



鉄鋼と石化コンビナートのコプロダクション連携

Co-production Integration between Steel and Petrochemical Complex

国立行政法人産業技術総合研究所
福島再生可能エネルギー研究所 (FREA)
所長

中岩 勝
Masaru Nakaiwa

(有) シミュレーション・テクノロジー 異 浩之
Hiroyuki Tatsumi

1 はじめに

本誌の先月号に掲載された堤・松田による「コプロダクションによる革新的エネルギー利用システム」では、エクセルギー損失(特に燃焼操作)を回避し、物質生産系で発生(あるいは排出)されるエネルギーを高度に循環利用する学術理論が紹介された。

本稿では、より工業的な視点に立ち、我が国の2大産業である鉄鋼分野と石油化学分野で起きている再編・統合の動きに対して、コプロダクション的な統合の方向性を議論する。また、物質生産系とエネルギー系とで構成されるコプロダクションシステムの最適条件を導き出すための解析手法の開発経緯と、それを鉄鋼分野に適用した解析事例を紹介する。

なお、化学・エネルギー分野を専門領域とする著者らにとって鉄鋼分野は専門外であるが、我が国の鉄鋼業の省エネルギー性が世界最高峰であることは十分に認識しているつもりである。特に、我が国が得意とするCDQ(コークス乾式消火)設備の非常に優れたエクセルギー回収特性には感嘆の念を覚える。さらに、高炉は非常に優れた冷ガス効率を誇るガス化機能を有している上に炉頂圧タービンによる発電も普及している。このように世界最高レベルと評される我が国の鉄鋼業に異分野視点から提言することをご容赦いただければ幸いである。

2 企業再編と企業間連携の動向

2.1 鉄鋼と石化分野のアナロジー

石油・石化分野においては、海外から輸入する原油や粗製ナフサなどを原料として、分離・精製・分解・転換・合成などの複雑な物質変換・合成プロセスを石化コンビナートに集積し、付加価値を最大化している。

一方、高炉一貫製鉄所においても、鉄鉱石と石炭という地球上で最も汎用的に利用可能な原料を元に、高炉で銑鉄を製

造し、転炉で鋼に転換した後、鋳造、圧延、後処理工程を経て最終製品として出荷される。

ここで、高炉・転炉までの川上工程が石化コンビナートで言えば製油所とエチレンセンターに相当し、鋳造以降の川下工程がいわゆる化学工場が果たしている役割に相当するようと思われる。最終製品が個別顧客の要求スペックにあうように極めて精緻な品質コントロールを行っているということに関して共通している。

2.2 進む再編

我が国の石化コンビナートにおいて、川上領域では石油元売り会社の再編が進行し、現在、主要3グループにまで統合された。エチレン業界もプラントの停止や事業提携が進み、川下領域でも各種ポリマーの事業統合が進んでいる。一方、鉄鋼業界でも企業再編が進んでいる。

これら統合の強化によるメリットは、多かれ少なかれ事業規模の拡大による原材料や製品の価格支配力向上と、拡大した組織・工場の業務・運転効率化や最適化によるコストダウンであろう。従来よりも一つの企業(事業連携における合弁会社も含む)が国内外により多くの製造所を有することとなり、エンタープライズとしての利益最大化を目指した生産設備の統廃合が実施されることになる。これは石化コンビナートの場合で言うと、同一地域内において縦方向で密接につながり、コンビナート内での局所最適化を図っていたこれまでの物差しに加えて、地域を超えた最適化要素が強まることである。この流れが進むと、コンビナート内の縦の連携要素が抜け落ちて、コンビナート本来の強みが失われていく危険性が増してきたという見方もできる。

2.3 鉄鋼-石化間の連携の可能性

著者らは、2000年初頭より、石化コンビナートにおける垂直方向の企業連携を推進する立場を取り、コンビナート内のエネルギー連携事業などで様々な企業間連携の提案を行っ

てきた¹³⁾。この時期は、まさに上述した企業や事業の再編が加速していた時期であるが、企業間連携事業で少なくとも数年以上の事業存続が前提条件として求められることに関して、関連企業の抵抗感は大きく、なかなか実現しなかった。しかし、数は少ないが、要件を満たす連携事業がいくつか具体化し、それぞれに大きな省エネルギー効果を上げることができた。

一貫高炉製鉄所は、単独で物質とエネルギーのバランスが完結できるように設計されている。石炭を蒸し焼きするコークス炉で発生するCガス（別称COG）、高炉から発生するBガス（別称BFG）および転炉で発生するLDガス（別称LDG）は、ほぼ全て所内燃料として利用され、その一部はガスタービンやボイラの燃料になり、所内発電のエネルギー源になっている。それ以外にもCDQや後工程で回収した蒸気の余剰分を蒸気タービンに導入し発電に寄与している。これらの結果、高い自家発電率が達成されている。高炉スラグは、その大半をセメント材料や路面材として再利用し、省エネルギーに貢献している。これら環境面での取り組みがされてもなお、鉄鋼業は我が国の産業部門全体の40%のCO₂を排出している。（化学工業は15%）そのため、CO₂排出削減のための新技術（水素還元やCO₂分離回収技術）の研究開発⁴⁾が行われており、2030年の実用化が期待されている。

著者らは、コプロダクションを基盤とする企業間連携の立場から、鉄鋼と石化コンビナートとの間の連携の可能性について注目してきた。現在、高炉が稼働中の製鉄所は国内に14カ所あり、そのうちの9カ所で製油所と近接している（図1）。

例えば、水素による連携を考えてみよう。Cガスには50%ほど水素が含まれており、燃料電池自動車等の将来需要に対する供給源として期待されているが、取り出した水素のエネルギー相当分は製鉄所内で不足することになるので、天然ガ

ス等で補充する必要がある。そのため、環境への影響は、天然ガス改質で水素を製造する場合との効率の違いを評価する必要がある。一方、製油所では脱硫や水素化分解などの目的で大量の水素が消費されている。石油改質装置で発生する副生水素や隣接するエチレンセンターの副生ガス由来の水素なども利用するが、不足分の水素はナフサのスチームリフォーミングで製造している。製鉄所内で水素をマテリアルとしては必要としていない現状であれば、Cガスからの精製水素製造がナフサのスチームリフォーミングよりも効率よく行えるのであればメリットが得られるであろう。このような連携スキームが可能なところは千葉、川崎、および水島が挙げられ、最大で年間43万トン程度のCO₂排出削減が得られるという報告⁵⁾がある。

しかし、シェールガス由来の液化メタンの輸入増大やそれに伴う液化天然ガスマーケットの軟化を背景として、近い将来、製油所が水素原料をガソリン基材であり、かつ石化原料として価値の高いナフサから天然ガスに切り替える可能性も考えられ、そうなるとCガス中の水素を取り出す意義は低下するであろう。並行して、水素還元製鉄の導入が進むことで、製鉄所自体が大きな水素需要家になるかもしれない。

高炉製鉄所内には、コークス炉から出てくる粗Cガスを精製する工程があり、粗Cガスに含まれる不純物を除去して精製することで、タール、軽油、芳香族系化合物、硫黄などを製造する化学系の工程が存在する。これらの化学系の工程については、製油所と共有化して効率を改善できる余地が大いにあるのではないかとと思われる。製鉄所と製油所が隣接する場合でも、広大な敷地（特に製鉄所）内でのプラントの位置関係によっては、連携のために長大な配管を敷設する必要性もあるが、そのような莫大な投資に見合うだけの効率化を図るための斬新な発想も必要となる。

長期視点では、石油会社が目指すべき方向性は、製品のケミカル化（Fuel to Chemical）と、電力・ガス自由化を背景とした総合エネルギービジネスの展開であるとも言われており、すでにその流れが出来つつある。そのため従来のビジネス領域を越えた競合が新たに生じる可能性も示唆される。

なお、上の9地点のうち、製油所が石化コンビナートの構成要素となっているのが7カ所ある。後述するが、石化コンビナートに融合ユーティリティセンターを設立する構想において、石炭がガス化原料のバランス調整用として必要とされ、製鉄所の有する石炭インフラが活用可能と考えている。

BガスやLDガスに含まれるCOについてもC1化学原料としての有効性が期待されている。COの需要家（酢酸プラント等）とのマッチング条件が揃うことがあれば実現の可能性も出てくるのではないかとと思われる。

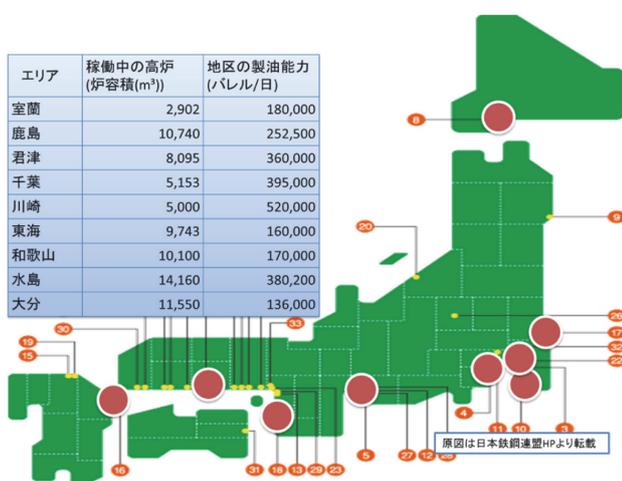


図1 我が国の高炉+製油所コンビナート

2.4 コプロ融合ユーティリティセンター構想

著者らは、産業技術総合研究所内にコンソーシアム「スマートコンビナート研究会⁶⁾」を設立し、2012年度より研究会活動を行っている。本研究会では、新世代のコンビナートの在り方^{7,8)}等を議論しているが、製鉄所を含むコンビナートのすべての主要なステークホルダー間でコプロダクシオンのエネルギーと物質を共有化するオール産業連携型の構想(図2)を検討した事例を簡単に紹介する⁹⁾。

ここでは、典型的なコプロプロセス(エネルギー・物質同時変換装置)の一つである“ガス化”を中核プロセスとして位置づけ、水素やCOなどのマテリアルと、電力やスチームといったエネルギーを融通し合う。

この検討の背景の一つに、エネルギー供給構造高度化法(別称、石油高度化法)と原油の重質化対応に伴い、石油残渣(石油コーク、SDAピッチ、減圧残渣、等)が増加するという予測がある。今のままではボイラ燃料にしかならない低付加価値の副産物が増えてしまうことになるので、付加価値向上を狙ったスキームとして提案された。

ガス化プラントの安定運転のためには、所定の投入原料量を確保する必要があるが、石油残渣のみで定量確保が困難であるという見通しのため、不足する期間においては残渣を海外から輸入するか、あるいは石炭をバランス原料として利用する方法も考えられる。後者の場合、製鉄所の貯炭インフラを利用することで連携を図ることも可能であろう(図3)。

ガス化プラントで製造した合成ガス(CO, H₂)は主にガスタービンの燃料として利用する。大規模高効率ガスタービンと追焚式排熱ボイラを組み合わせ、複合発電方式で蒸気タービンによる発電を行い、同時に、隣接する工場に中低圧蒸気を供給して総合熱効率を高める。また、一部の合成ガスはシフト反応器に導入して水素を製造する。C1化学工場があれば、分離したCOを原料として供給することも可能となる。

このようなコプロ融合ユーティリティセンターは、国内



図2 コプロ融合ユーティリティセンター構想

に2か所、例えば千葉地区と水島地区に1つずつ設置することが望ましいと思われる。それぞれ120万バレル製油所分の残渣を処理する能力を備え、原料として、石油コーク、SDAピッチ、エチレンタール、減圧残渣に加えて、調整用の製鉄用一般炭の利用も可能とする。事業イメージとしては、長期インフラ供給事業であり、石油産業、製鉄産業、石油化学、電力会社などによる共同事業体による運営が想定される。製鉄所としては貯炭場インフラ利用での長期一般炭の事業体への販売収益が期待できる。

ペトロコーク(昼間約60t/h、夜間約45t/h)を原料と想定した予備検討の結果、熱電併給のみ(蒸気250t/h、送電:昼間150MW、夜間98MW、水素供給なし)の場合、年間変動費メリットとして141億円と推定され、年間固定費(保守費、人件費)15億円としても年間粗利益として126億円が期待できることが分かった。投資800億円として単純投資回収6.3年となる。熱電併給+水素供給事業とした場合(ペトロコーク原料は昼間91t/h、夜間77t/h、水素供給は40,000Nm³/h)は、年間粗利益として200億円程度に改善されるが、投資規模は1300億円と大きくなり、単純投資回収は6.5年と熱電供給のみの場合と大差ない結果となった。

2.5 製鉄コプロダクション構想

我が国の転炉鋼生産で消費されるエネルギーは、総エネルギー換算で約23GJ/t粗鋼(転炉鋼の場合、2015年RITE調査)と言われる。国内年間粗鋼生産が8000万t前後で推移しており、主燃料として石炭が年間約7000万t消費され、我が国のCO₂排出源の最も大きな要因となっている。この最大のエネルギー消費産業をエネルギー生産型に転換することができないかという議論から生まれたのが“製鉄コプロ”というコンセプトである。

Cガスを改質し合成燃料や水素源として活用するというテーマは長年議論されてきていると思われるが、現状におい

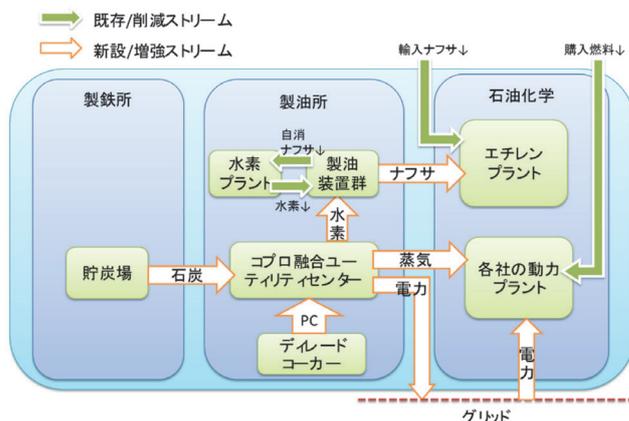


図3 コプロ融合ユーティリティセンターの主要ストリーム

てCガスはボイラや熱風炉の燃料として使用され余剰があるわけではないので、Cガスを改質利用するだけでは別のエネルギー源を導入する必要性が伴うこととなる。そのため、製鉄コプロでは、製鉄所内で省エネルギー策を施すことで余剰Cガスを確保することとの合わせ技を検討した。

省エネ策としてガスタービンの導入を想定する。既存の製鉄所の自家発電設備がBTG方式（ボイラと蒸気タービンの組み合わせ）であるため、40%を超える発電効率を得ることが困難であり、これをガスタービン複合発電方式あるいはガスタービンと熱風炉とインテグレーションに転換することで大きな省エネ効果が期待できる。ガスタービン燃料としてはBガスの利用を想定するが、Bガスの発熱量が低い問題を解消するためにCガス改質によって得られる合成燃料ガスの混合や、高炉への微粉炭仕込み比率アップや仕込み空気酸素富化によるBガスのカロリーアップ、あるいは外部から天然

ガスを補助的に導入することなどの対策を講じる。図4に、天然ガス（NG）を補助的に使用したガスタービンの排ガスをLDガス（LDG）などで追い焚きして既設熱風炉に供給する場合の想定フローを示す。

Cガスの改質においては、専用の改質炉を新設するという従来の発想だけではなく、そもそも非常に高い冷ガス効率（96～98%）を有する高炉をガス化・改質炉として転用する手段が考えられる。図5にイメージフローを示す。ガスタービンの排ガスには多くの酸素が残存しているので、追い焚きによって高温の燃焼ガスとし、それを蓄熱型熱交換器（従来の熱風炉の転用）によって原料Cガス（COG）を高温に予熱して高炉型改質炉に吹き込む。原料には天然ガスや石油系のオフガスを混合できるので、鉄鋼と石油やガスとの間の新たな連携の可能性も広がると期待できる。

これらのコプロダクション案を国内製鉄所に展開した場合、

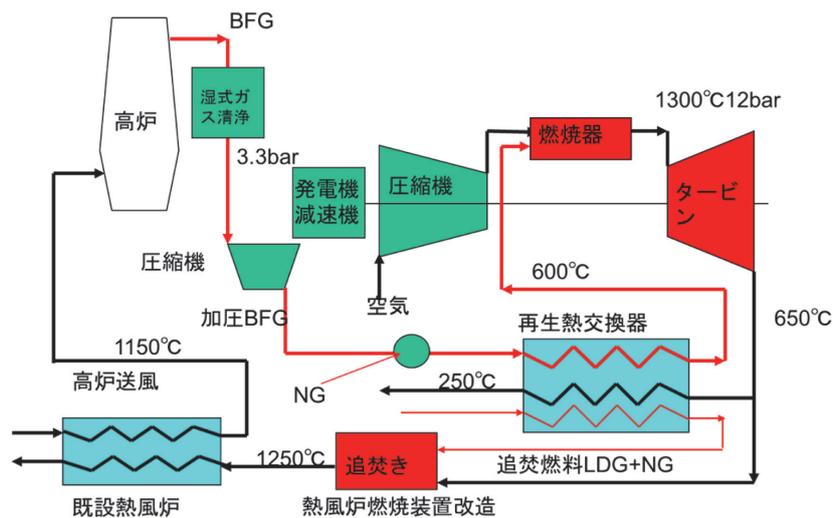


図4 製鉄コプロ方式コージェネシステム例（既設熱風炉とのインテグレーション）

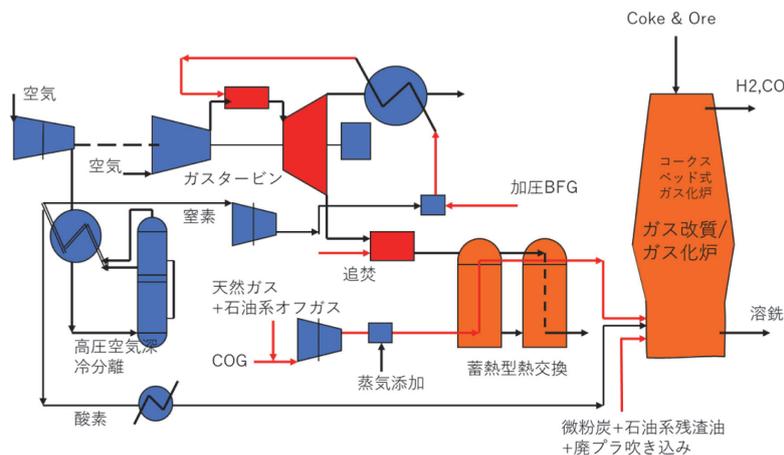


図5 製鉄コプロ方式Cガス改質方法例

原油換算で数百万トンオーダーの省エネが期待されるという試算がある。

3 コプロダクションピンチ解析法

何らかのコプロダクションプロセスを導入しようとしたとき、上述の構想にもあるように、広範かつ複雑なシステムに与える影響を定量評価する必要がある。既存のエネルギーや物質のネットワーク上に新たなストリームによる接続が発生することになるが、その接続ポイントをどこにしたらよいかという点も明らかにする必要がある。このような検討は、すべてのストリームのつながりを定めないと計算ができないプロセスシミュレーターのようなツールでは行うことができないため、新たな発想に基づくツールが必要である。

コプロダクションの研究が国家プロジェクトレベルで議論され始めた2000年ごろのことであるが、このようなツールのベースとなり得るモデリングと解析技術として、当時すでに省エネルギー解析技術として広く認知されていた「ピンチ解析法^{10,11)}」しかないであろうという議論の下、「コプロダクションピンチ解析法」の開発を手掛けることとなった。

その後、2001年～2003年度にかけてNEDOの研究開発事業(先導研究)として“プロトタイプ2”を開発し¹²⁾、2008年～2010年にかけて同じくNEDOの開発事業(実用化)として“プロトタイプ3”を開発した^{13,14)}。

3.1 コプロダクションピンチ問題の定義

ピンチ解析法は、図6のように縦軸に質(温度や純度)を、横軸に量(熱量や物量)を取ったグラフ上で、供給と需要の関係を定量化し、再利用の可能性を図示するものである。

図7(左)のように、供給源の質が需要先の要求品質よりも高ければ直接再利用が可能となる。このような直接的な熱エネルギーの再利用を繰り返すことをエネルギーのカスケード利用と呼び、基本的な熱回収方法である。エネルギーを使用し

てもエネルギー保存法則によってエネルギー量は変化しないが、使用するにしたがってエクセルギー(エネルギーの質)が低下するので、熱回収においては、エクセルギーの低下をなるべく小さくすることが重要である。

図7(中)のように、供給源と需要先の質が逆転している場合は、再生機能を付与することで回収が可能となる。熱の場合はヒートポンプであり、水素の場合であれば膜や吸着を利用した水素回収装置である。

コプロダクションでは、図7(右)のように、エネルギーと物質の再生を同時に行うコプロ変換を想定する。この図では、余剰熱と余剰物質を元により高品位の熱と物質を再生するイメージを表しているが、実際に取り扱う入力と出力関係はもっと自由な組み合わせが可能である。例えば、高品位なエネルギーを利用して低品位物質を再生するというパターンもコプロ変換である。

図8にエネルギーの生産形態の過去からの変遷を示す。一般にモノジェネよりもコジェネの方の総合熱効率が良くなり、工場のみならず、オフィスビル(地域冷暖房)や家庭(エネファーム)にまで導入が進んでいる。物質とエネルギーを併産するコプロダクションはさらにその先のスキームであり、コスト削減とCO₂削減をさらに高次元化する仕組みである。

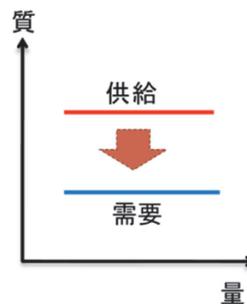


図6 ピンチ解析法上の需給概念

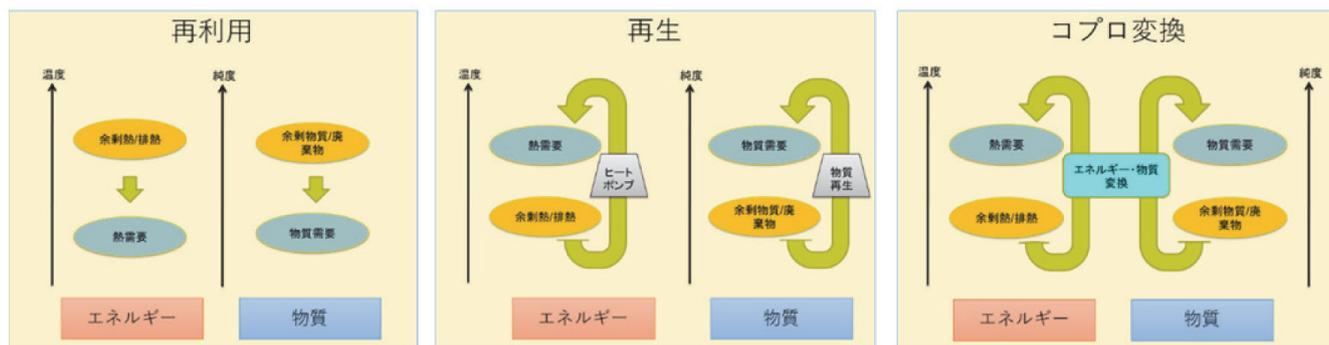


図7 エネルギーと物質の再利用、再生、およびコプロ変換の概念

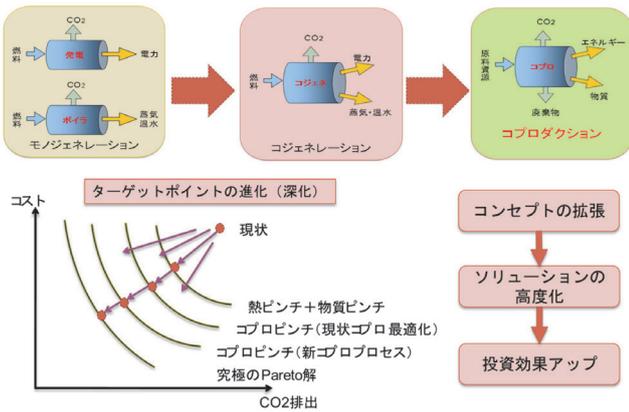


図8 モノジェネからコジェネ、そしてコプロへの発展

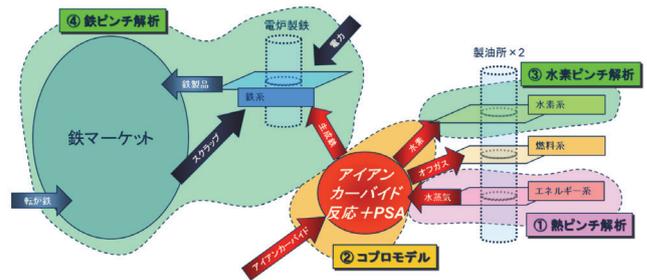


図10 アイアンカーバイド法製鉄コプロ問題の構成

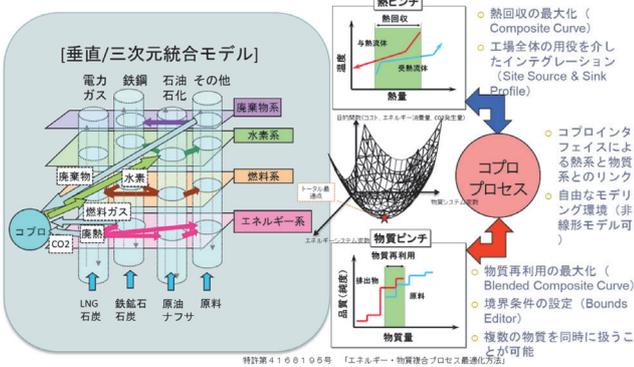


図9 コプロピンチ解析問題の構成

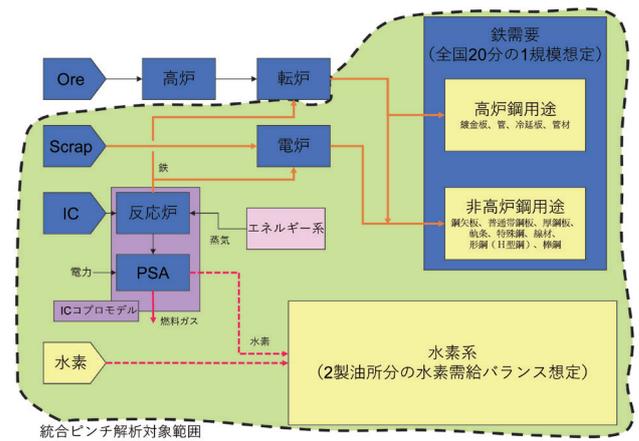


図11 アイアンカーバイド法製鉄コプロピンチ解析の対象範囲

3.2 コプロダクションピンチ問題

コプロダクション問題は、エネルギー系と物質系を同時に扱うことになる。まず標準的にエネルギー系として熱エネルギー、物質系としては燃料と水素を扱う。これらに加えて、問題別に必要なエネルギーや物質を定義してコプロ問題を構成する。例えば、図9ではコプロプロセスの典型例であるガス化をイメージして、燃料系、水素系、エネルギー系に加えてガス化原料となる廃棄物を加えて、それぞれの系が多層的レイヤーを構成する中に、コプロ（ガス化）を関連付けて表した。

コプロ問題を最適化する際の目的関数は、エネルギー系と各物質系に共通に適用できる尺度を用いる必要があるが、最も典型的な尺度は“コスト”である。それぞれのレイヤーごとにコストを集計し、全体の合計コストが最小になるように条件を最適化すればよい。

本稿では理論¹⁵⁾および計算のアルゴリズム¹⁶⁾の詳細は割愛する。なお、以下の適用事例の解析には“コプロダクションピンチ解析プロトタイプソフトウェア”を用いた。このツールを用いてコンビナートにおける実際の連携事業¹⁷⁾の

最適化評価に適用した実績が認められ、平成23年度の省エネルギー大賞（ビジネス部門）を受賞した。

3.3 適用事例～アイアンカーバイド法製鉄

2003年ごろに検討したテーマである。電炉製鉄の新たな鉄材として海外（天然ガス産地）でアイアンカーバイト（IC: Fe₃C）を生産し、日本に輸入し、水蒸気反応で水素リッチな燃料ガスとFeを分離してそれぞれ利用する方法である。検討当時に想定した問題の構成を図10に示す。電炉鋼にはスクラップ由来の銅が含有されるが、IC鉄を電炉に供給することで、電炉鋼のCu含有率を下げ、電炉鋼の利用範囲を広げる効果が期待される。

この問題構成に基づき、コプロピンチ解析の対象範囲を図11のように定義した。全国の20分の1規模を想定し、鉄需要、スクラップ供給については、統計データを基に銅含有量スペックで分類して定量化した。ICから水素と鉄を取り出すコプロプロセスについては、処理に必要な用役（電力、蒸気）の使用量を導き出すバランスモデルを作成した。水素系については、平均的な製油所2つ分の水素需要を想定したバランスモデルを作成し、ICプロセスから供給される水素によって、従来の水素製造装置の負荷を下げる効果を評価できるも

のとした。

このようなコプロピンチ解析モデルを構築し、鉄・スクラップ、スチーム・電力、水素・燃料ガスの合計コストを最小化するように最適化した結果、以下の知見を得た。

- ・ ICからの生成鉄を電炉へ供給する場合、転炉鋼の46%の代替が可能
- ・ ICの生成鉄は純度的には転炉鋼全体を代替可能
- ・ 発生水素は2製油所分の水素需要でほぼ吸収可能
- ・ ICコプロプロセスを導入することで、最大66.9%のコスト削減が得られる
- ・ 高炉鋼用途には電炉鋼 (IC鉄含む) を供給しないとした場合でも、26%程度のコスト削減が得られる

この事例は、鉄鋼会社 (電炉含む) と石油会社の大規模な統合のポテンシャルを示したものであるが、昨今では、高炉製鉄のCO₂排出が取り沙汰される中で、電炉製鉄へのシフトもCO₂削減対策として検討されている。銅含有問題の緩和や水素需要の増大に対する手段としても再評価されるべきと考える。いずれにしても、ここで実施したようなコプロピンチ解析を行うことで、全体システムに与える影響や各種制約を鑑みた全体最適による評価解析が重要であることを示す事例ではないだろうか。

4 まとめ

我が国の鉄鋼産業は、すでに世界最高レベルの効率を達成しているとはいえ、コプロダクシヨンの切り口において、まだ検討の余地があるのではないかと、という期待感を少しでも感じていただけたなら幸いである。紹介した事例は著者らの検討例である。誤りや不正確な表現などがあれば著者らが責を負うものである。

また、このような産業間連携の議論の活性化を望むものとして、読者からのフィードバックを願うとともに、産総研コンソーシアムのスマートコンビナート研究会を訪れていただくと幸甚である。

参考文献

- 1) 中岩勝, 巽浩之: ケミカルエンジニアリング, (2006) 4, 283.
- 2) K.Matsuda, Y.Hirochi, H.Tatsumi and T.Shire: Energy, 34 (2009), 1687.
- 3) 巽浩之: JETI, 59 (2011) 6, 38.
- 4) COURSE50: <http://www.jisf.or.jp/course50/>
- 5) 経済産業省平成29年度産業技術調査事業 (低炭素化に向けた革新的取り組みを促す制度等調査) 報告書
- 6) 遠藤明, 中岩勝: 化学工学, 79 (2015) 3, 184.
- 7) 巽浩之: スマートコンビナート構想とコプロダクシヨンプリンチ統合解析, 化学工学会第49回秋季大会, 名古屋, (2017)
- 8) 中岩ら: 座談会「将来のコンビナート構想」, ペトロテック, 41 (2018) 10, 754.
- 9) 産総研コンソーシアム スマートコンビナート研究会 平成25年度年報, 25 (2014)
- 10) 巽浩之, 松田一夫: ピンチテクノロジー (省エネルギー解析の手法と実際), 省エネルギーセンター, (2002)
- 11) 中岩勝, 巽浩之: Journal of the Japan Institute of Energy, 91 (2012), 584.
- 12) NEDO エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発 H13~15年度「エネルギー・物質併産プロセス評価解析システムの開発」成果報告書, (2004)
- 13) NEDO エネルギー使用合理化技術戦略的開発 平成19~21年度「コプロダクシヨンプリンチ設計手法開発と設計支援ツールの研究開発」成果報告書, 千代田化工建設, 産業技術総合研究所, (2010)
- 14) 谷口智, 中岩勝, 大森隆夫, 巽浩之: コプロダクシヨンプリンチ解析ツールを用いたプラントの統合解析, 化学工学会第41回秋季大会, 東広島, (2009) 9.
- 15) 谷口智, 巽浩之: 化学工学, 79 (2015) 3, 188.
- 16) 中岩勝, 巽浩之, リチャードテンシュ: エネルギー・物質複合プロセス最適化方法, 特許第4168195号.
- 17) 馬越和幸, 相野恵介, 田中充, 馬場研一: 化学工学, 79 (2015) 3, 197.

(2019年1月17日受付)