

# 製鉄プロセスにおける低炭素・脱炭素への将来展望

Future Perspective on Low Carbon and Decarbonizing in Ironmaking Process

有山達郎

Tatsuro Ariyama

東北大学 多元物質科学研究所  
教授

## 1 緒言

現在の地球温暖化問題の焦点は2020年時点での中期目標設定、ならびに2050年における50%以上の大幅削減など長期的な観点からの目標観とその達成に向けてのシナリオ作りに移っている。地球温暖化問題はこれまでの経験の範疇を超えた非常に大きな問題であるため、その共通認識を得ることも難しく、目標ありきの議論も優先されがちであるが、個別の産業分野では技術論をベースにした着実な検討、解析の積み重ねなど現在と連続性のある将来像構築も必要と思われる。鉄鋼は地球温暖化に対して影響度は大きく、また国内の主要な産業である故、注目度は高い。鉄鋼プロセスの技術開発の歴史は長く、今まで様々な課題解決に向けての技術開発が実施、展開され、我が国の鉄鋼技術は世界でもトップレベルにあるが、技術開発の新たな局面に入ったと言える。すなわち、地球温暖化に向けての研究開発は自然界も含む社会全体との整合性、資源とエネルギーの望ましい利用、さらに経済合理性をも考慮し、広い視野で根本から研究開発の方向を見定めなければならない。今、鉄鋼製品、プロセスの価値を計る尺度が変わりつつある。本稿では鉄鋼の地球温暖化対策で最もキーになる鉄鋼の製鉄分野において、将来に向けて考えるべき技術課題、新しい可能性の検討、海外動向も含め今後の方向を総括した。特に原理的な観点から、地球環境問題を克服しつつ将来に向けて製鉄分野の技術発展としてどのような姿があるかなど将来的プロセスの展望をまとめたものである。

## 2 炭素利用の現況と今後のCO<sub>2</sub>削減の方向

### 2.1 現況と課題

鉄鋼プロセスは炭素を主たる熱源、還元材として利用し、

その所要炭素量がそのまま生産コスト、生産効率に関わるため、長い歴史を通じてその削減と効率的利用に努力してきた。製鉄所にインプットされた炭素は種々の工程で最終的にCO<sub>2</sub>として排出されるが、高炉還元材比が製鉄所のインプットカーボンと対応し、製鉄所発生CO<sub>2</sub>と連動する。高炉還元材比を一つの指標として、この数十年の流れの中で製鉄所排出CO<sub>2</sub>の大まかな動きを把握することができる。約50年前から現在に至る国内高炉の還元材の推移を図1に示す。1960年以降、図中に示した高炉操業の様々な改善、新技術の導入によって還元材比は大きく減少している。その後、重油から微粉炭へなど補助還元材の転換によって増減があるが、現在では停滞気味に見える。既存技術の飽和点に達しているとも言える。図2は至近の鉄鋼主要生産国の還元材比比較を示す<sup>1)</sup>。我が国も含め、韓国、台湾、EUなどの国における還元材比は500kg/t前後であり、大きな差はない。還元材比の微小な差は主に原燃料ソースが異なるためである。一方、上記の国以外では、500kg/tの後半、あるいはそれ以上の還元材比であり、それぞれの国内での製鉄所間の差異もあると思われるが改善の余地を残している。図1の日本の経過を見て

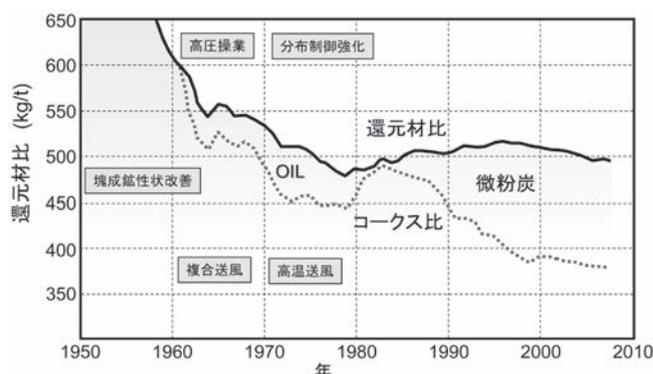


図1 我が国の高炉還元材比の推移

わかるように、還元材比 500kg/t レベルにおいて数 10kg/t の差は大きい。

資源、エネルギーに乏しい我が国では、所要炭材の削減と同時に各種の省エネ技術は積極的に導入され、CDQ、炉頂圧発電などの普及率は周知のように世界のトップレベルである<sup>2)</sup>。その結果、現在、鉄鋼生産のエネルギー利用効率は世界のトップに位置する<sup>3)</sup>。我が国は低品位原料も使いこなし、世界で最も少ないエネルギー消費で効率的に良質な鉄鋼製品を製造しているとも言える。これらの現況を考えると、当面の CO<sub>2</sub> 削減に対しては海外への技術移転の促進、また地球規模で実効性のあるルール作りが必要であろう。しかし、長期の CO<sub>2</sub> の大幅削減を考える時、問われるのは一段、高いレベルの目標達成であり、鉄鋼先進国の我が国がその技術ポテンシャルを生かし、トップランナーとして既存技術にとらわれない革新技术による突破口を開き、新たな展望を示すべきと思われる。

## 2.2 一貫製鉄所の CO<sub>2</sub> 発生

一貫製鉄所は大量の石炭など化石燃料を上工程での還元材、熱源として用いて溶銑を製造し、同時に発生するガスを各種工程のエネルギー源として供給することにより成立している。特に我が国では購入エネルギー単価が高いこともあって上記のように省エネ設備を積極的に導入し外部エネルギーの導入比率は少なく、エネルギー自己完結度が高い。一般的な一貫製鉄所をモデルに、基本となる炭素の流れを図3に示す<sup>4)</sup>。インプット炭素は石炭として製鉄所に入力され、製銑工程内で還元材、熱源として消費される。同時に発生するコークス炉ガス、高炉ガスは製銑工程内で消費され、余剰エネルギー E は下工程に供給される。一部のエネルギーは発電、酸素製造プラントで利用され、電力、酸素として製銑工程で再利用される。すなわち、インプット炭素 X は

$$X = Y + Z + P + Q$$

で表され、製鉄所の排出炭素は Y、Z、P、Q の総和となる。インプット炭素のほとんどは高炉を通過し、製銑工程で利用済み炭素は図3の Y として、未利用のガスは供給エネルギー E を経て最終的に P、Q として排出される。高炉で低還元材比操業を指向することはインプット炭素減に繋がるが、同時に余剰エネルギー E の減少を意味する。総合的なエネルギー利用の整合性、炭素の流れを勘案しながら、CO<sub>2</sub> 削減の方策を見いださねばならない。

製鉄所を構成する個々のプロセス別に排出される CO<sub>2</sub> 排出量の計算の一例を図4に示す。図3の炭素フローにしたがって、高炉では鉱石還元による CO<sub>2</sub> が生成し、この高炉ガスとコークス炉ガスを燃料として使用するコークス炉、焼結機、熱風炉、発電所、さらに下工程の加熱炉など様々な工程から CO<sub>2</sub> は排出される。この数字は製鉄所によって多少異なるが、高炉の還元によって直接的に生成する CO<sub>2</sub> は概ね 20% であり、他は製銑工程から供給されたエネルギーの消費

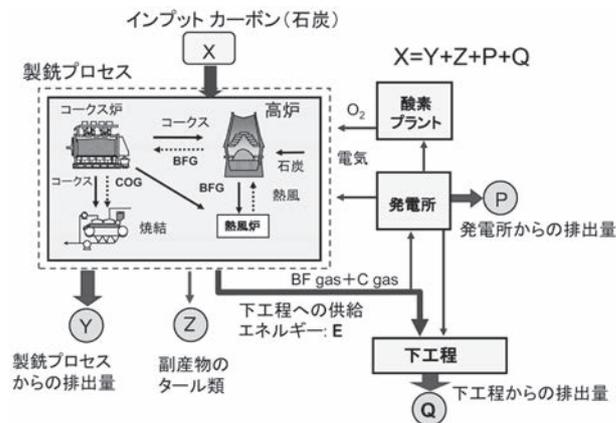


図3 一貫製鉄所の炭素フロー

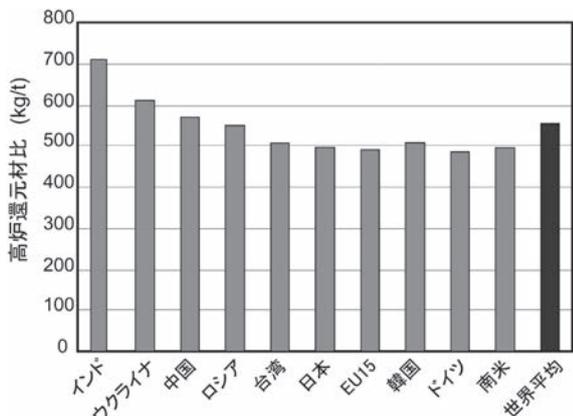


図2 鉄鋼主要生産国の高炉還元材比

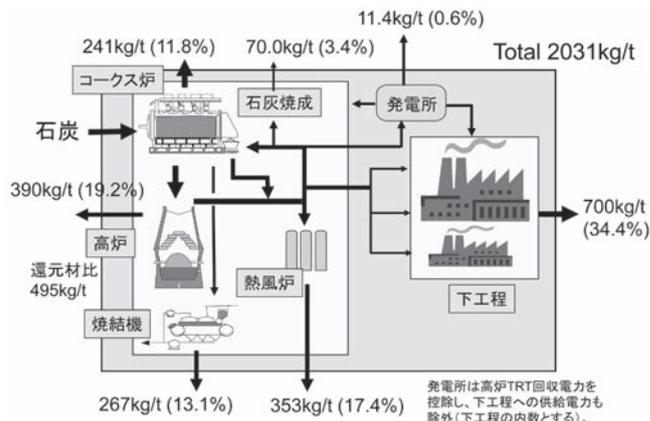


図4 製鉄所のプロセス別の CO<sub>2</sub> 発生量の例

に伴うCO<sub>2</sub>発生である。CO<sub>2</sub>削減のためには、製鉄所の機能を考えた上記のエネルギーバランスの整合性と排出CO<sub>2</sub>の全体像を考慮しなければならない。

### 2.3 今後の方向

鉄鋼生産に伴うCO<sub>2</sub>発生の構造は定性的に図5で示される。同図にはCO<sub>2</sub>削減の大きな方向も示した。右辺第一項はプロセス改善による効率アップと省エネの同時達成、さらには新たな低炭素技術など所要炭素量の削減を意味し、第二項は同じエネルギー消費であってもクリーンエネルギー、再生可能エネルギーの利用など炭素から離れる技術の推進を意味している。第一項の内訳として図4でわかるように製鉄工程の高炉だけでなく、焼結機、コークス炉も同時に対象になる。石炭事前処理に特徴を持つSCOPE21のようにコークス炉の省エネも不可欠である<sup>5)</sup>。原料品位の向上、コークス炉、焼結機の生産歩留まり向上も地味であるが無視できない。製鉄所における廃棄物リサイクル、バイオマス利用はエネルギーバランスの制約を受けずに脱炭素が図れ、実効性は高い。多角的な取り組みが必要となる。また、これらは入力されるカーボンの削減、ないし炭素以外の原料へ転換する方法であるが、将来的に例えば50%以上のCO<sub>2</sub>排出大幅削減などに対してはCO<sub>2</sub>分離、固定の導入によって最終出口のCO<sub>2</sub>排出を削減することも必要となろう。

## 3 低炭素高炉の概念

### 3.1 高炉還元材比低減手段とその効果

高炉はコークス炉、熱風炉などと物質、熱収支的に繋がっており、高炉の還元材比低減が製鉄全体のリンクを経て製鉄全体の炭素量削減となる。その高炉還元材比低減の原理的な考え方と方策を図6に示す。詳細は既報に述べたが<sup>6)</sup>、概念として高炉内ガス組成を高炉の還元平衡により近づけること、あるいは熱収支の改善などが挙げられる。ただし、これらは既に日常的に限界近くまで実施されており、改善の余地は少ない。還元平衡自身を制御する方向に今後の展開がある。還元平衡温度を低温側にシフトさせて平衡ガス組成を酸

化側に動かし、還元材比を低減する方法は古くからの提案である<sup>7)</sup>。手段としては高反応性コークスを使用し、低温から活発なコークスガス化反応を励起させ、その吸熱効果によって炉内温度分布を低温側に移行させる方法で、実高炉でもコークス中灰分のCa分の変更によって反応性を意図的に変える試験が行われ、その効果が検証されている<sup>8)</sup>。反応性上昇によってコークス強度低下が課題となるが、これを克服しさらに積極的にコークス反応性を制御する方法については後述する。鉄源の投入も還元平衡に関わるが、スクラップ鉄は限定的な資源である。還元鉄の場合にはその製造エネルギーの評価も勘案する必要がある。

また脱炭素として廃プラスチックのリサイクル、あるいはバイオマスの利用も考えねばならない。前者は廃棄されている廃プラスチックを製鉄プロセスで原料化する方法である。廃プラスチックは水素分が高くCO<sub>2</sub>削減の上で効果的な吹き込み還元材であり、既にJFEでは高炉吹き込みを実施し<sup>9)</sup>、新日本製鉄でも同様なCO<sub>2</sub>削減効果を持つコークス炉投入を実施している<sup>10)</sup>。海外でも実施例が報告されている<sup>11)</sup>。ただし、現在、我が国における製鉄所の廃プラスチック原料化実績はリサイクルの仕組みの影響もあって減少傾向にある。鉄鋼でのプラスチックリサイクルは他のリサイクル方式に比べ、LCA的な評価は高く、CO<sub>2</sub>削減の点からもさらに進めるべきと思われる。

バイオマスはカーボンニュートラルとして種々の分野で注目されている。国内の廃棄物系バイオマスの年間賦存量は炭素量換算で約3050万トンにのぼる<sup>12)</sup>。これは我が国で生産されているプラスチックに含まれる全炭素量の約3倍に相当すると言われている。最近ではRPS制度の制定もあって小規模の発電所などでは廃木材の燃料利用は進展している。しかし、図7に石炭、廃プラと対比してバイオマス等の組成を示すように、バイオマス類はセルロース、リグニン中の架橋酸素及び官能基由来の酸素を多く含むためエネルギー密度は低く、そのままでは熱源、還元材としての置換効果は少ない。高炉吹き込み還元材として利用時には羽口先の分解熱保

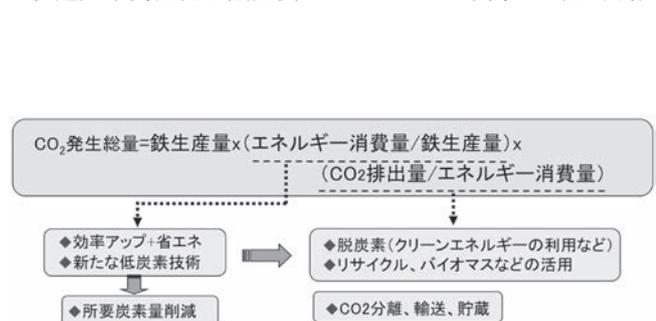


図5 鉄鋼生産に伴うCO<sub>2</sub>発生の構造と今後の方向

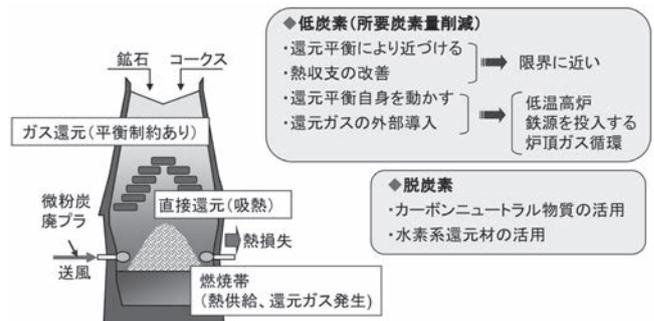


図6 高炉における低炭素、脱炭素達成手段

障から高炉操業範囲を狭くする。粉碎性が良好でないなどの課題も有する。一方、再生可能で低灰分の炭化水素源であり、組成、性状を適切に制御できれば有効な鉄鋼原料になり得る。雰囲気、温度を制御した乾留操作によってバイオマス中の酸素を選択的に脱離させ、高炉での利用効果の向上と同時に粉碎性も改善する方法が提唱されている<sup>13)</sup>。モデル計算上は40kg/tの乾留チャー吹き込みによって約5%のCO<sub>2</sub>削減効果がある。収集も含めたトータルシステムの確立を急がねばならない。

## 4 低炭素高炉に向けた原料設計からのアプローチ

### 4.1 今後の原料設計の考え方

従来、コークス、焼結鉱など塊成鉱を単体として用いてきたが、既存の装入物の性状改善では還元材比の大幅低下は期待できない。高炉原料自体の設計概念を変える必要がある。低炭素高炉に向けた今後の原料の姿を図8に示す。基本的には塊成鉱、コークスなどの従来原料に複合的な機能を持たせ、還元材比削減をねらう考え方である。一つには通常の焼結鉱を部分的に還元させた部分還元焼結鉱が挙げられる。高炉への鉄源投入効果を期待できる。既存焼結機を用い、事前造粒を強化し、複層的な疑似粒子設計で実験的には40%程度の還元率を持つ焼結鉱の製造が可能であることが立証されている<sup>14)</sup>。もう一つは粉鉄鉱石と炭材とを一体に塊成化させた炭材内装鉱の使用である。ガス還元だけでなく固体還元的高速化、浸炭速度も向上させて低還元材比を達成するもので実験的な検証も行われている<sup>15)</sup>。さらにコークスに金属

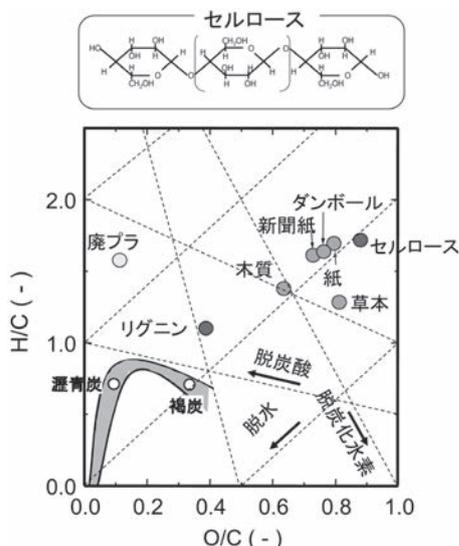


図7 バイオマスの組成比較

鉄を内装させ、反応性を飛躍的に上げた高機能原料としてフェロコックス (CIC: Carbon Iron Composite) が提唱されている<sup>16)</sup>。

### 4.2 フェロコックスの概念と効果

フェロコックスはコークス中に金属鉄を内装させたもので、金属鉄はコークスのガス化触媒として作用する。図9に示すように高炉の低温側からコークスガス化が活発化するため、その吸熱効果によって高炉の還元平衡温度を決める熱保存帯温度は低温側にシフトする。基本は3.1節の還元平衡制御にあり、さらに金属鉄投入効果による還元材比低減が期待できる。本技術は具体的な製造プロセスと高炉使用方法の提示、さらに環境対策強化、低品位炭の使用拡大も視野に入れた次世代型の新製鉄プロセスとして提案されている。その検証に向けて2008年度末まで約2年間、NEDOの革新的製鉄プロセス先導研究として産学共同で基礎研究が進められ、次ステップとして30t/dのパイロットプラント建設が予定されている。

図10はフェロコックスを組み入れた製鉄プロセス全体構成を示す。従来型の室炉コークス炉と異なり、縦型のシャフト

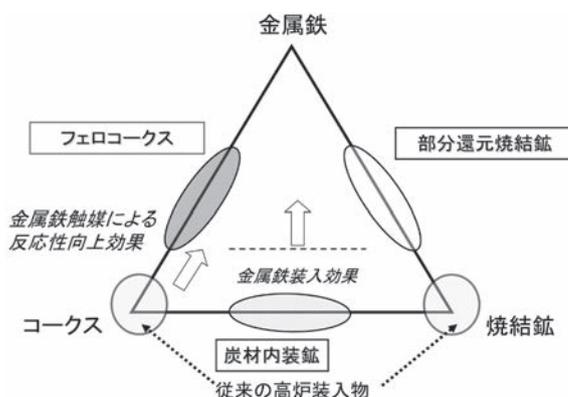


図8 低炭素に向けた今後の高炉原料の姿

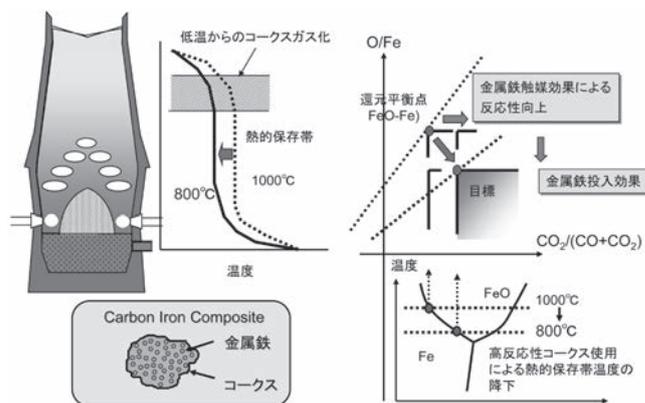


図9 フェロコックス使用時の高炉内現象と効果

炉からなる成型コークス炉をベースとしている。シャフト炉の採用でガスの密閉が容易であり、環境対策上、従来コークス炉より有利となる。この縦型のシャフト炉内で石炭乾留と同時に鉄鉱石は還元される。基礎実験の結果から還元率は約80%である<sup>17)</sup>。製品は通常のコークスのように不定形ではなく一定の形状を持つ。高炉内では小塊コークスの混合装入と同様に、通気性改善、及び還元促進を意図し、鉱石層混合装入が適切と考えられている。使用量は通常の高炉内ソリューションロス反応量に相当する装入コークスの約1/3が適切と予測されている。高炉内の通気性確保は通常コークスが担い、高炉内の還元ガス発生の機能は超高反応性のフェロコークスとなる機能分担である<sup>18)</sup>。低温高炉指向であり、それに追従できる高被還元性の塊成鉱使用が望まれる。モデル計算によって、高炉の熱保存帯温度が200℃低下すれば、還元材比は約60kg/t低下し、CO<sub>2</sub>排出削減効果は約10%と予測される<sup>19)</sup>。また、このプロセスは非微粘炭の多量使用など石炭資源への対策、及び製鉄所の環境対策強化などの効果もあって、今後の日本の鉄鋼事情に合致し、我が国の鉄鋼競争力向上にも寄与すると考えられる。

## 5 将来の低炭素製鉄プロセス

### 5.1 高炉発展系プロセスによるCO<sub>2</sub>削減

現状の高炉は熱風送風であり、熱風中の窒素は熱移送の役目をするが還元には寄与しない。酸素高炉は冷酸素を羽口から送るプロセスであり、ガス原単位の減少によって生産性向上が可能であり、また還元ガス濃度の上昇によって高炉の還元機能を強化できる。生産量一定であれば、高炉内容積は現行高炉の2/3になり、原料強度などの制約条件緩和も期待できる。さらに炉頂ガスは窒素フリーであり、そのガス利用によって様々な発展系が描ける。酸素高炉は海外においても検討例はいくつかあるが、いずれも机上検討にとどまっている。日本では試験高炉を用いての酸素高炉の検証と実高炉で

の酸素バーナー試験が実施されている<sup>20)</sup>。多量酸素の製造に伴う電力消費増大の課題もあるが、炉頂ガスは窒素フリーのため高炉内循環に効果的で、またガス量が少なくCO<sub>2</sub>分圧が高いため、CO<sub>2</sub>分離の適用が現行高炉より容易になると思われる。将来的に工業的な規模でCO<sub>2</sub>分離が適用可能となった場合、大幅なCO<sub>2</sub>削減に向け様々な展開が考えられる<sup>21)</sup>。現行の深冷分離よりエネルギー効率の優れた酸素製造法が開発されればさらに評価は高まる。

酸素高炉の基本形とそれをベースにしたCO<sub>2</sub>分離と炉頂ガス循環を加えたプロセス例を図11に示す。補助還元材として多量の微粉炭を吹き込む。高炉の上部では熱移送の役目をする窒素がなく熱不足になるため循環ガスを吹き込む。本図右の方式では高炉炉頂ガス中のCO<sub>2</sub>を除去し、還元能力を高めた炉頂ガスをシャフトあるいは羽口から吹き込む。未利用還元ガスの再利用によりインプットカーボンの大幅削減が期待でき、CO<sub>2</sub>大幅削減が容易になる。図12に高炉内還元の変化を示す。高炉内還元はCOガス還元、水素還元、固体炭素による直接還元に分けられ、通常高炉では概ね、各々約60%、10%、30%の比率である。炉頂ガスにCO<sub>2</sub>分離を施し、未利用のCOを循環利用すれば、ガス還元機能強化によって大きな吸熱反応である直接還元比率が約10%まで減少し、還元材比を低減できる。

還元ガスを外部で製造して高炉内に吹き込むアイデア自体

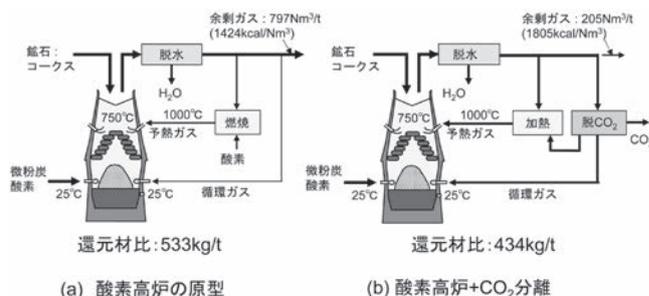


図11 酸素高炉の原型とCO<sub>2</sub>分離との組み合わせ例

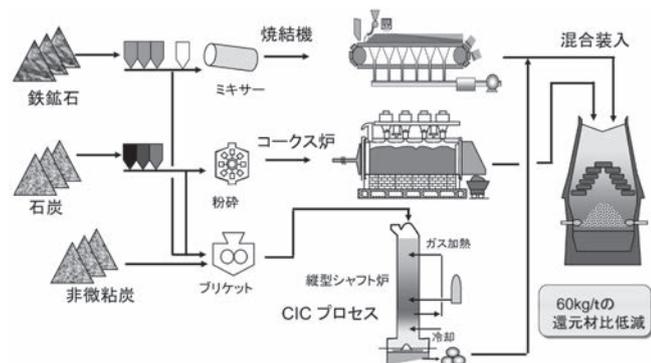


図10 フェロコークス製造プロセスを組み入れた製鉄プロセス

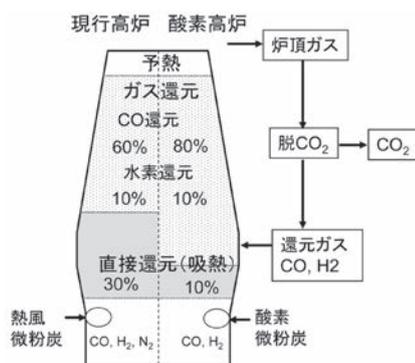


図12 現行高炉と酸素高炉の還元機構比較

は古くからあり<sup>22)</sup>、日本でも重油の部分酸化によって還元ガスを製造して高炉シャフト部に吹き込むFTG法<sup>23)</sup>、コークス炉ガス中のメタンを高炉炉頂ガス中のCO<sub>2</sub>によって改質し、高温還元ガスを吹き込むNKG法<sup>24)</sup>として1970年代に技術開発が行われ、試験高炉でその効果は実証されている。これらのプロセスの元々の意図は原料炭に依存するコークス比の大幅削減であるが、先の炉頂ガス循環と技術的共通点は多い。モデル計算、シャフトガス吹き込みなど高炉内のガスの浸透について広範な研究が実施されている。

酸素高炉にCO<sub>2</sub>分離を経由した炉頂ガス循環によるプロセスにおけるCO<sub>2</sub>発生を図13に示す。炉頂ガス循環によって還元材比は434kg/tに大きく減少する。熱風炉が不要になり、この工程からのCO<sub>2</sub>発生を削減できる。一方、酸素製造に伴う発電所発生CO<sub>2</sub>が増える。トータルではCO<sub>2</sub>削減率換算で-9%となる。これらの動きは循環ガス量の分配、下工程への供給エネルギーの設定によって異なり、他の条件も含め、図14のように表される。ただし、これらはインプットカーボン基準の削減率であり、CO<sub>2</sub>分離で固定されるCO<sub>2</sub>を考慮した出側基準で考えればCO<sub>2</sub>削減率は約50%になる。すな

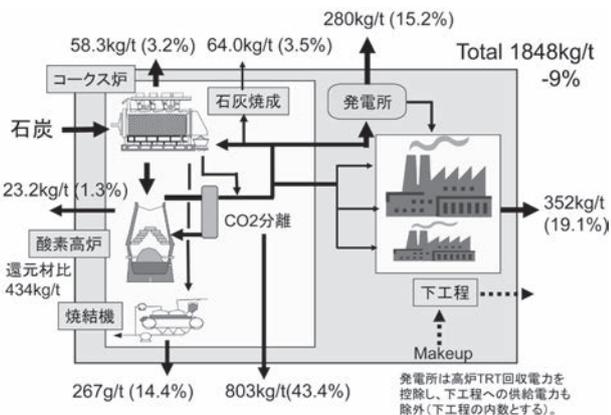


図13 酸素高炉と炉頂ガス循環プロセスにおけるCO<sub>2</sub>発生

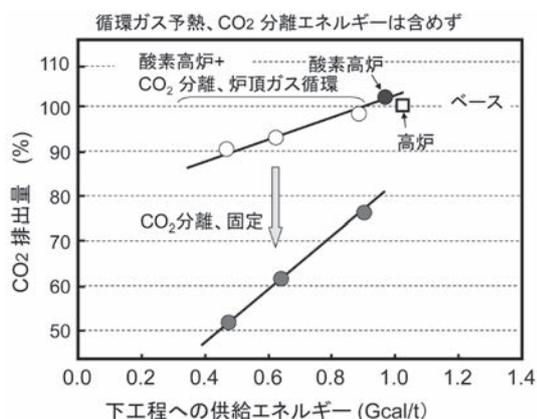


図14 各種プロセスにおける下工程への供給エネルギーとCO<sub>2</sub>発生量変化の関係

わち、CO<sub>2</sub>分離から輸送、貯蔵へと展開できれば大幅なCO<sub>2</sub>削減が達成できる。一方、下工程への供給エネルギーが同時に減少するため、下工程の省エネ同時進行が不可欠になる。一般の製鉄所の下工程では0.8~1.0Gcal/tのエネルギーを必要とし、エネルギー補填を考慮する場合には、炭素に依存しないエネルギー使用が望ましい。下工程への供給エネルギーを無視し、炉頂ガス循環などで発生ガスを使い切れば、図14の外挿でわかるようにインプットカーボンは約25%削減になる。これは後述する欧州のULCOS (Ultra Low CO<sub>2</sub> Steelmakng) のNBF (New Blast Furnace) に相当する。

5.2 炉頂ガス循環と水素系ガス利用の強化

COURSE50、日本政府が推進しているCool Earthプロジェクトの一貫として推進されているプロセスを図15に示す。これはコークス炉ガス中のメタンの水蒸気改質を行うことで水素を増量させ、その水素を還元に利用する方法と、高炉炉頂ガスからCO<sub>2</sub>を分離し、高炉に再循環するプロセスから構成されている。水素利用の際には、その製造に多くのエネルギーを消費するためトータルとしてのプロセス評価の問題が生じるが、本プロセスではコークス炉ガスの顕熱利用で水蒸気改質の熱を補填している。脱炭素と炉頂ガス循環による低炭素によって出側基準で30%のCO<sub>2</sub>削減が可能と試算されている<sup>25)</sup>。また、水素還元はCO還元より早い還元速度が期待できる点もメリットである。ただし水素還元はCO還元と異なり吸熱反応のため、水素還元拡大時には高炉上部の熱バランスに留意しなければならない。水素の羽口吹き込み時の熱収支を熱精算図(Reichardt線図)として図16に示す<sup>26)</sup>。本図によって高炉内の各温度における熱の授受を把握できる。羽口からの水素吹き込みによって水素還元率を通常

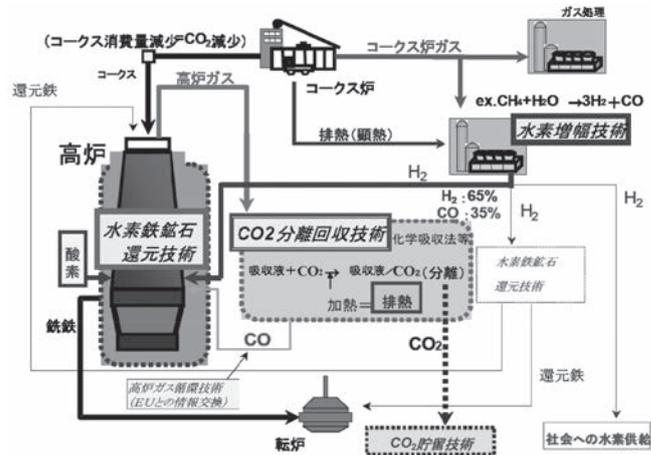


図15 COURSE50プロジェクト (COURSE50: CO<sub>2</sub> Ultimate Reduction in Steelmaking process by Innovative technology for cool Earth 50)

操業より倍加させると、水素還元吸熱反応とレースウェイ温度保障に伴う酸素富化の影響によって高炉上部のガス供給熱と固体側の必要熱の間の余裕がなくなり、熱移動からくる操業限界に接近することがわかる。

高炉内の還元機構は上述のようにCOガス間接還元、水素還元、直接還元に分けられるが、その分配比で還元平衡制御、炉頂ガス循環、あるいは水素還元強化の方向を明確にすることができる。図17はモデル計算による種々のプロセスにおけるその還元機構の分配比を示す<sup>26)</sup>。通常高炉のベース条件の場合、CO間接還元は62%、水素還元は11%、直接還元は27%に位置する。還元平衡制御、すなわち熱保存帯温度の低下操作は、CO間接還元の増によってベース条件をやや右上に動かす。酸素高炉で炉頂ガスにCO<sub>2</sub>分離を施し、高炉内に戻すCOガス還元強化の場合、循環ガス量の分配によって異なるが、CO還元は約80%に増加し、直接還元は10%以下に大きく減少する。同図には水素系のガス吹き込み(COG、天然ガス、水素)の計算結果も示す。水素還元強化

の場合には、水素還元増と直接還元率減が入れ替わる。右側に高炉操業条件を移動させるのは水素への置換による脱炭素となり、その操業限界は高炉上部の熱バランスで規定される。一方、循環ガスによる上方移動はインプットカーボン減による低炭素指向となる。また、いずれも還元ガスをシャフト部に吹き込み時、その炉内への浸透と拡散が技術課題になる。ガスの浸透は既往研究によれば運動量収支によって支配されると予測できるが<sup>24)</sup>、水素系ガスの吹き込みなど、羽口発生CO主体ガスと組成が異なるガスを吹き込む場合、その断面方向の混合拡散が径方向の鉱石還元挙動に影響すると推測される<sup>27)</sup>。

### 5.3 欧州のULCOSプロジェクト

ULCOSは欧州15カ国の48の企業、研究機関の参加からなり、EUのRFCS (Research Fund Coal and Steel) の資金で進められているプロジェクトであり、参照すべき点が多い。別稿で詳細の紹介があると思われるが、8つのSub projectから構成され、大きな柱は前述の高炉炉頂ガス循環を特徴とするNBF、熔融還元 (ISARNA) と直接還元プロセスである<sup>28,29)</sup>。その中でも核となっているのはNBFである。還元ガスの再加熱、還元ガスの吹き込み位置によって4種類のモードを検討しており、その一例を図18に示す。計算による予測ではインプットカーボンの削減率は28%となっている。さらにバイオマスの利用も考え、トータルで約50%のCO<sub>2</sub>削減を目標にしている。また図14に示したように下工程への供給エネルギーは消失する。この補填は特に配慮せず、製鉄所の上工程重視のコンセプトである。

このプロセスの検証としてスウェーデンのMEFOS試験高炉(内容積8m<sup>3</sup>)を用い、2006年9月末からNBFの実証試験操業を6週間行っている<sup>29)</sup>。炉頂ガス中のCO<sub>2</sub>をVPSAで吸

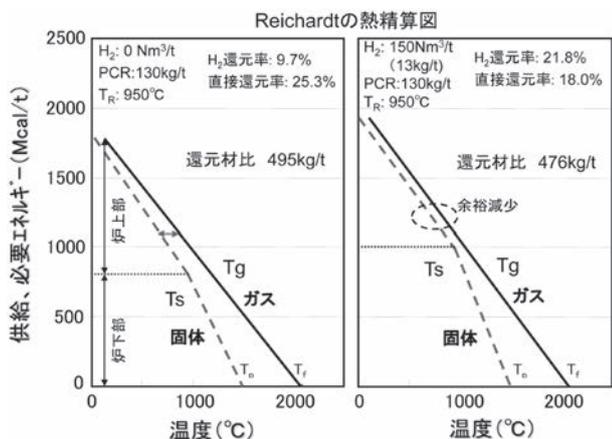


図16 水素吹き込み時の高炉内熱バランス

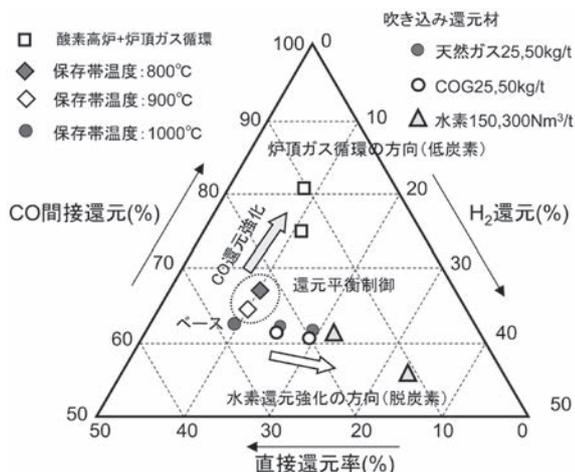


図17 各種のプロセスにおける高炉内還元挙動変化

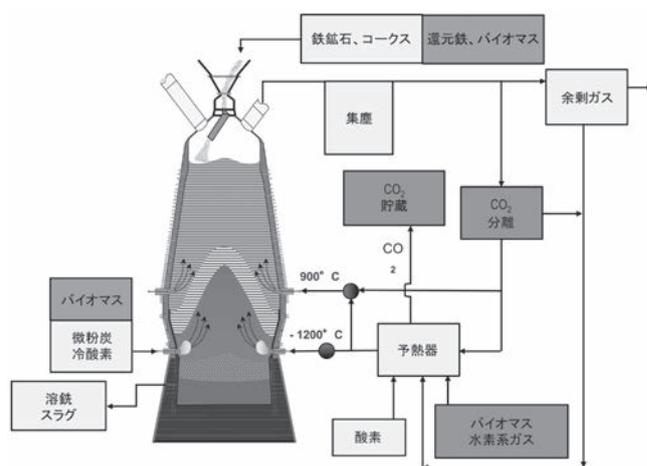


図18 欧州のULCOSプロジェクトにおけるNew Blast Furnaceプロセス

着分離し、高炉羽口及びシャフト下部に吹き込む試験操作を二つのモードで行い、カーボンインプットを24%削減することができたと報告している。また、ISARNAと称している熔融還元プロセスのパイロットプラント試験をドイツにて近以内に開始すると言われている。熔融還元炉は豪州のHismeltの技術をベースにしている。このプロセスでは石炭の事前乾留と、生成ガスを二次燃焼で高濃度CO<sub>2</sub>に転化後、CO<sub>2</sub>を分離し、発生熱を電気エネルギーに変換するコンセプトが特徴である。水素利用もULCOSの検討対象の一つであるが、天然ガスの改質を利用した直接還元への利用を主目的にしている。

## 6 CCSへの期待

CO<sub>2</sub>の大幅削減を考える上で、CCS (CO<sub>2</sub> Capture and Storage) の導入は不可欠であり、技術的信頼性、経済性などその評価は重要である。その詳細はIPCCのレポートにあり、分離技術は図19のように大別される<sup>30)</sup>。欧州のULCOSでは吸着法の適用を検討しているが、アミン液による化学吸収は化学プラントなどの実績もあり、技術的完成度は高いと思われる。深冷分離は低温操作であり、CO<sub>2</sub>濃度が高い場合、近接のLNGなど冷熱源確保が可能な時に適用可能性もある。

アミン吸収を鉄鋼プロセスに適用する際の大きな課題は製鉄所ガスに含有される微量成分の影響もあるが、CO<sub>2</sub>放散時の反応熱、水蒸気放散に伴うエネルギー消費と言われている。CO<sub>2</sub>分離の所要エネルギーはRITE (地球環境産業技術研究機構) によれば当初、4GJ/tCO<sub>2</sub>と試算されていたが、最近の研究では吸収液の改善などで2.8～2.9GJ/tCO<sub>2</sub>と報告されている<sup>31)</sup>。図20に年間350万トンベースの製鉄工程の

各種のプロセスから発生するガス量とCO<sub>2</sub>分圧の例を示す。対比として500MWの発電所の事例も示す。発電では将来的に高い効率を目指したIGCC (石炭ガス化複合発電) の採用などによって高圧化に向かいつつあり、物理吸収の適用、処理設備のコンパクト化も可能である。それを前提に欧州では新規発電所建設に対して“Capture Ready”の概念も提唱されている。製鉄所においては図20に示したように対象となる排ガス量が膨大であり、電力と異なりCO<sub>2</sub>排出箇所が分散している。工業化時には処理量に対応した吸収装置の設計と配置、吸収材再生時に必要なエネルギーの供給、さらに輸送、貯蔵など考えるべき点は多い。我が国では欧米に比べCO<sub>2</sub>の輸送、貯蔵は調査段階である。酸素高炉形式ではガス原単位が小さく、高炉炉頂ガス中のCO<sub>2</sub>濃度は通常高炉より高いため、常圧吸収としてもCO<sub>2</sub>分離は容易な方向にある。製鉄プロセスに本格的にCCSを導入する際には、CO<sub>2</sub>分離の負荷を軽減できる製鉄プロセスの設計、CCS採用に合致したプロセスへの転換も必要と思われる。

## 7 結言

今後のCO<sub>2</sub>削減に対しては低炭素と脱炭素を組み合わせた多角的なシステム設計、また製鉄原料の機能改善が当面、重要である。高炉の発展系として酸素高炉をベースにしたCO<sub>2</sub>低減に向けてのプロセスがいくつか考えられ、大規模なCO<sub>2</sub>分離プロセスの導入との組み合わせで、その優位性が出てくる。CO<sub>2</sub>分離から固定、貯蔵までを前提にすれば選択肢は広がるが、出口を抑えるCCSの実現には不確定部分もあり、基本は入り口側の低炭素と脱炭素と思われる。設備耐用年数の長い鉄鋼プロセスでは2050年は遠い将来ではなく、現在との連続性も勘案し、今から目標を意識した技術開発が必要であろう。また、これらは世界の鉄鋼業共通の課題であり、新しいプロセスは我が国だけでは実効性はなく、世界標

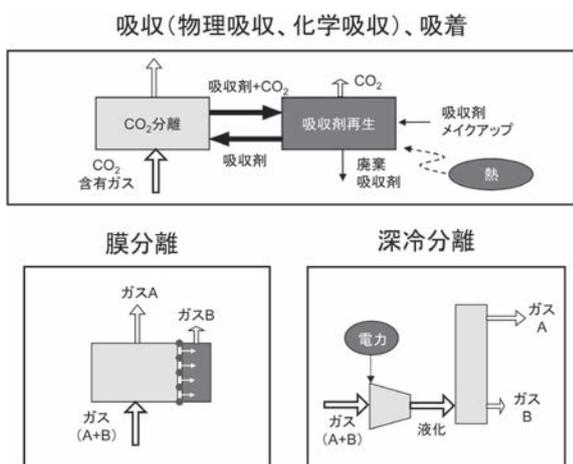


図19 CO<sub>2</sub>分離プロセスの代表例 (IPCCレポートによる<sup>30)</sup>)

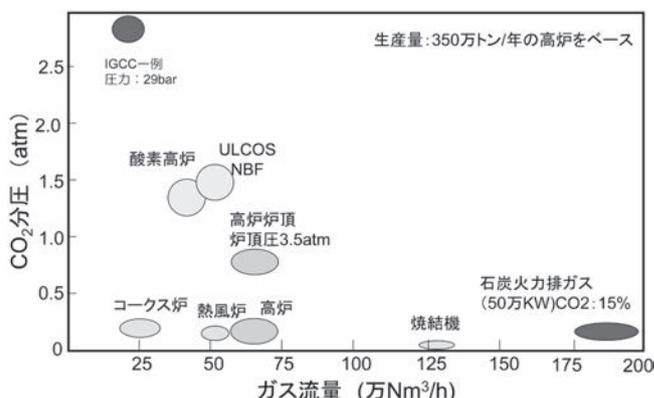


図20 一貫製鉄所におけるプロセス別のCO<sub>2</sub>発生量と電力との比較

準のものにしなければならない。

## 謝辞

欧州の ULCOS プロジェクトに関する資料掲載についてはドイツの ThyssenKrupp Steel 社 Dr.K.Müller 氏の了解と協力を得た。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) D.Ameling and G.Endemann : Stahl und Eisen, 127 (2007) , 569.
- 2) J.Oda, K.Akimoto, F.Sano and T.Tomoda : Energy Economics, 29 (2007) , 868.
- 3) 日本鉄鋼業のエネルギー効率について, 日本鉄鋼連盟資料, (2008)
- 4) T.Ariyama, R.Murai, J.Ishii and M.Sato : ISIJ Int., 45 (2005) , 1371.
- 5) NIPPON STEEL MONTHLY, (2008) 10, 1.
- 6) T.Ariyama, R.Murai, J.Ishii and M.Sato : ISIJ Int., 45 (2005) , 1371.
- 7) R.Nicole, R.Caperani, J.B.Guillot and R.Rist : Int. Symp. on Blast Furnace. (1980) , Arles, III -2-1.
- 8) 野村誠治, 鮎川祐之, 北口久継, 田原年英, 松崎真六, 内藤誠章, 小泉聡, 尾方亮晋, 中山岳志, 阿部哲也 : 鉄と鋼, 92 (2006) , 223.
- 9) M.Asanuma, T.Ariyama, M.Sato, R.Murai, T.Nonaka, I.Ookochi, H.Tsukiji and K.Nemoto : ISIJ Int., 40 (2000) , 244.
- 10) 近藤博俊, 鎌取英弘, 祖山薫 : 日本エネルギー学会誌, 81 (2002) , 81.
- 11) T.Buergler and P.Reisinger : 13th ISIJ-VDEh-Seminar, 19-20 Nov., (2008) , 56.
- 12) バイオマス・ニッポン総合戦略, 2006 農林水産省資料.
- 13) 植田滋, 井上亮, 有山達郎 : 鉄と鋼, 94 (2008) , 468.
- 14) 佐藤秀明, 町田智, 主代晃一, 市川孝一, 佐藤道貴, 有山達郎, 武田幹治 : 鉄と鋼, 92 (2006) , 815.
- 15) 笠井昭人, 内藤誠章, 松井良行, 山形仁朗 : 鉄と鋼, 89 (2003) , 1212.
- 16) 深田喜代志, 下山泉, 浅沼稔, 庵屋敷孝思, 藤本英和, 山本哲也, 有山達郎 : CAMP-ISIJ, 17 (2004) , 842.
- 17) 庵屋敷孝思, 藤本英和, 山本哲也, 下山泉, 武田幹治 : CAMP-ISIJ, 21 (2008) , 122.
- 18) 有山達郎, 佐藤道貴, 佐藤健, 渡壁史朗, 村井亮太 : 鉄と鋼, 91 (2006) , 114.
- 19) T.Ariyama : 13th ISIJ-VDEh-Seminar, 19-20 Nov., (2008) , 31.
- 20) Y.Ohno, M.Matsuura, H.Mitsufuji and T.Furukawa : ISIJ Int., 32 (1992) , 838.
- 21) R.Murai, M.Sato and T.Ariyama : ISIJ Int., 44 (2004) , 2168.
- 22) N.Meicher, R.Schulter, T.Joseph and R.Leary : AIME Ironmaking Conf. Proc., 27 (1968) , 151.
- 23) 八塚健夫, 中山一之, 大森和夫, 原義明, 井口正昭 : 鉄と鋼, 58 (1972) , 624.
- 24) 西尾浩明, 宮下恒雄 : 鉄と鋼, 59 (1973) , 1506.
- 25) 日本鉄鋼連盟 HP/COURSE50/:<http://www.jisf.or.jp>
- 26) 有山達郎, 佐藤道貴, 碓井建夫, 小野英樹 : 第2回 CO<sub>2</sub> 削減シンポジウム, 日本鉄鋼協会 (2009) , 25.
- 27) J.Buchwalder, J.Mernitz, G.Harp, M.Hensmann, C.Reuther and M.Schingnitz : METEC InSteelCon 2007, Düesseldorf, June, (2007) , 298-305.
- 28) B.Korthas, M.Peters and P.Schmöle : The 5th European Coke and Ironmaking Congress, (2005) , Mo1 : 4-1.
- 29) K.Müller : 13th ISIJ-VDEh-Seminar, 19-20 Nov., (2008) , 41.
- 30) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press (2005)
- 31) 小野田正巳 : 日本エネルギー学会誌, 88 (2009) , 278.

(2009年8月27日受付)