



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

スケールアップ試験に思うこと ～期待とその役割～

Expectations and Roles of Scale-up Experiments

紫垣伸行

Nobuyuki Shigaki

JFEスチール（株）
スチール研究所

環境プロセス研究部 主任研究員

CO₂削減の重要性が述べられるようになって久しいが、大量のCO₂を排出している製鉄プロセスでは、実機化した際の設備スケールも膨大となるため、CO₂削減技術の開発を行う上で、実験室レベルの小規模試験から大型ベンチ試験等へのスケールアップは常に難しい問題である。スケールアップ試験の困難さとスケールアップ試験で得られる新たな情報量とが単純な比例関係で表せないことが、その問題の一端にある。例えば装置サイズを大型化した場合、ある特定のサイズからは装置改造に設備工事が発生して装置改造負荷が極めて大きくなる。一方で、有意義な結果を得るためには相応のスケールアップ比での試験が必要であるため、装置高さに制約を設けることでスケールアップ試験自体の意義が希薄になる場合もある。近年、計算機性能の飛躍的向上により、CFD解析等のシミュレーションでもある程度の確度でスケールアップ性能を予測可能となってきたため、スケールアップ試験を省略することも1つの選択肢である。しかしながら、シミュレーション結果の信頼性は各種モデル式のパラメーター精度に依存するため、詰まるところ信頼し得るスケールでの試験データも必須であるというジレンマもある。そのような観点も踏まえて、スケールアップ試験の在り方を改めて考えてみる。

スケールアップ試験の意味合いを考える際、逆説的な見方をすればスケールダウン試験にも何らかの意味合いが必要である。その判断として、ラボ実験などのスケールダウン試験で想定される結果について自問自答を行ってみるのが筆者なりの方法論である。「実機だとガス流れが異なるのでは?」「小型装置だとヒートロスが大きいのでは?」などの様々な仮想問いに対して、スケールアップ試験を回避し得るだけの合理的な回答が難しい場合、結果的には早い段階でスケールアップ試験に踏み込んだ方が開発期間の短縮や開発費削減に繋がる場合もある。もう一つの判断基準として、装置のアス

ペクト比（縦横比など）がある。例えば、充填槽型反応器を考える場合、充填物の体積は3次的に増加する一方で、内壁面積は2次的に拡大するため、適切なアスペクト比を保ったスケールアップ試験でないとヒートバランス等が想定実機と異なる性能評価となってしまう。設置可能なスペースも含めて、適切なアスペクト比でのスケールアップ試験が可能か、というのも重要な観点である。

筆者は、2010年度から2016年度までの7年間、新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究開発プロジェクト「環境調和型製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」に参画して、「製鋼スラグ顕熱回収技術」および「物理吸着CO₂分離技術」の開発に従事してきた。何れもベンチ試験設備による実証試験を行っており、スケールアップに伴う様々な難しい課題に直面して紆余曲折しながらも、周囲の有識者の方々および工場スタッフ含めてベンチ試験に協力頂いた多くの方々の御支援のおかげで、最終的には計画通り開発完了することが出来た。その感謝の気持ちも含めて、本稿では今までに筆者が取り組んだCOURSE50ベンチ試験設備の開発経緯の一端について紹介させて頂く。

1 製鋼スラグ顕熱回収技術の開発

COURSE50では、高炉における水素還元および高炉ガスからのCO₂分離という2つの主要技術と、CO₂分離エネルギーとして必要な製鉄所未利用排熱の回収など主要技術を支えるサポート技術を開発している。製鉄所未利用排熱回収技術の1つとしてJFEスチールが開発担当した製鋼スラグ顕熱回収技術は、製鉄所未利用排熱の中でも特に高温で利用価値の高い熔融スラグの熱回収を行うものである¹⁻⁵⁾。本プロセスは、熔融スラグを水冷ロール表面上で板状に凝固させるスラ

グ連続凝固設備と、高温の板状凝固スラグを熱間破碎した後
に充填して熱回収を行うスラグ熱回収設備から構成される。
スラグ連続凝固設備については、小型設備だと連続運転試験
によるプロセス評価が難しくなるため、予め想定実機と同程
度のスケールで設計された。筆者が開発担当したのはスラグ
熱回収設備であるが、設計段階での課題はその設備スケール
の選定であった。本来、充填槽サイズは比較的自由度が高い
設計項目であるが、当該設備を設置可能なレイアウトを検討
した結果、充填槽を高くすると装入・排出シュートの角度制
約、充填槽断面積を大きくするとスラグ傾斜充填によるガス
偏流リスクが生じることが分かった。シュート角度について
は、ラボ実験で試作した板状凝固スラグ破碎品の安息角につ
いての評価は行っていたが、実際にベンチ試験設備で製造さ
れる板状凝固スラグの安息角はラボ試作品とは異なる可能
性があるため、若干余裕を持ったシュート角設計が必要であ
る。スラグ傾斜充填については、3次元CFD解析でスラグ充
填槽内のガス流れ分布や熱回収率への影響が予測出来るこ
ともあり、ガス偏流が起こり難い送風口レイアウトにするなど
設計上の配慮は行っていたが、著しい傾斜充填が生じると低
圧損領域へのガス偏流が顕著になり、熱回収率に与える影響
が無視出来なくなる。諸々検討を行った結果、スラグ連続凝
固設備のスラグ搬送用エプロンコンベアの末端から連結する
形でスラグ垂直搬送用バケットエレベーターを設けて装置
高さを確保し、奥行1.5m×幅2.0m×高さ2m、充填量6 t-slag
の充填槽として設計した。充填槽を角型にしたのは、熱回収
ガス送風時の内圧が小さく、建設コスト面で円筒型にするメ
リットが小さいためである。図1に、スラグ連続凝固設備お
よびスラグ熱回収設備の設備構成を示す^{6,8)}。スラグ熱回収
設備の処理能力は最大10t-slag/h（設計値）で、スラグ連続
凝固設備の処理能力60t-slag/hに対して1/6程度の処理能力
であるため、前記エプロンコンベアとバケットエレベーター

の連結部にスライド式シュートを設けて、スラグ熱回収設備
へのスラグ供給量を調整可能とした。図2は、実際に建設し
たスラグ熱回収設備の外観写真である。本設備は屋外設備で
あり、スラグ充填槽の上部スペースは比較的余裕があったた
め、熱回収ガス测温用の熱電対や熱回収ガス冷却用の散水設
備および除塵設備は問題なくレイアウト出来た。実際のベン
チ試験では、スラグ連続凝固設備のスラグ安定供給やスラグ
熱回収設備との連動部分など、設計とは異なる運転面での難
しさもあったが、最終的には本プロジェクトの目標であった
熱回収率30%（vs 熔融スラグ保有熱）を大きく上回る熱回
収率43%を達成することが出来た^{9,12)}。このような大型ベン
チ試験設備になると、工場の実操業と絡む試験規模となるた
め、試験チャンスが限定されて試験回数を増やすことは難し
い。しかしながら、熔融スラグは、温度や組成による固液比
および流動性の変化が大きいため、ラボスケールで如何に多
くの試験を行ってもプロセス実現性についての確証までには



図2 スラグ熱回収設備の外観写真⁶⁾

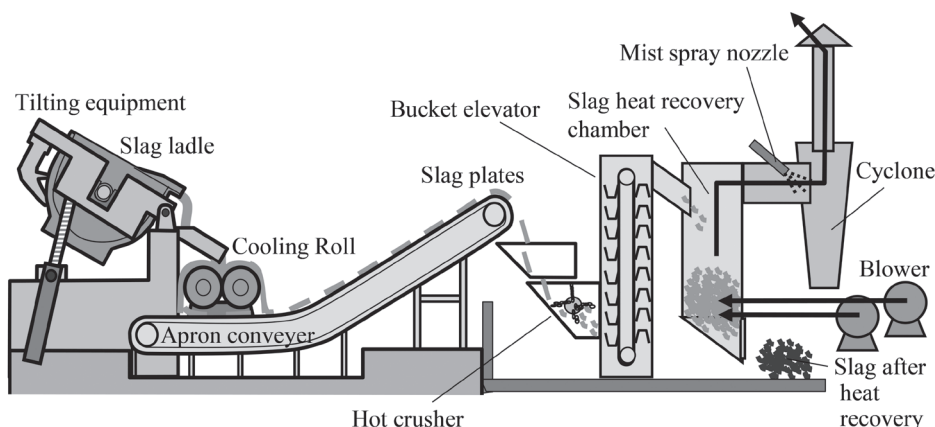


図1 COURSE50 製鋼スラグ熱回収ベンチ設備⁶⁾ (左：スラグ連続凝固設備，右：スラグ熱回収設備)

至らない。設計当初から、建設、運転に至るまで幾多の苦労を抱えながらも、初めてベンチスケールでプロセス実証を出来たということが本プロジェクトにおける何よりも大きな成果であった。

2 物理吸着 CO₂ 分離技術開発

物理吸着 CO₂ 分離は、圧力スイング吸着 (Pressure Swing Adsorption, 以下 PSA) と呼ばれるガス分離方法であり、産業用ガス製造方法の1つとして用いられている。この PSA を高炉ガスからの大規模 CO₂ 分離に適用する場合、ガス組成や吸着塔圧力損失が CO₂ 分離性能へ与える影響、長期運転時の吸着剤耐久性などを評価する必要がある。筆者は、前述のスラグ熱回収設備の建設および設備立ち上げ後のベンチ試験を終えた後、2014年度から2016年度までの3年間、物理吸着 CO₂ 分離ベンチプラントの試験運転に携わってきた¹³⁻¹⁸⁾。図3に本ベンチプラントの外観写真を示す¹⁹⁾。設備スケールは、想定実機の処理能力 1500 t-CO₂/day (50 万 t-CO₂/y) に対して 1/300 の 5 t-CO₂/day でガス圧縮機や真空ポンプなどの主要機器仕様が設計されている。吸着剤充填量と処理能力は概ね比例関係にあるので、設備スケールから吸着剤充填量は自ずと決定されるが、吸着塔形状については、吸着塔内径×吸着剤充填高さの選定に自由度がある。本ベンチプラントでは、吸着塔内径を 0.6m、吸着剤充填高さを想定実機並みの 1.5m とした縦長の吸着塔で設計した。PSA の吸着塔内径が小さい場合、ヒートロスが CO₂ 分離性能の誤差要因になるケースもあるが、本ベンチプラントの吸着剤温度は運転中も常温程度で温度変動が小さく、吸着塔内の径方向温度分布の実測結果からヒートロス影響が小さいことが予め確認されている。一方、吸着塔高さについては、吸着塔の圧力損失が、真空ポンプなど機械設備の設計仕様のみでなく、吸着剤の CO₂ 吸脱着挙動およびその塔内分布にまで影響を及ぼすため、より正確な圧力損失影響評価を行うために想定実機と同じ高さとした。図4は、実際に建設した物理吸着 CO₂ 分離ベンチプラン



図3 物理吸着 CO₂ 分離ベンチプラント¹⁹⁾

トの吸着塔である。上下ガス配管や開閉弁など付帯装置も含めると吸着塔部分の高さは約3mとなった。幸い、吸着剤入れ替え作業や開閉弁メンテナンス頻度が少なかったため、長期運転期間中においても吸着塔高さが工程上のネックになることは無かった。一方で、本ベンチプラントは試験設備であるため、ガスライン変更やサンプリングガス採取のための分岐配管を多数設けており、プラント改造工事の際の配管内 N₂ 置換作業などは非常に多くの工数を要した。プラント設計時には、設計思想が運転側に偏りがちであるが、プラント停止作業における作業性も考慮した配管設計にしておけば更に効率的にプラント運用出来たのでは、というのはベンチ試験後の回想である。このような部分で、時として運転スタッフに過剰な工数を割いてもらうことになったのはプラント運用面での反省点ではあったが、本プロジェクトの成果としては、吸着剤形状による真空ポンプ動力削減効果や、実高炉ガスを用いた累計 1000 時間の吸着剤長期耐久性の実証など、高炉ガス CO₂-PSA の実機設計に必要な数多くの試験結果を得ることが出来た²⁰⁻²²⁾。ガス吸着分離プロセスの研究では、開発フェーズでこのようなベンチスケールでの実証試験を行うケースは極めて稀であり、2016年にドイツで開催された国際吸着学会における依頼講演²³⁾ など、鉄鋼分野以外でも注目されるプロジェクトであった。CO₂ 削減は、鉄鋼業単独で完結的に取り組める部分が少なく、社外との連携が今後ますます重要となってくる。今回のようなプロジェクトをきっかけとして、より多くの業界に鉄鋼業へ関心を持って頂ければ、鉄鋼業界の今後の更なる発展という意味でも有意義である。



図4 PSA 吸着塔 (右下：筆者)

3 おわりに

スケールアップ試験は、現実的には、予算、敷地、環境など様々な制約があるため、それら制約下で何が実現可能で何を明確化できるのかを見極めながら試験計画の立案を行う。設備が大きいほど建設時の苦労や運用面での困難さを伴うが、スケールアップ試験で得られる知見は、その結果の良否により程度の差はあるにせよ、確実に将来ステップアップのための礎となる。スケールアップ試験のために必要なものは、何よりも先ずはその必要性を裏付ける十分なラボ実験およびシミュレーション等の事前検証であるが、実際に試験を行わないと分からないことがある以上、事前検証のみではその実施要否の判断するのは難しい。時には幾許かの勇気や決断も必要であり、更に、御支援頂ける方々のご理解とご協力、時には社会的機運の高まりなども追い風として進めていかなくてはならない。近年の脱炭素化に向けた機運の高まりはCO₂削減技術を開発する上で大きな追い風となっており、国内、海外含めて多くの実証試験が計画および実施されている。一方で、最近ではCO₂有効利用技術 (Carbon Capture and Utilization : CCU) など、製鉄プロセスとの関わりが従来と異なるCO₂削減技術が増えてきており、スケールアップ試験の位置付けも多様化してきている。そのような難しい局面に立たされる中で、時には一歩引いた眼で現状の技術レベルや立ち位置を見極めつつ、確実に技術のレベルアップに繋がるようなスケールアップ試験の在り方を今後も考えていきたい。

謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務「環境調和型プロセス技術の開発/水素還元等プロセス技術の開発 (COURSE50)」の結果として得られたものです。

参考文献

- 1) N. Shigaki and S. Ozawa : Proceedings of the 8th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM8), 1 (2013), 769.
- 2) S. Ozawa, N. Shigaki and H. Tobo : Proceedings of the 8th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM8), 1 (2013), 761.
- 3) Y. Ta, H. Tobo, N. Shigaki and S. Ozawa : 9th Global Slag Conference and Exhibition, Proceedings, (2013), 4.1.
- 4) K. Hagiwara, N. Shigaki, H. Tobo, Y. Ta and Y. Hagio : 9th Global Slag Conference and Exhibition, Proceedings, (2013), 5.1.
- 5) 當房博幸, 紫垣伸行, 萩尾勇樹 : JFE技報, 32 (2013), 38.
- 6) 紫垣伸行, 田恵太, 鷺見郁宏 : JFE技報, 40 (2017), 80.
- 7) N. Shigaki, H. Tobo, S. Ozawa and Y. Ta : CAMP-ISIJ, 26 (2014), 143, CD-ROM.
- 8) 小澤純仁, 紫垣伸行, 當房博幸, 田恵太, 渡辺圭児, 鷺見郁宏 : CAMP-ISIJ, 28 (2015), 625, CD-ROM.
- 9) N. Shigaki, H. Tobo, S. Ozawa, Y. Ta and K. Hagiwara : ISIJ Int., 55 (2015) 10, 2258.
- 10) 紫垣伸行, 當房博幸, 小澤純仁, 田恵太, 萩原一真 : 鉄と鋼, 103 (2017) 2, 111.
- 11) N. Shigaki, S. Ozawa and I. Sumi : Energies, 10 (2017), 755.
- 12) Y. Ta, N. Shigaki and I. Sumi : International Conference on Energy and Material Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EMECR), Proceedings, (2017), 64.
- 13) 紫垣伸行, 茂木康弘, 原岡たかし, 鷺見郁宏 : 第28回日本吸着学会研究発表会講演要旨集, (2014), 37.
- 14) 紫垣伸行, 茂木康弘, 原岡たかし, 鷺見郁宏 : 第29回日本吸着学会研究発表会講演要旨集, (2015), 28.
- 15) 紫垣伸行, 茂木康弘, 原岡たかし, 鷺見郁宏 : 第30回日本吸着学会研究発表会講演要旨集, (2016), 38.
- 16) 紫垣伸行, 茂木康弘, 原岡たかし, 鷺見郁宏 : Adsorption News, 30 (2016) 3, 9.
- 17) 紫垣伸行, 茂木康弘, 原岡たかし, 鷺見郁宏 : CAMP-ISIJ, 30 (2017), 759, CD-ROM.
- 18) N. Shigaki, Y. Mogi, T. Haraoka and E. Furuya : SN Applied Sciences, 2 (2020), 488.
- 19) 紫垣伸行, 茂木康弘, 原岡たかし : 新訂三版 最新吸着技術便覧 プロセス・材料・設計 (エヌ・ティー・エス), 第2章, 第4節
- 20) 紫垣伸行, 茂木康弘, 原岡たかし, 鷺見郁宏 : CAMP-ISIJ, 31 (2018), 659, CD-ROM.
- 21) N. Shigaki, Y. Mogi, T. Haraoka and I. Sumi : Energies, 11 (2018), 900.
- 22) N. Shigaki, Y. Mogi, T. Haraoka and I. Sumi : International Conference on Energy and Material Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EMECR), Proceedings, (2017), 438.
- 23) N. Shigaki, T. Haraoka, Y. Mogi and I. Sumi : 12th International Conference on the Fundamentals of Adsorption (FOA12), Book of Abstracts, (2016), 210.

(2021年2月26日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

名古屋大学 大学院工学研究科 物質プロセス工学専攻 教授

川尻 喜章

―― 酸化炭素排出削減、および分離回収は近年になっ
―― て急速に注目が集まっています。2020年10月には、菅総理大臣が2050年までに二酸化炭素の正味排出量をゼロにするカーボンニュートラルの実現を目指すことを宣言しました。二酸化炭素の排出を抑制するために、鉄鋼業界には大きな期待が寄せられています。二酸化炭素の正味排出量を削減するには、二酸化炭素発生の排出原因そのものを減らす技術、そして排出した二酸化炭素を回収する技術の両方が必要です。JFEスチール社はこの分野で世界をリードする成果をあげられています。

筆者は2008年から2017年まで米国のジョージア工科大学において研究室を運営しながら二酸化炭素吸着分離の研究に携わっており、国外から日本の研究開発動向を見る機会に恵まれました。米国の大学に在籍する身として国際学会に参加する中で、日本の産業界を代表して成果を発表される紫垣様を頼もしく見ておりました。

本稿のテーマであるスケールアップは、長年にわたり学界と産業界を悩ませてきた問題です。スケールアップとは小規模でしか実証されていない結果を大規模で実証する工程で、大学の研究者が取り扱うテーマとして極めて難しいものの一つです。大型の装置では、小規模では起こりえなかった非理想的条件、例えば温度や濃度の

不均一性、物質移動や熱移動速度などが、思わぬ結果をもたらすことがあります。このスケールアップを検討するには、小型の装置を少人数の研究者で運転する大学での研究と違い、より多くの人手をかけた大型装置の設計と運転が必要になります。文献から得られる学術的情報も決して多くないこの分野に果敢に挑戦する産業界の方々に敬意を表すると共に、産業界と学界が連携しながらこの問題に取り組む必要性を感じています。

温暖化ガス排出抑制をはじめとして、今日の日本には多分野の人たちが協力して解決すべき問題が多く存在しています。これら地球規模の問題のためには、従来の発想を超えたブレークスルー技術が求められており、そのような技術の開発のためには異分野の研究者や技術者が協力体制を構築する必要があります。海外で15年間の研究活動を行った筆者から見ても、日本の鉄鋼会社は金属や材料だけでなく様々な学術的バックグラウンドを持つ研究者、技術者を有する点において特徴的で、地球規模の問題を解決するために世界を牽引する体制が備わっていると感じています。

これからも紫垣様のますますのご活躍をお祈り申し上げます。

日本製鉄(株) 技術開発本部 技術開発企画部 上席主幹

宇治澤 優

筆 者の紫垣さんから、御自身が執筆される「躍動」記事に対して先輩としてのエール記事を依頼された際、同じ会社の先輩に書いてもらったら良いのではと、正直、そう思っていました。筆者の「躍動」記事を読んでその意味が分かったような気がしました。それは、小生は現在、筆者が開発に従事された「環境調和型プロセス技術開発(COURSE50)」のプロジェクトリーダー補佐としてプロジェクト全体の運営・開発の推進を担っていますが、同時にCOURSE50の主開発の一つである2030年頃のCO₂低減のための高炉水素還元技術の実用化に向けたスケールアップ技術確立にも取り組んでおり、その背景も踏まえて、筆者は小生にエール記事を依頼されたのだと感じました。筆者は、COURSE50の主開発のもう一つの柱である高炉ガスに含まれるCO₂ガスの分離回収に必要なエネルギーを製鉄所内の未利用排熱から回収する省エネ技術の確立(製鋼スラグ顕熱回収技術の開発)、ならびに化学吸収法によるCO₂分離回収技術と平行して開発が進められたPSA法による物理吸着CO₂分離技術の開発に果敢に取り組まれ、近い将来、そ

の実用化が大いに期待される非常にすばらしい開発成果を上げられました。その業績に対し、改めて感謝と敬意を表したいと思います。社会実装できる技術を目指し、どちらも実機規模相当のベンチ試験設備を用いたスケールアップ技術開発に取り組まれた事は、今後、筆者が新たな研究開発、技術開発に挑まれる際に、大いに役立つ経験と実績を積まれたものと確信しております。今、鉄鋼の研究者、技術者に1番求められる事のひとつは、鉄鋼の脱炭素化に向けて、社会実装可能なプロセス技術、設備技術を早期に確立し、実装化していくことです。そのためは、筆者が取り組まれたスケールアップ技術開発が必要不可欠であり、基礎研究、シミュレーション研究をベースに、実機へのスケール効果・影響を予測し、実プロセス成立要件を把握するためのベンチプラントやパイロットプラントを設計・製作し、プロセス立証試験を実行して実装化技術を確立していかなければなりません。その道のりは、非常に険しいものですが、将来の人々の暮らしを守るために、一緒に鉄鋼の脱炭素化の技術開発、社会実装化に取り組んでいきましょう。