

鉄鋼業の水素を核としたクリーンエネルギー 供給基地としての可能性

実原 幾雄・高松 信彦

新日本製鐵株式会社

〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3

A possibility of Japanese Steel Industry as a comprehensive clean energy
outsourcing base with H₂ at its center core source

Ikuo JITSUHARA and Nobuhiko TAKAMATSU

Nippon Steel Corporation

6-3 Otemachi 2-Chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8071

Japanese Steel Industry has so far been recognized as a typical complex of large-scale producer of a fundamental material(steel) and large-scale consumer of energy. However, for the coming materials recycle society and hydrogen energy society, Japanese Steel Industry has been recently reevaluated to play a key role mainly due to its specific large-scale high-temperature infrastructure along with its operating technologies. Its by-products are also notable, especially, COG(Coke Oven Gas: by-product gas from Coke Oven Batteries) seems to be promising as a clean energy source for its amount and high H₂ content. Present and future status of COG as a hydrogen outsourcing source was discussed along with an ongoing H₂ amplifying technology development program. And a future perspective on Japanese Steel Industry as a comprehensive clean energy outsourcing base was proposed.

Key words: Steel Industry, Coke Oven Gas, hydrogen, waste heat recovery, catalytic reforming

1. 緒言

鉄鋼業は、大量のエネルギーを消費しつつ産業基礎素材である鉄鋼製品を大量に製造する産業との認識からCO₂大量排出のイメージがつきまといがちであるが、本来、鉄鉱石の大型還元設備である高炉をシンボルとするだけに、究極のクリーン燃料と期待される水素とは還元剤としての関わりが深く、水素製造技術を含めた水素還元製鉄の検討は現在に至るまで数多く行われてきた[1]。

一方、オイルショックを契機として大型高温設備の熱回収を主体とする省エネ技術開発を強力に推進してきているが、最近では、グローバルな持続可能な発展が喫緊

の課題として認識され循環型経済システムの構築が急がれる中、高性能鉄鋼製品の社会的インパクトのLCA (Life Cycle Assessment) 評価、製鉄高温インフラを活用した廃プラケミカルリサイクル等にいち早く取り組んでいる[2,3]。これら最近の動きは、従来のプラント内クローズド型アプローチを離れ、業界の垣根を越えた物質、材料サイクルの最適化を指向した試みであり、時代の流れに即応した動きであるとも評価されるが、従来型アプローチの行き詰まりを示唆するものとも考えられる。

エネルギーに関しても同様であり、「使用合理化」、「クリーン化」、「再生可能化」の動向に対応して、鉄鋼業として水素に着目し、国家プロジェクトを推進しつつ保

図1. 鉄鋼製造プロセス概要

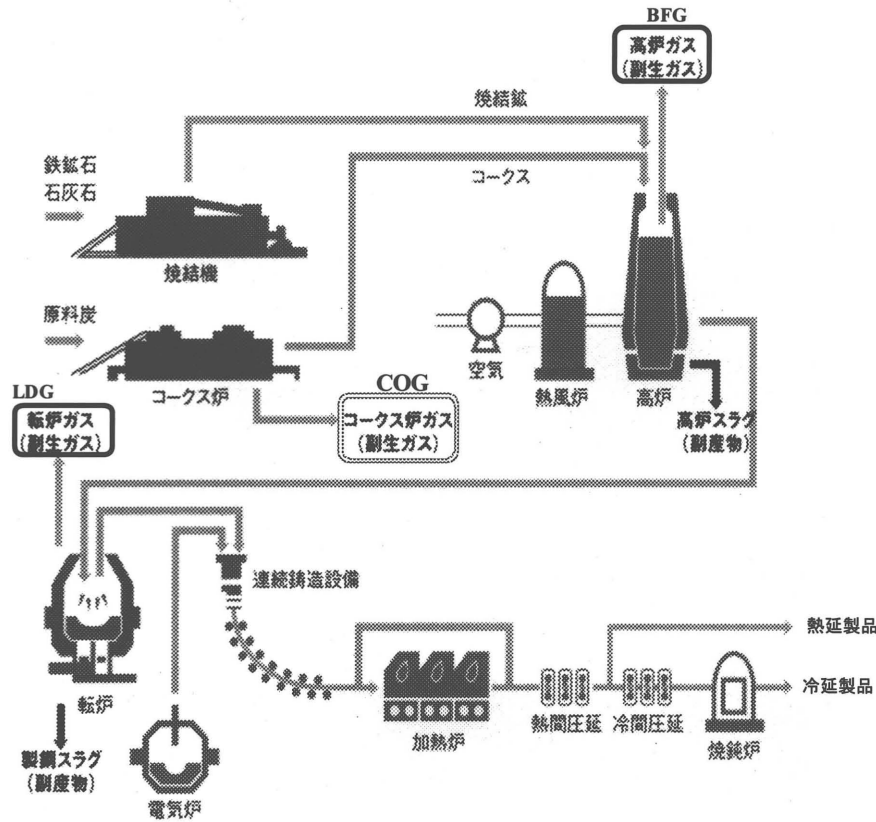


表1. 副生ガスの特徴と高付加価値化の可能性

('95統計ベース)

| Gas | | COG | LDG | BFG |
|-----------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 発生量 (百万 Nm ³ /Y) | | 12,763 | 7,000 | 123,668 |
| プラント内消費 (百万 Nm ³ /Y) | | 8,087 | 4,211 | 65,032 |
| 発電・ボイラー利用 (百万 Nm ³ /Y) | | 1,820 | 1,814 | 33,372 |
| ガス組成 | H ₂ | 55.6 vol. % | 3.0 vol. % | 2.9 vol. % |
| | CO | 5.3 | 71.4 | 21.9 |
| | CO ₂ | 2.5 | 8.9 | 21.0 |
| | H ₂ O | 2.7 | 2.7 | 0 |
| | N ₂ | 4.2 | 13.9 | 54.2 |
| | O ₂ | 0.2 | 0.7 | 0 |
| 炭化水素 (CH ₄ 主体) | | ca. 30 | 0 | 0 |
| 発熱量 (kcal/Nm ³) | | 4,000~4,500 kcal/Nm ³ | 2,000~2,200 kcal/Nm ³ | ~800 kcal/Nm ³ |

【発生副生ガスの規模観】

- 全副生ガス発生量：
 総発熱量 120 × 10¹² kcal/Y
 原油換算 16 百万 kl/Y
- 日本の総一次エネルギー供給量の3%
 参考：日本の一次エネルギー総供給量
 550 百万 kl/Y (原油換算)

- 発熱量増幅による高効率発電用燃料化
 ~GTCC用燃料へのグレードアップ
- 高発熱量ガスとの混合燃焼
- CO₂回収 (固定化)
- 酸素富化燃焼 (60%酸素富化空気必要)

【BFG】【グレードアップ化】

【COG】【水素源として高付加価値化】【LDG】

- 現行COG含有水素の潜在的外販可能量：27億Nm³/Y
 (燃料電池実用化戦略研究会報告：'98)
 (参考：石油化学：10億Nm³/Y、ソーダ電解：6億Nm³/Y)
- COG改質・水素増幅により生成する全水素量：166億Nm³・H₂/Y
 参考：水素を全量燃料電池車に供給した場合：1100万台
 自動車保有台数：7172万台 (内、乗用車5116万台)
- COG全量をメタノール合成に利用した際のメタノール製造量：7百万kl/Y
 参考：日本のメタノール輸入総量：3百万kl/Y

- CO水性ガスシフト反応による水素製造：
 50億Nm³/Y
 → 水素燃料電池車320万台/年 走行可能
 (水素精製時に回収されるCO₂：
 ~300万トンのC/年)
- COガス源としての活用：メタノール原料

有インフラ、副産物の見直しを実施している[4]。

本稿では、その一端を紹介しつつ、鉄鋼業の水素を核としたクリーンエネルギー供給基地としての可能性について考えを述べてみたい。

2. 高炉法一貫製鉄プロセスの特徴と副生ガス

高炉法一貫製鉄法のエネルギー面の特徴は、コークス炉、高炉、転炉という、いわゆる上工程の設備に原燃料が大量に投入され、副生するガス、高温廃熱を回収して鉄鋼プラントの殆どの(～90%) エネルギーを賄うに足るといって大型高温設備集約に固有のエネルギーの集中投入・回収・有効利用にある(図1参照)。図1には副生ガスの種類、COG(コークス炉ガス)、BFG(高炉ガス)、LDG(転炉ガス)と発生工程を記入した。それぞれのガスの特徴を表1に示す。表1から明らかであるが、石炭を原料にするとは言え、石炭火力発電の排ガスとは異なりプロセス固有の特異な成分で構成される副生ガスが複数分散生成するのが特徴である。特に、COGは石炭を乾留して高炉に供給する還元剤(コークス)を製造プロセスで副生するガスであり、揮発成分としてメタン(CH₄)と水素に富むガス組成となり、水素外販ソースとして期待される所以である。

BFGはその莫大な発生量と共に、水性ガスシフト反応により水素に転換可能なCOを20%程度含有することから水素源とも考えられるが、窒素、二酸化炭素を大量に含有することから、発熱量向上のための二酸化炭素分離(回収・隔離を成立させようとする経済政策上の仕組みが必須要件)または、高効率燃焼のための酸素富化(～60%)燃焼(安価大量酸素供給技術の実用化が必須要件)が高付加価値化のステップと考えている。一方、70%ものCOを含有するLDGも水素源としての有力候補とは考えられるが、水性ガスシフト反応で水素と共に生成する二酸化炭素の取り扱いも含めた総合ガス利用のための社会・経済基盤を確立していく過程の中で取り扱いを検討すべきものと考えている。又、COは、クリーン液体燃料の合成原料としての利用可能性もあり、我が国の総合エネルギー政策とリンクして有効活用を検討するのが妥当であろう。

3. COGの水素供給源としての位置づけ

COGは、発生量、水素濃度の点で水素供給ソースとして魅力があり、一部の鉄鋼プラントでは小規模ではあるものの内製用途(鋼板焼鈍還元雰囲気調製、等)も含めCOGからの水素回収・精製・外販事業を展開しており、前処理も含めた水素精製技術としての水素PSA(圧力スイング吸着法)プラントの設計・運転経験も豊富である。又、コークス炉を有する鉄鋼プラントは首都圏を始め、大規模需要先となる主要都市部に近接して全国に分布していることから、立地面でも優位なポジションにある。

COGの発生量は140億Nm³/年で、含有する水素量で70億Nm³/年強に達する。但し、鉄鋼プラントのエネルギー構造は副生ガスの燃料利用でクローズドしており、外部供給する場合は外部からの燃料購入が前提となる。この外部燃料供給を前提とした場合に、PSAでの水素回収率を60%とみて40億Nm³/年強の水素供給が可能と試算もあるが、鉄鋼プラントには立地するローカルなエネルギー事情を考慮して副生ガスを燃料とした発電プラントが隣接しており(多くは、電力会社との合弁会社)、外部燃料購入に関し制約がある鉄鋼プラントもあることを付記しておきたい。

ここで、コークス炉固有の特徴について概要を説明し今後の展望を含め水素供給ソースとしての可能性に論及してみたい。

コークス炉は鉄鉱石の還元に必要なコークスを製造する基幹大型プラントであるが、副産物としてCOGのみならず液状成分としてのBTX、軽油、タールを併産しコールタール化学産業の発展を支えてきた。つまり、石炭から固体(コークス)、液体(BTX、軽油、コールタール)、気体(COG)を生産すると共に有効利用が図られてきており、設備の規模とも相俟って総合エネルギー効率は95%に達する。5%のロスは、COG発生時に液状成分を随伴するが、この液状成分をクエンチして分離するために800℃という高温から常温までアンモニア水散布により冷却する過程で失う顕熱である。全コークス炉で45万kl/年の原油換算エネルギー損失と見積もられている。高炉法一貫製鉄プロセスのエネルギー構造とCOG顕熱ロスの位置付けを図2に示す。

又、持続可能な発展を指向した循環型経済システムの確立に向け官民を挙げてリサイクル活動が活発化しつつあり、なかでも、鉄鋼プラント固有のコークス炉、高炉との認定を受け処理量が拡大しつつある(現状、容器包

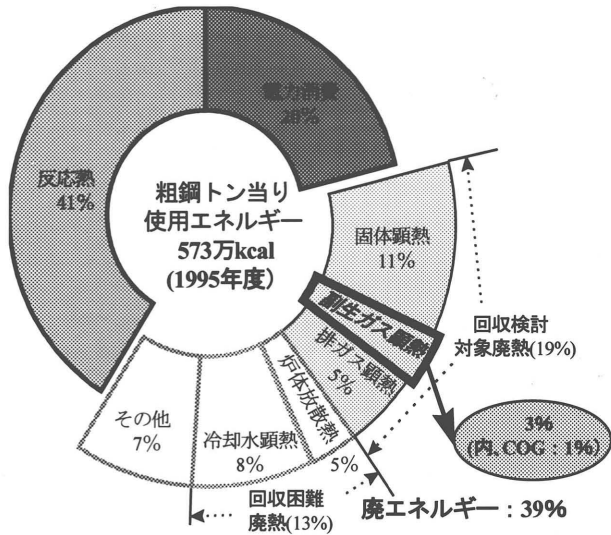


図2. 高炉法一貫製鉄プロセスのエネルギー構造

装プラスチック16万ト/年+産廃で21万ト/年の処理能力：日本鉄鋼連盟の省エネ自主行動計画では、2010年で100万ト/年の処理=1.5%の省エネを追加的施策として盛り込み）。

概要を図3に示す。尚、図中には経済産業省の燃料電池・水素エネルギー技術開発補助金制度に則り、鉄鋼業界が参画している水素製造・輸送に関わる代表的な2プロジェクトのスコープを記入してあるが、何れもコークス炉をベースとしている。図中にある「燃料電池発電実証プロジェクト」では、平成14年度から3年間の計画で、新日本製鐵株君津製鉄所のコークス炉発生COGを原料に、液体水素の高効率製造（200kg・H₂/日）の研究等を行うと共に、同プロジェクトで設置される有明水素ステーションに輸送して利用するまでの一貫実証研究を計画している。一方、「水素製造プロジェクト（ガス化・改質）」は、この実証プロジェクトの次世代バージョンとも位置付けられるが、COG発生時に随伴する液状成分を高温顕熱とガス成分を利用して触媒により軽質ガス（CH₄、H₂、CO）に転換する顕熱利用技術開発と、この軽質成分を水素転換して水素を増量する技術開発を一貫して行うものである。顕熱および液状成分が転換してガスエネルギー増幅となるため外部エネルギー補填が不要な水素供給技術となることが期待される。

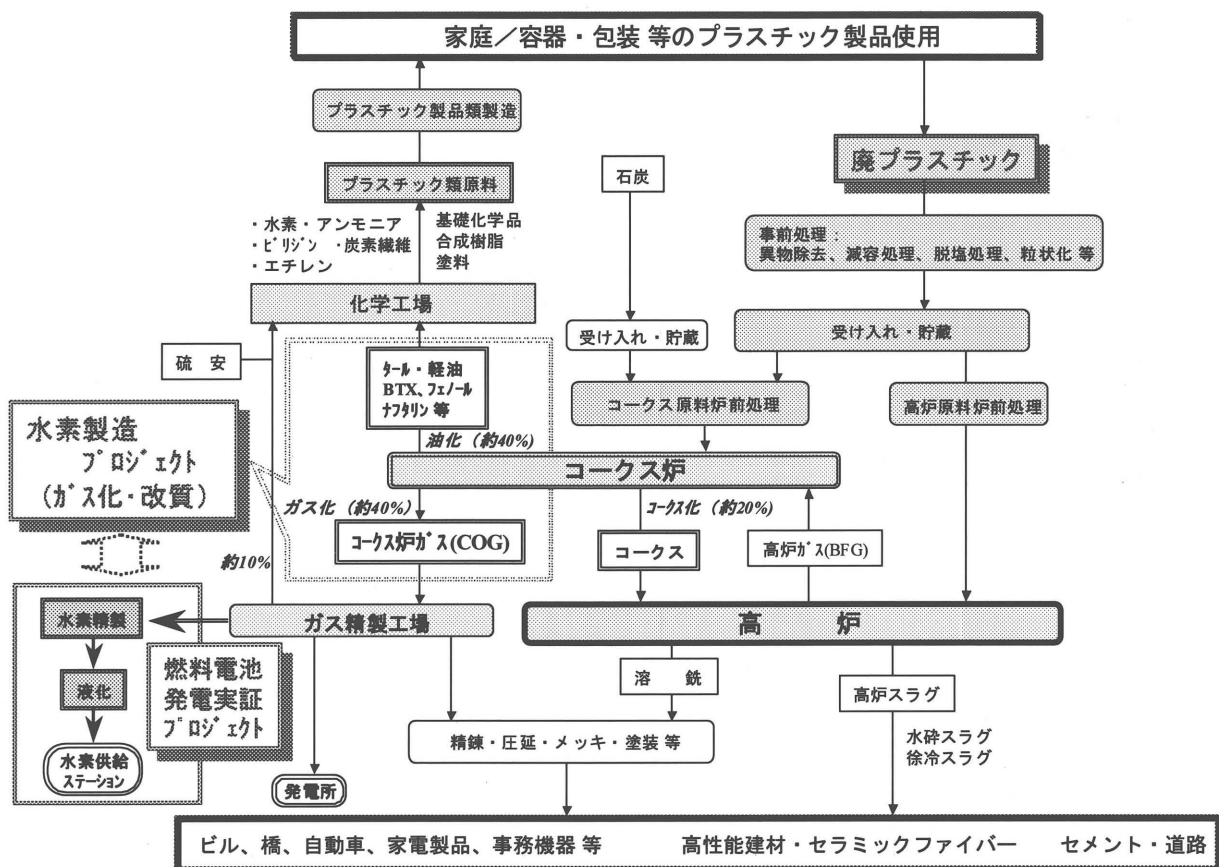


図3. 製鉄高温インフラ利用廃プラケミカルリサイクルと水素プロジェクトとの関連

表1にも示してあるが、最終的な水素生成量は、166億Nm³/年と試算され、現行のCOG含有水素量の2倍以上となり、ガスエネルギー増幅分を外販可能として40億Nm³/年強の水素供給が見込まれる。

以上述べてきた様に、鉄鋼プラントに固有なコークス炉は、立地、スケールメリット（設備規模に起因する高エネルギー効率、COGの大量発生・高水素含有）で水素供給ソースとしての優位性を持つのみならず、循環型経済システム（静脈系産業基盤）確立に向けた廃プラスチックの原料化が鉄鋼プラントの省エネと僅かではあるがCOG中の水素増幅（廃プラスチックは石炭よりも揮発成分に富み、水素生成量大）に繋がるという広域社会貢献としての側面と、廃熱の水素を主体とする軽質化学エネルギー転換というエネルギー使用合理化新機軸（熱エネルギーの化学エネルギー転換技術）開発要素の内包という側面も併せ持つことは着目すべき点であると認識している。

4. 高温COGガス化・改質水素増幅のための技術開発

前章でも若干触れたが、発生時の高温COGの軽質化学エネルギー転換技術開発は国家プロジェクト「製鉄プロセスガス利用水素製造技術開発」として平成13年度から5年間の予定で研究開発が行われている。要素技術構成を図4に示す。詳細は成果報告書がに譲るとして、技術開発のポイントは、高温下での液状成分の分解・改質によるドライガス化技術とドライガス化により回収可能となる顕熱の回収技術である。前者では新規触媒設計が、後者では技術新機軸として混合伝導性固体電解質（酸素イオン、電子の両者の輸送能を有する酸素欠損型Perovskite構造酸化物）酸素分離膜開発と、触媒との組合せによる混合伝導性固体電解質膜型改質反応器開発である。特に、後者は、米国エネルギー省（DOE）が天然ガス、石炭を原料とした高効率発電・合成ガス製造・水素製造プロジェクトとして大規模に推進している。

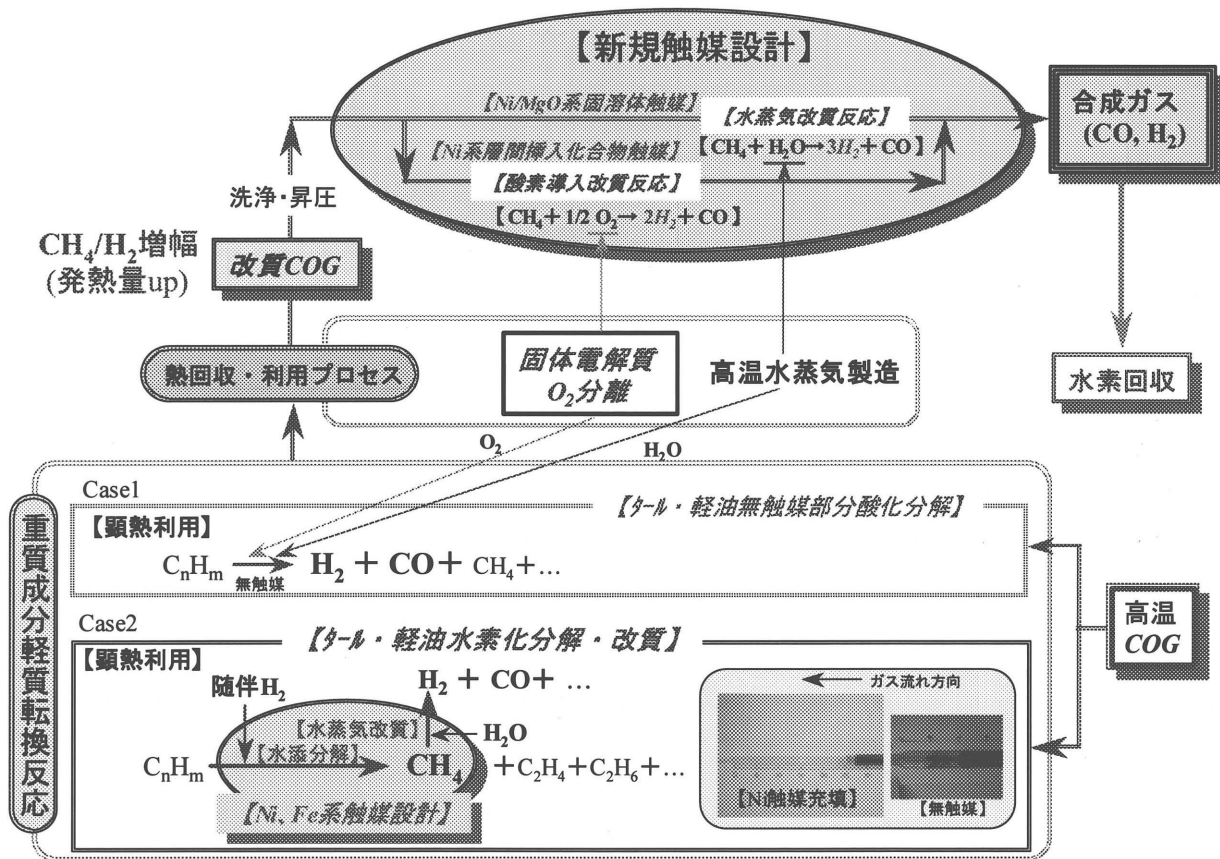
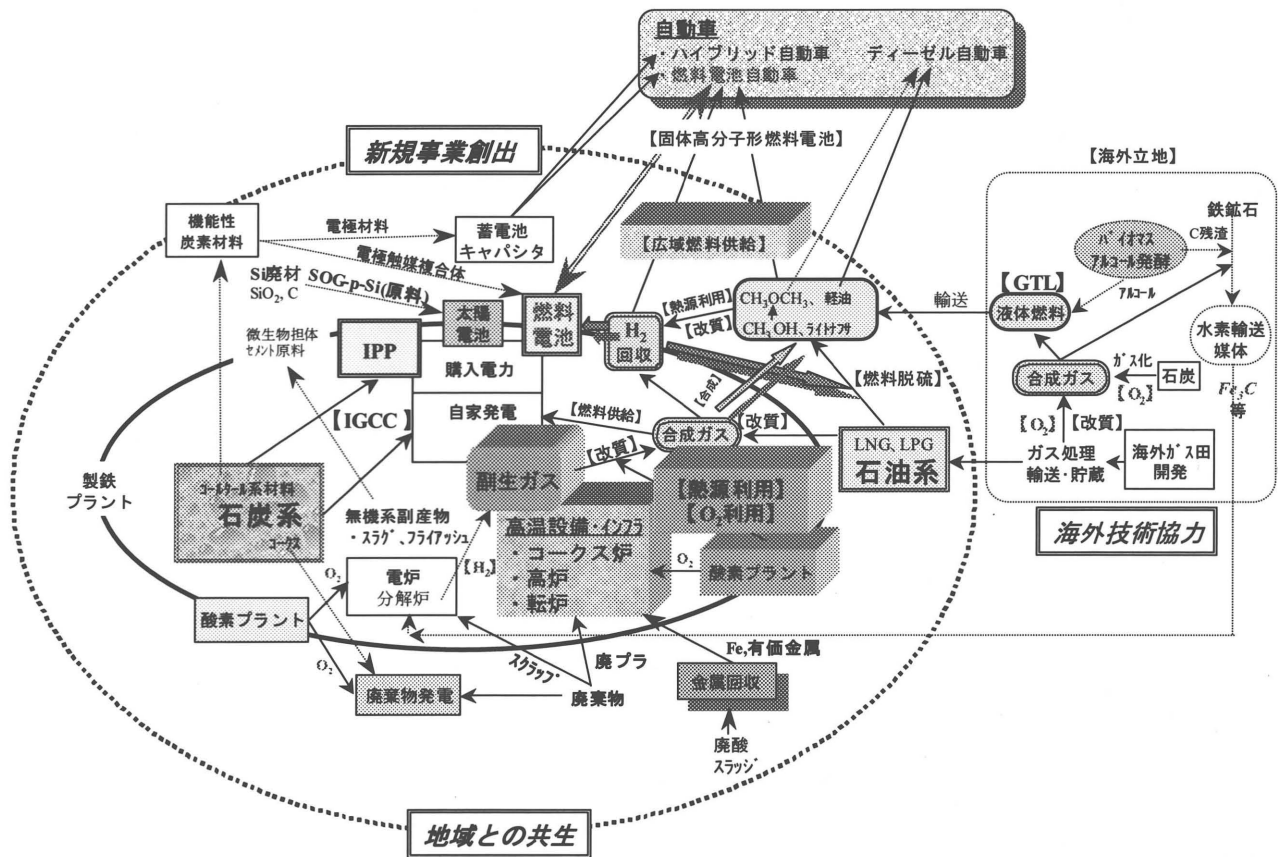


図4. 「製鉄プロセスガス利用水素製造技術開発」における要素技術構成

図5. 鉄鋼プラントのクリーンエネルギー供給基地としての将来像 (案)



現在まで、高温下 (>700°C) でのタール水素化分解・改質活性を有するNi, Fe系触媒、硫化水素が高濃度に存在する (~2000ppm) 反応系でメタン改質活性を有するNi₂Mg_{1-x}O系固溶体高活性触媒の開発に目処が着きつつある。又、混合伝導性固体電解質に関しても先行する米国に型を並べるだけの材料開発に目処が着き、管状膜開発とそのモジュール化開発に重点をシフトしつつある。何れも、材料の基礎設計から工業製造処方開発と総合システム化開発に向けてレベルアップを図る時期と認識され、周辺環境変化に適合して事業規模を柔軟に調整可能な設備構造設計を行えるだけの基本プロセス設計、技術検証のステップを踏むべくスケールアップ実験設備の検討に着手している。

粗試算ではあるが、2000t/日のコークス製造規模の大型コークス炉を想定して、これまでの研究知見をベースにFSを実施した結果、当初計画通りの水素増幅率 (~2倍) 及び、水素ガス製造原価として現行COGからの回収プロセスに比し25%程度の低減可能性を確認している。

これらの技術開発は、高温COGの処理技術に止まらず、固形物乾留・ガス化時に生成する重質タール成分の水添ガス化、改質合成ガス化に応用可能な触媒反応設計のデータベースを提供し、又、天然ガス水蒸気改質触媒の新たな設計指針を提示しうるものと考えられる。又、混合伝導性固体電解質を用いた酸素分離膜、部分酸化膜型反応器は、電力—酸素—水素等の複数の製品をプロセス熱源をカスケード的に高度利用することにより同時生産する新たな概念 (Co-Production) の工業化案件として汎用性を有するものと期待される。

5. クリーンエネルギー供給基地としての将来展望

鉄鋼プラントの将来像を図5に私案として纏めた。燃料電池・水素エネルギー社会に対する期待は高く、産官学を挙げて大規模な研究開発が行われている。水素の大量・安価供給技術開発もその一環で行われており、鉄鋼業の副生ガスがその有力候補であることを本報告で

述べてきた。しかし、水素の輸送・貯蔵・供給を含めたインフラの整備、水素の高効率利用技術としての燃料電池の実用化開発と連動しつつバランスある技術開発が望まれるのは言うまでも無く、事業化を念頭に置いた長期的事業開発論と政策論を十分に議論を戦わせ、立上り期～成長期に渡り適用可能なビジネスモデルの構築と国策としての戦略立案、支援の在り方が厳格に問われることになってこよう。

鉄鋼業としては、水素エネルギー社会構築の橋頭堡として循環型経済システムを捉え、インフラとその周辺技術を駆使して経済合理性を確保しつつリサイクル社会の基盤構築に尽力すると共に、副生するガスの水素転換を機軸とした高付加価値化のための技術開発を事業創出に結びつけるための中長期アクションプラン策定が必須となる。そのための一つの視点が、本稿で述べたCOG高温頭熱利用改質による鉄鋼プラントの省エネメリット享受と水素外販余力の確保である。改質COG含有水素部分回収→改質COGの水素転換による水素増幅・大量供給という2段階のステップを踏むことにより水素外販市場の成立状況に応じて柔軟性ある水素供給体制の構築が可能である。

一方、水素=新燃料という図式から離れ、既存燃料クリーン化のための改質原料、既存燃料クリーン燃焼のための燃焼助剤としての商品化・事業化展開を図ることは水素エネルギー社会の実現に向けた重要なステップと認識している。又、合成ガスが主要構成成分となる鉄鋼プロセス副生ガスの特徴を活かした液体燃料合成（合成ガスが原料）事業の可能性も今後の資源問題如何では浮上してくる事が想定される。これらを含め、鉄鋼プラントと近隣との共生・コンビナート化を基本としたクリーンエネルギー供給基地構想の一思案が図5である。多くの課題が山積するが、鉄鋼業として応分の役割を果たして行きたい。

参考文献

- [1] 実原幾雄, 化学工学, 63(12), 677-681(1999)
- [2] 高松信彦, 古川高司, 金属, 69(5), 413-418 (1999)
- [3] N. Takamatsu and I. Jitsuvara, J. Soc. Inorg. Mater. Japan (Muki-Materiaru), 9, 224-234 (2002)
- [4] 武田卓, 省エネルギー, 55(1), 25-28 (2003)