

(解説)



グリーン社会実現に向けた生産プロセスと製品を支える熱・流体制御技術

朴 海洋^{*1}(博士(工学))・藤澤 亮^{*1}(博士(工学))・関山和英^{*1}(博士(工学))・茂渡悠介^{*1}(博士(工学))

Thermal and Fluid Control Technologies Supporting Production Processes and Products to Realize Green Society

Dr. Haeyang PAK · Dr. Ryo FUJISAWA · Dr. Kazuhide SEKIYAMA · Dr. Yusuke SHIGETO

要旨

CO₂削減などのグリーン社会への貢献に寄与する熱・流体制御技術は、創業以来、様々な生産プロセスや製品開発のなかで発展してきた。これらの技術は流動、化学反応、伝熱挙動が複雑に絡み合うため、内部現象を理解するための可視化やプロセスを最適化するための制御は容易ではなく、CFDによる熱流体解析が用いられてきた。本稿では、直接還元鉄プラントや高炉PCI、微粉炭ボイラのような高温反応を伴う生産プロセス、ヒートポンプや混練機、気化器のような機械製品における熱・流体制御技術の変遷について適用例を中心に紹介するとともに、カーボンニュートラル実現に向けた将来の展望について解説する。

Abstract

The thermal and fluid control technology contributing to a green society, such as CO₂ reduction, has, from its beginning, evolved in various production processes and product development. These technologies involve complex interactions of fluid dynamics, chemical reactions, and heat transfer behaviors. Therefore, using visualization to aid in understanding the internal phenomena and control for process optimization is a not straightforward task. Hence, thermal fluid analysis using computational fluid dynamics (CFD) has been employed. This paper focuses on application examples, centering on the evolution of thermal and fluid control technology in production processes involving high-temperature reactions such as those in direct-reduced iron plants, pulverized coal injection (PCI) in blast furnaces and coal-fired boilers, as well as machinery products like heat pumps, mixers, and vaporizers. Also provided is an explanation of the future prospects for achieving carbon neutrality.

検索用キーワード

カーボンニュートラル、熱流体解析、高炉、直接還元鉄プラント、発電ボイラ、ヒートポンプ、混練機、気化器

まえがき＝当社は、機械系事業として圧縮機に代表される流体機械や、ヒートポンプ、混練機、熱交換器などの製品群を製造・販売するとともに、素材系事業としては製造設備である高炉や溶解炉、加熱炉、自家発電設備を保有している。いずれも熱・流動現象がプロセス性能や製品品質を支配しており、時代とともに高度化・複雑化する要求や現象に対して、熱・流体制御技術が重要な役割を担ってきた。とくに当社の製品ラインナップや生産プロセスでは、極低温から高温の幅広い範囲の温度領域や熱・流動に加えて化学反応も絡み合う複雑な現象を扱う場合が多く、熱・流体制御技術もこれらの特徴としている。例えば、省エネルギーと品質安定性、低NO_xを追求した燃焼制御技術や、溶鋼中の介在物除去のための流動制御技術は、設備導入時の事前検討や操業改善とともに発展した。また、製品ラインナップを拡充する過程においても、伝熱・流動制御により、省エネ性と製品品質を両立できる多くの産業機械を市場に投入することができた。これらの発展に大きく寄与したのがCFD(Computational Fluid Dynamics)であり、当社は1960年代後半より、機械製品や製鋼プロセス向けのシミュレ

ーション開発に着手した。当社製品ラインナップの特徴である幅広い温度領域においては、例えば、LNG用気化器のようなマイナス百数十℃レベルから、建設機械や原子力容器での数十～数百℃¹⁾、鋼の連続鍛造プロセス²⁾や廃棄物焼却炉³⁾のような1,000℃以上に至るまで、多種多様な現象解明を行ってきた。開発当初は、理論構築から始めて独自コードを開発してきたが、近年は汎用コードを応用したCFD技術や、汎用コードでは対応できない課題に対しては、独自コード群と最新技術を組み合わせながら、その適用範囲を拡大している。これにより、化学反応と熱流体挙動を連成させた還元鉄プラントの制御技術や、樹脂混練機の複雑な部分充満状態の解明により、品質と省エネを両立できる混練ロータ設計指針などの確立に寄与している。

現在、カーボンニュートラルの実現に向けて、省エネルギー技術に加え、水素やアンモニア、バイオマスなどへの低炭素燃料転換による脱炭素技術や、CO₂固定・利用のような炭素隔離技術が注目されている。低炭素燃料への転換はそれぞれの化学的性質の違いにより、ボイラ・加熱炉での燃焼特性や鉄鉱石などの還元特性が大き

*1 技術開発本部 機械研究所

く異なるため、バーナや原燃料供給方式などのプラント操業に関する新たな知見が必要となる。加えて、水素やアンモニアは物理的性質の違いにより、伝熱特性や流動挙動が大きく異なるため、機械製品の設計指針に大きく影響をおよぼす。本稿では、CO₂削減に資する生産プロセスならびに製品開発における熱・流体制御技術の変遷について、適用事例を中心に紹介するとともに、グリーン社会の実現に向けた技術開発の将来展望について解説する。

1. CFDによる熱流体解析

1.1 直接還元鉄プラント

当社は2030年度目標として、生産プロセスにおけるCO₂を30~40%削減、技術・製品・サービスによる61百万tのCO₂排出削減貢献を掲げており、これらの実現に向けたキーテクノロジーの一つが、天然ガスにより鉄鉱石を還元するMIDREX[®]プロセスである⁴⁾。MIDREX[®]プロセスは溶融鉄こそ存在しないものの、流動、化学反応、伝熱挙動が伴う複雑なプロセスである。具体的には、焼成ペレットや塊鉄石が高温のシャフト炉内を下降する間に、天然ガス由来のH₂リッチな還元ガスと接触して還元鉄となり、シャフト炉最下部から排出される。炉内ではCOやH₂による還元反応のみならず、改質反応、シフト反応、炭化・浸炭反応が起こっている。こうした内部状態を適切に理解し、かつプロセスを高度化する手法として、CFDによる熱流体解析や各種反応モデル解析技術を構築している。なお、還元鉄反応に関する詳細なメカニズム解明については、本号「還元鉄製造技術を活用したグリーン社会への貢献」(p.105~109)を参照されたい。本CFDでは反応を連成解析する化学反応ソルバーを導入し、反応速度に影響を与える熱的挙動を解く熱流体解析ソルバーと組み合わせることで、図1に示す

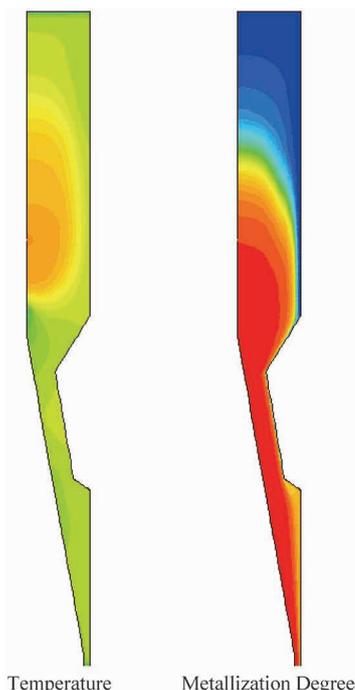


図1 シャフト炉内解析結果の例
Fig.1 Result of CFD analysis for shaft furnace

ようにシャフト炉内の温度や還元率を精度よく再現できるようになった。今後、さらなる低炭素化を目指し、水素直接還元製鉄(MIDREX H₂TM注1)のプロセス条件の最適化などに本技術を活用することで、カーボンニュートラル実現を目指していく。

1.2 ゴム・樹脂混練機

当社の産業機械の分野では、広範囲にわたる環境調和型の機械製品を製造・販売している。その中でタイヤ・ゴム機械は、難混練物質であるシリカを多く含む低燃費タイヤ向けの混練機開発を通じて、自動車燃費の向上によるCO₂削減に貢献している。樹脂機械では、世界トップシェアのポリオレフィン製造用大型混練造粒機を軸に、製品品質と省エネ性を両立できる混練機や、それにより製造される自動車軽量化向けの高性能プラスチック製品によりCO₂削減に貢献している。

混練機開発に不可欠なのは、混相流体の高度な解析技術であり、これらの開発にCFDが活用されてきた。樹脂やゴムのような高粘性流体を扱う装置では、混練機内部の材料温度や応力といった状態量を把握するために、これまで有限要素法(FEM)や有限体積法(FVM)といった格子法が一般的に用いられてきた⁵⁾。しかしながら、FEMやFVMでは混練機特有の部分充満状態(流体と空間が存在する状況)を取り扱うことが困難であり、粘性流体の分離や合流などの現象を定量的に評価することができなかった。当社は、混練機内の大きな自由表面変動を伴う部分充満流動に対して、VOF法(Volume of Fluid)や粒子法といった数値解析技術の独自開発を行うことで、従来明らかにされていなかった混練機内部の充満状態や副生成物に伴うプロセスの脱揮性能を評価できるようになった。図2は粒子法による解析結果の一例であり、樹脂の充満状態や混練状態を明確にすることで、CFDによる適正な運転条件の検討や混練ロータ形状設計を可能とした⁶⁾。引き続き、新たな数値解析技術と混練技術を用いて、樹脂やゴム材料の製造プロセスの省エネルギー化や高性能混練技術の開発を進めていく。

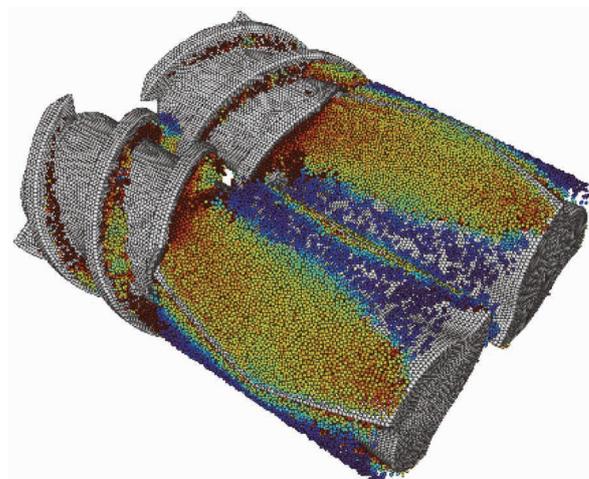


図2 樹脂混練機の部分充満解析結果の例
Fig.2 Result of partially-filled simulation for mixer

脚注1) MIDREX H₂TMは当社の商標である。

2. 高温反応プロセスの最適化

2.1 高炉操業の低炭素化

高炉はコークスを使用し鉄鉱石の還元を行うプロセスであり、当社はCO₂排出削減に資する取り組みを長年にわたり行ってきた。その一つが1983年に導入した高炉微粉炭吹込み（PCI: Pulverized Coal Injection）操業である。本技術は、還元材であるコークスを微粉炭に置き換えることで、高炉から排出されるCO₂を低減できるが、ペレット多配合操業ゆえ、融着帯の形状制御と炉中心ガス流れの確保が、当社における安定操業上の技術課題となっていた。そこで、コークス中心装入による高炉内のプロセス制御技術や、微粉炭吹込み位置や羽口形状を数値解析やラボ実証により最適化することで、PCI操業時の炉況安定技術を確立した。その結果、1998年3月に加古川1高炉において、溶銑（ようせん）1tあたりの微粉炭吹込み量が254 kg/tとなる当時の世界記録を達成⁷⁾しており、2000年代には資源循環の観点から廃プラスチック吹込みのトライアルも行っている。さらに、2020～2023年にかけてMIDREX[®]技術で製造された熱間成形還元鉄（HBI: Hot Briquetted Iron）を高炉に多量装入することで、高炉からのCO₂排出量の削減を実証した⁸⁾。今後も高炉でのCO₂削減に向けて、引き続きバイオマスや還元鉄などの原料代替を実現可能とする要素技術の検証や、操業安定化に向けた技術確立を目指していく。

2.2 微粉炭ボイラの低炭素化

当社は製鉄所の自家発電のノウハウを活かし、2002年より神戸発電所（微粉炭火力）の営業運転を開始し、現在は2019年運転開始の真岡発電所（天然ガス火力）を含め、計394.8万kWの電力事業を行っている。微粉炭燃焼の高度化は、前述のPCI技術や焼却炉設計指針を確立するための都市ごみ燃焼シミュレーション開発を源流としており、2000年代の資源価格高騰時には亜瀝青（れきせい）炭や褐炭などの低品位石炭利用技術開発^{9),10)}を、近年はカーボンニュートラル燃料利用拡大に向けた技術開発を行っている。

バイオマス燃料の利用拡大に向けて、灰性状の大幅な変化に伴うボイラの伝熱管壁への灰付着挙動を明らかにすることは特に重要である。一般的に灰付着挙動は、燃料性状（灰組成、灰融点など）やボイラ形状に依存する燃焼状態（温度、ガス組成、流速など）の影響を受けることが報告¹¹⁾されているが、それらの影響因子を統合した評価指標がなかった。そこで当社は、微粉炭ボイラ向けCFDと灰の融液状態を予測する熱力学平衡計算を組み合わせた独自の灰付着予測技術を構築した。具体的には、CFDにより伝熱管近傍のガス組成ならびに温度を予測し、それらを灰の融液計算の条件として入力することで、様々なボイラ形状や燃料条件のクリンカ生成特性を予測する技術を確立した。図3は様々な燃料種ならびに、それらの混合条件下における灰付着率（実測値）と灰中融液割合（計算値）の関係を示したものであり、灰中融液割合が基準値以上になると灰付着率が増加傾向になることがわかる。加えて、木質バイオマスや下水汚

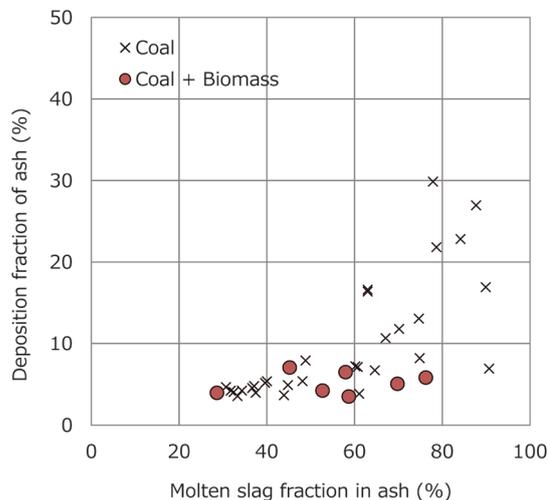


図3 灰中融液割合と灰付着率の関係

Fig.3 Relationship between molten slag fraction and ash deposition

泥炭化物のようなカーボンニュートラル燃料の混焼条件においても石炭と同様の傾向にあり、灰中融液割合が基準値以下となる混合条件（混焼率、混焼銘柄の組み合わせ）を事前予測することで、灰付着によるクリンカトラブルを回避できると考える。引き続き、様々なカーボンニュートラル燃料の燃焼特性を明らかにし、これを安定的に使いこなせる技術の確立を目指していく。

3. 流動・伝熱プロセスの最適化

3.1 ヒートポンプによる排熱利用

当社は、1915年に国産1号の高圧レシプロ圧縮機を製造して以来、圧縮機のみならず、その派生品として冷凍機、ヒートポンプの開発を行ってきた。1980年代後半には、オイルショックを契機として策定されたムーンライト計画内の「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム」に参画し、高効率ヒートポンプの開発に成功した。ここで獲得した高効率な半密閉スクリュウ圧縮機構や非共沸混合冷媒を採用したローレンツサイクル、小温度差熱交換器などのコア技術を応用し、現在では多種多様な高効率ヒートポンプを開発・販売している。図4に示すように、低温から産業用加熱に用いられる温水・蒸気といった幅広い供給温度に対応することで、工場の省エネルギーやCO₂削減に貢献している¹²⁾。例えば、2019年にプラントエンジニアリングメーカーである木村化工機（株）と共同開発した95℃温水取出機では、エネルギー多消費工程である蒸発・蒸留工程において、従来品に比べ最大60%のCO₂削減を達成することに成功している¹³⁾。

ヒートポンプをカーボンニュートラル実現に向けた化石燃料ボイラ代替とするためには、さらなる高温化や高圧縮比の達成が必要である。熱源となる外気温と出力温度の差を大きくするためには圧縮比を大きくする必要があり、当社製品は単段・二段のスクリュウ圧縮機を製品によって使い分けることで高い性能を実現している。加えて、ヒートポンプのような熱サイクル機器産業では、温室効果が高いフロン類の使用規制が進んでおり、GWP（Global Warming Potential）が1以下のHFO（Hydrofluoroolefin）

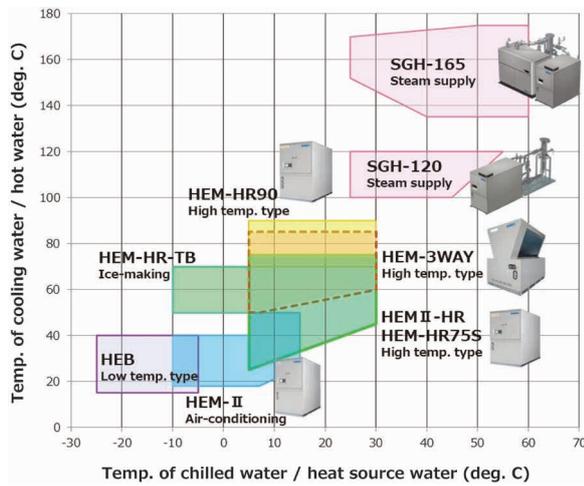


図4 当社ヒートポンプ製品の温度マップ
Fig.4 Temperature map of product

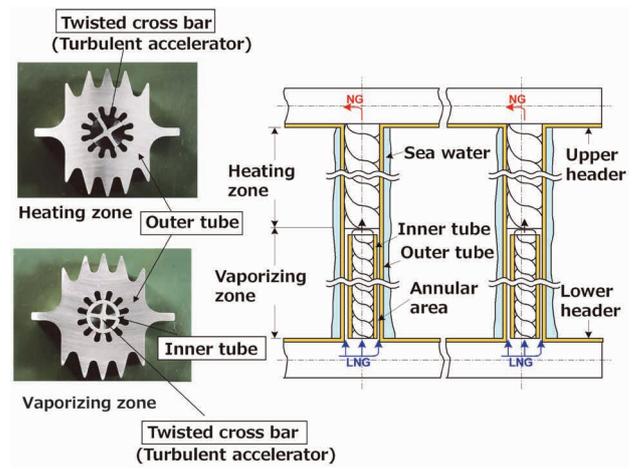


図5 SUPERORV®のパネル構造
Fig.5 Panel structure of SUPERORV®

冷媒を採用した機種を順次投入している¹⁴⁾。今後も高効率・省エネ性に優れた製品によりグリーン社会の実現に貢献していく。

3.2 低温液体燃料気化器による低炭素化

当社は空気分離製造事業により蓄積した低温領域の技術・ノウハウを活用し、1960年代に熱交換器事業を開始した。コンパクトで多流体を同時に熱交換できるALEX®(アルミろう付熱交換器)に始まり、1970年代には、火力発電所のLNG転換に合わせて低温液体燃料用気化器事業に進出し、オープンラック式気化器(ORV)を開発、続いてLNG冷熱が利用可能な中間媒体式気化器(IFV)を大阪ガス(株)からの技術供与を受け、独自展開を図った。LNGなどの低温液体燃料用気化器には様々な種類があるが、ORVは海水を熱源とするためランニングコストが安く、大規模用途として最も採用されている方式である。開発当初、LNGと常温の海水の温度差は約180℃程度となるため、ORVの伝熱管表面に海水が着水することで有効伝熱面積が減少し、性能低下が課題となっていた。大阪ガス(株)と共同開発したSUPERORV®は、図5に示すように伝熱管の下部のみを二層構造にする画期的なアイデアで伝熱管外表面の温度低下を抑制し、加えて伝熱管1本当たりの気化能力を従来の約3倍に向上させたコンパクトでコストパフォーマンスも高い気化器となった¹⁵⁾。

現在、カーボンニュートラル実現に向け、国内外ではガスタービンの水素混焼・専焼実証が計画されており、当社もLNG気化器のトップメーカーとして、液体水素気化器の開発を進めている。現在、NEDO助成事業「未利用エネルギー由来の水素サプライチェーンの構築」の中で低圧・小型(1MPa以下、1,200Nm³/h)の液体水素気化器IFVを用いて、安定した気化性能と冷熱利用の実証試験を進めている。引き続き、高圧化・大型化の開発・実証を行い、国内外のカーボンニュートラルに貢献できる製品開発を行っていく。

むすび=本稿では、生産プロセスならびに製品向けの熱・流体制御技術の変遷と適用例について紹介した。これまで、化石燃料利用を前提とした省エネを中心にCO₂削減に取り組んでおり、例えば1990年代の製鉄所の設備更新にあわせて、厚板や線材工場の加熱炉では低NO_xバーナやリジネバーナを導入し、最新の燃焼技術やCFD技術を確立してきた。機械製品開発においても、省エネや品質向上など、世の中のニーズに沿ったラインナップ拡充を図ってきた。今後、グリーン社会の実現に向けては、燃料転換による脱炭素化が社会価値となり、熱・流体制御技術のさらなる発展が不可欠である。引き続き、生産プロセスにおけるCO₂削減や、製品・技術・ソリューションによるCO₂排出削減貢献につながる技術開発を進めていく。

参考文献

- 1) 満田正彦ほか。R&D神戸製鋼技報。2001, Vol.51, No.3, p.69-73
- 2) 仲山公規ほか。R&D神戸製鋼技報。2001, Vol.51, No.3, p.2-8
- 3) 須鎗 護ほか。R&D神戸製鋼技報。2001, Vol.51, No.3, p.64-68
- 4) 原田孝夫ほか。R&D神戸製鋼技報。2005, Vol.55, No.2, p.128-132
- 5) M. Malik et al. Intern. Polym. Process. 2014, Vol.29, No.1, p.51-62
- 6) 関山和英ほか。R&D神戸製鋼技報。2018, Vol.67, No.2, p.26-29
- 7) 伊藤良二ほか。R&D神戸製鋼技報。2000, Vol.50, No.3, p.6-11
- 8) 神戸製鋼グループ プレスリリース。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1214019_15541.html, (参照2023-10-25)
- 9) 秋山勝哉ほか。R&D神戸製鋼技報。2010, Vol.60, No.1, p.67-70
- 10) 朴 海洋ほか。R&D神戸製鋼技報。2014, Vol.64, No.1, p.22-27
- 11) Benson, S. A. et al. Fundamentals of coal combustion, Elsevier Science, 1993, p.299
- 12) 和田大祐ほか。R&D神戸製鋼技報。2013, Vol.63, No.2, p.51-55
- 13) 神戸製鋼グループ プレスリリース。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1201980_15541.html, (参照2023-08-08)
- 14) 神吉英次ほか。R&D神戸製鋼技報。2020, Vol.70, No.1, p.65-68
- 15) 遠藤将夫ほか。R&D神戸製鋼技報。2005, Vol.55, No.2, p.119-121