

鉄鋼スラグ廃熱利用型セメントクリンカー製造法

秋山 友宏*・水落 登志雄*

摘 要

エネルギー多消費産業鉄鋼業の将来はより少ないエネルギーで鉄以外の多くの製品を生み出す環境効率の向上にかかっている。本研究ではエクセルギー理論に基づき、吸熱的化学反应で廃熱を回収する方法を提案し、異業種型共生製鉄所の可能性を模索した。その結果、鉄鋼スラグ廃熱で石灰石の熱分解しセメント原料とする利点をエネルギー消費及び炭酸ガス排出抑制の観点から明らかにした。

キーワード；エクセルギー理論、セメント製造、鉄鋼スラグ廃熱、共生型製鉄所

1. 緒言

鉄鋼業、窯業・土石、紙・パルプ、化学産業はエネルギー多消費 4 業種と呼称され、製造業の所要エネルギーの 7 割以上を占める。石油危機以来、個別の産業においてエネルギー有効利用策が積極的に行われて、現在ではいずれの産業ともに世界最高レベルのエネルギー効率で各プロセスの操業を行っている。回収可能な廃熱はもはや存在しないのだろうか。

これまで、廃熱回収と言えば水蒸気発生やレンガ加熱といった顕熱利用型が主流を占めていた。この考えは温度のレベルは考慮しない、いわば日来的量的評価法の発想である。エクセルギー（質）的発想法¹⁻⁴)は、エネルギーのレベルを考えて廃熱回収においてもその温度でなければ出来ない現象と組み合わせて回収することを志向する。従って、融点に熱を集中する潜熱利用型熱回収や反応熱利用型熱回収は温度レベルを考慮する点で、エクセルギー的に有望な方法であろう。反応熱利用型は従来、水素吸蔵合金やメタノールを利用しエネルギーの貯蔵・輸送・回収を考慮して分解・生成の可逆反応に限定していたが、不可逆反応まで広げてみるのはどうだろうか。セメント、化学、電力事業など各産業の主反応はいずれも吸熱的化学反应で、この反応を生起させるために多くの化石燃料を投入しているのに気付く。この種の吸熱反応利用型熱回収法の適用が可能となれば、単に鉄鋼業の熱回収などにとどまらず、産業の再構築まで影響を及ぼす可能性がある。なぜならば、

大幅な投入エネルギーの削減に結びつき、製鉄所内で鉄以外の製品を大量に製造できる共生型製鉄所が実現するからだ。この魅力的な可能性にも関わらず、これまで各産業で自立的にエネルギーを取り扱ってきたため、この種の検討はほとんどなされていないのは大きな問題である。

したがって、本研究では鉄鋼スラグ廃熱⁵⁾を対象に、この化学反应利用型熱回収法⁶⁾を基礎的に幅広く検討し、異業種、特にセメント製造業との共生の可能性を考察することとした。そこではエネルギー、エクセルギー、炭酸ガス排出量の 3 面から評価を試み、共生の利点を定量的に明らかにする。

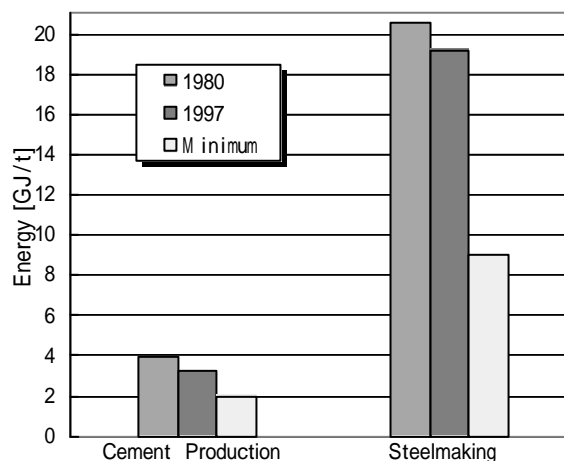


図1 製鉄およびセメント製造に要した製品 1ton 当りのエネルギー消費量の推移と理論最小値

2000 年 月 日受付、2000 年 月 日受理

*大阪府立大学大学院工学研究科物質系専攻化学工学分野

2. 鉄鋼廃熱

図1に鉄鋼およびセメントの歴史的エネルギー減少状況と理論最小値の関係を示す。歴史的に着実に省エネが進行してきている状況がわかる。それにもかかわらず、切迫するエネルギー問題や炭酸ガス地球温暖化問題を解決するために、現状の生産量を維持し、さらに省エネを推進する、新システムの提案が渴望されている。従来の考え方の延長線上でそれは可能なのだろうか。

この問題を根本的に検討するために、これまで個別に行われてきた異業種間の共生¹⁾の可能性、換言すれば、より少ない投入エネルギーで多品種の製品を得る環境効率の向上につながるシステム創製に着目した。そこで製造業としてエネルギー消費量が最大の鉄鋼業に的を絞り、文部省科学研究特定領域研究「ゼロエミッション」のご援助のもと、平成9年度、鉄鋼業の熱物質に関する詳細なデータの収集を開始した。さらに鉄鋼大手6社のご協力によりその歴史的変遷や近未来の操業データまで予測し詳細な検討を加えた。その結果、図2に示すように現状のエネルギー流入出状況が明確になった。左が従来のエンタルピー法（熱収支法）、右側がエクセルギー法による解析結果を示す。縦軸は温度の低い順から高い順に並べてある。鉄鋼業には1次エネルギーの約10%が流入し、鉄鉱石(Fe₂O₃)の還元・溶融等に使用された後、その約半分(46.5%)が流出する。容易な熱回収はかなり進んでいるが、回収率はその流出量の約17%に留まっている。結果として鉄鋼業から排出される廃熱量は1次エネルギーの4%弱にも相当し、温度分布も多岐に渡る。従ってこの莫大なエネルギーを他産業の流入エネルギーとして利用できないか検討する価値は十分にある。

一方この量的エネルギー評価のみにこだわっていると、現実を見誤る可能性がある。この評価法の致命的欠陥は、工業的に明らかに価値の異なる次の状態の熱量を等しく扱ってしまうことにある。

$$\begin{aligned} (\text{温度、量}) &= (1000 \text{ }、100\text{m}^3) = (100 \text{ }、1000\text{m}^3) = \dots \\ &= (0.000..1 \text{ }、\text{m}^3) \end{aligned}$$

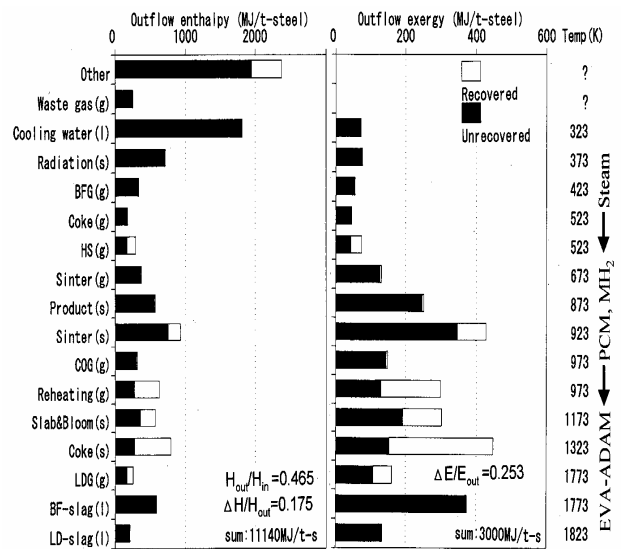


図2 モデル製鉄所における排出エンタルピーと排出エクセルギー¹⁾

これらを差別化できる方法論として、エネルギーの質を評価するエクセルギー理論^{2, 3, 4)}が注目されている。この概念により既存のエネルギー体系にとらわれることなく、新しい切り口から現状のプロセスやシステム自身を見つめなおすことが出来る。カスケード的な利用法¹⁾はまさにこの概念に基づく。熱の場合エンタルピーにカルノー効率を乗じ環境温度まで積分すると得られ、その結果、莫大な量を占めていた冷却水をはじめとする中低温の廃熱は実際にはそれほど使うことが出来ず、700 以上の廃熱が依然として大きな割合で存在することが明らかとなった。特に 1500 のスラグは空気を吹き付け、高温熱風とする廃熱回収法⁵⁾が1980年代に国家プロジェクトとして検討されたものの、実用化に至っていない。現在は水による冷却が大気中徐冷であるため全産業を通じ、量(年間 3500 万ト)および温度(1500)の両面から「廃熱回収の最後の砦」と見なされている。

3. 理論

エネルギー評価には熱力学コンパス⁴⁾の概念を使用した。この理論はきわめて簡単で、しかも明確に図式的に結果が表示されるので平衡論を基礎とする熱力学的評価には威力を発揮する。その方法論は COP3 の基礎データとすべく鉄鋼の理論最小エネルギーを論じた別報⁶⁾で報告済なのでその詳細な説明は省略し骨格を述べるに留める。

一般にシステムはいくつかのプロセスから成立する。プロセスとは物理的あるいは化学的变化を意味する。そこには物質(M)、エンタルピー(H)、エクセルギー(E)が流入出している。変化量を流出量から流入量を引いた値で定義するならば、物質に関しては質量保存の法則から M は常にゼロとなるが、H、E は計算することが出来る。システム評価のためには、システムを構成する全てのプロセスの H、E 値を合計しさえすれば良い。その時、熱力学第 1 法則および第 2 法則の制約として次の式を満足する必要がある。

$$H = 0 \quad \dots\dots (1)$$

$$E = 0 \quad \dots\dots (2)$$

熱力学コンパス上に個々のプロセスのベクトル(H, E)をプロットする。システム評価はこれらベクトルの合成ベクトルに注目すれば良い。上の2つの制約条件から合成ベクトルは鉛直下向きかゼロベクトルとなることがシステム成立条件となる。また各プロセスのベクトルの傾き E/H はエネルギーレベルとして定義され、通常その値 A はエネルギーの質を意味する。特に顕熱のエネルギーレベルは比熱一定を仮定するならば以下の式で表現できる。

$$A = (T - T_0) / T \quad \dots\dots (3)$$

ここで T は熱源温度 (K)、T₀ は環境温度 (K) (=298K) を意味する。したがって高温熱エネルギーほど急勾配のベクトルとなる。この熱力学コンパスでシステム成立の可能性は明確に判断することが出来る。すなわち、(1)(2)式の

両方を成立させるためには、合成ベクトルは Y 軸(エクセルギー軸)上の鉛直下向きかゼロとして出現しなければならず、この時のみシステムは成立する。加えて、そのベクトルの長さはエネルギーの低質度合い、すなわちエクセルギー損失に対応する。従って、より短い合成ベクトルを持つシステムがエクセルギーの有効利用の観点から選択されるべきである。

4. 方法

ここでは温度 1773K (1500 °C) の高温廃熱、高炉スラグを想定する。その場合スラグを環境温度まで冷却させる現象を「目的プロセス」とはじめに定義する。ここでは具体的に議論するため高炉スラグの熱回収の条件は次のように仮定した。

1. 組成は 4 成分系 43%CaO-35%SiO₂-15%Al₂O₃-7%MgO である。
2. 比熱は 59.7 (J/K·mole)¹³⁾である。
3. スラグ温度は 1773K (1500 °C), すなわち、エネルギーレベルは A=0.846 である。
4. 熱回収対象のスラグのエンタルピーは 200MJ とする。これは 2271 mole あるいは 143.5 kg に相当する。
5. 大気中への熱損失なしに理想的にスラグは熱交換し環境温度まで冷却する。プロセス形態は問わない。

この熔融高炉スラグの熱回収用冷媒として他産業で良く知られている 9 つの反応を選択した。表 1 は選択した反応、そのエンタルピー変化(ΔH)、エクセルギー変化(ΔE)、標準状態下での反応可能最低温度(T_{g=0})、およびエネルギーレベル(A)を示している。全ての反応は比較的大きな吸熱反応でその吸熱現象でスラグの熱を回収することが出来る。換言するならば、スラグの熱を利用してこれら吸熱反応を進行させる。これらの反応はいずれも他産業の主要反応であり、式(2)はセメント製造、(3)(4)は石炭ガス化、(5)から(8)は化学工業、直接製鉄等で重要な天然ガス改質反応である。比較のた

めに水分解による水素製造 (1)、メタノール分解反応 (9)も解析対象とした。可逆反応である式(9)はエコ・タウン構想のエネルギー輸送にも提案されている¹⁾。これら各々の式はシステム設計において、「組合せプロセス」としての役割を担う。

前述したスラグ熱回収条件から、我々は熱力学コンパス上で目的プロセスのベクトルを描くことが出来る。次に、表1に示すエネルギーレベルAから傾きが与えられるので、第1法則の制約により組合せプロセスのベクトル横軸長さは決まりベクトルを描くことが出来る。最後に2つのプロセスからなるこのシステムを評価し、次の3つの知見を得ることが出来る。

- 1) システム成立の可能性
- 2) システム成立時のエクセルギー損失量
- 3) 原料および生成物の物質量

表1 1700K以上の高温廃熱を熱化学変換によって回収するために選択した吸熱的反応

No.	Reaction	Enthalpy H[kJ]	Exergy [kJ]	T _{G=0} [K]	A € / H [-]
1	H ₂ O → 0.5O ₂ +H ₂	242	229	5400	0.945
2	CaCO ₃ → CaO+CO ₂	178	130	1110	0.731
3	C+CO ₂ → 2CO	172	122	1020	0.708
4	C+H ₂ O → CO+H ₂	131	91	982	0.694
5	CH ₄ +CO ₂ → 2CO+2H ₂	247	171	964	0.691
6	CH ₄ +H ₂ O → CO+3H ₂	206	142	960	0.689
7	CH ₄ +2H ₂ O → CO ₂ +4H ₂	165	114	957	0.688
8	C ₃ H ₈ +3H ₂ O → 3CO+7H ₂	498	298	742	0.598
9	CH ₃ OH → CO+2H ₂	90	25	410	0.278

5. 結果及び考察

5.1 熱化学変換

例えば目的プロセスである溶融スラグと組合せプロセスとしての反応式(2)からなるシステム評価のための熱力学コンパスを想定する。傾き 0.731を持つベクトルは式(1)の制約から水平方向の長さはベクトルと同じとなるように描くと、結果として合成ベクトルはY軸上の下向きに出現することは明らかである。これは式(2)で示す熱力学第2法則を満足しており、本条件下ではこのシステムは成立すると結論することが出来る。この時ベクトルの長

さはエクセルギー損失量 (EXL) を表している。組合せプロセスとして、この場合の EXL は -20 MJ (図3参照)、反応 (3)の場合 -24MJ、反応(4)から (7)の場合 -28 MJ となる。これら組合せプロセスは目的プロセスと傾きが非常に近いいため、結果として比較的小さなエクセルギー損失量であった。後者の反応群はほぼ同じ傾きを持っていることは興味深い。

プロパン改質、メタノール分解反応との組合せの場合、これらの反応温度は低温であるためエクセルギー損失は比較的大きくなった。逆に、スラグの傾き 0.846 より大きい傾き 0.945を持つ水の熱分解では合成ベクトルはY軸上向きとなるためシステムは成立しない。水の熱分解は理論的には 5000K 以上の熱を必要とし、この結果は合理的である。水の電気分解はスラグの代わりにレベル1である電気を使うことによって、合成ベクトルを下向きとしてシステムを成立させている。

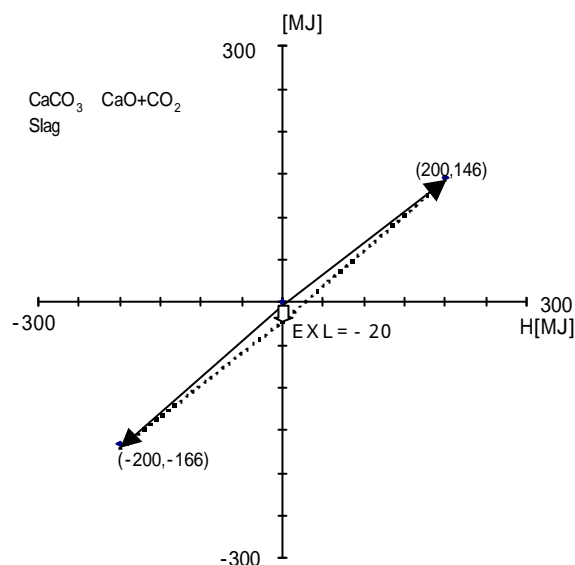


図3 反応(2)を組合せプロセスとしたときの熱力学コンパスによるスラグ熱回収システム解析

5.2 従来の熱回収法(水蒸気および温水)

顕熱利用型熱回収法とケミカル回収法を比較するため、次の2つのケースを評価した。

- 1) 冷水(398 K (25°C))から水蒸気(573 K (300°C))の製造。

2)冷水 (298 K (25°C)) から温水 (353 K (80°C)) の製造。

エネルギーレベルすなわちベクトル傾きは式(3)より容易に計算できるので、例えば2)に関しては図4を得ることが出来る。これらの図中の合成矢印はEXLを表示しており、温水製造による熱回収システムの場合は? 135 MJ となった。同様な方法で水蒸気生成による熱回収システムの場合は-84 MJ となった。反応式(2)~(7)に比べ、これらのEXLは大きかった。これは選択した組合せプロセスのあまりにも緩やかな勾配により引き起こされたのは明確である。この結果はEXLを減少させるためには、目的プロセスと組合せプロセスの傾きの差が小さくなるようにできるだけマイルドにシステムを設計すべきであることを示唆している。もっと具体的に言うならば、このようにシステムを設計するのが熱のカスケード利用の基本と言える。熱カスケード利用は頂上に貯えた水を一気に地表まで流し発電するのではなく、斜面に段階的にダムを設け何段階かに分けて発電するのに類似する。損失を小さくするためには標高差、すなわちエネルギーレベル差が小さい組合せを志向すべきであることを示唆している。この概念から判断すると1500もの高温排熱回収にスチームを生成して熱回収する方法は大きなエクセルギー損失を伴い得策とは言えない。

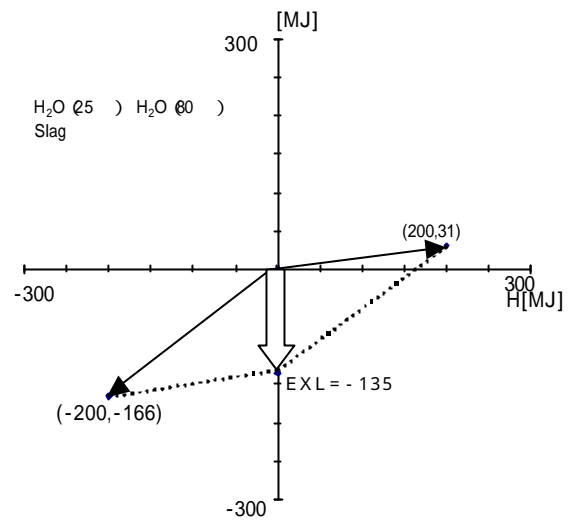


図4 温水発生を組合せプロセスとしたときの熱力学コンパスによるスラグ熱回収システム解析

5.3 総合評価

総括結果を表2に示す。組合せプロセスの傾きが異なるため、得られるEXLの値は大きく異なっている。溶融スラグ熱量 (H_{slag}) の対するEXLの割合、すなわち EXL/H_{slag} は0.1から0.675と幅を持った。特に、最小値0.1は反応式(2)、次いで小さい順に0.12は反応式(3)、0.14は反応式(4)~(7)を組み合わせた時に得られた。EXLの割合が0.23と0.55となった反応(8)および(9)は、中温排熱の回収に適しているものであり、スラグのような超高温のそれに使用すべきではないだろう。

表2 溶融スラグ顕熱回収時の理論的エクセルギー損失

No.	Reaction	EXL(MJ)	$\frac{EXL}{H_{slag}}$ (MJ/MJ)	Wr*(kg)	$\frac{W_r}{W_{slag}}$ (kg/kg)
1	$H_2O \quad 0.5O_2 + H_2$	impossible	-	none	-
2	$CaCO_3 \quad CaO + CO_2$	20	0.1	112.4	0.783
3	$C + CO_2 \quad 2CO$	24	0.12	13.9	0.097
4	$C + H_2O \quad CO + H_2$	28	0.14	18.3	0.128
5	$CH_4 + CO_2 \quad 2CO + 2H_2$	28	0.14	11.3	0.079
6	$CH_4 + H_2O \quad CO + 3H_2$	28	0.14	13.6	0.095
7	$CH_4 + 2H_2O \quad CO_2 + 4H_2$	28	0.14	17	0.118
8	$C_2H_6 + 3H_2O \quad 3CO + 7H_2$	46	0.23	17.7	0.123
9	$CH_3OH \quad CO + 2H_2$	110	0.55	71.1	0.495
10	$\underline{H_2O(l)}(25) \quad H_2O(g)(300)$	84	0.42	67	0.467
11	$\underline{H_2O}(25) \quad H_2O(80)$	135	0.675	865.8	6.033

*Amount of underlined reactant

同時に熱力学コンパスは表 2 に示すように反応物質および生成物質の量に関する情報も与える。ここで下線が引かれている反応物質、すなわち W_r の量は、スラグに対する比率 (W_r/W_{slag}) である。例えば、スラグに対する石灰石の比率 0.783 は、年間 30Mt のスラグは名目上、年間 23.5Mt の石灰石の熱分解、すなわち年間 $13.2(=23.5 \times 0.56)$ Mt の CaO (セメント主成分) の製造能力を有していることを意味する。また、熔融スラグは、353K の温水を 6 倍も作ることが出来るが、エクセルギー損失率は 67.5% にも到達しエネルギーの低質化が大幅に進んだ。水蒸気による熱回収は、それは温水回収よりは好ましいが、エクセルギー損失率は同様に大きいかった。

現在高炉スラグは多量の水を吹きつけ急冷しガラス化している。一部温水として熱回収しようとする試みがなされているものの、ほとんどの場合顕熱は廃棄されている。この水砕スラグプロセスは次の理由から改善を求められている。

- 1) スラグを急冷するために多量の水を必要とする。
- 2) スラグ中のアルカリが水の中に溶出し水質を汚濁する。
- 3) スラグ中の硫黄が気化し空気を汚染する。
- 4) 処理後に乾燥プロセスを要する。

従って、ここで提案した熱化学変換プロセスに基づいて、スラグの熱及び物質の両方を乾式回収できるプロセスが

可能であるならば、新しい環境適合型プロセス密閉システムとして開発されるべきである。この目的のために、最近はじめてスラグ触媒性が調査され、熔融スラグ上ではメタン水蒸気改質反応が進行することが確認⁸⁾されている。いずれにせよ、スラグ顕熱回収に(2)~(7)の吸熱的化学反应式を利用するケミカル熱回収の概念は極めて有望であると結論づけられる。

5.4 セメント製造

次に組合せプロセスとして最もエクセルギー損失が少なく有望と位置付けられた、石灰石の熱分解を主反応とするセメント産業を調査した。ポルトランドセメント⁹⁾は通常サスペンション・プレヒーター付きロータリーキルン、いわゆる NSP キルンで製造される。石灰石、すなわち $CaCO_3$ ははじめに粉碎され、次いで予熱された後キルン内で煅焼され CaO 主成分のクリンカーとなる。急冷された後、最後にクリンカーは粉碎されてポルトランドセメント製品となる。ロータリーキルンの燃料として石炭や石油が使用され約 1823K (1450°C) まで加熱される。エクセルギー解析の結果は、損失の総和は 1.882 GJ/t-cement であることを示した。中でも石灰石を熱分解する NSP キルンの損失量は、1.778 GJ/t で 94.3% にも達した。

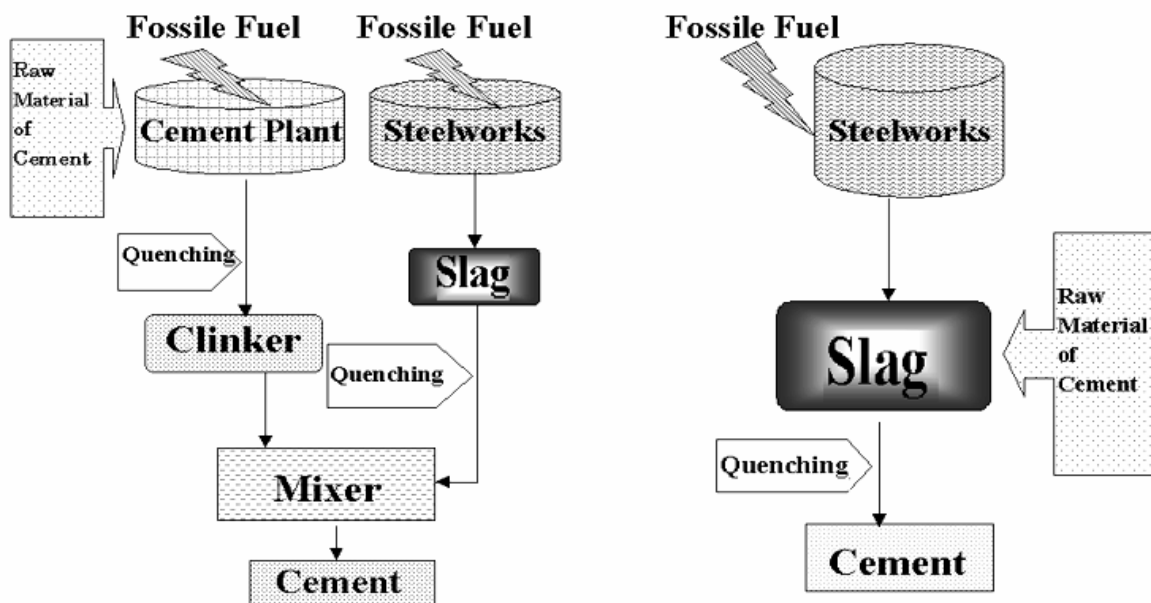


図 5 従来型セメント製造法(左)とスラグ顕熱利用型セメント製造法(右)の概念図

一方、市販の高炉セメントは水砕スラグとこのポルトランドセメントを冷間で混合して製造される。混合比率でその種類がA(混合率5~30%),B(30~60%),C(60~70%)と分類されるが、一般的なB種ではほぼ同量ずつ混合される。その概念図を図5に示す。従来個別の産業で製造されたセメントとスラグを冷却後混合するのに対して、本研究で提案するシステムでは溶融高炉スラグ中に石灰石を直接投入し瞬時にセメントクリンカーを製造する。セメント製造のエネルギーが節約できるので極めて合理的提案といえる。

図6に異なる3つセメント製造法のエネルギー消費量の比較を示す。左からポルトランドセメント、高炉セメントB種、および提案するスラグ顕熱利用型高炉セメントである。得られる各種セメント組成を表3に示す。後者2つはほぼ類似する組成となっている。

ここで提案型システムでは1500から石灰石の熱分解温度(約850)までのスラグ顕熱を石灰石の熱分解のために完全に利用できると仮定し、石灰石添加量を決定した。その結果、ポルトランドセメントのみではエネルギーを3000MJ/t消費するが、従来の高炉セメントでは鉄鋼副産物のスラグを使用するので、1600MJ/tと大幅に減少した。さらに提案型ではポルトランドセメント製造時のエネルギーを消費しないので、粉砕のエネルギーのみ計上すると、その値はポルトランドセメントの所要エネルギーの7%、高炉セメントのその15%まで激減した。なおセメント製造のエネルギーデータはセメント協会(2000)報告値¹⁾に基づいた。

図7はこれら3つの方法の炭酸ガス排出量を示している。セメント製造における炭酸ガス発生由来は、1)ロータリーキルンのエネルギーとして投入される石炭燃焼(Roasting)、2)粉砕工程の電力消費(Crushing)、および3)石灰石熱分解(Limestone decomposition)の3つである。1)の計算には、発熱量25900kJ/kg、炭素含有量74.8%の石炭を想定し、エネルギー量から評価した。2)の粉砕は原料およびクリンカーの両方を考慮し、発電効率36.5%の火力発電所を想定し0.168kg-C/kWh¹⁾の値で評価した。その結果、ポルトランドセメント製造にはトン製品

当たり250kg-Cの発生となった。この値は既存の報告値^{1,2)}の193kgより大きな値であるが、この原因として主として1)、2)の評価方法の違いにより生じたものと推察される。いずれのデータにせよセメント産業の特徴は燃料・電力由来の炭酸ガスよりも原料由来のそれが同程度かそれ以上排出していることである。

従来言われているように、ポルトランドセメントに対して高炉セメントは炭酸ガス排出抑制の観点からは大きく貢献している。スラグは鉄鋼副産品であるため、その製造時には炭酸ガスは発生しない。さらに提案型ではセメント燃料由来の炭酸ガスも減少できる可能性がある。ポルトランドセメントの値の30%、高炉セメントの60%程度にまで低減できる可能性を示している。石灰石由来の炭酸ガスの低減に関しては、原料を変換する以外に方法はない。例えば廃コンクリート由来のCa(OH)₂で代替することが可能であれば熱分解温度も600程度と低いことから魅力的であり、今後の検討課題といえる。

表3 評価した各種セメントの化学成分

	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ /CaO/MgO/TiO ₂ (mass%)
Portland Cement	21.6/5.1/63.7/1.7/0.34
Conventional BF Cement*	27.7/9.7/54.3/4.4/0.8
Proposed BF Cement**	26.2/11.1/55.5/5.5/1.0

*50% slag + 50% P.Cement, **Slag(1ton) + Limestone(510kg)

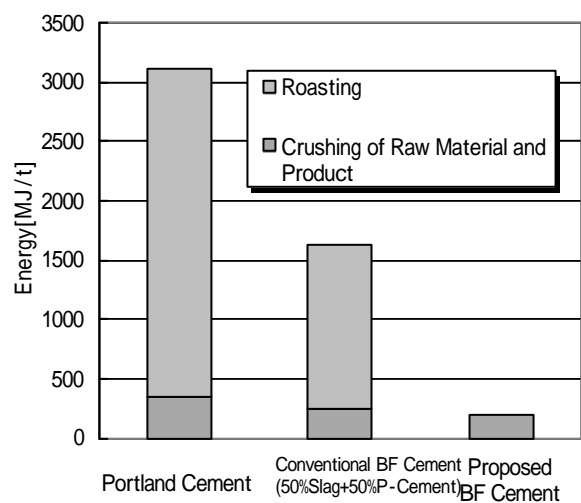


図6 従来型およびスラグ顕熱利用型セメント製造法におけるエネルギー消費量の比較

6 . 結 論

鉄鋼業の高温排熱スラグ顕熱回収法として、熱化学変換法の可能性を検討した。その結果以下の結論を得た。

- 1) 石灰石の熱分解 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), 天然ガス改質反応 ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$, $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$, $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$), 石炭ガス化反応 ($\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$, $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$)を利用するシステムは 11 システム中エクセルギー損失が少ない。特にセメント製造の主反応である石灰石の熱分解利用型がエクセルギー消費最小となった。
- 2) 温水回収法はエクセルギー消費最大であった。スチーム回収もまたかなりのエクセルギーを消費した。これらの方法はエクセルギー理論に基づくならば 1500 の顕熱回収には適していない。
- 3) スラグ顕熱利用型セメント製造法は、ポルトランドセメント、高炉セメントに比べエネルギー消費量及び炭酸ガス排出量の両面からそれぞれ大幅に削減出来ることを示した。

今後は実験的な側面から、提案する本プロセスの妥当性を検証する必要がある。

謝 辞

セメント産業の炭酸ガス排出量評価に関して、住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所山本貴憲工学博士にご協力いただいた。また、本研究の一部は科学研究費(基盤研究(B)(2)11555196、特定領域研究(A)、12015247)により遂行された。記して謝意を表する。

文 献

- 1) 秋山友宏、八木順一郎 共生型製鉄所の可能性、鉄と鋼、82(1996)、pp.177-184.
- 2) 吉田邦夫編、エクセルギー工学-理論と実際-(1999)[共立出版]

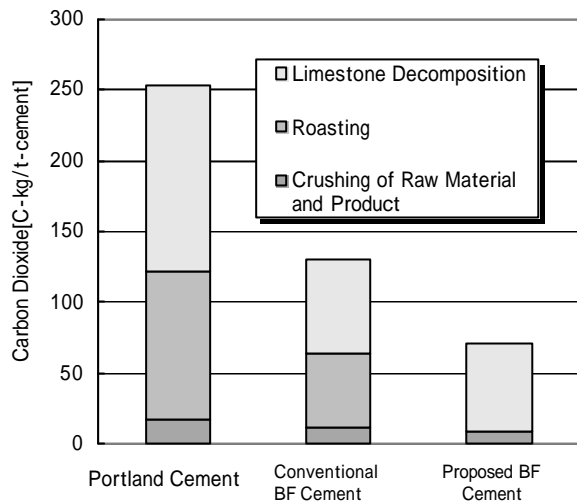


図7 従来型およびスラグ顕熱利用型セメント製造法における炭酸ガス排出量の比較

5 . 5 残された課題

本研究結果は、鉄鋼から排出される溶融スラグの未利用顕熱を利用してセメントを製造することが平行論的にエネルギーおよび炭酸ガス排出削減の可能性から極めて有望であることを明確に示した。しかしながら、更に実現に向けて次の3つの観点からの検討が望まれる。

1) 速度論的観点からのプロセス設計

セメントは CaCO_3 の熱分解のみで製造されるわけではない。 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 等(いずれも発熱反応)が生成するような温度保持が必要である。したがって熱交換速度、各種反応速度を考慮したプロセス設計が必要となる。

2) セメント特性

得られたセメントの強度発現特性は急冷速度の影響を強く受けることが予想できる。この点に関し、1)とともに実験的に調査する必要がある。

3) 物流エネルギー

現在、セメントは石灰石源と隣接して製造されている。本研究では、製鉄所までの輸送エネルギーはまったく考慮していない。立地条件も含め物流エネルギーの影響も調査する必要がある。

- 3) 秋山 友宏、八木順一郎, エネルギー問題・環境問題を考えるヒント、エクセルギー、ふえらむ、3(1998), pp.23-28.
- 4) 石田愈、熱力学 (1995), p.93. [培風館]
- 5) 榊原路悟, 高炉熔融スラグ顕熱総合回収技術の開発、鉄と鋼, 76(1990), pp.1587-1596.
- 6) T.Akiyama, K. Oikawa, T. Shimada, E.Kasai and J. Yagi, Thermodynamic Analysis of Thermochemical Recovery of High Temperature Wastes ISIJ Int., 40(2000), No.3, pp.285-290 .
- 7) T. Akiyama and J.Yagi, Methodology to Evaluate Reduction Limit of Carbon Dioxide Emission and Minimum Exergy Consumption for Ironmaking, ISIJ International, 38(1998), pp.896-903.
- 8) E.Kasai, T.Kitajima, T.Akiyama, J.Yagi and F.Saito, Rate of Methane-steam Reforming Reaction on the surface of Molten BF Slag – For Heat Recovery from Molten Slag by Using a Chemical Reaction -, ISIJ International, 37(1997), pp.1031-1036.
- 9) T.Akiyama and J.Yagi, Exergy Evaluation on the Pellets Production and Direct Reduction Processes for the Fired and Nonfired Pellets, ISIJ International, 29(1989), pp.447-454.
- 10) セメント協会、セメントの常識、pp.61-62(2000) [セメント協会]
- 11) 秋山友宏、八木順一郎, 製鉄システムのエクセルギーおよびCO₂解析, 鉄と鋼, 77(1991), pp.1259-1266.
- 12) 飯塚洲一、環境特別委員会審議経過報告、セメント製造技術シンポジウム報告集、50(1993), pp.24-33.
- 13) 第3版鉄鋼便覧(日本鉄鋼協会編)[丸善](1979), p320 .

Cement clinker production by utilizing waste heat of molten steel slag

Tomohiro AKIYAMA* and Toshio MIZUOCHI**

(*Dept. Chem. Eng., Graduate School of Osaka Prefecture University,

Gakuencho 1-1, Sakai, Osaka, Japan

** Dept. Chem. Eng., Osaka Prefecture University)

Abstract

The future of energy-consuming steel-making industry strongly depends on the improvement of *eco-efficiency*, that is, more products except a steel by less input energy. This paper describes a feasible study of symbiotic steelworks with a new heat recovery concept using endothermic chemical reactions. The results revealed a merit of heat recovery of molten slag by using thermal decomposition of limestone for producing a cement clinker from viewpoints of reducing energy consumption and carbon dioxide emission.

Key Words: exergy theory, cement production, waste heat of steel slag, symbiotic steelworks