

(解説)



素材系分野のものづくりを支える溶解・鋳造・溶接技術

石田 斉*¹ (博士(工学))

Melting, Casting, and Welding Technologies Supporting the Art of Manufacturing in Materials Business

Dr. Hitoshi ISHIDA

要旨

溶解・鋳造・溶接技術は、KOBELCOグループの多様な素材系事業のものづくりを支える重要なコア技術として、鉄鋼、アルミ、銅、鋳鍛鋼、チタン、溶接の各分野の特徴に応じて技術開発が進められてきた。さらに近年では、原料品位の劣質化が進展し、CO₂削減や資源循環の観点でのリサイクル素材の使用拡大が急速に求められており、将来のカーボンニュートラルに向けた技術開発も数多く行われている。これら各素材系分野の溶解・鋳造・溶接技術の進展と将来に向けた取り組みを紹介する。

Abstract

Melting, casting, and welding are essential core technologies that support the art of manufacturing in the Kobelco Group's diverse materials businesses. Technological development has been promoted, considering the unique characteristics of each field: steel, aluminum, copper, cast & forged steel, titanium, and welding. In recent years, there has been a degradation in the quality of raw materials, leading to rapid demand for the expanded use of recycled materials from the perspective of CO₂ reduction and resource circulation. Numerous technologies are currently being developed with the aim of achieving carbon neutrality in the future. This article introduces the progress and future efforts related to melting, casting, and welding technologies in each materials business.

検索用キーワード

溶解, 精錬, 鋳造, 溶接, 割れ, アーク炉灰, CCIM, ESW

まえがき = KOBELCOグループは、鉄鋼材料、アルミ、銅、チタンなどの非鉄材料、溶接材料などの多岐にわたる素材を有する特徴あるメーカーとして、自動車、航空機、造船、鉄道、食品容器、エレクトロニクス、建築土木などを主なお客様としている。特徴ある技術・製品・サービスの一例として、特殊鋼線材や高張力鋼板（ハイテン）、自動車用アルミパネル板、自動車サスペンション用アルミ鍛造部品、クランクシャフト、アルミディスク材、半導体用リードフレーム材、銅めっきなしソリッドワイヤなどがあげられる。これらの金属材料は、輸送機、社会インフラ、産業インフラに活用され、長年にわたり人々の「安全・安心なまちづくり・ものづくり」を支えてきた。いっぽう近年では、原料高や資源調達のリスクが強まるとともに原料品位の劣質化が進展している。このため、将来のカーボンニュートラルに向けたCO₂削減、ならびに資源循環の観点でのリサイクル素材の使用拡大が急速に求められており、「グリーン社会への貢献」や「未来へのソリューション提案」の観点でも、技術開発が行われている。

これら素材系分野のものづくりにおいて、金属材料の溶解鋳造プロセスは素材の生まれとなる工程であり、製品品質の良し悪しを左右する出発点であるともいえる。また、素材同士をつなぎ合わせる溶接プロセスは構造材

に不可欠な工程であり、強度・延性・じん性への高い信頼性が要求される。当社の溶解・鋳造・溶接技術の特徴は、(1) 高温冶金現象に基づく精錬反応を制御し所望の成分に調整しつつ、不要な成分・ガス・介在物などの不純物を除去して高纯净度化する「溶解技術」、(2) 割れや鋳造欠陥の防止、結晶粒の微細化、凝固組織の制御などを図りながら高品質な素材として固める「鋳造技術」、(3) 溶解と鋳造を同時に制御して接合し、高品質で高効率かつ作業性に優れる「溶接技術」、である。これらの技術は、当社の多様な素材系事業のものづくりの競争力を支えるコア技術として、創業以来、鉄鋼、アルミ、銅、鋳鍛鋼、チタン、溶接の各分野の特徴に応じて開発が進められ、相互に磨き上げてきた。さらに将来に向けて、自社もしくはサプライチェーン全体でのCO₂削減を実現し、不純物を多く含む低品位原料を使いこなすための「溶解・鋳造・溶接技術」の革新にも取り組んでいる。

本稿ではこれら各素材系分野のものづくりを支える溶解・鋳造・溶接技術と将来に向けた取り組みを紹介する。

1. 素材系分野の溶解・鋳造・溶接技術

1章では、鉄鋼、アルミ、銅、鋳鍛鋼、チタン、溶接の各分野について、共通するコア技術を基盤に、材料ご

*¹ 技術開発本部 材料研究所

とに異なる製造プロセスの特徴に応じて多様な形で発展を遂げてきた、溶解・鋳造・溶接技術を紹介する。

1.1 鉄鋼

鉄鋼分野において、神戸製鉄所（現・神戸線条工場）では線材・棒鋼、加古川製鉄所では、鋼材3品種（線材・棒鋼、薄鋼板、厚鋼板）を生産してきた。しかし、生産性とコスト競争力を強化し、お客様の要求品質に応える高付加価値化を実現するため、製鋼分野における高度な溶解・鋳造技術を開発・適用し、上工程の集約を推進した。2014年に新溶銑処理工場を稼働させ、2017年の上工程集約以降に機械攪拌（かくはん）式脱硫設備（以下、KRという）、転炉型脱りん炉の各2基体制を構築した。また、2次精錬工程では、溶鋼処理能力の高い取鋼製煉炉（以下、LFという）と真空脱ガス装置（以下、RHという）を用いた方式を採用し、連続鋳造工程では全鋼種を高生産性、高歩留まり、高品質で鋳造できる5ストランドブルーム連铸機（以下、6 CCという）を新設した。これらプロセスごとの取り組みにより、小ロット多品種である線材、棒鋼などの特殊鋼製品を高品質・低コストで大量に生産できるようになった¹⁾。

これらの製鋼工程における溶解鋳造のコア技術として、高品質で高効率な溶鋼処理を実現するため、平衡論や速度論に基づく高温冶金反応制御技術、水モデルや流動凝固解析²⁾などの化学工学的な実験解析技術を構築しており、脱硫、脱りんなどの反応効率向上や窒素制御、清浄化を図っている。つぎに、これらのコア技術による製鋼プロセスの変革を詳細に解説する。

新溶銑処理工場では、KRと転炉型脱りん炉を新設して脱珪（だっけい）、脱硫、脱りん、脱炭を機能分担し、プロセス高効率化と溶銑処理能力向上を図った（図1）。これにより、転炉における脱珪・脱りん負荷を軽減することができ、吹錬時間短縮による粗鋼生産能力の向上を果たしている。

脱硫技術では、強攪拌による反応効率向上を狙い、水モデル実験や5t KR試験で脱硫剤の分散性に及ぼすインペラ回転数と浸漬深さの影響を明らかにし、安価な石灰、アルミ灰を使用して高効率な脱硫を可能にしている（図2）。脱りん技術においても、反応速度式や水モデル実験で底吹き攪拌効果の最大化、底吹高流量下でも長寿命化を可能とする底吹き羽口耐火物仕様の最適化を行う

	Before	After	Improvement
De-Si	Temperature decrease and reaction rate unstable FeO (Solid)	Temperature increase and reaction rate stable Fe ₂ O ₃ powder (Solid), O ₂	Heating by gas oxygen ⇒ Heat loss decreased ⇒ High efficiency reaction for De-S ⇒ Iron yield increased
De-S	Compensation for low stirring energy by expensive flux CaC ₂	Strong stirring by impeller CaO	Strong stirring ⇒ High efficiency reaction for De-S ⇒ Low cost
De-P	Compensation for low stirring energy by lengthening of treatment time CaO-Fe ₂ O ₃ flux	Strong stirring by bottom blowing gas N ₂ (Gas)	Strong stirring ⇒ High efficiency reaction for De-P ⇒ Iron yield increase

図1 溶銑処理プロセスにおける機能分担とその効果

Fig.1 Improvement by allotment of refining function in hot-metal pretreatment

ことで、高効率な脱りん反応を実現している³⁾。

その他KRでは、省スペースでの前後スラグ分取を可能とする設備配置によるスラグ利材化の最適化や、2章で詳述する当社真岡製造所で発生するアーク炉残灰利用技術^{4), 5)}を確立した。脱りん炉では、炉内付着地金の溶解技術やスラグ冷却促進技術を確立するとともに、シミュレーションを用いて物流の最適化を図った⁶⁾。

2次精錬工程では、RHにて窒素濃度を所定範囲内に制御するため、独自の工夫を施して、環流ガス種、ガス流量、槽内真空度、溶鋼成分などの影響を考慮した窒素濃度予測計算システムを構築した（図3⁷⁾。またLFでは、スラグ巻き込みによる清浄度悪化の懸念に対して、スラグ設計と攪拌条件を組み合わせることにより、清浄化処理、介在物制御、S濃度制御を実現した。これらのLF、RHなどを用いた溶鋼処理技術により、介在物制御^{8)~10)}や超清浄鋼¹¹⁾などの高品質鋼の製造を可能としている。溶鋼処理を済ませた後、6 CCでは、安定流動制御と小ロット対応が可能な大型タンディッシュ設計、冷却速度の多様化に加えて冷却の均一性と良好なメンテナンス性を兼ね備えた3次冷却設備により、高品質・高機能を有した各種特殊鋼生産を可能にしている。

将来に向けては、製鋼分野におけるこれらの高度な溶

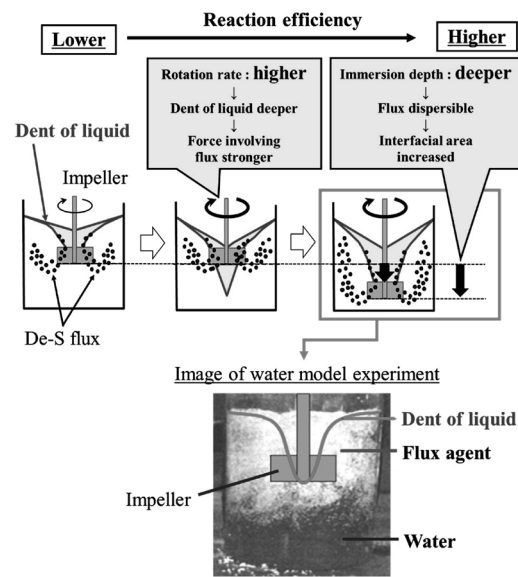


図2 インペラ回転数と浸漬深さが脱硫剤巻き込み挙動におよぼす影響

Fig.2 Influence of rotation speed and immersion depth of impeller on dispersion of desulfurization agent

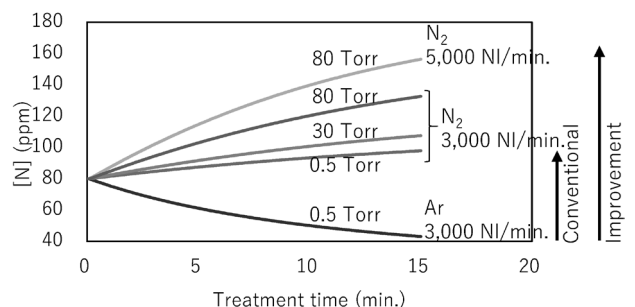


図3 RH環流条件が[N]挙動に及ぼす影響（計算結果）

Fig.3 Influence of RH treatment conditions on [N] contents (calculation results)

解・鋳造技術を活用するとともに、高度なAI技術の活用を含めて技術レベルの向上を図り、お客様の要求品質に応える高付加価値化を実現する。さらにカーボンニュートラルへのニーズに対しても、業界に先駆けた低CO₂高炉鋼材 (Kobenable Steel) を拡販するとともに、電炉による高級鋼製造に向けて、低品位原料やスクラップなどの多様な原材料の使いこなしに必要な溶解・鋳造技術の開発を推進していく。

1.2 アルミ

アルミ分野において、真岡工場は型材や板製品の製造を行っており、溶解炉、保持炉、DC (Direct Chill) 鋳造機、国内最大級の広幅圧延機などを有し、飲料用缶材や磁気ディスク用サブストレート材、自動車用パネル材を生産している。また、大安工場は航空機部品製造で培われた鋳鍛造技術を有し、油圧鍛造品、砂型鋳造品、自動車用アルミ足回り鍛造品などの一貫生産体制を確立し、長府工場でも世界トップクラスの技術力を誇るアルミ押出材を製造している。

一般にアルミ溶解工程は、溶解炉、保持炉、脱ガス装置、フィルタの設備を用いて、原料の溶解、成分調整、溶湯温度調整、溶湯清浄化が行われる。合金の迅速溶解と溶湯清浄化を低コストで達成するためには、とくに不純物除去の溶湯処理工程に高度な精錬技術が必要となる。アルカリ金属、水素、介在物などの不純物を除去するため、保持炉でのフラックス精錬、脱ガス装置による水素ガス、介在物除去、フィルタ処理による介在物ろ過などの技術が挙げられる¹²⁾。溶解精錬後のアルミの連続鋳造方法は、DC鋳造が用いられる。基本原理は1935年に発明されたものであり、国内展伸材の主要プロセスとなっている。鋳造プロセスでは、鋳塊形状、凝固組織の確保を行い、とくに、割れや鋳造欠陥の防止、結晶粒の微細化、形状寸法精度の確保などの技術が必要となる¹³⁾。

これら溶解鋳造の課題に対し、溶湯清浄化に向けた高温冶金反応制御技術やDC鋳造割れ防止のための熱応力解析技術など、高度な溶解・鋳造技術を開発し、お客様の要求品質に応える高付加価値化に貢献している。鋳造技術の一例を示すと、大型の矩形 (くけい) DC鋳造の鋳造割れのほとんどは鋳塊の表面から始まる表面割れであり、当社は割れ防止の鋳造技術を長年にわたって蓄積してきた。表面割れの起点は固液共存域で発生していることから、同温度域で表面から鋳塊が割れるメカニズムを熱移動と凝固過程を考慮して推定するとともに、合金組成による鋳造割れ抑制ポイントについて検討し、対策を実施している^{14)~17)}。

具体的には、半凝固部のデンドライトが収縮することでひずみが生じ、特定の固相率領域でのひずみ量の大きさおよびひずみ速度の差で割れが生じると仮定し、収縮ひずみ量を表す割れ伝播パラメータ ΔT_{II} と固相率変化に対する温度勾配を用いて割れ感受性を表す割れ起点パラメータ $\Delta R_{II}/\Delta T_{II}$ で整理した。複数の合金組成について、3段階の鋳造速度 (60 mm/min, 80 mm/min, 100 mm/min) での割れ発生の有無を◎○△×で評価した結果、

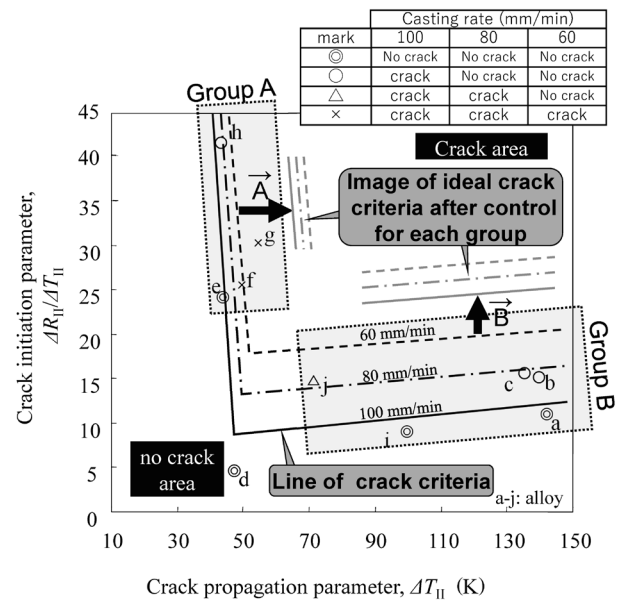


図4 各割れ感受性評価パラメータによる各種合金の割れ感受性評価結果と各グループの割れ防止の考え方

Fig.4 Crack sensitivity evaluation of each alloy by crack sensitivity parameter and crack prevention concept for each group

各鋳造速度においてこれら二つのパラメータが大きい領域で割れが発生しやすいことを明らかにした (図4)。このように割れ感受性を定量的に表現することで、割れ発生モードが異なる合金種に対しても、割れを抑制する考え方を明示可能とした。

今後も高度化する要求品質に応えるため、溶解・鋳造プロセスの品質向上、安定化に向けて一層の技術開発を進めている。近年、アルミ分野でもお客様のCO₂削減要求が強く、社内外スクラップ活用や副産物リサイクルの潮流が加速している。当社ではカーボンニュートラル社会に向けて、アルミスクラップリサイクルの技術開発にも積極的に取り組んでおり、当社独自の特徴ある溶解鋳造技術をさらに発展させていく。

1.3 銅

銅の溶解プロセスについて、長府製造所の溶解炉はシャフト炉とコアレス炉の二種類がある。シャフト炉は溶解能力が大きいことから、量産用の主力溶解炉として使用されている。シャフト炉は原料を効率良く溶解できるが、成分調整ができないため、電気保持炉で所定の成分に調整されたのち鋳造される。長府製造所ではKFC[®]注1) (高導電性耐熱合金) を主体とする純銅系合金の製造に使用している。コアレス炉は誘導加熱で原料を溶解する。コアレス炉は種湯が必要なく、室温から原料を溶かすことが可能で、一般的には少量多品種の溶解に適しており、NiやFeといった高融点金属の溶解も得意な特徴を生かして、KLF[®]注2) (高強度・高導電性銅合金) 並びにCAC[®]注3) (高強度・高加工性銅合金) シリーズの溶解に使用している。

銅溶解鋳造においても、平衡論や速度論に基づく高温冶金反応制御技術、シミュレーションなどの実験解析技

脚注1) KFC[®]は当社の商標である。

脚注2) KLF[®]は当社の商標である。

脚注3) CAC[®]は当社の商標である。

術を構築し、高纯净度化や铸塊品質向上を図っている。

健全な铸塊を得るには、溶解铸造段階でガスや介在物の少ない清浄な溶湯を作る必要がある。品質不良の原因となる H_2 ガス、水蒸気、 CO_2 ガスなどを極力排除すべく、原料から設備、炉内雰囲気まで管理し高品質な製品製造に対応している。また、連続铸造では熱間圧延を前提にして、断面が矩形で長さが4~6 mの铸塊を製作している。铸塊品質に関わる铸型の設計や铸造条件について、旧来は経験やトライアンドエラーによるところが大きかったが、最近では凝固・熱応力解析技術の進歩により、シミュレーションによってモールド形状や铸造条件を決定できるようになっている^{18), 19)}。それにより、中高温脆性によって铸塊の段階で割れやすい合金系の製造、铸塊内部の欠陥の抑制、表面品質の向上などが可能となり、数多くの品種を生産することに対応できる体制となっている。近年では、さらなるシミュレーション技術の進展とともに铸造プロセスをより詳細に解析可能となっているが、実験技術においてもSPring-8の放射光を活用した微視的な凝固現象のその場観察にも取り組んでおり、ミクロ偏析が铸造割れに及ぼす影響などの理論的解明も進展している。今後も、鋼分野は自動車電動化や半導体需要拡大などにおけるお客様の価値向上に向けて、高度な解析技術や実験技術に裏付けられた高品質の素材を提供し、新たなカーボンニュートラルのニーズにも応えていく。

1.4 铸鍛鋼

铸鍛鋼事業は当社創業と同時に铸物生産から出発し、そのうち船舶用品を加え、現在は一体型/組立型クランク軸の大型铸鍛鋼品を主力製品とする国内唯一の舶用品フルラインナップに対応している。なかでもクランク軸はエンジンの主要部品であるがゆえに高強度、高疲労強度が要求されることから、溶解铸造プロセスにおける高纯净度化技術が不可欠である。ここに当社の高度な溶解・铸造技術と介在物制御技術を適用することで不純物元素の低減、介在物混入・生成の抑制を実現し、国内外のお客様から高い信頼を獲得している。

溶解工程において、クランク軸内の不純物元素を低く抑えるためには、とくにりん、硫黄の除去や脱ガス処理が重要である。当社では、1988年ごろまでは出鋼脱ガス法と呼ばれる製鋼プロセスが用いられてきたが、1993年に取鍋精錬炉（真空保持炉）を設置し、電気炉から一度溶鋼を取鍋に受け、取鍋内で精錬を行う炉外精錬法が適用されている。これにより、電気炉内では限界があった硫黄などの不純物元素や酸素などのガス成分の除去が可能となり、クランク軸をはじめとする大型铸鍛鋼品の高品質化に寄与している^{20)~22)}。また、介在物制御技術の詳細は本紙別報をご参照いただきたいが、疲労破壊の起点となる介在物の低減を目的とし、不純物元素の低減や精錬条件の最適化、造塊条件の改良を進め、高纯净度化技術を開発した²³⁾。高纯净度鋼では、現用清浄度鋼に対して20%以上、従来鋼に対して最大40%近く疲労強度が向上し、設計に用いる疲労強度の算出時に使用する係数k-factorについて全船級協会からk=1.15の承認取得を完

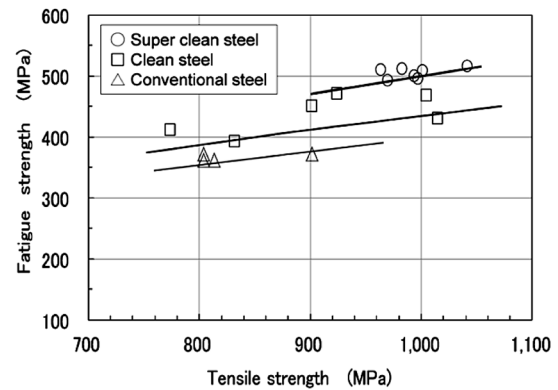


図5 一体型クランク軸用高纯净度鋼の疲労強度
Fig.5 Fatigue strength of super clean steel for solid type crankshaft

了している。これにより、当社材は通常値（1.00）に対し設計段階で疲労強度において15%の余裕度が認められ、エンジンの高出力化、コンパクト化が図られることが期待されている（図5）²⁴⁾。

将来のカーボンニュートラルに向けた電気炉のスクラップ利用拡大による CO_2 削減や、資源循環の観点で副産物の利活用においても当社技術の活用が可能である。今後も低品位原料の使いこなしと高纯净度化の両立を推進し、船舶品の安全・安心なものづくりに向けた生産性向上、品質安定化に取り組み、輸送機器の社会変化に伴うニーズに応えていく。

1.5 チタン

当社チタン事業は、スクラップチタンの安定溶解技術とコイル圧延技術により大量生産を可能にし、チタンを日本で初めて実用化した会社として日本のチタン産業をリードしてきており、お客様との強固な関係と豊富な納入実績を有する。チタンは酸素などと反応しやすい活性金属であることから、真空アーク溶解（以下、VARという）、および2章で詳述するコールドクルーシブル誘導溶解（以下、CCIMという）などの特殊な溶解・铸造技術を開発し、特殊溶解環境下での高温冶金反応制御技術、偏析制御技術を構築し、お客様の要求品質に応える高付加価値化を実現してきた。

VAR法は、スポンジチタンを合金原料とともにプレス成形してブリケットとし、これを溶接して棒状の消耗電極とする。真空または不活性ガス雰囲気下の水冷銅るつぼ内で、消耗電極と溶湯表面との間にアークを発生させ、その熱により消耗電極を溶融して溶滴として落下させる。溶湯プールは一方向凝固に近く、铸塊表面品質改善のために静磁場を付加して溶湯プールを回転攪拌することなども行われる。一回の溶解だけでは铸塊の合金成分均質化が不十分なため、初回溶解の铸塊を消耗電極として再度溶解する二重溶解が一般的であり、とくに高品質を要求される航空宇宙材料では三重溶解も行われる。

本溶解法は消耗電極表面と溶湯プールが近い距離で対面する配置となるため、熱放射ロスが少なく電力消費量の少ないことが特徴であるが、スクラップなどを原料として利用しにくいことが課題であった。そこで当社独自技術として、一次溶解において消耗電極と銅るつぼ壁との間（100 mm程度）からスクラップ細片などを連続的

に装入し高効率で均質に溶解する技術（神戸法）を実用化し、これにより溶解所要時間を50%、電力消費量を60%程度にまで低減している²⁵⁾。さらにVAR鋳塊偏析予測モデルを開発し、VAR鋳塊の非定常部の濃度変化を考慮することで、鋳塊全体にわたる成分分布を予測し鋳塊品質の向上につなげている²⁶⁾。

1.6 溶接

当社の溶接事業は、国内で唯一、溶接材料、ロボットシステム、電源、施工法のトータルメニューを有し、材料、システム、プロセスの組み合わせによる多様な溶接ソリューションの提案を行っている。その歴史は、1940年に始まって以来、産業のキーテクノロジーである溶接技術の開発をリードし、各産業の進歩に伴い変化する顧客ニーズに対応してきた。長年にわたり蓄積された多岐にわたる溶接コア技術の詳細は本号「溶接コア技術の開発と社会実装」p.98~104をご参照いただくとして、ここでは、安全・安心なものづくりに向けた溶接金属の凝固割れ改善技術の事例を紹介する。

溶接現象も局所的に見れば、接合部の溶融池で溶解と鋳造が同時に起こっており、鉄鋼材料などの高温冶金反応と凝固挙動を制御するコア技術が活用できる。TiO₂系FCW（フラックス入りワイヤ）は、全姿勢溶接作業性が良好であるため造船・橋梁（きょうりょう）分野で広く用いられているが、片面突合せ初層溶接部の溶接においては凝固割れが発生しやすい傾向にあり、凝固割れの抑制に取り組んだ²⁷⁾。まず、脱酸元素の存在状態を考慮した凝固割れ評価式を新たに構築した。凝固割れ感受性をより正確に評価するうえで、ミクロ偏析に加えて溶接金属中に含まれる酸化物の存在状態を考慮し、化合物を形成しやすい強脱酸元素の影響を明らかにした。また、鋼材やアルミの凝固割れ感受性の評価にはミクロ偏析を考慮した各種モデルが提案されているが、ミクロ偏析に加えて、新たにTiO₂系FCWで形成されている溶接金属部に含まれる強脱酸元素の酸化物の存在状態を考慮した凝固割れ評価式を構築した²⁷⁾。さらに、鋼材やアルミで行われる不均質核生成による凝固組織微細化の知見をもとに、非金属介在物を活用した溶接金属の凝固組織制御に着眼し、TiNに加え、Ti₂O₃でも炭素鋼溶接金属の等軸晶化が可能であることを明らかにして、凝固割れ抑制指針を示した。

その他にも、溶接材料の様々な品種に対して、多様な用途や環境での使い方に合致した素材系事業の知見や溶解鋳造のコア技術を活用した溶接材料設計に取り組んでおり、今後も複数の素材系事業を有する当社の特徴を活かして溶接技術を進歩させていく。

2. 未来に向けた溶解・鋳造・溶接技術の最新事例

「安全・安心なまちづくり・ものづくり」、「グリーン社会への貢献」および「未来へのソリューション提案」の観点で、とくにカーボンニュートラルに向けたCO₂削減ニーズや、生産プロセスで発生するリサイクル材の資源循環を進めるための溶解・鋳造・溶接技術開発の最新事例について紹介する。

2.1 アーク炉灰を利用した溶銑脱硫技術の開発

複数の素材系事業を有する当社ならではの資源循環の事例として、溶解プロセスで発生する副産物の利活用における鉄鋼事業とアルミ事業がコラボレーションした取り組みを紹介する。加古川製鉄所の製鋼における脱硫プロセスでは、石灰に加えてアルミ灰（金属アルミニウム、アルミナ含有）を溶銑に添加して機械攪拌し、脱硫促進している。いっぽう、真岡アルミ工場では、溶解工程で生成するアルミドロス（金属アルミニウムと酸化物の混合物）からの効率的な金属アルミニウム回収、回収後の残灰の無害化処理と再資源化を目的とした回転式アーク炉を実用化している²⁸⁾。残渣として発生するアーク炉灰は、一般的なアルミ灰と比べて、脱硫に有効な金属アルミニウムが少なく、代わりに窒化アルミニウム（AlN）が多いという課題があったが、この脱硫剤利用に着想し、アーク炉灰の脱硫剤利用条件を明確化することで、事業所間の副産物リサイクルを実現した²⁹⁾。

アーク炉灰の脱硫効率を300 kg ラボ試験で検証した結果、脱硫初期の脱硫速度はアルミ灰に劣るものの、石灰-50%アーク炉灰の使用により、10 min 処理で[S] 0.005 wt% 以下を達成できることを確認した。さらにアーク炉灰の脱硫寄与メカニズムについても検証したが、AlNは溶銑中で分解することで脱硫に有効なAl濃度を上昇させ、またその傾向は高温ほど顕著であることを確認した。以上をふまえて、加古川製鉄所における機械攪拌脱硫における脱硫剤へのアーク炉灰配合設計手法が確立されている。

本成果は、複数の素材系事業を持つ当社ならではの事業所間連携の事例であり、鉄鋼とアルミニウムの溶解鋳造技術に精通しているからこそ可能な着想ともいえる。また、新技術を当社グループ内で量産実証したうえで、社外展開できることも強みであり、リサイクルや資源循環においてお客様が抱える様々な課題に対して、当社の技術力を生かした貢献を目指していく。

2.2 CCIM 溶解鋳造技術の開発

チタンアルミ金属間化合物基合金（TiAl）は、Ni基合金に比べて密度が約半分と軽量であり、かつ高温強度に優れることから、近年の燃費削減ニーズやカーボンニュートラルに向けたCO₂排出抑制を背景に、民間航空機用ジェットエンジンの低圧タービンプレードへの採用が進んでいる。TiAlは融点が高く、溶融温度では激しく酸化されやすい非常に活性な合金であり、溶解には様々な溶解技術が用いられるが、ここではコールドクルーシブル誘導溶解法（以下、CCIM法という）における最近の技術開発成果を紹介する³⁰⁾。

CCIM法は、鉄鋼材料の溶解で一般的な真空誘導溶解法の耐火物をつぼを、水冷銅製の多数のセグメントで構成されるつぼに置換した溶解法である。本溶解法はVARなどと異なり、全原料を一括溶融する方式であり、溶湯成分の調整などが容易となるため合金の溶解に適している。CCIM法でのTiAl溶解における課題は、成分均質性と高歩留まりを両立する溶解鋳造プロセス、および低コスト化と低CO₂化を実現するためのスクラップ

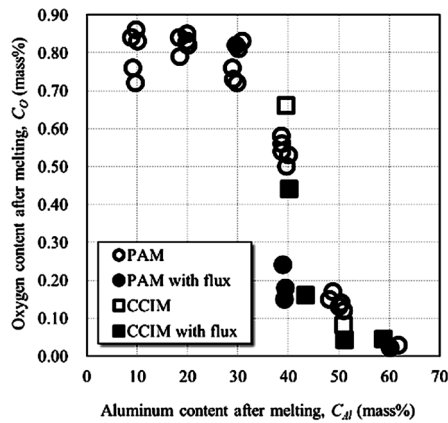


図6 フラックス添加時の溶融TiAl中脱酸挙動のAl濃度依存性
Fig.6 Effect of aluminum content on deoxidation behavior in molten TiAl with flux addition

処理プロセスの基盤技術の確立であった。成分の制御技術を高度化するため、溶解中のオンラインの迅速分析技術を開発して、Al濃度ばらつきを狭幅制御することが可能となった。また、鑄造速度を制御することにより、鑄造欠陥のない鑄塊を製造できることを明らかにし、鑄造歩留まりを改善した。さらに、SDGsにおける資源循環促進の観点からスクラップなどをリサイクルする場合、活性金属であるチタンにおいては不純物元素としてとくに酸素の除去が重要な課題であるため、TiAl金属間化合物を題材に新たな脱酸技術の開発に取り組んだ。熱力学的な観点ではTi-Al-O三元系状態図において、アルミ濃度が30~40 mass%以上になると金属間化合物中の酸素溶解度が著しく低下することに着目し、CCIM法あるいはPAM (Plasma Arc Melting) 法を用いたTiAl溶解中にアルミニウムを高濃度で添加すること、さらにフラックスを添加することによる脱酸プロセスの有効性を実証した(図6)。

本成果は、TiAlのCCIM法による高度な特殊溶解技術に加えて、スクラップリサイクルを最大活用できる新たな付加価値を加えたものであり、ほかのチタン合金にも活用できる技術である。航空宇宙分野をはじめとするチタン使用のニーズが拡大していく中、ますます求められるカーボンニュートラルに向けたCO₂削減、SDGsにおける資源循環促進の取り組みとともに今後の実用化に向けた発展が期待できる。

2.3 新エレクトロスラグ溶接法の開発

立向自動溶接としてエレクトロスラグ溶接法(以下、ESW法という)の適用拡大が期待されており、新たなESW法(SESTM注4)31)の開発が行われている。溶接作業性の改善、高品質化、自動化における溶接作業の負荷軽減と脱技術化に役立てる施工法であり、その取り組みの中で9%Ni鋼への適用可能性も見出した32)。

新ESW法の特徴として、エレクトロスラグ溶接の長所(スパッタやヒュームが少なく、耐風性が良好)を維持しながら、短所(溶接長の制限)を克服しており、スラグ浴制御機能に、水冷摺動(しゅうどう)銅板方式を採用することで、長尺溶接が可能となっている。トーチ

のオシレート範囲が拡張され、1パスで溶接可能な最大板厚が80 mmとなっており、極厚板溶接において、良好な溶込みと溶接性が確保されている。板厚30 mmの9%Ni鋼板を12%Ni系溶接材料でESW試験評価した結果、良好なビード外観を示し、溶接金属の引張強さと低温じん性も向上した。

近年、天然ガスから排出されるCO₂をオフセットする新たな取り組みとして、カーボンニュートラルLNGの導入が始まっており、その手段の一つとしてCO₂回収・貯留が期待されている。液化CO₂貯蔵タンクには、9%Ni鋼の適用が計画されているが、極低温用鋼の適用可能性も高まっている。また、洋上風力発電設備などの再生可能エネルギーにおける極厚板の高エネルギー溶接施工への適用も期待される。今後もエネルギー分野に向けた高品質、高エネルギー溶接施工を提案し、CO₂循環のインフラ構築へのより一層の貢献が期待できる。

むすび=溶解・鑄造・溶接技術は、KOBELCOグループの多岐にわたる素材のものづくりを支える技術として、各事業分野のニーズに応じて開発が進められてきた。未来に描くカーボンニュートラルや資源リサイクルによる持続可能な世界の実現に向けて、素材系事業の多様な技術力を融合して溶解・鑄造・溶接技術を発展させ、CO₂削減や資源循環のニーズに応えていきたい。

参考文献

- 1) 浜田 努. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.3-8.
- 2) 仲山公規ほか. R&D神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, No.3, p.2-8.
- 3) 齋藤幸介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.32-36.
- 4) 渡辺大輔ほか. Iron Steel Technology. 2018, Vol.15, p.74.
- 5) 西村友伸ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.3, p.31-34.
- 6) 岩谷敏治. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.29-35.
- 7) 吉田康将ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.26-31.
- 8) 木村世意ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.3, p.25-28.
- 9) 木村世意ほか. 鉄と鋼. 2002, Vol.88, No.11, p.53.
- 10) Tomoko SUGIMURA et al. ISIJ International. 2011, Vol.51, No.12, p.1982.
- 11) 太田裕己ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.98-101.
- 12) 高橋功一. 軽金属. 2015, Vol.65, No.10, p.518-522.
- 13) 高橋功一. 軽金属. 2015, Vol.65, No.11, p.599-603.
- 14) 森下 誠ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.3, p.23-28.
- 15) 森下 誠ほか. 軽金属. 2009, Vol.59, No.8, p.417-423.
- 16) M. Morishita et al. Mat. Trans. 2011, Vol.52, No.2, p.166-172.
- 17) 森下 誠ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.18-23.
- 18) 竹内勝彦ほか. 伸銅技術研究会誌. 1998, Vol.37, p.182-188.
- 19) 石飛秀樹ほか. 伸銅技術研究会誌. 1998, Vol.37, p.189-194.
- 20) 森 啓之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.41-45.
- 21) 岡村正義ほか. R&D神戸製鋼技報. 1983, Vol.33, No.3, p.3-7.
- 22) A. Suzuki. 10th International Forging Conference Sheffield. 1985.
- 23) 篠崎智也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.94-97.
- 24) 藤綱宜之. R&D神戸製鋼技報. 2016, Vol.66, No.1, p.2-6.
- 25) 草道龍彦ほか. R&D神戸製鋼技報. 1999, Vol.49, No.3, p.13-14.
- 26) 横山 弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.3, p.57-60.
- 27) 島本正樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.32-36.
- 28) 徳田健二. 軽金属. 2009, Vol.59, No.11, p.652-653.
- 29) Takero Adachi et al. "Utilization of low-grade aluminum ash for mechanical stirring desulfurization process". 7th International Congress on Science and Technology of Steelmaking. Venice. 13-15 June 2018. Organized by ASSOCIAZIONE ITALIANA DI METALLURGIA. ICS081.
- 30) 松若大介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.2, p.27-31.
- 31) 柿崎智紀. ほうだより. 2020, Vol.507, p.2-6.
- 32) 柿崎智紀ほか. 溶接学会誌. 2021, Vol.90, No.6, p.18-23.

脚注4) SESTMは当社の商標である。