

■ 要旨

木炭に代わって石炭を乾留したコークスが高炉における還元剤として英国で誕生して約 300 年が経過するが、その間高炉は目覚ましい発展を遂げた。しかし、その発展を支えたのはスムーズな炉内のガス流れを可能とするコークスの品質であるといっても過言ではない。

明治における富国強兵策の一環として行われた海外技術のフルセット導入に際して起こった釜石、八幡における創業時のトラブルの例を思い出すまでもなく、与えられた石炭からどのようにして望ましいコークスを生産するかは 18 世紀に始まったコークス高炉以来の宿命的な課題と云える。

第 1 章では高炉におけるコークスの役割を概観する

第 2 章では向流式反応器である高炉内で起こるさまざまな現象を解説し、それぞれについてコークスの性質が高炉の操業にどのように係るかを説明する。

第 3 章ではコークス炉の構造を解説し、どのように誕生し、改良発展してきたかを述べる。

第 4 章では江戸時代末期に、石炭乾留炉が反射炉建設に絡んで我が国へ伝来した歴史を述べる。

第 5 章では明治維新以降の富国強兵政策の元で行われた官営製鉄所におけるフルセット技術導入の失敗と、帰国留学生による改良と成功にいたる経緯を述べる。

第 6 章ではいくつかの海外コークス炉の導入経験を経たうえでの国内独自路線の始まりと発展を述べる。

第 7 章は第 2 次大戦後、米国炭や豪州炭など海外原料炭の輸入により従来の国内炭をベースとした場合のコークス品位上の制約から解放され、高度経済成長に対応するコークス炉の大型化に専念できた経緯を述べる。

第 8 章はコークス製造における石炭の配合や事前処理など、いわばコークス製造のためのソフト技術について述べる。

第 9 章は付帯設備であるが、地球規模の省エネルギーに貢献しているコークス乾式消火装置 (CDQ) について述べる。

第 10 章はこれまでのコークス製造技術の総仕上げのような形で産学官共同で開発され実機化を果たした「次世代コークス炉」(SCOPE21) について述べる。

第 11 章は将来のため国家プロジェクトとして開発された「成型コークス」「フェロコークス」など現行のプロセスとは異なるシャフト炉によるコークス製造技術について述べる。

第 12 章は国内ではそれぞれの理由で実機が存在しない「熱回収コークス炉」「スタンプ装入炉」などにつき、海外で注目され始めていることから取り上げた。

第 13 章では現行の室炉式コークス炉を構成する耐火煉瓦についてその使用状況の歴史的経緯を述べるとともにその損傷対策について述べる

第 14 章では製鉄所全体のエネルギーバランスに関係する COG、さらには販売により鉄鋼・製品コスト低減に影響を及ぼすコークス副製品回収設備について 100 年の歴史を有する八幡製鉄所の事例を中心に述べる。

第 15 章では日本へのコークス製造技術の到来から現在までの炉の構造の変化や事前処理などを含めた配合技術の推移を、社会ニーズの変化、原料の変化などそれぞれの時代背景と、開発を担った技術者の切り口で分析、系統化した。

■ Abstract

Three hundred years have passed since coke, carbonized coal, came to be used as a reducing agent in blast furnaces in the U.K. to replace charcoal. Blast furnaces have evolved remarkably since then. It would not be an exaggeration to state that this evolution was made possible by the quality of coke which allows for the smooth flow of gases inside the furnace.

Many troubles arose during establishment at Kamaishi and Yawata in full turnkey adoption of foreign technology as a part of the Meiji Era policy to increase national prosperity and military power. But there is no need to recount this to understand that figuring out how to produce the desirable coke for blast furnace operation from the available coal has been the fateful issue since coke blast furnaces appeared in the 18th century.

- Chapter 1 outlines the role played by coke in a blast furnace.
- Chapter 2 explains the various phenomena which happen inside the blast furnace—a countercurrent reactor—as well as how the properties of coke under each phenomenon affect the operation of the blast furnace.
- Chapter 3 explains the structure of a coke oven and describes how it came to be and was improved and developed.
- Chapter 4 describes the history of how coal carbonizing furnaces were introduced to Japan in connection with the building of reverberatory furnaces toward the end of the Edo period.
- Chapter 5 describes the sequence of events from the failure in full turnkey adoption of foreign technology at government—operated steelworks—as a part of the Meiji policy to increase national prosperity and military power during and after the Meiji Restoration—to improvements and success by engineers returning from study abroad.
- Chapter 6 describes the beginning and development of independent domestic methods, following the experiences of adopting several foreign coke ovens.
- Chapter 7 describes the liberation from the quality constraints of coke produced from domestic coal—as foreign coal began to be imported from countries such as the U.S. and Australia following the end of World War II—and the resulting ability to focus on the enlarging of coke furnaces in response to the rapid economic growth.
- Chapter 8 describes the so-called soft technology for coke production, such as the fundamental aspect of the blending and pretreatment of coal.
- Chapter 9 describes the Coke Dry Quenching (CDQ) system, which, though an auxiliary facility, originated in Japan and has been adopted around the world, contributing to global energy savings.
- Chapter 10 describes a next-generation coke furnace (SCOPE21) developed and produced through collaboration among industry, academia, and government—a culmination of all the coke production technology developed during 20th century.
- Chapter 11 describes shaft-furnace-based coke production technologies such as “formed coke” and “ferrocake”, which are unlike the current processes and were developed as government-sponsored projects for the future.
- Chapter 12 presents “heat recovery coke ovens” and “stamp charging ovens”, because they are starting to garner attention overseas, though neither type has been installed in Japan, each due to its various reasons.
- Chapter 13 describes the refractory brick used in current chamber-type coke furnaces—the historical sequence of its use and measures against its damage.
- Chapter 14 describes Coke Oven Gas (COG) which underlies the energy balance of the entire steelworks facility, and facilities for recovering coke by-products—the sale of which would reduce the cost of iron and steel products—centered on the case of Yawata Steel Works and its hundred-year history.
- Chapter 15 analyzes and systematizes the transition of oven structure and developments in coal blending technology including preparation of coal, from the introduction of coke production technology to Japan up to the present, as viewed in the context of the times—such as the changes in the needs for steel production and in the raw materials availability—and from the stories of individual engineers who were involved in the development.

■ Profile

中村 正和 Masakazu Nakamura

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和36年 3月	東京大学工学部応用化学科卒業	
36年 4月	八幡製鐵(株)入社 東京研究所勤務(現新日鐵住金株式会社)	
61年 1月	新日本製鐵(株) 第一技術研究所 特別基礎第二研究センター所長	
63年 5月	新日本製鐵(株) 人事部所属 (株)日鉄技術情報センター 出向	
平成 2年 7月	(株)日鉄技術情報センター 取締役 調査研究部長	
9年 7月	々	専務取締役
19年 3月	々	退任
19年 4月	々	客員研究員
24年10月	(社名変更)日鉄住金総研株式会社	
27年 4月	国立科学博物館 産業技術史資料情報センター主任調査員	

■ Contents

1. はじめに (高炉用コークスとその役割)	3
2. 製鉄用コークス	4
3. 日本におけるコークス炉設置・開発史	10
4. 明治以前の日本における石炭乾留技術	14
5. 海外技術導入の経緯	19
6. 我が国コークス工業の発達	25
7. 第2次大戦中以降のコークス炉	32
8. コークス製造における石炭の配合や 事前処理などの技術	36
9. コークス乾式消火装置	43
10. SCOPE21 (次世代コークス炉開発)	
11. 国家プロジェクトによる	49
コークス製造技術の開発	55
12. 国外におけるコークス技術の動向	63
13. コークス炉耐火物	65
14. 化成品処理の歴史	71
15. あとがき	80

1 | はじめに（高炉用コークスとその役割）

木炭に代わって石炭を乾留したコークスが高炉における還元剤として英国で誕生して約 300 年が経過するが、その間高炉は目覚ましい発展を遂げた。その発展を支えたのはコークスであるといっても過言ではない。

高炉技術の系統化がすでに行われ発行されているが¹⁾、特に近年高炉は大型化し内容積が 5,000m³を超えており、この状況の中で熱交換と還元反応をどのように効率よく行わせるかが高炉の性能を決定することから、与えられた石炭からどのようにして望ましいコークスを生産するかの技術を系統化することは極めて意義がある。

高炉では特に、炉の高温部で固体を液体にすることにより原料に由来する不純物をスラグとして金属鉄と分離することが可能となることが重要であり固気液の三相反応器の特徴となっている。

このように高炉は充填層で、しかも向流式反応器である構造から、極めて高い生産性と熱効率が得られ、いわば究極の反応器と云えることから、鉄の生産は我が国では約 75%、世界的にも 70%が高炉法によっている。

この反応器はガスと固体の間の熱と分子の交換によって成立することから、充填層の中をガスがスムーズに通過することが前提となっている。この通気性を確保しているのがコークスである。黒船来航で始まった我が国製鉄の近代化の最初から還元剤のコークスの性状が高炉操業成績を左右する。

鉄は最初鉄鉱石という酸化物で炉内に入り、炉内を降下するに従って酸素を失い、その過程で造滓剤として同時に装入されている石灰石などと反応し、軟化溶解という相変化が発生するため相互に融着し、ガスの通過に障害となる。

これに対してコークスは炭素であり基本的には酸素ないしは CO₂ と反応してガス化しない限り高温でも形状を維持することから、高炉内の通気・通液性はコークスの充填状況に依存している。安定した高炉操業の維持に良質なコークス性状が必須であることは、後述する釜石、八幡における創業時のトラブルの例を思い出すまでもなく、18 世紀に英国で始まったコークス高炉以来の宿命的な課題と云える。

技術の受け渡しは人を通じて行われ技術そのものが独り歩きするわけではない。ここでは「技術の系統化」の趣旨に沿って、なるべく技術伝承のエピソードを交え、特にコークスのユーザーである高炉の炉況とコークス性状の関係を絡めながら技術の展開を述べることとする。

なお、コークス設備の歴史としては北九州産業技術保存継承センター（KIGS）による官営八幡製鉄所における創業期のピーハイブ式から黒田式、日鉄式に至るコークス炉開発の優れた成書があり²⁾、そのほかにも鉄鋼協会出版³⁾のもの、西岡の解説書⁴⁾などがあるので、設備の歴史ないしは解説の詳細についてはこちらを参照されたい。

参 考

- 1) 彼島秀雄, 高炉技術の系統化, 平成 21 年度技術の系統化調査報告, 国立科学博物館, 2010.
- 2) 酒井英孝, 清水 泰ほか, 八幡製鉄所の設備・技術の変遷, 第 2 分冊 コークス製造設備: 北九州産業技術保存継承センター, 2008.
- 3) 日本鉄鋼協会, 原燃料から見たわが国製鉄技術の歴史, 1984.
- 4) 西岡邦彦, 太陽の化石: 石炭, アグネ, 1990.

2 | 製鉄用コークス

2.1 高炉用コークスとその役割（向流三相反応器の説明）

高炉は図 2.1 に示すような溶けた鉄を製造するための徳利型の形状をした巨大な反応器で炉内に気相、液相、固相の 3 相が共存し、それらが相互に影響を及ぼし合う複雑さをもったプロセスである。図に示すように炉口部、炉胸（シャフト）部、炉腹（ペロー）部、朝顔（ポッシュ）部、炉床部の 5 つの部分から構成され、炉胸部と朝顔部の 2 つは円錐台形、炉口部と炉腹部、炉床部の 3 つは円柱形の形状である。

鉄鉱石とコークスは下降し、レースウェイで発生した高温の還元性ガスは下降する固体の間をすり抜けて上昇する向流移動層型反応器であり、熱の供給を兼ねる還元ガスの通気、固体の荷下がりの 2 つが円滑に行われることが操業において必須の要素である。

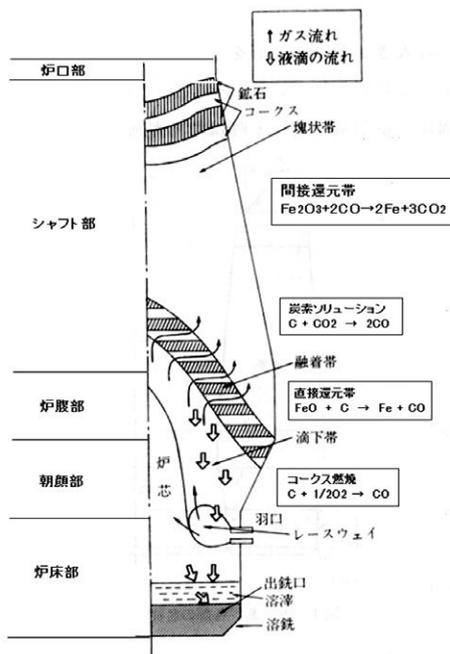


図 2.1 高炉の概念図¹⁾

特に、炉下部の高温部で固体を液体にすることにより原料に由来する不純物をスラグとして金属鉄と分離することが可能となることが重要であり三相反応器の特徴となっている。ここでも炉底に溜まった溶鉄の出鉄口への流動を支配しているのは炉芯と呼ばれるコークスの充填層であり、その流路によっては炉底浸食の原因となり、コークスの充填状況が高炉の寿命に決定的な影響を及ぼす。

2.2 還元材としてのコークス

2.2.1 レースウェイにおける高温還元ガスの発生

炉下部への送風は数十本の銅製の羽口を通して行われるが、それに先立って空気は熱風炉内で 1200℃ 最高 1350℃ まで加熱される。

高炉内に送り込まれる高温の空気は羽口先端の出口で 200~250m/s の高速であるため、羽口前面にレースウェイと呼ばれる直径 1.5m 前後の空洞が生じ、この中をコークス粒子群が激しく旋回運動している。

レースウェイ内の反応モデルを図 2.2 に示す。

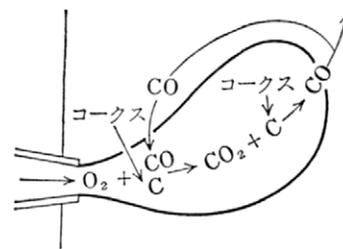
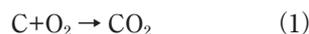


図 2.2 レースウェイの反応モデル²⁾

図 2.2 に示したモデルにより行ったレースウェイ内のガス組成分布のシミュレーション結果を図 2.3 に示す。



すなわち、上記反応式 (1) に示すように熱風中の酸素により炉内の CO ガス及びコークス中の炭素が燃焼して、先ず二酸化炭素 CO₂ が発生し、次いで反応式 (2) により CO₂ はその先に存在する充填コークスと反応して一酸化炭素 CO と空気中に含まれていた窒素 N₂ とからなる 2 千数百℃ のガスが発生し、この高温ガスが高炉内を上昇して上部から下降してくる鉄鉱石と熱交換して加熱しながら還元すると共に、生成した金属鉄を溶かして脈石と分離する。

2.2.2 鉄鉱石の還元反応

高炉の上部から投入された鉄鉱石が徐々に下に降りていく過程で、下部から上昇してくる CO によって還元反応 1 → 還元反応 2 → 還元反応 3 または還元反応 4 というように順に進行し金属鉄が生成される。(間接還元)

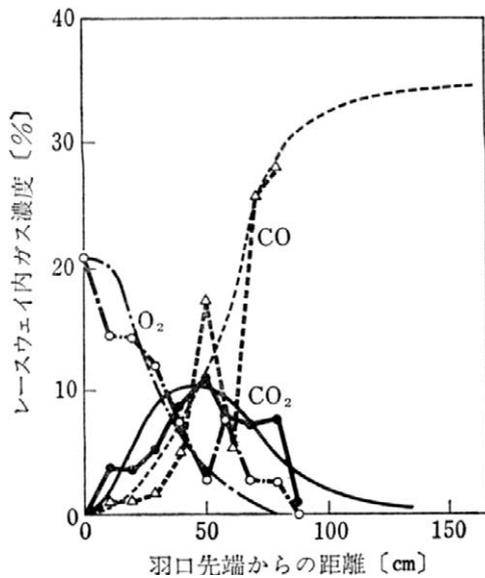
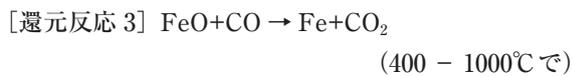
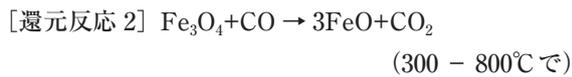
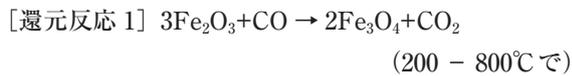
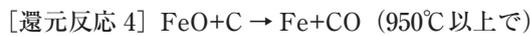


図 2.3 レースウェイのガス組成分布
折れ線：測定値、曲線：計算値



950°C以上の高温ではC(固体炭素)それ自体によって還元される(直接還元)



2.2.3 軟化融着帯と溶鉄の溶け落ち

高炉内における装入物の降下状況は、炉壁の侵蝕状態や、付着物の状態によって細かい点では異なる。しかしどの高炉にも共通していえることは、鉱石が溶け落ちるまでは鉱石層とコークス層が明確に保たれていることである。

融着層は還元の進んだ鉱石粒子同士の軽い焼結に始まり、金属となって溶け落ちに終わる鉱石層をさしている。

操業状態のまま急冷して解体調査をした際に採取した融着帯の概念図を図 2.4 に示した³⁾。

図 2.4 の a) は鉱石層が厚い高炉の上方レベルの G-5 融着層の構造模式図で、A は半溶融部、B は融着部、C と D はともに塊状であるが C は比較的低温で融着することなく還元が進み金属化した粒子から構成され、D の鉱石のままの塊状部とは異なる。高炉下方レベルの代表にあげたのが図 2.4 の b) で融着部に比して半溶融部が長くなり、また C に相当する塊状部のないことが特徴である。

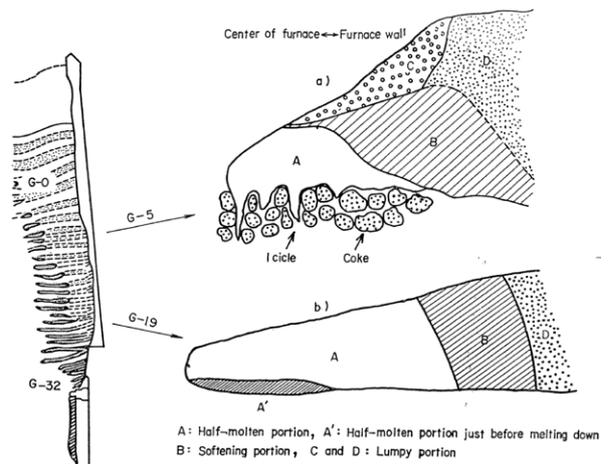


Fig. 1. Structure of softening-melting layers (Hirohata No. 1 BF)

図 2.4 融着帯概念図

なお、融着帯下方からコークス層に垂れ下がったつらら状の半溶融物を“つらら”と称した。

融着部のマクロな組織が図 2.5 a) で、粒子の種類は独立に識別できる状態にある。焼結鉱が関与する融着はすべてスラグ結合で、ペレットの場合はスラグあるいは金属結合である。

半溶融部は図 2.5 の b) に見られるようになりに密化しており、ほとんど金属鉄から成っていてスラグは少ない。また装入物中の石灰石とかんらん岩は未滓化の状態にある。

先述のつららは上方レベルの融着層にあるものほど長く、G-1 では数 10cm にもおよんだがシャフト下段では精々 1~2cm で、つららというよりは滴下直前の液滴が多数集まったような状態であった。図 2.4 b) ではとれを A' で表わしている。

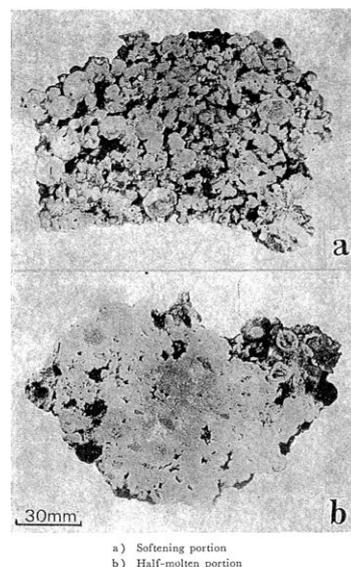


Photo. 1. Macrostructure of the softening-melting layer sample (G-5, Hirohata No. 1 BF)

図 2.5 融着帯断面図(広畑 No.1BF)

田口らは千葉1高炉解体調査において採取された試料について気孔率と通気抵抗の関係を求めている。⁴⁾

鉄鉱石は一般に特に低温では降下中における還元による酸素除去の結果気孔率が上昇するが、温度の上昇と上からの荷重を受けて収縮する結果として見掛け密度が上昇し、図2.6に示すように層としての通気抵抗が上昇する。気孔率は軟化初期の38%から融着が進むにつれ10%まで減少し、通気抵抗は3桁近く大きくなるのがわかる。

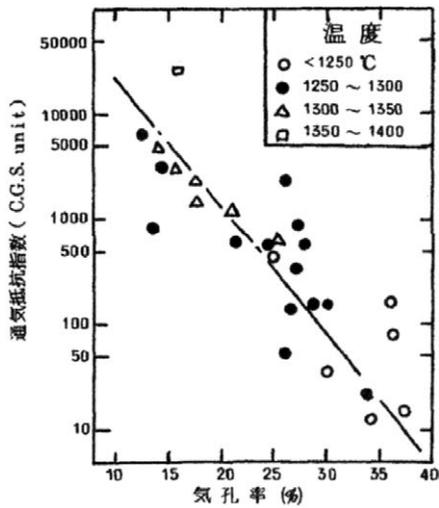


図2.6 融着帯の通気抵抗

図2.7は融着帯の通気抵抗指数 (K_f) を Case - A) 500 及び Case - B) 15,000 と変えた場合の炉内のガス流れ変化をシミュレーションした結果である。融着帯の形成によりガスがその部分を避けてコークス層を流れることがわかる。高炉はその内部にガスの流れを人為的に操作するための構造物を何も持たない反応器である。一度どこかにガスの流れやすい個所ができると、高炉全体に万遍なくガスを流して鉄鉱石を還元することができなくなる。シミュレーション結果から融着帯の存在により半径方向のガスの流れの再配分が起こっていることがわかる。この結果、鉄鉱石とコークスの炉頂における装入分布の制御による融着帯の造り込みにより炉内ガスの通過経路を高炉全体として最適化することが可能となる。

2.2.4 炭素ソリューション

レースウェイで生じたCOガスは鉄鉱石を還元する過程でCO₂となり、これは還元力を持たないが、このCO₂はある温度以上で炉内の炭素（ここではコークス）と以下に示すブドアル反応（BOUDOUARD）と呼ばれる反応により再びCOとなる。

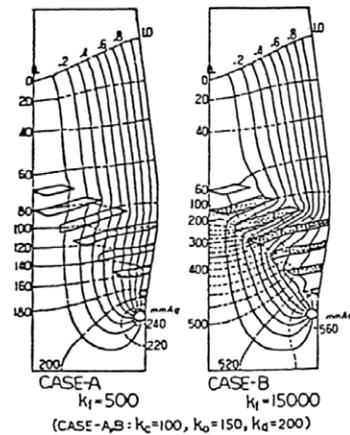
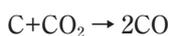


図2.7 ガス流れに及ぼす融着帯の影響⁵⁾

全圧が1気圧の場合、この反応の平衡関係は図2.8が示す通りである。一定温度でこの平衡値以上のCO₂濃度のガスが供給されれば反応は右側にシフトし炭素と反応しCOガスとなる。

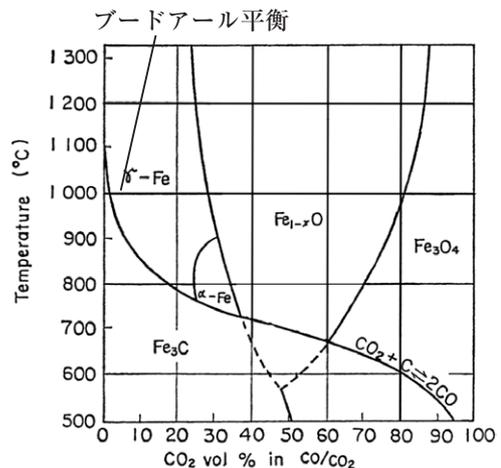


図2.8 Fe-C-O系反応状態図

図2.8から高温域ではCO₂は平衡論的にはCO側に偏っており鉄鉱石の還元に寄与することになるが、コークスはその一部がガス化して失われることから機械的には弱くなり粉化など通気性の障害となるマイナス要因にもなる。これが炭素ソリューションである。

コークスの性状を示す指標に反応後強度（CSR）という試験法があるが、これは試験機の中で一定の条件で上記反応を起こさせ、その後回転試験機で破壊の状況を定量化する試験法であり、コークスの炉内での挙動を予め把握し、操業の指針を定める重要な指標である。

2.2.5 炉床部におけるスラグの役割

原料鉄石やコークスにはSiO₂やAl₂O₃などの不純物が存在する。これを取り除くために高炉中に石灰石

(実際には鉍石と共に予備的に焼成してCaOとなっている(焼結鉍))を装入し、それら不純物成分と混合加熱すると融点が下がるため流動性が増し、その上比重が銑鉄よりも小さく、溶融状態では銑鉄の上になるため鉄と分離して高炉スラグして回収される。石灰(CaO)とシリカ(SiO₂)を主成分とし、その他の成分として、アルミナ(Al₂O₃)、酸化マグネシウム(MgO)を含む。

さらにスラグ成分においてCaO(塩基)とSiO₂(酸)の比率を塩基性側とすることにより鉄製品の脆性に悪影響のある硫黄を銑鉄から除去することができる。

(S):スラグ中硫黄濃度

S:銑鉄中硫黄濃度

この溶鉄-スラグ間の硫黄の移動は硫黄と酸素の置換反応であり



溶鉄に移行した酸素(O)は溶鉄の中の炭素と反応しCOとなって離脱する。

ここにMeはCaやMgなどSと結合しやすい金属であり、溶鉄金属中にあったSがスラグ中に移行する。高炉が脱硫器と称されることがあるのはこのためである。

通常の操業ではスラグ塩基度~1.25では溶鉄中S~0.02%/スラグ中S~1%となる。

なお、このスラグは水と反応して固まり、時間とともに強度が向上する水硬性を有しているため、大きな支持力が期待でき砂利と同様に路盤材に使用されるほか、セメントクリンカーと混合して高炉セメントとして使用されている。

2.2.6 炉芯および炉底の湯流れとコークス^①

炉芯(deadman)とは高炉の中心下部に存在する円錐型のコークスの停滞領域で、炉頂から装入されたコークスは融着帯付近までは半径方向にほぼ一定の速度で降下するが、それより下部ではコークスの大部分が炉壁側を羽口先にあるコークス燃焼空間であるレースウェイに向かって加速しながら縮流降下して行く。

先に述べたようにコークスの消費は酸素か二酸化炭素との反応であり、ほとんどが熱風によるレースウェイでの燃焼であるが、図2.3に示したようにレースウェイから抜けコークスベッドに入ったところでCO₂はコークスと反応してCOになりその後はコークスの消費に関与しない。もう一つの消費のパスは酸化鉄の還元で発生したCO₂による炭素ソリューション、及

び、2.2.2 鉄鉍石の還元反応の項で述べた直接還元であるが、これらの反応は融着帯に到達する前後に終了しており、それ以下の金属鉄の滴下領域のコークスは溶鉄がC飽和になるまでの炭素が溶け込むのみの消費となり、結果として融着帯の下部に長期間炉内に滞留する円錐形のコークス層が生成することになる。これが図2.1における炉芯である。

この炉芯は高炉の底に存在し、溶鉄やスラグを一時的に貯留し出鉄口にスムーズに誘導する重要な役割を有しているが、レースウェイで消費されるコークスと異なり、上述の理由によりその充填された状況を入れ替えるアクションと結果にタイムラグが生じるために羽口より上部の操業とは別の注意が必要となる。問題の要点は2つあり、その一つは温度であり、二つ目は円錐層の位置と通液性である。

炉底炉壁に設置された温度計による温度は通常月あるいは場合によっては年の時定数で変化する。炉芯の状況はこの時定数で変化していると考えられ、炉底温度が高炉の熱的な余裕を示しているとともに炉底の浸食を初めとする高炉の長期的な特性を検出する重要な指標である。

一方、炉内ガスの滞留時間は10秒以下である。また、炉頂で挿入された鉍石が還元されて出鉄口に到達するのに6~10時間とされている。

このように時定数の異なる現象が高炉内で並行して進んでいるところが高炉が他の例えば石油化学の反応器と異なるところであり、このすべてに通気・通液性を支配しているコークスの性状が関係する。

荷下がりの不順に起因する棚釣り、吹き抜け、冷え込みなど場合によっては数か月に及ぶ操業トラブルもその原因には再現性が乏しく、予測が困難であるのは、この時定数の異なる現象が並行して走っているところに起因する。大抵は高生産、またはエネルギー削減などその時それぞれの操業目的のためぎりぎりの条件を探りながら操業するわけであるが、これまでは大丈夫であっても何かの組み合わせでトラブルになることがあり、列車の複合脱線に例えられる。

2.3 高炉操業に及ぼすコークス性状の影響

向流式反応器である高炉の生産効率が通気性に依存し、さらにこれが炉内コークスの充填状況に依存していることを2.1節で述べた。

戦争によって欧米との技術交流の場が遮断され、大戦直後は世界の技術水準、特に米国の技術水準において大きな格差が生じていた。米国との技術交流の端緒

となったのは昭和 22 年以降のストライク賠償調査団、鉄屑調査団の来日、米軍の天然資源局（NRS）の寄与するところ大であった。

戦後、鉄鋼業は基礎産業として厚い優遇措置を受けてきた。しかし対日援助の中止、日本政府の補助金の停止、輸入原料比率の削減などを柱とする「ドッジライン」の浸透によって鉄鋼業は苦境に陥るが、1950（昭和 25）年 6 月に朝鮮戦争が勃発し事態は一変する。鉄鋼業自立化活動の線に沿って米国技術者による本格的、組織的に各工場での技術指導が開始されたのである。

高炉部門では 1951（昭和 26）年 4 月からミネソタ大学工科大学の副学長で米国鉱山冶金学会鉄鋼部会長の要職にあるジョセフ（T.L. Joseph）が総司令部経済科学局技術顧問として来日して、わが国の製鉄技術の状況を調査し高炉操業、原料事前処理に関する以下のような指導勧告が行われた。

- ① 鉱石の事前処理の必要性、
- ② 装入物の被還元性と装入物分布の重要性、
- ③ 高温送風の重要性

一方、米国技術者による技術指導と合わせ、米国の現場技術水準を直接に触れて自ら確認することは極めて重要なことであり、総司令部の周到な準備と配慮によって短期間に多数の工場を視察し有益な調査を行っている。

これらの結果、製鉄工程における装入物関係では、粉鉱石は焼結工場で塊成化して使用するとか、コークス工場と高炉工場間のコークス輸送はコンベア方式としコークスの炉前篩別装置が新設された。

1 次篩別は 25mm のローラーグレート、2 次篩別は 10mm の振動篩を採用、10mm 上は中骸ホッパーで貯留、中塊コークスとして別装入された。

また、1950（昭和 25）年にデミング博士（William Edwards Deming）が来日し品質管理手法が導入されたが、1951（昭和 26）年には鉄鋼協会に鉄鋼品質管理部会が設立、製鉄部会では鉄鉄成分管理のための鉄鉱石の配合、粒度管理、原料受け入れ試験、コークス性状と高炉炉況との関係に重点が置かれ、原料、コークス品質の改善が進展した。燃焼管理技術の標準化、冶金管理課の設置による製品規格、標準作業設定による製造工程管理の強化、各種試験操業の実施が積極的に導入されている。

実高炉における典型的な操業パラメーターとコークス品位の関係を以下に示す⁷⁾。

図 2.9 はコークス粒度と炉内の圧力損失の関係を示している。粒度が大きくなると送風量に対する圧力損

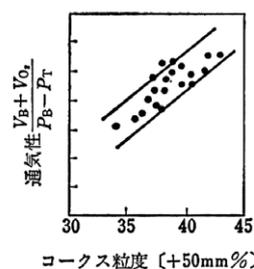


図 2.9 装入コークス粒度と通気性

失が小さくなること、同様に図 2.10 コークス強度の上昇により圧損は小さくなること、

さらに、その結果高炉の容積生産性が改善されることが図 2.11 の出鉄比の変化に示される。

通常はコークス粒度は 75~50mm が $40 \pm 5\%$ 、50~25mm が $45 \pm 5\%$ 、25mm 以下が $5 \pm 5\%$ 、ドラム強度 DI_{50}^{150} が 85 ± 3 程度で操業がなされるが、それぞれの製鉄所における製鉄所のエネルギーバランス、原料価格などを考慮に入れた生産計画の状況により変化する。

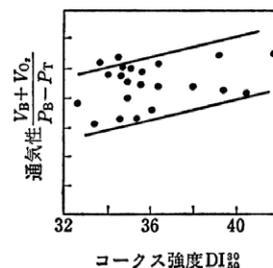


図 2.10 装入コークス強度と通気性 (V_B : 送風量 V_0 : 富化酸素量 P_B : 送風圧 P_T : 炉頂圧)

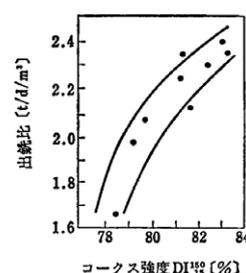


図 2.11 コークス強度と高炉容積生産性 (出鉄比: 出鉄量 (t/d) / 高炉容積 (m³))

2.4 コークスの性状試験法^{B)}

コークスの品質規格に関する取組みは第 1 次世界大戦後になる。黒田泰造、伊能泰治 は灰分などの化学的性質、粒度と形状、単位容積重量、真・嵩比重、気孔率、磨耗強度、落下強度、圧縮強度、反応性等をコークス規格の対象とし、規格制定に当たっては地域の条

件やコストを考慮して妥当な品質規格を定めることが重要であるとされた。

八幡製鉄所における規格は1924（大正13）年5月に初めて潰裂強度と気孔率の下限値を設けたコークス品質規格が以下のように設定された。

灰分 $18 \pm 0.5\%$ 、潰裂強度 $> 81\%$ 、気孔率 $> 41\%$ 、全硫黄 $< 1\%$ 。

さらに1931（昭和6）年には、粒度30mm以上、灰分 $18 \pm 0.5\%$ 潰裂強度 $> 85\%$ 、気孔率 $> 41\%$ 、固定炭素分80%以上と改訂している。

第二次大戦後は多種類の輸入炭の使用とともに導入された各国の試験法の使用経験によって、粘結現象やコークス化性評価（コークス強度を含む）に対する理解が深まった。一方、1950年代から導入されていた石炭の組織学的手法を用いる評価法に関しては、アモソフ（Ammosov）やシャピロ（Schapiro）らによるコークス強度推定への応用およびわが国の原料炭需要の拡大ニーズに呼応して、本法の実用化研究が活発になった。その結果、石炭の評価法として一部に問題点を残しながらも日本鉄鋼協会共同研究会コークス部会では、コークス用原料炭分類法の見直しを行い、組織学的パラメーターを導入した新分類法を1983（昭和58）年に制定した。

以上のような経緯ののち、1980～1984年にかけてISO-TC27石炭・コークス日本委員会用語分類分科会およびほぼ同一メンバーによる石炭利用技術用語辞典編集委員会（燃料協会；現日本エネルギー学会）では、石炭利用技術用語の統一、制定作業を行った。その際に、粘結性、コークス化性の概念定義および粘結性、コークス化性試験法の整理を行ったが、さらに石炭組織分析の項を追加し、粘結性、コークス化性評価パラメーターとして再整理した。これを表2.1に示す。

技術の発展とその結果を評価する試験法は表裏一体

表2.1 粘結性およびコークス化性評価パラメーター

分類	試験法	測定値	略号例	
物理的試験	膨張性	るつば膨張試験	るつば膨張指数	CSN
		K B S 試験	K B S 曲線	-
		グレイ キング試験	グレイ キングコークタイプ	A, B, ... G
	粘結性 (350~500°C) 間の性状	ロ ガ 試験	ロ ガ 指数	-
		カンブレドン法	カンブレドン指数	-
		粘結力試験	粘結力指数	CI
		流動性	最高流動度	MF
	軟化溶解性	ゴセラープラストメーター	収縮量(指数)	x
		ラジオニコプラストメーター	軟化溶解度(指数)	y
	コークス化性 (350~1000°C) 間の性状	小型乾留炉	L C T 試験	L C T 指数
かん焼試験			ドラム指数	DI_{10}^D, DI_{10}^H
工業炉		コークス強度試験	タンブラー指数	T_{10}, T_0
		マイカム指数	マイカム指数	M_{10}, M_0
工業炉		シャッター指数	シャッター指数	SI_{10}
顕微鏡試験		石炭組織分析	反射率測定試験	ビトリニット平均反射率
	組織成分分析		マセラル含有率	V_L, E, I
	石炭組織分析	組織成分分析	組織成分含有率	-
		活性成分分析	組織平衡指数	CBI
		強度指数	SI	

であり、これにより共通の認識の下での討議が可能となり日本の技術を世界のレベルに引き上げる原因の一つとなった。

回転強度試験方法（ドラム法）

試料を規定のドラム試験機に挿入し、規定の速度で規定の回転数だけ回転させた後、目開き100mm、75mm、50mm及び25mmふるいでふるい分け、各区分ごとにその質量を求め、試料に対する加算分率（%）をドラム強度指数（記号：DI）として表す

粒度 (mm)	ドラム強度指数	
	30 回転	150 回転
50 以上	DI_{30}^{50}	DI_{150}^{50}
25 以上	DI_{30}^{25}	DI_{150}^{25}
15 以上	DI_{30}^{15}	DI_{150}^{15}

参 考

- 1) 彼島秀雄, 高炉技術の系統化, 平成21年度技術の系統化調査報告, 国立科学博物館, 2010より(一部著者改変).
- 2) 鉄鋼便覧 第3版 第2巻 図5.37 図5.38, 1980.
- 3) 佐々木稔ら, 鉄と鋼, 62, 5, p.559, 1976.
- 4) 田口整司ら, 鉄と鋼, 64, 11, S548, 1978.
- 5) 入田俊幸ら, 鉄と鋼, 66, 11 S706, 1980.
- 6) 篠竹昭彦, 日本燃焼学会誌, 56, 177号, p.225-233, 2014.
- 7) 村上惟司, 鉄と鋼, 61, 2, A1, 1975.
- 8) 美浦義明, 鉄と鋼, 75, 7, p.1096, 1989.

3 | 日本におけるコークス炉設置・開発史

3.1 コークス炉の概要¹⁾

現在稼働中の多くの室炉式コークス炉は、図 3.1 に示すように炉体の下部に蓄熱室があり、その上部に燃焼室と炭化室とが交互に配列されている。燃料ガスおよび空気は蓄熱室で予熱され、燃焼後隣接する蓄熱室で熱回収されたのち、煙道を経て排出される。

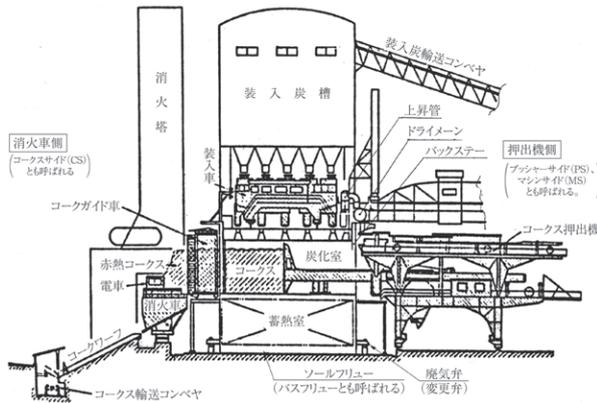


図 3.1 コークス炉の全体像

原料である石炭は通常は図 3.2 の炉の上部にある装入口から重力を利用して装入されるが（トップチャージ）、予め炭化室のサイズに成型された石炭を炉の側面から装入する方法（スタンプチャージ²⁾）もある。

乾留に必要な熱量は燃焼室より炉壁煉瓦を通して石炭層の両側から供給され加熱される。

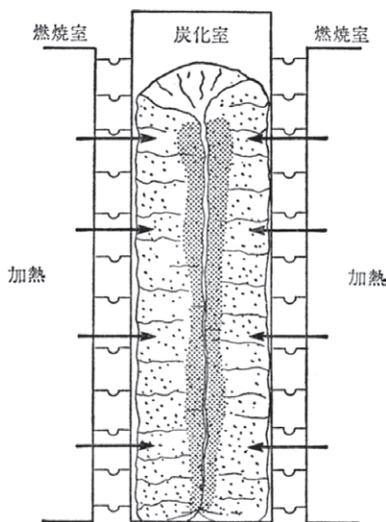


図 3.2 コークス炉炭化室のイメージ³⁾

このような条件下では、炉壁面に近い部分の石炭は急速に乾留されてコークスとなり、その中心寄りには半熔融状態のプラスチック層（軟化熔融層）が存在し、その内部には粉炭のままの石炭があるという状況が順次内部に向かって進行する。すなわち図 3.3 は炭化室における装入炭の温度変化を示しているが、燃焼室に隣接する炉壁に近い 6 の部分から温度の上昇が起り、中央部の 1 に向かって伝熱し、遅れて温度が上昇していることがわかる。

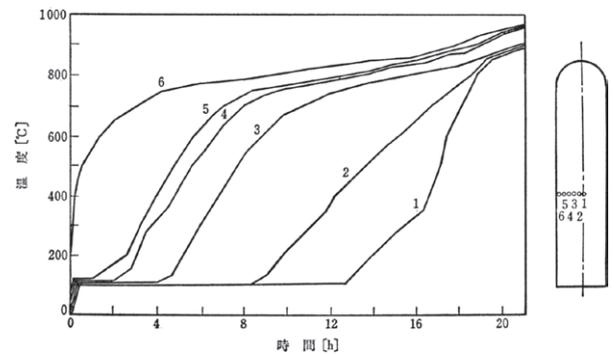


図 3.3 炭化室内位置における温度変化

発生ガスやタールは主としてコークス層と、コークスが収縮する結果、炉壁とコークス層の間に発生するすき間を通して熱分解を受けながら炉頂空間に達し炉外へ導かれる。

乾留終了後では、壁面に接したコークス層より発生したき裂が炉心部へ向けて延び、また収縮によるこの隙間が側面よりの押出し機による製品コークスの回収を可能にする。

コークス炉の使命は高炉で使用する良質なコークスを低コストで製造するところにある。上述のように非定常伝熱の間接加熱であることから、コークス化の過程は燃焼室の炉温、炉幅、装入炭水分、装入密度（図 3.4）などにより大きな影響を受けることになる³⁾。

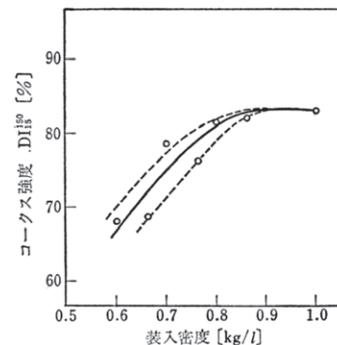


図 3.4 石炭の装入密度とコークス強度（試験炉）

与えられた原料炭および生産計画において操業の方針を決定する際の留意事項は大よそ図 3.5 に示した要素に集約される。

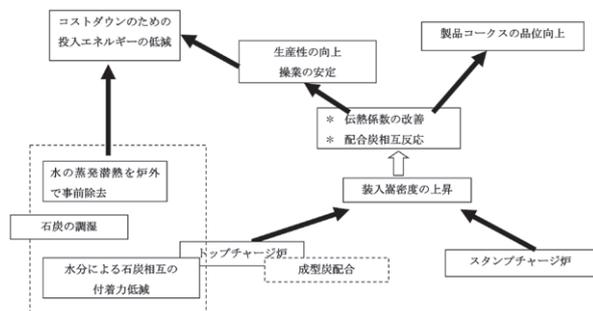


図 3.5 コークス製造における要因

その実現のための具体的な方策は第 8 章にて詳述するが、大別して一つは設備の改善によるハードの側面であり他の一つは原料における複数銘柄の配合や、燃焼室の温度管理に代表されるソフトの側面である。

3.2 コークス炉の歴史

コークスの源流は木炭である。その木炭は木材と違い火力が強くて煙や炎が出ない、もしくは少ないことから洞窟などでの住環境における優位性が認識されていたと思われる。

図 3.6 のように丸太を円錐状に積み上げ表面を土で覆って空気を遮断し、底部に着火しゆっくりと燃焼させる⁴⁾。



図 3.6 初期の木炭製造イメージ

石炭コークスの技術がいつ確立したかは必ずしも明確ではない。燃料としての使用は 4 世紀および 9 世紀の中国において、また製鉄における利用でも 11 世紀初頭の中国という記述がネット上に存在するが文献的な実態は明確でない⁵⁾。歴史的にはイギリスにおけるウイスキーなどのアルコール類の蒸留のケース⁶⁾の

ように、木材の切断が必要でコストが高い木炭の代替として石炭を使うことによるコストダウン、さらに石炭に含まれる硫黄に由来する不都合を回避するための事前処理としての熱処理の結果としてコークスの利用のような状況が起こったと推測される。

1590 年に臭いを消すため石炭の事前の調理 (cooking) することが特許となり、1620 年に鉄石の溶解、金属製造に適用が許可されたとしている⁴⁾。

1600 年当時ビールの醸造に際してモルツ (Malts) を焙煎する燃料として木炭が使用されていたが原料木材の欠乏などから石炭の使用が試みられたが、含まれる硫黄による悪臭がビールに移行することを回避するため木炭製造との類推から 1603 年ハフプラット Hugh Plat により石炭の炭化が提案された。しかし結局 1642 年ダービシャー (Derbyshire) 地方においてコークスがモルツの焙煎に採用されるまでは実現しなかった。しかし一旦導入されると普及が進み 17 世紀末にはコークスを用いて生産されたビールの色調から特に「ペールエール」 (pale ale) と呼ばれるまでに認知が進んでいる。

イギリスのダービー (Abraham Darby I) は 1709 年、石炭を蒸し焼きにして不純物をのぞいたコークスを燃料にして、高炉で製鉄を始めたが、その背景にイギリスにおける醸造業がある。彼は 1690 年代にモルツを粉砕する粉砕機製造工場に見習いとして参加し、ここで青銅などの合金に関する金属学を習得すると同時にモルツ焙煎炉における石炭中の硫黄分が製品ビールに及ぼす影響を体験し、供給不足になっていた木炭使用削減の課題を認識したと思われる⁷⁾。

なお、ダービー I 世の血統に (great-grandnephew) にダッドレイ Dudd (Dud) Dudley (1600-1684) がおり、イギリスの市民戦争では王政側について技術将校として参戦し、鉄石をコークスで溶解することを提案した最初の一人に挙げられていて、1622 年 2 月 22 日付でこの方法による 3 トン/週の鉄生産を父親に報告し速やかな特許申請を提案している。ただしその当時の主流であった木炭派の中傷と抵抗に会いその後発展することはなかった⁸⁾。

森林の伐採による木材原料の不足から炭田の開発が進み、木炭との連想から当初は石炭を野積みにして灰などで表面を覆い空気を遮断した上で火をつけ、不完全燃焼させて石炭の揮発分を除いたのち、水をかけて消火するという野焼法によってコークスが製造されていた。

その後約半世紀経過した 1768 年 John Wilkinson は図 3.7 に示した積み上げた木材の中心部に粗く煉瓦

を積み、周辺で燃焼し発生したガスがここへ集まる仕掛けを作り、この方式を転用することにより良塊コークスの歩留まりを改善し、さらに堆積石炭に対する空気遮断層や消火法の工夫によりももとは1/3程度であったコークス歩留まりが19世紀の中ごろには2/3の改善を達成している⁹⁾。

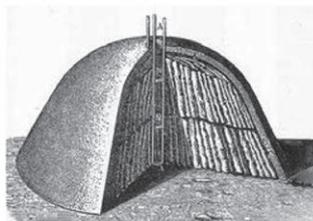


図 3.7 中心のガス抜きを持つ野焼きコークスの原型

人類が土器を焼き始めた最初はほとんど囲いのない状態で素地と薪などを混載したものに着火して焼成している。それが壁に囲われ、燃焼室と焼成室が機能分化され現在の陶磁器類の焼成へと進化したとされる。縄文土器、それに続く弥生土器や土師器は野焼きであったが古墳時代時代に伝わった穴窯によって1000℃以上の焼成温度で須恵器が焼かれたとある¹⁰⁾。

コークス炉の変遷を見ると、原始的な野焼から、ビーハイブ炉 (Beehive) を経て室炉式コークス炉が出現している。ビーハイブ炉 (図 3.8) は石炭の揮発分を炉内で燃焼させその熱で石炭自体を乾留する一種の反射炉で木炭炉いわゆる炭焼き釜と原理は同じである。

陶磁器では既に穴窯による1000℃レベルの焼成が行われており、共通の原理による木炭炉も存在していたにも拘わらずビーハイブ炉の出現が19世紀に到ったかは不明であるが1802年にSheffieldの近郊にビーハイブ炉が設置されると、たちまち普及し1870年にはWest Durham 炭田地域における設置数が14,000基で420万トンのコークスを生産している。

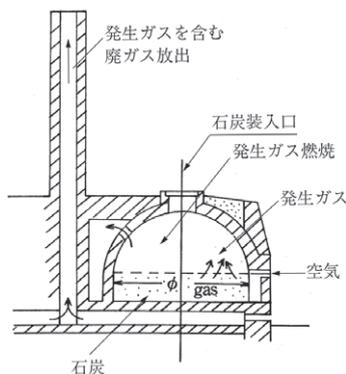


図 3.8 ビーハイブ式コークス炉

一方、米国においても例えば1870年から1905年までの間のビーハイブ炉設置数は200基から31,000基に急増している。

ちなみに、1881年の官営釜石製鉄所、1901年の官営八幡製鉄所の操業開始に際し、当時世界的な標準とされたビーハイブ炉でスタートしている。

しかし第2章で述べたようにコークス性状が高炉操業に決定的な影響を示すことが明らかになると、良質なコークスを得るためには加熱によるコークス化の過程で、石炭粒子の相互の接着のためには粒子の膨張を壁によって拘束することが必要との認識が生まれ、結果としてビーハイブ炉は室炉式に取って代わられることになる¹¹⁾。

3.3 炭化室と燃焼室の分離

1850年代に両扉を備えた長方形断面の炭化室を持ち、炭化室に空気を入れず発生ガスを焔道に送り、そこで空気を導入し発生ガスを燃焼する独立した燃焼室を設け、耐火物で構成される壁を介して炭化室を加熱する、現在見られるようなコークス炉の原型が出現した。なかでも1852年のスメ (Smet) 炉は水平焔道、1882年のフランソア・レックスロス (Francois-Rexroth) 炉は直立焔道の元祖とされている。

一方、1880年代以前においては、コークス炉の燃焼は乾留で発生するガスだけでなく、固体燃料も燃やせるように焔道の下に火格子を備えるのが普通であった。しかしシモン (Simon) は、1883年に加熱方法を改良し、初めて空気予熱用の蓄熱式炉を開発、さらに1903年、燃料ガスと空気を炉の外から水平焔道に直接吹き込んで、交互に燃焼させるという画期的加熱方式を開発した。なお、蓄熱室のアイデアそのものはシーメンス (Siemens) 兄弟による平炉にあり、特許権を買って実用化に取り組んでいたマルチン (Martin)、さらに高炉用熱風炉の開発に取り組んでいたカウパー (Cowper) などとの協力関係の中で1860年前後に実機化されている¹⁰⁾。

こうした背景にあって、L Semet はソーダ製造に必要なアンモニアを副産物から得ることを目的に、1882年、ソルベー (Semet-Solvay) 炉 (図 3.9) を築き、試験操業を実施して好成績を挙げ、この炉はまたたく間に世界各地で採用され、一世を風靡した。その後、副産物回収は、経済的にもコークス製造法選択上の重要項目として現在に至っている。

水平焔道方式は炭化室に沿って加熱室が配置されることから発想が容易だったせいかスメ炉やシモン炉な

ど初期のコークス炉開発段階では殆どがこの方式のバリエーションの形で行われた。

しかし、炭化室と燃焼室が分離独立し、炭化室における発生ガスと燃焼室での燃料ガスがそれぞれ独自の取り扱いが可能となり、石炭自身の部分燃焼による自己加熱の制約から解放されるとコークスの収率が改善され生産性が向上した結果、コークス炉炭化室の容積を増やしたいというニーズが出てくるのは自然であった。さらに製品の品質を確保するためには炭化室の均一加熱が必要であることから、炉の高さ方向、長さ方向についてきめ細かい燃焼制御が可能なコペー(Coppee)炉(図3.10)やコッパース(Koppers)炉など垂直焰道方式に移行し、ソルバー炉のような水平焰道方式は次第に姿を消していった。

垂直焰道方式は我が国では1894年釜石の田中製鉄所で野呂景義設計のコペー式コークス炉によるコークス高炉の成功が実機化の最初の事例であるが、野呂は1890年頃、事前に古河鋳業深川散炭所において“コペー式炉”を用いた石炭のコークス化研究を行っており、その知見を釜石で実現したものと思われる。深川におけるコークス炉の建設については第4章4.2節において後述する。

海外では1905年のオットー(Otto-Hilgenstock)炉、1906年のコッパース炉、そして1916年の黒田式ヘアピン炉の開発へと続き、発生ガスの余剰は50%を越えるに至り、コークス炉の熱効率は大幅に改善された。

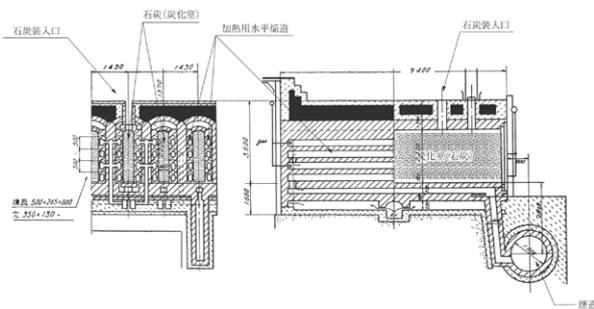


図 3.9 ソルバー炉 (水平焰道) ¹⁾

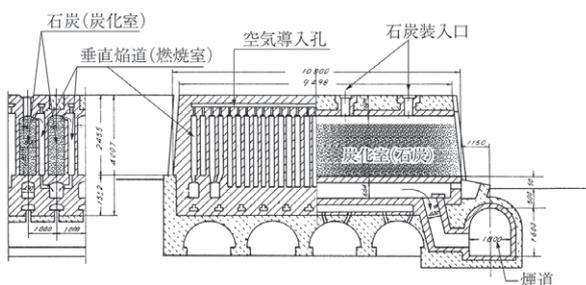


図 3.10 コペー炉 (垂直焰道) ¹⁾

参 考

- 1) 酒井英孝, 清水 泰ほか, 八幡製鉄所の設備・技術の変遷 (第2分冊), コークス製造技術, 北九州産業技術保存継承センター, 2008.
- 2) インドのTATA製鉄所においては1980年代より各種の方式を検討の結果、スタンプチャージ炉採用を決定しこの形式に移行している傾向がある。
- 3) 鉄鋼便覧(Ⅱ)第3版, 図4.20, 図4.22, 図4.17, 1980.
- 4) <http://en.wikipedia.org/wiki/Charcoal> (2016.2.8).
- 5) [http://en.wikipedia.org/wiki/Coke_\(fuel\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Coke_(fuel)) (2016.2.8).
- 6) http://en.wikipedia.org/wiki/Pale_ale [http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%BC%E3%83%AB_\(%E3%83%93%E3%83%BC%E3%83%AB\)](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%BC%E3%83%AB_(%E3%83%93%E3%83%BC%E3%83%AB)) (2016.2.8).
- 7) Trinder, Barrie [1974]. The Darbys of Coalbrookdale. Phillimore & Co. / Ironbridge Gorge Museum Trust. p. 9, 1991.
- 8) http://en.wikipedia.org/wiki/Dud_Dudley/ (2016.2.8).
- 9) Beaver, S.H. "Coke Manufacture in Great Britain: A Study in Industrial Geography". (17): 133-148, 1951.
- 10) 杉田 清, 炉の歴史物語, 成山堂書店, 2007.
- 11) 有馬 孝, 愛澤禎典, 野村誠治, 鉄と鋼, 100, 2, p.110, 2014.

4 | 明治以前の日本における石炭乾留技術（文献情報による試行錯誤の時代）

4.1 ガス灯

産業的な石炭乾留の歴史は世界的にはダービー父子の製鉄用に始まるといえる。我が国では釜石のコークス高炉の成功が、それに先立つ古河鋳業（後に東京ガス）における野呂景義のコペー炉を用いた研究から始まっていることから、むしろガス灯のガスとしての利用が先行している。

照明としてのガス灯器具を最初に製作したのは、スコットランド人のウィリアム・マードックであり、1797年にイギリスのマンチェスターにおいてガス灯を設置している。日本においては18世紀頃には、既に越後地方において「陰火」（いんか）として天然ガスの存在が知られており、ガスを灯火として用いた最古の記録としては、安政の大地震以前に盛岡藩の医師であった島立甫が、亀戸の自宅においてコールタールから発生させたガスを灯火として燃焼させたことが記されている（石井研堂「明治事物起原」より）。また同時期に盛岡藩の医師・鋳山技術者大島高任が水戸藩那珂湊に建設した反射炉の燃焼ガスを用いて照明とした記録（大島信蔵編「大島高任行実」より）や鋳山の石炭ガスを燃焼させて灯火として燃やした例などがある。

1857（安政4）年には鹿児島県鹿児島市の仙巖園において、既存の石灯籠にガスの管を繋ぎ、照明としてガスを燃焼させた事例がある。この装置の製作を命じたのは島津斉彬であり、藩内各地において同様の装置を設置する構想も立てていたが、翌年の急逝で構想は流れた。

明治時代に入ってから本格的な西洋式ガス灯の照明器具が用いられるようになった。日本で最初に西洋式ガス灯が灯されたのは1871（明治4）年大阪府大阪市の造幣局周辺においてで、ガス発生装置は当初鉄製のレトルトで機械の燃料として用いていたガスを流用する形で工場内および近隣の街路にてガス灯が点灯された。その時使われたガス灯の器具は造幣局内に現存する。装置を英国から持参したのはウィリアム・キンドルであるが、それと前後して来日したガーランドが銅精錬の反射炉をもたらし、マクラガンがガス事業を直接指導した。

なお、造幣局ではガス供給だけでなく、本来の事業目的である金銀地金溶解のためのコークスを自給する

ためのビーハイブ炉を11炉を建造し1871（明治4）年から高島炭を使用してコークス製造を開始している。

1872（明治5）年9月1日に、実業家高島嘉右衛門とフランス人の技師プレグランの尽力により、神奈川県横浜市に最初のガス灯が造られ、日本における事業としてのガス利用に先鞭をつけた。

4.2 製錬用コークス（反射炉におけるコークス）

古河鋳業足尾銅山では、製錬用燃料として木炭を使用していたが供給が間に合わず、大阪市場においてコークスを購入していたが、燃料自給のため太田炭鋳を買収し深川骸炭炉の技師福岡健良を大阪造幣局に派遣し外人技術者から冶金技術、反射炉、コークス製造技術の伝習を得て、1888年南葛飾郡砂村にビーハイブを建設、1895年コペー炉に改造している。後に釜石、八幡でコークス高炉の成功に貢献する野呂景義が我が国最初のコークス研究を行ったのはこの炉である。

製品コークスは深川骸炭炉前の小名木川から舩船で隅田川に入り、神田川を經由して秋葉原に着き、ここから鉄道便で日光へ、そこから足尾という行程である。

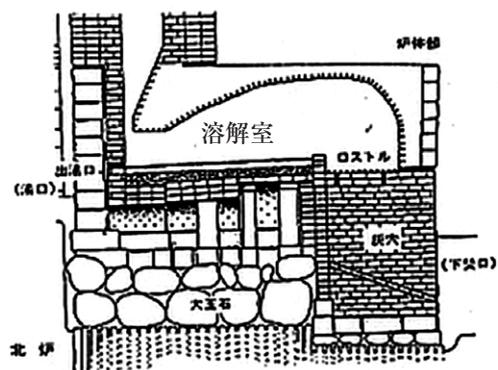


図 4.1 反射炉の構造¹⁾

燃料（石炭）を燃焼させる炎や熱を、炉のドーム状の天井に反射させ、一点に集中させた反射熱を利用して金属を溶解する図 4.1 に示す方式による。

最初、木炭の弱火でロストル（火格子）を温め、この上に木屑と薪を置き石炭を堰よりやや高くなる程度に入れ、千数百度まで温度を上げる。

燃焼ガスの集合により最も高温になる溶解室に銑鉄

等を入れ溶解する。 炉床面は出湯口に向かってゆるやかな下り勾配になっていて、不純物を含んだ銑鉄が溶けると傾斜に従い出湯口に向かう。出湯口の手前で上に煙道が伸びる。出湯口の上部に方形の窓がありここから溶湯を攪拌する。

1840（天保11）年のアヘン戦争で2年後に清が大敗しイギリスの半植民地化したことで、日本でも欧米諸国の進出に対する危機感が強まり、薩摩・佐賀・水戸など開明的な藩主のいた藩や、幕府でも蘭学に通じた先覚者達により、西洋の先進的な技術の導入が表4.1に示すように積極的に行われるようになる²⁾。

表 4.1 幕末の反射炉・高炉

藩名	場所	最初の炉の 竣工年月	同操業 開始年月	炉数 (その後の増設を含む)	燃料 (コークス炉)
反射炉	肥前 佐賀	1850 (嘉永3) 7月	1851 (嘉永4) 12月	4基 8炉	木炭
	薩摩 鹿児島	1852 (嘉永5) 秋	1853 (嘉永6) 夏	2基 4炉	木炭
	(天領) 葦山	1854 (安政元) 6月	1855 (安政2) 2月	2基 4炉	石炭or木炭 (石炭テル製造業)
	水戸 那珂湊	1854 (安政元) 8月	1856 (安政3) 2月	2基 2炉	石炭(コークス?) (木炭で成功)
	鳥取 六尾	1857 (安政4) 4月	1857 (安政4) 9月	2-4基 2-4炉	
	長州 萩	不明	1858 (安政5) 頃完成	1基 2炉	
	岡山 大多羅	1864 (元治元)	1864 (元治元)	1基 1炉	
	薩摩 鹿児島	1852 (嘉永5) 夏	1854 (安政元) 7月	1基	木炭・石炭
高炉	箱館(奉行所)	1856 (安政3) 7月	1858 (安政5) 以降	1基	
	南部	1857 (安政4) 5月	1857 (安政4) 12月	10基	木炭→ 石炭コークス
	仙台 東磐井	1863 (文久3)	1863 (文久3)	2基	

4.3 反射炉各論

4.3.1 佐賀藩

1850（嘉永3）年6月に佐賀藩主鍋島直正は佐賀城西の築地に大砲製造方を置きオランダのヒューゲニン著「ライク王立鉄大砲製造所における鑄造法」³⁾を翻訳させ7月に反射炉の建造着手し11月に第1炉竣工、石見産の銑鉄、肥後産の木炭により溶解を開始し、当初温度不足のため未溶解部分が残存したりしていたが、第8次以降ヒューゲニン原書にも記載されている溶湯の攪拌実施により安定した溶解が実現している。以降2年間で4基を完成させ操業に成功し、4炉同時操業による合わせ湯（7.2トン）の結果36ポンド砲の鑄造へと発展している。

4.3.2 島津藩

1853（嘉永6）年夏に薩摩藩主島津斉彬による集成館事業（洋式産業群）の一環で藩邸内で試作炉を、完全な2号炉は1857（安政4）年夏に完成させた。大橋周治¹⁾は集成館の高炉については図面・写真などが

全く残っていないが、藩主島津斉彬の側近で集成館の経営にあたった市来広貫の記述になる「島津斉彬言行録」において「様式の溶鋳炉を建設すべき旨（藩主に）奉命し嘉永5年の夏より着手し安政元年の秋に落成、藩内産の砂鉄鋳および厳鉄鋳⁴⁾を用いて試験をおこない、洋品に劣らない良好な銑鉄を得ることができ反射炉で溶解し鑄砲の材料とすることができた」としている。また佐賀藩主の鍋島直正から薩摩藩にヒューゲニン著（手塚謙蔵訳）「西洋鉄鋼鑄造篇1」が嘉永3年に贈与されていて、先述の言行録に「洋名ホーク・オーフェン」とオランダ語を付して記載があることから、同書の設計図に準拠して築造されたと推定し、斉彬の急逝により事業としては挫折したものの、「三日三夜で3,600斤」という生産記録（単純計算で700Kg/日）があり、水車送風による洋式高炉で鉄鋳石から銑鉄を生産することに一応成功したといえるとしている。

4.3.3 伊豆葦山

一方、葦山については伊豆葦山代官江川英龍（太郎左衛門）が海防の必要性和江戸湾防備の具体策——台場を構築し異国船に備える等——を幕府に建言し、嘉永6年のペリー艦隊の来航等を受けて聞き入れられる。

台場に設置する大砲は、従来のものより長射程で堅牢、かつ低コストの条件を満たすためには、鉄製で口径長大な砲の製作が必要であるが、それを想定していた英龍は「ライク〜鑄造法³⁾」を石井修三と矢田部卿運に「和蘭国製鉄炉法」として翻訳させるなどしており、幕府の許可が下りてすぐに、反射炉建造に着手した。1853（嘉永6）年12月当初建設場所を伊豆賀茂郡本郷村（現在の下田高馬付近）で計画したが、1854（安政元）年3月27日、工事中の反射炉に、近くにある下田港に入港していたペリー艦隊の水兵が侵入する事件が起きたため、建設地を急遽、葦山代官所に近い田方郡葦山中村に変更することとしている。

1855（安政2）年1月16日に英龍が江戸屋敷で病没したが、子の英敏が意志を継いで工事は続行され、2月21日に1番反射炉半双。1856（安政3）年4月11日テール製造所が完成。その間、安政2年8月に幕府を通じて佐賀藩の協力を要請し、12月に承諾を得る。1857（安政4）年2月5日佐賀藩より技師の杉谷雍助（翌年3月9日帰国）・田代孫三郎および職人達（翌年3月22日帰国）が到着、南炉建設。7月1日南炉試鑄。9月9日に最初の18ポンド砲の鑄込みが行われる。

安政5年(1858)3月連双2基が完成。製造した18ポンド砲は良好だったが、その後度々の天災や粗悪な銑鉄使用の弊害等が重なり、鑄砲の困難が記録に見られる。安政6年から銅製砲を鑄造し、完成した大砲の28門が品川台場に据付けられたという。

幕末期から国内で幕府直轄4、藩営6、民間3箇所の反射炉が作られ、8箇所が完成したといわれる(幕府直轄は葦山のみ)が、現存するのは山口県萩(試験炉とみられる)と葦山のみ、実際に稼働運用し当時の姿をほぼ完全な形として残すものは図4.2に示す葦山のみとなった。

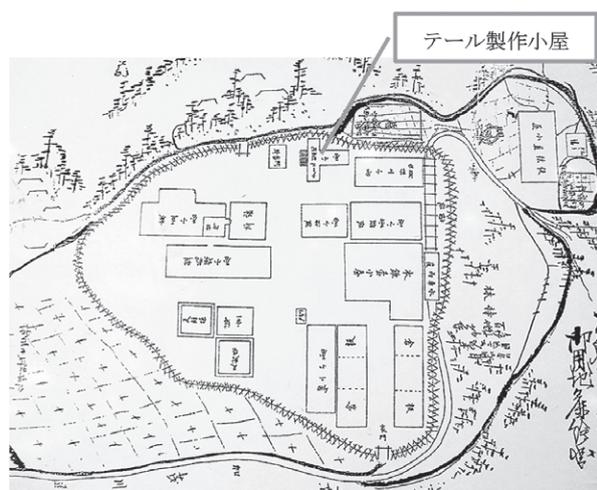


図4.2 葦山古絵図(文久3年9月)(江川文庫蔵)

葦山反射炉の技術的特徴は燃料に木炭だけでなく石炭ないしはコークスを使用していることである。反射炉着工が決まった嘉永6年12月には「石炭テール製炉築立」の目論見書が提出されていて、石炭を乾留してテール(タール)を採取し、焼成されたコークスを反射炉で使用することが最初から計画されていた。木炭、石炭、コークスがどのような比率で使われたかは不明であるが、葦山の技術者八田平助のメモに「石炭は油気少なきを用い候。(中略)テールと唱える油を取り候上にて相用い候」とあるとのことでコークス化²⁾の程度はともかく今日でいうコークスを用いたことは確実である。

4.3.4 水戸藩

水戸藩では藩主徳川斉昭が水戸学の立場から強硬な攘夷論を展開していたが、その立場から黒船に対抗するための武器の必要性を感じており、中浜万次郎を召して米艦の大砲について尋問したり、反射炉建設をすでに始めていた薩摩に人を派遣して図面を複写させたり建設工事を实地に学ばせたりしている。

しかし、その攘夷思想から藩校の弘道館における蘭学も限定的で、反射炉の築造、大砲の鑄造を行うに当たり藩内に蘭学技術者が育っておらず、安政元年、薩摩藩より竹下清右衛門、南部藩より大島惣左衛門(高任)⁵⁾、秋田三春藩より熊田嘉門の蘭学字術者の招聘をそれぞれの藩主に要請し、那珂湊(現:茨城県ひたちなか市)に反射炉を建設、1856(安政3)年には大砲の鑄造に一応成功する。

葦山におけるテール製作小屋は敷地の見取り図(図4.2)の中に示されているのみであるが、那珂湊では設備の図面が示されている(図4.3)。

なお、佐久間の「反射炉日録抄出」や大島の操業状況記述に燃料として「石炭」と書かれている。これが文字通りの石炭なのか脱油処理をした石炭なのかは明快な記載がない。石炭を用いたが「火力が弱くて溶解に失敗」との記述があり、木炭を使用したらかえって火力が強くて溶解に成功したとの記述もあり、よくわからないが炭化の程度はあまり高くなかったのかもしれない。

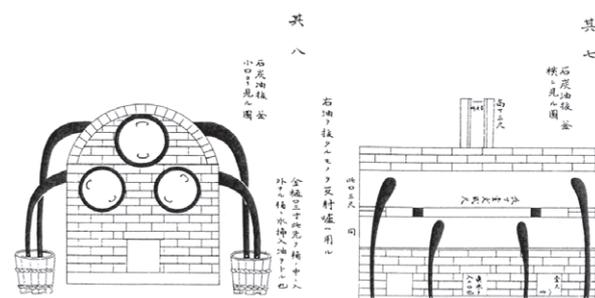


図4.3 石炭油抜の窯(那珂湊)(ひたちなか市教育委員会蔵)

加熱の方法がこの図からは判読しがたいがタールを回収しているところから間接加熱のように見える。

鉄製砲の製造数は佐賀が約200門、薩摩が数十門であるのに対し那珂湊は約3年間に鑄造した砲は20門に満たず試射で合格した数は一層少ない。

大橋²⁾は水戸で量産体制に到達しなかった理由の一つに技術者が寄せ集めで人的関係が極めて悪く、佐賀の場合のようにチームワークが成立せず反目と混乱が生じたことを挙げている。また島津斉彬が技術上の知識を持っていて各要素部門の企画を自ら立て、現場に出向いて問題に応じて藩士技術者を選択し直接指示し報告を聞いていたのに対し、斉昭は招聘した3人の蘭学技術者に対して江戸屋敷で「お庭拜見」という古風な形式で一度会っただけ、那珂湊建造・操業の間一度も現場に来ることはなかったというマネジメント上の問題も指摘している。しかし、根本的な問題は反射

炉の原料となるべき銑鉄の確保が困難であった技術的なことであり、人的な関係もこの問題についての関係者の立場の相違から生じているとも論じている。

砂鉄はチタンを含むことが多く、これを含む鉄で製造した砲はぜい弱で必ず破裂することを認識していた大島は、鉄銑石を釜石の高炉で還元し銑鉄として反射炉に供給するという構想を嘉永6年那珂湊着工の時点から斉昭の側近である藤田東湖に提示していた。1856(安政3)年、第1炉が完成し銑鉄の溶解は不完全ながらも煉瓦が高温に耐え継続操業の見込みが立ち、さらに反射炉の増設も決まったところで現場責任者の佐久間は上記大島の希望を藩に伝え、この時点で大島が一時帰国して南部における高炉建設の可能性を検討する一方、竹下、熊田の両技術者は水戸藩自身で高炉の建設の可能性を検討するため小坂銑山を調査している。

大島は勿論知らなかったであろうが「花崗岩が語る地球の進化」⁶⁾によれば山陰帯の鉄銑石はチタン鉄銑石系であるのに対し北上山系の鉄銑石は磁鉄銑系列でチタンが少ないとされる。

4.3.5 南部藩

南部藩では大島高任の計画書による事業には直接乗り出さなかったが、貫洞瀬左衛門が高炉建設を引受け高炉建設願、建設用材の調達、木炭製造用山林の払下げ、人夫賃等の諸経費、税金に関する民間事業としての要望書を南部藩に提出し許可された。大橋高炉は大島高任が南部藩から出向して担当する体制で建設が推進された。

大橋1号高炉は甲子(かっし)村大橋(現:釜石市大橋)に1857(安政4)年3月に着工して11月に完成し、その年12月1日に火入れ初出銑を行った。これを記念して12月1日を「鉄の記念日」と定めている。

那珂湊では1857(安政4)年12月に第2炉が完成し水戸反射炉は本格的な2炉同時稼働により24ポンドの大砲が製造可能となったが、まさにその時釜石の大島より高炉銑の製造成功の報告が入ったことになる。

1858(安政5)年4月27日に釜石の銑石銑760貫が届き入荷し、5月22日の操業からは南部柔鉄を原料とする鑄造が行われるようになり、水戸藩の事業も軌道に乗るかかると見えたとき、推進者の斉昭が幕府より謹慎を命じられ⁷⁾、水戸藩の反射炉・鑄砲事業はここに一時挫折し、4年後の1862(文久2)年再開され15寸径の大砲が製造され幕府に献上されたりした

が、その後水戸藩内が勤皇派と佐幕派の抗争の中で反射炉は戦場となり破壊され再び復旧することはなかった。

1853(嘉永6)年以降は幕府が海防に迫られ大砲と大船建造を公認した後であるが、中央集権国家が成立する前の諸藩が鉄砲・製鉄事業が公然・非公然の人的交流に加え各種の連携・協力関係の下で行われた。

大橋によればそれを二つの流れに分けている。一つは幕府を仲介とした佐賀・葦山の協力関係、もう一つは薩摩・水戸・南部を結ぶ流れである。これを図4.4に示した。

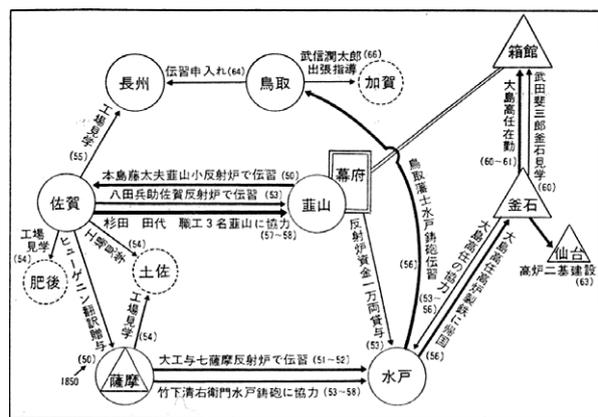


図 4.4 幕藩営事業の連携と交流

幕府は次のような形で各藩の事業を組織した

- ① 葦山：鉄製砲の製造に出資して経営を江川家に委託
- ② 佐賀藩：公儀石火矢200丁の製造委託
- ③ 水戸藩：反射炉建造に製品による返却を条件に1万両貸与
- ④ 箱館奉行：蝦夷地開拓の一環として反射炉(中止)、高炉製鉄(大島高任在任)、銑物資源開発

全国8か所の藩営事業の内4か所が幕府の直接間接の関与を通して連携しており、特に佐賀藩は幕府関係者には秘密主義はとっていない。薩摩-水戸-南部の関係は藩意識を脱却し時代を先取りした国家意識を持った島津斉彬の存在が大きいと大橋は分析している。

さらに、一般に技術が閉鎖的な徒弟・見習い制度の中で秘伝・口伝の形で継承されてきた江戸時代において、蘭学者が提供する新技術の工業化という共通の目標に各種の技術者・職人が協同して参加するというのは新しい経験であったと思われるとしている。

反射炉の建造と操業そして大砲の製作の途上で生じた諸問題の対応について諸藩技術者の認識が相似して

いるのは、技術の根拠がヒューゲニンただ一つという事情もあるが、関係者の間の交流の下に西洋技術の移植が進行し成功したことが、明治以降の殖産興業に、さらに第2次大戦後の復興における製鉄技術の共同導入につながったのではないかと思われる。

4.4 ヒューゲニン著「西洋鉄鋼鑄造篇」におけるコークス炉

反射炉の技術がヒューゲニンに始まり、佐賀、薩摩、韭山、那珂湊とその技術の進歩がたどれるのに対し、この「石炭テール製炉」「石炭油抜の窯（那珂湊）」という概念は韭山で突然現れる。

反射炉がヒューゲニンの著作に基づいていることから手塚謙蔵による翻訳「西洋鉄鋼鑄造篇」を参照すると、「卷之三 鋼鉄を精製する炉を録す」に「古は鋼鉄を溶解するに唯木炭のみを用ゆ。エンゲランドに於いては、木炭を製するために殆ど樹木を尽くすに至ることあり。是に於いて焼石炭を用ゆることを発明す。」とあり、の初めから「焼石炭」として登場し、「脱硫石炭即ち簡亜苦斯（コークス）」という言葉がすでに用語として定着していたことがわかる。

卷の七に反射炉操業における耐火物と石炭の具備すべき性質および炭材の使用手順についての記述があるが、硫黄分の高い石炭は鉄の溶解には不可で、「瓦や石炭を焼くには甚だ可なり」とあるものの、出炭地による揮発成分、着火性などの差を記すのみで乾留の方法についての記述はない。

この時代西欧ではピーハイブを初めとする現在の室炉式コークス炉の原型炉が既に登場し始めており、

1730年代ダービー父子によるコークス高炉の出現からほぼ100年経過した1826年出版の「西洋鉄鋼鑄造篇」の時点で何らかの方法で石炭を焼くことは既に常識となっていたと思われる。

参 考

- 1) 「史跡韭山反射炉保存修理事業報告書」p.109, 図59.
- 2) 大橋周治, 幕末明治製鉄史, アグネ, 1975.
- 3) Ulrich Huguenin, Het gietwezen in's Rijks uzer-geschutgieterij te Luik(1), Kloots, 1826.
手塚謙蔵訳：1846年南部藩の藩命により長崎に留学した大島高任が、同学の手塚と翻訳したとされるが佐賀藩主鍋島直正が翻訳を命じたと言う記述との関係は明らかでない。
- 4) 巖鉄鉍；岩鉄（塊鉍石），大正時代に砂鉄に対する鉄鉍石の呼び名として使われた。
- 5) 大島高任は1826（文政9）年5月11日，盛岡仁王小路にて盛岡藩侍医大島周意（かねおき），千代の長男として生まれた。惣左衛門を名乗り，1869（明治2）年に高任と改名した。
1842（天保13）年，17歳の時に上京，江戸で箕作阮甫（みつくりげんぼ），坪井信道らの元で蘭学を学んだ。1846（弘化3）年，さらに勉学に励むべく長崎に留学し，幕末の兵学者・砲術家の高島秋帆の長男浅五郎から西洋兵学，砲術，採鉍，精錬を学んだ。
- 6) 高橋正樹，花崗岩が語る地球の進化，岩波書店，1999.
- 7) 「安政の大獄」の予兆.

5 | 海外技術導入の経緯（官営製鉄所におけるフルセット技術導入の失敗と帰国留学生による成功）

わが国の産業革命は、開国を巡って発生した政変により政権を獲得した明治政府が、植民地支配を進める欧米列強に対抗するため富国強兵策の一環として急速な西欧技術導入を図ったことで始まった。その多くは、生産設備を始め操業指導のための技術者招聘までを含むいわゆるフルセット技術導入であった。

製鉄技術として歴史的には伝統技術である「たたら」があり、19世紀半ばからは、国防上の要請から佐賀藩の反射炉、薩摩藩の高炉建設が始まる。いずれも技術という意味ではオランダのヒューゲニンによる著書を参考にしてはいるものの試行錯誤による言わば独自技術である。さらに水戸藩の反射炉への銑鉄供給の問題意識をもった大島高任による釜石高炉の建設により、銑鉄の生産と流通という形の産業経済圏のコンセプトが初めて我が国において成立した。彼自身の言葉によれば鉄の記念日の起源となった釜石製鉄所であるが、文献によるヨーロッパの知識と「餅鉄¹⁾」という東北の土着技術を背景に、地元産業資本家の資金的協力を得て実現した「日本式高炉」であるとしている。

コークス製造は第2章に述べたように、これを使用する高炉の操業と表裏一体となっており、その技術の発展は取りも直さず鉄鋼生産の歴史そのものと密接に関係している。「技術の系統化調査」シリーズの「高炉技術の系統化」²⁾においてもかなりのページを割いてコークス品位と高炉操業の関係を述べている。

この章ではまずコークス製造技術を事例として取上げ、わが国が行った技術導入、そしてその技術を自家業籠中のものとし、やがて他国へ供与するに至る歴史を振り返り、技術移転の意義を考察する。但し、それぞれの設備の各論は次章以降に詳述する。

5.1 釜石におけるコークス炉³⁾

釜石での高炉による製鉄は第4章で述べた水戸で反射炉の操業を経験し、銑鉄の重要性を認識した大島高任による1857年の大橋1号高炉に始まる。1873(明治6)年、明治政府は大橋、橋野、佐比内、栗林にあった鉄山を工部省の所管とし、翌年には大橋鉄山のみが官営となり、1875(明治8)年には釜石村鈴子(すずこ・現在の釜石製鉄所の位置)が「鍛砒所、其他器械所建設ノ地」と定められた。同年から建設が始まった官営釜石製鉄所は製銑工場(25トン高炉2基、高さ18.3メートル)、練鉄工場などが建てられ、いわゆる

本格的な洋式高炉による銑鉄生産は1881(明治13)年9月13日の第1次操業における25トン高炉による初出銑に始まる。しかし原料の木炭の供給不足から初出銑後94日で操業中止に至り、1883(明治16)年に廃業した。

この失敗の背景には計画の段階から先進国ドイツの技術者ピアンヒーが主張する大規模な欧米式製鉄所と、外遊途中でフライベルグ大学に留学しヨーロッパの技術を知った上で「小さく生んで大きく育てる」案の大島高任の意見が鋭く対立していたことがある。工部省が外人技師尊重の立場を選択したため、大島は釜石を去り、この高炉の建設・操業には実際には関わっていない。

釜石におけるコークス炉は1880(明治13)年9月官営製鉄所第1次操業時の原料木炭の不足を解消するため1881(明治14)年12月の第2次操業時代に設置したビーハイブ炉48門であるが、このときも最初は木炭でスタートし途中からコークスに切り替えたがコークス操業は「火力が炉内に行き渡らず」炉内でスラグの凝固いわゆる冷え込み状況になり失敗している。結果として技術的困難(生産コスト大)、鉄鋼需要の未発達などによる1883年に官営製鉄所そのものの廃業によりコークス炉の出番はないまま終わっている。

一方、製鉄所を管轄する工部省は、1880年の「工場私下概説」⁴⁾の一環として海軍への糧秣(りょうまつ)や鉄材の納入を取り仕切っていた政府御用達の金物商であった東京の田中長兵衛⁵⁾に払い下げを打診する。娘婿で番頭格の横山久太郎や長男安太郎の熱心な勧めもあって製鉄所の再建を決意した田中長兵衛は、横山を派遣して現地の総責任者とし、休止していた英国製25t高炉の他に、新たに既に経験のある大島高任の大橋高炉と同型の2基の小型高炉(日産3t)を作って銑鉄の製造(製銑)に当たらせ釜石は第2の創業期を迎えることになる。

1884(明治17)年に木炭を燃料とする小規模高炉を新たに建設した田中は、失敗を繰り返しながらついに1886(明治19)年10月16日、49回目にして初めて出銑(しゅっせん)に成功し、製鉄所再興の道が開かれた。しかしこの時点では未だ木炭高炉である。

(49 回目の挑戦で成功)³⁾

横山はさらに操業を続行した。炉の欠点、操業上の不備など考えられるものすべて考えた。資金が尽き、横山は家財・衣料などを売り払い職工に払う金だけは確保した。横山は裸同然になった。…(中略 明治19年7月(この時通算46回目)東京の本店から横山に電報が届き現場を高橋亦助に託して上京する。高橋は官営時代の操業を思い出しながら2回の操業を行うが失敗に終わり、横山の残した残金も底をついたことから職工を集め転職を勧める。)

翌朝になって数人の職工代表が亦助を訪ねて…「…中断して自分たちを解雇するのは当然であり異論はない。…(中略)…家族が食えるだけの銭さえあればいいから自分たちをここへおき、鉄を作らせてくれないか」。さらに職長が「試に今まで不良鉱石として放棄しているもので操業してみてもどうか」との提案をしてきた。…

そして、10月16日(49回目の)湯口を開く日を迎えた。

これまで飽きるほど失敗のさまを見続けてきた亦助、職工たちの前に(この日から)信じられないことに連続的に湯が迸って流れ出た。(釜石製鉄所ではこの日をもって創業記念日としている)

そもそも釜石鉱山の鉱石は磁鉄鉱(Fe_3O_4)であり分子式では鉄に対する酸素量が通常の赤鉄鉱(Fe_2O_3)より少なく、分子式の見かけ上は還元が既に進んだ状態に見えるが、鉱物的には緻密であり速度論的には不利である。ここでいう不良鉱石は釜石100年史では“赤石”と記述され、官営時代も含めて失敗を重ねた操業結果の炉内残留鉱石が次の操業のために炉外に掘り出されて野積みになっていたものを指すと推定している。一度炉内で高温にさらされた磁鉄鉱が野積みにされて再酸化され、丁度現在の焼結鉱のような還元性の良好な状況になったのではないと思われる。何故このアイデアが生まれたかは今となってはわからないが、現在の製鉄理論でも納得できる事件である。

翌年には釜石鉱山田中製鉄所が設立され、陸軍大阪砲兵工廠の砲弾用銑鉄や水道用鉄管材料の受注で社業を拡大し、1893(明治26)年には以下に述べる経緯を経て官営時代の“大型”高炉を改修して再稼働、翌1894(明治27)年には国内初のコークス銑の生産に成功している。

即ち、東京帝国大学の野呂景義は釜石の現況と改良方法をまとめ「釜石鐵山の近況及其改良案」⁶⁾を発表した。田中長兵衛と横山久太郎はこれを読み積極的にこの提言の実践に取り掛かる。

野呂景義は田中長兵衛の懇請によって顧問に就任すると「現場の技師長」として愛弟子の香村小録を推薦し、香村は1893(明治26)年農商務省技師試補を辞して釜石に赴任すると官営時代の25トン高炉を調査して以下の問題点を指摘して改良工事を実行した。

- ①熱風炉とボイラーの排気煙突の独立(熱風炉の燃焼効率確保)、
 - ②高炉プロフィールの不適(炉腹部の拡張と湯溜の分離：滴下帯の温度確保)、
 - ③原料鉱石の焙焼強化
- などである。

香村は復活操業に際して、農商務省時代の知友と思われる品川硝子製造所の中島宜と盛岡の下斗米小六郎とを招聘し、耐火材料、コークス技術面などの実地作業に加わり、高炉現場作業主任の高橋、機械設備担当の村井らとともに、工部省高炉の高炉・熱風炉の設計上の欠陥を是正し、1893(明治26)年には高炉1基の改修・復活ができた。

1894年(明治27年)11月改修高炉が完成し、最初は木炭によりスタートし火入れ後10日で定常運転となる。前年の1893(明治26)年建設に着手した野呂の設計によるコペー式コークス炉⁷⁾6トン43門による夕張炭を原料としたコークスに切り替えて操業したところ出銑量が一躍増加したとしている。

香村の日記³⁾：「この年1894(明治27)野呂博士の設計にてコペー式散炭窯を作り、1883(明治16)年旧工部省官業廃止以来、空しく雨露に晒されて休止せる25トン高炉2基の内先ず1基を操業することとして準備を進め(明治)27年、之が火入れをなし最初の「籠り付」は木炭を用い送風後散炭に変え、良好な成績を挙ぐるを得たり。本邦における散炭銑の算出はこれを持って嚆矢とす」

即ち、1894(明治27)年7月に鉄鉱・石炭の調査のため夕張出張を命じられた野呂が途中釜石に立ち寄り、夕張コークスの適用の道筋をつけるとともに、出張を延長して香村に直接指示を与えて、8月に図5.1に示すコークス炉によるコークスでの操業に成功した⁸⁾。



図 5.1 釜石コペー式コークス炉

また、田中は自ら御用達商人の経験から、製品を大阪砲兵工廠に納入するという「安定した販路」をみつけている。大阪砲兵工廠は、鑄鉄砲、砲弾用に1889（明治22）年段階で約2,000トンの需要があった。それ迄、主に、イタリア産グレゴリーニ銑鉄を輸入、使用していた。1890（明治23）年釜石銑鉄で鑄造した砲弾との比較試験が行なわれたが、「……毫モグレゴリーニ銑鉄ニ異ナラズ、或イハ此ノ外国品ニヤヤ優ル」との結果がえられた。

大型高炉の稼働によって前年まで年間8,000トンレベルだった銑鉄生産量は12,735トンに増加。この年、はじめて高炉銑が中国地方のたたら銑の生産量（8,115トン）を上回った。1735年ダービーⅡ世によるイギリスにおけるコークス製鉄の確立から遅れること160年でようやく追いついたことになる。

5.2 官営八幡製鉄所⁹⁾

産業の基盤となる鉄鋼需要の8割を輸入しながら、釜石の失敗を目の当たりにした議会は製鉄所建設の建議を全て否決してきたが、日清戦争が終わった約1年後の1896（明治29）年3月30日やっと製鉄所設立案が可決された。官営八幡製鉄所の誕生である。

このとき榎本農商務相が釜石の失敗を踏まえて「小さく生んで大きく育てる」を設立意見として表明したにもかかわらず、戦後の鉄鋼需要の増加、清国との鉄鉱石長期契約などから計画は大幅に拡大され、兵器用鋼材の生産を主とし一般鋼材を従とする小規模粗鋼生産規模から、多品種鋼材の大量生産を可能とする高炉を主とし所謂銑鋼一貫体制をとるドイツ方式に変更され実行された。

装入原料品位の裏付けなどがなく、設備・資材の全量輸入、ドイツ人技師による全面的指導という形

をとった1901（明治34）年の160t高炉のスタートは惨憺たる有様で（538日で操業中止；平均76トン／日）、結局ドイツ人技術者を解雇し、釜石での経験を元とする野呂らが自力で操業確立したが、1904（明治37）年の日露戦争には実質的に間に合わず議会で大問題となる。

この時ドイツ方式を採用し、グーテ・ホフスンクス・ヒュッテ社一括発注というフルセット技術移転への方針転換の主役となった大島道太郎が、先述の「小さく生んで大きく育てる日本式高炉」でピアンヒーに敗れた大島高任の息子であるのは歴史の皮肉だが、臨海一貫製鉄所で世界をリードした我が国のその後を考えると先見の明と云わざるを得ない。

当時の技術職の回顧談：⁹⁾

<八幡製鉄所50年誌 座談会>

田中宿老：「いよいよ作業に掛かりましたが、何分にも不慣れなためか、やり損じまして吹きたてのときに爆発を起こしまして、…しかし段々慣れてきまして、その後5ヶ月ぐらいいしてからは少しずつ湯が出るようになったのであります。」

「…突然、農商務省の方から（作業）中止と決ったのでした。…、そこで西洋人は早速帰ってしまい、…。その後、1年ばかりしてまた作業を始めましたが、それは、日本とロシアとの間の空気が険悪化してきたからではなかったかと思えます。」

「さて、この作業では三井のコークスを使用しましたが、とうとう溶銑炉を詰まらせてしまいました。硫黄分が多いのと、鉄分と銑滓が分離できないで、1週間ほど自宅にも帰らずに、高炉の前ががんばっておりましたが、その時は服部さんも一緒でした。「もう駄目だということで、農商務省に電報を打って報告された服部さんは、進退伺いを中村長官¹⁰⁾に出されたのであります。」

田中宿老：「…そんなことがあって、第3回目の吹き入れをすることになり、東京帝国大学の野呂先生がみえられて、薪を半焼きにしたものを炉底に入れて溶銑炉に吹き入れを行ったのでした。ところがなかなかコークスに火が燃えつかない。そこで野呂先生がふいごを持ってこさせてブウブウ吹いたのですが、…。私は鍛冶屋の経験がありますので「それじゃ駄目だ、ふいごに蔽いなければいかん」と建言しまして、…。どうにか火がついて煙突からやっと煙が出るようになりました。こうしてどうにか出銑が出来、…。」

来所した野呂が提出した八幡高炉不調の原因解明の

報告書は、ヨーロッパの原料条件を前提に操業したのが失敗の主因だとし、*本邦産の原料経験のない外国人の起用、*送風口の不適切、*不良なコークス使用、*原料配合の不適切（融点が高く解けにくい）を指摘し、高炉プロフィールの変更を含む改善を行うことで操業を可能としている。プロフィールの変更を可能とする技術水準に既に達していたということである。

野呂をはじめ当時海外留学した人たちの多くは学問だけでなく製造現場で作業員と共に働き現場体験をしていればこそこの指摘であり対策であろう。

問題のコークスは予算上の齟齬からコークス炉の建設が間に合わず、高炉用コークスに対する認識がないままに、1892（明治25）年三井三池が横須浜に建設したビーハイブ炉で製造されたものを使用したものである¹¹⁾。

コークス炉については高炉の稼動から5ヶ月遅れた7月にビーハイブ炉が完成しているが、釜石での経験を活かした1904（明治37）年のコペー炉建設、および大阪舎密 下村の指導による1907（明治40）年～1909年にかけてのソルベール炉建設、1914（大正3）年のコッパース炉の導入を経てやっと軌道に乗ることになる。

5.3 副産物回収コークス炉¹²⁾

1896（明治29）年、35歳のときに大学から化学工業界に進出した下村孝太郎¹³⁾は、有機化学での事業を始めるため副産物回収式コークス炉の建造に着手する。大阪舎密工業株式会社の技師長として約半年の欧米視察ののち、ベルギーのセメ・ソルベール炉（Semet・Solvay）の方式を最良と判断したが、当時の国内の技術力では外国人技術者の手を借りる必要があった。しかし、下村は外国人を雇うなら自分は辞任する、あくまでも国産独自に建造し運転したいと社長に申し出た。苦難のすえに1898（明治31）年に無事に大阪舎密工業の16炉が完成し、日本で初めて副産物のアンモニアから肥料用の硫酸アンモニウム（硫酸）の大規模な生産に成功する。

1907（明治40）年から1909年には、官営八幡製鉄所の依頼で150炉の同型の炉を建造した。

セメ・ソルベール炉は従来の平炉とは違い原料に圧力がかかるので、この炉さえつければ良質のコークスが得られると下村は予想したが、硫黄分の少ない堅いコークスはできなかつた。炉の構造よりも原料の良否が肝心であることを悟り、石炭の乾留による半成コークスの製法と配合により「下村式石炭低温乾留法（X

炭法）」を確立させる。これにより第二次世界大戦後の困難な原料事情での製鉄の操業を可能にし、また液体燃料の見地から石炭低温乾留の先駆者として海外からも注目される。下村の人柄を以下のコラムに示す。

京都大学を出て化学技術者になった息子の明と孝次に与えた遺訓3条がある。

*「技術者は機械にあらず、機械を支配する職なれば、人生を弁じ、人間を支配する能力なかるべからず」

*「世に技術者かたぎと申す変てこりんのものあり、他人の言うことを聞かぬ性質を指すなり。折々素人が途方もないことを言い出すことあり。かかる言い分には技術者の参考として思考の種となるものなきにしもあらず」

*「技師は経済の思想なかるべからず。理想的な技師は技術に加うるに営業の才能ある者たるべし。これなき技術者は一種の高等職人たるにすぎず」

わが国コークス工業の思人“下村孝太郎の手紙”

（原文は東京在住の服部教授あて英語で書かれている、訳はご子息の下村明工学博士による¹²⁾）

16門の副産物回収式コークス炉を有する私どもの工場はヨーロッパの技術者の助けなくして（は）日本人の手だけで仕上げるとは（彼らは）考えも及ばなかつたでしょう。私はほとんど他からの助けを得ないで炉の建設、スタートから運転にまでこぎつけました。建設費は25万円かかりました。私は自分の持っている化学・物理・数学のすべての知識を集めて仕事にかかりました。建設の間、毎日唯一つの考えは自分の手で炉を建設して、自分の手でそれをスタートし、運転するということだけでありました。政府、特に八幡製鉄所の技術者のなかには大きな危惧の念を持っていた人も多かつたのです。これはもっともなことで、炉の建設は非常にむずかしいものである上にその運転を敢行した日本人は今まで誰一人もいなかったからであります。（中略）

炉の乾燥には60日を要しました。その間に総額1,500円分の薪と石炭を燃やしました。昨年（1898年明治31年）10月26日の朝私は心に死を決しながら妻と2人の子供に別れを告げて出かけました。（中略）

この20日の間私は毎夜僅かに2時間だけしか眠りませんでした。深い心配と乾燥中の炉の点検は私を眠らせませんでした。私は痩せました。一夜訪ねて来て

くれた私の友人はあまりにひどいやつれ様にびっくりしていました。しかしむずかしい仕事は一つ一つ円満に片付けてゆきましたので嬉しく思いましたが、さて最も危険な時が近づいて参りました。

(中略) それでいよいよスタートの朝 (注-1898 (明治31) 年11月3日)、すべての職工を遠くの安全な場所に避難させた後、自分は最も危険な場所に立ち、一人の助手をしてガス栓を聞かせて反対側からその燃焼の具合をしらべました。(注-本炉は水平焰道式である。) 第1の炉はうまく点火されて爆発は起こりませんでした。もし私が十分な注意を怠り、築造に一つでも不備な点があったら全装置は爆発して私もろとも粉々になったかもしれないのであります。

第2の炉も無事点火できました。引き続き一つ一つ円満に点火できてゆきました。実は16の炉が全部無事スタートするまで本当の安心はできないのでありますが、第8の炉の点火を無事に終えて、あとの分について自信がでた時、私は自分の部屋に走り帰り、喜びと満足の感で声をあげて泣きました。そして神に感謝致しました。神は乾燥期間中好天候を保ってください、睡眠不足と多忙で痩せ衰えた肉体にもしっかりと強い精神力を与えてくださったのです。

かくて大仕事は無事安全と満足のうちに終わりました。機械類も皆スムーズに運転をはじめました。

16門すべてがスタートした時、社長の外山氏がこられ、多くの職工の前で感慨深く眼に涙をうかべて無言のまま私の手を固く握りしめられました。(後略)

5.4 海外からの技術導入

釜石、八幡における、外人技術者の設計ミス、日本技術者により修正、成功させていることについて野呂景義は、鉄鋼協会創立、刊行され出した学会誌「鉄と鋼」創刊1号から数回にわたり「本邦製鉄事業の過去及将来」なる論文を書き、次のように述べている。すなわち、「抑々工場全部の設計及び操業を外国人に委するの可否については、大いに考慮すべきことなり。我が鉱業に関しては、佐渡・生野・院内・阿仁・小坂等における外国技術の成績を見るに、何れも不良にして、殊に製鉄業、即ち釜石及び八幡製鉄所の製鉄業の如きは皆失敗に終り、我が技術者に依りて初めての成功したるの例を見れば、思ひ半ば過ぎむ」である。

釜石、八幡の両所でいわば後始末をすることになった野呂の発言であるが、背景に明治政府による官営事業における海外技術最優先のフルセット導入の方針がある。

不成績の原因のひとつに外国人技師の雇用及び使用方法の失敗が指摘されているが、八幡のケースでドイツ人技師を顧問でなく直接に日本人職員の上司として作業を指揮させるという和田長官のやり方は失敗に終わった¹³⁾。「外国技師備聘以来其技量及執務ノ状況ヲ看、尚外国技師ト本邦技術官及職工等トノ関係ヲ觀察スルニ、大ニ予想ト反シ、独り予期ニ副ハザルノミナラズ、永ク現状ヲ将来ニ維持セントセバ、却チ大禍害ヲ醸スノ虞アルヲ認ム」というのが和田の結論で、高炉作業開始後数か月しか経ていない1901 (明治34) 年4月には、トッペら3人の外人技師の地位をもとの顧問技師にもどし、さらに同月末にはトツペとシュメルツェルを解雇したのである。

和田自身はこのような結果招いた要因として、外人技師の経験技量の不足、言語不通による齟齬、邦人技術者や職工との感情上のいきちがい、邦人技師との待遇の差 (に対する邦人側不満) などをあげているが、これらは、技量の問題を除くと製鉄所に限らず外人を雇傭する以上は避けられない問題である。

しかし、1876 (明治9) 年に東京医学校の教師として招聘されそれ以来滞日二十数年にわたり日本女性を妻としたベルツは日本滞留25周年記念祝宴の演説 (日記; 1900 (明治33) 年11月22日) で、日本では西洋の科学の「成果」のみを受け取ろうとしていて、成果をもたらした精神を学ぼうとしないと述べ、日本ができるだけ早く外国人教師の助けを借りずに自立することを (以下のコラムのように) 訴えている。

ベルツは和田に会って八幡における外人技術者の処遇について会話をしたらしく (日記; 1900 (明治33) 年1月2日)、その時点でドイツ技術者を日本人職員の上司として作業を指揮させる和田方式の結果に期待している。

わたしの見るところでは、西洋の科学の起源と本質について、日本ではしばしば誤った見解が行われているように思われるのであります。(日本の) 人々はこの科学を、年にこれだけの仕事をする機械であり、どこか他の場所へたやすく運んでそこで仕事をさすことのできる機械であると考えています。これは誤りです。西洋の科学は決して機械ではなく、一つの有機体と同様に一定の気候、一定の大気が必要なのであります。しかしながら地球の大気が無限の時間の結果であるように、西洋の精神的な大気もまた自然の探求、世界の謎の究明を目指して幾多の傑出した人々が数千年にわたって努力した結果であります。(中略)

西洋各国は諸君に（これら精神を日本に植え付けるべく）教師を送ったのでありますが、…もともとかれらは日本の科学の樹を育てる人たるべきで、そうなるうと思っていたのに、かれらは科学の果実を切り売りする人として取り扱われたのでした。…

釜石、八幡のお雇い技術者と大学教授の力量と認識を同列には扱えないとは思いますが、招聘する政府と来邦者双方の意識にミスマッチングがあったことは確かと思われる。また、結果的には国内原料の使用により失敗したとはいえ、設備的には当時として一流設備が移入されていた訳であり、反射炉の延長上でゼロから始めて試行錯誤をする無駄が省けたことも確かである。

何はともあれ、結果的に外国人技術者が不成功に終わった事業の課題を日本技術者が解決し、その意味ではベルツの期待が実現したことになる。

参 考

- 1) 餅鉄：小石状の磁鉄鉱石，たたら原料。
- 2) 彼島秀雄，高炉技術の系統化平成 21 年度 技術の系統化調査報告，国立科学博物館，p.102, 2010.
- 3) 鉄と共に 100 年，新日本製鐵 釜石製鉄所，1986.
- 4) 殖産興業、富国強兵を目的として官営事業を興したものの業績が上らず、その立て直しの一環として民業への移管が図られた。
- 5) 田中長兵衛（1834 年生まれ）は、鉄屋の屋号で安政年間に麻布飯倉において金物商を開いていたが、三田の薩摩屋敷への出入りが許されるようになると薩摩屋敷の出入り商人となった。明治維新以後、官省御用達商人となり、陸海軍のまかない方を引き受け蓄財が進んでいった。
- 6) 日本鉱業会誌，8，8，1891.
- 7) 野呂がこれに先立つ 1890（明治 23）年に、深川の古河骸炭製造所で粘結性の弱い国産炭のコークス化を試みており、この成果を元に設計したコッペー式コークス窯を建設してその成果が活かされたと思われる。
- 8) 中島邦雄（政策研究大学院大学）重要課題解決型研究などの推進」プログラム「我が国の科学技術行政の関する歴史的考察」第 4 章製鉄事業の発祥と展開。
- 9) 八幡製鉄所五十年誌，八幡製鉄所（株），八幡製

鉄所，1950.

- 10) 東田高炉火入れの翌年（1902 年）長官が和田維四郎から中村雄次郎に交代している。
1901 年 11 月に官営八幡製鐵所開業式がおこなわれたものの、製鐵所の業績はかんばしくなく、創立費予算の不足による財政的破綻が明らかになり、これまで創立費予算として約 1,900 万円を投下したにもかかわらず、1901 年度末には製鐵所は未完成のまま行き詰まってしまったのである。長島修：「立命館経営学」第 46 卷，11 月，p.187, 2007.
- 11) 三池炭鉱の歴史（技術教育研究会・会報「技術と教育」10 月号（通巻 334 号），2001.
<http://www.gijyutu.com/ooki/tanken/tanken2001/gikyouden/gikyouden.htm>
1469（応仁 3）年 農夫の伝治左衛門が薪集めの途中、三池郡稲荷山（現在の大浦町付近）で焚火をしているうちに、そばの黒い石に火が燃え移り「燃える石」（石炭）を発見したと言われる。
1721（享保 6）年 平野山炭山が柳川藩営となる。
1738（元文 3）年 稲荷山炭山が三池藩営となる。
1873（明治 6）年 三池炭鉱が官営となる。良質の「三池炭」が国内だけでなく中国やイギリスなどに輸出される。
1889（明治 22）年 官営三池炭鉱が三井組（三井財閥）に払い下げられ、三井三池炭鉱となった。
1892（明治 25）年 三池横須浜にピーハイブ炉（コークス炉）が完成。
- 12) 眞田雄三「わが国におけるコークス製造技術の変遷と関連する基盤研究」鉄と鋼，96（5），pp.186-195, 2010.
- 13) 下村孝太郎（1861～1937）1885 年渡米し、マサチューセッツ州ウースター市（ボストン郊外）のウースター工科大学（Worcester Polytechnic Institute）で化学を専攻した。さらに、ジョンズ・ホプキンス大学の大学院でアイラ・レムセンに師事して有機化学の研究を始めたが、新島襄から新設の理学部設立を主宰することを要請される。1890 年創立の科学高等教育機関、同志社ハリス理化学校（現在の同志社大学工学部の前身）の教頭に就任する。教頭時代にもレムセンとの研究に従事し、化学工業界での業績を残した。
- 14) 佐々木亨：専修大学現代文化研究会会報 Vol.88，8 月，1989.

6 | 我が国コークス工業の発達

第2次大戦前のコークス工業の発達は以下の三期に分けて説明することができる¹⁾。

6.1 第一期 (小型コークス炉時代)

第一期は第5章に述べたコークス製造技術の海外からの移植試験時代であり、炉式は「ビーハイブ」「ハルデー」「コペー」および「ソルベー」式さらに官営八幡製鉄所における「コッパース炉」導入迄であるが、これらの諸式は日産4トン以下の小型炉である。このうち「ソルベー」は余熱を蒸気で回収するとともに発生ガス中のアンモニアとタールを回収する初めての副製品回収タイプである。

我が国におけるコークス製造は野呂景義が古河鉱山にて研究を始めた1885(明治18)年に遡る。最初ビーハイブ炉でスタートしたが後にコペー式に改め、ここでジャガー式洗炭機を使用するとともにコークス排出に工夫を加えてコークス製造を実現している。また、この研究過程でコークス品質を左右するのは炉の構造ではなくむしろ原料炭の配合であることを見出し、1893(明治26)年に従来夕張炭のみの場合の亀裂の発生を肥前大田炭の配合により回避し堅牢なコークスを得ている。

1894(明治27)年11月釜石改修高炉が完成し、最初は木炭によりスタートし火入れ後10日で定常運転となる。前年の1893(明治26)年建設着手、野呂の設計によるコペー式コークス炉36門による夕張炭を原料としたコークスに切り替えて操業したところ出銑量が一躍増加したとしている。

この時のコークス炉寸法は室幅1.65m、高さ1.4m、長さ6.6m、装入炭5t/室、炭化時間46時間でありそのほかジャガー式洗炭機、及び押出機を装備している。このように古河鉱山における野呂の研究成果がそのまま釜石の生産現場に活かされていることがわかる。

官営八幡製鉄所における「コッパース炉」移植以前の第一期における経過は以下のようなことになる。

すなわちコペー式炉を使用した配合炭の研究により、揮発分が多く粘結膨脹性大な夕張炭を主成分とし、適当な配合炭を加へて優良コークスの製造に成功したことによって1894(明治27)年釜石における36基の建設、これに続く1898(明治31)年三井鉱山三池、1901(明治34)年北海道炭鉱追分、1904年(明

治37年)官営八幡製鉄所の36基など、コペー式炉の建設が相次ぎ、明治の末には全国で182室の炉が稼働した。また1914(大正3)年黒田の海外調査に基づいて導入されたコッパース式炉はコペー炉と同じ垂直焔道であるが、この時点では蓄熱室はない。しかし1912(明治45)年三井三池炭鉱、1914年には東京瓦斯砂村製造所で蓄熱式コッパース式炉を輸入建設して、以後、拡張・新設工場では蓄熱室付垂直焔道式が主流となる。

小型コークス炉時代における各炉形式のコークス生産量を表6.1に示す。

表6.1 各炉形式のコークス生産量

	加熱形式	焔道	生産(トン/年)
ビーハイブ	直接加熱		100,000
コペー	間接加熱	直立焔道	126,000
ハルデー	間接加熱	水平焔道	43,000
ソルベー	間接加熱	水平焔道	200,000

小型コークス炉時代においては構造が堅牢で操業が容易な水平焔道式が現場に受け入れられたことがわかる。

6.2 第二期 (本格的海外技術導入期)

第二期はコッパース蓄熱式副産物回収炉移植に始まり欧州大戦終了に終わる時期で、日露戦争後における製鉄業その他諸工業の勃興及び世界大戦の好況よりコークス炉の建設、拡張が行われた。炉式は「コッパース蓄熱式」「ソルベー複熱式」「ウイルプット蓄熱式」など近代式の炉が建設され一室の生産能力は第一期に比べて約2倍に増えている。なお、戦時中の急激な需要増に対して建設費の安いビーハイブ炉が一時的に建設されている。また、副産物のタールなどは自動車その他の内燃機関用燃料、木材防腐、道路舗装に利用され始めたのみならず、さらにこれを加工する火薬や染料製造業が勃興した。

釜石製鉄所のケースを図6.1に官営八幡製鉄所の事例図6.2に示す。

図6.1に中国地方のたたらによる銑鉄生産量が示されているが、コークスの使用が始まるとたちまちたたら銑を追い越している。

戦時中の一時的な需要増に應えるためビーハイブ炉を建設し対応しているが大戦が終わるとビーハイブを廃棄するとともに、1894年「我が国初のコークス高炉」以来親しんだコペー炉も近代コークス炉である

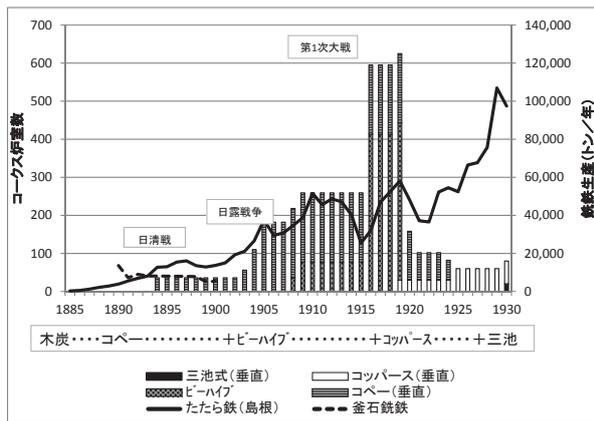


図 6.1 釜石製鉄所における銑鉄生産とコークス炉建設の推移

コッパースに置き換えている。なお、最後に登場している三池式コークス炉は 1892 (明治 25) 年のビーハイブ以来、1898 年のコペー式、1912 年のコッパース蓄熱式炉を経験した三井鉱山三池炭鉱の牧田環氏が考案した形式でコークス炉加熱室を 4 組ないしは 4 の倍数の組に分け、4 組毎に両端の 2 組と中間の 2 組を交互にガスを切り替えて燃焼させ、かつ水平焔道により加熱室の状況を通して観察可能とした構造で、これにより炭化室の加熱を均等化することを意図している。このタイプの炉は釜石以外では 1912 (大正 13) 年とその翌年日本製鋼所の輪西工場 (室蘭市) に設置されている。

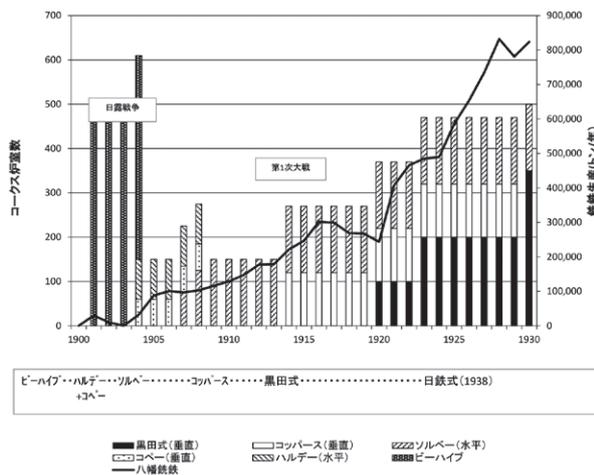


図 6.2 八幡製鉄所における銑鉄生産とコークス炉建設の推移

5.2 項で述べたように、八幡では装入原料品位の裏付けなどがなく、ドイツ人技師による全面的指導という形をとった 1901 (明治 34) 年の 160 t 高炉のスタートは平均 76 トン/日という設備仕様の半分の生産で、538 日目に操業中止、結局ドイツ人技術者を解雇し、釜石での経験を有する野呂らが自力で操業確

立することで始まった。

問題のコークスは予定されたコペー炉が予算の関係で建設が間に合わず、高炉用コークスに対する認識がないままに、1892 (明治 25) 年三井三池が横須浜に建設したビーハイブ炉で製造されたものを使用したものである。

官営八幡製鉄所のスタート時の所内コークス炉については図 6.2 に示すように高炉の稼働から 5 ヶ月遅れた 7 月にビーハイブ炉がやっと完成している。しかし釜石で実績の確認されている当初予定のコペー炉ではない。

ビーハイブ炉は築造が低廉で操業も容易なため初期において多用され、その後改良されたコークス炉が建設されたのちも緊急の需要対策として利用された。その加熱方法は炭化室内部の天井からの反射熱により、装入炭層の上部より加熱するもので、炭化が徐々に行われる関係上揮発物多く膨張性大なる石炭にも、揮発物少ない石炭にも適用可能で、劣質石炭を使用せざるを得ない我が国では、歩留まりが良好でないにもかかわらず製鉄所以外の事業所でも緊急避難などの目的で寿命を永らえた。

釜石での経験を活かしたコペー炉が八幡で完成するのは 1904 (明治 37) 年、さらに大阪舎密工業 下村の指導による副産物回収の本格的コークス炉のソルバー炉は 1907 (明治 40) 年～1909 (明治 42) 年にかけて完成する。

1914 (大正 3) 年の蓄熱式を欠いたコッパース炉導入を経て、1916 (大正 5) 年の欧米視察結果を反映しヘアピン式燃焼室を特徴として 1919 (大正 8) 年に建設された黒田式コークス炉は、蓄熱室を備え生産性、熱効率に優れ、コッパースやオットーなど海外メーカーに影響を与えたとされる。

なお、ビーハイブとソルバー炉の間につながりとしてコペー炉と共に導入された「ハルダー炉」はその構造が、内部加熱式である「ビーハイブ炉と外部加熱式の中間にあり、炉室内天井よりの反射炎にて加熱されるのみならずその余熱を三段の水平焔道に導くことによって側部および底部よりも加熱されることによって炭化時間は 36～48 時間に短縮されたが、炭化進行方向が不規則となるため粉コークスの産出が多くなる欠点を有した。官立八幡製鉄所において 1904 (明治 37) 年第一高炉復活に際し仮コークス炉として 90 門築造されたが、ソルバー炉が立ち上がった時点で 1909 (明治 42) 年廃棄されている。

1919 年 (大正 8 年) ごろの各炉形式でのコークス生産量を表 6.2 に示す。

表 6.2 各炉形式でのコークス生産量

	加熱形式	焔道	生産(トン/年)
ピーハイブ	直接加熱		300,000
コペー	間接加熱	直立焔道	130,000
コッパース	間接加熱	直立焔道	730,000
ウイルプット	間接加熱	直立焔道	160,000
ソルベー	間接加熱	水平焔道	300,000

明治の末年ごろ最大の生産を行っていた水平焔道方式は大戦直後の1919(大正8)年の頃には生産高を5割程度伸ばしているものの、コッパースなどの直立焔道方式の約三分の一に過ぎない。先に3.3項で述べたように生産量増のためコークス焔炭化室の容積を増やしたいというニーズ、同時に製品品質を確保するためには広くなった炭化室の均一加熱が必要であることから、焔の高さ方向、長さ方向についてきめ細かい燃焼制御が可能であり、熱効率改善のための蓄熱室とのガス流路の整合性の良い垂直焔道方式に移行し、ソルベー焔のような水平焔道方式は次第に姿を消していった。

6.3 第三期(我が国独自路線の始まり)

第三期は第1次大戦終了後の引き続いた拡張期であるが、ここで特徴があるのはこれまでの海外技術の導入・模倣を脱し、黒田式、三池式など我が国独自の発明による焔が建設され始めることである。

我が国コークス工業は世界大戦中内地はもとより朝鮮満洲においても異常の発展を遂げ、本溪湖、兼二浦、鞍山の各製鉄所相次いでコークス製造を開始したが、1920(大正9)年に引き続き1922年の東洋製鉄、神奈川コークス、1926年本溪湖に黒田式コークス焔が建設され、漸く従来の欧米模倣時代を脱し日本に名前の付いたコークス焔が誕生する。

ここまで釜石および八幡に代表される製鉄所内に建設されたコークス焔について述べてきたが、コークス焔としては後にガスやコークスを生産・販売する会社となる石炭鉱山系の企業が存在する。そもそも野呂景義がコークス研究を始めたのは古河鉱山のコペー焔であったが、ここはその後1910(明治43)年東京瓦斯に買収される。また、官営八幡製鉄所は高焔の火入れにコークス焔が間に合わず、1892年三井三池が横須浜に建設したピーハイブ焔で製造されたコークスを使用したのは先に第5章で述べたとおりである。

世界大戦中列強は燃料国策の極めて重要であることを認識し、競って燃料研究を開始したが、我が国でも1920(大正9)年国費百万円を投じて商工省に燃料研究所を新設した。

燃料研究所における研究項目には、コークスの性質並びにコークス化現象の研究を基調とする混炭方法の合理化と、更に進んで弱粘結および非粘結炭をコークス化する処理法が挙げられており、我が国における優良石炭原料の欠乏を補填する意図が見て取れる

製鉄所内に設置された自家用コークス焔に、ガス会社で販売用としてコークスを製造するケースなどを含めたコークス焔の築造の第三期の推移を図6.3に示す。

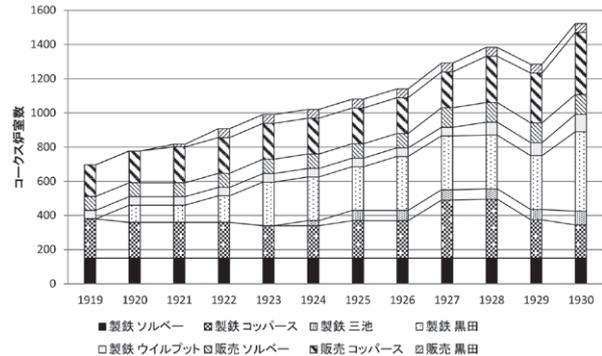


図 6.3 各コークス焔形式の築造推移

第1次大戦終了から昭和の初期にかけて、これまでの海外技術の導入・模倣を脱し、黒田式(日鉄式)、三池式など我が国独自の発明による焔が建設され始めたことがわかる。

各形式によるコークス生産実績を図6.4に示した。

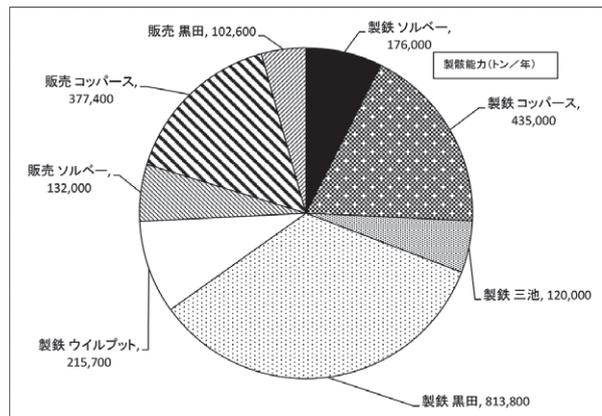


図 6.4 各焔形式によるコークス生産実績

製鉄用コークス生産では黒田式が、ガス製造やコークス販売分野ではコッパースが首位となっている。

6.4 コークス焔の種類(各論)²⁾

(1) 焔体構造

今日稼働中の室焔式コークス焔は、図3.1の例(新

日鉄 M 式) に示したとおり、炉体の下部に蓄熱室があり、その上部に燃焼室と炭化室とが交互に配列されている。燃料ガスおよび空気(富ガスの場合は空気のみ)は蓄熱室で予熱され、燃焼後隣接する蓄熱室で熱回収されたのち、煙道を経て排出される。

コークス炉にはコークス炉ガス(COG、富ガス)のみを燃料とする単式炉(例外的に貧ガス単式炉もある)と、高炉ガス(BFG、貧ガス)、コークス炉ガスのいずれも使用できる複式炉とがある。

コークス炉の構造上の特色としては、燃料、空気の供給方法、蓄熱室の配列、燃焼室の構造などが上げられる。燃料、空気の供給方法には、ガンタイプとアンダジェットタイプとがある。

ガンタイプとは、炉体下部側面より供給するもので、炉長方向のガスと空気の分配調整は、燃焼室内のバーナ開度を調整するもの、蓄熱室下部に設けた調整板(ノズルプレート)によるもの、DKH 炉のように炉底部の水平炎道(以下ソールフリーと称す)を細分化して、それに分配調整機構を取り付けたものなどがある。

アンダジェットタイプは炉底よりパイプにより供給するもので、各パイプ内にオリフィスなどを取り付け、その孔径などを調整することによって、炉長方向

のガス、空気の分配を行なうものである。炉長方向の温度分布に対しては有効で操作も比較的簡単であるが、パイプなどの保全に人手を要する。

燃焼室については、2 分割タイプ、多分割タイプ、ヘアピントイプなどがあり、特異な構造としてクロスオーバタイプがある。また蓄熱室の配列には 2 分割タイプと多分割タイプがあり、多分割タイプには 1 燃焼室に 1 蓄熱室を対応させたものから、数燃焼室を対応させたものなど多種類のものがある。

燃焼室の構造は幾つかのタイプに分類されるが、蓄熱室の構造はそのコークス炉固有の構造を持っている。即ち、ヘアピン式燃焼室は日鉄式、コッパース式及びオットー式とも共通であるが、その蓄熱室の構造はそれぞれ固有の構造を有している。

又、どのコークス炉でも逐次部分的な改造は進められているが蓄熱室・燃焼室の基本構造は維持されている。

表 6.3 に各種コークス炉の特徴を蓄熱室の形式、燃焼室以降のガス流れについて示す²⁾。

(2) 燃焼方式

近年、コークス炉の大型化にともなって炭化室上下方向の温度分布を均一化するよう燃焼方式その他につ

表 6.3 代表的なコークス炉の特徴

コークス炉	蓄熱室	燃焼室(加熱室)	ガスの流れ
1) コッパース式	2 分割式 (2 分割式蓄熱室と燃焼室を結ぶクロス焰道方式)	ヘアピン (燃焼ガス再循環式、上部補助加熱焰道方式)	
2) カールスチール式	2 分割式 (蓄熱室はほぼ中央で 2 分割)	2 分割 (上部水平焰道方式、多段燃焼方式、COG は単段バーナー)	
3) DKH 式	2 分割式 (蓄熱室は底部に独立したソールフリーを持つ。2 分割流量制御式)	2 分割 (上部水平焰道方式)	

コークス炉	蓄熱室	燃烧室 (加熱室)	ガスの流れ
4) ウイルプット式	4分割式 (2つの OUTERゾーンと2つの INNERゾーンを持つ)	4分割 (上部水平焰道方式)	
5) オットー式	多分割式 (蓄熱室を小室化して"対"の燃焼室を持つ)	ヘアピン (高低バーナー式による2ステージ燃焼方式)	
6) 日鉄式	多分割式 (蓄熱室は空気室とガス室を交互に配置)	ヘアピン	

いて以下のような工夫がなされている。

(1) 多段式バーナ

ガス燃焼を高さ方向に数段に分けて行なう。

(2) 高低バーナ

燃焼バーナに高低2種類のものを使用する。富ガスの場合が多いが、貧ガスのものもある。1 燃焼室内に高低2つのバーナを取り付けた、いわゆる2ステージ燃焼方式のものもある。

(3) 燃焼廃ガス循環

廃ガスの一部を燃焼室内で循環させ、燃焼を遅らせることにより、長炭化を計る。

(4) 炭化室寸法および壁厚の変更

炭化室上部を下部より狭くし、壁厚を薄くする。

KIGS 報告書ではそのあとがきで「室炉式コークス炉を設計するのに必要な、ガスの分配や流れの抵抗に関する工学的理論は確立しておらず、設計者が失敗から学び、手探りで確証のない試みを実行していく試

行錯誤的な苦心努力の積み重ねがコークス炉の歴史でなかろうか」とした上で、「ここでは他式コークス炉の機能的な特徴には触れないが、どのコークス炉にも長所、短所があると考えるのが妥当であろう」と結んでいる。

6.5 代表的コークス炉の概要

現在我が国で稼働中のコークス炉は、改修により導入時の仕様の一部が変更されていると思われるが基本的な構造は変わっていないと思われる。各コークス炉の構造と特徴を鉄鋼便覧より引用する。

6.5.1 カールスチル (Carl Still) 式³⁾

多段燃焼式の代表的な炉であり、1964 (昭和 39) 年川鉄化学 (現在 JFE 東日本) に初めて導入され、わが国のコークス炉大型化の契機となった。最近では

1976 (昭和 51) 年日本鋼管 (現在 JFE 東日本) 京浜製鉄所扇島に炉高 7.55m のものが稼動を開始したが、単一の炉容積としては現在でも最大である。

この炉の基本構造は燃焼室、蓄熱室とも 2 分割構造であり、燃焼室仕切壁内に設けたダクトから、空気および貧ガス (富ガス燃焼時は空気のみ) が、6 段に分かれて供給され燃焼するため、上下温度差は少ないといわれる (図 6.5)。

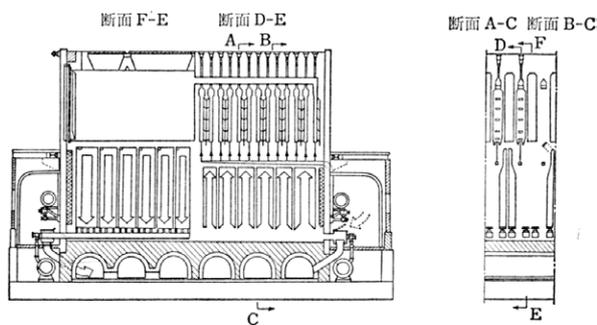


図 6.5 カールスチル (Carl Still) 式コークス炉³⁾

6.5.2 コッパース (Koppers) 式⁴⁾

現在わが国で稼動中のものでは新日鉄住金鹿島製鉄所及び日本コークス北九州事業所の炉高 7.125m のものがこのタイプでは最も大きい。この炉の特徴は、廃ガス循環方式により長炎化を計っていること、燃焼室上部に補助炎道機構を有し炉頂部温度調整を計っていること、炭化室上下で炉幅を変更していることなどが上げられる。複式炉の炉体では蓄熱室は 2 分割式を採用し、燃焼室はヘヤピンフリーユを採用している。そのため蓄熱室と燃焼室の中間部に水平交道を配する構造となっている。

最近の単式炉では、蓄熱室は炉団方向に空気室と廃ガス室とが交互に配列され、富ガスはアンダージェット方式により、高低バーナで燃焼させる方式が多い。

なお、和歌山 No.1~No.5 はコッパース式である。

6.5.3 オッター (Otto) 式⁵⁾

わが国では川鉄・千葉、関西熱化学、大阪ガス、三菱化成など古くから採用している炉で、大阪ガスによって開発された貧ガス、空気を含む全アンダージェット方の大ガス・オッター式など各種の改良型がある (図 6.7)。

複式炉では、1 つの炭化室の下に、貧ガス用、空気用の 2 つの蓄熱室を配置し、各蓄熱室は各 1 組フリーユごとに 1 蓄熱室が対応するよう仕切壁で細分化されている。

燃焼室はヘヤピンタイプであり、最近では高低バー

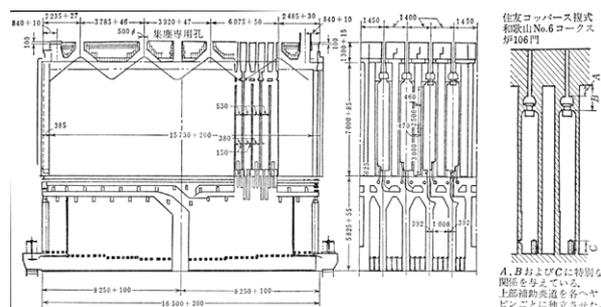


図 6.6 コッパース (Koppers) 式コークス炉⁴⁾

ナをさらに改良し、2 ステージ燃焼方式を採用したものもある。炉長方向のガス、空気分配制御には、ソールフリーユと蓄熱室下部との中間部に鉄板製のノズルプレートを取り付け、炉側部より調整ができるようにしてある。

単式炉では蓄熱室と燃焼室とを結ぶ交錯カナル部の構造が簡単となる (図 6.7)。

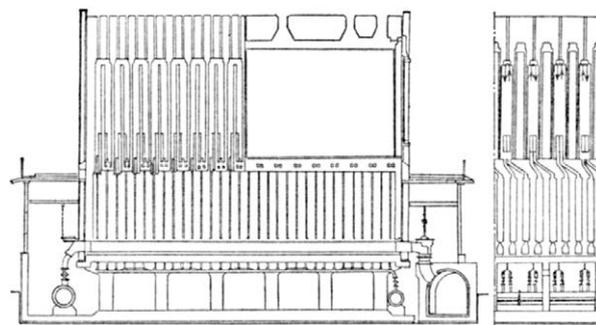


図 6.7 オッター (Otto) 式コークス炉⁵⁾

なお、日本鋼管 (現在 JFE 西日本) 福山製鉄所には炉締金物などにウイルプット式の長所を取り入れたウイルプット-オッター式コークス炉がある。

6.5.4 新日鉄 M 式³⁾

日鉄式コークス炉を大型化したもので、1968 (昭和 43) 年新日本製鉄化学工業君津製造所 (新日鉄住金に移管) に第 1 号炉が建設された。上下方向の温度分布の均一化を計るため、3 段燃焼方式とし、最上段のポートにスライドれんがを設けて、上下方向での温度分布調整ができる構造にしている。蓄熱室は炉長方向に多分割され、燃焼室はヘヤピンタイプである。蓄熱室と燃焼室を結ぶカナルの形状をすべて等しくし、流速抵抗を同一にするよう工夫されている (図 6.8)。

6.5.5 新日鉄 S 式³⁾

シンプルで低廉な炉を目標に開発されたもので蓄熱室、燃焼室とも 2 分割タイプであり貧ガスはガンタイ

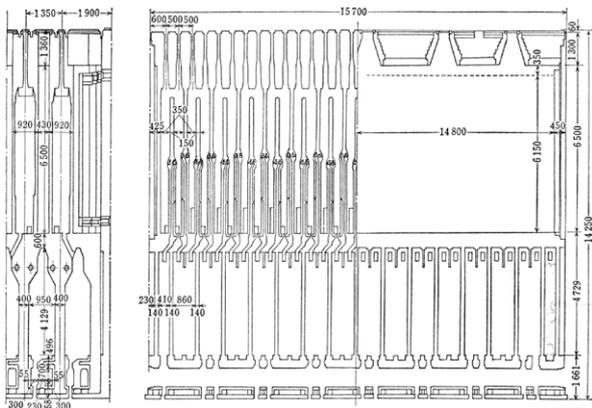


図 6.8 新日鉄 M 式コークス炉³⁾

プで供給し端フリュー昇温用として富ガス混焼が行なえる構造となっている。富ガス燃焼時にはガスはアンダジェットで供給される(図 6.9)。1970(昭和 45)年新日鉄名古屋に建設された。

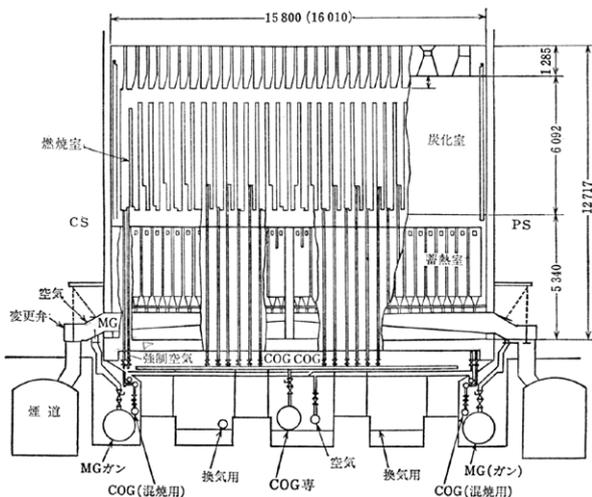


図 6.9 新日鉄 S 式コークス炉³⁾

6.5.6 ウイルプット (Wilputte) 式³⁾

1966(昭和 41)年に日本鋼管(現在 JFE 西日本)福山製鉄所に建設されたものは、4分割複式炉で炉高 5.1m である。この炉の特徴は蓄熱室が 3セルに分割されており、貧ガスはガンタイプ、富ガスはアンダジェットタイプで供給される。貧ガス、富ガスとも高低バーナを設置しており、高さ方向の温度分布の均一化を計っている(図 6.10)。

福山製鉄所では 7.3 項で後述するように、大型化の課題に対してウイルプット・オットー式としている。

6.5.7 DKH (Didier-Kogag-Hinselman AG) 炉³⁾

1964(昭和 39)年に新日本製鉄広畑および名古屋

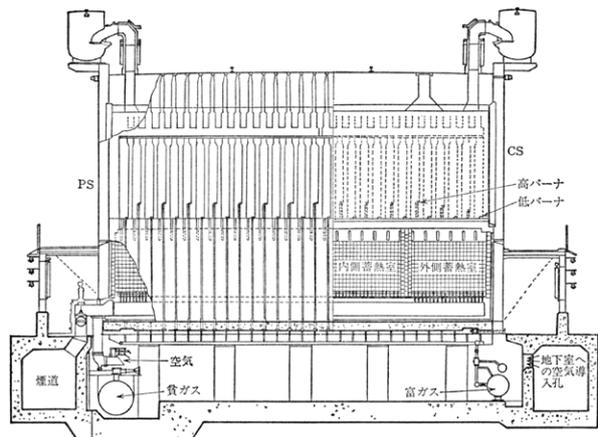


図 6.10 ウイルプット (Wilputte) コークス炉³⁾

製鉄所(現在新日鉄住金)に導入された炉で、いずれも高さ 5m である。蓄熱室、燃焼室とも 2 分割タイプであるが、炉長方向に細分割された個々の蓄熱室は、その底部に独立したソールフリューを有しており、このソールフリューは開孔面積の調整可能な変更弁とつながっており、ガスおよび空気の分配制御をこれによって行なう構造となっている。貧ガス燃焼ではガス、空気とも単段燃焼で、端フリューのみ 2 段燃焼を採用している。この型式で 6m を越えるコークス炉では、2 ステージバーナ、ダブルヘヤピン方式などが採用されている(図 6.11)。

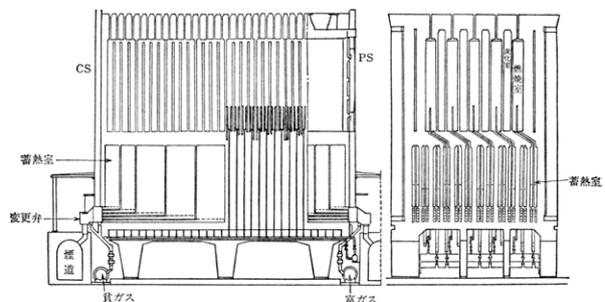


図 6.11 DKH コークス炉³⁾

参 考

- 1) 日本鉱業発達史(中巻)第三章 骸炭の製造 第二節 本邦骸炭工業の発達, 鉱山懇話会, 1932.
- 2) 「八幡製鉄所の設備・技術の変遷」第 2 分冊 コークス製造設備: 北九州産業技術保存継承センター p.94~99 より著者編集, 2008.
- 3) 鉄鋼便覧(II)第 3 版, 図 4.29, 図 4.32, 図 4.33, 図 4.34, 図 3.35, 2008.
- 4) コークスサーキュラー 21, 3, p.1651, 1974.
- 5) 燃料協会, 新版: 燃料便覧, p.161, 1974.

7 | 第2次大戦中以降のコークス炉

経済成長期に新日鉄の製鉄部門を総括する立場にいた石川は第2次大戦末期から終戦、そして復興から経済成長期におけるコークス技術の推移を以下のように振り返っている¹⁾。

7.1 第2次大戦中から終戦

1944（昭和19）年8月20日、八幡製鉄所が第2次空襲に見舞われた。洞岡の第2コークス課区域は500ポンド爆弾35発を被弾し、コークス掛の6名が殉職した。第4コークス炉（黒田式複式炉75門）は炉中央部に被弾した。一時全面休止したその他のコークス炉は、7日後に生産を再開し、被弾した第4コークス炉の修理は47日間を要して、57窯を復活再開した。

戦争末期に入った1944（昭和19）年末、高炉は30基稼働しており、これに対応するコークス炉は31炉団が数えられた。その炉型式を見ると、日鉄式15炉団902門（49%）、黒田式12炉団750門（41%）、オート式2炉団140門（8%）、コッパース式44門（2%）であった。

1945（昭和20）年年初め、高炉用コークスを生産していたコークス炉は全国で12工場、32炉団、1815門が数えられる。空襲は逐次激化し、主要工業地帯、大都市更には全国の小都市に到るまでが、大量の焼夷弾攻撃により消滅していった。釜石、室蘭など数都市が艦砲射撃を受け破壊された。日本鋼管（現在JFE東日本）では1945年7月、扇町コークス工場が被爆した。第1コークス炉は500ポンド爆弾の直撃を受けた。既に石炭が不足して50%以下の極度の低稼働率になっていた、第2、第3コークス炉もこの空襲により休止に到った。終戦の日に稼働していたのは、大島第4コークス炉のみであった。

このような状況の下、8月15日の終戦の日の稼働コークス炉は15炉団に半減していた。その後、さらに原料炭不足、枯渇、従業員の不足の為、逐次休止してゆき、終戦翌年の1946年末の稼働コークス炉は僅か7炉団となっていた。

1947年の傾斜生産方式²⁾による経済復興の効果が上がり始めるとともに、各コークス工場で、休止コークス炉の復旧再開が図られた。しかし、突発休止したコークス炉の再開作業は大工事である。八幡をはじめ日本鋼管（現在JFE東日本）の各事業所においてそれぞれに大変な努力をしたことが伝えられている。

室蘭仲町、釜石、東京ガス末広等10炉団が逐次修理し、生産を再開したが残りの10数炉団には再開の機会が与えられることは遂に無かった。

しかし、休止したコークス炉の再開に関する実績は、同じような社会状況におかれたドイツにも多くあるが、休止時の冷却状況と休止中の保守の程度により、復旧の方法は異なるとはいえ、コークス炉は、その状況を正しく判断し、適正な修理を行えば、経済性は別として、正常な状態に復旧されると石川は分析している。

7.2 戦後の復興期

1950（昭和25）年の八幡・富士への日鉄解体に続き、1951年には銑鉄の価格統制、配給統制が撤廃され、高炉4社（八幡、富士、日本鋼管、小倉製鋼）の平炉向け銑鉄はフリーマーケットになった。

このため、平炉メーカーは銑鉄の供給を安定させるため、自ら高炉を持ち、銑鋼一貫体制を目指すことになる。川崎製鉄は千葉製鉄所（現在JFE東日本）を1953（昭和28）年創設し、住友金属は先ず1953（昭和28）年小倉製鋼を併合し、更に1961（昭和56）年和歌山製鉄所（現在新日鉄住金）を建設する。神戸製鋼は1958（昭和33）年神戸製鉄所を作り、日新製鋼は1962（昭和37）年呉製鉄所を建設した。八幡、富士、日本鋼管の3社は高炉を増強した。

1951（昭和26）年から1955年の産業合理化審議会の第1次合理化計画の結果、製鋼能力は16%の増に対し、出銑能力は294万トンから629万トンへと倍増した。1965年には、高炉稼働基数は34基に達し、コークス炉は24炉団が稼働するに到る。

1953（昭和28）年、川崎製鉄・千葉製鉄所が戦後初の銑鋼一貫製鉄所として建設され稼働した。当時の緊迫した資金事情からコークス炉は建設費の節減を強いられ、たまたま休止していた北海道の滝川化学（株）のコークス炉（オート単式）並びに移動機械全てをスクラップとして購入し、解体して千葉に再建された。解体に当たり、母材を傷付けぬようリベットをガスで丁寧に切り、全部品を千葉に輸送したと伝えられている。煉瓦だけは新たに購入しオート社の図面により新オート複式炉（55門）として築造。再現された。従業員も多くが滝川から千葉に移り採用され、作業技術、洗炭、配合、タール処理技術も滝川の技術

であったという。又広畑にて、従業員の訓練が行われた。こうした大変な労苦の末、戦後初の新コークス工場は操業を開始した。この第一コークス炉は、順調に稼働し、1975年まで22年間、窯出11,666本/窯、製骸量606万トン記録した。

1958(昭和33)年稼働の第2コークス炉(新オート一式60門)は、移動機械に大きな進歩が見られた。押出機はツインドライブの門型とし、レベラーを高速化し、炉の表裏の連絡装置に超短波無線を採用した。石炭装束車は嶋崎式フィーダーにより給炭時間を短縮し、消火塔は嶋崎式自動消火装置を採用して、無人化した。その他油圧リフター、スラストブレーキ、集中給油方式、等の新機能が試みられた。

1960(昭和35)年1月稼働の千葉第3高炉対応の第三コークス炉(74門、新オート式)は、わが国のコークス炉として、初めて炉高4米の壁を破り4,160mmとした。僅か煉瓦一枚の積み増しにしか過ぎないが、コークス炉の大型化に対するコークス技術者の意欲を示した。

7.3 高度経済成長とコークス炉の大型化

1960年代に入ると高炉の大型化と高出銑比により、建設されるコークス炉は一斉に大型化に向かわねばならなかった。

コークス炉の製骸量は、次式に依って表される。

炉団製骸量(T/D) = 一窯当たり製骸量 × 一日当り窯出本数

一窯当たり製骸量 = 炉幅 × 炉高 × 炉長 × 装束密度 × 歩留

一日当り窯出本数 = 装備門数 × 稼働率
= 装備門数 × (24 / 炭化時間)

炭化時間 = C × (炉幅)ⁿ (ある炉温において)

n = 1.7~2.0 (フリー温度(燃焼室温度)及び炉壁の熱伝導率と厚みに関係)

つまりコークス生産速度を上げるための要因は炭化炉の寸法と炉温そして装束密度であることが明らかであるが、これらの要素の間に二律背反の関係のあるものがありその効果は単純なものではない。

炉高を高くした場合、燃焼室の垂直方向の均一加熱を如何に実現するかである。高い炉高に対してはその分だけ熱を上部に与えねばならず、また高い炉高では炭柱の全収縮量(焼き減り)が大きく、炭化室頂部空間が乾溜末期に大きくなり、過熱によるカーボン付着

トラブルの原因となる。これを回避するためコークス工場とコークス炉メーカーは、2段バーナー(ウイルプット)、多段燃焼(オートー)、(カールスチル)、排ガス循環(コッパース)、炭化室のテーパー化(コッパース)、独立型上部加熱焔道(コッパース・住友)等の新しい方式を貧ガスと富ガスのそれぞれに応じて適用した。コークス炉の燃焼挙動は、極めて経験的な要素が強く、炉の設計も試行錯誤の繰り返しであったと言える。

炭化時間と炉幅の関係から、コークス炉の一炉団製骸量、設置門数、最高稼働率、押し出し本数の間に多数の解をもつことになる。

一炉団製骸量一定であれば、1サイクルの窯出し本数の限界に見合う最大稼働率を得る狭い炉幅を選び、設置門数を少なくして投資効率を上げる事が出来る。他方最大製骸量を得るためには、炉幅を大にして稼働率は下がるが、設置門数を多くして窯出し本数を確保することになる。

我が国の原料炭配合は欧米に比して揮発分が高く収縮率が大い。これがコークスの品質とコークス炉の熱分布制御に大きく影響することを危惧した結果、『わが国の原料炭性状から見て、炉幅400mm、炉高4,000mmが品質上最適である』と言う、戦前からのコークス炉技術指針は残っていたにもかかわらず、こうして1963年以降、最大製骸量を得る必要性のために430~460mmの炉幅が挑戦的に採用された。しかし、この時期、既に豪州炭の長期契約が成立しており原料炭は良質で且つ安定しており、かつて危惧したコークス品質の問題は殆ど起こらなかった。

炉幅の拡大は押し出し抵抗を緩和し、押出機のラムとレベラーを太く強固に出来(炉長の延長の対策になる)、巨大化する炭柱を容易に処理した。又、上昇管径が大になり、大量の発生ガスを吸引し得た。

炉長の延長は、各燃焼室へのガスの適正な分配に更に配慮された。アンダジェット、多層式ソールフリー、バーナー口径配列調整、スライド煉瓦設置等である。

炉の内容積は、高さ4m炉の21m³から飛躍的に上昇し、15年後には7m炉の60m³級(扇島1CO)に到る。一窯当たりの製骸量は、約10トンから31トンに増加した。

1961(昭和36)年以降に建設された主たるコークス炉の仕様を火入れ順に表7.1に列記する。

日本のコークス炉の大型化の過程は、その型式に見る如く、世界有数のコークス炉メーカーが競合する巨大なマーケットになった。

デーカーハー (DKH)、オットー (Otto)、コッパース (Koppers)、カールスチル (Carl Still)、ウイルプット (Wilputte) の各社である。国産技術は日鉄式 (後の新日鉄 M 式) と富士式 (後の新日鉄 S 式) であった。(第 6 章 6.5 参照)

表 7.1 1961 年以降に建設された主なコークス炉の仕様

設置年	製鉄所	炉団番号	形式	門	W×H×L(mm)
1961	富士室蘭中町	3CO	日鉄M	73	410×4,600×13,200
1962	鋼管水江	1CO	Otto	86	400×4,500×13,770
1963	大ガス堺	1CO	DG-Otto	100	450×4,500×13,700
1964	富士広畑	4CO	D.K.H	70	450×5,000×13,000
1964	川鉄千葉	5CO	C.Still	92	460×5,910×14,850
1965	住金和歌山	3CO	Koppers	76	450×5,000×14,620
1966	鋼管福山	1CO	Wilputte	94	430×5,100×14,540
1966	関熱扇町	1CO	Koppers	40	450×5,000×14,620
1967	川鉄水島	1CO	C.Still	78	435×6,456×15,750
1968	富士名古屋	3CO	C.Still	100	435×5,910×15,750
1968	八幡君津	1CO	日鉄M	90	450×5,500×15,700
1969	三菱坂出	1CO	N.Otto	100	430×6,000×15,430
1969	住金和歌山	6CO	Koppers	106	450×6,000×16,500
1969	鋼管福山	3CO	Wilputte	104	430×6,500×15,430
1969	川鉄水島	3CO	C.Still	86	435×6,706×15,750
1970	新日鉄名古屋	4CO	日鉄S	50	435×5,920×15,670
1970	新日鉄戸畑	5CO	日鉄M	110	450×6,000×15,700
1970	加古川	1CO	Koppers	60	450×6,500×15,560
1971	住金鹿島	1CO	SKoppers	154	460×7,125×16,500
1971	新日鉄君津	4CO	日鉄M	92	430×6,500×15,700
1972	新日鉄大分	1CO	日鉄S	78	440×5,625×14,930
1973	三菱坂出	2CO	C.Still	100	432×6,915×16,880
1973	三井鉱山	1CO	Koppers	92	430×7,125×16,500
1973	川鉄千葉	6CO	C.Still	102	435×6,706×15,750
1976	鋼管扇島	1CO	C.Still	124	450×7,550×17,220

炉式 日鉄.M: ; (八幡製鉄式), 日鉄.S: (富士製鉄式), C.Still: カールスチル式, Wilputte: ウイルプット式, Otto: オットー式, N.Otto: 新オットー式, Koppers: コッパース式, SKoppers: コッパース・住友式,

炉式 日鉄.M: ; (八幡製鉄式)、日鉄.S: (富士製鉄式)、C.Still: カールスチル式、Wilputte: ウイルプット式、Otto: オットー式、N.Otto: 新オットー式、

Koppers: コッパース式・、SKoppers: コッパース・住友式、

石川は八幡以外の各社が外国メーカーのそれぞれの型式を選択した経緯を以下のように総括している。

即ち、1964 (昭和 39) 年の川崎製鉄千葉第 5 コークス炉は、カールスチルの多段燃焼に着目し採用し、一気に 460mm 幅の 6m 炉にした先見性と大胆さを評価している。日本鋼管福山は、1966 年当時米国で 5m 炉として最も高生産の実績を上げていたウイルプット式を採用したが、第 3 コークス炉 (1969 年) の段階では、既にウイルプット社の大型化の設計能力に限界を感じ、炉体をオットーに設計させ、付属金物類をウイルプットに作らせて、ウイルプット-オットー式を構成し、6m 炉を完成し成功した。更に 1976 年の扇島の 7.5m 炉には、大型炉の実績の多いカールスチルを採用し、当時世界最大のコークス炉とした。又、大阪ガスによりコークス炉の操業結果から積極的に原型の改良を行い、大ガス・オットー式 (全アンダージェット化)、さらに住友金属による住友・コッパース式 (ヘアピン反転部位低下と上部補助加熱焔道の改良) と呼ばれる炉型式が誕生した。

ちなみに各事業所の建設・改修が一段落した 1992 (平成 4) 年の全国稼働コークス炉のメーカー別型式を見ると、カールスチル式 1235 門 (門数比 30%)、新日鉄式 1295 門 (32%)、コッパース式 (コッパース・住友式を含む) 1119 門 (27%)、ウイルプット式 444

表 7.2 1992 年以後のコークス炉の仕様 (その 1) (新日鉄住金関係)

製鉄所	設置年	炉団番号	1992年			2010年				
			形式	門	W×H×L(mm)	炉団番号	形式	門	W×H×L(mm)	
旧新日本製鐵										
八幡						4CO	日鉄M	90	400×4,000×13,400	
八幡	1970	5CO	日鉄M	110	450×6,000×15,700	5CO	日鉄M	110	450×6,000×15,700	
広畑	1964	4CO	DKH	70	450×5,000×13,000					
名古屋		1CO				1CO	DKH	100	450×5,000×13,590	
名古屋		2CO				2CO	DKH	110	450×5,000×13,590	
名古屋	1968	3CO	C.Still	100	435×5,910×15,750	3CO	C.Still	90	435×5,910×15,750	
名古屋	1970	4CO	日鉄S	50	435×5,920×15,670	4CO	日鉄S	82	440×6,092×15,800	
名古屋	2013	5CO	-	-	-	5CO	SCOPE21	64	450×7,500×16,000	
君津	1968	1CO	日鉄M	90	450×5,500×15,700	1CO	日鉄M	90	450×5,500×15,700	
君津		2CO	日鉄M			2CO	日鉄M	95	450×5,500×15,700	
君津		3CO	日鉄M			3CO	日鉄M	100	450×5,500×15,700	
君津	1971	4CO	日鉄M	92	430×6,500×15,700	4CO	日鉄M	92	450×6,500×15,700	
君津		4CO	日鉄M	92		5CO	日鉄M	92	450×6,500×15,700	
大分	1972	1CO	日鉄S	78	440×5,625×14,930	1CO	日鉄S	78	440×5,925×15,800	
大分		2CO	日鉄S			2CO	日鉄S	78	440×5,925×15,800	
大分		3CO	日鉄S			3CO	日鉄S	82	440×6,092×15,800	
大分		4CO	日鉄S			4CO	日鉄S	82	440×6,092×15,800	
大分	2008	5CO	-	-	-	5CO	SCOPE21	64	450×7,500×16,000	
室蘭	1961	3CO	日鉄M	73	410×4,600×13,200	3CO	-	-	-	
室蘭		5CO	日鉄	-	-	5CO	日鉄	100	430×5,000×14,200	
室蘭		6CO	日鉄M	-	-	6CO	日鉄M	42	430×6,500×15,800	
旧住友金属										
和歌山		1CO				1CO	ACRE	130	450×6,000×15,980	
和歌山		2CO								
和歌山	1965	3CO	Koppers	76	450×5,000×14,620					
和歌山		4CO				4CO	Koppers	76	450×5,000×14,620	
和歌山		5CO				5CO	Koppers	92	450×5,000×14,620	
和歌山	1969	6CO	Koppers	106	450×6,000×16,500					
鹿島	1971	1CO(AB)	SKoppers	72	460×7,125×16,500	1CO(AB)	SKoppers	72	460×7,125×16,500	
鹿島	1971	1CO(CD)	SKoppers	82	460×7,125×16,500	1CO(CD)	SKoppers	82	460×7,125×16,500	
鹿島		2CO(AB)				2CO(AB)	SKoppers	92	460×7,125×16,500	
鹿島		2CO(CD)				2CO(CD)	SKoppers	87	460×7,125×16,500	

表 7.3 1992 年以後のコークス炉の仕様（その 2）（JFE 関係）

日本鋼管 製鉄所	設置年	1992年				コークスノート2010年			
		炉団番号	形式	門	W×H×L(mm)	炉団番号	形式	門	W×H×L(mm)
水江	1962	1CO	Otto	86	400×4,500×13,770	京浜 1CO	C.Still	124	450×7,550×17,000
扇島	1976	1CO	C.Still	124	450×7,550×17,220	2CO	C.Still	74	450×7,550×17,000
福山	1966	1CO	Wilputte	94	430×5,100×14,540	1CO	-	-	-
福山	?	2CO				2CO	-	-	-
福山	1969	3CO	Wilputte	104	430×6,500×15,430	3CO	Wilputte -Otto	104	430×5,100×14,540
福山	1971	4CO	Wilputte	175	430×5,100×14,540	4CO	Wilputte -Otto	175	430×5,100×14,540
福山	1973	5CO(ABC)	Wilputte	165	430×5,100×14,540	5CO(ABC)	Wilputte -Otto	165	430×5,100×14,540
福山	2006	5CO(D)				5CO(D)	Uhde	55	430×5,100×14,540
川崎製鉄									
千葉	1964	5CO	C.Still	92	460×5,910×14,850	5CO	C.Still	92	460×5,910×14,850
千葉	1973	6CO	C.Still	102	435×6,706×15,750	6CO	C.Still	102	435×6,706×15,750
千葉	1980					7CO	C.Still	65	435×6,706×15,750
水島	1967	1CO	C.Still	78	435×6,456×15,750	1CO	C.Still	78	435×6,456×15,750
水島	1967/ 1968	2CO	C.Still	84	435×6,456×15,750	2CO	C.Still	84	435×6,456×15,750
水島	1968/ 1969	3CO	C.Still	86	435×6,706×15,750	3CO	C.Still	86	435×6,706×15,750
水島	1971/ 1972	4CO	C.Still	86	435×6,706×15,750	4CO	C.Still	86	435×6,706×15,750
水島	1973/ 1973	5CO	C.Still	86	435×6,706×15,750	5CO	C.Still	86	435×6,706×15,750
水島	1980	6CO	C.Still	43	435×6,706×15,750	6CO	C.Still	43	435×6,706×15,750

表 7.4 1992 年以後のコークス炉の仕様（その 3）（その他コークス専業メーカーなど）

事業所	設置年	1992年				コークスノート2010年			
		炉団番号	形式	門	W×H×L(mm)	炉団番号	形式	門	W×H×L(mm)
神戸製鋼									
開熱扇町	1966	1CO	Koppers	40	450×5,000×14,620	加古川			
加古川	1970	1CO	Koppers	60	450×6,500×15,560	1.2CO	Koppers	120	450×6,500×15,560
加古川	?					3.4CO	Koppers	128	450×6,500×15,560
事業所	設置年	炉団番号	形式	門	W×H×L(mm)	炉団番号	形式	門	W×H×L(mm)
大ガス塚 (NSC塚)	1963	1CO	DG-Otto	100	450×4,500×13,700	-	-	-	-
三菱坂出	1969	1CO	N.Otto	100	430×6,000×15,430	1CO	N.Otto	100	430×6,000×15,430
三菱坂出	1973	2CO	C.Still	100	432×6,915×16,880	2CO	C.Still	100	432×6,915×16,880
三菱坂出	1973/ 1984	3CO	C.Still	123	432×6,915×16,880	3CO	C.Still	123	432×6,915×16,880
三井鉱山	2006/ 1974	1CO	Koppers	92	430×7,125×16,500	日本コークス 1CO	Koppers	92	430×7,125×16,500
三井鉱山	1980/ 1977	2CO	Koppers	108	430×7,125×16,500	2CO	Koppers	108	430×7,125×16,500

門（11%）等である。

その後の各事業所のコークス炉の仕様を「コークスノート 2010」³⁾により表 7.2～表 7.4 に示す。

1990 年代にほぼ炉の形式は固定化され、大幅なチャレンジは行われていない。

補修その他で炉命延長してきた中で、室炉式のコークス炉が一度建設されるとその形式および寸法を変えることがいかに難しいかということがわかる。

参 考

- 1) 石川 泰, ふえらむ, Vol.2, No.7, p.515-526, 1997.
- 2) 輸入重油－鉄鋼増産－炭鉱へ鋼材の傾斜配給－石炭増産－鉄鋼への石炭増配という経路を通じて、石炭、鉄鋼の生産を相互循環的に上昇させ、それによって縮小再生産を食止めようとするもの。
- 3) (一社)日本エネルギー学会編, コークスノート 2010, 2010.

8 | コークス製造における石炭の配合や事前処理などの技術

8.1 石炭配合の概念

わが国における製鉄の生産技術の始まりは、実質的には第5章で述べた1881年に釜石で木炭高炉が操業された時とみられるが、木炭の供給が間に合わず間もなく石炭コークスに置き変わる。

使用されたコークス炉としては第3章で述べたように初期のピーハイブ炉、コッパー式炉、ハルデー式炉、ソルバー式炉などを経てコッパース式、黒田式、オート一式ならびにカールスチル式炉などの現在稼働しているコークス炉へと変遷をみた。

日本では、コークス炉導入時に当時としての最新の炉が導入されたが、国内弱粘結炭は若い石炭であり炭化度が低く、揮発分が高く高流動性であり、製品は亀裂が多く高品質のコークスが出来なかった。

日本のとった選択は第5章で野呂景義や下村孝太郎の選択として述べたように、日本炭に適したコークス炉（ハード）の開発よりもむしろ、室炉で高品質コークスを製造するために、事前処理により性状を人工的に変えたものも含めた、さまざまな性状を有する種々の石炭を配合する「石炭配合技術」（ソフト）の開発であった。

使用した石炭についてみると1894（明治27）年には釜石で野呂景義の指摘の結果北海道夕張炭を使用してコークスの製造が試みられ、我が国初のコークスによる高炉操業に成功している。1901年に官営八幡製鉄所のピーハイブ炉で三池炭・二瀬炭を使用してコークス製造が始まったが、高炉の操業に耐えられる良質のコークス製造は容易ではなく、九州の鹿町炭（強粘結炭）の使用が検討されたが、中国炭などの低揮発分粘結炭の配合が行われ、さらには1904年には八幡製鉄所で不活性物として無煙炭の配合が試みられ、その後の1929年（昭和4）年の輪西製鉄所におけるコーライト（石炭の低温乾留物）配合コークス製造と小型高炉での使用試験などにつながった¹⁾。

「本邦の石炭は瓦斯分に富み、骸炭を製する際著しく収縮するを以て裂罅（ひびのこと）を生じ、為にその質脆弱なるもの多し」とし、さらに、「之をして堅硬にして能く製鐵用に供し得べきものとするの法あり、即ち此の如き石炭に調合するに長崎縣、徳島縣等より産出する極餅質の特異なる石

炭（高石炭化度粘結炭を指すか？）若くは天草等より出づる無煙炭を以てするにあり」野呂景義（1915年）

有馬らは「コークス強度制御の高度化に向けた石炭の利用技術」鉄と鋼, Vol.100, No.2, p.2, 2014において、この野呂の文章を引用し「これは石炭配合技術の本質を看破している」としている。

副産物を回収するセメ・ソルバー法を国産独自に建造し運転した下村は第5章5.3項で引用しているように「セメ・ソルバー炉は従来の平炉タイプのピーハイブ炉とは違い炭化炉が縦型の充填層で原料に圧力がかかるので、この炉さえつければ良質のコークスが得られると予想したが、硫黄分の少ない堅いコークスはできなかった。炉の構造よりも原料の良否が肝心であることを悟った」とした。

そして、熔融する部分と熔融しない部分の割合が適当でなければならぬとし、石炭の事前乾留による半成コークスとの配合により「下村式石炭低温乾留法」（X炭法）を開発し1908（明治41）年に特許を取得している¹⁾。

国内炭は、図8.1に示すように地域により差はあるものの、わが国の地質条件に起因して石炭化度が低く、かつイナータ成分が少なくデグラディニット（degradinite）²⁾を多く含んでいる。また、水素含有量、脂肪族構造部分が多い、そのため、北松炭を除き一般に高揮発分であり、また高流動性炭（西九州系、夕張系）、低流動性炭（筑豊系、赤平・芦別系）の両者に分類できた。

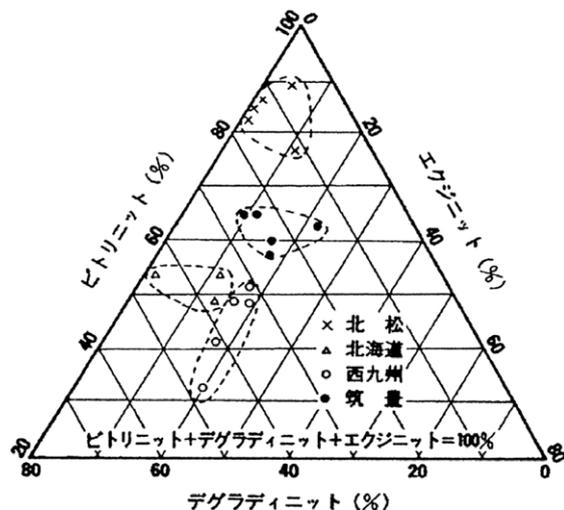


図 8.1 日本炭の組織

城が国内弱粘結炭を粘結成分の多い高島・夕張グループとコークスの骨格部分を構成する繊維質部分の多い筑豊・砂川グループに分類し、石炭配合におけるこれら粘結成分の多い高流動性炭の役割や評価を図8.2のように明示した結果その後の低流動性輸入炭の配合に際しての理論的な裏付けとして貴重な役割を果たした³⁾。

コンクリートにおけるセメントと砂利など骨材に対比させて説明される所以である。

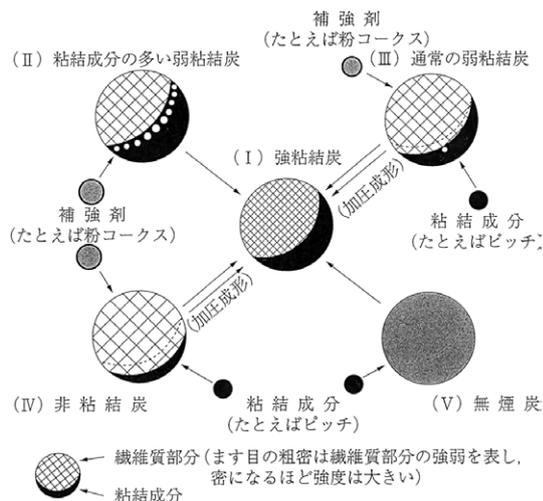


図 8.2 石炭配合の基本概念⁴⁾

また、宮津はコークス強度に及ぼす配合炭の石炭化度、粘結性（流動性）の要因分離実験を行い、石炭化度支配、流動性支配の概念を導入し、実炉データによってその有効性を証明した⁵⁾。図8.3はその結果を示したものである。

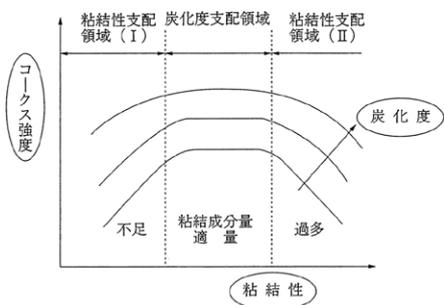


図 8.3 配合炭の流動性とコークス強度の関係⁴⁾

すなわち、配合炭の石炭化度一定の場合、流動度によって生成コークス強度が影響をうける範囲（流動度支配領域）と受けない範囲（石炭化度支配領域）が存在し、後者の場合、粘結性とコークス強度の関係に炭化度がパラメータになっていることから、コークス強度を目的値に合わせるためには、配合により全体の石炭化度を変化させればよい。

このように国内炭による高品質コークスの製造は困難であつたので、石炭化度の不足を補うためコーライト化やブリケット化が、粘結性不足に対しては膨潤炭法や石炭予熱など種々の新技術が検討された⁷⁾。

結局、効果不十分や特にコスト高であつたため、これらの研究は実用化に至らなかったが、この選択は第2次大戦後、世界から原料を選びブレンドする臨海製鉄所においてその成果が遺憾なく発揮された。

例えば、コーライト配合法については輪西製鉄所仲町第3高炉（公称能力700t）で1949（昭和24）年10月から実施した試験では、道内の非粘結炭を特殊なロータリーキルンで低温乾留してコーライトを製造しこれを0.3mm以下に粉碎したものを大夕張炭ベースの弱粘炭に25%配合して乾留することにより潰裂強度80%、灰分16%に近い製鉄用コークスを製造したものを用いている。

日産700t高炉にとって望ましくは潰裂強度は85%が必要であるが、鉄鉱石の整粒強化や鉱石とコークスの混合装入法の採用等のあわせ技を適用することによって日産600t近い安定操業が可能であったと報告されている。

石炭の粘結性やコークス化性の概念、および配合の結果を評価するための試験法には経験的要素が強く反映している。

明治期においては石炭の配合設計に関する理論的展開は世界でも未だ行われていなかった。八幡製鉄所は自社保有の二瀬炭をベースとして三池炭、高島炭、微粉炭を試行錯誤的に組合わせ、灰分低減のために洗炭を行い粉碎機によって石炭粒度を種々調整することによって配合炭を作り実釜試験によって具体的にコークス強度を確認していく試行錯誤的な改善活動が絨毯爆撃的に繰返されている。当時はコークス品質規格がなく製造されたコークスは使用粗炭銘柄によって各々名称が付された。

表8.1は先人達の国内炭を利用してどのようにして強固なコークスを製造するかの努力の歴史である

8.2 コークス化のメカニズム

粘結炭を乾留すると、図8.4に示すように先ず熱分解反応がおこり、200℃前後からタールが発生し、その後CH₄などの炭化水素ガス、CO等が発生するとともに、膨張、収縮等の種々の物理現象が起る⁵⁾。

表 8.1 わが国における装入炭事前処理技術の研究開発³⁾

分類	年代	内容
粒度調整 (装入炭均質化)	1957-1963	・SOVACO 法の適用試験(資源技, 八幡, 富士) ・粉碎-配合方式, 反撥粉砕機の導入(各所)
	1971	・閉回路粉砕方式(和歌山, 鹿島)
	1979	・2 段階式閉回路粉砕システム(広畑)→中山(1983)→坂出(1985)
	1981	・統計理論による粒度調整理論(川鉄)
装入密度増大	1959~	・オILING法(八幡, NKK, その他)
	1966	・成型炭配合法の開発(八幡)
	1965	・成型炭最良: 装入法実用化試験(国内炭利用研究, 鉄鋼協会)
	1971	・成型炭配合法実用化第1号(八幡)
装入炭水分の低減	1975~1981	・成型炭配合法の普及(国内の40%)
	1980	・スタンピング法(ブロック装入法)の研究(NKK, 川鉄)
	1963	・乾燥炭装入法(フランス)の適用試験(八幡)
	1966	・乾燥炭装入法実用試験(川鉄化学, NKK, 富士鉄)
	1968~1975	・乾燥機設備(福出)
	1971~1975	・乾燥機+篩分機設備(鹿島)
粘結性調整	1949~1952	・コライト法の適用(室蘭, 八幡)
	1947	・粉コークス配合法の検討(八幡)
	1950~ 1965~	・オイルコークスの配合(各所)
	1971~ 1975~ 1982	・粘結材添加(川鉄, アスファルト) ・粘結材添加(住金, ASP) ・粘結材添加法試験(新日鉄, SRC) ・粘結材添加法試験(NKK, SRC, 重質油)

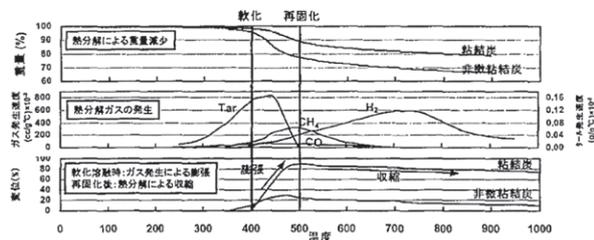


図 8.4 加熱下における粘結炭の挙動⁵⁾

粘結炭は 400°C 前後で軟化溶解し、粘結炭粒子内部に気泡ができて膨張する。この加熱下で石炭が示す溶解、膨張等の性質を粘結性と呼び、粘結性の測定方法として JISM8801 ではジラトメータによる膨張率、ギーセラープラストメータによる流動度等が規定されている。膨張率は、軟化した石炭中で発生するガスにより気泡が出来て石炭が膨張する程度を測定し、流動度は石炭熱分解過程で発生する液体やガスにより石炭全体が軟化する程度を測定している。

一旦軟化した石炭は 450~500°C になると再固化して多孔質のセミコークスになる。コークスは気孔率約 50% の多孔質体であるが、気孔構造が決定されるのは、この軟化溶解開始してから再固化するまでのおよそ 100°C 程度の軟化溶解温度範囲である。再固化後も熱分解は引き続きおこり、メタン等はさらに発生を続けるが 700°C 前後には発生が終了する。主に縮重合反応により水素が発生し、水素発生速度は 700~800°C で最大となる。再固化後、熱分解の進行とともにコークスは収縮してより緻密な構造になるが、一方で収縮の歪により亀裂が生成する。

再固化から 1000°C までの収縮率は粘結炭の場合で 12~17% 程度になる。石炭化度の低い (VM が高い) 石炭は再固化温度が低く、低温から収縮を開始して収縮係数も大きいいため、1000°C までの収縮率が大きくな

る。炉内のコークスには温度分布があるため、収縮率差に起因する歪により熱応力を生じコークス塊内に亀裂が生成する。そのため、収縮率が大きい低石炭化度炭からは、亀裂が多く体積破壊を起しやすいコークスが生成し、粒度やドラム強度指数 (DI_{15}^{150}) が低くなる。

コークスは脆性材料と考えられ、破壊強度は材料の基質物性そのものと共に破壊の原因となる欠陥の特定がまず重要である。

コークスの基質強度は、1mm 程度に粉碎して亀裂の影響を除いた粒子で測定されるマイクロ強度指数で評価されており、従来は石炭化度が高い石炭からのコークスの方が高いとされてきた。しかし近年、マイクロ強度指数の低下は、測定に使用される粒子の気孔率が異なることや粒子内に非接着粒界が存在している場合があるためであり、石炭化度による差は本質的には少ないことが示された。

そのため図 8.5 に示した軟化した石炭中で発生するガスにより気泡が出来て、石炭が膨張する際に発生する連結気孔や非接触粒界の制御が重要で、非接着粒界を生成させないためには、石炭は軟化するだけでなく、粒子間空隙を埋めて粒子が相互に接触し接着するように膨張することが必要である。さらに、連結気孔を生成させないためには、石炭が自由膨張できず膨張を拘束される条件で乾留されることが必要であることが分かってきた⁶⁾。

石炭の膨張率が十分高ければ、粒子間空隙が完全に充填されて石炭粒子は全表面で接着し、もとの空隙は消滅して石炭粒子内に発生した気泡が残りコークスの気孔となる。一方、膨張率が十分でない場合は、図 8.5 に示したようにもとの空隙の一部が非接着粒界として残る。

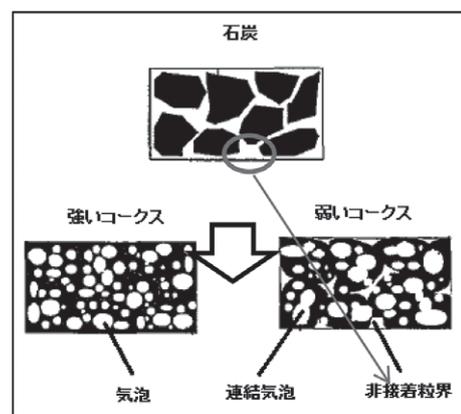


図 8.5 コークスの気孔形成過程

したがって高強度コークスを造るためには、膨張率が大きな石炭を用いるか、粒子間の空隙を小さく（石炭充填密度を大きく）すればよく、空隙充填能力という視点では、石炭の膨張性も充填密度も等価である。

すなわち、膨張性が乏しい非微粘結炭でも充填密度を向上させれば、低充填密度で充填した強粘結炭と同等の強度のコークスが得られることになる。

8.3 事前処理技術各論

コークス炉において高強度コークスを実現するための装入密度の増加は常に求められる共通な目標でもあり、図 8.6 に示すように粒度構成、乾燥、予熱、塊体化などの事前処理技術が効果を発揮することになる。

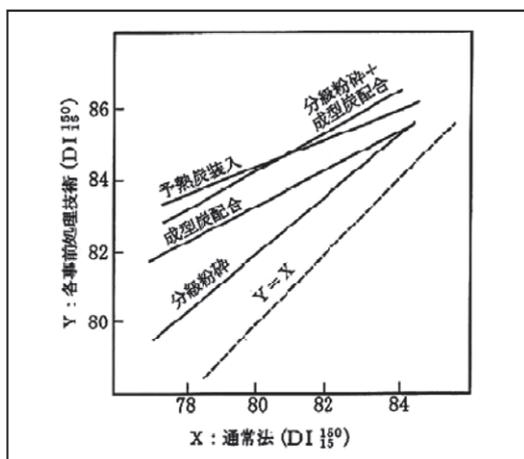


図 8.6 事前処理技術の効果⁷⁾

事前処理の各方法の概要を図 8.7 に示す⁸⁾。

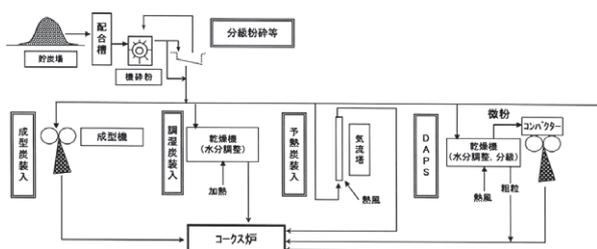


図 8.7 石炭の事前処理設備の例⁸⁾

8.3.1 分級粉砕法

コークスは砂利とセメントから構成されるコンクリートに例えられることがある。石炭化度、組織成分によって石炭の粉砕性が異なるため、各種石炭を混合粉砕した場合、セメントに相当する粘結性の良好な低・中揮発分炭や石炭中のビトリット部分が細粒化し、砂利に相当する粘結性が比較的低い高揮発分炭や不活性成分の多い部分が粗粒で残る。石炭乾留時の粒

子間反応やコークス組織の均一性から見た場合、先に述べたように不活性部分は細粒化され、いわゆる糊に相当する粘結性に富む部分は粗粒であることが望まれる。したがって石炭の性状に応じて粉砕粒度の変更が可能な粉砕配合工程やグループ粉砕工程、さらには粉砕機とふるいを組み合わせて組織成分別粉砕性の差を考慮した選択粉砕法などが採用されている。即ち、石炭の銘柄毎の特性（活性成分量（リアクティブ）及び不活性成分量（イナート））に応じて、一次、二次分級篩の篩目が選択され、2段に分級粉砕される。これによって、活性成分の微粒化防止及び不活性成分の細粒化均一分散化が図られ、コークス組織が均質化し、コークス強度が向上する。特に、不活性成分の多いオーストラリア炭やカナダ炭の粗粒部分を選択的に微粉砕することが、コークス品質向上に効果的だと言われている。本法により、非微粘結炭を5~10%使用することが可能となる。

図 8.8 に分級粉砕処理フローを示す⁹⁾。

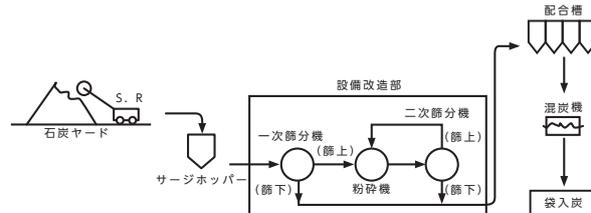


図 8.8 分別粉砕処理フロー⁹⁾

8.3.2 調湿炭装入技術 (CMC : Coal Moisture Control)

現状の湿炭装入レベルの装入石炭水分を低減させることによる水分蒸発エネルギー低減により乾留所要熱量の低減を図る手法は 1968 (昭和 43) 年 日本鋼管福山製鉄所 (現 JFE 西日本) で実用化された。一方、装入石炭水分の低減により、微粉石炭の付着力が低下することで微粉石炭は飛散しやすくなり、飛散粉塵による環境の悪化をまねくことになる不利も発生する。

1%の装入炭は水分低下は乾留のための熱量の 13~20 (kcal/kg-coal) 削減に対応する。

水分と余熱温度の装入密度とコークス強度への影響を図 8.9 に示す¹⁰⁾。

そこで水分低下による乾留所要熱量の低減に加えて、石炭粒子間相互の滑り向上によるコークス炉への石炭装入嵩密度の向上を目的とし、乾燥のための熱源としてコークス炉の排熱を利用し、乾微粉の発塵を考慮し装入炭水分を 6%前後に制御した石炭を装入する調湿炭装入法が 1983 (昭和 58) 年新日鐵 (株) 大分

製鐵所で初めて導入された。図 8.10 にその概略フローを示す⁹⁾。

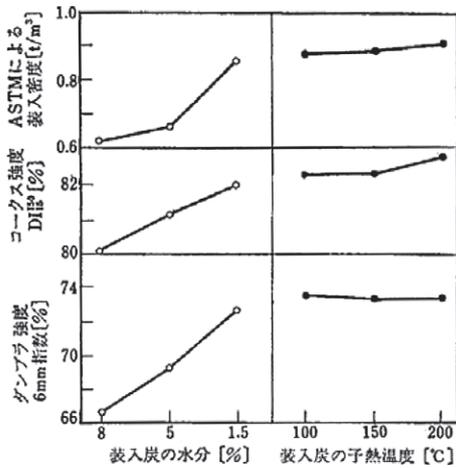


図 8.9 装入炭の水分と予熱温度がコークス強度に及ぼす影響

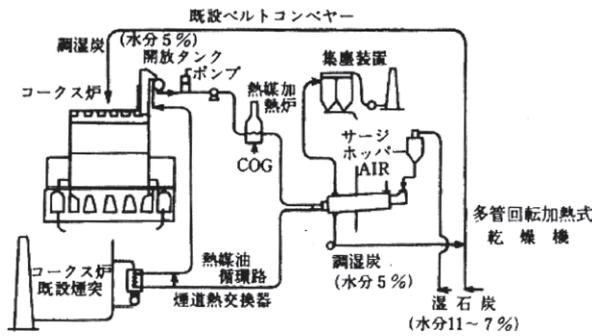


図 8.10 調湿炭装入技術

水分を含んだ湿炭の一部がサージホッパーを介して回転乾燥機に装入され乾燥され、湿炭と合わされて調湿炭としてコークス炉に供給される。なお、この図では乾燥の熱源に熱媒油を使用し、その加熱にコークス炉の燃焼排ガスの顕熱を利用して省エネルギーを図っている。

8.3.3 予熱炭装入法（プレカーボン法：Precarbon）

本法は Bergwerksverband G.m.b.H.（西ドイツ）と Didier Engineering G.m.b.H.（西ドイツ）の協力で完成した技術である。

本法は図 8.11 に示すとおり、湿炭をまず 1 段目の乾燥塔 90℃ 近くに予熱し、2 段目で約 210℃ まで予熱したのち、サイクロンで回収し、予熱炭貯槽に受ける。これをコークス炉上に設置したチェーン・コンベヤにより炭化室上部まで輸送し、装入用バギー車に取り付けたシュートを介して炉に装入する。

本法による操業結果によれば、装入密度が 10～

14% 向上し、炭化時間が約 20% 短縮する結果、生産性は約 35% 向上するとしている。日本では、北海製鉄室蘭製鐵所の No.6 コークス炉で 1979（昭和 54）年 10 月より導入され現在稼働している。石炭はコークス炉に装入されるまでに、気流塔内で熱風により 170～200℃ に予熱される。その結果、装入嵩密度の向上と乾留時間の短縮となり、安価炭の増配合、生産性の向上、乾留所要エネルギーの低減などの効果が得られている。

なお、本技術は前述のようにヨーロッパで始められ、ドイツ（ザルツギッター社等）、フランス、スペイン、米国（US スチール社等）でパイロットプラント級の実験が行われ、実機へも 20 数基に導入され、室蘭製鐵所は 10 基目である。しかし、欧米ではその後操業は停止され、現在実機で稼働しているのは日本の室蘭製鐵所のみである。

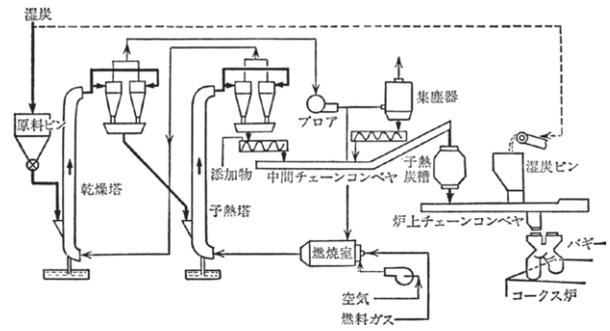


図 8.11 プレカーボン法フロー¹¹⁾

8.3.4 成型炭配合法

石炭を予め圧縮成型して密度を上げるという考え方は表 8.1 に示したように 1965 年頃から存在したが、1971（昭和 46）年新日本製鉄八幡製鐵所で 1 号機が稼働以来各所で急速に採用された。

成型炭を配合することによって、成型炭自体のコークス化性改善効果のみでなく、コークス化過程で成型炭が膨張し、その周辺の粉炭部分を圧密化し、石炭粒子間の結合や組織を強化すると推定されている。そのため成型炭の膨張性が重要であり、成型炭の見掛密度、サイズおよび結合材の種類などがコークス強度改善効果に密接に関係していると考えられている。

粉碎配合処理後の装入炭の一部を取り出し、結合材を加えてニーダ（混合機）で蒸気を吹き込みながら加熱混練したのち、直ちにダブルロール成型機（図 8.12）で相対する 2 つのロールの間で成形される。製品は冷却コンベヤにて徐冷したのち、製品槽を経てコークス炉へ送られる。炉上の炭槽では粒度偏析防止のため、粉炭と成型炭とを別々に貯蔵し、装入車へ積み込む際

に両者を所定割合で混合する。そのフローを図 8.13 に示す¹²⁾。

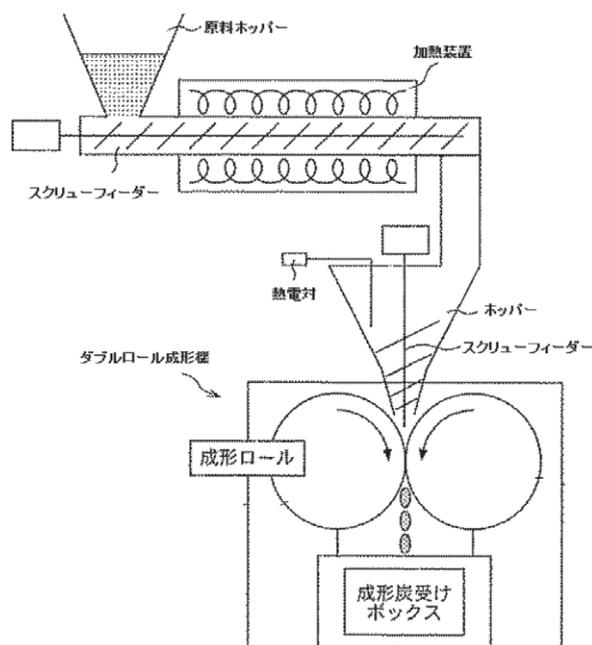


図 8.12 ダブルロール成形機¹²⁾

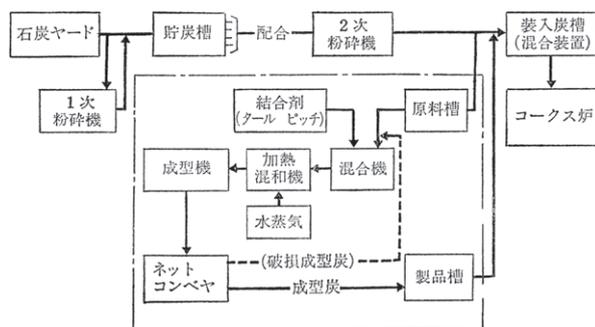


図 8.13 成型炭配合のフロー¹³⁾

本法適用時の操業上の影響については、装入密度が約 8% 増加するが火落時間は 7% 延長するため、生産性の向上はわずかであるといわれる。またコークスの押出負荷の増加はわずかであり、操業上何ら支障ないことが確認されている。

8.3.5 微粉塊成炭配合設備 (DAPS: Dry-cleaned and Agglomerated Precompaction System)

図 8.15 に示すように粉碎された石炭は流動層乾燥機に送られ、乾燥機下方より吹込まれる熱風により石炭粒子の、乾燥と、0.3mm 以下の微粉炭と 0.3mm 以上の粗粒炭の分級が乾燥機で行なわれるようになってい

その後ロールコンパクターに送られ塊成化される。

この微粉の塊成化により送炭途中や装入中の発塵が抑制される。一方、粗粒炭は塊成化された微粉炭と再び混合されコークス炉へ送炭される。

1992 (平成 4) 年新日鉄大分製鉄所で実機化され、この乾燥・分級・塊成化の工程により、装入炭の水分は 2% 程度まで低減される。この水分の低減により調湿炭装入法より大きな効果が得られ、装入嵩密度は 800kg/m^3 以上、発塵は調湿炭並とされ、乾留所要熱量の低減、コークス品質の向上が報告されている¹⁴⁾。

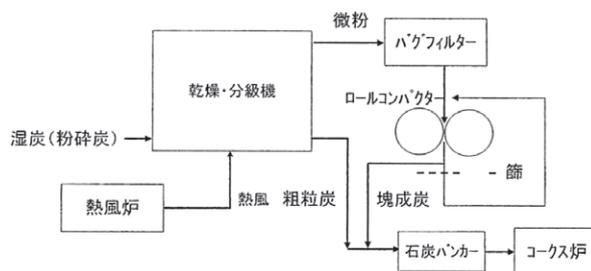


図 8.14 DAPS 法のフロー¹⁵⁾

8.3.6 その他

コークス製造技術に関してこの他、選炭、スタンピング、オイリングなどの技術があるが現在日本では使われていないので取りあえず省略する

8.4 コークス炉設備の計画・設計

第 6 章の表 6.3 において現行各製鉄所におけるコークス炉の特徴を述べた際に引用した、「八幡製鉄所の設備・技術の変遷 (第 2 分冊) コークス製造技術」¹²⁾ に「ここでは他式コークス炉の機能的な特徴には触れないが、どのコークス炉にも長所、短所があると考えるのが妥当であろう」としていることに象徴されるよう、世の中に突出したコークス炉が存在することはない。先ずコークス炉設備の計画・設計の段階で使用対象とする高炉の仕様に合わせて図 8.15 に示すようなコークスの生産量、必要な品質、想定される使用石炭銘柄、環境対策などについて配慮しつつ、設備投資額、建設工程管理と整合を図り適切な炉形式が選択されることになる¹⁶⁾。

特に最近では煉瓦を初めとする設備調達先はグローバル化しており、国内で完結していた過去と異なり、商習慣の違う外国の企業との共同作業はフルセット設備導入の明治時代とは別の意味で相手の言いにならない確固たる技術を保有し続ける必要がある。

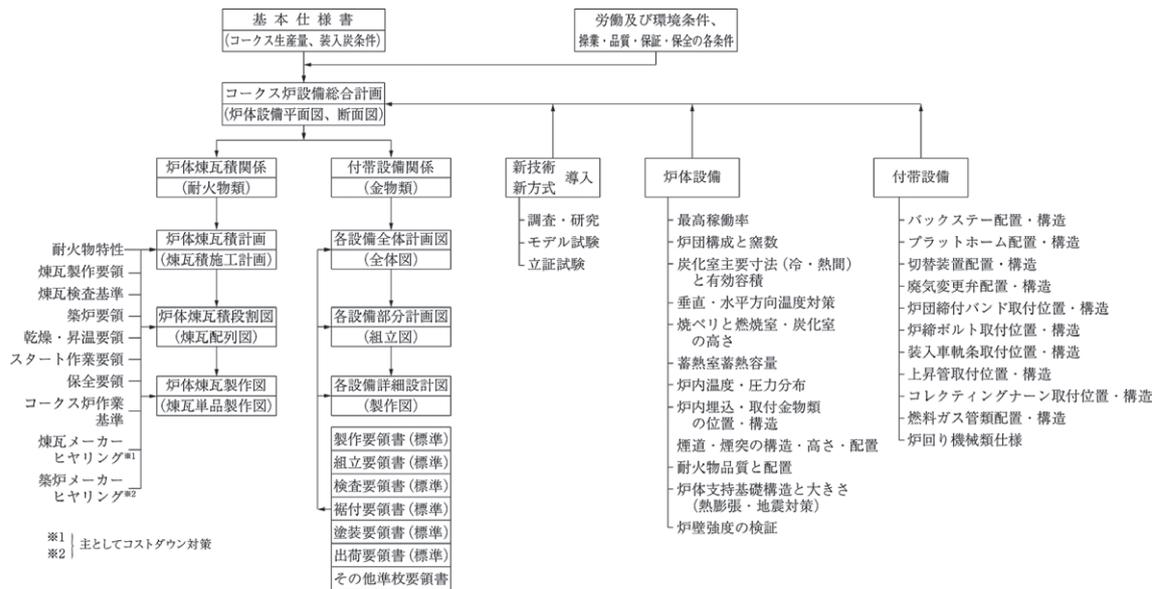


図 8.15 コークス炉設備の計画・設計の手順

参 考

- 1) 原燃料からみたわが国製鉄技術の歴史, 日本鉄鋼協会, 1984.
- 2) 植物の木質部が微細に崩壊したものに由来する微細組織成分であり, 通常の石炭主成分であるピトリニットより揮発分や水素を多く含む
- 3) 美浦義明, 鉄と鋼, Vol.75, No.7, p.1095, 1989.
- 4) 八幡製鉄所の設備・技術の変遷 第2分冊, p.117, 図5, p.118, 図6, 北九州産業技術保存継承センター, 2008.
- 5) 野村誠治, 西山記念技術講座 (2014 (平成26)年6月, (一社)日本鉄鋼協会, 2014.
- 6) 有馬 孝, 愛澤禎典, 野村誠治, 鉄と鋼, Vol.100, No.2, p.112, 2014.
- 7) 鉄鋼便覧 第4版 (電子版), 第2巻, 図42-4・41, 2002.
- 8) 鉄鋼便覧第4版 (電子版), 第2巻, 図42-4・19, 2002.
- 9) 石炭高度転換コークス製造技術開発追跡評価, 資料4-2別冊, 参考資料1, 図8.8, p.2, 図2.3.3, 図8.10, p.3, 図2.3.5, 2009.
- 10) 鉄鋼便覧 第3版, 図4.91, 1980.
- 11) 鉄鋼便覧 第3版, 図4.96, 1980.
- 12) 花田浩二, 鉄と鋼, 90, 9, p.662, 2004.
- 13) 鉄鋼便覧 第4版 (電子版), 図4.20, 2002.
- 14) 加藤, 中嶋, 山村, 新日鉄技報No.384, p.38, 2006.
- 15) 鉄鋼便覧 第4版 (電子版), 図4.20, 2002.
- 16) 八幡製鉄所の設備・技術の変遷 第2分冊, p.100, 2008.

9 | コークス乾式消火装置（省エネルギー対策設備の導入と普及）

9.1 消火装置の歴史

操業開始当初のコークス炉では炉から押出された赤熱コークスはコークサイドの炉前に貯められて図9.1に示すように人手によってホース注水で消火された。

八幡製鉄所では1923（大正12）年に操業開始した黒田式単式第1次東田第9コークス炉で傾斜ワーフが設けられ人手によってホース注水で消火された。この炉ではコークガイド車に補助的な消火装置が搭載された。



図9.1 ソルバー式炉における炉前散水消火¹⁾

1933（昭和8）年に操業開始した黒田式単式第2次東田第8コークス炉（後の第3コークス炉）で図9.2に示すように初めて消火車・電車が登場していわゆる集中消火方式（消火搭散水消火設備）が採用され、また、傾斜ワーフが設置されて最近まで使われていた現在型の湿式消火設備がここで誕生した。



図9.2 黒田式単式炉における消火車・電車と傾斜ワーフ²⁾

9.2 乾式消火装置の試み

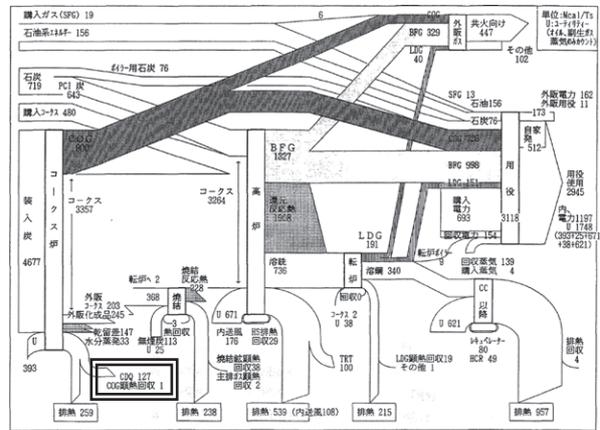


図9.3 一貫製鉄所のエネルギーフロー³⁾

図9.3に示した一貫製鉄所のエネルギーフローにおいて二重枠線で囲った部分は、コークス炉からの高温（赤熱している状態）コークスの顕熱であり、この顕熱回収が試みられるのは自然の成り行きであった。

1930（昭和5）年に操業開始した黒田式複式第1コークス炉及び1932（昭和7）年に操業開始した同式の洞岡第2コークス炉ではコークス炉前にコリン式乾式消火設備が設置された。当時、この設備は画期的な設備として注目された。設備はコークス炉3窯に対して1個宛の火消函（全部で25函）を備え、その中に赤熱コークスをコークガイドを経て落し込み、直ちに蓋をしてこれに廃ガス（不活性ガス）を吹き込んでコークスを冷却する。熱せられた廃ガスは付属するボイラーに送られ蒸気を発生し、廃ガスはボイラーと火消函の間を循環する。実際の作業では、火消函の内張り煉瓦の脱落や水封管理の不十分さから小爆発も続発した。窯の休止期間が多く稼動を中止して散水消火に切替えられた。

9.3 戦後の乾式消火装置（CDQ ; Coke Dry Quenching）

1973年の石油危機発生以前までは、環境対応・コークス品質向上のための技術として検討が行われていたものの、当時のエネノレギーコスト体系下では経済的に成り立たない等の理由により普及は滞っていた。

しかし、石油危機によって新たな省エネノレギーの手段として注目されたことで急激に導入が加速し、大

型化も進展したことで発電設備としての役割も担うようになった。新日本製鉄は、1973（昭和48）年に全ソビエト技術輸出入公団との間で、技術導入契約を締結し、わが国の1号機（標準能力56t/h）として1976年2月から稼働を開始した。また、日本鋼管もソ連式が優れていることを確認し、NKK-ライセンスイントルク式CDQ（標準能力70t/h）として1976（昭和51）年9月から操業を開始した。以後、川崎製鉄や住友金属工業等でも導入が進み、1978年から1987年までの10年間で、設置基数（累積）は約3倍にまで増加した。また、わが国のコークス炉の生産能力が高いため、複数基の設置が求められるようになったことから、各社がそれぞれのコークス炉の生産能力に対応する形で、ソ連オリジナルモデルに対して大型化を図ると共に性能向上にも着手した。その結果、石油ショック以後のエネルギーコストが上昇する一方で、CDQの大型化によって発電可能出力が増大し、買電価格と十分競争できるようになってきたことから蒸気の使用目的は、時代が進むにつれて熱利用から発電が主流になることになる。

図9.4に示すこの装置は、消火車に積載した下開き式のバケットに赤熱コークスを受け、完全自動巻上機で炉頂部へバケットを巻き上げ、プレチェンバ内に赤熱状態のコークスを装入する。

プレチェンバはクーリングチャンバー（冷却室）の前設置設備として生産変動を吸収し、かつ操業の安定性を得る目的で設けられている。コークスは冷却室内で不活性ガスと熱交換して200℃近くまで冷却されたのち、一定量ずつ切り出される。熱交換後800℃に加熱された不活性ガスは1次ダストキャッチャーを経てボイラで熱回収され、循環ブローで再度冷却室へ圧送される。

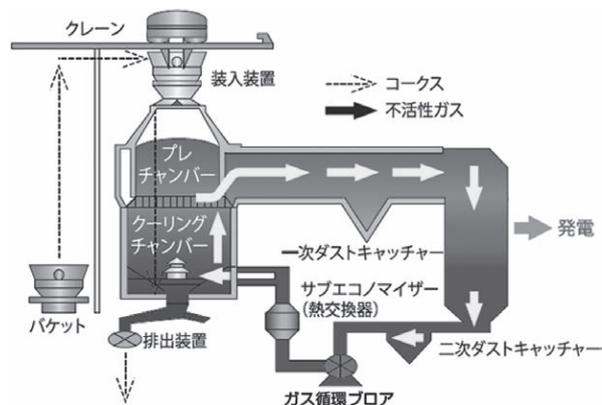


図9.4 コークス乾式消火装置（CDQ；Coke Dry Quenching）⁴⁾

我が国で開発された技術を途上国へ移転する手引書としてNEDO（新エネルギー・産業技術開発機構）発行の「地球温暖化対策技術移転ハンドブック2008」において、本設備を設置することにより、蒸気回収量は0.5t-steam/t-cokeとなる。さらに0.5トンの蒸気は約150kWh（300kWh/t-steam）の電力となるとしているのでコークス生産1トン当たり150kWhの発電量となる。（但し、設備規模、設置場所の固有の条件により異なるのでこの数字はおおよその目安である）

CDQの品質面への影響については、赤熱コークスがチャンバー内でガスにより徐冷されるため、表9.1に示すようにコークス強度（DI, CSR³⁾）が約2%改善される。湿式消火の際に生じるコークス表面気孔や内部亀裂がないことや、粉率の上昇にみられるチャンバー内でコークスの脆い部分が取り除かれるためである。

表9.1 CDQコークス品質の比較⁵⁾

項目	方法	湿式消火	乾式消火
水分 [%]		2～5	0
灰分 [%]		11.35	11.39
揮発分 [%]		0.50	0.41
平均粒度 [mm]		65	55
粉率（カット後） [-15mm %]		10	13
気孔率 [%]		49	48
DI ¹⁵⁰ ₁₅ [%]		83.5	85.5
DI ¹⁵⁰ ₅₀ [%]		12.9	17.9
小型反応後強度 [%]		50	52

9.4 乾式消火設備の海外展開

国内では既に100%の設置が完了しているが、中国やインドなど鉄鋼生産を急激に伸ばしている途上国は省エネルギーが環境対策だけでなく、むしろ品質の向上も含めた生産コスト低減につながることからこの技術に関心を持ち始めている。NEDO（(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構）省エネモデル事業により導入資金を援助し、これを呼び水として1990年代から日本製CDQの導入を推進し、その省エネ効果が認められたことから、中国政府は第10次5カ年計画において新規コークス炉建設にはCDQ設置を義務付けるなどのCDQ導入政策を開始（2001年～）している。

それに呼応して日系エンジニアリング企業の現地JVが設立され、価格が低下したことも相まって、2000年代半ばより中国でのCDQ導入は加速的に増加。更に、図9.5において設備のメーカーを国旗で示

したことからわかるように中国現地メーカーによるCDQ 国産化も実現した。

中国におけるCDQの普及は、日本発の技術が移転先でスタンダードな技術となることで、加速的な普及に繋がった好例である。

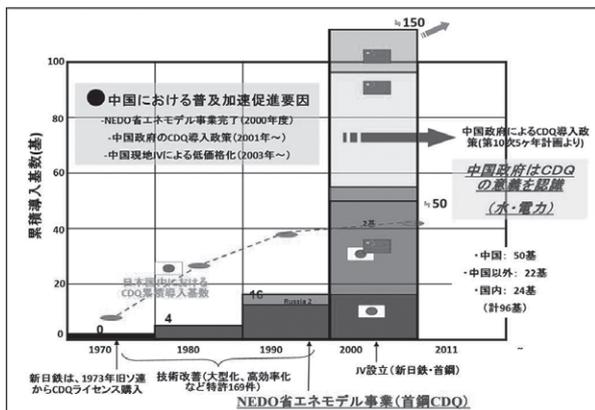


図 9.5 2011 年時点での海外普及状況（日本鉄鋼連盟）
低炭素社会計画（平成 24 年 8 月）

この時点で 72 基であった普及状況は、その後さらに発展し 2015 年 6 月時点では我が国が関与した CDQ 設備が 87 基に増加している。（中国の独自の動きは不明である）

表 9.2 各国が導入した日本の省エネ設備による削減効果（日本鉄鋼連盟）

	(万t-CO2/年)	
	設置基数	削減効果
CDQ(コークス乾式消火設備)	87	1,533
TRT(高炉炉頂圧発電)	58	1,073
副生ガス専焼GTCC	45	1,492
転炉OGガス回収	21	792
転炉OG顕熱回収	7	85
焼結排熱回収	6	88
削減効果合計		5,062

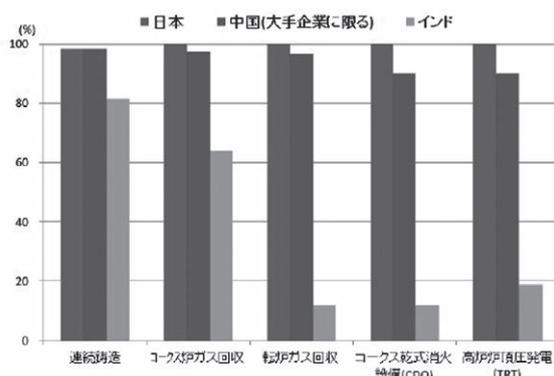
※CDQ:Coke Dry Quenching(コークス乾式消火設備)
TRT:Top Pressure Recovery Turbines(高炉炉頂圧発電)
GTCC:Gas Turbine Combined Cycle system

表 9.2 から我が国の技術移転によって CDQ だけでも年間 1,500 万トンの CO₂ 排出が削減されていることになる

図 9.6 によると CDQ についていえば中国ではかなり普及が進んでいるが、エンジニアリング会社としてはインドがこれからの市場ということになる。

9.5 我が国における鉄鋼環境対策さらに省エネルギー対策設備の経緯

ここで、省エネルギーさらに環境投資に至る、我が国鉄鋼業界の戦後の設備投資の経過についてレビューしておく。



(注)連続铸造は3か国とも高炉・電炉メーカー等を含む(連続铸造生産の合計+粗鋼生産の合計、2013年時点)。その他の設備については、日本は2013年度時点、中国のコークス炉ガス回収と転炉ガス回収は2013年時点、CDQとTRTは2010年時点、インドは2000年時点。
(出所)日本:日本鉄鋼連盟
中国:コークス炉ガス/転炉ガス回収→中国鉄鋼工業協会(CISA)『中国鉄鋼工業発展報告2014』、CDQ→冶金情報(2012/11/27)、TRT→王維興(中国金属学会)『2010年重点鉄鋼企業能耗述評』『世界金属導報』(2011/3/8)
インド:Diffusion of energy efficient technologies and CO2 emission reductions in iron and steel sector(Oda et al. Energy Economics, Vol.29.No.4, pp.868-888.2007)より、鉄連編集

図 9.6 高炉メーカーにおける主要省エネ設備の普及率
／日本鉄鋼業の地球温暖化問題への取組低炭素社会実行計画（日本鉄鋼連盟）（平成 28 年 1 月）

9.5.1 生産設備の充実期

我が国の粗鋼トン当たりのエネルギー原単位は、第 2 次世界大戦以前で 10,000Mcal 以上、戦後間もない 1953（昭和 28）年でも 7,808Mcal と極めて悪かった⁶⁾

政府は、1950 年 8 月に産業合理化審議会の答申に基づいた企業合理化促進法を受け、これを鉄鋼各社が具体化したのが、第 1 次から第 3 次までの合理化計画でありこの下で、平炉から LD 転炉への転換や連続铸造 (CC) の導入が行われた。同時に装置産業におけるスケールメリットを活かすための設備の大型化が進行し、生産効率を向上させ、原単位の低減（臨海製鉄所の長所を活かした大型船による）、原料の輸送コスト低減により生産コストを低減することができた。

1952（昭和 27）年に制定された企業合理化促進法は①技術向上、②機械設備等の近代化、③産業関連施設の整備、④原単位の改善、⑤中小企業診断を柱としていて、この法律の最大の特徴は、企業合理化を促進する手段として減税措置に最も重点を置いた点にあり、重要産業の近代化機械設備等の特別短期償却制度は、1951（昭和 26）年の租税特別措置法で認められた 3 年間 5 割増の特別償却制度とも相まって設備近代化に大きく貢献することになった。（電中研レポート）

この間、政府は「熱管理法（1951-1979）」「省エネルギー法（1979-）」を制定し、エネルギー消費の抑制を図ってきた。

1951（昭和 26）年に制定された熱管理法は、工場での熱管理対策を規定するものであり燃料の損失の防止、燃料の燃焼、ガス化及び乾留合理化、放射、伝導等による熱損失の防止、廃熱の回収に努力を払い、燃

料及びこれを熱源とする熱の有効利用を図り、燃料資源の保全及び企業の合理化を究極の目的とするものであった。

我が国鉄鋼産業におけるCO₂排出量が年間約2億トンである。表9.2によるCDQのCO₂削減量1,500万tでありこれは約8%に相当し、その他の省エネ技術を含めた約5千万トンは約25%であるので、これらの技術移転がいかに地球温暖化の軽減に寄与しているかがわかる。

9.5.2 環境対策設備導入期

国民所得倍増計画は1961（昭和36）年からの10年間に名目国民所得（国民総生産）を26兆円に倍増させることを目標に掲げたが予想以上の成長を遂げ、実質国民総生産は約6年で、国民1人当りの実質国民所得は7年間（1967年）で倍増を達成した。しかしその間生産活動に伴う公害問題が多発し社会問題となり、1967年「公害対策基本法」が成立すると事業者や国・地方公共団体、住民が果たすべき義務を明らかにし、公害を防ぐための大気汚染防止法・水質汚濁防止法などのいろいろな法律が制定された。

当時、製鉄所でも汚染物質をオンラインでモニターしている自治体などからの警告により、SO_x、NO_x発生源である例えば焼結工場などを一時的に停止する措置を取らざるを得ない事態になり、操業上の工夫で汚染物質の抑制を図る技術開発や排ガス処理設備の設置が行われた。結果として警告の回数も減少し市民も納得することとなった。

省エネルギー及び環境対策設備の投資状況を図9.7に示す。

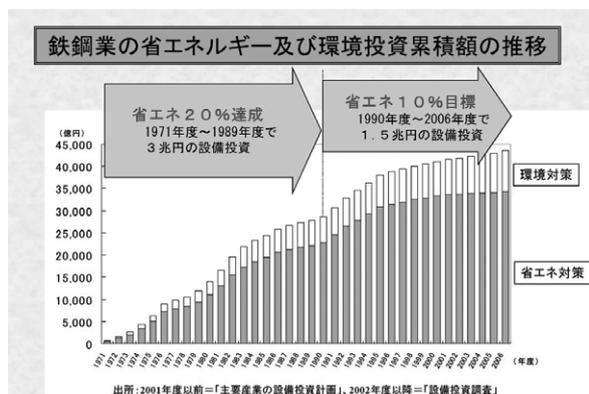


図9.7 鉄鋼業における省エネルギー及び環境投資額の推移⁷⁾

以下の図9.8は北九州市における対策の結果の一例である⁸⁾。(エコタウン指定第1号 その後環境関連の事業所が多数立地)

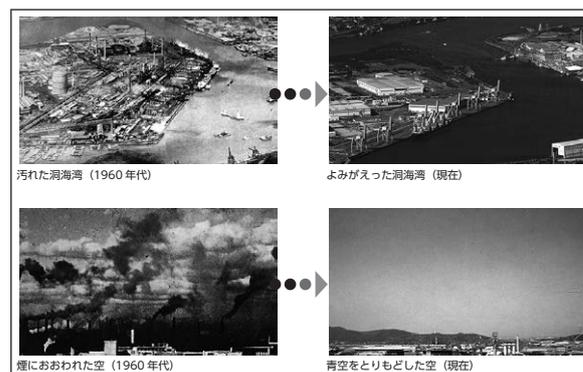


図9.8 北九州における環境改善

9.5.3 省エネルギー推進期

1972（昭和47）年にローマクラブが『成長の限界』を発表し、高度成長に対して懸念が表明され、一方、大気汚染、水質汚染などの産業公害に対する世論も顕在化し一方的な成長神話に疑問が生じた所へ、1973（昭和48）年11月に石油危機が起こり、粗鋼生産は1億1,932万t（1973（昭和48）年をピークに鉄鋼の内需の不振や貿易摩擦により停滞し、日本鉄鋼業は国際競争力を維持するために大型化による効率の向上以外の新たな技術的手段が必要となった。⁹⁾

高炉メーカーでは、生産額に占めるエネルギーコストが1973年に21%だったが、1975（昭和50）年には36%へ急騰し、一旦落ち着いたかに見えた数字が1978年の第2次石油危機で再度上昇し1985（昭和60）年まで30%弱で推移している。したがって、石炭・石油価格の上昇はエネルギー消費量の削減及び効率化への十分なインセンティブとなった。

政府は第1次・第2次の石油危機を背景にわが国の脆弱なエネルギー供給構造にかんがみ、全エネルギー消費量の約6割を占める産業部門のエネルギー対策を加速度的に推進し、エネルギー安全保障を確立するために、1979（昭和54）年「熱管理法」を発展的に解消して「エネルギー使用の合理化に関する法律（省エネルギー法）」を制定し省エネルギー関連の設備投資に対し、税制・金融上の措置を講じた。具体的には、産業部門での省エネルギー設備投資を推進するために、1975（昭和50）年より特別償却制度¹⁰⁾、免税、日本開発銀行の低利融資など金融・税制上の助成措置が行われた。これらの制度によって、省エネルギー設備費用を国税や地方税へ転嫁できたので投資回収年数を短縮する一因となった。

環境省は京都議定書の採択（1997（平成9）年12月）そして発効（日本：2005（平成17）年2月）を受けて、地球温暖化対策の推進に関する法律（温対法）を1997（平成9）年に施行、2006年に大幅改正をし

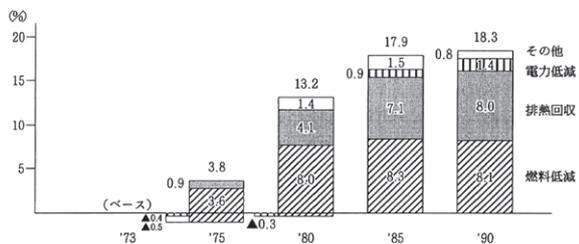
ている。温対法は京都議定書の趣旨を国内で法的に有効にさせるための法律として位置づけられる。

しかし、日本には1979年からの省エネ法があり、エネルギーの効率的利用に関して実効性の高い法律となっていた。したがって、エネルギー起源CO₂という部分で省エネ法と温対法が重なりあうことになり、排出量算定報告においては温対法の報告書を省エネ法の定期報告書に添付して提出するという事になった。

一方、経団連は1997(平成9)年6月『経団連環境自主行動計画』を発表、製造業を始めエネルギー、流通、運輸、金融、建設、貿易等37業種が、経団連として「2010年度に産業部門及びエネルギー転換部門からのCO₂排出量を1990年度レベル以下に抑制するよう努力する」という目標を設定し、1998年度から計画の実行状況をフォローアップしている。

また、エネルギー多消費産業を対象に、算定方法の国際標準化に向けた取組が模索されるなか、鉄鋼業界では、CO₂排出量算定方法の世界的な共通化を図るため、worldsteelが策定した鉄鋼CO₂排出量・原単位計算方法をベースに日本主導で国際標準化を推進し、2013(平成25)年3月15日にISO14404として正式発行された。

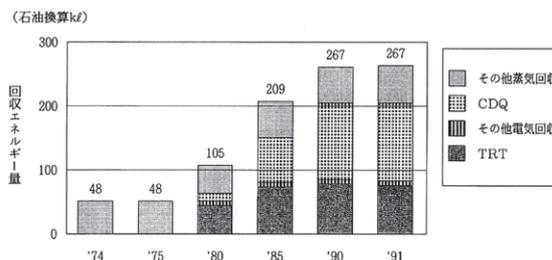
省エネルギーの要因は、燃料低減と排熱回収に大別できるが、燃料低減は第1次石油危機を契機に大幅に進展した。その内容は図9.9に示すような連続鋳造や連続焼鈍など生産設備の革新とコークス炉の燃焼管理など設備投資をほとんど必要としない操業改善である。しかし2度目の石油危機を契機にさらなる省エネルギーの必要に迫られ、設備投資を伴う排熱回収は1975年では0.9%であるが、1980年で4.1%、1985年で7.1%と進展している¹¹⁾。



出所) 日本鉄鋼連盟エネルギー対策委員会省エネルギー実績分析WG『一貫製鉄所の省エネルギー対策とその成果』1993年4月、94ページ。

図9.9 省エネルギー技術の内訳

その内容は、TRTの電力回収、CDQの電力または熱回収などが中心である。特に、図9.10エネルギー量を見ると、TRT、CDQが占める割合が大きい⁹⁾。



出所) 日本鉄鋼連盟『一貫製鉄所の未利用エネルギー』1993年、13ページ。

図9.10 省エネルギー設備の内訳

省エネルギー対策は歩留り、エネルギー消費原単位の向上など生産能力を質的に発展させるものであり、環境対策として実施された排出ガスからのSO_x、NO_x削減設備などと異なり企業に経済的損害を与えるものではない。

日本では電力料金がいため電力として回収することが有利であるが、海外では各事業所の条件を個別に検討した上で、費用対効果の視点による投資の優先度の見極めは必須である。

日本における鉄鋼業の地球温暖化への取り組みの経緯を概念的に図9.11に示す。

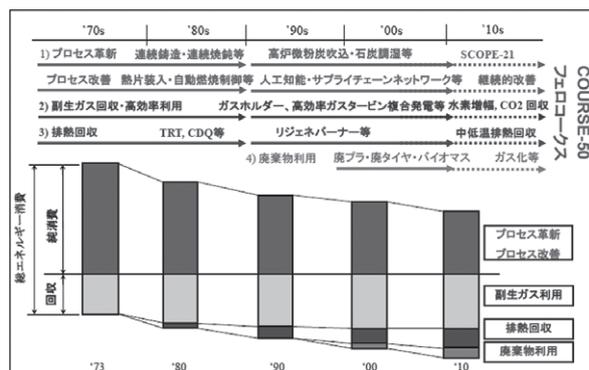


図9.11 我が国における鉄鋼業の地球温暖化への取り組み
鉄鋼業の地球温暖化作業への取組
平成28年1月 日本鉄鋼連盟

副生ガスの利用範囲の拡大に始まり、排熱回収がこれに続き、最近では廃プラスチックや廃タイヤなど外部からの廃棄物を有効利用する静脈産業的な取り組みが進んでいる。

参考

- 1) 八幡製鉄所 資料室所蔵, K280.
- 2) 日本のコークス変遷史 八幡製鉄所の設備・技術の変遷第2分冊, P35, 写真6-4.
- 3) 鉄鋼界, 3月号, p.23, 1993.
- 4) JASE-W 国際展開技術集 (S-10).
- 5) 鉄鋼便覧 第5版, P111. 表4.6, 2014.

- 6) 豊田 茂：鉄と鋼, Vol.68, (13), p.1675, 1982.
- 7) 「環境税」に関する見解」日本鉄鋼連盟 (H15.09.19).
- 8) 「ばい煙の空、死の海から奇跡の復活」北九州市環境局環境国際戦略課.
- 9) 上園昌武：経営研究, Vol.48, No.1, p.135, 1997.
- 10) 「取得価額×30%」を通常の減価償却額とは別枠で特別に償却することができる制度。
- 11) 「一貫製鉄所の省エネルギー対策とその成果」日本鉄鋼連盟エネルギー対策委員会, p.94, 1993.
- 12) 一貫製鉄所の未利用エネルギー：その実態と活用の可能性, 日本鉄鋼連盟, p.13, 1992.

10 | SCOPE21 (次世代コークス炉開発)

第3章の図3.5においてコークス製造において原料炭の炭化室における石炭の装入密度が製品品質、生産性に影響することを述べた。さらに密度上昇を実現するために開発された具体的な事前処理の手段を第8章において紹介した。ここで述べるSCOPE21 (Super Coke Oven for Productivity and Environmental Enhancement toward the 21st Century) は図10.1に示すようにいわばこれまでの技術の集大成と云えるものである。

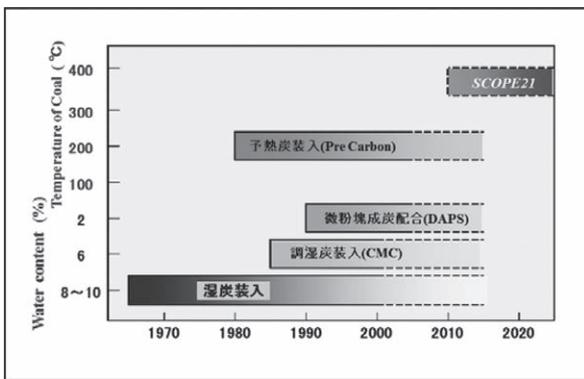


図 10.1 従来技術と SCOPE21 の位置付け

先に8.3.5で述べたDAPSは既に分級粉碎から塊成炭装入、調湿炭装入を組み合わせた技術であり、これ

にプレカーボンの予熱技術を加えて品質改善から生産性向上までを狙った技術である。

SCOPE21は、このDAPS技術に予熱炭装入における予熱温度をさらに高くすると共にその温度上昇速度を速くすること、またコークス化が終了した後の消火に乾式消火を採用した技術である。

図10.2にSCOPE21の要素技術フローを示す¹⁾。CDQは既知の技術であるので、予熱炭装入の延長上ではあるものの急速加熱のみが新規に加わった技術である。

石炭は約400℃以上に加熱すると軟化溶融する。石炭をコークス炉に装入する前の事前処理工程で、石炭から水分を除去し蒸発過程を省略し、さらになるべく高温に加熱してからコークス炉に装入して乾留した方がコークス製造に要する時間は短くなって生産性が向上することは自明である。

10.1 技術のバックグラウンド

石炭が軟化溶融する温度域(約400~500℃)で加熱速度を大きくすると、8.1節で述べたコークス強度を支配する要因の一つである石炭の流動性(粘結性)や膨張率が向上することは、D.W.Vau Krevelenによりすでに知られていた²⁾。

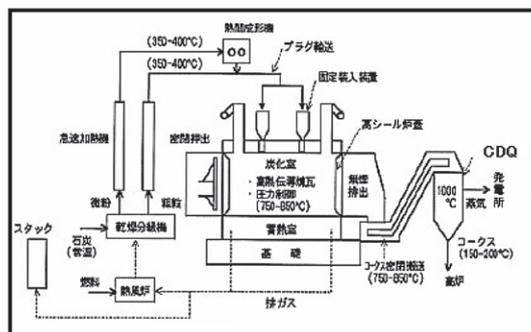
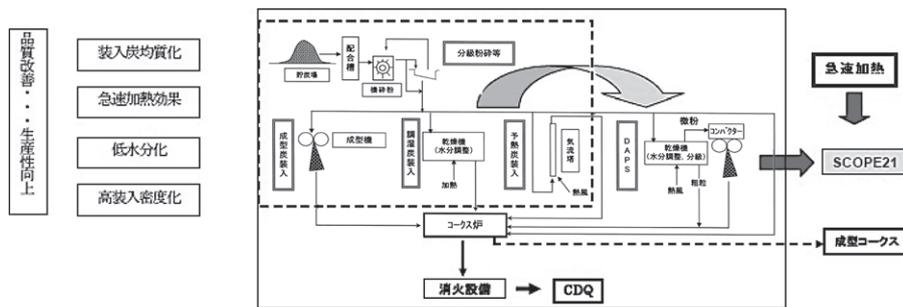


図 10.2 SCOPE21 の技術フロー¹⁾

しかし、実機プロセスを考える場合に、炭塵爆発の恐れのある微粉炭を何度までハンドリングできるのか、石炭を何度まで急速加熱処理することによりコークス強度向上効果が得られるのかという課題については未知であった。

1993（平成5）年に新日鉄（現新日鉄住金）総合技術センター（RE）において先ずひと粒の石炭を用いた針侵入型試験装置による実験からスタートし、1回の実験で使用する石炭量が200g規模の小型急速加熱－乾留試験装置によるラボ実験を行った。直径25mm、高さ1.8mの気流塔加熱機のパイプを作り、急速加熱による石炭の粘結性向上を確認した。その結果、石炭を約380℃以下まで急速加熱した後、コークス炉の炭化室に装入して乾留することでコークス強度が図10.3のように向上することが期待された³⁾。

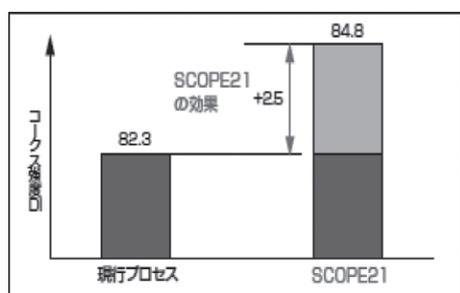


図10.3 急速加熱のコークス強度に及ぼす期待される影響

プロジェクトに理論的根拠を提供するため、先端的分析技術の適用によるメカニズム解明などが研究室の壁を越えて行われた。

プロジェクト当事者の鷹嘴・加藤らが溶媒抽出法で見出した「自己溶解反応説⁴⁾」を齊藤・古牧・加藤らは高温 in-situ NMR イメージング法により急速加熱効果メカニズムを分子レベルの反応として確認した⁵⁾。

すなわち、石炭を一連の分子量分布を有する集合体とすると、軟化溶解初期で熱的な緩和により凝集構造が解放され、これがもともと存在する可溶成分に融け込んで流動化すると考えられる。

このようにして生成した軽質の可溶成分がひとつ上の重質成分の溶解に寄与し、ここで可溶化した成分が次の重質成分の溶解を促すという形で、次々に重質成分の溶解が図られていくという過程である。

この研究は、鉄鋼協会 石炭粒子の軟化溶解機構解析研究会の研究の一環として、行われたものである。ここで石炭の軟化溶解とはどのようなメカニズムで起こるのかを徹底的に研究された。

この時点で鷹嘴は東北大学に所属し（現在は産業技術総合研究所に移籍）、齊藤は新日鉄 先端技研の所属であり、古牧・加藤が所属する新日鉄 鉄鋼技研とそれぞれ組織的には異なる研究所に所属してプロジェクトの基礎的な部分を担当している。

日本鉄鋼連盟主体の石炭利用に関する国家プロジェクトには、「連続式成形コークス製造技術（FCP）」（1978年～86年）、「石炭直接利用製鉄技術開発（DIOS）」（1988年～94年）があった。DIOSプロジェクトの終了時に、通産省（現・経済産業省）より次の開発テーマへの打診があった。新日鉄はこの急速加熱効果「確認」をもとに、鉄鋼各社の賛同を得て、国家プロジェクトとして提案し、1994（昭和59）年に国家プロジェクト開発がスタートした³⁾。

一方、（社）日本鉄鋼協会では、1977（昭和52）年から石炭の基礎物性値と基礎特性、コークス製造技術に関する基盤研究をはじめ、産学連携で時代ニーズを先取りする石炭の有効利用技術の研究活動を推進してきた⁶⁾。

現在、コークスは大学では研究の対象になりにくいと言われている。

- ・企業のノウハウが多く、工学的な解析がしにくい
- ・ユーザーが製鉄業に限定されていて研究成果の汎用性の点で難点がある
- ・戦後、有機化学の関心が石炭化学から石油化学へ移行し、特に最近は地球温暖化に絡んで社会的に脱石炭の傾向がある

などが理由とされているが、しかし、石炭構造～軟化溶解現象～コークス化現象を解明できれば炭素繊維など石炭科学、他の材料への解析結果の展開などが可能になると思われる。

そのような観点を踏まえて、大学側から数名～10名程度の研究委員に対して、企業側の研究幹事がペアを組んだ1期間4年間の鉄鋼協会のコークス研究会が約30年間位続けられており、その成果は、最終年度の報告会で印刷物にして発行されている。

産学連携でホットなテーマについて、表10.1に示すように基盤研究を重視しながら行っており、人材育成にも非常に役立っている。

このような活動が過去にあることが、SCOPE21で業界が団結して研究開発を推進する上で、貴重な役割を果たしたことは明らかである。

SCOPE21における産学官の共同研究活動において主導的役割を果たしたのは、先述のように（社）日本鉄鋼協会における高温プロセス部会・特定基礎研究活動に始まる一連の研究会活動であり、プロジェクト期

3) 要素組合せ試験（急速加熱／塊成化／搬送工程）

②環境／省エネルギー技術

- 1) 燃焼構造最適化試験
- 2) 高シール炉体構造検討
- 3) 高温炭／コークス密閉輸送試験

③高生産性技術

- 1) 中低温コークス改質評価試験

(3) パイロットプラント試験（2000～2002年）

・パイロットプラント設備（図10.4）は、要素組合せ試験結果をもとに設計した石炭加熱処理工程に、乾留工程とコークス、ガス・タールなどの乾留生成物評価工程までの設備を加えて、全系運転が可能な設備とした。一年間の試験操業を行い、開発目標の確認と実機化のためのエンジニアリングデータ収集を実施した。

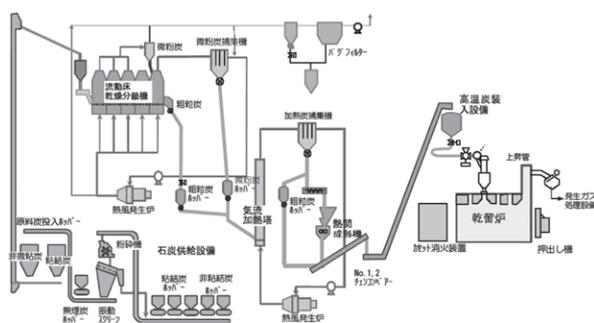


図 10.4 パイロットプラントの基本フロー

(4) 実機設備の概念設計（2001～2002年）

- ・パイロットプラント試験操業で得られた実機設計のためのエンジニアリングデータを基に、コークス生産能力4,000トン／日規模の実用化設備の概念設計を実施。
- ・更に、実機設備の建設費およびコークス製造コストを試算し、同規模の生産能力を有する現行法の湿炭装入プロセスとの比較評価を実施。

(5) パイロットプラントの解体調査研究（2003年）

- ・パイロットプラント設備の中で、開発要素の大きい石炭事前処理設備の一部および乾留炉設備について解体調査を行い、実機設備の材料選定に必要な設計データの収集および開発・改良技術の効果確認を行うとともに、実機設備の概念設計の妥当性評価を実施。

10.3 成果概要

(1) 調査研究

1994-1995（平成6～7）年度の調査研究ステージで基本プロセスを構築し、実機化までの開発展開を表10.2のように設定した。

表 10.2 実機化までの開発展

	石炭事前処理設備	乾留設備
1st BP 試験	0.6 t/h	実機大燃焼試験
2nd PP 試験	6.0 〃	17 t/ 窯
3rd 実機想定*	240 〃	34 〃

※前提：コークス量 4,000t/ 日の生産ユニット

(2) 要素技術開発

1996（平成8）年度から要素技術試験を行い、1998（10）年度には、新日本製鐵(株)名古屋製鐵所構内に最重要工程である石炭事前処理工程のベンチプラント（石炭処理量0.6t/h）を設置（図10.5）し、1年半の試験操業（要素組合せ試験）を行ってパイロットプラントの設備仕様を確定した。



図 10.5 ベンチプラントの外観

(3) パイロットプラント試験

- 1) 要素技術開発成果をもとに設計・建設した石炭処理量6.0t/hのパイロットプラント（図10.6）をベンチプラントに引き続き名古屋製鐵所構内に設置して、一年間の試験操業を実施した。



図 10.6 パイロットプラントの外観

2) 当初開発目標を表 10.3 のようにほぼ達成できることを確認した。

表 10.3 開発目標に対するパイロットプラント成果

開発項目	目標	成果
石炭資源の有効利用	・非微粘結炭の使用割合増 20%→50%	達成
高生産性	・生産性 3 倍	2.4 倍
環境及び省エネルギー	・省エネルギー 20% ・NOx30% 低減 ・無煙、無発塵技術の確立	達成 (21%) 達成 実機設計データ収集

3) パイロットプラント試験で実機設計のエンジニアリングデータの収集作業を行い、実用化のための総合評価を行った。

10.4 実機稼働

(1) 大分第 5 コークス炉³⁾

SCOPE21 の実機化は、2003（平成 15）年 11 月の国家プロジェクト終了後、蓄積された研究・試験結果に基づき新日鉄が独自に計画立案し、大分製鉄所第 5 コークス炉・石炭事前処理設備・改質チャンバー（CDQ）の建設に併せて、図 10.8 に示す石炭輸送設備、石炭事前処理設備と、後工程となる CDQ、コークス輸送設備、ガス精製設備など前後工程の増設までを含めた大規模プロジェクトとして実現することになった（図 10.7）。

2006（平成 18）年 4 月の着工を目指し、企画から設計、海外・国内ベンダーからの資材調達、品質・納期管理は設備班が担当した。

主要設備	仕様	
石炭事前処理設備	基本プロセス	SCOPE21 プロセス
	流動床乾燥分級機	石炭処理量：155dry-t/h
	気流塔加熱機	石炭処理量：106dry-t/h
	塊成機	石炭処理量：34dry-t/h×2 基
コークス炉	型式	SCOPE21 型低 NOx 炉
	炭化室	64 門、炉高 6.7m×炉幅 0.45m 炉長 16.6m
CDQ (Coke Dry Quenching)	コークス処理設備	120t/h

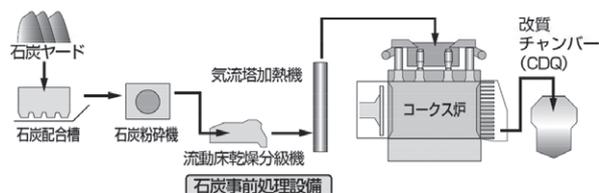


図 10.7 大分第 5 コークス炉のプロセスフローと主な設備仕様

建設物の高さが 60m に到達する大規模な SCOPE21（図 10.8）では、鋼材、煉瓦などの建設資材量も膨大

である。コンクリート 2 万 5,000m³、鋼材 1 万 800 トン、耐火物 2 万 4,600 トンが必要となる中で、国内で調達できない珪石煉瓦や特殊形状の粘土煉瓦をはじめ一部の鋳物品を海外から調達した。

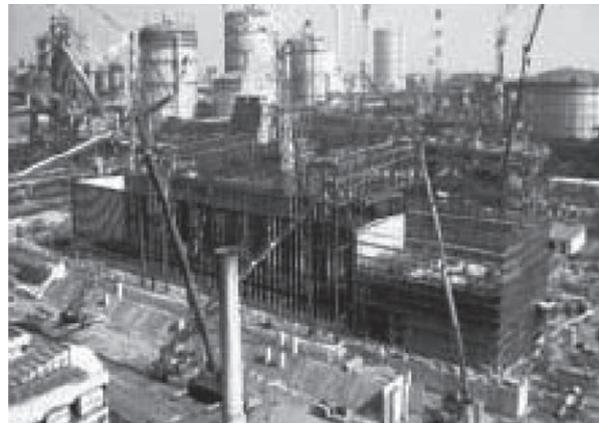


図 10.8 建設中

本プロジェクトの実施に際して、大分製鉄所ではコークス製造経験者の復職と中途採用を含む新規採用による増員を行い、さらには八幡、名古屋、君津、室蘭からの所間応援体制を組み、事前に既設コークス炉での長期研修を行った。2008（平成 20）年 5 月 30 日稼働した。（図 10.9）



図 10.9 完工後

今後他所に展開する可能性を踏まえて、大分での操業ノウハウを確実に蓄積して、円滑にトランスファーできる仕組みを構築したいとしている。当初の目的の一つであった技術の伝承はかろうじて達成されようとしている。

(2) 名古屋第 5 コークス炉⁷⁾

2008（平成 20）年 5 月に大分製鉄所で稼働した大分第 5 コークス炉の成果を踏まえて 2013（平成 25）年 6 月に名古屋製鉄所で第 2 号機が稼働した。（図

10.10)

名古屋製鉄所第5コークス炉の生産能力は約100万トン／年。投資額は約600億円。同コークス炉は既設コークス炉に対して生産性1.7倍で、非微粘結炭の使用比率を50%まで拡大している。また、既設コークス炉に対して原油換算で約数万キロリットル／年の省エネと、10～20万トン／年のCO₂削減を実現している。



図 10.10 名古屋製鉄所第5コークス炉

参 考

- 1) 鉄鋼便覧 第4版(電子版), 図42-4.52.
- 2) D.W. Van Krevelen: Coal, p.261, Elsevier, 1961.
- 3) Nippon Steel Monthly,10, p.1, 2008.
- 4) 鷹鷲利公, 加藤健次, 深田喜代志, 石炭の加熱下現象と理論モデル, 日本鉄鋼協会編, 東京, 107, 1997.
- 5) 齋藤公兎, 加藤健次, 新日鉄技報, 第384号, p.48, 2006.
- 6) 産業構造審議会技術分析会/経済産業省「石炭高度転換コークス製造技術の開発」追跡評価報告書平成22年3月, (株)日鉄技術情報センター, 2010.
- 7) 新日鉄住金(株)プレスリリース(2013年6月18日)

11 | 国家プロジェクトによるコークス製造技術の開発 (将来のための技術開発)

11.1 成型コークス高炉装入試験

成型炭の製造には、ピッチ等をパインダーとし、それが溶融する 100℃ 前後で成型する冷間成型法と、高流動性粘結炭の熱可塑性を活かし、その軟化溶融温度領域である 450℃ 程度で成型する熱間成型法とがある。20 世紀後半になって、従来の室式コークス炉によらない、非微粘結炭を主に、粘結炭を従に配合する、多様な成型コークス製造法の研究が世界で盛んに行われ、日本においても数種の方式が検討されている。堅形炉（シャフト炉）による乾留、冷却はクローズドシステムの堅形炉で従来の室炉法に比べ、作業環境、労働生産性、停止・起動の容易さ、所要スペースの面等で数多くの優れた特徴を有している。

しかし外国各国の製造法はいずれも開発中で実用設備の稼働実績はない。また、これらの多くは産炭地にリンクした石炭を対象にしているのに対し、我が国の場合は成型コークス用といえども海外からの輸入炭に頼らざるを得ないことから、海外とは異なり原料のフレキシビリティに留意した開発が必要であった¹⁾。

成型コークス製造の研究は旧八幡製鉄所技術研究所において 1952（昭和 27）年に石炭総合研究所との共同研究として開始したのが初めてである。その後原料事情や経済環境などの状況変化により図 11.1 に示すようにその消長はあったが一貫して研究は継続され、その成果の一部は成型炭配合コークス製造法などの形で実用化され、1971（昭和 46）年には戸畑工場で工業化されている。

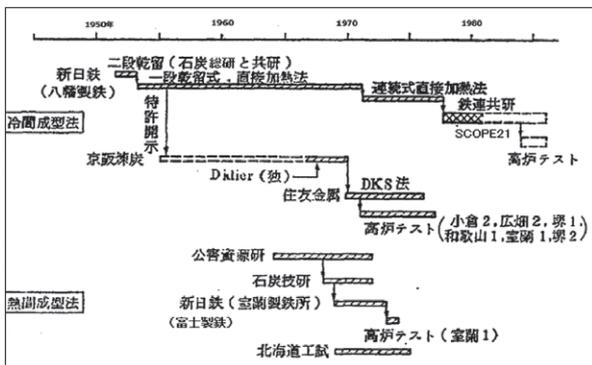


図 11.1 我が国における成型コークス製造技術開発

【成型コークスの留意点】

- 粉化しやすい

- 高密度が高く、装入に際し密に充填される

この傾向はいずれも炉内の通気性にとっては望ましくない性質であり、場合によっては装入物の降下障害（棚吊り）や、ガス流路が特定の場所に集中しいわゆる吹き抜け、その結果として熱交換が不十分で温度が低く、還元反応の不十分な装入物が急激に炉の下部に降下し冷え込みという最大級の操業トラブルに移行する危険がある。そのため通常は炉の中心部分に比較的通気性のよい部分を作り操業の安定化を図る中心操業と呼ばれる方法が行われている²⁾。

表 11.1 高炉試験の概要³⁾

名称	成型法	乾留法	企業名 (当時)	高炉名	炉容 (m ³)	試験 操業 (年)	FC使用量 (t)	試験 期間 (days)	置換率 (Max) (%)	結果概要	文献		
DKS	冷間	外熱	住金	小倉2	1,350	1971	14,000		50	通気性指数やや高いがトラブルなし	1		
				和歌山1	1,633	1974	20,000		100	RAR微増	2		
				広畑2	1,407	1973	8,000				9		
				堺1	2,510	1974	8,210	17	33	送風圧、RAR微増	3		
				室蘭1	1,245	1974	2,700	8	50	普通コークスとほぼ同等	4		
			新日鉄	堺2	2,787	1975	16,000	30	50	送風圧増、周辺流	10		
				堺2	2,787	1977		29	20	周辺流一熱損失増大	5		
				東大試験高炉								炉下部微粉が蓄積	6
				新日鉄	戸畑4		1986		74	20	K値が4%上昇	7	
				川崎製鉄	千葉5		1992		6w	20-30	装入分布の適正化により安定操業	8	
FCP	内熱												

例えば表 11.2 における文献 9 に引用した 1975 年堺第 2 高炉における実験において⁴⁾、通常コークスから成型コークスに順次切り替えていった際に送風圧が上昇し憂慮すべき状況になった。

表 11.2 文献

1 角南:	燃料協会誌	'58(1975)No.631 p.985
2 赤松ら	鉄と鋼	'75(1975)A9
3 加藤ら	鉄と鋼	'74(1974)S358
4 山田ら	鉄と鋼	'75(1975)S16
5 加藤ら	鉄と鋼	'79(1979)S78
6 桑野ら	鉄と鋼	'80(1980)S691
7 奥田ら	鉄と鋼	'87(1987)S813
8 原ら	川鉄技報	29(1997)No. 1p.43
9 中村ら	Ironmaking Proc. Iron&Steel Soc.AIME/Detroit(1979)	

この時、ステープ前温度（高炉炉壁温度）が図 11.2 に示すように成型コークスの使用にともなって炉の下部から上昇しているのが認められる。同時に、炉頂温度およびクロスゾンデ中心温度の低下が観測されていることから、炉内ガスが周辺流化したと推定される。その対策として試験期間の後半、装入物装入分布調整により中心流を促進した結果、シャフト中段付近の圧力損失が低下し、送風圧が低下するとともに変動が少なくなり、また、ステープ前温度も変動があるものの徐々に低下傾向にあり対策が成功したことがわかる。

【羽口採取コークスの解析】

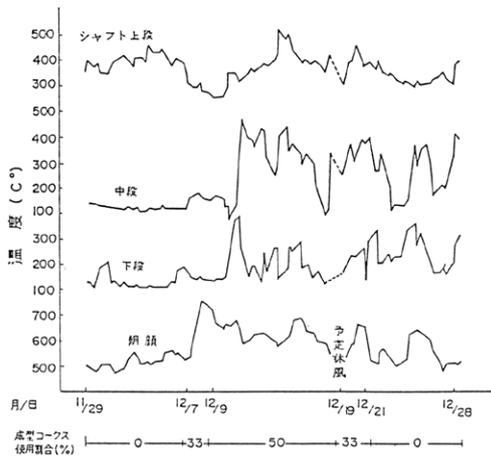


図 11.2 試験期間中のシャフトステーブ前温度の変化

成型コークスの炉内における挙動を調べるため、休風時に直径 300 mm のパイプを羽口より打ち込むことによりコークスの採取を行った。採取した炉内コークスの状況を図 11.3 に示す。

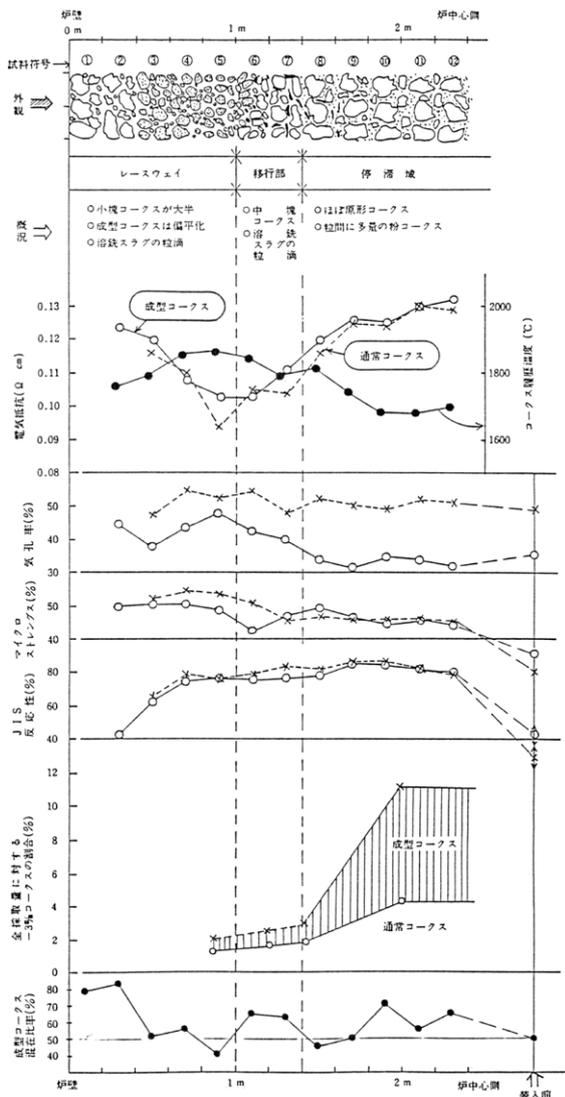


図 11.3 羽口採取コークスの状況 (成型コークス 50% 使用時)

微粉コークスの急増する位置、履歴温度変化が著しい位置をレースウェイ壁と考えると、成型コークス 50% 使用期間中レースウェイ奥行がサンプルの長さで約 400mm 短い。また、この時期炉芯には成型コークス由来の微粉 (−3 mm) が多い。

図 11.4 は羽口採取成型コークスの顕微鏡写真である。無煙炭などイナータ成分が鋭角をなしている、ほとんど反応の痕跡を止めないのに対して、これらを結合していたバインダーの部分が消失しているように見える。すなわちもともと粘結性の乏しい石炭をバインダーで糊付けしていたものが、炉内でソリュションロス反応で反応性の高い糊の部分が選択的にガス化消失した結果、元の粉に戻ってしまったということである。したがって、そもそも非粘結炭の使用が目的である以上避けがたいことであることであり、バインダーの選択などの更なる検討が必要となる。

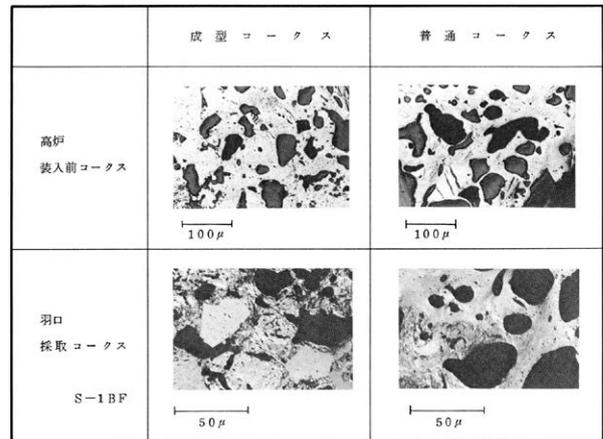


図 11.4 羽口採取コークスの組織写真

本質的な課題のもう一つは高密度である。通常のコークスがイレギュラーな形状をしているのに対して成型コークスは人為的に成型しているため均一な形状をしている。さらに通常のコークスが極めてポーラスであるのに対し空孔が少ない。その結果高密度が高く炉内で「ぎっしり」詰まってしまうことになり、コークスに期待される通気性に不利となる。

11.2 FCP プロジェクト (FCP ; Formed Coke Project)

1978 (昭和 53) 年から 1986 (昭和 61) 年にかけて実施された日本鉄鋼連盟による成型コークス法プロジェクトでは、枕型形状で成型炭容積 92cm^3 、コークス容積 75cm^3 の成型コークスが使用された。高炉で 20% 成型コークスを使用した場合平均して 4% の通気圧損上昇が認められた。圧損の上昇はコークス層の通気

抵抗が支配的な炉下部で顕著であり、高炉内圧損の解析から成形コークス層の通気抵抗は従来室炉コークス層の約2倍と結論された。高炉の微粉炭吹込みによる低コークス比換業条件のもとでは通気圧損の上昇が成形コークス使用上の大きな障害となると考えられる。

新しい成形コークス形状として、表面にU字型の通気溝を有する中凹型形状(図11.5)の採用と大型化の組み合わせが適当であると結論した。この成形コークスの通気性は、従来の枕型成形コークス(図11.6)の約2倍であり室炉コークスと同等である⁵⁾。

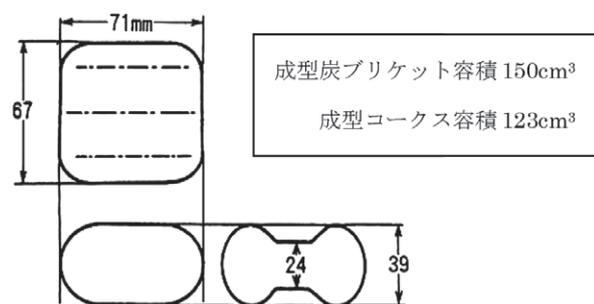


図 11.5 新型コークス

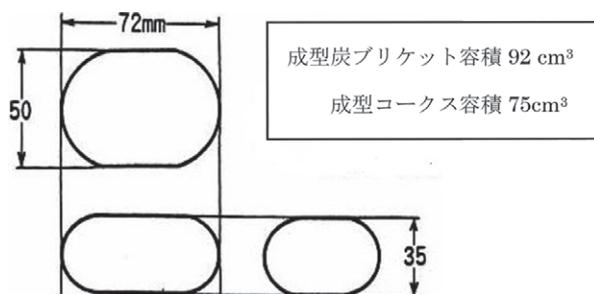


図 11.6 従来枕型コークス

図 11.7 は連続式成形コークス製造法の概念図であり、石炭粉に粘結剤を添加し、ダブルロール型、打抜き型、押し出し型、ベレタイザーなどの成型機により一定形状に成型した後、これを堅形炉(シャフト炉)でその形状のまま乾留しコークスとする方法である⁶⁾。

成型工程；原料は、非粘結炭を主原料(60~80%)とし、水分2~3%に乾燥①し、これを粉碎②する。石炭にタール等の結合材(バインダー)を加え混練③、成形④し、成形炭が得られる。

乾留工程；成形炭は乾留炉⑤に装入され低温乾留ゾーンを経て、高温乾留ゾーン⑦で1000℃まで加熱、乾留される。その間つぶれ、ふくれや収縮による割れがないように加熱速度を制御する。乾留されたコークスは、冷却ゾーンで炉の最下部から常温で吹き込まれたガスによって100℃以下に冷却され排出される。

発生ガス；炉頂からのコークス炉ガス(300-350℃)は、プレクーラー⑨、プライマリークーラー⑩で冷却され、⑪でタールミスト除去後大半のガスは循環使用される。余剰分は系外に抜き出され精製・脱硫後、高力ロリークリーン燃料(3,800kcal/Nm³)(15.9MJ/Nm³)として使用される。

副産物；ガス中の液体はデカンター⑫に導かれタールと安水が沈降分離され、それぞれ既設プラントへ送られ処理される。処理後、タールは、成形炭用のバインダーとして再利用される。

ガス循環；電気集塵機でタールミスト除去後のガスは高温ガス加熱炉⑬で約1000℃に加熱されて高温乾留ゾーン⑦に吹き込まれる。又低温ガス加熱炉⑭で450℃に加熱されたガスは⑮エジェクターを駆動し、コークス冷却に用いた高温ガスを吸引し、約600℃で低温乾留ゾーン⑥に吹き込まれる。

国プロジェクトで行ったパイロットプラントでは、通常、非粘結炭70%、粘結炭30%の配合により操業を行ったが、非粘結炭100%配合の操業にも成功した。設備能力200t/日での長期運転を行うと共に、設計能力の1.5倍にあたる300t/日の生産も達成した。また、熱原単位としては320Mcal/t-成形炭(1.34GJ/t-coke)を達成した。実大型高炉(戸畑4BF4,250m³)において、74日間にわたり、通常20%、最高30%の配合により長期の連続使用試験を行った結果、成形コークスは室炉コークスと同様に使用できることを確認した。パイロットプラントフローを図11.8に、プラントの全景を図11.9に示す。

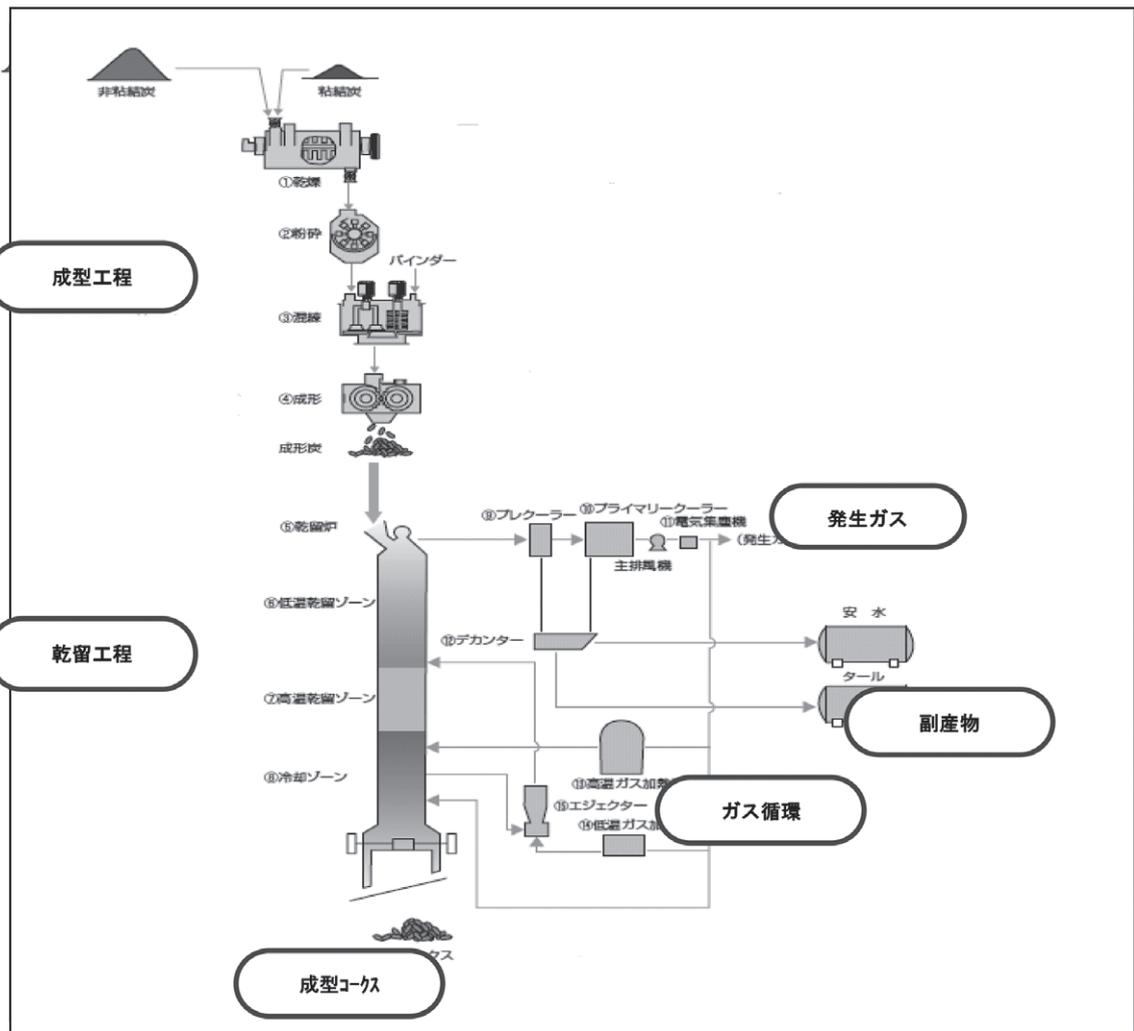


図 11.7 連続式成形コークス製造プロセス

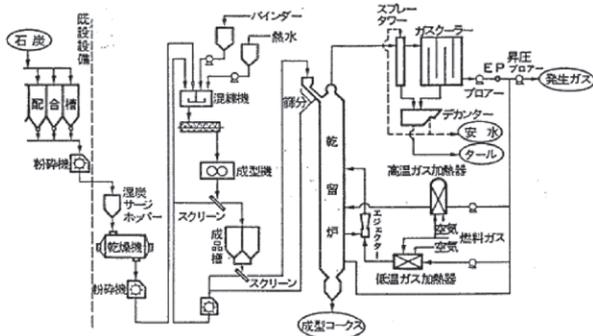


図 11.8 FCP パイロットプラントフロー

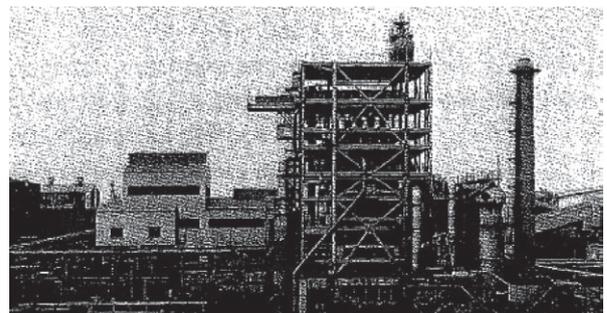


図 11.9 200t/日 成型コークス製造パイロットプラント全景

11.3 コークス製造の発展の可能性 (フェロコークス)⁷⁾

わが国では、鉄鋼各社の共同プロジェクトとして 1999～2003 (平成 11～15) 年度に文部科学省の国家プロジェクト「エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉における革新的精錬反応に関する研究」、2003～2005 (平成 15～17) 年度に日本鉄鋼協会の研

究会「高炉限界現象研究会」を実施し、日本発の省エネルギー・CO₂削減プロセスとして図 11.10 に示したフェロコークスプロセスが検討された。

高炉法において、高炉内の反応効率を向上させる技術は、還元材比を低下させ、CO₂の排出抑制効果が期待できるという点で極めて重要である。単純に考えれば還元剤と被還元物を如何に効率的に接触させるかであるが、被還元物が固体の鉄鉱石であり、還元剤が

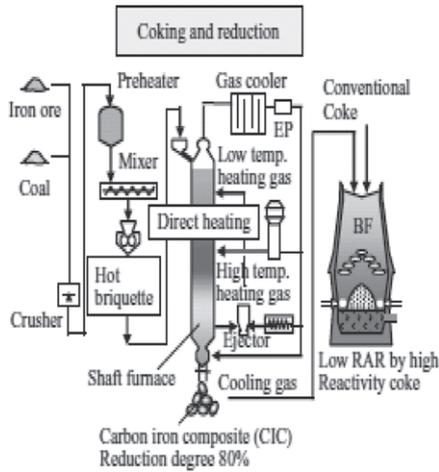


図 11.10 フェロコクスプロセス

COなどのガスであり第2章で述べたとおりガスの流通がコークスの充填状況に依存するということから層状の充填構造を採用してきた。

還元剤と被還元物を接近させたいという思いは常に存在し、炉内の通気性を悪化させない範囲で鉄鉱石とコークスを一部混合装入するなどが実行されてきた。これによって還元反応で生成したCO₂がすぐ傍にあるコークスとの反応でCOに戻り次の還元に参加できることになる。

従来の高炉内には、コークスのガス化開始温度に相当する1000℃程度の高炉熱保存帯が存在する。そして、高炉原料の還元は熱保存帯より高温の領域で約70%が生じること、温度が高くなるにしたがい図11.11に示すように還元平衡ガス組成が高CO側にシフトすること、約1100℃以上で鉄原料から融液が生じ気孔率が減少し原料内部への還元ガスの拡散が不十分となることが知られている。

このため、熱保存帯温度が1000℃程度と高い従来の高炉操業においては、高炉原料のガス還元による間

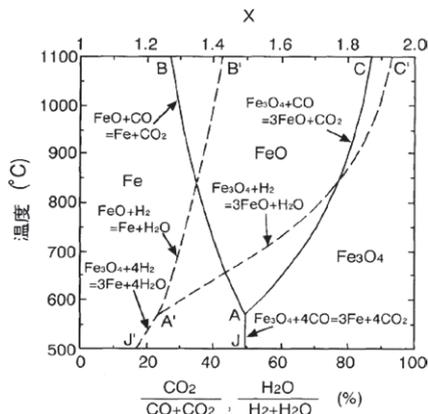


図 11.11 酸化鉄の還元平衡図

接還元が有効に活用できず、高炉原料から生じた融液中の酸化鉄とコークスとが接触して反応する直接還元の割合が高く、燃料比が高くなる問題があった。

熱保存帯温度を従来より低下させることができれば、還元平衡ガス組成が低CO側にシフトするとともに、約1100℃以上における高炉原料からの融液生成までに高炉原料が十分に間接還元されるため、直接還元の割合が低下し、燃料比が低減できる。

以上のことからさらに装入物そのもので鉱石と還元のための炭材を混合するという考えが生起するのは自然であり、これを鉱石側から行うのが含炭塊成鉱でありコークス側から行うのがフェロコクスである(図11.12)。

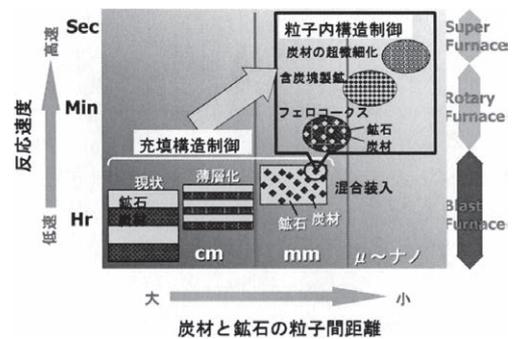


図 11.12 炭材/鉱石近接化による反応の高速化

その中でも高反応性コークスを使用して、高炉内熱保存帯温度を低下させる方法が有望と考えられている。従来はCO₂によるいわゆるソリューション反応によるコークスの劣化を抑える立場から反応性は低い方がよいとされてきたが、逆転の発想でコークスの反応性を高めソリューションによるCO₂+C→2COによる還元能力の増強と、この反応が吸熱反応であることから付近の温度が低下することから、期待して省エネルギーを図ろうとするものである(図11.13)。

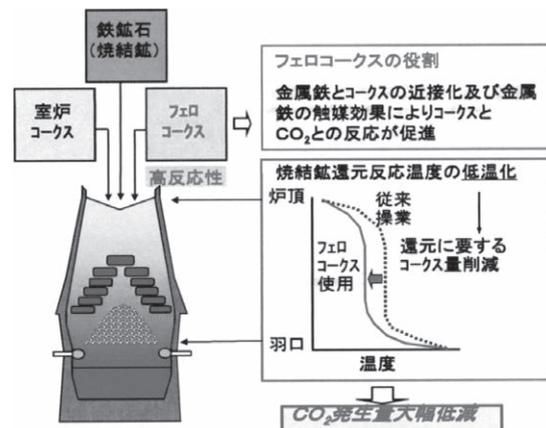


図 11.13 フェロコクスによる還元材比低減機構 2

過去にコークスにCaなどを加えて反応性を上げる試みが行われて高炉試験なども行われていたが、これをFeで行おうとするものである。

この効果を狙って高炉の低還元材比操業による省エネルギー（CO₂排出量削減）、一般炭や低品位鉄石などの劣質原料の多量使用による資源対応力の強化を目的に、原料の石炭と鉄鉱石を混合、熱間成型した石炭／鉄石の複合成型物を乾留し、一部還元された粉状鉄源を内蔵した図11.14に示す鉄内装型コークス製造プロセス（フェロコークス）パイロットプラント（30t/日）建設が国家プロジェクトとして2年間の総事業費47億円で2009年12月スタートした。



図 11.14 パイロットプラント全景

所定の粒径に粉碎された鉄鉱石および石炭は、所定の比率で配合され、熱間成型によりノーバインダーで圧密される。圧密された成型物は、高温羽口、低温羽口を備えた直接加熱方式の堅型乾留炉に装入され、金属鉄を含有する鉄内装型コークスが製造される（図11.15）。



図 11.15 製品フェロコークス

2012年4月～2013年2月長期製造試験（7段階、約1ヶ月の連続操業を反復）により製造、備蓄した約2,100トンのフェロコークスを用いて、東日本製鉄所（千葉地区）第6高炉（炉容積5,153m³）にて2013年3月11日から5日間の使用試験が実施された。高炉でのコークス使用量の約10%をフェロコークスに置き換え、高炉操業に及ぼす影響を評価した。

高炉内のガス流通の悪化や溶銑温度の変動が懸念されたが、フェロコークスの強度確保、高炉への装入方法の適正化により、高炉操業に悪影響を及ぼすことなく実験を終了することができた。同時に、フェロコークスの使用により、還元材比、コークス比が計画通り低下することを実証した。

以下に述べるように、フェロコークス自体は新しい技術ではない。しかし、従来のフェロコークスが室炉タイプのコークス炉で生産されたのに対し、今回の試みは直熱式のシャフト炉である。

さらに過去のフェロコークスは、消火に際し水を使用する湿式であって、折角乾留過程において金属まで還元されている鉄分が再酸化されてしまっている。しかし、今回は乾式消火（CDQ）を使用するためその不利は回避できる。

11.4 過去のフェロコークス技術

文献に現れるフェロコークスの最初はむしろ硬いコークスを作るために石炭に鉄を含むダストを添加するという1900年のドイツ・Alphons Custodisの特許であり、その後世界で行われたフェロコークスの開発や高炉装入試験も、地元の石炭（ガス用石炭など）でどのように硬いコークスを焼くか、言い換えればどのようにして強粘結炭を節約するかというコンセプトの中で行われた。

11.4.1 八幡製鉄所における試験操業

そのなかで第2次世界大戦末期の昭和19（1944）年の八幡製鉄所で、途中空襲で被害に遭いながら行われた試験操業は現時点で考えれば先進的である。粉鉄及びガス灰の有効利用が目的とされるが、恐らく制海権が危うくなり原料の入荷状況が厳しくなることからの行動であったと思われる。

5%の磁鉄鉱を添加したフェロコークスは殆ど通常コークスと同等の品質を有し、高炉操業もコークスによる障害は認められない。

この試験操業に使われた技術がどのような経緯でわが国にもたらされたかは、今となっては推測するしかないが、1930年代にドイツでフェロコークスをリードしたPacshkeが関係するものが多く、低シャフト炉で劣質原料を用いて合金鉄の成分制御などに利用する特許などがある。Pacshkeが1930年代の後半、東田試験に先立つ5年ほど前に当時同盟国であったドイツにあって（Claustahl工科大学）フェロコークスの研究開発を精力的に行っていたことと無縁ではないと

思われる。

その後、また10年が経過して1950年代の中ごろ世界的にフェロコークスのブームが起こる。

- + 1953年；Republic Cleveland No.6BF (11.19-12.10) 3,239t フェロコーク使用
- + 1956年；Mystic BF 2年間使用 (Eastern Gas and Fuel Associate)
- + 1956年；(6.11 1~21日) 洞岡2BF コークス炉操業／製造条件設計のための缶焼き試験 (八幡技研)

11.4.2 フェロコークス高炉試験

①高炉試験 - (昭和31年(6月11~21日) 洞岡2BF)

使用したコークス性状を表11.3に、洞岡2BFにおける高炉実験の操業諸元を図11.16に示す⁸⁾。

表 11.3 使用コークス性状

Properties	Coke	Iron coke		Coke
		5% fine ore mix.	10% fine ore mix.	
Ash %	18.05	21.83	12.17	
Drum index (15mm) %	91.80	91.60	91.90	
Volatile matter %	2.16	2.31	1.64	
Mean size mm	74.8	77.3	73.6	
Screen test (+100mm) %	15.0	17.7	11.6	

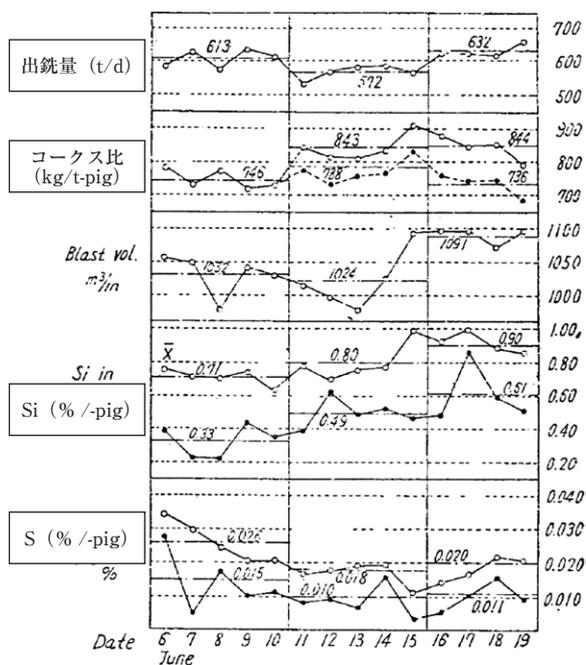


図 11.16 高炉操業諸元

強度指数はむしろ改善されていて特に問題は認められない。

* 5%フェロコークス装入期の出鉄量減は製鉄量律速

で増風できなかったため

* 補正コークス比 (図中の点線) :

0.746/F-coke- 0 %

0.788/F-coke-5%

0.736/F-coke-10%

* フェロコークス中固定炭素の変動大のため、炉熱に幾分余裕を持たせるため熱め操業したことにより溶鉄中 Si 高めである。

* 通風不良、スリップなし

コークス炉の操業状況と製品コークス性状との関係を表11.4に示す。鉄分の増加に対して若干炉温を上げていることがわかる。製品コークス強度は改善されている。

表 11.4 操業成績とコークス品質

	操業成績				コークス品質								
	平均炉温	平均炭化時間	平均火焔時間	平均炉温	D.I 50mm		D.I 15mm		T.I 25mm		T.I 6mm		
					\bar{x}	R	\bar{x}	R	\bar{x}	R	\bar{x}	R	
普通コークス	1,215	16°45'	15°43'	74.4	4.0	29.7	3.2	91.9	0.8	75.7	3.1	85.9	2.2
5%配合フェロコークス	1,236	16°50'	15°34'	76.0	3.5	32.2	6.0	91.8	0.8	74.9	5.2	85.0	3.7
10%配合フェロコークス	1,247	16°42'	15°28'	76.2	5.6	36.5	6.2	91.7	1.2	77.4	5.1	86.4	2.1

コークス製造に際しての留意事項

装入系統

* 粉鉱石以外の作業系統については平常作業と同様に実施したが、鉱石は比重大のため石炭の輸送設備の転用は不可能である

押し出し作業

電流値からの判断では特に問題はない

炉壁の損傷

コークス中の鉄分と炉壁のシリカの反応が懸念される

* 海外事例では Fayalite が 1360℃ 以上で生成との報告がある。

11.5 シャフトコークス炉まとめ

第2次堺2BF試験での羽口採取コークスをみると形態的には健全、ないしは相似形を保って縮小している。微粉の発生という観点から課題のある成型コークスであるが、破碎という見地ではむしろ有利とさえ云えるのではなからうか。

2015年3月、経団連・環境本部より公表された「低炭素社会実行計画フェーズII」において「フェロコークス技術」は高炉1基当たり原油換算で3.9万kL/年のCO₂削減を期待されている。

堺 2BF 以後、周辺に 20% 程度を装入して中心流を維持しながら使用するというのが現時点での操業標準となった。しかし、今後、成型コークス性状の欠陥が克服され使用量を増やすことが可能になった将来で、シャフト炉乾留でスケールアップによるその生産量をどのように確保するかが課題である

参 考

- 1) 美浦義明, 奥原捷見, 燃料協会誌, Vol.61, (No.659), p.170, 1982.
- 2) 高炉技術の系統化 (国立博物館) p.139, 2010.
- 3) 表 11.2 に示した文献により著者作成。
- 4) Nakamura M., et al., Ironmaking Proc. Iron & Steel Soc, AIME / Detroit, 1979.
- 5) 小牧ら; 鉄と鋼, Vol.82, No.5, p.442, 1996.
- 6) (一社) 石炭エネルギーセンター「日本のクリーン・コール・テクノロジー」成形コークス製造技術, B-07-01, 2016.
- 7) JFE スチールプレスリリース (2013 年 4 月 19 日)
- 8) 白石芳雄, 光井 清, 都留 隆, 鉄と鋼, Vol.43, No3, (19570301), pp.351-352, 1957.

12 | 国外におけるコークス技術の動向

これまで我が国におけるコークス技術の展開を追ってきた。多くの産業技術が明治維新政府の殖産興業政策により海外から移入されたが、受け入れに際しての単なるデッドコピーが失敗に終わり、その後の急速な発展はそれまでに自発的に培っていた江戸時代からの下地の存在が寄与しているとの分析が行われている。コークス技術においても例外ではない。

イギリスにおける石炭コークスによる製鉄技術から約200年遅れてスタートした我が国であり、世界に先駆けて発見・発明した原理的に新しい概念は残念ながらない。しかし、導入した技術を我が国の実情に合わせて換骨奪胎し国際競争力のある技術に高めたことも、我が国の他の生産技術と同様である。

しかし近年、鉄鋼市場がグローバル化し、途上国が自国生産を始めると、臨海製鉄所をベースとする我が国の製鉄技術が必ずしも世界標準にならず、それぞれの国の条件に沿った技術が求められてくる。例えば生産拠点を国内から海外の消費地の近くに移転する際や、そこまでではなくとも省エネ技術や環境対策技術を単体設備として海外に移転する場合などである。

このような状況で、今後の技術開発を考える際には海外で普及している技術にも留意する必要がある。本章では、我が国では殆ど実機が稼働した事例がないが一部の国では普及が進んでいる技術について述べる。

12.1 熱回収型コークス炉 (Heat Recovery Coke Oven) / 副産物非回収型コークス炉 (non-recovery coke oven)

米国、豪州にて稼働している熱回収型コークス炉は、かつてのビーハイブコークス炉と同系列のものである。図12.1 熱回収型コークス炉の例に炉構造の模式図を示す。前方炉蓋を開き炉底に石炭を装入する。

石炭から発生するガスに炉蓋開口部から空気を導入し燃焼させ、乾留の加熱源とする。燃焼ガスは更に炉底部部のフリーに吸引され炉底からの加熱をおこなう。その後、ガスは吸引本管にて排出される。燃焼排ガスは熱量を保持しており、これから熱回収を行うためボイラーにより蒸気を発生し蒸気タービンにより発電機を回して電力としてエネルギーを回収する。このように、炉内を負圧にして操業しており、かつ石炭発生ガス・タールを炉内で完全燃焼させるため、コークス炉からのガス・タールの漏出防止については、最も信頼度の高いプロセスである。また、窯毎独立構造であることから窯毎のメンテナンスは容易である（図

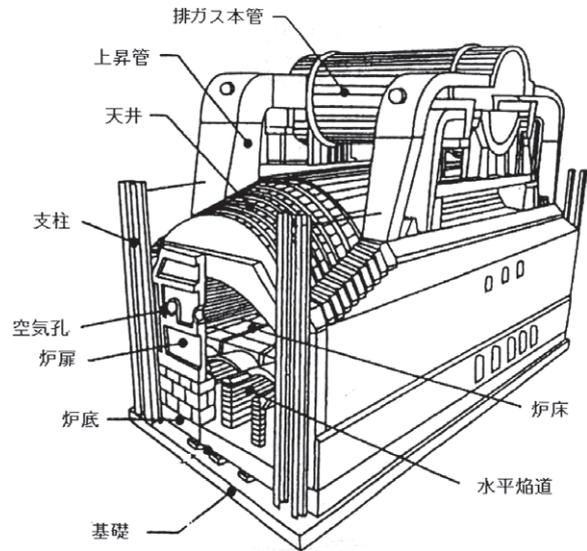


図 12.1 熱回収型コークス炉の例¹⁾

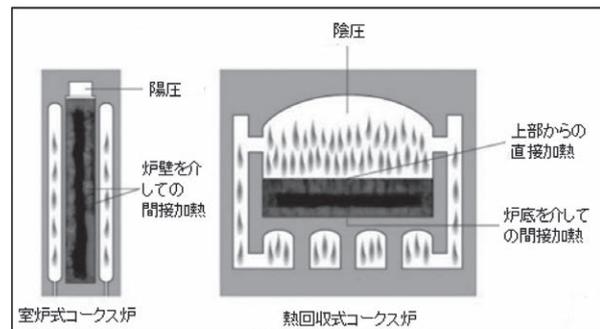


図 12.1-1 室炉式コークス炉との伝熱モードの違い²⁾

12.1-1)。

第14章で述べるようにコークス炉ガスの回収工程は極めて複雑なシステムである。さらに、回収工程がコークス炉で発生した乾留ガスからタールなど有害成分を含めた各成分の分離設備から構成されていることから予想されるように、環境への漏洩は大気汚染防止法、水質汚濁防止法などで厳しく制限されている。

現状の室炉式コークス炉は物の出入り口が多く、しかも若干加圧サイドで操業が行われるため、その気密性の確保のためさまざまな工夫が必要となる。

従来型と比較して熱回収型炉は大気放散物質、有害大気放散物質等発生量は少なく、かつ化成品副産物を回収しないので廃水や有害物質も発生しないことから環境的にはコストパフォーマンスに優れているとされるが、伝熱面積を稼ぐために室炉タイプに移行した歴史とは逆行することになる。限られた敷地面積で高い生産性を要求される我が国においては成立が困難であ

るが、海外への技術移転という側面では留意する必要がある技術である。

いずれにしても COG ガス精製設備を含めて設備構成がまったく異なるので、例えば炉の老朽化による改修などに際して、室炉タイプのコークス炉の一部を部分的に熱回収型に交換するということは不可能であり、建設の最初にその事業所における COG 回収の必要の有無を十分確認し、どちらを選ぶかの選択をする必要がある。

12.2 スタンプチャージ炉

石炭を事前に塊成化してコークス炉に挿入するスタンプチャージの概念は既に 20 世紀の初めから存在しポーランドから始まりヨーロッパにおいてドイツ、フランス、英国、チェコ、そしてウクライナに広がるとされる³⁾。例えば英国では 1914 年 Coppee 社により 30 室のコークス炉が建設された。その際バインダーとして麦わらが使用されたという記載がある。

官営八幡製鉄所がソルバー炉導入に際しソルバー社より購入したリストの中に搗き固め装置があり、むしろ当時スタンプチャージが標準仕様の中に入っていた可能性がある。

先に第 8 章で述べたように装入密度による製品コークス性状への影響は明らかであり、塊成炭配合のように部分的に塊成化した石炭を使用するバリエーションが数限りなくトライされたが、本格的なスタンプチャージは 1978 年ドイツ、Völklingen において高揮発分の Sarre 炭を用いて高さ 6m のケーキ作成に成功し、そのサイズに対応する現在 ZKS (Zentralkokerei Saar) と呼ばれるプラントが 1984 年に建設された。その後このサプライヤーはいくつかの経営者の変化を経て現在は中国の重工産業 (Taiyuan Xingang) とのジョイントとなっている。

インドでは TATA 社が 1989 年に実機化しその後インド国内で普及が進んでいる。21 世紀になって中国で普及が急激に進み、既に年間生産量は 100 万トンを超えている。

図 12.2 において、スタンプチャージが熱回収コークス炉と組み合わせられて実機化している事例が多いことがわかる³⁾。

室炉タイプの場合、炉高を高くすることで炭化炉の容積を稼ぎ生産性の向上を図るのに対し、熱回収コークス炉が比較的フラットな炉形式のためスタンプによ

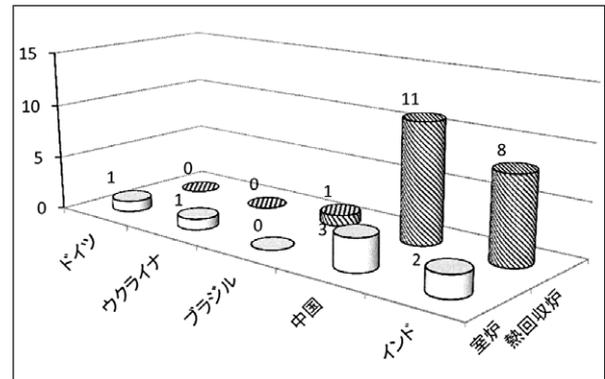


図 12.2 スタンプチャージ導入事例 (注 3 資料表 1 により著者作成)

り形成したケーキの安定性がよく、結果的に層の厚みを増やすことで生産性の確保が可能となる。層厚が増えることで炭化所要時間は増大するが 1 チャージの製品量が増えるのでキャンセルされ生産性が維持されることになる。

(KIGS 報告書によれば官営八幡製鉄所がコペー炉及びソルバー炉導入に際しスタンプ装置が付属していたという記述があり、ソルバー炉建設の際に指導を依頼された下村がスタンプを提案したという記録もことから⁴⁾、むしろ当時は標準設備となっていた模様である。おそらく、原料炭をすべて海外から輸入するようになった我が国では、その後の配合理論ないしは事前処理技術の進歩によりスタンプの概念が不要となったものと思われる)

スタンプチャージによる製品コークスの性状についての評価はそれぞれの事業所のベースによるので一概に言えない。例えば、インドでは石炭の品位が低いいためスタンプによる塊成化の効果が大きい、鉍石を選択して輸入使用する日本では必ずしも同じ効果は得られない。

しかし、以前は大型高炉では使えないとされたスタンプチャージコークスが中国では使えるようになってきたとの情報もあり、安易に無視することは避けなければならない。

参 考

- 1) 鉄鋼便覧第 4 版, 図 42-4. 60 より著者一部改変, 2002.
- 2) ThyssenKrupp Industrial Solutions brochure, coke plant technology, より著者一部改変, 2015.
- 3) Jorge Madias “A review on stamped charging of coals” The 43rd Ironmaking and Raw Materials Seminar,(September 1st to 4th, 2013, Belo Horizonte, MG, Brazil), 2013.

13 | コークス炉耐火物

13.1 歴史

コークスは当初は野焼法と称する窯炉を使用しない方法で石炭からつくられていたが、1810年頃に英国でピーハイブ窯が発明され、さらに、1850年から1900年にかけて、ドイツを中心に現在の室式コークス炉が発明された。

その耐火物には、ピーハイブ窯では粘土レンガが使用されていた模様で、コッパー炉やソルバー炉に始まる室式コークス炉も当初は粘土レンガであったが、19世紀の後半には半珪石レンガ (semi-silica brick) が出現し、コークス炉用レンガの標準的材質として定着した。それは半珪石レンガでは、珪石レンガと粘土レンガの加熱収縮特性が調和して、温度変化に対する容積安定性が良く、かつ安価に製造できたからである。

コークス炉の炭化室に、珪石レンガを使用するという現在の設計方式が採用されたのは、20世紀初頭(1920年頃)になってからである。

人類が耐火物という“火に強い炉材料”の存在を意識するようになったのは、土器焼成窯炉の始祖ともいえる穴窯あるいは原始的縦窯での焼成温度が、粘土鉱物分解温度の上限(800℃付近)に達した頃(BC4000-3000)と推定され、それは青銅器時代の初期にあたる。穴窯の場合、“火に強い土”のある場所が選ばれた筈である。当時、その“土”に期待された機能は、熱を逃さないこと(断熱性)と火に溶けないこと(耐火性)であった。

鉄器時代(BC2000頃以降)に入り、炉内で鉄鉱石を木炭で還元して鉄をつくる原始的製鉄炉では、さらに温度が高くなり、内張りには炉内物質との反応にも耐えること(耐食性)も重視されるようになった。したがって、断熱性、耐火性、耐食性の3特性を備えた炉内張り材としての本格的耐火物は、製鉄技術とともに生まれたともいえる。

杉田 清：新日鉄技報 第388号(2008) p.8

13.2 耐火物の製造体制¹⁾

産業革命以前の木炭高炉時代の製鉄工場では、耐火物の製造・施工・解体はすべて製鉄作業の一環として製鉄工場内で処理されていたと伝えられている。わが国のたたら製鉄工場も、また中国の工場でも同様であった。

19世紀の初頭には、各種の粉碎機、混練機、成形機などの窯業機械が開発され、土木建築用レンガや陶磁器の製造に使用され始めており、耐火物の製造が窯業メーカーの手に移行し始めたのは、この頃からであろう。

W.W. ヤングが珪石レンガを発明し、Neath 陶磁器工場で、生産を開始した1856(安政3)年を、近代耐火物工業元年とする欧米の説は十分理解できる。珪石レンガは、古代土器レンガの進化した粘土レンガとは異なり、新商品の高性能耐火物であり、しかも窯業専門工場で製造されたからである。

日本では、明治開国後1875(明治8)年西村勝三が伊勢勝白煉瓦製造所(現品川白煉瓦)を民間企業として設立したのが耐火物専門メーカーの最初で、1906年設立の日本坩堝(現日本ルツボ)、さらに1936(昭和11)年大阪セメントなどの出資により設立の大阪窯業耐火煉瓦(現ヨータイ)などへと広がった。以来、一世紀近くの間、耐火物は製鉄所附属工場での自製方式と専門メーカーからの外部調達方式が併存することとなる。

コークス製造の効率を左右する要素に耐火煉瓦がある。コークス炉の耐火物は、珪石煉瓦、粘土質煉瓦が大部分で断熱煉瓦と赤煉瓦とモルタルを使用する。19世紀末、アメリカで初めて珪石煉瓦のOtto-Hoffmann炉が開発されて以来、耐火度の高いそして熱伝導率の高い珪石煉瓦がドイツで使われ、コークス炉は大型化、高温化して今日に到った。炭化室、燃焼室、蓄熱室壁等高温部に使用する珪石煉瓦と蓄熱室等炉下部に使用する粘土質煉瓦の比率は、コークス炉のメーカー別型式によりかなり異なる。珪石煉瓦は48 - 64%、粘土質煉瓦は30 - 48%と見られる。既に戦前から耐火物工業は製鉄業とともに発達し、特に珪石煉瓦はその原料にわが国の良質な赤白珪石を使用したため、品質は比較的良好であった。

創業期における官営八幡製鉄所の製鋼史は珪石煉瓦

の開発に始まったと言ってもよく、高炉煉瓦については内地産のものがあったが製鋼用煉瓦だけは外国に依存していた²⁾。1903（明治36）年高辻吉、三好久太郎、葛蔵治の三技師が協力して、大分県津久見地方産の珪石原料から、いわゆる赤白珪石煉瓦をつくることに成功し、1906（明治39）年に製鉄所が製造を始めたのが最初である。

ここで耐火煉瓦製造研究に没頭していた高良淳は製鉄所における第3期拡張6カ年計画や、「官民合同製鉄事業調査会設置建議」を初め、多くの鉄鋼業促進の建議、請願の結果設けられた「製鉄事業調査会」1916（大正5）年の答申内容およびその答申にもとづいて制定された「製鉄業奨励法」（1917（大正6）年）などによって鉄鋼業が将来わが国の基幹産業の性格を失わないこと、従って耐火煉瓦の将来はそれと併行して約束され、しかも品種、形状、品質の点、でとれまでの先進企業の未開拓分野が多く、よって市場余地が残されているなど、政治・経済的諸般の状況から総合的に耐火煉瓦企業の可能性を判断して、製鉄所を退職し、安川・松本財閥の資金援助を得て1918（大正7）年10月黒崎窯業を設立する。

当時の窯業の発展状況は1902（明治35）年をベースにすると会社数で2.6倍、払込資本金で5.3倍、工場数で2.8倍、電力で20倍にしていた。

このような背景のもとで、耐火煉瓦工場は、1875（明治8）年創業の品川白煉瓦（株）が1916（大正5）年、日本窯業を合併して拡大し、近くは旭硝子（株）、九州耐火（株）がほとんど時を同じくして設立され、工場数にして主たるものだけでも約20数工場が設立された。

高良はその回顧録³⁾で珪石煉瓦に注力した理由について以下のような手記を残している。

「私は製鉄所在職中、独、英、米と出張したが、その時骸炭炉の煉瓦は、ドイツは半珪石（粘土と珪石の中間）、英国は粘土、米国は珪石を使用していた。それを見た時、これから先は瓦斯関係炉もすべて珪石を使用することになると確信した。帰国してみると日本の瓦斯会社でもだんだん珪石を使用するようになっていた。」また「先行するS社（品川白煉瓦）も珪石煉瓦工場を拡張したが粘土質煉瓦の比重が高かったように思うとし、その理由を、平炉等の粘土質煉瓦は回転が早かったからだと考える」としながら、競合するリスクの小さい、ライフが長く、従って回転が遅いコークス炉を当面のユーザーとしたようである。

やがてソルベー式（粘土質煉瓦使用）からコッパース式（珪石と半珪石煉瓦使用）さらに黒田式コークス

炉（珪石煉瓦使用）とコークス炉用耐火煉瓦は変化していったが、そのうちのほとんどを黒崎窯業で納める事になっている。

1959年八幡は洞岡第4コークス炉をKoppersに発注し、敢えて外部の血を入れることを試みた。炉の全ての機材をドイツから搬入したが、珪石煉瓦だけは、ドイツのそれより優位な品質である事がドイツで検査、立証され、国産煉瓦を使用したと伝えられている。

ちなみに国産コークス炉を設計した黒田泰三は官営八幡製鉄所時代に高良の上司であり、高良の独立に理解を示し、その後の珪石煉瓦開発における高良の貢献を評価している⁴⁾。また、黒田とその後を継いで日鉄式コークス炉を開発する大野宏はソルベー炉を自力で建設成功させた下村孝太郎が製鉄所からの依頼で八幡にコークス炉を建設する際指導を受けている。時期的に少しずつ下村と高良が直接会うことはなかったかもしれないが下村の技術者としての振る舞いは高良と重なるところが大きい。

八幡製鉄所炉材自製工場は、1930年代の耐火物全国生産量の約30%を占める実績があったが、1956年に企業提携により黒崎窯業へ移管分離された。つづいて日本鋼管の自製工場が、品川白煉瓦と旭硝子に移管された。そして1967（昭和42）年、富士製鐵室蘭製鐵所炉材工場が日本最後の自製工場として播磨耐火煉瓦に移され、耐火物の生産は製鉄所から専門メーカーに移管された。

13.3 コークス炉耐火物の損傷対策

過去の耐火物技術進歩は、状態図からの基礎科学的アプローチ、材料諸特性の測定評価から構造体特性測定、実炉での比較試用に至る実に多彩な方法論による研究開発に支えられてきた。

耐火物使用技術領域での歴史のなかでは、その格別の意義と貢献が認められるものに炉内損耗機構の解明と使用条件の影響度の調査がある。

損耗機構研究には水モデル法なども使われたが、最も活用されてきたのは使用後耐火物の変質調査で、世界最初の試みは、1917年発表のル・シャテリエによる平炉天井での使用後珪石れんがの調査である。以来、各国で多くの研究が行われ、特に1950年代から70年代にかけては、高炉、コークス炉を始め各種製鋼炉、さらに鑄造用ノズル（閉塞現象を含む）に至るまでその対象は広がった¹⁾。

損耗機構の研究成果は、耐火物品質の改良、新規材質の開発などに進展し、あるいは製鉄所での操業条件

アイノスタ ディックプレス (CIP)		導入	容量拡大	性能拡大			
油圧プレス	1000-1200t		3600tプレス	3000t真空プレス			
フリクション プレス	100-300t		750tプレス	1000-2000t 真空プレス			
年度	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985

図 13.5 耐火物用成形機の発展

は、その経済性も含めて、熱伝導性が低いというただ一つの難点を除けば実際上最適の材料であるといえる。

珪石レンガの製造にとって、わが国がかかえている最大の問題は、その生産量の減退傾向であり、この生産量の激減により、多数の珪石原料鉱山が閉山され、製造技術の温存も危ぶまれており、すでに輸入品への転換が進行している。

コークス炉はその心臓部である炭化室、燃焼室のほかにも多量の耐火物を使っているが、その大部分がシャモットレンガでこの半世紀その品質には大きな変遷がみられない。

13.4 築炉

コークス炉は鉄鋼用窯炉のなかで、その規模が最大、寿命は最長（20～50年）の炉であり、その築炉と補修の技術は永年の主要課題であった。

コークス炉の築炉作業は、その基本技術の面では戦後この半世紀に大きな変化がなく、若干の機械化（たとえばコンベアーなどによるレンガ運搬）は進行してきたものの、典型的な労働集約型作業であり、不定形化による機械化の進んだ他の窯炉との格差は大きい。

高炉改修やコークス炉の建設において、窯炉構造物を構築するための技能者、すなわち築炉工がその建設の主体作業者であるが、急速な世代交代への対応の面で様々な歪が生じている。

現在、黒崎播磨（株）ファーネス事業部八幡事業所長である石松は、かつて八幡製鉄所 設備部 炉材技術室長としてコークス炉の発注者側にいたが、新日鉄系築炉メーカーを代表して以下のように述べている⁸⁾。

一般に技能伝承問題が危機感をもって語られる昨今であるが、築炉工不足問題は単なる技能伝承問題ではなく、築炉工そのものが枯渇しつつあり、窯炉建設の経験を有する築炉技能者は“絶滅危惧種”であるとも言える状況である。

この築炉工不足問題は1990年前後から業界の関係者より警鐘が鳴らされていたが、バブルの崩壊後の不

況に加えて、高炉・コークス炉の改修周期延長などにより建設ニーズが縮小し、それとともに表面上は問題が沈静化していた。しかし、当時指摘された問題点、課題はその後改善されず、有効な対策が講じられてこなかった。

築炉工不足の背景は様々であり以下のようなものである。

(1) 処遇

かつて高炉建設、コークス炉建設が盛んだった昭和40年代は高給で処遇されていたが、最近では技能に見合った処遇ではなくなった。

(2) 環境

いわゆる3K（きつい、きたない、危険）作業である。重筋労働であり、高所への昇り降りも多い。昼夜（交代）勤務があること、暑熱、粉塵環境であることなどによる。

(3) 育成方法、育成システム

施工会社では各社毎に育成への取り組みがなされてはいるが、大半は従来の徒弟制度を踏襲したものであり、系統的な育成システムのない会社が多い。また、教育コスト、教育余裕のなさが取り組みを難しくしている。

1954（昭和29）年創業の品川ファーネス（株）は各種耐火物を使用した高炉、熱風炉、転炉、コークス炉、加熱炉など重要な工業炉の大型建設工事から、各種工業炉の保全修理工事までを行っているが、山梨工場内に「築炉技能高等訓練学校」を置き、全国でも珍しい築炉技術に関する事業内技能訓練校としている。

(4) そのほか

鉄鋼以外の業種も渡り歩いている技能工には、鉄鋼業界は必ずしも歓迎されていない面がある。処遇条件以外の手続き、細かいルール、管理項目の多さ、書類主義、自主管理活動や諸行事への参画要請などの風土が職人気質には受け入れ難いと感じて嫌悪感、忌避感を抱くらしい。

課題のうち例えば処遇に関連して、新日鉄の各製鉄所において窯炉整備、築炉施工を請け負っている主要7社の年齢構成を図13.6に示す。

その結果、①築炉作業を担っている約30%以上が50歳以上の高齢者、②高技能者（築炉技能1級⁹⁾以上）の約35%が50歳以上、であることが判明し、高齢化が深刻であることが分かった。特に、55歳以上の比率が高いことがこの問題の緊急性を示している。加えて次代を担う中堅、若手が少ないことも大きな問題である。

2008（平成20）年時点で検討中としている今後の

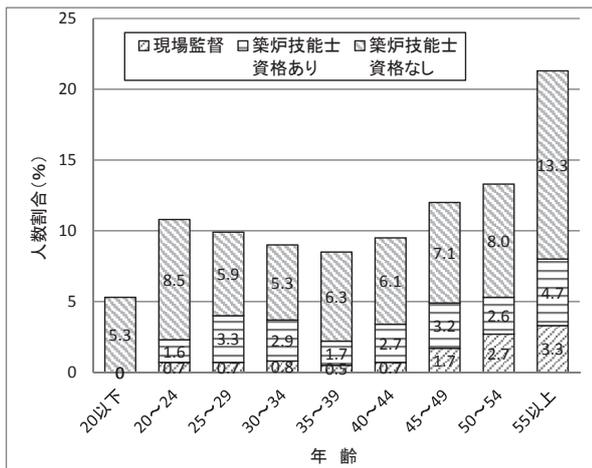


図 13.6 新日鉄系 7 社の築炉戦力の年齢構成²⁾

対策では、技能競技大会などを通して“技能”をレスペクトする社会的風土・環境を醸成することとそれに見合った処遇、さらには流動化した労働力に合わせる形で外部化した社内教育も、経営資源として内製化する必要性などの考え方を述べている。

一方、当然のことであるが技術開発は必須で、暗黙知を体系化し形式化して特殊な技能を不要とするために、作業を機械化・自動化するロボットなどの開発は極めて有効であろう。

13.5 炉壁診断・補修技術¹⁰⁾

先に述べたように窯寿命の支配要因は2つの要素に分けて考えることができる。1つは長期にわたる使用の結果に伴う炭化室炉壁の壁耐力の低下で、もう一つが押出時に壁にかかる負荷上昇である。そのため新日鉄ではコークス炉延命技術とは以下の①コークス炉の構造強度を維持する技術、特に②炭化室壁にかかる負荷を軽減する技術が重要と考え、壁面の平滑化を実現する装置の開発を行っている。

従来の損傷度管理および補修実行はオペレータによる目視観察や人海戦術による溶射補修であり、損傷度評価の定量性が不正確、炭化室中央部の評価が困難、溶射補修面の平滑仕上げ精度が低い且つ耐久性が低い、高熱重筋作業である等の問題点があった。

- (1) 炉壁凹凸量の定量測定
- (2) 損傷部位の正確な位置把握
- (3) 炭化室両壁の短時間測定 (5分以内)
- (4) 補修表面の高精度平滑溶射 (凹凸 10mm 以内)
- (5) 自動溶射による作業負荷大幅低減

1,000℃を超え、なおかつ 45cm という幅狭の炭化室内部で奥行き 16m・高さ 6m の大面積の炉壁を観察

する技術は、先行技術は見当たらず、光検出素子を一行に 1,000 素子以上配置したライン CCD カメラという特殊な撮像装置を適用することで、炉壁を高精度に撮像することができるようになった。

ライン CCD カメラを炉の放射熱から守るため、水冷断熱装置を搭載して炉内に送り込み、1mm ピッチで撮影したライン映像信号をメモリ上に並べて蓄積することによって 2次元画像化している。さらに図 13.7 に示す水冷により金属鏡面が高温酸化しない耐熱ミラーを考案し、撮像方向をミラーで折り曲げて炉壁を垂直に観察できるようになったことで、装置が炉幅方向に蛇行しても観察位置が変化せず、縦方向の亀裂を明瞭に観察できる優れた特徴が備わった。

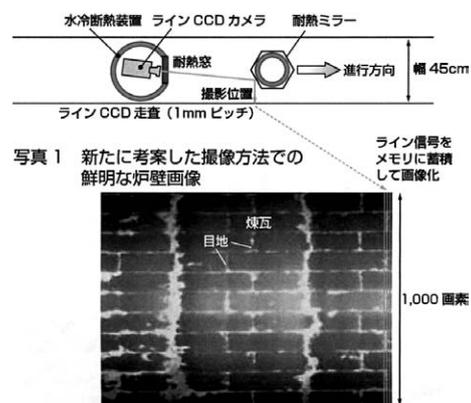


図 13.7 ライン CCD カメラと炉壁画像

ライン CCD カメラを高さ方向に 4 台搭載し、約 4 分という短時間で炉壁全体を 1mm の分解能で観察することが可能になった。

また、3 台のレーザー距離計により炉高方向 3 点の炉幅測定を行い、壁の湾曲や大きな亀裂などプロフィール測定を行うことが出来る。診断で損傷箇所と判定された部位はその炉内位置および損傷深さを三次元の座標データで把握することが可能である。

新日鉄では 1970 年代初頭から研究をはじめ 1978 年に酸素プロパン焰を利用するコークス炉補修技術を開発していた¹¹⁾。しかし、既存の補修装置はコークス炉外から補修用溶射ランスを手で動かしたり、その延長線上の技術として長尺アームを炉外から駆動する方式であった。しかし、アームのたわみや振動から高精度な補修は困難であり、理想的な補修を実現するためには、損耗した炉壁の直前に近づき、溶射向きが壁に垂直で揺れない安定した溶射を行う必要がある。

補修マニピュレータは図 13.8 に示す 3 軸の間接構造としており、炉長方向 (X 方向) への前後移動動作、炉高方向 (Y 方向) への上下旋回動作、炉幅方向 (Z

方向)への左右旋回動作を組み合わせ任意の座標(X、Y、Z)に自由自在に動作可能であり、高精度(最小1ミリ単位)に制御が可能である。

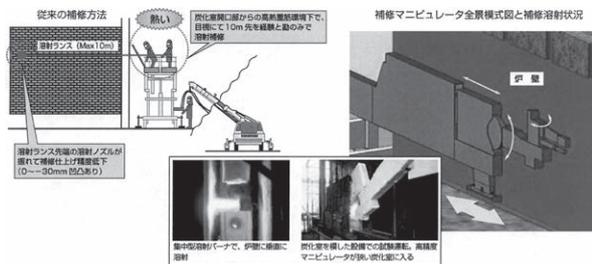


図 13.8 炉壁補修の過去と現在

先端のレーザープロファイル計は補修位置の詳細なプロファイル計測を行い、炉壁の凹凸状況を図 13.9 に示すような等高線 (contour map) で把握することが出来る。

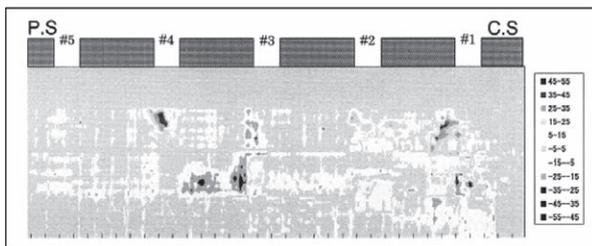


図 13.9 壁面等高線図例

このデータから補修範囲を設定し、デスケーリング装置および溶射バーナの動作プログラムを作成し、全自動運転での補修作業を実現した。

最近の機能追加では炉底に近い炉壁の水平目地の損

傷検出機構とその溶射による補修技術、また破損が破孔に至っている場合の補修技術が加わっている¹²⁾。

なお、類似の技術に関西熱化学が開発した上部の石炭装入口から補修が実施できる垂直ランス式コークス炉溶射補修装置がある。

参 考

- 1) 杉田 清, 新日鉄技報, 第 388 号, p.14, 2008.
- 2) 黒崎窯業五十年史 (昭和 44 年), 1969.
- 3) 「50 年を顧みて」(黒崎窯業 (株) 発行)
- 4) 八幡製鉄所化工部概史
- 5) Nippon Steel Monthly, 06, p.1, 2009.
- 6) 杉田 清, 製鉄・製鋼用耐火物, 地人書店, 1995.
- 7) 冷間等方圧加圧 (cold isostatic pressing) とは、水などを圧力媒体として 100 MPa やそれ以上の圧力を粉体製品に等方的に加圧する方法。
- 8) 石松宏之, 新日鉄技報, 第 388 号, p.35, 2008.
- 9) 築炉技能士とは、国家資格である技能検定制度の一種で、都道府県知事 (問題作成等は中央職業能力開発協会、試験の実施等は都道府県職業能力開発協会) が実施する、築炉に関する学科及び実技試験に合格した者をいう。なお職業能力開発促進法により、築炉技能士資格を持っていないものが築炉技能士と称することは禁じられている。
- 10) 境田道隆ら, 新日鉄技報, 第 384 号, p.63, 2006.
- 11) 杉田 清, 製鉄・製鋼用耐火物, 地人書店, p.329, 1995.
- 12) 小林信太郎, 中嶋 淳, 新日鉄住金技報, 第 402 号, p.45, 2015.

14 | 化成品処理の歴史¹⁾

官宮八幡製鉄所でソルベー式コークス炉を導入、副産物回収で所の収支の黒字化を実現した。また、終戦直後の製鉄所では硫酸やサッカリンの現金収入を所員の給与に当てたという。

14.1 コークス炉ガス (COG ; Coke Oven Gas) 精製設備 (副産物回収)²⁾

コークス炉からの副産物回収は1907(明治40)年2月のソルベー炉の稼働に始まる。ソルベー式炉は製鉄所第三代長官、中村雄次郎が大坂舎密工業で稼働していたソルベー式炉を視察して採用したもので、建設に当たってはこの炉を大坂舎密工業に導入開発した下村孝太郎博士に依頼した。下村は副産物回収炉の研究の動機をこう言っている。「有機化学に縁故深いコールタール事業に従事せんとコークス事業に思いつき、当時のコークス製造法は貴重なるコールタール、アンモニア及びガスは燃焼し或いは発散せしめ居るを惜しみ、遂に副産物捕収のコークス炉の研究を為さんと決心するに至った」。また、創業直後の休止した高炉を蘇らせた功労者の野呂景義はコークス炉の副産物の重要性を指摘し、「…ことに製鉄業中骸炭の煤燃より発生するところのアンモニア及びタールはことに重要な副産物にして、とりわけタールより生じる各種の油類は染料、火薬、薬剤の製造に供せられ、これらの物料価格は骸炭のそれを超過するをもって、ついに主客はその位置を転倒し…」と言っている。

日露戦争と言う当時の時代背景もコークス炉の副産物回収を必要としていた。当時軍艦の燃料であった煉炭の製造に必要なバインダーが不足していたことからピッチの生産を海軍が要望していた。1905(明治38)年5月農商務大臣、海軍大臣連名の「煉炭用ピッチ製造に関する件」と言う閣議稟請案が総理大臣あてに提出され、ただちに決裁されソルベー式炉(108基)の着工となった。

その後、石油化学の勃興によりBTXを初めとする石炭化学製品の多くが石油化学で製造されるようになった。しかし石炭化学ではピッチコークス(ニードル及びアモルファス)、バインダーピッチ、カーボンブラック、炭素繊維などの炭素材料及び無水フタル酸、ナフタリン類、タール塩基類(ピリジン類、キノリン類)、フェノール類(フェノール、クレゾール類)等の芳香族化合物を製造している。コールタールの主成分は多環芳香族化合物であるから、石油化学では製

造が困難な多環芳香族製品の製造に特徴がある。特に、ピッチコークスやバンダーピッチ等のように多環芳香族を混合物のまま加工し、有効利用することが差別化要因であり今も石炭化学産業として健在である。

ちなみに2014年度のピッチの内需は18万トンと前年比109%であった。需要の主要を占める電極向けが前年比104%、コークス配合向けが前年比114%と増加し、輸出は4万トンで前年比75%であった。

国内需要の9割を占める電極向けのクレオソート油は62万トンで前年比93%に減少であった³⁾。

コークス炉よりガスとともに発生する副産物は、まず冷却後、ガスは主として燃料用に、タール、軽油、アンモニアは副産品として回収され、ガス液は排水処理設備で無害化したのち廃棄される。これらのガス処理工程を大別すれば、発生ガス冷却排送工程、NH₃除去工程、軽油回収工程、脱硫工程の4つに分けられる。これらのフローの順列は、いろいろな理由から最近ではかなり交錯しており、必ずしも一様ではない。精製工程の全体像を図14.1に示す。

A. コークス消火設備

消火設備は2種類あり、通常はCDQ(コークス乾式消火設備)を使用し、CDQの定期点検時や非常時には従来から使用してきたCWQ(コークス湿式消火設備)を用いる。

消火が終了したコークスは、ベルトコンベアで運搬しコークスヤードに貯留する。

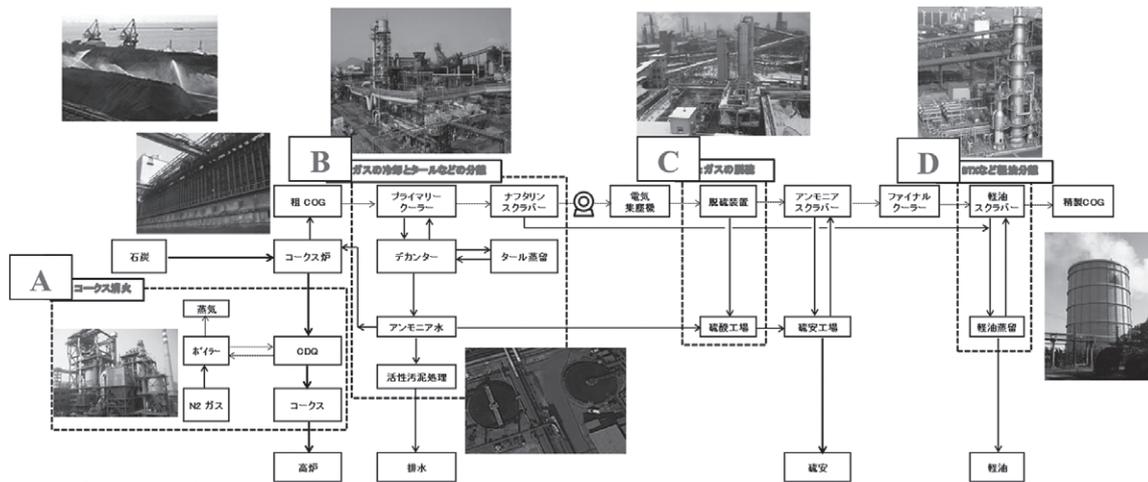
B. 発生ガス冷却とタール、ナフタリンの除去と安水処理

炉より発生したガス生成物は、上昇管部で安水(ガス液:アンモニアを含んだ水溶液)を散布し、約800℃から85~95℃に冷却する。

ついでガスクーラで30~35℃まで冷却し、タールや安水を除く。タールと安水はデカンタや分離槽で分けられ、タールは回収し、安水は処理後廃棄する。

また、ナフタリンはタールミストを除去したあとの粗ガス中に1~2g/Nm³含まれるが、配管系統の閉塞防止のため、取扱いガス温度における飽和濃度(たとえばガス温度10℃の場合、0.1g/Nm³)以下にせねばならない。

最近はさらに安水の高次処理として、凝集沈殿法、活性炭吸着法、固定NH₃除去法などが、活性汚泥法と組み合わせて使用されている。



排水処理設備

安水および副産物処理工程で発生する排水はタールなど油分のほかに、アンモニア、フェノール、シアン、硫化水素、その他の COD 成分などが含まれている。排水の処理法としては、溶剤抽出法(フェノール類の除去)、水蒸気蒸留法(NH₃、H₂S、CN の除去)、活性汚泥法(フェノール、COD 成分などの除去)がある。このうち活性汚泥法は微生物により有害成分を分解除去する方法であり、アンモニア除去が困難なこと、余剰汚泥処理が必要なこと、安水の脱色ができないことなどの欠点もあるが、経済的かつ分解除去率が優れているため、広く採用されている

図 14.1 コークス炉副製品回収工程の例

クーラ後のガスは排送機（ブロー）で吸引昇圧後次工程に送るが、その際排送機の前後でタールミストを機械的方法や電気集塵機で除去する。

C. NH₃ 除去工程

発生ガス中 6~10g/Nm³ 含まれる NH₃ は、配管の腐食、燃焼時の NO_x 発生問題などから除去しなければならない。除去法としては、従来はもっぱら硫安回収法が行なわれていたが、石油化学の分野で生成する回収硫安が急激に増産されて供給過剰となり、採算が悪化してきたため、近年では硫安を回収しない方法、すなわち高純度の液安を製造するフォッサム（Phosam）法や、NH₃ を水で吸収回収後、蒸留放出し、触媒下で燃焼分解するカールスチル法や、触媒なしで燃焼するコッパース法などが採用されている。

D. 軽油回収工程

軽油は除去しないと一部が凝縮してドレンとなり、また軽油中に含まれる不飽和炭化水素による配管やバーナなどの閉塞を引き起こす。軽油の回収法には吸収法、吸着法、加圧深冷法などがあるが、吸収法が一般的である。吸収法では石炭系のクレオソート油や、石油系のストロ油を吸収剤として吸収塔頂部からスプレーし、ガス中の軽油を吸収する。軽油分約 4% を含む吸収油（含ベン油）は水蒸気蒸留にかけて軽油分を追い出したのち、吸収塔へ循環使用する。

14.2 副産物回収の歴史

戦前の製鉄事業所の直営コークス炉は殆ど旧日本製鉄（日鉄）系であり、特に副産物回収を始めたのは官営八幡製鉄所であることから化成品回収技術の歴史を八幡の事例で述べることにする。これら副産物設備を管掌する部門を化工部と称し、その後、分社して化学会社として独立する歴史がある。ここではその歴史について要約する。

・発祥期（1907（明治 40）年～1929（昭和 4）年）

1907 年、東田地区においてソルベー式コークス炉の作業が開始されるとともに、副生する硫安、コールタールの回収も開始された。次いで、1918 年にコッパース式コークス炉の作業開始に伴って、軽油の回収も始められた。

東田地区煉瓦工場跡にタール蒸留工場の建設が始まった。タール蒸留はイギリスより輸入した 12 トン・スチル 5 基で実施された。

粗ナフタリンは露天に据えた 5m³ の結晶槽を使用して分離していた。また、当時は遠心分離機を使用せず油分を含んだまま外販していたようである。1907 年、また、1926 年 12 月、粗ナフタリン分別装置、ピッチクーラー、タール貯蔵池などの装置が整えられ、近代石炭化学工業がここにスタートした。

・安定成長期（1929（昭和 4）年～1952（昭和 27）年）

東田地区の工場設備も逐次改良、拡張されたが、洞岡地区でもコークス炉が建設されたことにともない、1930年洞岡硫安工場ならびに軽油工場が建設された。また、1933年にはベンゼン精製作業が開始された。更には、1937年、洞岡タール工場の作業開始と、コークス炉建設が行われる等順次化成品の増産が図られた。また、作業法の改良も鋭意進められた。

・転換期（1952（昭和27）年～1960（昭和35）年）（化工部の廃止と新会社設立）

戸畑地区において最新鋭第一タール連続蒸留設備が建設され、1956年2月より作業が開始された。これに伴い、わが国最古を誇る東田タール工場は1955年10月をもって40数年間の歴史を閉じた。

1960年3月、八幡地区に残っていた八幡製鉄所の化学関連設備が八幡化学に譲渡され、八幡製鉄所化工部は創業以来半世紀にわたる歴史の幕を閉じた。

1956年10月八幡化学工業株式会社の発足に伴い、八幡製鉄所第三化成課戸畑タール工場が同社に編入され、コールタールの処理は同社に委託されることになった。

1955年5月第二タール連続蒸留設備、ナフタリン分別装置およびメチルナフタリン蒸留設備が建設された。このようにタール処理能力が増大したことにより、洞岡タール蒸留設備が1955年6月停止した。

14.3 回収設備導入当時の工場各論

（硫安工場）

コークス副製化学物質のうちN（窒素）を含む物質、フェノールなどOH（水酸基）を含む物質を分離するため硫酸や苛性ソーダが必須である。

このように化成品工業に欠くことが出来ない硫酸の製造を始めたのは1913年7月であった（図14.2）。

その後、1926年9月に搭式設備の建設が洞岡地区で行われた。更に、1930年5月には第一工場が、1935年10月には第二工場が、1937年1月には第三工場が洞岡地区に建設された。製造方法はいずれも鉛室式であった。これら工場の生産能力は合計57,000T/Yであったが、洞岡第二工場は1944（昭和19）年の大空襲で破壊され操業不能になった。

戦後、所内の硫酸需要の増加に伴い新規工場が建設された。すなわち、1953年5月にはチーレン接触式硫酸工場が完成した。これにより、旧式硫酸工場は



図 14.2 硫安工場建屋全景（1913年）⁵⁾

1956年8月全面的に作業を中止した。

（硫安工場）

硫安工場は1907年5月に創業し、作業方法もソルバー式間接法からコッパース式半直接法へ、更には直接法へ変遷した。各種技術改良を行うことにより良質の硫安が製造されるようになった。硫安母液中に含まれるピリジンの工業的回収に日本で始めて成功したのもこの工場であった。硫安工場の昭和12年の写真を図14.3に示す。



図 14.3 硫安工場およびベンゼン工場⁶⁾

ベンゼン工場は東田地区に1916年10月に完成した（図14.4）。一方、洞岡地区には1933年から1937年にかけて複数存在したコークス炉からガスを一箇所で処理する軽油工場とベンゼン精製工場が完成した。その設備規模は国内最大のものであった（図14.5）。

技術の内容は、コークス炉ガス中に含まれるベンゼンなどの低沸点化学品を吸収油で吸収し、次いで蒸留操作で吸収油とベンゼン分を分離する。次に、硫酸、苛性ソーダで不純物を洗浄除去した後、精密蒸留で純ベンゼン、純トルエン、キシレン、ソルベントナフサ



図 14.4 東田ベンゼン工場建屋完成 (1917年)⁵⁾



図 14.5 洞岡ベンゼン工場精製設備 (1933年)⁵⁾

を分離した。上記、硫酸洗浄を行う際、ピリジン類は回収され、硫酸母液から回収された粗ピリジンと共にピリジン工場で分留して、純ピリジン、 α ピコリン、工業用ピコリンなど一連のタール塩基が製造された。

1952年から55年にかけて軽油スクラバーの改造、軽油蒸留から純ベンゼン蒸留までの連続化、洗浄作業の連続化などを行い、コスト低減が実行された。

1958年5月、老朽化した東田ベンゼン精製工場の操業が休止され、洞岡工場で集中処理をしたが、一層の装置近代化のため洞岡軽油工場では1959(昭和34)年パイプスチル式新設備の建設が行われた。

一方、ベンゼン水添精製装置および蒸留設備が1956年分離独立していた八幡化学で1959年2月に建設を終え、4月から生産を開始したので、上記洞岡ベンゼン工場は1959年7月に操業を停止した。

(タール工場)

東田タール工場は1907年の操業以来数回の拡張を

行ってきたが、1955年10月操業を停止した。

洞岡タール工場は1937年2月操業を開始し(図14.6)、我が国最大かつ優秀な設備を誇ってきたが、2回の戦災の結果、設備能力は6万T/Yに減少した。また、老朽化し、旧式になったので、戦後戸畑に最新式のタール蒸留設備を新設することになり1955年西独オットー社のパイプスチル式新鋭設備が建設された。



図 14.6 洞岡タール工場全景 (1937年)⁵⁾

(フェノール類工場)

1937年、洞岡工場の作業が開始されたが、当時の生產品目は分留石炭酸1号、オルトクレゾール、クレゾール酸1号、メタクレゾール酸1号、キシレノール酸、高沸点タール酸であり質量とも我が国1位であった。

(二次製品工場)

以下の製品は全て八幡製鉄所化工部ないしはこれを引き継いだ八幡化学(現日鉄住金化学)が独自に開発し製品化したものであるが、そのほとんどは製造中止となっている。

- ・1946年8月から1949年5月までサッカリンの半工業的生産を行った。
- ・ α ピコリンからズルチンの製造法を確立した。
- ・1954年アントラセンの酸化によるアントラキノンの製造に成功した。設備能力は10t/月であった。
- ・1953年1月合成ジフェニールの製造が洞岡テストプラントで開始された。能力は1954年には2010t/月、1955年には8010t/月まで増強された。合成ジフェニールは日本で唯一の生産会社であった。
- ・アントラセンの製造は試行錯誤を繰り返し、最終的には1955年9月コリジン溶媒法で工業化された。このアントラセンはアントラキノンの原料に使用

するためのものであった。

- ・メチルナフタリン類の製造は1945年4月に開始された。製品の種類はα-メチルナフタリン、β-メチルナフタリン、溶媒メチルナフタリン、ジメチルナフタリンなどであった。

東田・洞岡両地区における化成工程フローを図14.7に示す。

14.4 八幡化学創始期から日鐵化学との合併まで

我が国のタール工業は副産物工業として、主として鉄鋼、都市ガス、化学工業で兼営されてきた。しかし、これら企業でのタール部門の占める地位は一般に低く、副産物部門であるタール工業部門は第二義的に考えられるため、化学工業としての発展がみられなかった。新会社の設立趣旨は従来の化工部門の鉄鋼依存の安易性と副産物的観念を取り払って自主性を賦与し、経営全般にわたる管理を強化して日進月歩の化学工業界にあって遅れをとらないよう合理化を図り、積極的に新分野に進出すべきであるとの考えに基づいている。

1956(昭和31)年3月、通産省で「タール工業育成対策」が決定されると、タール業界においても同年10月「タール工業合理化拡充5ヵ年計画」を発表され、各社において設備の近代化に拍車がかかった。このよ

うなタール工業の合理化を専任の経営者に責任もたせることにした。また、合成樹脂及び軽金属の技術進歩により鉄鋼の需要が影響を受けることは判明した。このような状況下、鉄鋼各社は化学事業へ注力し鉄鋼の受注減を補完する代替材料開発を傘下の化学会社に期待した。

14.4.1 八幡化学発足時のタール関連設備

1956(昭和31)年10月 八幡製鐵(株)の化工部門が独立し「八幡化学工業株式会社」として発足に際し、八幡製鐵所の鉄鋼関連設備の拡張に対応して各種化学設備の建設を行った。各設備の概要は次のとおり。

(タール蒸留設備)

1955(昭和30)年10月にotto式タール蒸留設備が完成した。また、戸畑地区での集中処理のため、1958(昭和33)年5月第二タール蒸留設備を完成し、コールタール処理能力は15,00010t/月になった。

(ベンゼン工場)

従来から行われていたベンゼン類の硫酸洗浄、苛性ソーダ洗浄に代わる新しい精製法である水添精製を取り入れたベンゼン工場が1959(昭和34)年2月に完成した。これはドイツ、ルルギ社が開発した技術によるもので、水素源としてはコークス炉ガスを使用している。水添精製されたベンゼン類は連続蒸留でベンゼ

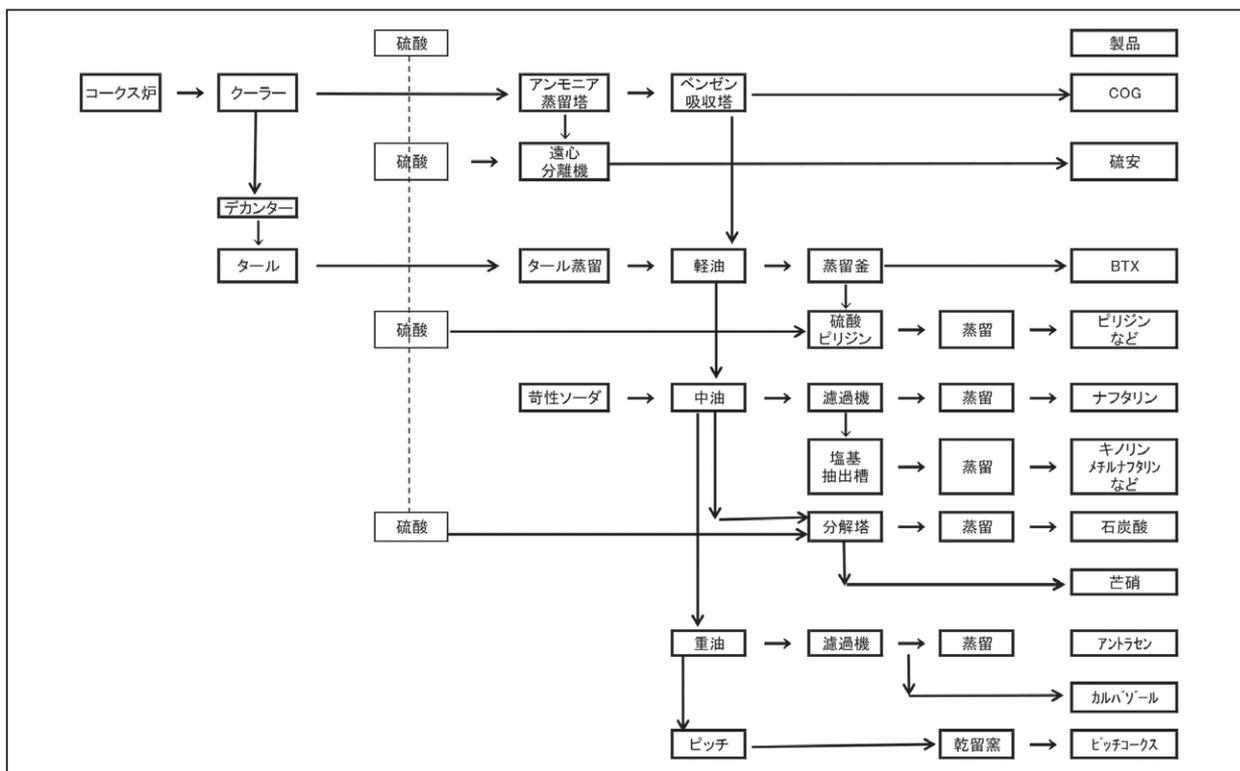


図14.7 東田～洞岡における化成工程フロー⁴⁾

ン、トルエンなど各製品に分留される。能力は水添設備 = 13010t/日、蒸留設備 = 15010t/日であった。

(硫安製造設備)

遠心分離機、乾燥機および倉庫を新設した。完工時期は1960(昭和35)年9月、能力は90010t/月であった。

(軽油捕集設備)

戸畑コークス炉一炉団の稼動に伴って、1959(昭和34)年7月に新設備を建設し、ベンゼンの回収を行ってきたが、第二炉団に対応するため、同一の設備を1960年9月、完工させた。

(フェノール製造設備)

洞岡の石炭酸工場の老朽化並びにタール蒸留量の増加に対処するため戸畑地区にフェノール精製設備を新設した。完工時期は1960(昭和35)年9月、能力は32010t/月であった。

発足より3年間で念願の「タール蒸留設備」、「ベンゼン精製設備」、「セメント製造設備」のいわゆる緊急3工事を主体とした第1次合理化工事を完成した。

続いて、「無水フタル酸」、「無水マレイン酸」、「軽油」、「硫安」、「合成アンモニア」等の第2次合理化工事も順調に進捗した。

しかし、1950年中ごろから次第に台頭してきた石油化学の進出はタール、ベンゼン類製品と競合する事になった。更に、貿易自由化の進展も逆風となり、コールタール化学事業にとって辛い時代に突入した。この事態を打開し、体質改善を図るため「赤字品種の解消と経営収支改善」および「COGの有効利用計画完遂」を目標に「量」から「質」への転換が行われた。具体的にはCOG中の有効成分である水素(55%)、メタン(26%)、エチレン(3~4%)のうち水素は既にアンモニア合成に利用されていたが、メタンからメタノールを、エチレンからスチレンを生産することが計画された。メタノール設備は1963(昭和38)年に、スチレンモノマーは1967(昭和42)年に完成した。また、スチレンモノマーを原料とするポリスチレン(スチロール樹脂)設備は既に1976(昭和41)年7月、アメリカUCC(ユニオン・カーバイト社)からの技術導入で完成していた。

14.4.2 安定成長から成長発展へ

八幡製鉄所の鉄源戸畑集中化に伴い、コストダウンのため化学部門も集中化が必要があり、分散していた設備を北地区(戸畑区先の浜地区)へ集中することにした。

1974(昭和49)年、東田地区第三タール蒸留設備

をリプレースしたのを皮切りに他の工場も相次いでリプレースされ1974(昭和49)年には洞岡地区の設備が完全に撤収された。また、1980(昭和55)年3月南地区(戸畑区三六地区)の完全撤退が完了し、戸畑北地区への一本化が完結した。

その間、1982(昭和57)年7月には自社技術によりメチルナフタリン、インドール設備が完成し、コールタールの有効成分の高付加価値化が行われた。

1984年4月1日ピッチ関係で強い繋がりのあった日鐵化学と合併し、新日鐵化学として第一歩を踏み出した。

(タール製品)

冒頭述べたように石油化学の勃興によりBTXを初めとする石炭化学製品の多くが石油化学で製造されるようになった。しかし多環芳香族製品を主成分とするタール誘導品の製造には競争力を維持している。

八幡製鉄所は1925(大正14)年日本で始めてピッチコークスの製造を行った。八幡製鉄所ではコークス炉が稼動しており、コールタールよりピッチが生産されていた。このピッチは艦船の燃料練炭の粘結材に使用されていたが、艦船の燃料が重油に切り替わったため、ピッチの需要がなくなった。そこで、ピッチを家庭用燃料にするため、ピッチコークスを生産するようになった。しかし、夏場は需要がないため、家庭用燃料以外の用途開拓の必要があり、人造黒鉛電極向けあるいはアルミニウム精錬向けの需要開拓が進められた。

日本でアルミニウムの製造が開始されたのは1934(昭和9)年であった。国策としてアルミニウムの国産化が進められた。アルミニウムは原料「ボーキサイト」から「アルミナ(酸化アルミ)」をつくり、これに氷晶石を加えて電気分解する事によって製造されるが、このアルミ精錬の陽極素材にはピッチコークスが不可欠である。

当時の時代背景からピッチコークスの国産化が必要となり、新会社が設立された。当時の会社「創立趣意書」を以下に記載する。これによって会社設立当時の意図と環境が理解できる。

「創立趣意書」

軽金属工業は国防見地より^{はたまた}其の資財国産充実の建前より逐年アルミニウムの増産に及んでいる。其の軽金属に欠く可からざる無煙コークスの生産跛行的不均衡であって年々輸入に俟つ実情である。

十三年度需要量は軽金属関係の約五万吨に対

し、国内産は二万三千屯にして今後三年乃至五年後には十五万屯の需要量になり、寒心に堪えないものがある。茲において日本製鐵株式会社輪西工場の高炉増設計画に拠る原料ピッチの増産を目し、三誠商会の受給量の一部を割き、之が製造に当て将来性並びに発展性を考えると時宜に即する事業と信じ別途目論見書に依り之の計画を起こさんとするものであります。

昭和十四年二月 発起人

このようにして北海道室蘭地区に日本ピッチコークス工業株の工場が建設されたが、まだ需要を十分に満たす事が出来なかったため、更に増設の必要があった。そこで、1942（昭和17）年商工省立案によるピッチコークス製造事業整備要綱に基づき北九州戸畑地区に年間能力25,000tのコークス式工場が建設されることになり、戸畑地区でのピッチコークスの生産が始まった。

しかし、我が国は既に太平洋戦争に突入しており、年々戦況は深刻化し、原料不足をきたした。このような困難な状況にも拘わらず生産は上昇し、1944（昭和19）年には創業以来の生産新記録を達成した。1945（昭和20）年の終戦により、9月17日設備は休止した。

コークス式コークス炉体は火を落としていたため、早急な生産再開は不可能であった。やむなく簡単なピーハイブ炉8基を新設してピッチコークスの生産にあたることにした。この当時の生産能力は150t/月であった。ピーハイブ炉では生産量が少ないので、コークス炉の早急な再稼働が喫緊の課題であったが、炉自体の状況から早急な立ち上げは技術的に困難なことに加え、原料ピッチの調達にも目処が立たなかった。そこで、石炭コークス炉に転換すれば比較的簡単な炉体修理で再開が可能であることがわかり、推進することになった。

当時、たまたま、アルミ産業の復興が本格化するのに伴い、アルミ精錬用電極に使用する高品位のピッチコークスの需要が興ってきた。そこで、修理工事途中で、計画を変更し、一炉団（5門）を月産1千トンのピッチコークス製造に振り向け、残り一炉団を石炭コークス製造用に活用する事にした。

朝鮮戦争特需の影響で1952年頃からピッチコークスを必要とするアルミ産業が活況を呈したことにより、生産量は確実に増加した。しかし、会社発展のため、他の事業への展開も図ることが決定された。その結果、木材防腐化工（1951（昭和26）年9月）、カラー

用カーボンブラック（1952（昭和27）年9月生産開始）、樹脂再生（1953（昭和28）年12月生産開始）、クマロン樹脂（1955（昭和30）年9月生産開始）、タールエナメル塗料（1956（昭和31）年12月生産開始）等の事業がラインアップされた。

1968（昭和43）年9月にピッチコークスの新製造設備が完工した。これは従来の炉団式コークス式炉と根本的に異なる製造方式である。すなわち、原料ピッチをコーキング（炭化）するディレイドコーカー設備と、生成した生コークスをか焼するカルサイナー設備とからなる。このコーカー設備は米国ルーマス社と、カルサイナー設備は米国ペトロカーブ社との技術提携により建設された。1973年この技術導入と製造技術確立の業績により「燃料協会賞」を受賞している。

この時期まで、ピッチコークスの主な需要はアルミ精錬向けであったが、1965年代のなかばから我が国のアルミ産業が原料面および電力費などの面で国際競争力を失い、構造不況業種に陥った。このため、ピッチコークスも非常に厳しい環境になった。この時期、“Uコークス”の開発に成功し、ピッチコークス事業の窮地を救った。Uコークスは原料ピッチの処理に技術的な進歩がある。Uコークスはアルミ精錬用コークスと比較して熱膨張係数が小さく、電気製鋼に使用される黒鉛電極のフィラーとして適している。Uコークスの組織を顕微鏡観察すると、針状であるので、「ニードルコークス（針状コークス）」と呼ばれる。このニードルコークスをコールタールピッチから製造する技術を開発したのは世界初であった。なお、同時期に三菱化成（現三菱化学）も同様の技術を独自に開発した。両社は1980年、「コールタール系針状コークスの開発」により日本化学会から化学技術賞を授与された。（炭素繊維）

炭素繊維は、石油、石炭、コールタールなどの副生成物（ピッチ）またはアクリル繊維を原料に、高温で炭化して作った繊維であり、その原料によって「ピッチ系」と「PAN系」に分かれる。

1963（昭和38）年に当時の群馬大学・大谷教授らによって等方性ピッチ系炭素繊維製法が見いだされ、さらに1969（昭和44）年光学的に異方性を示すメソフェーズピッチを紡糸することにより強度、弾性率が高いピッチ系高機能炭素繊維が製造できることが見いだされた。

コークス炉の副産物は「ピッチ系」炭素繊維であり、黒鉛結晶が繊維軸方向に規則正しく並んだ「黒鉛繊維」である。他の材料の追随を許さないこの製品の特徴が、軽量・高剛性であり、さらに熱膨張係数が低く、

寸法安定性に優れた素材として認知されている。このような特性から、シビアな温度変化がある宇宙空間にて利用される人工衛星用アンテナ/リフレクターから、高温雰囲気下において使用されるロール等一般産業用途において幅広く利用されている。

なお、現在メソフェーズピッチ系炭素繊維生産は三菱レイヨン、新日鉄系では1995（平成7）年旧新日鉄と旧日本石油により設立された日本グラファイトファイバー（株）によっている。

14.5 新日鉄グループ以外の石炭系化学会社

高炉用コークス製造と連携する化学企業には八幡製鉄所に続いて建設された高炉に併設されたコークス炉を所有したJFEスチール系のJFEケミカルと三菱化学（グループに神戸製鋼のコークス部門である関西熱化学）がある。

14.5.1 三菱化学系

コークス事業の発祥は、1898（明治31）年に三菱合資（1893（明治26）年設立）、1897（明治30）年に当時の遠賀郡戸畑字牧山鼠島（現戸畑牧山）に設立された筑豊骸炭製造合資会社を買収し、三菱合資若松支店牧山骸炭製造所として発足された時点にさかのぼる。

牧山骸炭製造所では、24門のホルダー炉により、3トン/門の装入量、48時間の焼成時間で、年間約8,000トンのコークスを生産しており、主に三菱合資の槇峯鉱山（延岡）に出荷していた。

1934（昭和9）年8月、三菱鉱業（株）および旭硝子（株）の折半出資により設立された日本タール工業（株）は、1935（昭和10）年に八幡製鉄所に隣接する黒崎にコークス炉を建設して染料、肥料等の事業を開始し市場に供給した。

現在は坂出に製造拠点を移し石炭化学事業を続けるとともに瀬戸内海の製鉄所にコークスを供給している。

コークスを製造する過程で発生するコールタールを原料として、八幡化学とほぼ同時期に開発に成功した石炭系ニードルコークスを製造している。このニードルコークスは鉄材スクラップを溶解・精錬する電気製鋼炉用の電極材料として使われる。また、同じくコールタールから製造されるピッチコークスは、アルミ精錬用の電極材を始め、半導体用特殊炭素製品原料として幅広く使用されている。

コールタールを原料とする三菱化学の炭素繊維は、

石炭ピッチ系炭素繊維として世界で始めて開発に成功した。従来のPAN系炭素繊維に比べて高弾性かつ高強度、高熱伝導性などの優れた機能を持っている。ただしこちらは短繊維で日鉄化学の長繊維とは用途が異なる。

14.5.2 神戸製鋼系（関西熱化学）

1956（昭和31）年8月三菱化成工業株式会社（現三菱化学株式会社）、株式会社神戸製鋼所、旧尼崎製鉄株式会社（後に神戸製鋼に吸収合併）の3社共同出資により、製鉄用コークス製造のため尼崎コークス工業株式会社として設立（資本金5億円）。1970（昭和45）年05月加古川工場を建設、コークス炉操業開始。1976（昭和51）年8月関西熱化学（株）に社名変更した。

コークス炉の副製品は株主構成比率が関西熱化学（株）51%、三菱化学（株）49%の大阪化成（株）においてニードルコークスやピッチコークスを始めとする炭素製品になっている。

14.5.3 JFEスチール系

日本鋼管福山製鉄所（現JFEスチール西日本）の建設経過を述べた論文で「化工工場はコールタール、粗軽油、アンモニアは回収のみとしタールの蒸留、粗軽油の精製は行っていない」としている⁷⁾。しかしその後日本鋼管の化学事業部門は多角化の一環としてアドケムコ（株）を発足させている。

一方、川崎製鉄（株）千葉製鉄所（現JFEスチール東日本）を開設（1953年6月17日高炉火入れ）。1959（昭和34）年2月川鉄化学設立、順次化学部門（コークス製造部門を含む）を同社へ移管、1984年一時川崎製鉄化学事業部としたが、2003（平成15）年の日本鋼管と川崎製鉄の合併で川崎製鉄（株）化学事業部とNKK化学事業会社アドケムコ（株）が合併し、JFEケミカル（株）が発足している。

どのケースでも製品はニードルコークス、ピッチコークス、炭素繊維、カーボンブラックなどの炭素材部門、無水フタル酸、「軽油」、「硫安」など伝統的な化成品部門に大別され、基本的には余り差異はないが、それぞれに注目する独自の製品を開発して顧客を確保している。

参 考

- 1) 参考資料：a) 八幡製鉄所化工部概史 b) 新日鉄化学社内資料 c) 日鉄化学社史
- 2) 八幡製鉄所の設備・技術の変遷 第2分冊 コー

- クス製造設備 p.65, 2008.
- 3) 日本エネルギー学会誌, Vol.94, No.9, p.923, 2015.
 - 4) 八幡製鉄所 50 年史 八幡製鉄所, 1950.
 - 5) 新日鉄住金 (株) 八幡製鉄所史料室所蔵.
 - 6) 八幡製鉄所化工部概史.
 - 7) 中野 宏, 鉄と鋼, Vol.54, No.7, p.803, 1968.

15 | あとがき

我が国へのコークス技術到来とその後の発展の歴史を辿った。

第1期は黒船の来航に端を発した国防上の要請から、鉄製の大型砲を製作するための反射炉の建設が国内各地で行われた時期である。ヒューゲニン著の『ライク王立鉄大砲製造所における鑄造法』を翻訳するところから始まった、いわば洋学者たちによる文献ベースでの手探りの開発である。しかし、現存する装置図面などでは「タール除去炉」の名称で登場しており、コークスを製造するという意識は必ずしも明確ではない。石炭を予備的に加熱してタールを回収することに目的があり、結果的に得られた炭化物(コークス)の火力が石炭より強くなるなどの効果を認識したものと思われる。

そして第2期は明治維新の開国による人の交流に伴う技術移転、これも前半は海外から招聘した教師や技術者による指導から始まった。しかし、少なくとも高炉、コークスに関係する切り口では全くの失敗に終わることになる。官営釜石製鉄所および官営八幡製鉄所は、設備的には当時としての最良の設備を導入しており、招聘した外国人技術者が悪意によりそのような結果に導いたということではないことは勿論である。製品コークスの質が、原料石炭に大きく左右されるという事実が当時は分っておらず、かつ日本の原料事情に不案内であったことが原因であった。

コークス技術の要諦は、①与えられた石炭で、②一基で日産1万トンの製品を生産する、類まれな反応器である高炉の、安定した操業を可能にする仕様のコークスをどのように造り込むか、③それを可能とする設備をどのようにデザインするか、である。

この第1段階での失敗は①の前提が崩れたために②③に進む以前に頓挫したということであり、技術格差の中で、その後の日本のコークス技術開発努力は一部の例外を除き、設備開発ではなく①の国内の石炭をどのように使いこなすかに向けられることになる。

第2期の後半は維新後、選ばれて海外へ留学した若い俊英たちが日本に戻って、第1段階での失敗をリカバーする時代である。かれらの多くは学問だけでなく、製造現場の実学を経験して帰ってきたため、失敗の原因を理解し、実験を行い極めて適切な改造を行って成功に導いている。しかし、もともと移入されたそれなりの設備が目の前に存在していた訳で、“反射炉”の延長上で試行錯誤をする無駄を省けた意義は小さく

ない。いずれにしても最初は黒船の来航にともなう急ごしらえの対応であり、その時点での彼我の技術格差は圧倒的であった。したがってそこから始まった技術開発が一方的な片道交通になったのはやむを得ないことであった。

第3期では、その後、最初の留学帰国組に続く第2世代が、創成期設備の拡張期を担当し、模倣を脱却して黒田式コークス炉や高良の珪石煉瓦に代表される、当時としても世界第一級の技術開発を成功させ、逆に海外のオリジナルに影響を与えるに至った時期である。しかし、彼らも海外視察を繰り返して、習得した技術をベースとしたという現実がある。残念ながら当時は、日本の技術のいずれにも原理的なオリジナル技術は見つからず、先行する概念の組み合わせであったと云わざるを得ない。

第4期は戦後の占領政策とそれに続く高度経済成長期である。1950年の日鉄解体による独占的企業の消滅があり、さらに1951年には銑鉄の価格統制、配給統制が撤廃され、高炉4社(八幡、富士、日本鋼管、小倉製鋼)の平炉向け銑鉄はフリーマーケットになった。その結果、平炉メーカーは銑鉄の供給を安定させるため、自ら高炉を持ち、銑鋼一貫体制を目指すことになる。経済成長に対応する生産増を実現するため、この時期における最良の海外設備を導入し、1900年前後に起こった釜石・八幡の導入劇の1950年度版が再現され、その後の60年は、日鉄式を始めその他の炉式の基本構造も導入当時のそれを引き継ぐ形になっている。

丁度世紀が替わるころ、様々な背景を持つ7-8人が毎月集まって「イノベーションとは何か」について議論していた。海外からの「技術のただ乗り論」批判がきっかけであったと思う。

議論の中心は、改良型の技術開発がイノベーションと云えるかどうか、逆にどのような新しい概念でも過去の知識と全く独立に生まれることがあるだろうかというようなところであった。仲間の一人に特許の専門家がいた。彼によれば発明は一般に以下の3つの部分から構成されているという。

- ①技術的課題
- ②課題解決の具体的構成
- ③具体的構成を取った時に得られる効果

この説を基に皆で以下のような議論をした。①と②の部分に新規な部分があれば基本発明である。一方、

③に新規な部分があれば改良発明といえる。あえてイノベーションに当てはめれば①、②は、非連続的、③は連続的なイノベーションと分類できる。さらに、基本特許と改良特許の価値の比較について、基本特許の重要性は弁えつつも、実用化までの時間のパラメータを考慮し、改良特許といえども現実的な重要性は否定できないという結論になった。すなわち、自分で一からやっていたら3年かかることが、改良発明をすぐに利用できることで大きな利益を生み出せるとすれば、これが評価の対象となるということである。

従って特許の切り口では改良技術もその効果が際立っていれば特許として成立することになる。

日本の技術開発、特にコストダウンなどに関しては現場の技術職の人たちがおこなう日常的な「改善提案」に負うところが極めて大である。改善のためには以下のことが必要である。

- ①改善すべき箇所を特定して、改善方法を考える能力があること
- ②改善方法の効果を確認し、実機で実施する機会が与えられること

「実施機会」という意味での20世紀は、鉄鋼製造技術に関する限り、初めは生産増、そして環境対策、エネルギーショック、コストダウンと次から次へと外部からのストレスが加わった。そのストレスが勉強する動機付けになったし、その結果を確かめる設備投資とうまく噛み合ったと思う。

我が国の技術はこのように、日常的な作業のなかで積み上げられたものが多いのではなからうか。「総合技術」という所以である。

第5期は特に、環境対策、オイルショック以降の省エネルギー対策で、世界に先行するである。

所得倍増計画は、1961年からの10年間に名目国民所得（国民総生産）を26兆円に倍増させることを目標に掲げてスタートし、予想以上の成長を実現させた。しかしその間、生産活動に伴う公害問題が多発して社会問題となった。1967年に「公害対策基本法」が成立すると公害を防ぐための大気汚染防止法・水質汚濁防止法などの関連する法律が制定され、事業者はこれをクリアするための技術開発を求められた。また、1973年の「石油ショック」を契機に、全社的な省エネルギーが生き残りをかけて実行された。これが先行したが故に、その後、地球温暖化問題で京都議定書（1998年）が批准されると、その温暖化ガスの量的な削減義務を果たすために乾いた雑巾を更に絞られることになったのは歴史の皮肉であった。しかし、現時点でコークス製造に関係する技術や設備が国際的

に評価され、海外から導入の引き合いが来ている技術もこの分野にあることも確かであり、コークス炉の基本構造は変わらないものの、オリジナリティの切り口ではこの時期が日本の絶頂期であったかもしれない。

環境関連では中国へのCOG脱硫設備、省エネルギーでは中国をはじめとするインドなどへの、国の補助を得たCDQの技術供与が発端となり、その後民間ベースでの技術移転が進んでいる。

現在、アジアの途上国の多くには高炉がないためコークス炉も存在しない。しかし今後の経済成長に伴い、鉄鋼需要が増加した際には生産性の視点から高炉が選択されると思われる。環境汚染問題の越境が問題になりつつあるなかで、EUにおける長距離越境大気汚染条約のような規制が合意されると、これらの技術が注目されることは確実である。

北九州産業技術保存継承センター（KIGS）の報告書では、そのあとがきで「室炉式コークス炉を設計するのに必要な、ガスの分配や流れの抵抗に関する工学的理論は確立しておらず、設計者が失敗から学び、手探りで確証のない試みを実行していく試行錯誤的な苦心努力の積み重ねがコークス炉の歴史でなからうか」とした上で「・・・どのコークス炉にも長所と欠点があると云われ、課題を抱えておるとすれば、終着駅に到着したとは云い難い」とし、今後のさらなる研究開発を切望している。

コークス炉に限らず製鉄設備のほとんどは、製鉄所内の技術者が仕様書を書き、外部のプラントメーカーと緊密な連携の下に設計図を仕上げてゆくというオーダーメイドのスタイルをとっている。戦前は原料の選択肢が多くなかったし、事業所も日鉄などに系列化されていたので「日鉄式」はある程度の標準化が可能であった。戦後は先ず原料の選択肢が広がった上に海外から導入された炉の形式が多様であり、しかも寿命の延長技術により、思い切ったコークス炉改修の機会がないままにオイルショック以降の生産安定期に入ってしまった。

8.1で述べたように、明治期、我が国ではコークス炉導入時に海外から当時としての最新室炉が導入されたが、日本炭では高品質のコークスが出来ず、野呂景義や下村孝太郎が高品質コークスを製造するために選択した判断は、コークス炉（ハード）の開発よりも、むしろ、処理により人工的に性状を変えたものも含めた種々の石炭を日本炭に配合する「石炭配合技術」（ソフト）の開発であった。

この釜石・八幡以来100年間に行った乾燥、加熱、成型塊成化など事前処理技術の集大成があり、これを

黒田、大野、日鉄式と発展してきたプラットホーム¹⁾に乗せたのが次世代コークス炉 (SCOPE21²⁾) である。高度な操業技術を要求されることから現時点では技術移転を行うに至っていないが、高炉が存在する限り、いつかは海外を含めて日本ブランドとして普及することを期待したい。

以上述べた、我が国コークス技術の発展の経緯を、コークス技術の系統図として図 15.1 に示す。

参 考

- 1) ソフトウェアやハードウェアを動作させるために必要な、基盤となるハードウェアや OS、ミドルウェアなどのこと。
- 2) Super Coke Oven for Productivity and Environmental Enhancement toward the 21st Century.

謝 辞

コークス炉の設備については既に優れた成書があり、特に北九州産業技術保存継承センター発行の「八

幡製鉄所の設備・技術の変遷」第2分冊 コークス製造設備に負うところが大きであった。

また、技術の系統化という当初の趣旨から、ルーツにできるだけ追りたいとの思いもあり、江戸末期の反射炉の建設にコークスがどのように係ったかに一章を割いた。これにより、我が国の製鉄技術が「たたら」から脱皮する時点で、西欧との技術格差がいかに大きかったかを再認識することができたが、国立科学博物館産業技術史資料センターの蔵書に負うところが大きかった。

最後に、作成した原稿を査読し、ご意見を頂いた、新日鉄住金(株)技術開発本部 斎藤公兎フェロー、新日鉄住金(株)技術開発本部 プロセス研究所製鉄研究部、上坊和也主幹研究員、日鉄住金テクノロジー富津事業所 資源・プロセスソリューション部 有馬孝専門主幹、新日鉄住金エンジニアリング 加藤健次技術開発第二研究所長、元新日鐵化学戸畑製造所長 藤本研一様に心からの謝意を表します。

コークス技術産業技術史資料所在確認

名称	史料形態	所在地	製作年	備考
野呂景義設計のコペー炉	図面	新日鉄住金 釜石製鉄所	明治27年 1894年	ピーハイブ炉が現在の豎型コークス炉へ変化する歴史的過程の履歴
野呂景義設計のコペー炉写真	写真	釜石市立鉄の歴史館		
設備配置図(田中製鉄所見取り図)	図面	釜石市教育委員会		
八幡製鉄所におけるコペー炉写真	写真	新日鉄住金 八幡製鉄所	明治37年 1904年	

コークス技術の系統化調査 正誤表

ページ	段落	行	技術の系統化調査報告 共同研究編第9集 2016年3月 (誤)	全文PDF版 2016年10月 (正)
34	表7.2	右↑7	形式 Skoppers	形式 Koppers
34	表7.2	右↑6	形式 Skoppers	形式 Koppers
49	右	↓3	SCOPE21は、このDAPS技術のうちに予熱炭装入における	SCOPE21は、このDAPS技術に予熱炭装入における