

特別講演

□西山賞受賞記念

鉄の工学と「夢」を求めて

Seeking for Dreams in the Science and Technology of Ironmaking

徳田昌則 東北大学 名誉教授

Masanori Tokuda



*脚注に略歴

1 はじめに

西山弥太郎の名前は、臨界製鉄所という新しいコンセプトに立って、当時の政策方針に逆らって、千葉製鉄所を建設した反骨の経営者というイメージで知っていた。今回の授賞を契機に、同氏の評伝¹⁾を幾つか読んで、日本の戦後復興の方向がようやく見え始めた時期に、事態を冷静に分析し、確信を持った市場判断、技術力の沈着な準備、そして果敢な資金調達の実行に任せ、戦前から抱き続けていた一貫製鉄所建設という夢を実現させたことを、改めて知った。

2004年4月をもって、日本の国立大学は全て独立行政法人化され、教官も事務官も全て非公務員になる。日本の経済や産業社会の大変革とも軌を一にしており、社会に大きな影響を及ぼすと予想される。学会活動へも深刻な影響が出てくるだろう。この歴史的転換の時期に、西山氏の記事を念頭に、夢の効用と果敢な工夫の在り方について、考えてみたい。

2 大学評価の時代と鉄鋼協会の役割

21世紀は知の時代といわれ、大学は知の創造、継承、応用の担い手として、最も重い責任を持っており、その活動の成果と効果とを評価し、さらなる機能発揮につなげようとする大学評価が、世界各国の共通の関心事となっている。

その評価の対象は、端的には、研究面における国際競争力の確立と教育面における国際通用力の向上に集約され、各大学は、それぞれの立場から、これらの目的達成に向けた学内資源の最大活用を、各大学の経営の根幹に据えることになる。

一方、専門分野を同じくする個人や組織が集まって、学協会が形成され、各専門分野において、知識の創造と継承、応

用の機能を発揮し、それぞれの専門分野の発展に大きな役割を果たしている。

従来は、各大学に籍を置く大学人個人の立場でいえば、教育に関しては大学の枠内での活動を中心にしつつ、研究に関しては学会を活動の中心とすることが、いわば当然であり、研究のニーズ発掘の現場も学会が中心であった。

しかし、個別大学の組織としてのパフォーマンスとその成果が問われる今後の評価の時代にあっては、大学は、学内の研究資源の活用を最大限に追求する結果、学内での連携強化を求め、研究対象の発掘も学内の連携強化の観点から行われることになる。その結果は、一般的には、鉄鋼や金属分野の産業界が大学に期待する基礎的、基盤的研究課題は、ますます採用されにくくなる。このことは、既に、大学研究者にとっての重要な研究資金源である科学研究費補助金の分野では常態化している。

従って、学会が組織的に研究課題を集め、検討する必要がある。その意味では、鉄鋼協会のリーダーシップで実行された研究戦略ロードマップの策定は、このような方向を先取りした先駆的試みとして、高く評価される。今後は、大学内連携の強化という環境の中で、学会として、具体的な成果に結びつける方策が望まれる。

産業界が期待する人材の育成の観点からも、今後は学会の役割が、ますます重要になる。

大学のカリキュラムの中に、各産業分野に関わる専門内容をどのように盛り込むかの工夫が不可欠である。たとえば、今や、鉄鋼製錬や鉄鋼材料の名前を冠した講座がほとんど無くなった状況の中で、教員の出自や好みのような、いわば個人的な事情に依拠した関係だけで、鉄鋼関連の専門内容を体系的なカリキュラムの中に組み込むためには、個々の教員の極めて大きな負担を伴う。また、これらの内容を体系的に教

*昭和40年東大大学院冶金学博士課程を修了後、東北大選鉱製錬研講師、55年教授、61年難処理希少資源研究センター長の後、国際文化研究科、学際科学研究センター、東北アジア研究センターを経て、平成11年同センター長。13年大学評価・学位授与機構教授。16年3月退職。平成13年4月東北大学名誉教授。

えることの出来る教員を擁する大学の数も漸減している。

したがって、鉄鋼関連の専門分野において、授業内容の精選、教授方法(教材の種類、演習問題の内容、遠隔授業法等を含む)、PBL (Project or Problem Based Learning) の対象課題の工夫、インターンシップの積極活用法など、いわば、標準的あるいは先端的内容を体系的に整理し、個々の教員をサポートする体制の構築に、学会として、専門的組織的に取り組む必要があるのではなかろうか。

これらの成果は、ひとり日本のみならず、国際的にも大きな意味があり、鉄鋼関連の人材育成の分野で、日本鉄鋼協会のリーダーシップを発揮すべき課題と思われる。

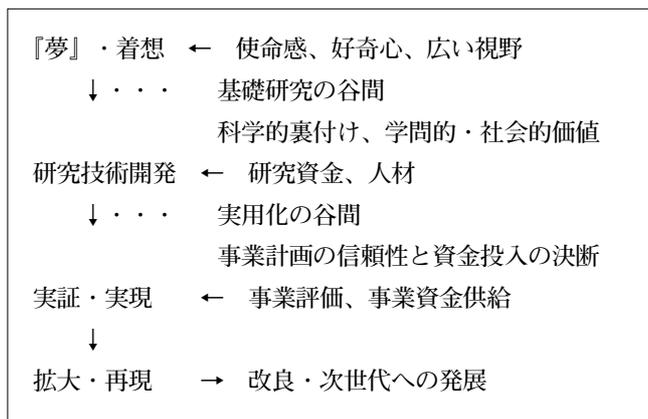
そして、前述の研究資金と同様、これらの教育活動をサポートする学会としての資金獲得策についても考える必要がある。そのためには、伝統的な会費や賛助会員から資金を仰ぐだけの体制から、より主体的に、活動資金を獲得するための事業部をおくなど、新しい時代に向けた学会としての戦略、新しい学学、産学連携方策や学会独自の知的資源の掘起こしと積極的活用を念頭に置いた活動施策などの模索がなされるべきと思われる。

3 『夢』と研究

教育も研究も、そして事業も夢を起点にする。これまで、筆者自身が基礎的な面で携わってきた鉄鋼のプロセス工学的研究に加えて、製鉄プロセスに関する幾つかの国家プロジェクトや技術移転等に岡目八目的に関わってきた経験によれば、プロセス工学的研究課題は表1のようなライフステージを経るように思われる。

まず、夢とか着想と呼ばれる段階がある。ここでは、個々の研究者の好奇心とか使命感に依存して、様々なスケールのもがあり得るが、それらが、実際に研究開発の課題に取り上げられるためには、科学的あるいは技術的な裏付けがな

表1 プロセス工学的研究課題のライフステージ



れ、学問的意味あるいは社会的価値がなければならない。一見、荒唐無稽に見えるものでも、それなりの客観的に説得できる科学的裏付けがあれば、研究対象になり得るし、それがなければ、いつまでも、単なる空想の段階に止まる。この境界を、基礎研究の谷間と呼ぶことにすると、この谷間を渡れない課題の探索が、新しい研究のシーズの提供可能性を期待させる。

一旦、研究課題に取り上げられると、研究資金や人材が投入され、基礎研究の成果を経て、研究開発が順調に進められ、ベンチスケールからパイロットプラント段階迄に達すると、実用化目前となり、開発担当者の目の色も変わり、世間も大いに成果を注目する。

実際には、さらに進んで、実証設備が建設され、試験的にせよ商業的なルートに乗ったコスト評価の洗礼を受けなければ、実用化されたとは云えない。むしろ、第二号、三号と拡大再現されないと、本当に実用化したとも云えない。しかしながら、この実証の段階には、特に鉄鋼の分野では、多くの場合、多額の資金を要するという深い谷間があり、資金の手当が付かない場合は、谷間を渡れずに、ライフステージを終える羽目になる。これを、実用化の谷間と呼ぶことにすれば、多くの国家プロジェクトといわれたプロセス研究が、この谷間を渡れずに、あたら、パイロットプラントの報告書の段階に止まっている。

そこで、ここでは、まず、これらの谷間について、筆者が関わったものの中から紹介し、谷間を渡るための考察を加えることにする。

3.1 基礎研究の谷間を渡れない課題

1) 湧昇流を積極的に活用した海洋牧場²⁾

海洋における鉛直方向の栄養成分分布は、地球上の海表面の90%以上では、図1に見るように、表面付近で極端に貧栄養状態で、深くなるほど濃度が高くなる。光の届く100m程の深さまでは、光化学反応により植物プランクトンの活動が活発なことを反映していると言われる。つまり、植物プランクトンの成長にとって、海洋表面は栄養成分の供給律速の状態にあり、栄養分を海洋表面に供給してやれば、植物プランクトンの成長を促進できるはずである。

深層の海水を供給することは、その最も有力な方法と考えられる。実際に、自然界ではそれが、湧昇流という形で実現しており、大規模に湧昇流が起こる諸大陸の西海岸は、世界的な漁場になっている。黒潮に浮かぶ三宅島は、黒潮の流れに抗することで、湧昇流を発生させ、島の周囲で、海産生物の成育に大きな相違が観測されている。

そこで、かつて、西山記念講座で、筆者が提案した湧昇流の人工的活用法について、もう少し、現実的な方法を考えて

みたい。

湧昇流の活用は、既に、小さな規模では行われ、成果も報告されている³⁾。

そこで、まず、日本近海の大陸棚で、大規模な湧昇流形成海域や、人工的な構造物の付加により、湧昇流が大きく促進され得るような構造をもつスロープや海底山脈などを探索する。場合によっては、さらに深い外洋にも探索を広げる。そこに、湧昇流誘起構造物を建設する。そして、その深層水が大量にわき上がってくる海域一帯に、植物プランクトンが集中的に発生、維持されるような構造物を造る。例えば、図2のような昆布の大群生林を形成させれば、それは、大量の魚群を育成すると同時に莫大な量のCO₂を吸収し、水素源となるバイオマスも取り出せる広大な海洋牧場になり得るのではないか。図1の濃度を参考に、10%の反応率を仮定して試算すれば、黒潮流域に、100 m厚×1000 m幅×10 km/hrの湧昇流誘起ができれば、それは、260万トン/年のCO₂吸収期待量(C換算)になる。世界の漁獲量が年間約1億トンであることを考えれば、この数値の大きさが理解できる。折角、深層水中に閉じこめてあるCO₂を、少なくとも夜間は大気に放出することになるというマイナス効果もあり得る。太陽光をより深い層まで到達させたり革新的な夜間照明を工夫するなど、深層海流利用のこのような夢の下に、海洋学、水産学、鉄鋼材料学、土木工学、光学など様々な分野を覆う学際的研究が進められることが望まれる。

2) 人工雲の形成促進

夏の夕立は、暑い日中に海上で成長した入道雲が陸地に流されてきて、雨となって降り注ぐもので、そのメカニズムは

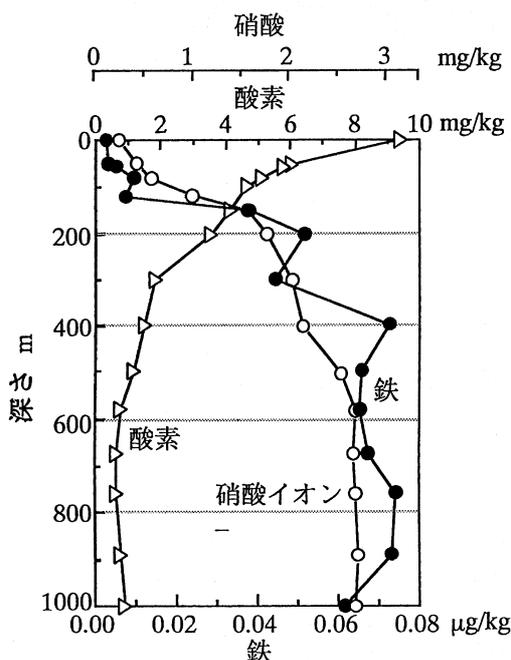


図1 海水中の栄養分濃度の深さ方向変化の例

よく知られている⁴⁾。台風の発生初期のメカニズムも基本的には同様と考えられている。海洋表面が一定温度以上になり、水蒸気圧が一定水準以上になったところで、局部的に強い上昇気流の発生が引き金になる。その気流は、上昇過程で断熱膨張により水滴を凝縮して潜熱を放出する。その結果、周囲よりも高い温度が維持され、さらに上昇の駆動力を獲得する。しかも、上昇気流の発生場所には、周辺海面上の高い水蒸気濃度の空気が流れ込み、絶えず水蒸気が供給されるので、上昇気流の上昇力と周辺空気への収束力は加速度的に増大する。こうして生成した上昇気流は、一定高さで、雲を形成する。雲は、偏西風に乗って流される間に、内部で水滴群を凝集成長させ、やがて、降雨条件に達すると雨を降らせる。そこに、人間がいると、さわやかな夕立を観測できる訳である。

この一連のプロセスは、図3に示すように、太陽エネルギーを用いた海洋表面から陸地への淡水の輸送プロセスとして捉えることが出来る。

その鍵は、一定水準以上の飽和蒸気圧が達成されるある面積以上の広大な水面の存在であり、もう一つは、強い上昇気

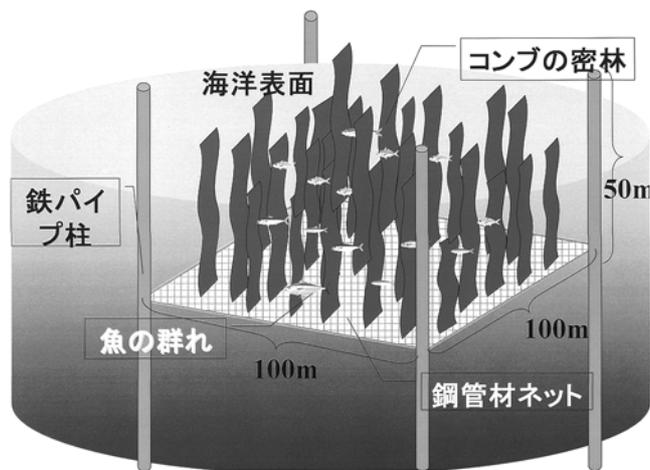


図2 鋼管ネット魚礁のイメージ図

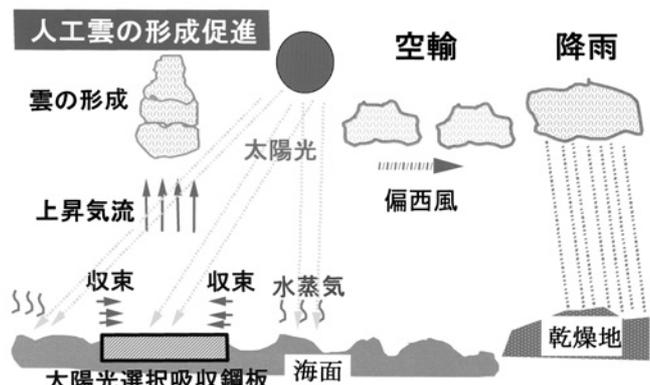


図3 海洋から乾燥地への太陽熱利用による淡水の輸送イメージ図

流を、自己増殖的に成長できるまで、ある時間以上継続させるような仕掛けであると思われる。

世界地図を眺めると、西岸を大海に接しながら砂漠地帯の憂き目を負っている地域が多数ある。そういう乾燥地域は、日射も強く、地表や海表面上での水蒸気圧も高い。高い青空に白い雲が幾つか浮かんでいる映像にお目にかかることもある。それにも拘わらず、降雨にいたる入道雲が生成しないのは、この亜熱帯地域の全地球的規模での高気圧のせいと考えられる。しかし、何らかの仕掛けにより、強力な上昇気流を人工的に発生させ、周辺地域から収束流を呼び込めるほどに、継続発達させることが出来れば、局部的に降雨現象をもたらすほどの雲を造ることが出来るのではなかろうか。

例えば、広大な乾燥地域に隣接する海洋表面すれすれに、少なくとも数キロメートル四方規模で、太陽光の選択吸収処理を施した鋼板製の巨大な筏群を集結させ、この領域の海面温度を大幅に高めることで、強力な上昇気流を発生させ、雲の形成を促進させる。どういふところに、どういふ特性の筏群を、どの程度の規模で集結させるべきかは、最終的には実験が必要だが、その実験条件を設定するには、計算機によるシミュレーションが最も有効であろう。そもそもこのような人工雲促進システムが、地球規模の高気圧地域で機能し得るかの可能性の探索から始めれば良い。

しかし、実際には、上昇気流中に水滴が凝縮成長する核生成、拡散現象やその微粒子表面から周辺空気への放射伝熱の過程を表すナノオーダーの物理化学モデルから、高度数千メートル広さ数百平方キロメートルにわたる気流の運動を記述するメソスケール気象モデルまで、10数桁立方の空間をカバーする計算が必要とされ、真っ正面から取り組むことは、現在の高性能コンピューターをもってしても、容易ではない。従って、数十キロメートルオーダーの空間のごく一部のみにナノメートルオーダーの空間を切り込むような計算手法など計算技術の手法開発も含め、シミュレーション技術を総動員して、可能な条件を探索し、実際の海洋面上での巨大な実証実験の仕様を設定する必要がある。

世の中には、都市計画や港湾の配置、周辺海域の事情から、意図しないで人工雲の形成を促進する地理的条件が出来上がっている地域があるかもしれない。シミュレーションや実験の前に、人工雲形成促進の見地から、まず、そのような地域を探索することが有効かもしれない。

3.2 実用化の谷間を、未だ越えられない課題

1) 有機性廃棄物の亜臨界水処理⁵⁾

水は一気圧下では、100℃で沸騰して、水蒸気となる。加圧すれば、沸騰が抑えられ、高温でも液体状態を維持する。

この場合、気体の密度は加圧のために上がり、液体の密度

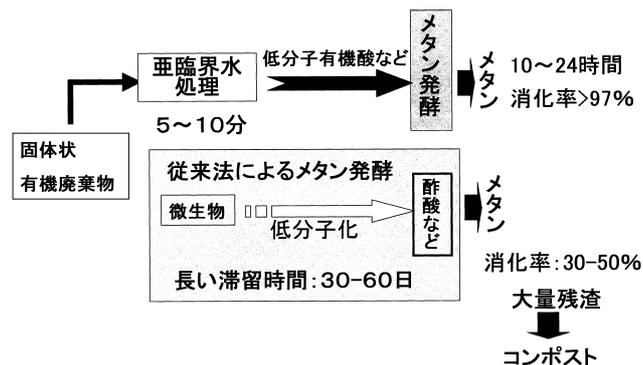


図4 有機廃棄物のメタン発酵における従来法と亜臨界水処理法の比較⁵⁾

は高温のために下がる。221気圧、374℃の水の臨界点に達すれば、気液の密度は等しくなり、これ以上では、超臨界流体と言われる。超臨界水は、酸化力が強く溶解度や拡散速度が大きいなど魅力的な特性を持つために、筆者もかつて、その製錬反応への応用を目指した研究に携わったことがある。この臨界点未満の水は、亜臨界水と呼ばれ、特に有機物の処理に大きな特性を発揮することが分かり、大阪府立大の吉田教授を中心に、文科省肝入りの21世紀COEプログラムにも発足の年度に採択され、活発な応用研究が展開されている。

たとえば、生ゴミを発酵させて、メタンガスを回収すると共に、残渣を堆肥化して利用するという廃棄物処理プロセスが脚光を浴び、大型処理場の建設運用に期待が集まっている。しかし、発酵に要する時間が長い上に、有機物の消化率、つまりガス化率が低いために、残渣の発生量が多く、その堆肥化にも時間を要し、処理場は巨大な設備と広大な面積を必要とする。発酵処理速度が小さい理由は、このプロセスが、有機物の酢酸クラスの有機酸への分解過程と有機酸のメタン発酵の二段階からなり、分解バクテリアの働きが悪いためと言われる。このバクテリアに替えて、亜臨界水処理を用いると、この分解プロセスは10分以下に、桁違いに短縮され、消化率も97%以上になり、実質的に堆肥工程を回避できる。その結果、設備、面積共に大幅な圧縮が可能となる。現在、4トン/日のパイロットプラントが完成し、様々な応用実験が開始されている。将来は、メタンのみではなく、水素発酵への展開も視野に入っている。

製鉄所は、250℃未満の廃熱を大量に発生しているため、この温度領域を活用できる亜臨界水利用プロセスは検討に値しよう。使用鋼材や反応装置の特性解明も含め、今後は実証設備へ向けての鉄鋼研究者からの大きな貢献が期待される。

2) コンパクト高炉

石井邦宣北大教授をリーダーとし、日本の大学、企業の製鉄研究者を結集した超省エネ型コンパクト高炉の研究プロジェクトが、最終報告書を提出した⁶⁾。本稿で、詳細な紹介を

する紙数はないが、多数の興味ある研究成果や提案が盛り込まれている。

一つだけ例を挙げると、新型炭材内装ペレットの提案が目される。従来型の炭材内装ペレットも、その良好な被還元性と省エネ効果は把握されていたが、ペレットとしての形状と強度を維持するための結合材にセメントを用いるために、スラグ量が増大し、所期の目的の達成には至らなかった。新しい提案は、結合材に石炭を用いて熱処理に工夫を凝らして結合させるもので、被還元性とスラグ量の両面から効果を上げ、熱保存帯の温度低下を通じた省エネ効果も達成できることが、シミュレータの結果で得られている。プロセス分野での大学主導の産学共同研究の成果が、具体的に実機化されるという点では、画期的な事例になることが期待される。

3) 新コークス炉 SCOPE21⁷⁾

世界で毎年製造される8億トンの鉄鋼の内、6割以上は高炉を経由する。高炉には、コークスが不可欠であり、毎年3億トンに近い製鉄用コークスが生産されている。耐火煉瓦の固まりと称されるコークス炉は、一基で数百億円を要するので、各製鉄所では、コークス炉の寿命延長技術を開発し、日本のコークス炉は、軒並み長寿命を達成しているが、高齢化に伴う生産性の低下や環境対策が困難などの問題が顕在化しつつある。結果として、日本におけるコークスの供給は、既に逼迫しており、コークスの不足分200万トン程度を、従来の2～3倍の値段で購入する立場に追い込まれている。こうして、客観情勢から見る限り、従来型を含め、新しいコークス炉建設への決断の機は熟していると思われる。

そこで、日本では、製鉄メーカーとコークスメーカーが結集して、国の支援も得て、新型のコークス製造システム開発の国家プロジェクトをSCOPE21と銘打って遂行し、日本のコークス研究者の全力と115億円に近い研究費と10年近い歳月を投入して、図5のような新しい製造法を完成させた。最後の3年間には、パイロットプラントの操業も行って、新方法の実用化の見通しも得られた。

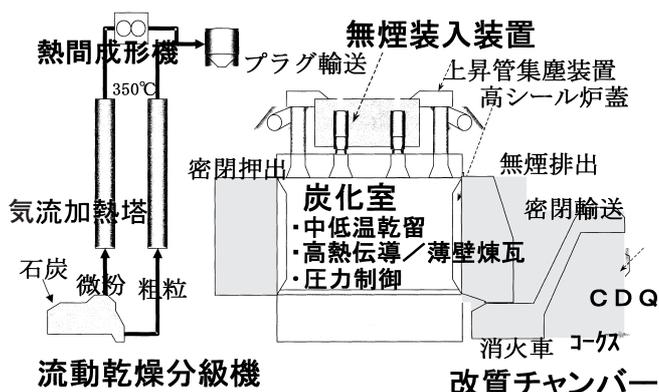


図5 SCOPE21の主要設備構成図

その特徴は、図6に、概念的に示されるように、石炭溶融温度まで急速加熱して粘結成分の分解離脱を抑制することで、強粘結炭以外の石炭を従来以上に使えるようコークス炉の炭火室壁を高熱伝導性にすると同時に、中低温窯出しにより、乾留時間の大幅な短縮を図ることにある。このような方式により、2倍以上の生産性が得られる。最終的には、設備コスト16%、製造費18%の削減効果を試算している。さらに、極力密閉方式を取り入れて、環境対策における従来型の弱点の克服に努めている。

しかし、SCOPE21の全面的実用化に際しては、実証性等の面でなお課題が残されている。

従って、次のステップとしては、実証炉の建設を行って、新プロセスの優秀性の実証と従来型のコークスとは異なる形状などに現場の高炉操業者が抱えている不安を払拭する必要があるが、日本の個別の製鉄会社では、また、世界のどの会社でも、商業的に、100億円以上の費用を掛けて、これだけの実証炉の建設を行う余裕はない。

将来をみれば、世界的にもコークス炉の増設は必須であり、従来方式では高炉の衰退につながるとまで指摘⁸⁾される中、開発されたプロセスが高い競争力を持ち得ると期待されるにも拘わらず、そのためのステップが踏み込めないことは、由々しい問題と云える。

まさに、SCOPE21の新コークス炉は、実用化の谷間の前に、苦吟している。

4 夢の実現を求めて

ここで、SCOPE21の場合について、西山弥太郎氏の故事に戻って考えてみよう。

彼は、千葉製鉄所の建設を構想したとき、三つの要因を冷静に検討したと言われる。

市場の要求、供給の裏付けとなる技術力、資金の外部からの調達である。

コークスへの需要は十分に高いが問題はそれらが高炉で、

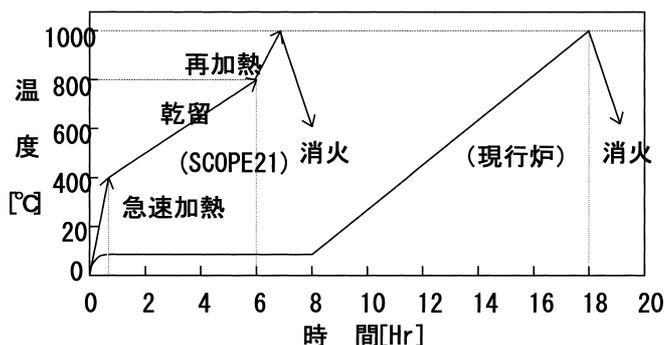


図6 SCOPE21プロセスと現行法の乾留時間比較概念図

それなりに使用できるかどうかの判断である。技術力も、高炉への使用で問題なければ、ほぼ自動的にクリアされる。

資金に関する外部調達の方法が残る課題である。西山氏の時代と異なることは、外部資金に関しては、様々な可能性が存在することであり、それらをどのように、このプロジェクトに向けるかの工夫に知恵が要求される。

そのためには、SCOPE21の新コークス炉建設は実証試験の色が強いが、それにもかかわらず、商業的に見ても、十分な利益が得られる事業であるとの位置づけとそれを具体的な事業評価により保証する必要がある。

この段階では、製鉄各社のコークスユーザーとしての協力が不可欠である。すなわち、例えば、200万トンの実証炉を建設する場合、まずどこかの会社が建設の場所を提供して、副産物のコークス炉ガスなどを引取ってくれる保証が要る。次に、各社が分担して、製品の引取りを確約してくれなくてはならない。日本全体で、4000万トンほどのコークスを消費しているので、たとえ、当初は使い勝手が悪くても、相応な価格であれば、各社、5%程は引取ってくれるのではないか。その確約があれば、事業として成立し得る。

そこで、図7のようなスキームにより、SCOPE21の実現を展望してみたい。

まず、SCOPE21の実現を目指す「新コークス炉実現推進会」が発足し、実現のための戦略、戦術を練り、技術、法律、事業評価、市場評価、資金調達、将来計画等のコーディネートを受持つ。この段階で、学会も積極的に関与する。次に、新コークス炉の設計、建設、操業と新コークス製造販売の実行責任を負う「新コークス会社」の設立が必要である。そして、上述の製鉄各社の引取り保証を得た後、専門の複数の機関に事業評価を委託する。その場合、外国の研究者や企業なども入った第三者による技術評価も必要となろう。しっかりした事業評価に基づいて、公的機関も含む資金運用機関から、投資を受け、建設・操業に踏み込む。

高炉でも、新コークス使用のノウハウが蓄積され、新コークスの使用実績が高まって、新しい製鉄原料として実証されると、その後は、日本発の新世代コークス炉として、大きな需要が保証されることになる。「新会社」や資金提供機関がその成果を享受することになるが、それらと共に、「実現促進会」も恩恵にあずかり、ここを通して、日本やひいては、世界の鉄鋼研究者にその恩恵が広がっていき、次なる研究成果につながっていくことを夢見るものである。

5 おわりに

自分の名前にかこつけて、突拍子もないことを話すと、地下の西山さんは、おそらく、苦笑しておられるかと思う。今

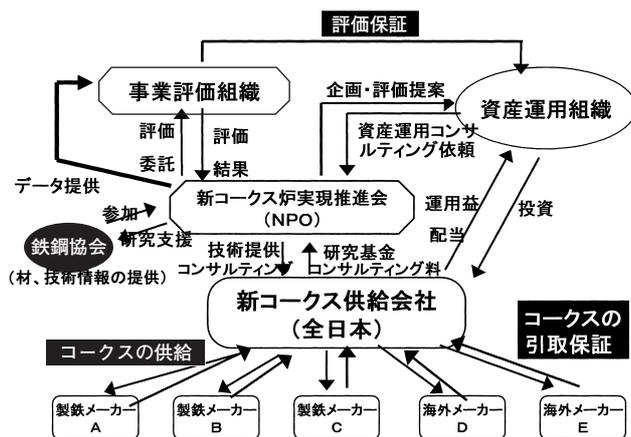


図7 SCOPE21実証炉実現のビジネスフロー図

後の21世紀前半において、日本鉄鋼業が、20世紀後半の産業と技術の発展で演じた世界史的役割を継承し、さらなる発展を展望する意味で、西山さんの故事を引き合いに出したもので、そのことに免じて、許して頂きたい。

参考文献

- 1) 西山弥太郎：鉄鋼巨人伝，鉄鋼新聞社編(1971)，米倉誠一郎：鉄鋼—その連続性と非連続性，東洋経済新聞社(1991)，佐々木聡：日本の戦後起業家史，反骨の系譜，有斐閣，(2001)
- 2) 徳田昌則：夢の次世代鉄鋼技術，第135回西山記念講座，日本鉄鋼協会，(1990)
- 3) 技術創世紀—未来と向き合う，日本経済新聞，(2001.8.22)
- 4) 浅井富雄：たとえば，大気対流の科学，東京堂出版，(1983)，68，79.
- 5) 吉田弘之：21世紀COEプログラム，水を反応場を用いる有機資源循環科学・工学報告書，大阪府立大学，(2004)，H. Yoshida, H. Tokumoto and K. Nishiguchi：High Speed and efficient methane fermentation process for excess sludge using sub-critical water hydrolysis as pretreatment, Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering, (2004)
- 6) エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究成果報告書，文科省研究振興課，(2003)
- 7) 石炭高度転換コークス製造技術の開発，経済産業省資源エネルギー庁 資源・燃料部 石炭課，(2003)
- 8) E.フィングルトン著中沢訳：製造業が国を救う，早川書房，(1999)，221.

(2004年5月7日受付)