

- I. はじめに(鑄鉄製造プロセスのコペルニクスの転回)
- II. LCA(ライフサイクルアセスメント)調査
 - II 1 鑄鉄製造プロセスの革新が進展しないのは主原料に鋼屑を選択していることにある
 - II 2 調査対象としたプロセスとシステムの境界
 - II 3 前提条件
 - II 4 主要使用データ
- III. LCA 計算結果
 - III 1 各プロセスの原単位
 - III 2 鑄鉄および粗鋼のインベントリ
 - III 3 鑄鉄および粗鋼のライフサイクルインベントリ
 - III 4 木を見て森を見ずの愚を犯してはならない
 - III 5 システム全体のライフサイクルインベントリ
 - III 6 系全体のマテリアルフロー
- IV. 考察
 - IV 1 ものづくりは自然科学の論理に基づいて
 - IV 2 鋼屑リサイクルは系内循環
 - IV 3 競争力強化のためのコスト低減は製造プロセスへのコスト負担を如何に小さくするかにある
 - IV 4 鑄鉄業界の二酸化炭素削減対策と将来への課題
- V. おわりに(逆転の発想)

―はじめに(鑄鉄プロセスのコペルニクスの転回)

高炉が発明され、溶けた鉄を手にした時から人類は産業革命を促し、鉄の生産と消費を驚異的に進展させた。当初はこの溶湯を直接鑄型に流し込んで鑄鉄が大量に造られた。勿論、鋼もバドル法によりこの溶湯を脱炭して造られたが、一つの塊がせいぜい三五 kg程度だったので大型構造物は鑄鉄で賄われていた。セバロン河に架るアイアンブリッジはその代表的なものである。しかし近代製鉄の三大発明といわれている一八五六年のベッセマーの転炉、一八六四年のシーメンス・マルティンの平炉、一八七四年のトーマスの塩基性転炉の発明により鉄は鋼の時代へ進展していった。爾来、高炉メーカーは鋼製造の原料供給、即ち鉄鋼一貫への道を歩むことになった。

一方、鑄鉄業界は早くから行われていた青銅鑄物等の鑄造技術の応用として、当初は隕鉄やケラから生ずる銑(すく)を溶解し鑄型に流し込んでいた。一時期、高炉も前述のとおり鑄鉄鑄物を作り一世を風靡したが、まもなく鋼の生産に傾斜、一般の鑄鉄業界は高炉から型銑の供給を受け冷鉄源を再溶解するシステムを採用し、鋼と鑄鉄は違った道を歩むことになった。爾来、鋼が転炉の発展によって材質の改良に邁進したのに対し、鑄鉄業界の品質改良は市中の鉄源(故銑・銑鉄・鋼屑等)の選択と配合によって対処してきた。ここに品質に対する根本的な考え方に大きなズレが生じることになった。かつては高炉から出てきた溶銑や型銑を再溶解してそのまま精錬することなく鑄込んでいたため、韌性に問題があった。鑄鉄業界の品質改善の主たる技術開発のテーマは精錬された鋼屑の配合や鋼屑に加炭させるステムを旨とした。近年は鋼が高級化に向かったため、鑄鉄の原材料として、鋼屑は不適切な元素の混入等、品質が劣化の方向に進み業界はその対処技術の開発に注力してきた。すなわち鋼が材料の品質改善に注力したのに対し、鑄鉄は材料の選択と配合及び成分調整に目を向けた。現在、素形材業界の中でも鑄鉄業界だけが工場毎に小ロットで材質の品質管理や成分調整及び対処技術の開発に時間と労力をさいている。

この際、鉄の歴史的経緯と周辺技術の進歩を見つめ直して、鋼のように精錬技術を活用し鑄鉄の種類に合った最終目標成分の素材材料(製造に目を向けてはどうか。そして鑄鉄も鉄の生産システムの一部と考えればこのような配合や成分調整及び成分的品質保証の仕事は一切不要となり、材料の大量生産による品質向上と安定及び保証はもとより大幅な生産性向上に繋がるのはいうまでもない。今、鑄鉄業界が閉塞感に陥っている最大の原因は「鋼のように素材の段階での材料開発を行って来なかったこと」と今もって「鋼屑を主原料にした生産システムにとらわれていること」にある。業界や学会は百家争鳴、「鋼屑は安いから」と、コスト低減の一方法として鋼屑の使用を推奨しているが、トータルコストについては科学的論拠を持って計数的に証明されてはいない。又技術開発の方向も「鋼屑のリサイクル利用を徹底して研究すべし」としてそれが省資源や環境に貢献できると声高に論じているが、これは鑄鉄業界だけの視野狭窄的論理にすぎず、地球が中心と考えられた十六世紀のコペルニクス以前の現状追認の発想からその域を出ていない。地動説を唱えたコペルニクスに習って思い切った製造プロセスの転換を図りたいものである。

II LCA(ライフサイクルアセスメント)調査

LCAとはあるシステムの境界を設定し、システム内の材料の選択や工程改善等のイノベーションを図ることににより資源の採集から製品の販売通常はリサイクルや廃棄(までの資源やエネルギーのインプットと、そのアウトプットである製品や二酸化炭素等の廃棄物との物質収支を計算、定量的にどのように改善されたかを計る手法の一つである。

いいかえると、我々の日常経済活動の地球環境への負荷をどれだけ低減できたか、即ち資源の生産性を如何に高めることが出来たか、二酸化炭素を含む廃棄物をどれだけ削減できたかを計る手法である。

そこで我々は、現状の鋳物業界が三万トンの鋼屑を主原料としている場合と、この鋼屑を転炉に回し、余剰となった銑鉄を主原料にした場合とどちらが省資源・省エネルギーなのか、そしてどちらが二酸化炭素排出等地球環境への負荷が小さいか、環境管理の物さしであるLCA(ライフサイクルアセスメント)をISO14044に準拠して検証することにした。
(「鋳物の花見酒」より)

II 1 鋳鉄製造プロセスの革新が進展しないのは

主原料に鋼屑を選択していることにある

鋼屑はもとも素形材用に製造された鋼材の加工屑であり、鋳鉄用に製造されたものではないので、成分等の特性が鋳鉄用に適しているはずはなく、鋼屑が本来持っている属性をよく考慮した上でその使用を考えなければならぬ。生産技術の革新が進まない原因がこの鋼屑の属性を無視した生産システムにあることに気付かなければならない。その理由を列挙してみよう。

(1)加炭・加珪等資源の再投入という冶金的工程が必要でそのための作業も要る。我国の鋳鉄業界の規模別企業数の現状を見ると、全一、一六八社中業者一人未満の企業が一、一四社あり、全体の九五・四%を占めている。それぞれの企業が一チャージ毎に鋼屑・銑鉄・戻り銑・加炭材・珪素等、最低五種類もしくはそれ以上の原材料の配合・計量を行っている。又装入作業は鋼屑や戻り銑の充填密度が小さいため通常一チャージ当り五〜二〇数回も行わなければならない。平均して一チャージ一〇回の装入で一日五チャージとして一工場で五〇回装入することになる。

このような繰り返し作業は自動化の難しい中小企業すなわち一人未満の企業だけでも一ヶ月間に何と一、三九二・五回も行われている勘定になる。コスト負荷はもちろんのこと配合間違い・計量間違い・装入忘れ・過装入等が起これらはないはずがない。鋳鉄の信頼性が問われるのは、ここにその原因がある。

(2)加炭のため高温溶解が必要となり、成分の調整やチェック工程が必要不可欠となる。その作業は一チャージ毎に平均一・五回としても一日に一工場で七・五回、全国で一ヶ月に実に一八、八七五回も行われている。その結果、注湯までのリードタイムが長くなりエネルギー原単位も上がる。

(3)鋳鉄にとっての不適切元素の混入が増え、不良品が多く、その対策としての技術開発が不可欠となっている。結果として方案歩留りが低下しトータルコストの上昇をまねいている。等である。

これらはまさに実験室が研究室の延長で、経済活動としての生産システムといえるものではない。ものづくりはもっと生産工学的な手法を取り入れたプロセスにす

べきだと考える。又、資源循環の原則から見ると、溶銑から炭素を酸化(脱炭)して二酸化炭素を排出し折角鋼にしたものに再び炭素を加えるというプロセスは決して科学的でも合理的でもない。

従って鋼屑はその持っている特性を最大限有効に活用できる生産システム、即ち鋼の再生産のためにリサイクルし、余剰となった溶銑・鑄鉄の基本的元素の一つである炭素をそのまま合金の形でもっている(を鑄鉄生産の原材料として利用することを提案したい。この生産システムを具現化するためにキャストロイ)を開発したので鋼屑との置換を前提に環境の負荷とコストへの負荷について検討する。

ものづくりの材料選択の良し悪しがコストや品質保証に大きな影響を与えることは今も変わらない。現状の生産システムの中で現状追認や対処療法の論理でコストや品質保証を論ずることは「鹿を追う者山を見ず」のきらいがある。地球規模的資源の生産性や環境負荷の視点から鉄の業態系全体のライフサイクルの中で最適な原材料選択のあり方を究明することが先決だと考える。「流水の清濁はその源にあり」である。

そこで資源の生産性と環境負荷、即ち地球温暖化対策としての二酸化炭素問題についてLCA(ライフサイクルアセスメント)のISO 14040に準拠して調査した。その結果を報告する。

キャストロイ…株式会社福田博商店開発、株式会社神戸製鋼所製造の高純度EP銑(Eutectic Pigion)のニックネーム。共晶組成なので融点が高い

II 2 LCA 調査の対象としたプロセスとシステム境界

LCAはあらゆる社会活動の中での環境負荷を測定する手法で、その真髄は「ゆりかごから墓場まで」、すなわち資源の採集から製造・使用・廃棄まで総合的に資源の生産性や排出物の削減の度合いを判定し、地球への環境負荷低減に寄与、社会の持続的発展、責任ある成長への指針にしようとするものである。

高炉からの鉄源(溶銑)もリサイクルされている鋼屑も粗鋼製造や鑄鉄製造に使われている同じ鉄の仲間、すなわち同じ系内の原材料である。従って、LCAを調査するに当たってはその対象となるシステムとその境界を明確にしておかなければならない。

図1は現状のシステムを示している。すなわち鑄鉄生産の鉄源として鋼屑を主原料としている。図2は改善プロセスで鋼屑は転炉や電炉の粗鋼生産へリサイクルし、鑄鉄の主原料は全てキャストロイを使用したシステムである。図示網掛け部分の如く、いずれも鉄鉱石や石炭等の原料採集から鉄鋼製品(粗鋼・鑄物銑)製造まで、および鑄物銑・加工屑等を原料とした鑄鉄製造までをシステム境界とした。主原料は本調査の目的に鑑み、鉄鉱石・鋼屑・石炭(コークス)および石灰石を対象とした。尚製鉄所におけるエネルギー利用形態は複雑で、石炭は下工程のエネルギー源としても活用されており、これらを含んだ評価となる。

鑄鉄製造は電気炉(誘導炉)とキュボラを用いた溶湯製造までとし、造型や注湯・中子製造・型バラシ・仕上げ等の下工程は対象外とした。

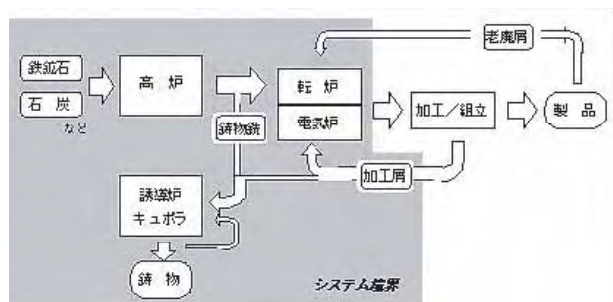


図1 現状プロセスのシステム境界

II 3 前提条件

LCAは科学的にその結果を評価するのが目的なので、前提条件を明確にしておく。対象とするシステムの機能は一九九七年度平成九年における品質の粗鋼および鉄の生産量を確保することを前提とした。

- (1) 転炉および電気炉での粗鋼生産量は一定とし、また転炉鋼/電気炉鋼の比率は変えない
 - (2) 転炉での鋼屑増大に伴う熱補償は炭材の燃焼によるものとした
 - (3) 鉄用原料となつている鋼屑は実態に鑑み、加工工場・組立工場等で発生する加工屑のみとし、自動車・家電製品等の使用後に発生する老廃屑は対象としない
 - (4) 加工屑の環境負荷は便宜上ゼロ評価とし、発生場所から製鉄所あるいは鉄工場への輸送時の環境負荷は考えない
 - (5) 鉄用原料の違いによる鉄の品質の差、特にりん・硫黄などの不純物の影響が考えられるが考慮しない
 - (6) 鉄製造では成分調整用の添加剤(加炭材・合金材・球状化材)のみを考慮し、鉄屑・鉄型・副資材などは同一条件であるとしてインベントリー集計の対象外とした。
- 尚、コスト低減への可能性を見極めるため、キャストロイを使用した実績値をもとに鉄製造の歩留り改善時の環境負荷への影響も検討した。但し、その際の方案歩留りや不良率の改善による鉄屑や中子製造などの影響は考慮していない。

II 4 主要使用データ

鉄鋼製造に関する鉄・粗鋼の生産量および原材料の消費量のデータは鉄鋼年鑑(平成十年版)の統計データを用いた。また炭酸塩の形で存在する石灰石・ドロマイトなどは分解によって二酸化炭素を発生する。これらの消費量は鉄鋼統計年報の平成九年度の値を使用した。ただし、これらは全て次に示す石灰石に換算した値(二酸化炭素ベース)を用いた。

【換算係数】

石灰石	1
生石灰	1.1786
ドロマイト	1.187
焼成ドロマイト	1.283

鉄製造に関する鉄・粗鋼の生産量および原材料消費量は素形材年鑑(平成十年版)の統計データ(一九九七年度)を用いた。

鉄用鉄は高炉の溶鉄を原料として製造されている。しかし我が国における鉄の製造は限られており鉄に限定した統計データが得られないため溶鉄原単位・成分調整用合金鉄原単位については鉄バランスに基づき計算した結果を用いた。

以上が今回LCA算出のために使用した基礎的データである。関連データおよび詳細については福田勝著「鉄の花見酒」(日本鉄工業新聞社)二年刊(を参照していただきたい。尚、このLCA調査を進めて問題点としてクローズアップされたのが各製造工程中の物質収支に大きな影響を与える「歩留り」である。経験的

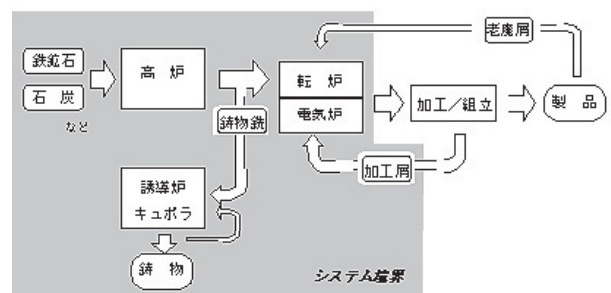


図2 改善プロセスのシステム境界

には推定できるものもあるが信頼性の高い統計データがないのが実情である。

そこで我々は計算の過程で溶銑・鋼・鋳鉄の中で最も基本的元素である鉄(C)について原料と製品の間でバランスさせることにした。

III 1 各プロセスの原単位

高炉製鉄・転炉製鋼・鋳物銑製造・鋳鉄製造の各プロセスおよびプロセス相互の関連データと原単位を求めた。詳細は前出「鋳物の花見酒」を参照されたい。

III 2 鋳鉄および粗鋼のインベントリ

鋳鉄及び粗鋼のインベントリはそれぞれの製造工程に沿って原料投入量を積算することによって求めることができる。この値を表1に示した。

III 3 鋳鉄および粗鋼のライフサイクルインベントリ

前述のインベントリにそれぞれのプロセスで投入される溶銑および鋳物銑の製造原単位を積算することによりライフサイクルインベントリを求めることができる。

ライフサイクルインベントリでは投入資源量(この場合、鋳鉄製造プロセスと粗鋼製造プロセスは独立した別の系としての計算するため鋼屑・鉄屑も資源として扱う)および環境負荷量(大気排出物・水域排出物・固形廃棄物など)として表す。但し戻り銑(返り屑)はシステム内を循環しているので除外する。

本来は高炉製鉄と転炉製鋼および鋳鉄製造に分けるべきであるが、鉄鋼製造プロセスにおけるエネルギーの使用形態は複雑なため、本調査では便宜上石灰は鋳鉄製造プロセスのキュボラで使用する石灰(コークス)を除いてすべて高炉製鉄で使用することとしている。したがって石灰使用に伴う二酸化炭素排出については、一部鋼に固定されるものを除いて溶銑に配分した形になっている。

日本鉄鋼連盟では鋳鉄は製品対象としていないためこの鉄鋼プロセスにおける二酸化炭素排出量の銑鉄と粗鋼への配分は現時点では検討されておらず、今後の課題である。従って今我々が提言している銑鉄を主原料とした鋳鉄製造プロセスにとっては結果として過剰に配分されることになる。しかし本調査の目的からすれば、このことはLCAの理論(現状と改善の差し引き)からいって改善プロセスの結論を覆すものとはならない。結果を表2に示す。

III 4 「木を見て森を見ず」の愚を犯してはならない

今、業界や学会では「鋳鉄製造に銑鉄を使うと二酸化炭素の排出量が増加し、環境負荷が大きくなる」と論じられている。これは我々が調査した結果、に示すように二酸化炭素排出量は鋳鉄一トン当り一、五九五トンが改善後は二、五二六トンとなり、九三トン増加している。

表2 鋳鉄、粗鋼各1トン当りのライフサイクルインベントリ

ライフサイクルインベントリ	単位	鋳鉄製造			粗鋼製造(転炉)		
		現状	改善	改善-現状	現状	改善	改善-現状
(r) 鉄鉱石	kg	349.27	1,253.82	904.55	1,631.59	1,631.01	△ 60.58
(r) 石灰石	kg	56.85	187.24	130.39	319.99	308.52	△ 11.47
(r) 石灰	kg	307.74	707.33	399.59	815.32	786.12	△ 29.20
(scr) 鋼スクラップ	kg	588.00	51.43	△ 536.57	83.96	119.23	35.27
(scr) 鋳物バスマット	kg	162.14	160.00	△ 2.14	0.00	0.00	0.00
エネルギー*	kJ	23,692.28	36,292.28	12,600.00	26,124.50	25,183.78	△ 940.72
鋳鉄製造までの二酸化炭素	kg	1,297.75	2,251.78	954.03	1,942.58	1,872.98	△ 69.60
各工程で発生する二酸化炭素	kg	298.21	274.72	△ 23.49	224.77	221.58	△ 3.19
二酸化炭素(CO ₂)合計量	kg	1,595.96	2,526.51	930.55	2,167.35	2,094.56	△ 72.77

*エネルギーには溶解以外に鋳鉄製造に関わるエネルギー全消費量を含む

今我々がよく考えなければならないのは、鑄鉄も粗鋼も製造のプロセスは同じ系内すなわち鉄の業態系内の生産活動であるということである。LCAでは資源の生産性や環境負荷を論ずるとき、系外すなわち自然界との物質やエネルギーの入出力については事前に人為的に変化を加えずに環境から取り込まれた(または排出された)ものと規定されている。

今、我々が問題としている鋼屑のリサイクルはかかる視点から見ると同じ系内での物質のやりとりにはすぎない。即ち鉄の業態系内の循環であることを理解しなければならない。一種のゼロサムゲームみたいなもので、自然界との入出力には基本的に何等関係ないのである。ただ鑄鉄の製造、粗鋼の製造いずれのプロセスにおいても鋼屑以外の物質(加炭材や合金鉄等)およびエネルギーの入・出力が自然界すなわち系外に対してどのような影響をもたらすのかについての検証は見落してはならない。結局、つきつめていくと鋼屑をそれぞれのプロセスで使用したとき、そのプロセスで使用する鋼屑以外の物質とエネルギーの自然界との入・出力比較ということになる。従って鑄鉄製造プロセスだけの物質やエネルギーの入・出力を論ずるのは片手落ちとなる。

そこで我々は、鑄鉄製造に使用していた鋼屑を転炉での粗鋼製造に回したときのライフサイクルインベントリを算出した。その結果は表2の右辺のとおりである。粗鋼製造プロセスでの二酸化炭素の排出量は粗鋼一トン当り現状二、一六七トンが二、九四トンと減少しているがその差は・七二トンである。

しかし、このライフサイクルインベントリは単純比較で判断すべきでない。鉄の業態系としてとらえることが肝要である。

III 5 システム全体のライフサイクルインベントリ

「何でこんなに安い値段で・・・」と目を疑うスーパーマーケットのチラシ広告をしばしば目にする。この商売の採算について考えると面白い。このスーパーマーケットでは一日に売れる量は大体定まっている。競争が激しく利益もほぼトントンの状態にある。そこで売上が落ちないように目玉商品を設け、集客力を維持しながら収益力を改善しようとする戦略である。目玉商品となった商品は一ヶ売ると九三・五五円の赤字なので四五八個売ると四二一六一九二円の赤字となる。しかし購買心理と集客効果により他の商品が一ヶの利益が七二・七七円しかないけれども六九六二個売れるのでトータル利益は五・六六二五円となる。その結果全体では差し引き八、三六 円の儲けになる。結局は単価(原単位)と数量(総生産量)との関係でトータルで利益が出ればよいという勘定である。数字は少しややこしいが、今LCAで検証しているシステム全体のライフサイクルインベントリを模したもので目玉商品の単価(利益)は鑄鉄の主原料に鉄屑を使用したときの二酸化炭素の増加量(原単位)を、販売数量は鑄鉄の生産量を表しており、他の商品の単価(利益)は粗鋼の二酸化炭素削減量(原単位)を、販売数量は粗鋼の生産量を擬似的に当てはめて計算したものである。差し引き利益はシステム全体での二酸化炭素削減量に相当するものである。

表3 システム全体のライフサイクルインベントリ

	ライフサイクルインベントリ	単位	現状 (歩留り63.62%)			改善 (歩留まり63.78%)		
			鑄鉄	粗鋼	計	鑄鉄	粗鋼	計
資源	(r) 鉄鉱石	10 ² t	1,597.98	117,756.96	119,354.94	5,736.49	113,539.17	119,275.65
	(r) 石灰石	10 ² t	260.12	22,275.18	22,535.31	856.67	21,477.34	22,334.01
	(r) 石炭	10 ² t	1,407.95	56,757.12	58,165.07	3,263.43	54,724.21	57,980.64
	(scr) 鋼スクラップ	10 ² t	2,690.22	5,845.00	8,535.22	235.29	8,299.93	8,535.22
	(scr) 鑄鉄スクラップ	10 ² t	741.84	0.00	741.84	732.03	0.00	732.03
	エネルギー	10 ² PJ	108.40	1,818.60	1,927.00	161.04	1,753.47	1,914.51
排出物	二酸化炭素(CO ₂)	10 ² t	7,301.81	150,874.35	158,176.17	11,553.23	145,808.55	157,367.83

(改善効果)

ライフサイクルインベントリ	単位	改善-現状	
		鑄鉄	粗鋼
(r) 鉄鉱石	10 ² t	4,138.51	▲ 4,217.73
(r) 石灰石	10 ² t	596.55	▲ 797.85
(r) 石炭	10 ² t	1,828.48	▲ 2,032.91
(scr) 鋼スクラップ	10 ² t	▲ 2,454.93	2,454.93
(scr) 鑄鉄スクラップ	10 ² t	▲ 9.81	0.00
エネルギー	10 ² PJ	57.65	▲ 65.14
二酸化炭素(CO ₂)	10 ² t	4,257.47	▲ 5,065.80

下記に示す表3が実際のシステム全体についてそれぞれの生産量を積算して求めた全体のライフサイクルインベントリである。これが我々が最終的に求めようとしている解答である。すなわち鋼屑を転炉に回し、銑鉄を銑鉄製造の主原料にすると銑鉄製造プロセスだけ見た場合、原単位では鉄鉱石・石灰・石灰石のインプットは増大し、二酸化炭素排出も増える。これに対し鋼製造プロセスでは銑鉄製造に比べて原単位は小さいけれども鉄鉱石等のインプット及び二酸化炭素排出量が減少する。従って粗鋼の生産量が銑鉄の生産量に比べて圧倒的に大きいのでトータルでは資源のインプットは減少し、二酸化炭素排出量も低減される。即ちシステム全体として資源の鉄鉱石は銑鉄製造プロセスでは四、一三八、五一 トン増加するが、粗鋼製造プロセスでは四、二二七、七九 トン減少し差し引き七九、二八 トン減少する。同様に石灰は二、四、四三 トン減少し、石灰石は二、一、三九 トン減少する。

二酸化炭素は銑鉄製造プロセスでは四、二五七、四七 トン(五八・六%)増加するが、粗鋼製造プロセスでは五、六五、八 トン(三・四%)減少し、差し引き八、三、四 トン(一・五%)削減される。

III 6系全体のマテリアルフロー

各プロセスの銑鉄と粗鋼一トン当りのマテリアルフローおよびシステム全体のフローを表4、表5に示す。但し銑物銑製造や銑鉄製造に消費される合金材は、今回は使用量が少ないこと、また比較するプロセス間の差も小さいことから除外した。

また製鋼製造工程での副資材についてもインベントリ計算に直接かわらないので除外した

表4 表5

IV 1ものづくりは自然科学の論理に基づいて

先に述べたように、銑鉄業界が鋼屑を主原料としている現在の製造プロセスが地球規模的な資源の生産性や環境負荷という視点では何等社会的にも正当性を持たないことが判明した。リサイクルに貢献しているとか、銑鉄を主原料にすると二酸化炭素排出量が増加するとかの論理はまさに誤謬、客観性に欠ける非科学的な論理といわざるを得ない。

LCA調査で莫大なデータ処理を行いつつ痛感したのは前提条件の一つである「システム境界を明確にする」ということは、まさに自然科学での諸々の現象や諸活動を「系」という概念でその系を明確にすることと同意で、その概念が理解できればLCAはそれほど難しいものではない。

それは、宇宙空間全ての現象は「開放系」「閉鎖系」「孤立系」「孤立した系」に分類され、地球上での自然の営みや生物の生息、あるいは我々の生産活動はもとより通常の社会活動等は全て物質およびエネルギーの交換(入・出力)が自由にできる「系」、すなわち「開いた系」である。しかしその諸々の営みが行われている地球自身は太陽によるエネルギーの交換はあっても物質の交換は行われぬ「閉じた系」である。「孤立した系」は外部とは一切物質およびエネルギーの交換が行われない一種の鎖国状態をいう。身近では過疎化した村落やかつてのニュータウンが高齢化とともに人の出入りがなくなり孤立化しゴーストタウン化していくようなものである。

都市は人間・情報・物質・エネルギーのたえず流入と消費および人・情報・物などの流出によって維持されている(開いた系の典型)。周りから孤立させられた都市はいずれ崩壊へと向かわざるを得ない。

現在の鑄鉄製造プロセスはこのような視点でみるといずれ行き詰まり孤立の方向に向かいつつあるように思えてならない。それは外界（自然界や上工程の製鉄業界）からの物質や情報等の流入が少なく同じ系内の鋼屑や戻り銑の循環に頼っているからである。鋼屑や戻り銑のリサイクルは新たな品質を生み出すものではなく、基本的属性としてカスケード的に劣化していく宿命にあるからである。

IV 2 鋼屑リサイクルは系内循環

鋼屑は我国ではほぼ一 リサイクルされている。鑄鉄業界もその一端を担っており、地球が閉じた系である限りいずれ枯渇の運命にある物質（鉄）の延命に貢献していることは明白な事実である。

しかし現実には我々人類が延々と築いてきた文明を維持するためには「鋼」はこの鋼屑のリサイクルだけでは賄いきれず、我国ではその二倍に相当する七、万吨もの鉄を自然界から賄っている。それにひきかえ、鑄鉄はその主原料を鋼屑のリサイクルで賄っているので自然界への負荷は小さいと考えている。銑鉄を主原料にすれば自然界すなわち系外より新たな物質（鉄鉱石・石灰石等）を取り入れるので二酸化炭素排出等環境負荷が大きくなるという論理である。

しかしよく考えてみると、鋼屑は鋼の製造業界の系内での循環物質である。鋼の業界と鑄鉄の業界が別の系とするならば鑄鉄業界は鋼の系から物質（鋼屑）を拝借していることになる。結果、鋼の系はその分、自然界から取り入れなければならないゼロサムゲームである。鑄鉄も鋼も鉄という物質の同じ系内の生産活動なのである。

よって鋼屑のリサイクルは同じ系内のやり取りに過ぎず鑄鉄と鋼のいずれにリサイクルするのが鉄以外の物質（炭素材・合金材等）やエネルギーが少なくて済むのかの問題として真摯に考える時世である。

IV 3 競争力強化のためのコスト低減は製造プロセスへの

コスト負荷を如何に小さくするかにある

製造コストは環境負荷という概念から見ると製造工程の一つの系と考えることができ、コスト負荷という概念に置き換えられる。

競争力を高めようと日夜コストダウンに尽力し、その手段の一つとして安い材料ということで鋼屑を選択しているのも必要条件の一つには違いない。しかし工場経営の立場からはトータルコストが安くなる必要にして、かつ十分条件すなわち究極の目的なので LCA の理念である「ゆりかごから墓場まで」が大いに参考になる。鑄鉄製造に於いては材料以外のコストが 80% を占めている現実から目をそらすわけにはいかない。主原料を除くエネルギー・人件費・合金鉄等の副原料等がそれである。そして出力は生産活動の目的である製品と排出物で二酸化炭素はその代表的なものである。戻り銑と称せられる湯道や押湯・不良品も立派（？）な排出物である。生産活動でのコスト負荷を低減するということはいかにこの外部入力を最小にし目的の出力を大きくし（生産性）、排出物を最小にするかにある。

一般的に環境と経済は相矛盾する要素のように思われているが、このように考えると同じ座標軸・ベクトルで対処出来る。すなわち環境負荷の小さいものづくりのシステムはコスト負荷も小さく、コスト低減に繋がるのである。

従ってここでは環境負荷低減の視点からコスト低減の手段として二酸化炭素排出量と戻り銑と称せられる排出物について考えてみる。

戻り鉄の排出量は製品歩留りの逆数である。従って戻り鉄の排出量を削減するということは目的の出力(製品生産)を大きくすることで、製品歩留りを向上させることに他ならない。

鉄鋼業界の歩留りは過去三十年間に連続鑄造設備の技術開発と導入により約1%向上し、省資源・コストダウンに貢献した(ふえらむ Vol.17(2001)No.3)。それに比べて鑄鉄製造はこの同じ三十年間に歩留りが1%低下している。両業界のコスト競争力はこの三十年間になんと上下一1%も開いたことになる。この原因は一体何なのか我々は謙虚に反省しなければならないのではないか。

主原料が鉄鉄から鋼屑に置換されるに従って製品歩留りが低下していつているのは単なる偶然なのか…。勿論ダクタイル鑄鉄の増加とかの鑄鉄の材質の変化等も原因の一つには違いないが、鋼材は連鑄設備だけでなく炉外精錬技術の開発が寄与、連鑄とのマッチングによる製鋼時間の短縮と高張力化等材質の向上や徹底した品質のコントロールというハードルを越えての生産性と歩留り向上を達成している。あらためて鋼屑の使用が鑄鉄製造の歩留り低下の主原因と思えてならない。歩留りのコストに及ぼす影響の大きさについては周知のとおりである。もし、鑄鉄製造の歩留りが現状より1%向上したならばコストや環境負荷にどれほどの影響(低下)を及ぼすのかを検証するためLCA調査結果による「鑄鉄および粗鋼各1トン当りのライフサイクルインベントリ」及び「システム全体のライフサイクルインベントリ」を参考のために表6、7、8に示す。

IV 4 鑄鉄業界の二酸化炭素削減対策と将来への課題

今年中に京都議定書の発効が見込まれる。各企業・各業界が夫々に二酸化炭素削減目標を掲げその対策への取り組みが本格化しつつある。

我々の鑄鉄業界はどのように対処しようとしているのか明確な方針が提示されていないように思う。しかし鑄鉄業界にはこのように材料転換を行えば年間一、二六三トンの二酸化炭素削減の可能性があると判った。又前述した如く、コストへの負荷も大幅に削減され配合や成分調整等の工程削除の可能性もあり無人化も視野に入ってくる。更に溶解と造型ラインのマッチングを考えロットの適正化を図れば溶解時間の短縮や出湯待ち時間の削除(Point to Point ジャンボジェット旅客機の搭乗手続きや荷物受取時間と飛行時間とのアンバランス解消の考え方。ゴルフ場の四人乗りカーとも同じ)が即座に実現できる。結果として電力基本料金の低減や電力原単位の向上にも繋がる。そこで我々はこのような可能性を実現するため、そのシステムをCMM(Castalloy melting system)と名付け、次世代鑄鉄製造プロセスとしてその実現に邁進していこうと考えている。そのイメージ図を図3に示す。

同じ系内同士、高炉メーカーに品質保証された材料の開発と製造を要請してはどうか。鑄鉄業界にトラウマの如く蔓延している「高炉メーカーに首根っこをつかまれる」なんて発想は既に過去のものだ。お互い力を合わせ、世界の最先端を行く高炉メーカーの技術と設備を活用し智慧を出し合いグローバルな戦いに挑戦していきたい。

鑄鉄工場の材料蔵入・溶解・注湯のシステム化【図3】

溶解ロットのポイント・トウ・ポイント・システム化【図4】

V おわりに(「逆転の発想」)

現在、鑄鉄業界では主原料に鋼屑を使用することは資源のリサイクルに貢献、二酸化炭素発生量も少ないと考えている。その根拠は表9の二酸化炭素排出量原単位によるもので、「鋼の生産にも鉄鑄物の生産にも鋼スクラップの使用は二酸化炭素発生量の大幅な低減をもたらすことは明らかである」と。従って鉄鑄物の主原料に鋼屑を使えば二酸化炭素の発生量は減るとの論理である。しかし、鉄の業態系全体では二酸化炭素の発生量は増加する。なぜならば「鉄と鋼屑の選択は同じ系内でのゼロサムゲーム」だからである。

鉄と鋼屑の使用はゼロサムゲームであることを明確にするため物質のフローを図5に示す。

図のAは現在、主原料として鑄鉄製造に使用している鋼屑の量である。粗鋼の生産量Xが一定ならば高炉から転炉へ供給される溶鉄は鋼屑と同量のAだけ不要となる。従ってその不要となった溶鉄の製造に必要な鉄鉱石や石炭なども減る。一方、鑄鉄製造工程では主原料としていた鋼屑の量Aに相当する材料を高炉からの溶鉄で賄わなければならない。当然、その溶鉄Aの製造に必要な鉄鉱石や石炭の使用が増加する。しかし、結局は鑄鉄製造工程で増加した鉄鉱石や石炭の量は粗鋼製造工程で減少するのでトータルでは増加も減少もしない。

このように鉄と鋼屑のリサイクルは結局は同一系内のゼロサムゲームであることが解る。結局、我々が考えなければならぬのは鋼屑は鉄全体のシステムの中のどの工程にリサイクルするのが最も環境負荷を小さく出来るかということである。鑄鉄にリサイクルしていた鋼屑を転炉あるいは電気炉の粗鋼製造にリサイクルし、鑄鉄製造は鉄を主原料にしたとき、二酸化炭素発生量がどうなるのかを表9のデータをもとに計算したのが表10である。参考のためにLCA調査結果の二酸化炭素排出量の原単位とシステム全体の排出量を表11、表12に示す。

表 11 二酸化炭素排出量原単位比較 (CO₂t/製品t)

	鑄鉄	粗鋼
鋼屑	(現状) 1.585	(改善) 2.084
鉄	(改善) 2.526	(現状) 2.167

表 12 システム全体の CO₂ 排出量比較

鑄鉄主原料	鑄鉄	粗鋼	合計
鋼屑 (現状)	(鋼屑主原料) 7,301,810	150,874,350	158,176,170
鉄 (改善)	11,559,280	(転炉に鋼屑を配合) 145,800,850	157,367,830
差引き	-4,257,470	△5,065,800	△908,340

表 10 システム全体の二酸化炭素排出量比較

鑄鉄主原料	鑄鉄	粗鋼	合計
鋼屑 (現状)	2,790.872	(溶鉄主原料) 132,284.70 (189,284.70)	135,055.572 (192,055.572)
鉄 (改善)	15,088.180	(溶鉄+鋼屑) 114,881.45 (164,361.45)	129,959.610 (179,459.610)
差引き	12,307.288	△17,403.25 (△24,903.25)	△5,095.982 (△12,595.982)

但し 鑄鉄生産量 4575.2千トン
粗鋼生産量 高炉-転炉 89,813.00千トン
電炉-鋼 30,000.00千トン
合計 89,813.00千トン

注) 粗鋼・合計欄上段は高炉-転炉鋼の場合
下段()内は高炉-転炉及び電炉鋼合計の場合

表 9 二酸化炭素排出量原単位比較

主原料	鑄鉄	粗鋼
鉄	0.81+1.9/0.7=3.3t	1.9 (高炉-転炉)
鋼屑	0.81	1.65 (高炉-転炉) 電炉

〔キュボラを考える会NO.33 早稲田大学理工学部教授中江秀雄著「地球の材料資源・環境問題と鑄造業」より〕

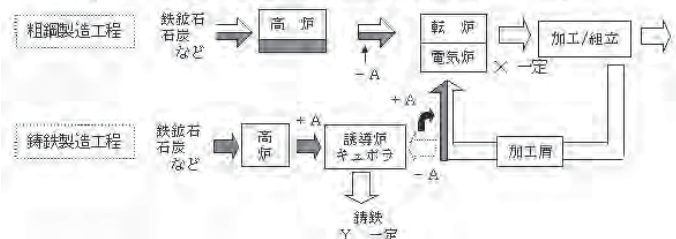


図 5 系内循環のゼロサムゲームのイメージ図

以上、述べてきたことのまとめとして鑄鉄製造の主原料を鋼屑から銑鉄(キャスタロイ)へ転回させることの利点(逆転の発想)を列挙すると次のようになる。

逆転の着目点

分野	材料開発	生産システム
逆 転 の 着 眼 点	素人 → プロ (加工費高) (材料費高)	少種多量 → 多種少量
	小ロット → 大ロット (加工費なら安くなる)	バッチ → 連続 (加工費は高くつく)
	汎用 → 専用	集中 → 分散 (加工費高) (加工費低)
	安い → 高い (鋼屑) (銑鉄)	固定 → 変動 (基本料金)
	高い → 安い (銑鉄) (鋼屑)	回収 → 発生低減
	付加価値大 → 付加コスト小 (歩留り) (歩留り)	個別原単位 → 一々原単位 (歩留り)

逆転の利点

- 1 材料配合による計量や装入回数削減と装入時間の短縮
- 2 溶解時間の短縮
- 3 成分調整の作業及び時間の削減
- 4 装入から溶解・注湯までのリードタイムの短縮
- 5 適正ロットの設定による基本料金の低減と多品種少量生産への対応
- 6 ダイレクトドライブ方式によるポイント・トゥ・ポイント生産の実現による溶解待ち時間の低減

- 7 エネルギー原単位の低減
- 8 不良率の低減及び方案改善による歩留り向上
- 9 溶解量の低減
- 10 操業時間の短縮
- 11 トータルエネルギー消費量の低減
- 12 品質の安定による信頼性の向上
- 13 機械加工や熱処理等、後工程のコストダウン
- 14 環境負荷の低減（二酸化炭素、廃棄物）
- 15 コスト負荷即ちトータルコストの低減
- 16 自動化・無人化
- 17 以上の相乗効果による生産性向上（競争力強化）