

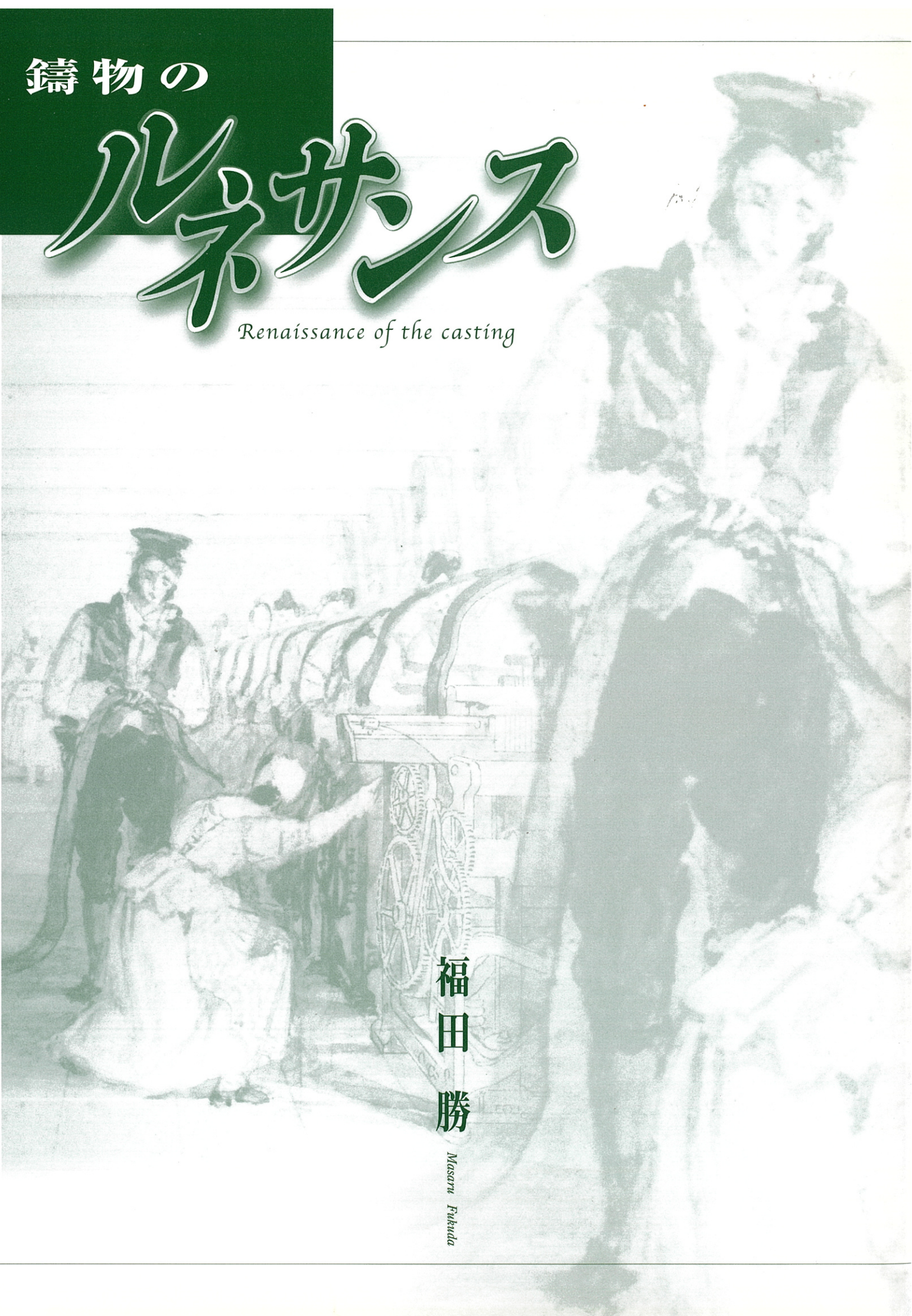
鑄物の

ルネサンス

Renaissance of the casting

福田勝

Masaru Fuhuda



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	03
II-2.調査対象としたプロセスとシステム境界	04
II-3.前提条件	04
II-4.主要使用データ	04

III. LCA計算結果

III-1.各プロセスの原単位	05
III-2.鑄鉄および粗鋼のインベントリ	05
III-3.鑄鉄および粗鋼のライフサイクルインベントリ	05
III-4.木を見て森を見ずの愚を犯してはならない	06
III-5.システム全体のライフサイクルインベントリ	06
III-6.系全体のマテリアルフロー	07

IV. 考察

IV-1.ものづくりは自然科学の論理に基づいて	10
IV-2.鋼屑リサイクルは系内循環	10
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	10
IV-4.鑄鉄業界の二酸化炭素削減対策と将来への課題	11

V. おわりに (逆転の発想)

CONTENTS

I はじめに

(鑄鉄製造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。勿論鋼もパ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350kg程度だったので大型構造物は鑄鉄で賄われていた。セバー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、一八六四年のシームス・マルティンの平炉、一八七八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造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することになった。爾来、鋼と鑄鉄は違う道を歩むことになった。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ようになった。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システムを目指した。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。素形材業界の中でも鑄鉄業界だけが今もなお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。そうすれば鑄鉄も鉄の生産システムの一部と考えられ、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。又技術開発についても「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。



(コールブルックデールの夜景:大英科学博物館展カタログ)



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ンベントリを算出すること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算する手法の一つである。

いかにあると、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算する手法である。

そこで我々は、現状の鋳物業界が三〇〇万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、環境管理の物さとしてLCA(ライフサイクルアセスメント)をISO14040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。

鋼屑はもともと鋼の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。したがって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。鋳鉄製造の生産技術の革新が進まない原因はいつにこの鋼屑の属性を無視した生産システムにあるといわざるを得ない。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(一九九七年)を見ると、全国一、二六八社中従業員100人未満の企業が一、二一四社あり、全体の九十五・四%を占めている。それぞれの企業が一チャージ毎に鋼屑・鉄屑・戻り鉄・加炭材・珪素等、最低5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鉄の充填密度が小さいため通常一チャージ当たり5〜20回も行わなければならない。平均して一チャージ10回の装入で一日五チャージとして一工場50

回装入することになる。このような繰り返し作業は100人未満の企業だけでも一ヶ月間に何と一、三九二、五〇〇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・過装入等が起こればはずががない。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1.5回としても一日に一工場7.5回、全国で一ヶ月に実に二〇八、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。意外と見落とされているのがCEメーターへの過信である。炭素及び珪素の過少過多添加という誤調整や再調整によるコストもバカにならない。

(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。

これらはまさに実験室か研究室の延長で、経済活動としての生産システム

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ISO14040に準拠して調査した。その結果を報告する。

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(溶鉄)もリサイクル

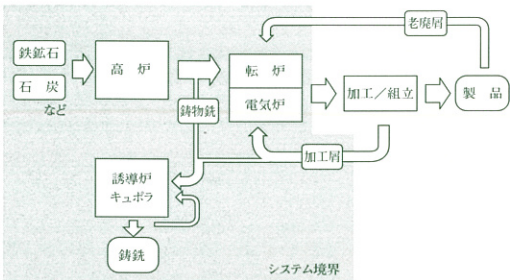


図1 現状プロセスのシステム境界

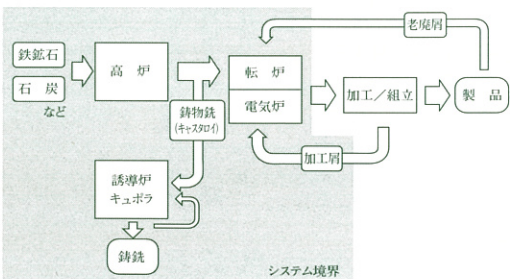


図2 改善プロセスのシステム境界

高炉からの鉄源(溶鉄)もリサイクルを対象とした。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。

されている鋼屑も粗鋼製造や鋳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。すなわち鋳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、鋳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・鋳物鉄)製造まで、および鋳物鉄・加工屑等を原料とした鋳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・石灰(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。

鋳鉄製造は電気炉(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。

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。

- (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) 鋳鉄用原料となっ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鋳鉄工場への輸送時の環境負荷は考慮しない。
- (5) 鋳鉄用原料の違いによる鋳物の品質の差、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) 鋳鉄製造では成分調整用の添加剤(加炭材・合金材・球状化材)のみを考慮する。

II-4 主要使用データ

慮し、鋳物砂・鋳型副資材などは同一条件であるとしてインベントリ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鋳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鋳物砂や中子製造などの影響は考慮していない。

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
生石灰	一・七八六
ドロマイト	一・〇八七
焼成ドロマイト	二・〇八三

※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鋳EP鉄(Eutectic Pigiron)の通称名(ニックネーム)。共晶組成なので融点が低い。

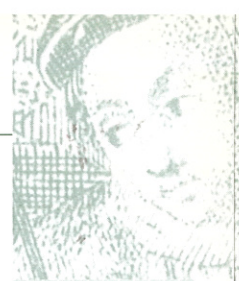


表2 鑄鉄、粗鋼各1トン当たりのライフサイクルインベントリ

ライフサイクルインベントリ	単位	鑄鉄製造			粗鋼製造(転炉)		
		現状	改善	改善一現状	現状	改善	改善一現状
(r) 鉄鉱石	kg	349.27	1,253.82	904.55	1,691.59	1,631.01	△60.58
(r) 石灰石	kg	56.85	187.24	130.39	319.99	308.52	△11.47
(r) 石炭	kg	307.74	707.39	399.65	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) 鑄物スクラップ	kg	162.14	160.00	△2.14	0.00	0.00	0.00
エネルギー*	MJ	23,692.28	36,292.28	12,600.00	26,124.50	25,188.78	△935.72
鑄鉄製造までの二酸化炭素	kg	1,297.75	2,251.78	954.03	1,942.56	1,872.98	△69.58
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	2,167.33	2,094.56	△72.77

*エネルギーには溶解以外に鑄鉄製造に関わるエネルギー全消費量を含む

鑄鉄製造に関する鉄鑄物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)を用いた。

鑄物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鑄物用鉄の製造は限られており鑄物用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自著「鑄物の花見酒」(日本鑄物工業新聞社二〇〇二年刊)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鉄・鋼鑄鉄の中で最も基本的元素である鉄(Fe)と炭素(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。

LCA 計算結果

III-1 各プロセスの原単位

高炉製鉄・転炉製鋼・鑄物鉄製造鑄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「鑄物の花見酒」を参照されたい。

III-2 鑄鉄および粗鋼のインベントリ

鑄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 鑄鉄および粗鋼のライフサイクルインベントリ

鑄鉄及び粗鋼のインベントリはそれぞれを除外して溶鉄に配分した形になっている。

日本鉄鋼連盟では鉄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鉄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鉄鉄を主原料とした鑄鉄製造プロセスについ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、業界や学芸では「鑄鉄製造に鉄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、表2に示すように二酸化炭素排出量は鑄鉄一トン当り一・五九五トンが改善後は二・五二六トンとなり、〇・九三トン増加している。

今我々がよく考えなければならぬのは鑄鉄も粗鋼も製造のプロセスは

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鉄および鑄物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

表1 鑄鉄および粗鋼各1トン当たりのインベントリ

単位	鑄鉄		転炉	
	現状	改善**	現状	改善
鉄鉱石	kg			
スクラップ(加工鋼屑)	kg	585.41	48.85	83.96
スクラップ(老廃鋼屑)	kg	0.00	0.00	
スクラップ(鉄鉄)/鉄屑	kg	160.00	160.00	
スクラップ(鑄物)/返り屑 CS-2B	kg	569.00	566.86	
石灰	kg	0.00	0.00	
鉄鉄(溶鉄)	kg	0.00	0.00	1,036.52
鑄物(F)鉄	kg	210.00	0.00	
鑄物(EP)鉄(FCH)	kg	0.00	525.52	
鑄物(EP)鉄(FCD)	kg	0.00	252.76	
主原料合計	kg	1,524.41	1,553.99	1,120.48
加炭材(電気炉)	kg	14.30	0.53	
コークス(加炭分)	kg	9.24	0.77	
土壌黒鉛	kg			0.00
フェロシリコン	kg	13.93	3.03	
フェロマンガ	kg	0.44	0.04	
シリコマンガ	kg	0.00	0.00	
球状化剤	kg	6.96	6.96	
カバー材	kg	2.59	2.58	
副原料(合金等)小計	kg	(47.46)	(13.92)	
原料合計	kg	1,571.87	1,567.91	1,120.48
石灰石	kg	14.88	12.79	109.05
酸素	kg	0.00	0.00	105.15
予備処理剤	kg	0.00	0.00	
鑄型	kg	0.00	0.00	
耐火物	kg	0.00	0.00	
電力(電気炉溶解)	kWh	1,347.48	1,189.81	
燃料(コークス)	kg	89.94	84.48	
エネルギー計*	Mcal	4,162.40	3,768.33	
鉄鉄(溶鉄)	kg			
鑄物(F)鉄	kg			
鑄物(EP)鉄(FC)	kg			
鑄物(EP)鉄(FCD)	kg			
鋼製品(粗鋼)	kg			1,000.00
鑄鉄	kg	1,000.00	1,000.00	
スクラップ(鑄鉄)CS-2A	kg	566.86	566.86	

*エネルギー計には溶解以外に鑄鉄製造に関わるエネルギー全消費量を含む

**現状と改善はP4および図1、図2に示したように現状は鑄鉄生産の鉄屑を、改善はキャストロイを主原料としたシステムを意味する(以下の表や文章中の語も同様)

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ライフ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ぬ。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・二六七トンが二・〇九四トンと減少しているがその差は〇・〇七二トンである。

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。

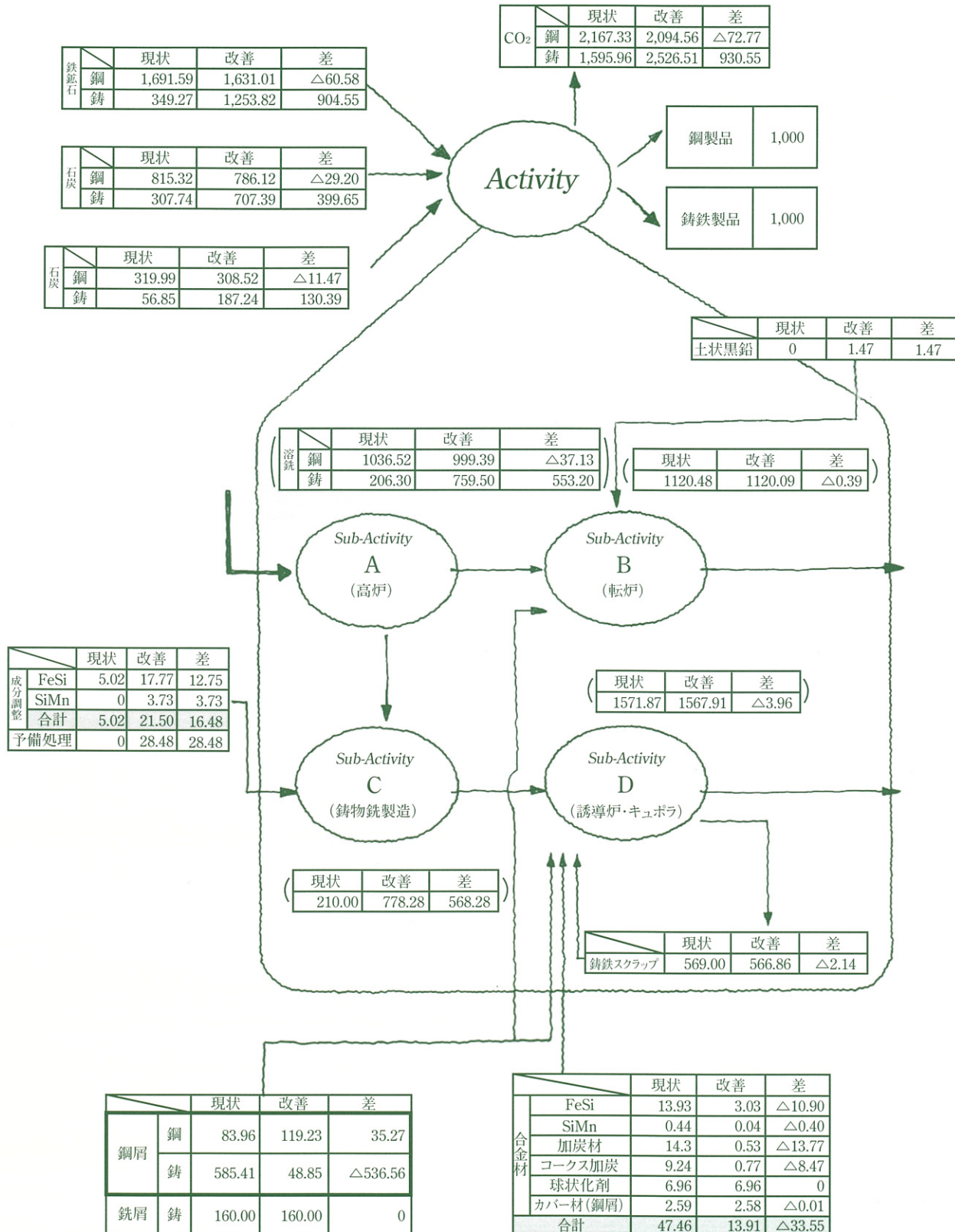
III-5 システム全体のライフサイクルインベントリ

「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。それは、目玉商品となった商品は一ヶ売ると九三〇・五五円の赤字で四五八個売ると四二六、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の利益が一ヶ当たり七二七円七角かなければ六、九六二個売ればトータル利益は五〇六、六二五円となる。その結果全体では差し引き八〇、三六〇円の儲けになる。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



表4 粗鋼・鋳鉄各1,000kg当りのマテリアルフロー

(単位:kg)



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)は鋳鉄の主原料に鋳鉄を使用したときの二酸化炭素の増加量(原単位)を、販売数量は鋳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。

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、鋳鉄を鋳鉄製造の主原料にすると鋳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鋳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鋳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鋳鉄製造

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(歩留り63.78%)			
		鋳鉄	粗鋼	計	鋳鉄	粗鋼	計	
(r)鉄鉱石	10 ³ t	1,597.98	117,756.96	119,354.94	5,736.49	113,539.17	119,275.65	
(r)石灰石	10 ³ t	260.12	22,275.18	22,535.31	856.67	21,477.34	22,334.01	
(r)石灰	10 ³ t	1,407.95	56,757.12	58,165.07	3,236.43	54,724.21	57,960.64	
(scr)鋼スクラップ	10 ³ t	2,690.22	5,845.00	8,535.22	235.29	8,299.93	8,535.22	
(scr)鋳鉄スクラップ	10 ³ t	741.84	0.00	741.84	732.03	0.00	732.03	
エネルギー	10 ³ TJ	108.40	1,818.60	1,927.00	166.04	1,753.47	1,919.51	
排出物	二酸化炭素(CO ₂)	10 ³ t	7,301.81	150,874.35	158,176.17	11,559.28	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			
		鋳鉄	粗鋼	計	
(r)鉄鉱石	10 ³ t	4,138.51	▲4,217.79	▲79.28	
(r)石灰石	10 ³ t	596.55	▲797.85	▲201.29	
(r)石灰	10 ³ t	1,828.48	▲2,032.91	▲204.44	
(scr)鋼スクラップ	10 ³ t	▲2,454.93	2,454.93	0.00	
(scr)鋳鉄スクラップ	10 ³ t	▲9.81	0.00	▲9.81	
エネルギー	10 ³ TJ	57.65	▲65.14	▲7.49	
排出物	二酸化炭素(CO ₂)	10 ³ t	4,257.47	▲5,065.80	▲808.34

各プロセスの鋳鉄と粗鋼一トン当りのマテリアルフローを表4、表5に示す。但し鋳物鋳造や鋳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。

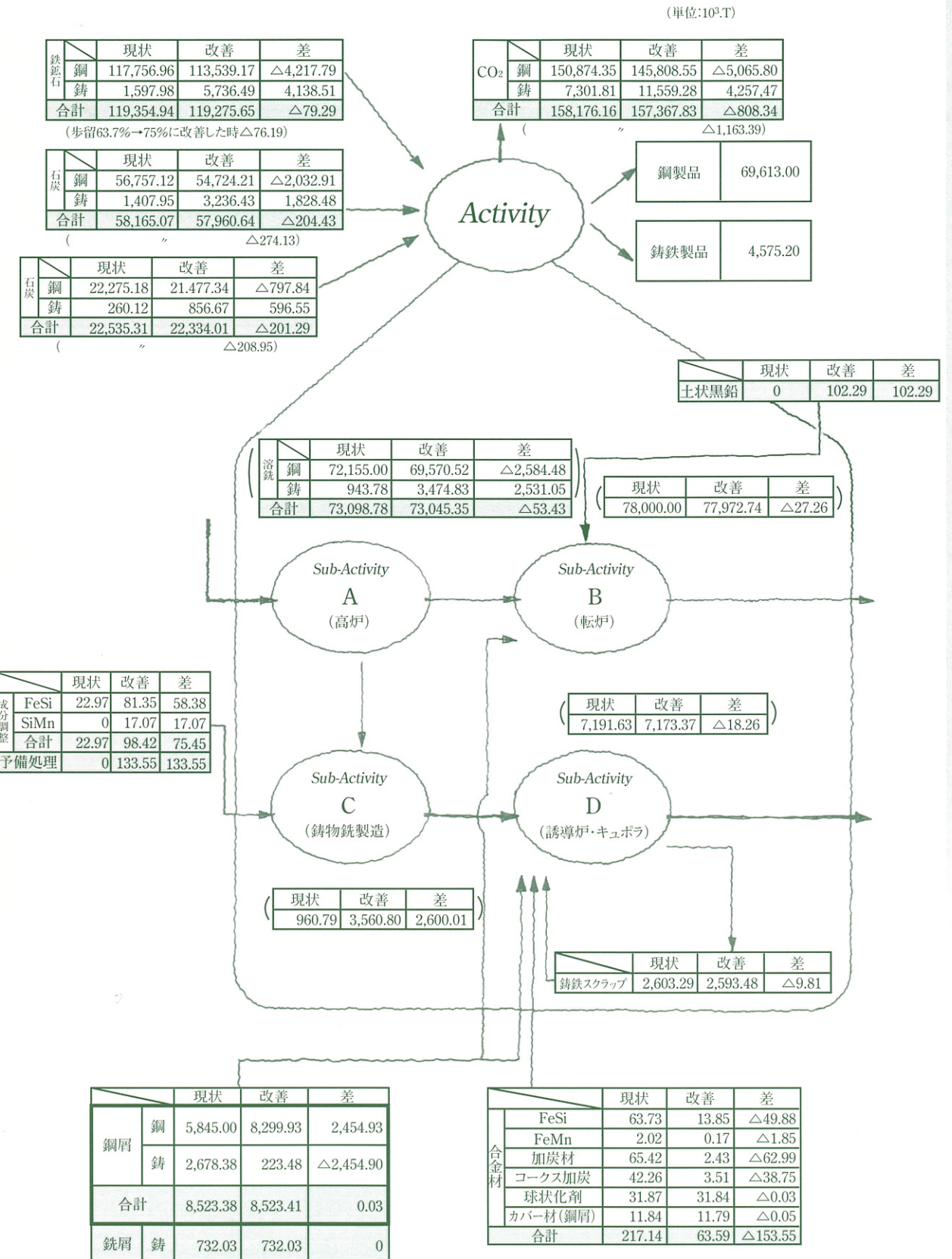
III-6 系全体のマテリアルフロー

プロセスでは四、一三八、五一〇トン増加するが、粗鋼製造プロセスでは四、二一七、七九〇トン減少し差し引き七九、二八〇トン減少する。

二酸化炭素は鋳鉄製造プロセスでは四、二五七、四七〇トン(58.6%)増加するが、粗鋼製造プロセスでは五、〇六五、八〇〇トン(3.4%)減少し、差し引き八〇八、三四〇トン(0.5%)削減される。



表5 システム全体のマテリアルフロー



考察

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、鋳鉄業界が銅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論理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、鉄を主原料にするとか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。

LC A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ということと同意で、その概念が理解できればLC A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」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)が自由に行われる「系」、すなわち「開いた系」だから可能なのである。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ない「閉じた系」である。「孤立した系」と外部と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が少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ざる流入と消費および人・情報・物などの流出によつて維持されている(開いた系の典型)。周知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。現在の鋳鉄製造プロセスはこのような視点でみるといざ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・自然界や上工程の鋳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鉄の循環に頼っているからである。

鋼屑や戻り鉄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100%リサイクルされている。鋳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、〇〇〇万トンもの鉄を自然界から賄っている。それにひきかえ、鋳鉄はその主原料を鋼屑のリサイクルで賄っているのが自然界への負荷は小さいと考えている。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循環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。鋼の業界と鋳鉄の業界が別の系とするならば鋳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。鋳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。よつて鋼屑のリサイクルは同じ系内のやり取りに過ぎず鋳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なければならぬ時世である。

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LC A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。鋳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。主原料を除く工



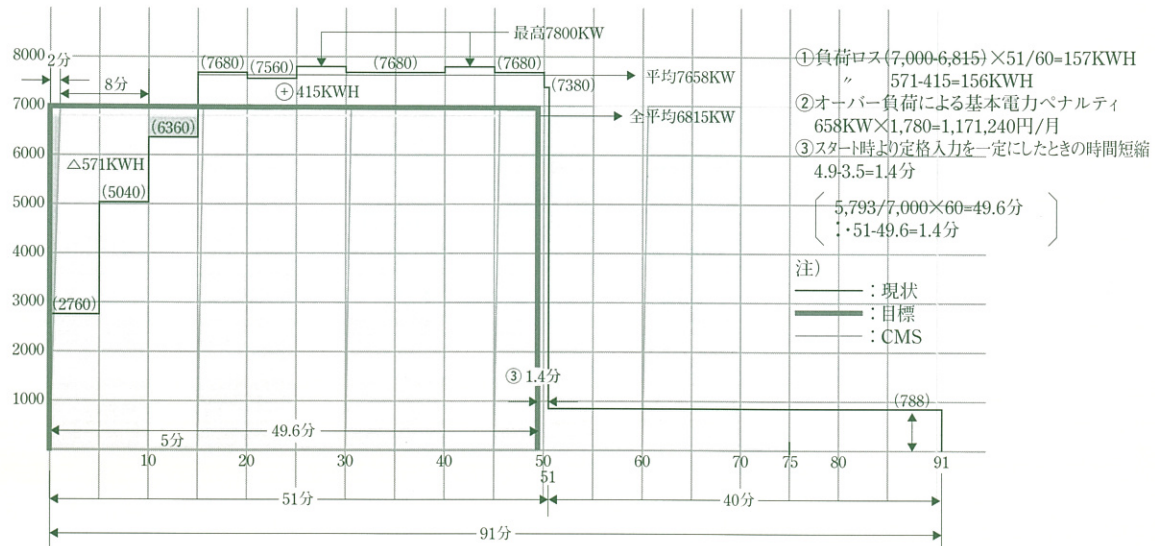
溶解ロットのポイント・トゥ・ポイントシステム化

(A社実作業データ)

時間	累計材料投入量	回数	累計消費電力	T当り消費電力	投入電力	累計平均電力	備考
~5分	3,685 kg	5 +α	230 KWH	62.4 KWH/T	2,760 (4000) KW	2,760 KW	
10	4,135	1	650	157.2	5,040 (5000)	3,900	
15	5,825	4	1,180	202.6	6,360 (7000)	4,720	
20	7,070	2	1,820	257.4	7,680 (〃)	5,460	36分間 7,000KW 31分間平均 7,658KW以上
25	9,135	3	2,450	268.2	7,560 (〃)	5,880	
30	9,960	2	3,100	311.2	7,800 (〃)	6,200	
35	10,505	1	3,740	356.0	7,680 (〃)	6,411	
40	10,535	0	4,380	415.8	7,680 (〃)	6,570	
45	10,565	0	5,030	476.1	7,800 (〃)	6,707	
50	10,525	0	5,670	538.7	7,680 (〃)	6,804	
51	10,500	0	5,793	551.7	7,380 (〃)	6,815	
合計	10,500 kg	18 +α 回	5,793 KWH	551.7 KWH/T	6,815 KW	6,815 KW	

	現状(A社実作業例)	CMS(想定)
炉容量	10T	2T
定格電力	7,000kw	7,000kw
周波数	200Hz	?
電力密度	0.7kw/kg	3.5kw/kg

(電力積算図)



④ 現状溶解パターンとCMSの比較

	現状	CMS	
		10.5t	2.1t
1チャージ 溶解量	10.5t	2.1t	10.5t (5チャージ)
消費電力	5,793KWH	1,050KWH	5,250KWH
トン当り 消費電力	551.7KWH/t	500KWH/t	500KWH/t
1チャージ 溶解時間	51分/1ch	10分/1ch	50分/5ch
成分調整・保持・出湯時間	40分/1ch	5分/1ch	25分/5ch
消費電力	525KWH	0	0
トン当り	50KWH/t	0	0
合計トン当り消費電力	601.7KWH/t	500KWH/t	500KWH/t
1チャージのサイクル時間	91分/1サイクル	15分/1ch	75分/5ch
基本電力料金	7,000KW → 7,658KW (10%ペナルティ)	7,000KW → 7,000 × 20/30 = 4,667KW (33%カット)	

図4 現状システムとCMSの比較-II

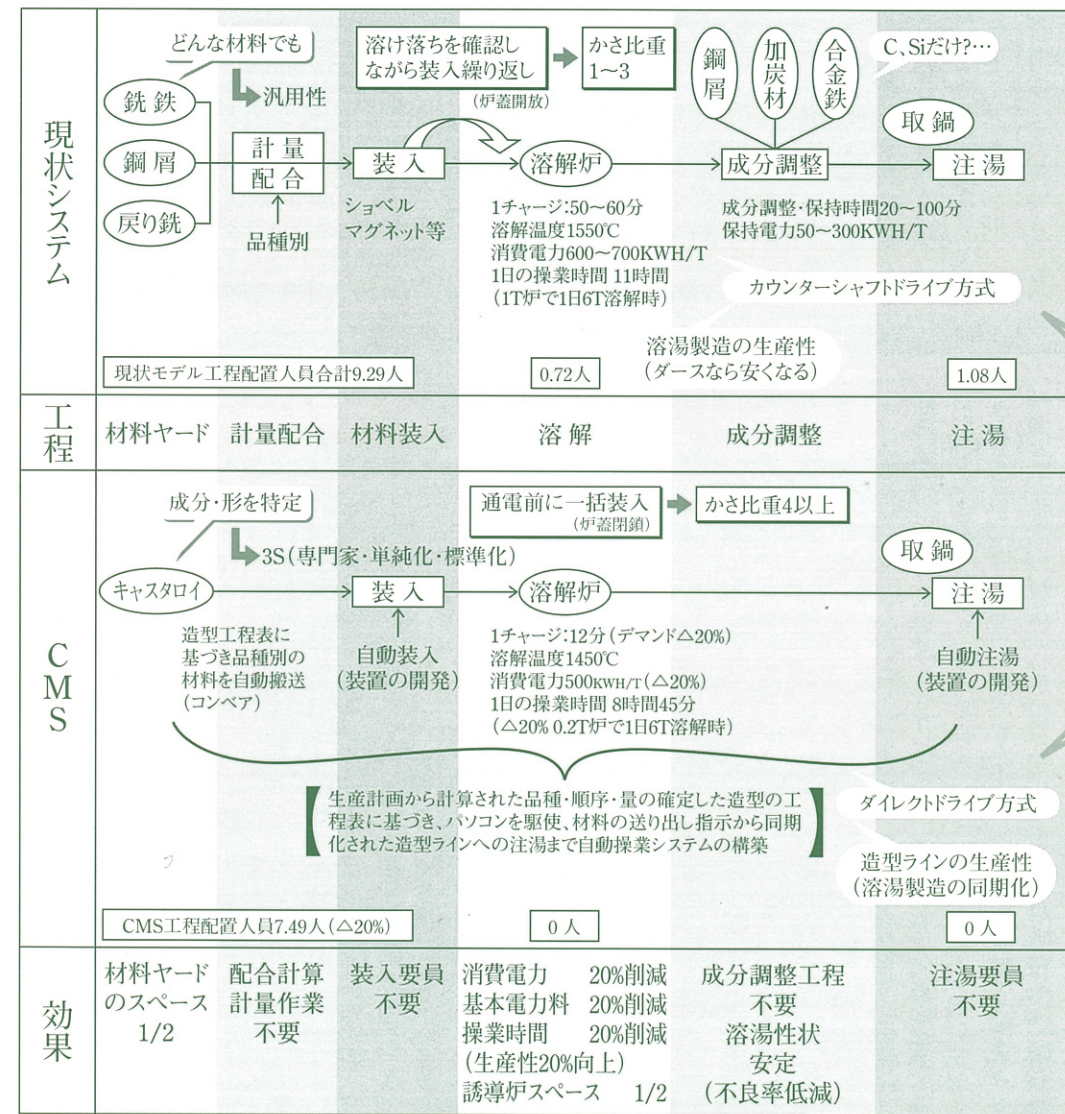
鋳鉄工場の材料装入・溶解・注湯のシステム化

目的： 鋳鉄の国際競争力構築のため

- コスト競争力【①人件費(標準時間の大幅短縮)②エネルギー費(電力原単位の低減)③土地・地代(土地の生産性)】
- 品質 〃 【①材質の安定性②方案歩留の抜本的向上③不良率の低減】
- 納期 〃 【①材質対応のフレキシビリティ性の向上(多品種少量生産対応)②生産リードタイムの短縮】

開発テーマ： 材料開発と材料装入・溶解・注湯工程の自動化システム

- 品種別(FC、FCD)鉄源材料の成分と形状の開発
- 高効率・高速溶解炉と溶解システムの開発
- 材料の自動装入装置と装入システム開発
- 自動注湯装置と注湯システムの開発
- 材料装入・溶解・注湯工程の無人化とコンピューター制御による自動操業システムの開発



総コスト50%低減

図3 現状システムとCMSの比較-I

バッチシステムの最適ロットの設定
(ポイント・トゥ・ポイント)



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10 システム全体の二酸化炭素排出量比較

CO ₂ トン(総生産量)			
鑄鉄主原料	鑄 鉄	粗 鋼	合 計
鋼 屑 (現 状)	2,790,872	(溶銑主原料) 132,264,700 (189,264,700)	135,055,572 (192,055,572)
銑 鉄 (改 善)	15,098,600	(溶銑+鉄屑) 114,861,450 (164,361,450)	129,959,610 (179,459,610)
差引き	12,307,288	△17,403,250 (△24,903,250)	△5,095,962 (△12,595,962)

但し 鑄鉄生産量 4,575.2千トン
粗鋼生産量 高炉一転炉 69,613.00千トン
電 炉 鋼 30,000.00千トン
合 計 99,613.00千トン

注)粗鋼・合計欄上段は高炉一転炉鋼の場合
下段()内は高炉一転炉及び電炉鋼合計の場合

表12 システム全体のCO₂排出量比較

CO ₂ トン(総生産量)			
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
銑 鉄 (改 善)	11,559,280	(転炉に鋼屑を配合) 145,808,550	157,367,830
差引き	4,257,470	△5,065,800	△808,340

表11 二酸化炭素排出量原単位比較

CO ₂ トン/製品t		
	鑄 鉄	粗 鋼
鋼 屑	(現状) 1.595	(改善) 2.094
銑 鉄	(改善) 2.526	(現状) 2.167

表9 二酸化炭素排出量原単位比較

CO ₂ トン/製品t		
主原料	鑄 鉄	粗 鋼
鋼 屑	0.61	1.65 (高炉一転炉 電炉)
銑 鉄	0.61+1.9/0.7=3.3	1.9(高炉一転炉)

【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

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「銑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。銑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銑は鋼屑と同量のAだけ不要となる。従ってその不要となった溶銑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銑で賄わなければならない。当然、その溶銑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。

このように銑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。銑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、鑄鉄製造は銑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。

◎逆転の着眼点

分野	材料開発	生産システム
逆 転 の 着 眼 点	素人(加工メーカー) → プロ(材料メーカー)	少種多量 → 多種少量
	小ロット → 大ロット (ガスなら安くなる)	バッチ → 連続 (ガスは高くつく)
	凡用 → 専用	集中(カウンターシャフト) → 分散(ダイレクトドライブ)
	安い(鋼屑) → 高い(コスト)	固定 → 変動 (基本料金)
	高い(銑鉄) → 安い(コスト)	回収 → 発生低減
	付加価値大(米活用形) → 付加コスト小(米形)	個別原単位 → トータル原単位(歩留り)

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鑄鉄(キャロスタイ)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。

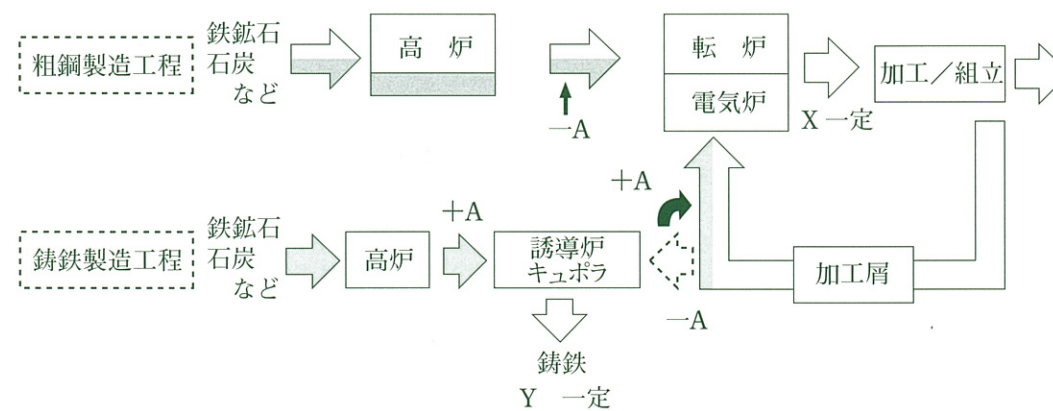
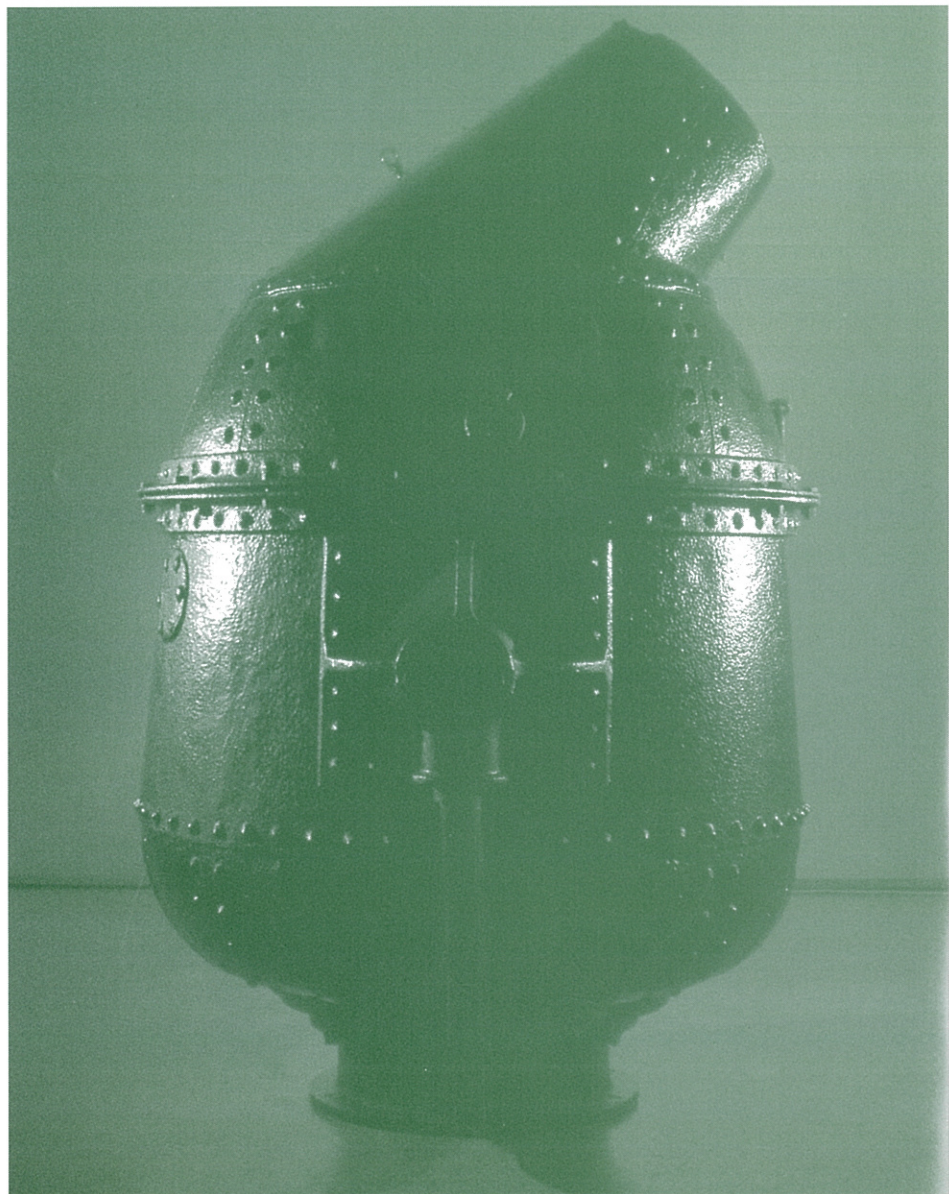


図5 系内循環のゼロサムゲームのイメージ図



(ベッセマーの転炉：大英科学博物館展カタログ)

表紙や本文中の挿入写真はいずれも大英科学博物館展カタログより抜粋させていただきました。



株式会社
福田博商店

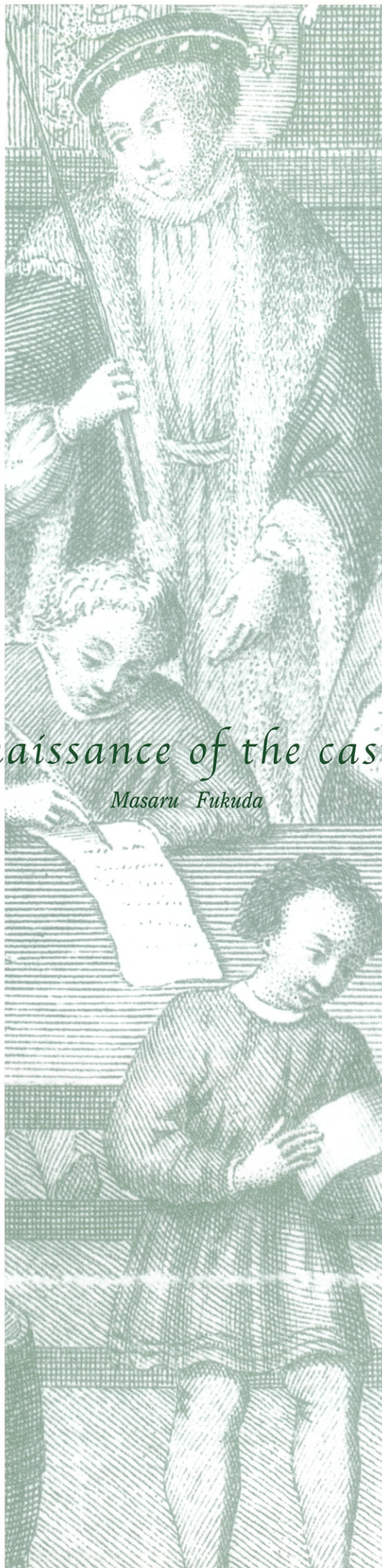
〒660-0095 尼崎市大浜町1-43
TEL.(06)6416-5331 (代表) FAX.(06)6419-7668
UEL [Http://www.castalloy.co.jp](http://www.castalloy.co.jp)
E-mail fukuda@castalloy.co.jp



- # 逆転の利点
1. 材料配合による計量や装入回数の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湯待時間の低減
 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(CO₂、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)



この本は「キュポラを考える」(会報No. 34(2003))に掲載された論文を一部修正したものをまとめたものです(著者)



Renaissance of the casting

Masaru Fukuda