

# 共生型製鉄所の可能性

秋山 友宏\*・八木順一郎\*

Feasibility of Symbiotic Ironworks

Tomohiro AKIYAMA and Jun-ichiro YAGI

**Synopsis :** The concept of zero emission of waste material in the manufacturing process has been focussed worldwide for more efficient utilization of fossil fuels and environmental protection. In this study, background and feasibility of symbiotic ironworks based on this concept were discussed from the state-of-the-art technology in catalyst and heat storage/transportation. One possibility is ironworks with methanol industry, in which charged coke is partially replaced by natural gas and the hydrogen-enriched blast furnace offgas(BFG) is used as raw material for methanol synthesis. The results of systematic analysis demonstrated that this system leads to not only exergy saving but also less emission of greenhouse gas(GHG). The key technology is to develop a catalyst for BFG of CO<sub>2</sub>-CO-H<sub>2</sub> system. Another one is "urban-symbiotic ironworks", where excess outflow energy from ironworks is efficiently employed as a utility for household affairs. The use of latent heat and reaction heat is being planned in this system for thermal energy recovery and transportation. Possible energy recovery processes for the waste heat remaining in the ironmaking industry was reviewed, together with the detailed concept of 'urban-symbiotic ironworks' as an energy supplier. In particular, the use of phase change materials(PCMs) and of hydrogen storage alloy as the new technologies was fundamentally promising.

**Key words :** ironmaking ; symbiotic ironworks ; exergy ; energy storage ; energy transportation.

## 1. 緒言

最近、不要な物質を排出しない、いわゆるゼロ・エミッション製造プロセスを指向して産業を再構築しようとする動きがみられる。そのプロセスにおいては廃棄物は存在せず、プロセスへの全入力は全出力と等価になる。物質のリサイクルを安易に考える前に、一見意外に見える異業種間の結合が廃棄物の放出の削減につながる可能性を持っていることが指摘されている。

製鉄所には鉄鉱石、化石燃料、石灰石等が流入し、鉄製品のほかスラグや各種ガスが排熱を伴って副生する。これら副産物を他業種の原料として再利用し使い尽くすことにより、究極のゼロ・エミッション製鉄業は実現する。エネルギーに関していえば、製鉄所には粗鋼1トン当たり24000MJが流入し、11140MJが一次排熱として発生、一部は回収されるものの一次排熱の83%が捨てられている。本邦において消費される化石燃料のうち鉄鋼業は製造業の中では化学工業とほぼ同様の27.8%を占め、依然としてエネルギーの有効利用が最重要課題と位置づけられている。製鉄所内にはいまなお高質の廃熱が多量に存在することから、エネルギー供給者としての新たな役割が期待されている。

本報では異業種と共生する次世代の鉄鋼業の可能性を探

ることを目的として、一例として製鉄所とメタノール産業との共生、および製鉄所と都市との共生の概念を提案した。その共生のために不可欠な要素研究の現状と問題点を紹介し、これら共生型製鉄所の可能性を解説した。

## 2. エネルギー問題と地球温暖化問題

極端に言えば我々は10<sup>9</sup>年のオーダー(46億年)で地球が熟成した化石燃料を、ほんの10<sup>3</sup>年のオーダーで消費し枯渇させようとしている。信頼性が高い一説<sup>2)</sup>によると石油、天然ガス、石炭の可採年数はそれぞれ今後40, 51, 325年である。太陽エネルギーに代表される新エネルギーの研究開発は積極的にこなわれているものの、化石燃料を代替し実用化に至るのは2050年前後と予想されている。そのため、多様化する各種エネルギーを受け入れる体制の整備と、残存する化石燃料を真の意味で「有効」に利用することが必須の課題となっている。

一方、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)、ダイオキシンや温室効果ガス(GHG)などいわゆる環境破壊物質の放出に関して今や世界的に敏感である。前者3つは放出削減の具体的な対応策が存在するのに対して、GHG放出が引き起こす温暖化問題は地球的規模で、最も回答が困難であり、そ

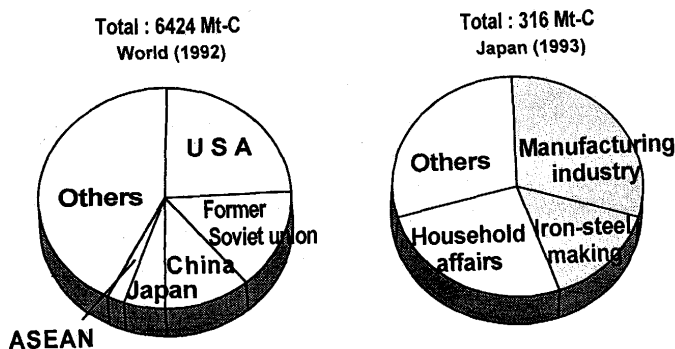


Fig. 1. GHG emission in the world and in Japan.

の影響は深刻である。典型的なGHGである炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)は主として化石燃料の消費に起因するため、多くの提案にも関わらずその固定化回収の決定的な手段が確立されていない現状では、製造業からのCO<sub>2</sub>放出は不可避にみえる。CO<sub>2</sub>放出量は年々増加しており1992年で全世界で6400Mトンに達した。これは20年前に比べ2000Mt, 10年前に比べ1000Mtの大幅な増加である。その内訳は、Fig. 1に示すように、アメリカ1581Mt, 旧ロシア935Mt, 中国733Mt, 日本349Mt, ASEAN130Mt等であり、国内においては電力事業者を除くと、鉄鋼業は運輸部門の20.9%について14.9%と第2位となっている<sup>3)</sup>。運輸業が分散発生源であるのに対して、鉄鋼業は固定発生源であるので特にその対策技術が注目されている。

結論として鉄鋼業が持続可能な開発(sustainable development)を維持しつつ、このエネルギー問題と温暖化問題を同時に解決するためには、水素エネルギーの使用を視野に入れてC/Hの値が小さい燃料の使用に移行し、独創的な省エネルギーを強力に推進するしかなく、提案されている種々の炭酸ガス固定化法に比べてこの方法が唯一経済原則と連結し最も現実的な施策といえる。ちなみに、化石燃料に関していえば炭酸ガス排出量は同一発熱量基準で石油を1として、亜炭で1.4, 無煙炭で1.2, 天然ガスで0.65となる。

### 3. 異業種共生型製鉄所

省エネルギーには2つの方法論がある。一つは「物質」の流れに注目する方法であり流れの効率化という視点から、プロセスを1)省略化, 2)連続化, 3)複合化する。1), 2)に関する例は多数あるが、代表的なものとしてそれぞれ原料塊成化を省略する, 溶融還元プロセス<sup>4)</sup>と連続鑄造プロセスがあげられる。

そして、さらに最近、異業種であるメタノール製造業と製鉄業を「複合化」させることが試みられている。メタノール(CH<sub>3</sub>OH)は最近化学工業原料のみならず、自動車用燃料として強く脚光を浴びているため、その需要の伸びは特にめざましい。排ガス中のNO<sub>x</sub>, CO, HC(炭化水素)削減

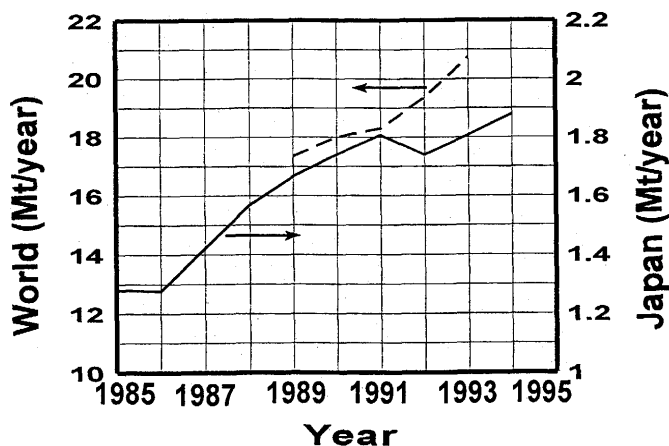


Fig. 2. Increasing methanol demand in the world and in Japan.

のために米国では一部の州がメタノール混合ガソリンの使用を条例化したり、本邦においても運輸省が2000年までにメタノール自動車一万台の普及をめざし積極的推進の方策をうちだしている。メタノールを自動車に供給するエコ・ステーションの建設も各地で行なわれている。世界におけるメタノール総需要は20Mt/year(1993年)に達し、そのうち日本は10%強をしめ、さらに近い将来数百万トンの需要の伸びが予測されている(Fig. 2)。さらに学術的にも低エクセルギー損失燃焼の概念からもメタノール合成は注目されている<sup>5)</sup>。

現在のメタノール製造プロセスは天然ガスを原料とし、大別して水蒸気改質, 合成反応器, 蒸留塔の3プロセスから成立する(Fig. 3上参照)。合成反応が発熱反応であるのに対して、水蒸気改質は大きな吸熱反応であるため、このプロセスが全所要エネルギーの50%強を占めている。当初、合成反応器は20MPaの高圧を要したが、現在は低圧用触媒の発見により5MPa程度であり、ほぼ完成の域に達している。そのため、今後燃料用として大幅に需要が見込まれているにもかかわらず、このシステム構成ではこれ以上の大幅な価格低減は困難であると予想されている。

最近、このような背景のもと高炉ガス(BFG)を原料とする新しいメタノール合成システムが提案された<sup>6)</sup>。これはFig. 3に示すように、製鉄業とメタノール製造業を複合化し共生を試みているのに他ならない。このシステムにおいては装入コークスを減らし、天然ガスのような補助燃料を高炉羽口から吹き込みH/Cの割合が高い炉頂ガスを生成する。天然ガス多量吹き込み操業は旧ロシアなどで'60年代におこなわれ、銑鉄1トン当り100Nm<sup>3</sup>程度の吹き込み実績がある。複合化の目的は現行メタノールプロセスにおけるエネルギー多消費の水蒸気改質プロセスを省略し、その機能を高炉により代替することにある。そこでは、大幅な天然ガス吹き込みによりGHG放出量やエネルギー消費量の削減を狙っている。ここで、GHGはCO<sub>2</sub>, COおよび炭化水素を意味する。天然ガス吹き込みにより水素富化されたBFGは1MPa

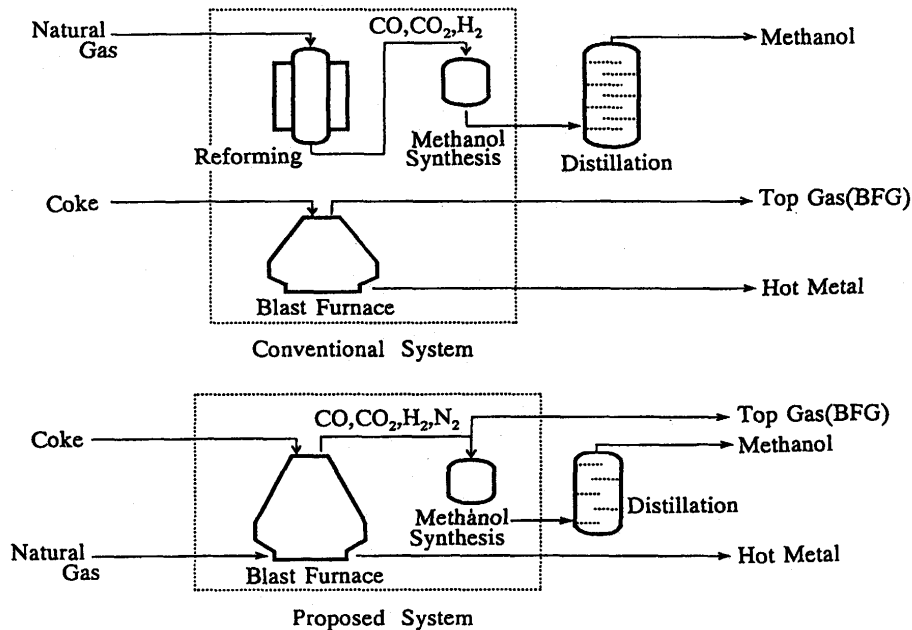


Fig. 3. Concept for the integration of blast furnace ironmaking and methanol synthesis systems.

以下の低圧で従来の合成ガスに比べ窒素や炭酸ガスを多量に含む。これにも関わらず、最近転化率は低いものの選択率の高いメタノールの合成実験に成功した。引き続き反応器形状や炭酸ガスを含有するガス用の触媒探索が行われている<sup>7,8)</sup>。実験においては触媒は従来と同様、銅-酸化亜鉛-酸化アルミニウム系触媒が使用され有望であることが判明したが、その最適組成比は大きく異なっていた。試算によると鉄トン当たり天然ガス220Nm<sup>3</sup>の吹き込みにより、GHG放出量は542から454kg、エクセルギー損失は9.0から8.2GJに低減する。この時GHG減少量88kgのうち、天然ガス吹き込みの効果は74kg、メタノール合成の効果は14kgであった。天然ガス以外の補助燃料の効果についても検討されている<sup>9)</sup>。

BFGは本質的に反応に関与しない窒素を50%程度含有し圧力も低いことからメタノール合成には最適とはいえない。そのため、(脱窒素+昇圧)プロセスを付加する可能性も検討されている。一方、実用化が進められているDIOSプロセスの排出ガスはCO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>系で、1)窒素を含まず、2)排出口を絞ることにより比較的容易に昇圧が可能であることから、予備還元炉からの排出ガスはよりメタノール原料として適しているといえる。

いずれにせよ上記のシステム解析<sup>6,8)</sup>は「すでにある程度洗練された異業種プロセス間の複合化により、省エネルギーを大幅に推進できる余地があること」を明確に例証したといえる。

#### 4. 都市共生型製鉄所

もう一つの省エネルギーの方法論は「熱」の流れに注目

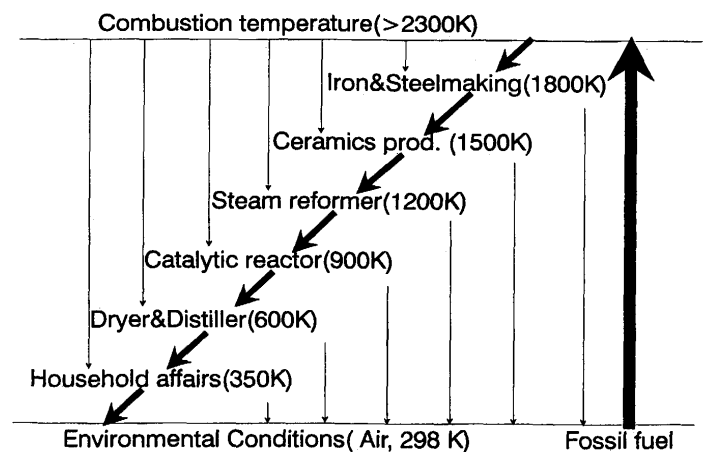


Fig. 4. Example of the cascade use of thermal energy.

する方法であり流れの効率化という観点から、製鉄所内で発生する排エネルギーを段階的に利用することである。化石燃料自身は理想的な燃焼条件を設定することによって、2300K以上の高温に達するポテンシャルを有している。それにもかかわらず、現在のエネルギーシステムにおいてはその能力を省みることなく、そのような高温を必要としないプロセスにも化石燃料を投入している。各プロセスの必要とする熱の温度は大きく異なっていて、例えば高炉や転炉は全産業中最高温度レベル(1820~1870K)であるのに対して、民生で必要としているのは高々350K程度であろう。したがって、前者のような高温を要するプロセスには化石燃料を使用するのは仕方がないとしても、後者のような低温熱源として化石燃料を使用しているのは極めて贅沢な使用方法といえる。高温プロセスの排熱を他プロセスの流入エ

エネルギーとして順次温度レベルに従って利用する、いわゆるカスケード利用方式を製鉄所内で推進し、さらに所近隣の他産業や都市を包括した系で再構築(Fig. 4)するならば大幅な省エネルギーが期待できる。しかしながら、各プラントが独立に離れて存在する現状では直接的再利用は容易ではないだろう。

この実現のためには、「製鉄業から排出される中高温排熱を対象とした高効率で、実用的な熱貯蔵や輸送技術の確立」がきわめて重要となる。製鉄所では二度の石油危機を契機に焼結鉱冷却器、炉頂圧回収装置、コークス乾式急冷装置、転炉排ガスボイラー等のエネルギー回収装置の導入が積極的に行われたものの、エンタルピー収支(熱収支)基準では流出エネルギーの回収率は17%に留まっている<sup>9)</sup>。これ以上の熱回収が進まないのはエネルギー回収が容易なものはスチームの形式ですでにほぼ回収され、製鉄所内には回収が比較的困難な形態の排熱しか存在していないことに起因する。また、スチームによる熱輸送は熱損失をとまうため、2 km以上の長距離輸送は困難で民生用に供給しづらいことも原因している。電気としての回収は長距離輸送の観点からは有利であるが、再び排熱をとまないその発電効率が高々40%であることから、供給先が熱を必要としている場合は、熱、電気、そして再び熱というエネルギー変換は望ましくない。なぜなら、電気は100%エクセルギーの最高質なエネルギーであることから、質の低い熱への再転換は不合理であり、理想的には照明・コンピュータ等の電気であれば稼働しない装置だけに使用は制限すべきであろう。

エクセルギーの概念は高温や化学反応を伴うプロセスシステムのエネルギーの定義に極めて有効である。これは

熱力学第1および第2法則に基づき、工学的エネルギーの尺度としてエネルギーの真のポテンシャルを表示する<sup>4)</sup>。換言すれば、エクセルギーは使用可能なエネルギーを意味し、エネルギーの質を表示するのに対して、エンタルピーはエネルギーの量を表示しているのに過ぎない。省エネルギー

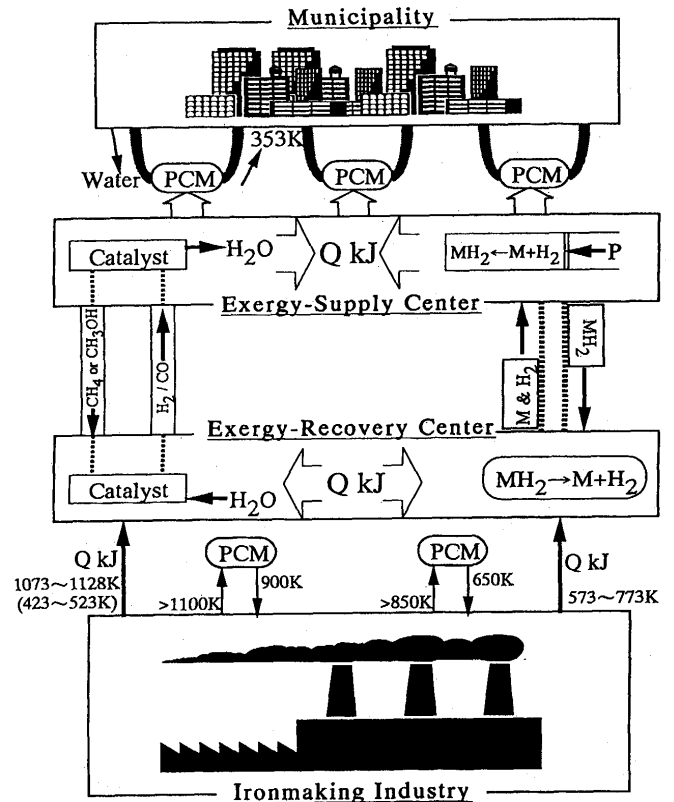


Fig. 6. Concept of the urban-symbiotic ironworks.

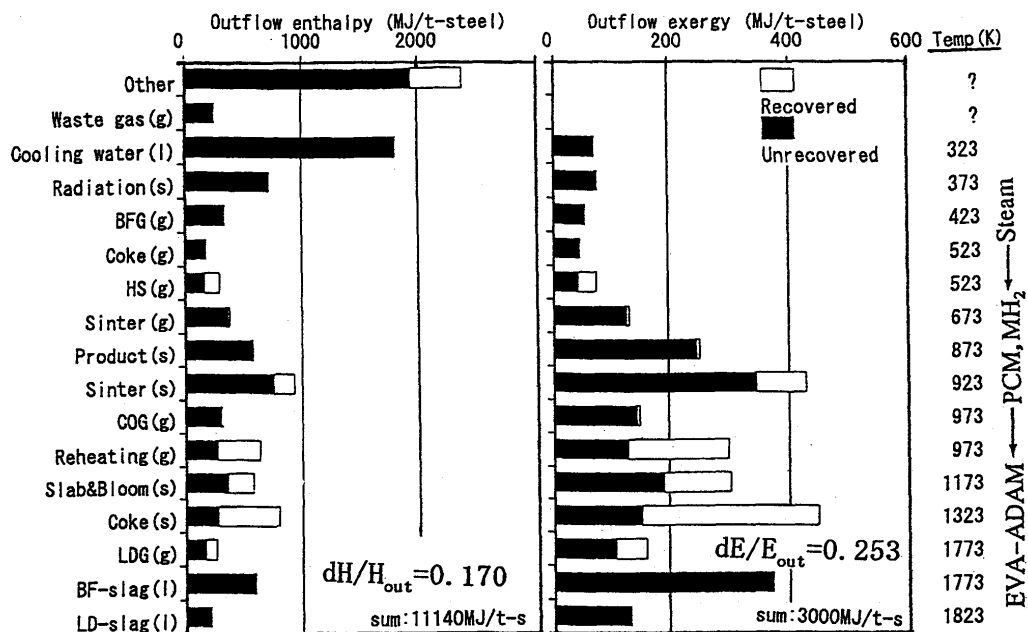


Fig. 5. Waste enthalpy and exergy in the Japanese ironworks.

を検討する際には、「エネルギー保存則」(熱力学第1法則)のみに立脚するエンタルピー評価だけでは困難であるため、工学的なエネルギー評価はエクセルギーでおこなうべきであろう。一例として、1992年における主要製鉄所の操業データ<sup>9)</sup>に基づき排出エネルギーの評価を、エンタルピーおよびエクセルギーの両者で行った結果をFig. 5に示す。縦軸の各項目は文献9)に基づき、排熱温度のレベルに従って並べている。かつこの英文文字s.l.gはそれぞれ排熱の形態が固体、液体、気体であることを示す。棒グラフで白ヌキ部分は既回収、黒色部分は未回収を表す。エクセルギー基準だと前述したエネルギー回収率は約25%に達していることがわかる。冷却水のような低温エネルギーは低質であるためそのエクセルギー量は小さく、逆に依然として中高温(673-1823 K)の未利用エクセルギーの割合が多いことを認識すべきであろう。

このような状況なので、製鉄所においてさらに省エネルギーを進めるためには、前述したような段階的熱利用体系をさらに推進し、所内で未回収となっている熱を積極的に異業種プロセスに供給するのが得策である。その一例として民生用に利用する都市共生型製鉄所のエネルギーシステムの概念図<sup>10)</sup>をFig. 6に示す。最近民生用エネルギー需給は年率1%から5%で増大しており、このシステムの構築により都市での化石燃料の消費を確実に抑制できる。このシステムは

1. エクセルギー回収センター
2. エクセルギー供給センター
3. エクセルギー貯蔵装置および
4. これらを連結する輸送プロセス

から成立している。両センターは高い熱エネルギー貯蔵能

力を有し、輸送プロセスとしては次に述べる気体、液体利用の触媒反応や金属水素化物の利用が長距離輸送の観点から有望視されている。

### 5. 潜熱利用型熱貯蔵

相変態時の潜熱を利用する熱貯蔵システム<sup>11)</sup>は注目を集めており、一部は既に実用化されている<sup>12)</sup>。排熱回収を対象とする温度域に融点を持つ相変化物質(PCM)を選定し、通常これを球カプセル内に封入後充填層プロセスを形成させ加熱操作を行う。この蓄熱装置の典型的な操作をFig. 7に示す。工業プロセスから周期的に放出される排熱を充填層に流入しPCMを溶解することにより熱回収し、冷風を吹き込み凝固時に他プロセスや民生用の流入エネルギーとして一定温度の流体を供給することができる。ここで、PCM充填層から得られる熱エネルギーの温度はPCMの融点近傍(図中実線)となる。充填層型潜熱蓄熱装置の主たる特徴は、

1. 一定温度のクリーンな熱が得られ
2. 煉瓦などの顕熱利用型に比べ単位体積、重量当りの蓄熱密度が大き
3. 固液変態を繰り返すだけなので長期使用が可能である

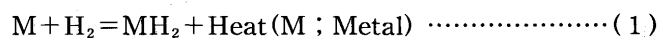
等が挙げられる。温度が異なる473-1273Kの中高温排熱に適用するために、いくつかの融点異なるPCMの候補が選択されていることから、これらを組み合わせて段階的熱利用も可能になる。最適な操作条件を決定するために、蓄熱充填層の理論及び実験的研究が行われている<sup>11)</sup>。実験ではステンレス製球カプセル(肉厚2mm, 外径40mm)が使用されたが、実用化のためにはより安価な原料で、簡単にPCMを封入できる技術開発が期待されている。

### 6. 反応熱利用型熱輸送

#### 6.1 水素吸蔵合金

LaNi<sub>5</sub>, FeTi, Mg<sub>2</sub>Niに代表される水素吸蔵合金は熱輸送および貯蔵媒体としても魅力的である。反応条件を制御すればほぼ永久に熱は化学エネルギーの形態で貯蔵でき、熱損失なしに長距離輸送することが可能である。

この合金は水素を放出することにより熱を貯蔵し、高圧下で水素を吸収することにより熱を放出する。必要ならば熱源よりも温度を高くすることも可能で、副次反応も起こらない。



とりわけ、マグネシウム系合金は実用合金中最も軽量であり輸送に適している。その蓄熱密度は他合金に比べはるかに大きく、対象熱回収温度域は573K以上と予測されることから製鉄所の中温排熱回収に適している。輸送形態とし

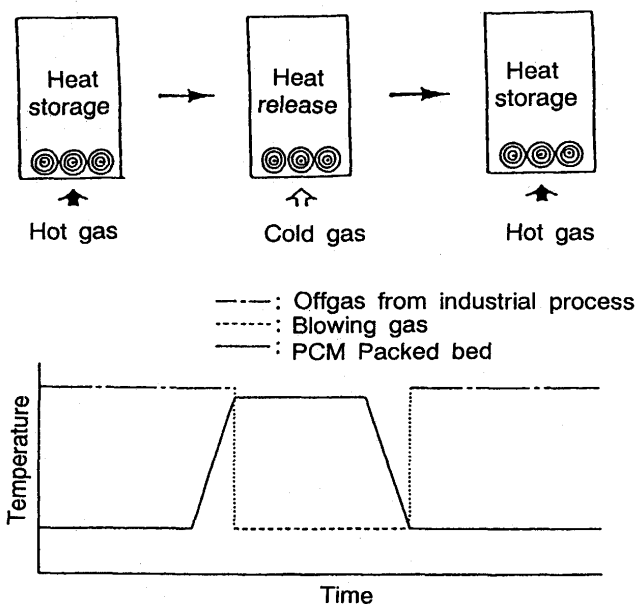
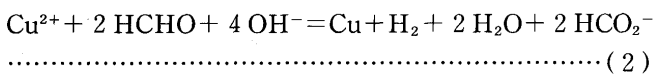


Fig. 7. Operation in the heat storage unit utilizing latent heat.

てはスラリー輸送が考えられ、これは後述する気体輸送に比べ高密度熱輸送の観点から有利である。

一般に水素吸蔵合金の使用に際していくつか解決しておかなければならない問題点がある。ひとつは吸蔵、放出に伴って結晶構造が変化し膨張収縮を繰り返すため、内部応力が発生し合金が数ミクロンまで微粉化し、充填容器の変形、配管内のダスト増加、さらには熱伝導率低下を引き起こすことである。そのため、数多くの研究者が圧粉成型の方法により改良を試みてきた。とりわけ、銅によるマイクロカプセル化技術は水素吸蔵能力を損ねることなく強度を改善し、併せて熱伝導特性を改善する手段と注目されている。この技術はプラスチック工業ではすでによく知られたメッキ技術であり、最近マグネシウム系水素吸蔵合金に適用された<sup>13)</sup>。この加工プロセスでは合金を予め20ミクロンまで粉碎し、銅の薄膜を被覆(マイクロカプセル化)し、プレスにより圧粉成型する。マイクロカプセル化は室温下で処理液(HCHO, NaOH, CuSO<sub>4</sub>, ethylene-diamine-tetraacetic acid(EDTA))に浸しさえすればよく、主として以下の化学反応により薄膜は形成される。



興味深いことに、得られた圧粉体は水素の透過に対して何等抵抗を示さず、コーティング前後の試料の反応速度に違いは見られない。これはメッキ時に発生する水素により膜構造が粒子表面に形成されたことによる。そのため、不純ガスによる被毒に対しても強い抵抗を示す。

圧粉体の強度に関しては水素吸蔵放出の繰り返し条件下

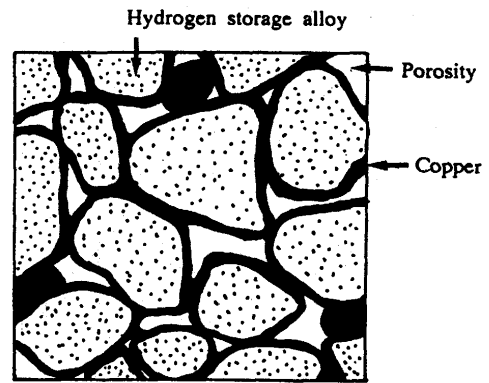


Fig. 8. Ideal microstructure of an encapsulated alloy.

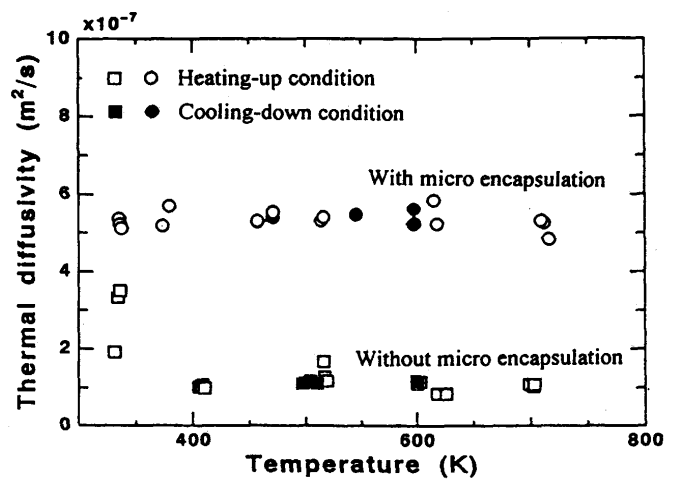


Fig. 9. Thermal diffusivity of Mg-Ni alloy with and without the Cu-microencapsulation.

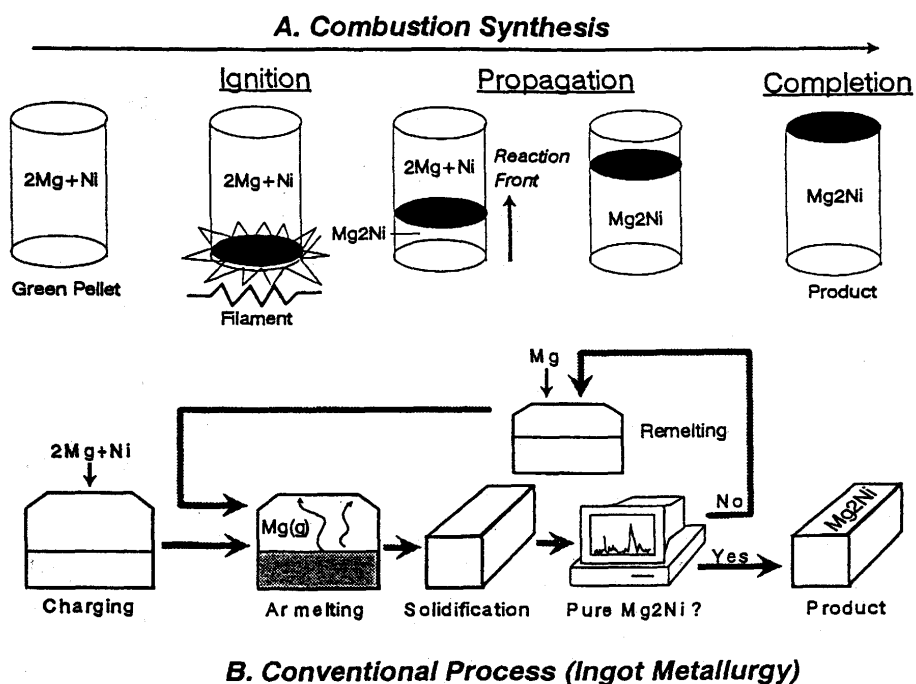


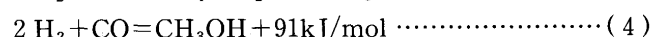
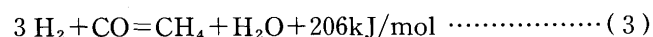
Fig. 10. Flow diagram of combustion synthesis (A) and conventional process based on ingot metallurgy (B).

で耐久性の試験がなされ、未処理合金が50-100回程度で亀裂が入り最後には割れたのに対して、マイクロカプセル処理の合金は200回の繰返し試験後でもなんら亀裂の発生は観察されなかった。これらの結果は粉体を包み込んだ銅が柔軟に変形し、圧粉時にはある種の接着剤として機能したことを証明した(Fig. 8)。加えて、銅自身はきわめて高い熱伝導率を持つためマイクロカプセル化により数倍熱伝導特性を向上させる(Fig. 9)。さらに、圧粉条件やマイクロカプセル化条件の最適化が試みられ、膜厚、圧粉圧力および圧粉保持時間が熱伝導率や繰返し強度に及ぼす影響が調べられている。注目すべき結果としては、1) 圧粉体の熱伝導率は銅の膜厚には依存せず、2) 圧粉成形時には合金は極めてゆっくりと変形する、いわゆる粘弾性挙動を示し30分以上の保持時間を要すること等が明らかにされた<sup>14)</sup>。

もうひとつの問題点として、マグネシウム系合金製造時の組成制御の難しさがあげられる。マグネシウムとニッケルを混合して溶解する従来の溶製法においては、マグネシウムが溶解時に揮発してしまうため、純粋なMg<sub>2</sub>Ni合金を製造するのは困難である。純度99.9%のMg<sub>2</sub>Niの試薬を製造するために、マグネシウムを添加し再溶解する、この手順を数回以上繰り返さなければならない(Fig.10下図)。そのため、長時間製造、エネルギー多消費のプロセスとなり、合金価格を引き上げていることが問題となっている。これに対してごく最近、純Mg<sub>2</sub>Ni合金製造の代替プロセスが提案された<sup>15)</sup>。その方法は固体間の燃焼合成反応(あるいは自己発熱反応、SHS)法に基づく。この基本原理は「あらかじめ十分によく混合された圧粉試料の一端を加熱し着火したならば、自分自身の大きい発熱により反応が保持され、高速で進行し高純度生成物が得られる」ことにある。この方法は1970年代のロシアでの偶発的な発見以来、80年代の後半になって日米を中心に世界的に広がり、現在まで400種類以上の物質に適用されている。Mg<sub>2</sub>Ni合金の燃焼合成では、粒子径、混合方法、プレス方法が圧粉体の着火に及ぼす影響が調査され、それほど大きな発熱ではないものの燃焼合成は可能で、マグネシウムの揮発が抑制され高純度の合金が得られることが判明した。特に微粒子ニッケル粉(1~2ミクロン)、湿式混合法、冷間等方圧プレス(CIP)使用の条件下で最も高純度合金が得られた。この製造方法は従来の水素吸蔵合金製造法に比べ、操作時間、所要エネルギー、製造価格を大幅に減少させる可能性を示唆した。

## 6・2 気体—気体/液体間反応

次の気体—気体/液体間反応を利用する熱輸送技術も実用化の大きな可能性を持っている。



メタンやメタノールの分解時の吸熱反応により排熱は回収されエクセルギー供給センターにパイプラインで輸送さ

れる。次いで必要時に、これらを合成し熱エネルギーを供給する。これらの方法はケミカル・ヒートパイプと呼称され、そこでは水を除くすべての物質は閉サイクルの中で消費されることなくリサイクルできるという利点を持つ。

メタネーション反応を利用する第一の方法(Ava-Adam法、式(3))は1970年代にドイツで原子炉排熱回収のため開発された。このシステムにおいては、1073-1123Kの範囲の排熱が回収され、放出時には723K程度の熱エネルギーが得られることが報告されている。合成分解のいずれの反応も触媒を必要とすることから、積極的に転化率が大きく長寿命で安価な触媒探索が行われてきた。製鉄用還元ペレットも十分な触媒能を有することが最近報告されているのは注目値する<sup>16)</sup>。また、現在排熱として全て廃棄している高転炉スラグは前述したように高いエクセルギーを有していることから、この反応を利用して化学エネルギーとして回収を試みることは魅力的であり、触媒性を検討してみる価値は十分にあるだろう。スラグは全産業中最高温度の廃熱で、高炉スラグの熱エクセルギーは銑鉄トン当たりでコークス約11kgに相当する。

一方、第2の反応(式(4))は423-523Kの比較的低温の熱を回収するのに適している。この反応を利用する熱輸送計画は国家プロジェクト(ニューサンシャイン計画)として現在積極的に推進中であり、試算によると30kmの距離を60%の効率で輸送することができるとされている。全エネルギーの40%はH<sub>2</sub>、CO、CH<sub>3</sub>OH等の輸送動力として消費される。この操作条件は比較的低温、低圧であるため、触媒開発を含めた反応効率の改善が鍵を握る技術と見なされている<sup>17)</sup>。

## 7. 結言

エネルギー問題、地球温暖化問題に対する解決方法として、ゼロエミッション製造の概念に基づき物質および熱の効率的流れの観点から考えられる次世代製鉄所システムの例を提示した。そこでは「都市を含めた異業種産業との共生」と「段階的熱利用」がキーワードと認識され、炭酸ガスを多量に含むガスを原料とするメタノール合成用触媒の開発や高効率な熱輸送技術の確立が急務の課題となっている。

熱輸送技術はいずれもパイプライン輸送が基本であるため、その基盤となる施設(インフラストラクチャー)の整備が不可欠である。現在、天然ガス輸送用に国内を縦断するパイプライン整備が計画されているが、その際にパイプを耐水素用に配管しておくのが最も早道と考えられている<sup>18)</sup>。一方、ドイツにおいてはThyssen製鉄所等の民間企業、地方自治体、地域熱供給公社の3社協力のもと、隣接する2都市に1980年以降熱幹線を使用して温水の形で熱供給を開始している。25%は政府の補助金を受けており経済的利点はないが地域との共生を重視して実行している。

さらに今後、重油価格の動向とは無関係にエネルギー、

環境問題の深刻さ、エネルギー供給システム確立の重要性に関して国民的同意を得ることも課題とされている。

最後に本文の一部は新エネルギー・産業開発機構(NEDO)の村上昌三氏との議論により生まれたことを記して謝意を表す。

### 文 献

- 1) Gunter Pauli: 化学工学, 59 (1995), 562.
- 2) (財)エネルギーセンター: 省エネルギー便覧, 文栄社, (1992), 8, 9.
- 3) エネルギー経済統計要覧, 日本エネルギー経済研究所編, (1995), 207.
- 4) T. Akiyama and J. Yagi: The Proc. Tech. Conf., (AIME), (1988), 179.
- 5) K. Hijikata: IEA Int. Conf. on Technology Response to Global Environmental Challenges, Kyoto, (1991), 359.
- 6) T. Akiyama, H. Sato, A. Muramatsu and J. Yagi: ISIJ International, 33 (1991), 1136.
- 7) A. Muramatsu, H. Sato, T. Akiyama and J. Yagi: ISIJ International, 33 (1993), 1144.
- 8) 佐藤弘孝, 秋山友宏, 村松淳司, 杉本忠夫, 八木順一郎: 石油学会誌, 38 (1995), 390.
- 9) (社)日本鉄鋼連盟: 一貫製鉄所の未利用エネルギー, (1992), 10.
- 10) J. Yagi and T. Akiyama: Journal of Materials Processing Technology, 48 (1995), 739.
- 11) T. Akiyama, Y. Ashizawa and J. Yagi: Heat Transfer Japanese Research, 21 (1992), 199.
- 12) I. O. Sayler and A. K. Sircar: Int. Ene. Conv. Eng. Conf., 25 (1990), 236.
- 13) T. Akiyama, T. Fukutani, H. Ohta, R. Takahashi, J. Yagi and Y. Waseda: AIChE Journal, 41 (1995), 1349.
- 14) T. Akiyama, T. Tazaki, R. Takahashi and J. Yagi: Journal Alloy and Compounds, (1996)印刷中
- 15) T. Akiyama, H. Isogai and J. Yagi: International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 4 (1995), 69.
- 16) 沈峰満, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 78 (1992), 1658.
- 17) 通省産業省: ニューサンシャイン計画ハンドブック, (1993)
- 18) 平田 賢: 省エネルギー論, テクノライフ, (1994), 116.