

(補論 3)

鉄鋼業内部での石炭のエネルギー転換について

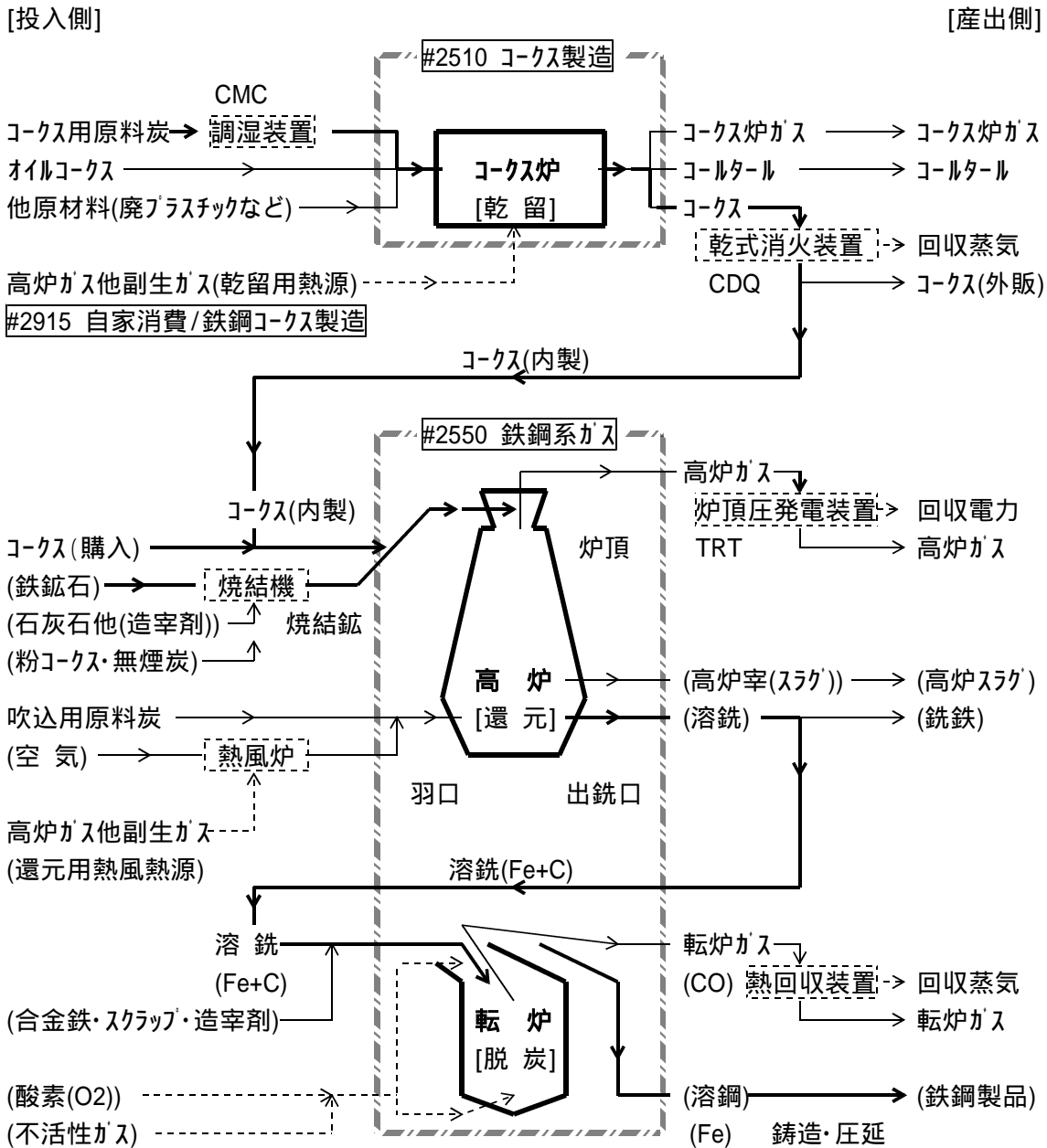
1. 鉄鋼業における製鋼過程とエネルギー転換の概要

日本の鉄鋼業では、高品質な鉄鋼製品を生産するための工程(製鋼工程)がほぼ確立しており、原料炭などのエネルギー源はこの製鋼工程での利用に適した形態にエネルギー転換されて使用されている。

また、製鋼工程において、各種のエネルギー源は鉄の還元に使われるため殆どの場合完全燃焼されないこと、工程全体が高温環境下で行われることなどから、途中段階で様々な形態の副生エネルギー源(副生ガス)や回収蒸気・回収電力が得られることとなる。

製鋼工程をエネルギー源が転換されていく様子を中心に整理した図を図補 3-1.に示す。

[図: 補 3-1. 製鋼工程でのエネルギー源の転換に関する鳥瞰図]



## 2. コークス炉におけるエネルギー転換

### (1) 工程の主目的: 良質の高炉用コークスの製造

製鋼工程において、コークスはその大部分が高炉の炉頂から鉄鉱石とともに投入され、焼結鉱中の酸化鉄を直接あるいは一酸化炭素により還元する還元剤として、かつ一酸化炭素、二酸化炭素と酸化していく際に酸化鉄の還元反応に必要な熱を発生するエネルギー源として用いられている。

高炉で使用するコークスには、高炉内部で粉化して目詰まりを起こさないよう十分な強度を持つこと、炉内で効率的に還元反応を行うよう比表面積が大きく多孔質であること、炭素分が多くかつ製鋼を阻害する硫黄分やリン分を殆ど含有しないことなどの性質が要求される。

### (2) コークス用原材料

#### 1) コークス用原料炭と粘結性<sup>\*1</sup>

(1)のような要求を満たすコークスを製造するため、1970年代までの日本の鉄鋼業は、低硫黄の強粘結炭など、良質の原料炭だけを選択的に使用してコークスを製造していた。

しかし、世界的な鉄鋼需要の増大と良質の粘結炭資源の不足に伴い強粘結炭価格が高騰し十分な入手が困難になったため、1980年代にかけて日本の鉄鋼業各社においては、廉価で入手が容易な弱粘結～微粘結炭の粒度を調整し湿分を低減させる前処理(調湿)を行い、さらにオイルコークス、コールタール、アスファルトなどの粘結剤を添加(増粘)した上でコークス炉で高温乾留することにより、強粘結炭から製造したコークスとほぼ同様の性状のコークスを製造する技術を開発し相次いで実用化した。

この結果、現在日本で用いられているコークス用原料炭は、諸外国のような強粘結炭ではなく弱粘結～微粘結炭が主流であり、一般炭に比較的近い独特の性状となっている。

#### 2) 粘結剤と廃プラスチックの原料利用

1) で述べたような経緯から、日本のコークス製造工程においては、コークス用原料炭に添加する粘結剤としてオイルコークス、コールタールなどが使用されている。

また、近年では廃プラスチックを粒状化し、他の原材料とともにコークス炉に挿入して乾留・分解し、化学原料やエネルギー源として再生利用<sup>\*2</sup>することも行われている。

### (3) コークス炉の構造とエネルギー転換

コークス炉はほぼ共通して図補 3-2.のような構造を持ち、乾留の熱効率を上げるため薄板状の炭化室と燃焼室を交互に 50 ~ 120 枚立てて並べたサンドイッチのような形をしている。コークス用原料炭等原材料は炭化室上部の穴から落下挿入(装炭)され蓋を閉めて密閉される。

炭化室中の原材料は、耐火煉瓦を隔てた両側の燃焼室で高炉ガスなどを燃焼させた熱により約 1100 ~ 1350 に加熱され、12 ~ 14 時間程度空気を遮断して乾留される。この過程で原材料中の固定炭素分などは炭化室下部で融着・固結して赤熱状態のコークスとなり、揮発分は蒸発・分解し気体となってコークス表面から抜けていき炭化室上部の配管から回収される。

乾留が終わると赤熱したコークスは押出機により水平方向に取出され、直ちにコークス乾式消火設備(Coke Dry Quenching; CDQ設備)において窒素ガスにより消火冷却され熱回収され

\*1 粘結性とは、400 以上に加熱した石炭が膨張・融解し、さらに加熱していくと石炭同士が餅状に融着・固結する性質のこと。粘結性の強さにより強粘結炭、弱粘結炭、微粘結炭、非粘結炭に分類される。微粘結炭や非粘結炭をそのまま乾留するとバラバラで脆いコークスになってしまうが、強粘結炭を乾留すると全体が十分に融着・固結するため強度の高いコークスが得られる。

強粘結性を示すのは固定炭素分と揮発分のバランスがよく、かつ揮発分の沸点が高い瀝青炭の一部のみであり、過度に炭化が進んだ無煙炭や、逆に揮発分・水分が多い亜瀝青炭・褐炭などは粘結性を示さないため、強粘結炭の資源量は大きく制約される。

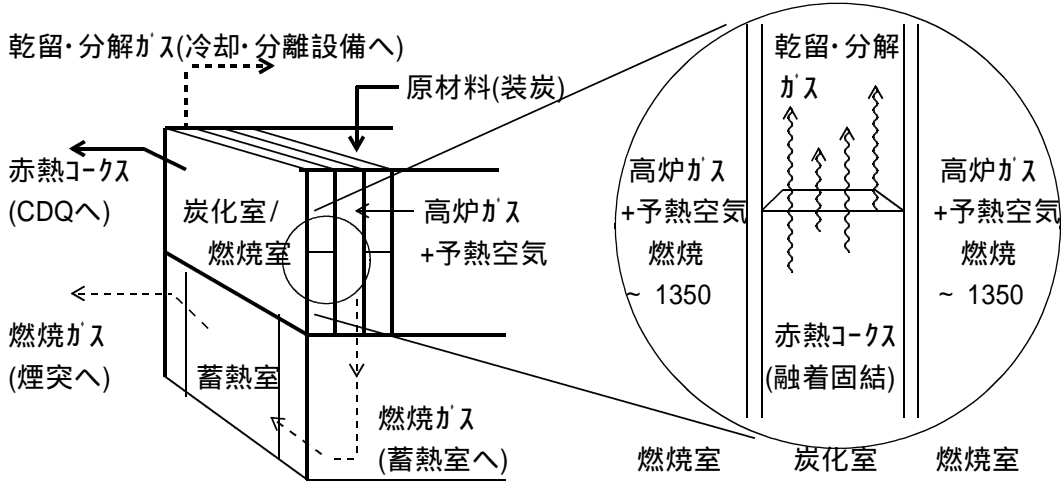
\*2 廃プラスチックをコークス炉で乾留・分解した代表的な例では、廃プラスチックはコークス 20 %、コールタールなど炭化水素油 40 %、コークス炉ガス 40 %に転換される(コークス炉化学原料化法、数値は(社)日本エネルギー学会「コークス・ノート」による)。

る。この際窒素ガスは 800 以上になるため、ここから高温高压の回収蒸気を得られる。

一方、炭化室上部から取出された気体は燃焼用空気を予熱するための熱交換器(空気予熱器)で徐々に冷却されていき、コールタール、ナフタレン・ベンゼン(ガス軽油)、アンモニア、硫化水素・硫酸、コークス炉ガスなど沸点別に分離され化成品やエネルギー源に利用される。

コークス炉全体として見た場合、原材料の乾留に必要な熱は高炉ガスなど副生ガスの燃焼により外部から与えられ、原材料はほぼ密閉状態で燃焼することなく処理されるため、コークス用原料炭やオイルコークスなどの原材料が、直接にコークス、コールタールやコークス炉ガスなどにエネルギー転換されているものと考えることができる。

[図: 補 3-2. コークス炉の構造例(高炉ガスを乾留用熱源とする場合の例)]



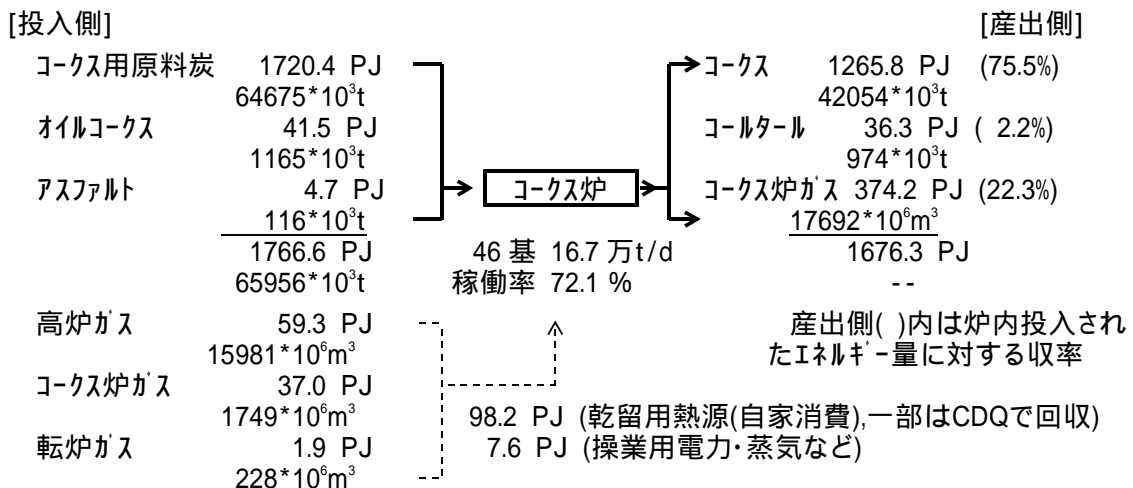
(4) コークス炉のエネルギー投入・産出

コークス炉の投入-産出を、石油等消費動態統計などから推計し、主要なエネルギー源について表現した結果は図補 3-3. のとおり。

コークスの平均的な性状は、炭素分 90 %、灰分 10 % 前後、揮発分・水分合計 1 % 以下であり、「少量の灰分を含んだ炭素の固まり」とであると表現できる。

コークス炉ガスの性状は操業方式や原材料により異なるが、代表的な性状では、水素 50 % 前後、メタン 30 % 前後、一酸化炭素 10 % 弱、他の炭化水素、二酸化炭素、窒素がそれぞれ数 % 含まれており、コークス産出 1t 当たり約 400m<sup>3</sup> が回収される。

[図: 補 3-3. コークス炉のエネルギー収支・物質収支の試算例(2002 年度)]



### 3. 高炉におけるエネルギー転換

#### (1) 工程の主目的: 鉄鉱石中の酸化鉄の還元

製鋼工程において、高炉は鉄鉱石中の酸化鉄を還元する主要工程であり、年間約 8,000 万 t を超える銑鉄の需要を賄うため、コークス、吹込用原料炭などの形で日本の一次エネルギー総供給の 5 % を超える大量のエネルギー源が投入されて操業が行われている。

高炉には、付属設備を含めて 3 つの経路でエネルギー源が投入されている。

- 1) 高炉炉頂部からのコークス投入
- 2) 高炉基底部の羽口に送る熱風を作るための熱風炉への副生ガスの投入
- 3) 高炉基底部の羽口からの吹込用原料炭の投入(吹込)

#### (2) 高炉用エネルギー源

- 1) コークス(2. (1)参照)
- 2) 熱風炉用副生ガス

酸化鉄の還元反応は吸熱反応であるため、高炉での円滑な還元反応を維持するためには最高 2300 程度の高温を維持する必要がある。高炉に常温の空気を吹込んでしまうと炉内の温度維持のため余分のコークスや吹込用原料炭を必要とするため、高炉には熱風炉と呼ばれる、副生ガスを使って高温空気を生成するための設備が付属している。

熱風炉は、直径 10m、高さ 50m 程度の巨大な蓄熱式熱交換機であり、高炉 1 基当 2 ~ 4 基 1 組で切替式で操業される。熱風炉は一定時間高炉から遮断して高炉ガスなど副生ガスを内部で燃焼させて 1300 程度に昇温蓄熱させた後、副生ガスを止めて高炉の羽口に接続され、吹込用の空気を通して 1150 ~ 1200 の高温空気にするために用いられる。内部が冷めてくると別の熱風炉に切替えられて遮断され、副生ガスの燃焼による加熱が再開される。

熱風炉からの高温空気は、コークスや吹込用原料炭と異なり直接的に別のエネルギー源に転換されないため、熱風炉で使用した副生ガス<sup>3)</sup> はエネルギー転換の投入として扱わず、鉄鋼業の最終エネルギー消費として取扱う(図補 3-4 参照)。

#### 3) 吹込用原料炭

1980 年代までの日本の製鋼用高炉では、還元剤のほぼ全部を炉頂部からのコークス投入により賄っていた。このため、粗鋼生産量が増加すると直ちにコークスの必要量が増加し、コークス炉のコークス収率は 75 % 前後であるため、コークスを製造するための高品質のコークス用原料炭をさらに大量に必要とするという構図となっていた。

1980 年代後半から、強粘結性原料炭の価格高騰と入手困難化を背景に、製鋼用高炉の羽口から熱風と一緒に非粘結炭を微粉化して吹込み、微粉炭の部分酸化により生成した一酸化炭素と酸化熱で高炉内の還元を効率化することにより、炉頂から投入するコークスやさらにはコークス用原料炭を節約する「微粉炭吹込操業技術; Pulverized Coal Injection; PCI」が開発され、高炉とコークス炉を一貫した製鋼工程の効率化・合理化が図られている。

微粉炭吹込に用いられる非粘結炭は PCI 炭と呼ばれ、高炉内に直接吹込まれることから、製鋼の障害となる硫黄分・リン分をなるべく含まず、灰分が少なく、かつ微粉化しやすい性質を持った瀝青炭・亜瀝青炭が多く用いられている。

PCI 炭は廉価で低硫黄であるため一般炭として用いられることもあるが、製鋼工程で使用される際にはその炭素分・水素分は高炉ガスの原材料となり、さらに炭素分の一部は溶銑中の溶解炭素となり転炉ガスの原材料となるため、これを原料炭(吹込用原料炭)として取扱う。

\*3 統計上熱風炉用という単独の項目は存在せず、熱風炉用副生ガスの消費は高炉での最終エネルギー消費の内数となっている。

(3) 高炉の構造とエネルギー転換

高炉は図補 3-4. のような耐火煉瓦で内張された円筒状の設備であり、内容積は 1600 ~ 5600m<sup>3</sup>、基底部分で直径 10 ~ 16m、高さ 30 ~ 40m、付属設備を加えると高さ 80m 程度になる。

高炉頂部では、鉄鉱石と石灰石・ドロマイトなどを焼結した焼結鉱、粉状の鉄鉱石を造粒成形したペレット、コークスが投入される。これらの投入原材料は予め 5cm 大程度に粒度調整しておき、炉内で均一に互層状になるよう計算されて順番に投入される。

高炉基底部分には、下から溶銑溜、出銑口、出宰口、羽口が設けられている。高炉内に熱風を均一に送るため、炉体を一周する熱風環状管から 400kPa 程度の高い圧力で高温空気が羽口へ送られており、数十個ある各羽口には吹込用原料炭の微粉炭吹込口が設けられている。

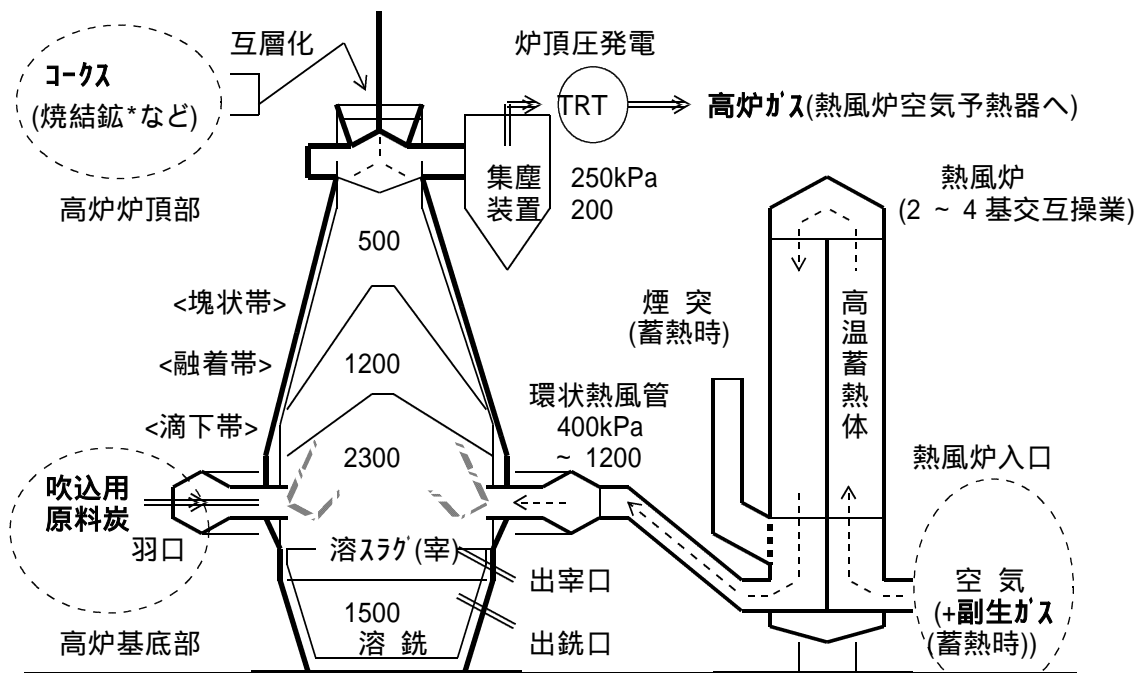
還元されてできた銑鉄は比重が非常に大きいため、高炉内を滴下して炉底部の溶銑溜に溜まり、その表面に石灰分などが溶けて不純物を吸収してできた液状のスラグ(宰)が溜まる。

高炉内部は、羽口付近の吹込用原料炭の部分酸化で生成した一酸化炭素によって全体が還元雰囲気には保たれている。炉上部の低温域( ~ 500 )では一酸化炭素が酸化鉄を間接還元する固体-気体反応により、基底部分に近い高温域( ~ 2300 )では溶融した酸化鉄と炉心付近の赤熱コークスが直接反応することにより酸化鉄の還元が行われている。

高炉内部では、炉頂から投入された原材料の互層が、炉内を吹上げてくる高炉ガスの圧力で浮いているような状態で釣合を保っており、上からの重みで降下して行くにつれ原材料は軟化・融着して徐々に溶銑とスラグ(宰)に分離していき、基底部分付近では溶銑とスラグ(宰)の液滴が高温高压の高炉ガスの中を落下している状態となっている。高炉ガスは羽口付近で生成し溶銑とは逆に炉内を上昇しながら順次還元反応と熱交換を行っていき、最終的に 250kPa、約 200 の低温高压の状態でもって回収される。高炉ガスは集塵した後、炉頂圧発電設備で余剰圧力から電力を回収し、さらに熱風炉の空気予熱器などで低温熱を回収している。

巨視的に見た場合、高炉内部ではコークスと吹込用原料炭が一旦全部一酸化炭素にエネルギー転換され、酸化鉄を還元して二酸化炭素になったり溶銑中の溶解炭素として消費されるが、余った一酸化炭素が高炉ガス中の可燃分として出てきている、と考えることができる。

[図: 補 3-4. 高炉と主要付属設備の構造例(断面図)]



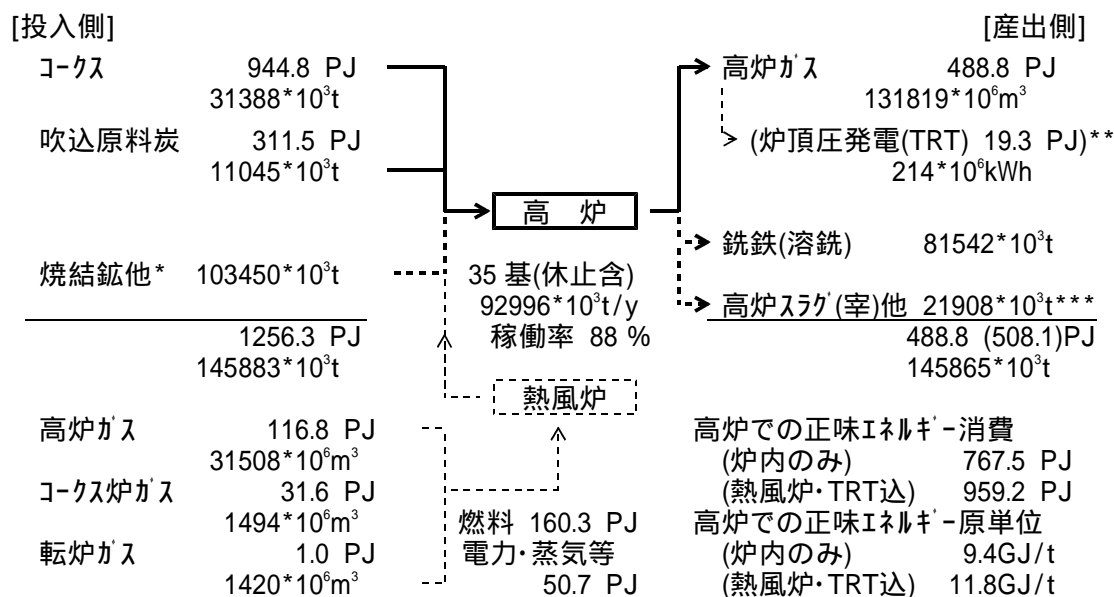
\* 焼結機における粉コークス・無煙炭などのエネルギー消費は鉄鋼業の最終エネルギー消費に計上されている。

(4) 高炉のエネルギー投入・産出

高炉の投入-産出を、石油等消費動態統計、鉄鋼統計などから推計し、主要なエネルギー源について表現し、また主要原単位を試算した結果は図補 3-5. のとおり。

高炉ガスの一般的な組成は、一酸化炭素 20 %、水素 5 %程度、二酸化炭素 20 %、窒素 50 %程度という組成であり、組成の大半を窒素と二酸化炭素が占めるため体積当発熱量は約 3.7MJ/m<sup>3</sup> で転炉ガスの 45 %、コークス炉ガスの 20 %程度しかない。しかし、高炉操業中は産出する溶銑 1tにつき約 1600m<sup>3</sup> という大量の高炉ガスが発生するため、製鉄所内部で高炉ガスは熱風炉やコークス炉、発電・蒸気生成のエネルギー源など多彩な用途に使用されている。

[図: 補 3-5. 高炉のエネルギー収支・物質収支の試算例(2002 年度)]



\* 焼結鉱、ペレット、炉頂から投入した石灰石・消石灰などを含む

\*\* 炉頂圧発電による発電量は一次エネルギー換算している

\*\*\* 高炉スラグ(宰)の量は物質収支からの推計、高炉ガスの集塵過程で回収されるガスなどの形態のものを含む

4. 転炉におけるエネルギー転換

(1) 工程の主目的: 溶銑の脱炭と成分・温度調整による製鋼

高炉から出たばかりの溶銑には、高炉内の還元雰囲気下で炭素分が 4 ~ 5 %も溶けておりそのままでは脆くて鋼にはならない。溶銑を鋼にする方法としては、溶銑を転炉に入れ、消石灰などを加えて純酸素<sup>4</sup>を吹込み溶銑中の炭素分を 0.05 %以下に除去する方法(塩基性酸素製鋼法)が一般的であり、溶銑の大部分は転炉により脱炭され溶鋼に処理されている。

転炉には脱炭とともに鋼の成分調整・温度調整を行うという重要な役割があり、転炉に溶銑とともに目的に応じて合金鉄(ファロアロイ)、屑鉄(スクラップ)などを加え、ステンレス鋼や各種の特殊鋼を調製し、また脱炭終了時の出鋼温度を調整して連続鋳造の下準備を行う。

現在の日本の製鋼過程では、転炉に入れる前に不純物の低減処理を行う溶銑予備処理や、転炉を出た後さらに不純物の低減を行う二次精錬(炉)処理などが行われているが、エネルギー

\*4 転炉で用いる酸素は、製鉄所内の空気深冷分離プラントにより自家発電の電力などを使って製造される。石油等消費動態統計では酸素製造をエネルギー転換と見なして扱っているが、酸素自体にエネルギー量はないため総合エネルギー統計では酸素は取扱わない。

転換との関連性はないため説明を省略する。

(2) 転炉用エネルギー源

転炉においては、溶銑中に純酸素を吹込むと溶銑中の炭素が一酸化炭素に酸化されて吹出してくるが、この際の反応熱で炉内温度が上昇するため、転炉自体を動かしたり酸素などを吹込む動力源を除けば、転炉でのエネルギー転換にエネルギー源は必要ない。

(3) 転炉の構造とエネルギー転換

転炉は図補 3-6. のような耐火煉瓦で内張された直径 10m 前後の鍋のような構造を持ち、約 20 分の処理で 1 回に 150 ~ 300t 前後の溶銑を処理することができる。

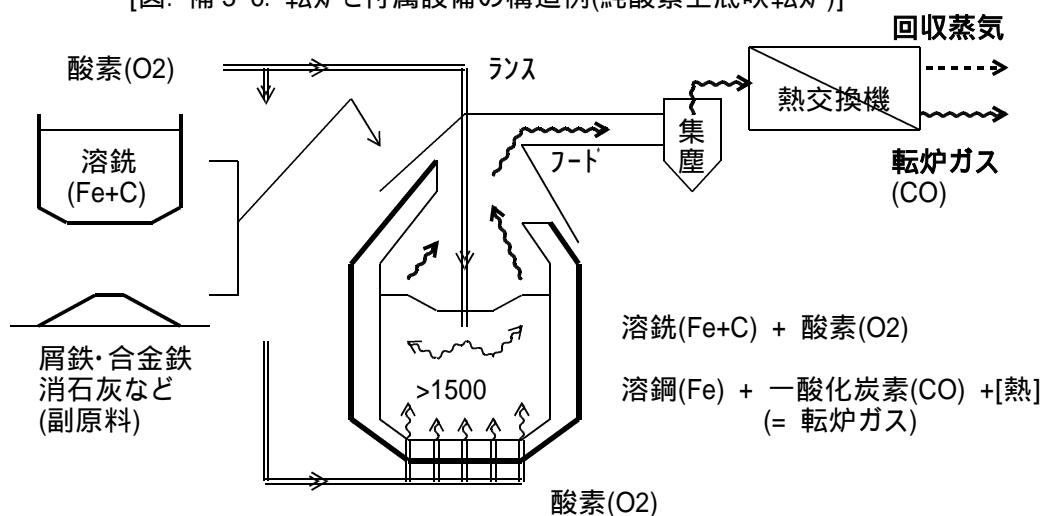
転炉での製鋼の原理はみな同じであるが、製鉄所毎に酸素の吹込方法(上、底、上・底)、炉の冷却方法、不活性ガスによる攪拌強化方法などで様々な工夫がこらされている。

転炉は副原料、溶銑の順に充填して混合した後フードで覆い、上部から溶銑に突刺した中空管(ランス)及び底部の吹込孔から溶銑内に超高压の酸素を吹込んで攪拌し 15 ~ 20 分「吹錬」する。吹錬中は転炉ガス(一酸化炭素 70 %、二酸化炭素 20 % 程度)が回収される。

転炉内は反応熱により 1500 を超える高温となるが常圧で操業されているため、高炉ガスと異なり転炉ガスは高温低压で回収される。このため転炉ガスは集塵後熱交換機を通して蒸気を回収している。

吹錬終了後、ランス、フードを外して転炉を傾け、溶鋼、転炉スラグ(滓)をそれぞれ取出す。

[図: 補 3-6. 転炉と付属設備の構造例(純酸素上底吹転炉)]



(4) 転炉のエネルギー投入・産出

転炉には直接のエネルギー源の投入はない。2002 年度の転炉ガスの回収実績は 74.5PJ、 $8861 \cdot 10^6 \text{m}^3$  であり、転炉から産出する粗鋼 1t につき約 1.0GJ/t、 $109 \text{m}^3/\text{t}$  が回収される。

5. コークス炉におけるエネルギー転換の計量方法とその評価

(1) 2001 年度改訂総合エネルギー統計での状況

2001 年度改訂総合エネルギー統計においては、コークス製造に関する石炭・石炭製品の需給について、2000 年度迄の部分についてはエネルギー生産・需給統計におけるコークス用原料投入量、コークス生産量、コークス炉ガス発生量などを基礎として算定し、2001 年度以降については、エネルギー生産・需給統計が廃止されたため、エネルギー生産・需給統計の値と最も近い推移を示す石油等消費動態統計の鉄鋼業の原料炭投入量とコークス・コークス炉ガス産

出量の関係から推計を行って算定していた。

ここで、エネルギー投入・産出の間に収支差がある場合には、コークス炉には赤熱コークスの取出時に大気解放下でコークスの一部が燃焼してしまう過程があることから、コークス炉でのエネルギー転換に伴うエネルギー損失であると見なして取扱ってきた。

## (2) 問題点

2001 年度改訂総合エネルギー統計の算定方法では、1990 ~ 1998 年度頃のコークス製造に関するエネルギー損失が 20 % を超える計算となっており、これが赤熱コークスがコークス炉を出て CDQ に入るまでのわずか 2 ~ 3 分間に燃焼する量とは凡そ考えられず、当該推計方法は全く実態を反映していないことが石炭関係の有識者から指摘されたため、改善のための検討を実施した。

## (3) コークス炉に関する統計値と推計方法

コークス炉に関するエネルギー投入・産出の推計方法には、以下の 2 通りが考えられる。

- 1) エネルギー生産・需給統計におけるコークス統計調査を用いる方法
- 2) 石油等消費動態統計の鉄鋼業など関連業種の投入・産出量を用いる方法

エネルギー生産・需給統計におけるコークス統計調査は、コークス炉を保有する工場・事業所からの悉皆調査により原料消費量、生産量と出荷・販売量を調査しているが、原料炭の支給による委託生産などの中間物流が考慮されておらず、コークス炉自体の投入量と産出量の関係と統計上の数値が必ずしも対応していない問題がある。

一方、石油等消費動態統計の鉄鋼業など関連業種の投入・産出量は、鉄鋼業・化学工業(製鉄化学)・窯業土石工業(専業コークス)の工場・事業所からほぼ悉皆調査により石炭の原料消費量、コークスなどの生産量を調査している他、原料払出量、製品受取量を調査しているため、委託生産なども捕捉していると考えられるが、同一のコークス炉に関するエネルギーの投入・産出量が業種間で重複計上されていたり、受入分に輸入コークス量が合算されているため、複雑な重複処理計算を要する問題がある<sup>\*5</sup>。

このため、これら 2 通りの方法による試算を行い、そのエネルギー収支を比較し評価することとする。

## (4) エネルギー収支・炭素収支の試算結果と評価

コークス炉のエネルギー収支・炭素収支の試算を (3) の 2 通りについて行った結果を図 補 3-7、3-8 に示す。

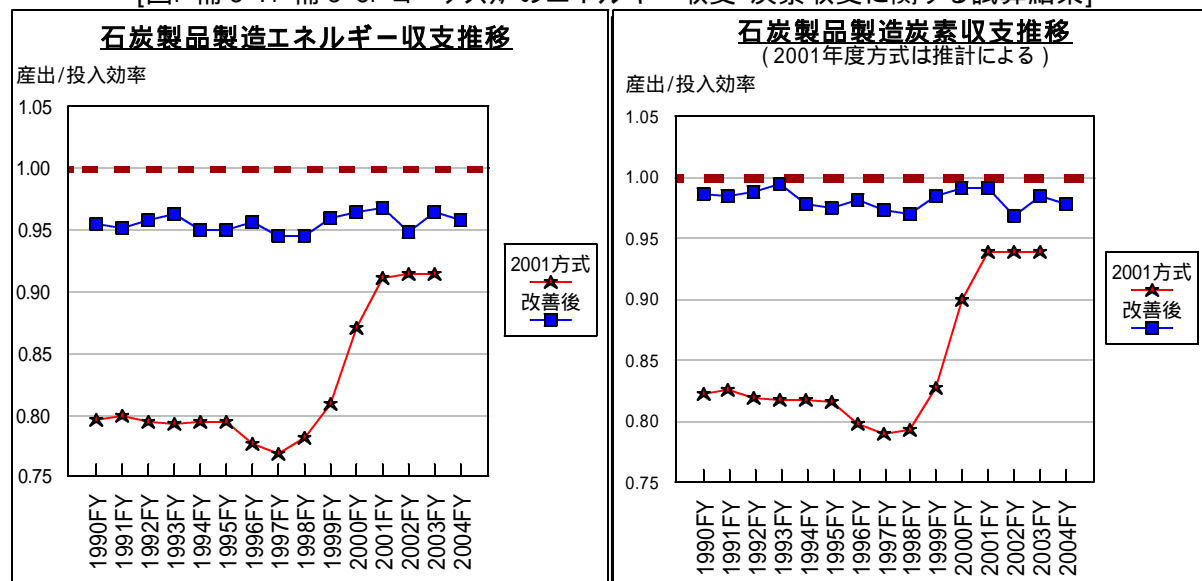
当該結果から、明らかに石油等消費動態統計の関連業種の投入・産出量から重複処理によりエネルギー収支を計算する方が試算結果が安定しており、かつコークス炉のエネルギー転換損失が 4 % 前後で推移しており、20 % といった非現実的水準ではないことが確認された。

従って、コークス炉のエネルギー転換については、石油等消費動態統計の関連業種の投入・産出量から重複処理により表現する方法に切替えることが適当であると評価される。

但し、幾つかの年度において例外的に炭素収支がごくわずかに「湧出し」となっていることから、コークス炉のエネルギー転換については、石油等消費動態統計の関連業種の投入・産出量から重複処理により表現する方法を基礎とし、原料炭などの発熱量の精査、推計方法の一層の改善など、更なる精度向上のための調整を行った上で算定することとする。

\*5 さらに、石油等消費動態統計上の指定品目コークスに関する統計数値は、コークスの生産に要したエネルギー源の投入量のみが示されており、これと対応する生産量が得られない問題がある。

[図: 補 3-7. 補 3-8. コークス炉のエネルギー収支・炭素収支に関する試算結果]



図注) 2001年度方式では、炭素収支についてはコークス炉ガスの炭素排出係数を調整して強制的に炭素収支を成立させる方法としていた。図補 3-8. の炭素収支は筆者の推計による数値である。

## 6. 高炉・転炉におけるエネルギー転換の計量方法と「#2550 鉄鋼系ガス」の考え方

高炉・転炉のエネルギー転換を巨視的に見た場合、高炉へ投入されたコークス、吹込用原料炭のエネルギーの約 45 %が、高炉ガスと転炉ガスの形に転換されてそれぞれの炉から産出しているものと見なすことができる。

この際、コークスと吹込用原料炭がどの程度の比率で高炉ガスと転炉ガスにエネルギー転換されたのかを厳密に識別することはほぼ不可能であるため、生成した高炉ガスと転炉ガスのエネルギー産出量の合計を、コークスと吹込用原料炭の高炉へのエネルギー投入量の比率で案分し、当該投入量の比率に応じてコークスと吹込用原料炭が高炉ガスと転炉ガスの産出量に応じて部分的にエネルギー転換されていると見なして算定を行うことが合理的である。

総合エネルギー統計 #2550 鉄鋼系ガスにおける推計処理は、当該方法により高炉ガス・転炉ガスの産出に関するエネルギー転換を表現しているものである。

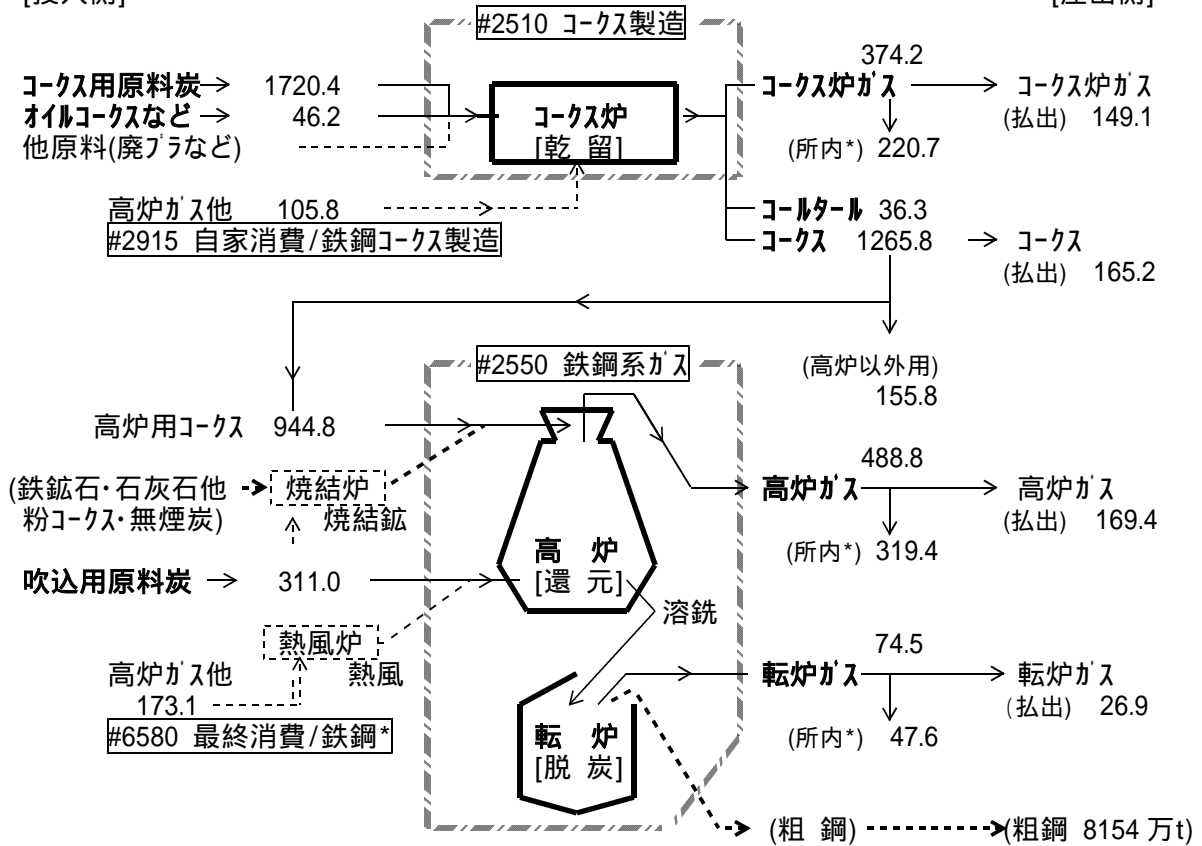
当該高炉・転炉におけるエネルギー転換については、高炉へのエネルギー源の投入量から、高炉ガス・転炉ガスの生成に必要なエネルギー源を控除する方法で表現し、エネルギー損失は考慮しない(エネルギー転換効率を常に 100 %とする)。

エネルギー損失を考慮しない理由は、高炉・転炉内でのエネルギー転換の実態は、製鉄用や製鋼用に投入したエネルギー源の一部が他のエネルギー源として「出てきてしまう」というものであり、仮にエネルギー転換に固有のエネルギー損失があったとしても、高炉・転炉の内部におけるエネルギー損失は熱エネルギーの形で炉内の温度上昇・保持に寄与するはずであり、結果として当該エネルギー損失は全て製鉄用や製鋼用のエネルギー消費として使われたと考えることが妥当だからである。

[図補 3-9. 石炭の主要なエネルギー転換に関するエネルギー鳥瞰図]  
(単位 PJ、2002 年度実績値)

[投入側]

[産出側]



産出側(所内\*) は、#2915,#6580,#2217,#2307 の合計値