

鑄鍛鋼の革新と新報国マテリアルの新たな挑戦

小 奈 浩 太 郎 五十嵐 正 晃

新報国マテリアル(株)

新報国マテリアル(株)は、インバー合金を主力製品とする特殊鋼メーカーで、鑄造・鍛造・3D 積層造形を柱に、半導体製造装置や環境分野向け高性能材料を独自開発している。今後も革新的技術で新たな事業を創製し、社会に貢献していく。

1. 会社紹介

新報国マテリアル株式会社は、半導体製造装置向けインバー合金鑄鍛鋼品を主力製品とする特殊鋼の製造・加工を手掛ける企業である。1949年に設立され、本社は埼玉県川越市、主力の鑄造工場は三重県川越町にある。2024年度の売上高は約65億円、従業員数は約100名の少数精鋭で事業を展開している。図1に当社が製造する製品の一例を示す。設立当初から1990年頃までは、製鉄所向け耐熱耐摩耗鋼やシームレスパイプ工具を主力製品としていたが、1990年以降、インバー鑄鋼の実用化に成功し、現在では鑄鋼、鍛鋼合わせたインバー合金の売上が約7割を占める主力製品となっている。2021年には事業内容を反映して社名を「新報国製鉄」から「新報国マテリアル」に変更し、現在に至っている。

当社は2029年の創業80周年を見据え、昨年2月に中期経営目標を策定した。その中で掲げた「インバー合金グローバルニッチトップ」の実現に向け、売上100億円企業への成長、顧客から信頼されるパートナーとしての社会貢献、そして社員が笑顔で働ける職場づくりを目指している。この目標を達成するため、少数精鋭の体制でグローバルNo.1のインバー合金設計・製造技術を駆使して、顧客ニーズに応じた独自の合金を提供するべく、鑄造・鍛造・3D 積層造形を製造の3本柱として技術開発を推進している。

本稿では、当社が中期目標の実現に向けて取り組む新商品開発や事業展開の構想について概説するとともに、現在の状況と今後の課題についても紙面の範囲内で紹介する。

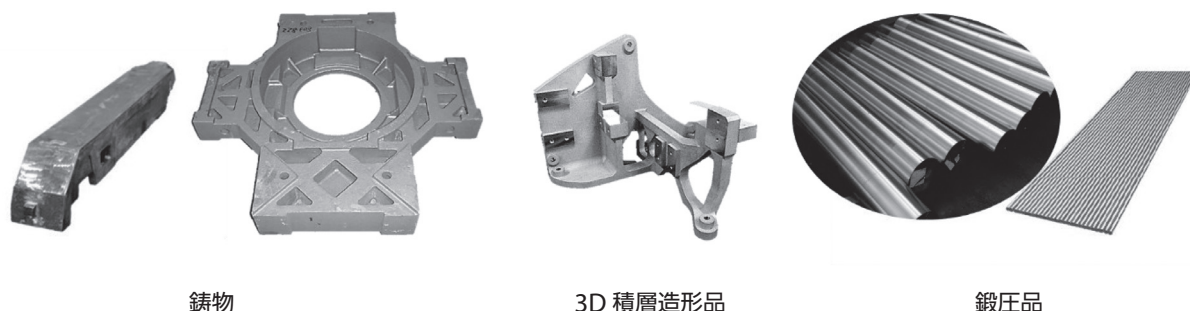


図1 新報国マテリアルの製品例

2. 新たな商品開発と事業展開の構想

インバー合金は1897年フランスのギヨーム博士がFe-36%Ni合金で初めて発見したもので、不変の(invariable)という意味からInvar[®] (仏Aperam社の登録商標)と名付けたことに由来する¹⁾。現在では温度が上昇してもほとんど熱膨張しない合金、低熱膨張合金を総称してインバー合金と称する場合があるため、ここでもそのように総称する。その後増本量先生がインバー合金の1/10程度の低熱膨張を示すFe-32%Ni-5%Coスーパーインバー合金²⁾を開発すると、この2つの合金が精密機械や高精度計測装置等に広く使用されるようになった。近年では、半導体製造装置向けに様々な温度範囲において0～数ppm/Kの低熱膨張率を有するインバー合金が使用されている。さらに宇宙・天文分野では極低温までの低熱膨張特性が要求される場合があり、様々な合金が開発されている³⁾。また、航空機用CFRPの精密成形金型としてもインバー合金が利用されてきたが、近年さらに空飛ぶクルマ向け等に熱可塑性CFRPの高精度高速成形金型として、高温まで低熱膨張となるインバー合金が必要になると想定されている⁴⁾。図2に新報国マテリアルが開発したインバー合金ラインナップを示す。当社では極低温から高温までお客様のニーズに合わせて熱膨張率を制御した合金群を商品化しており、さらに高強度、高剛性、非強磁性、快削性、高耐食性等の特殊なニーズにも対応できる合金を製造可能である。

これらのインバー合金群に加えて、当社では長年培った耐熱耐摩耗合金の設計技術を応用し、ごみ焼却炉やバイオマスボイラなど環境関連分野で使用

される部材向けに、高温耐食合金のシリーズ開発も行っている。

以下、近年開発された新商品の一例と、鑄造技術の革新に貢献するシミュレーション技術、さらには今後さらなる展開が期待される事業について具体的に述べる。

2.1 高剛性スーパーインバー鑄鋼の開発

スーパーインバー合金(Fe-32%Ni-5%Co)は、熱膨張係数が極めて小さく、精緻な寸法公差が求められる精密機器部材に広く使用されている。中でも半導体関連製造装置は、ナノメートルスケールでの超精密な加工精度が要求されており、使用環境によって生じる装置機構のわずかなブレを抑制するために構造体の骨格にスーパーインバー合金が適用される。近年では、半導体製造装置の更なる高精度化および生産性のスループット向上を目指した構造体の大型化が加速しており、リブ構造を多用した複雑かつ大型形状の成形が可能な鑄鋼品の需要が高まっている。ところが、鑄鋼品に形成する凝固組織に起因して<100>集合組織が発達し、ヤング率が低い、すなわち剛性が十分でないという問題を抱えていた。この問題を解決するため、再結晶や相変態を利用する冶金的手段が検討されているが、再結晶には十分な塑性加工が必要であり、鑄鋼品への適用は困難である。一方、相変態を利用する方法としてKraussらは、Fe-(25～33)%Niオーステナイト合金に液体窒素を用いたサブゼロ処理を施し、fcc-bccマルテンサイト変態を誘起、その後の焼鈍で逆変態を発現させる方法を提案した⁵⁾。ただし、この逆変態では結晶方位が可逆的に変化するため、元の凝固集合組織を解消することは困難である。これに対して、

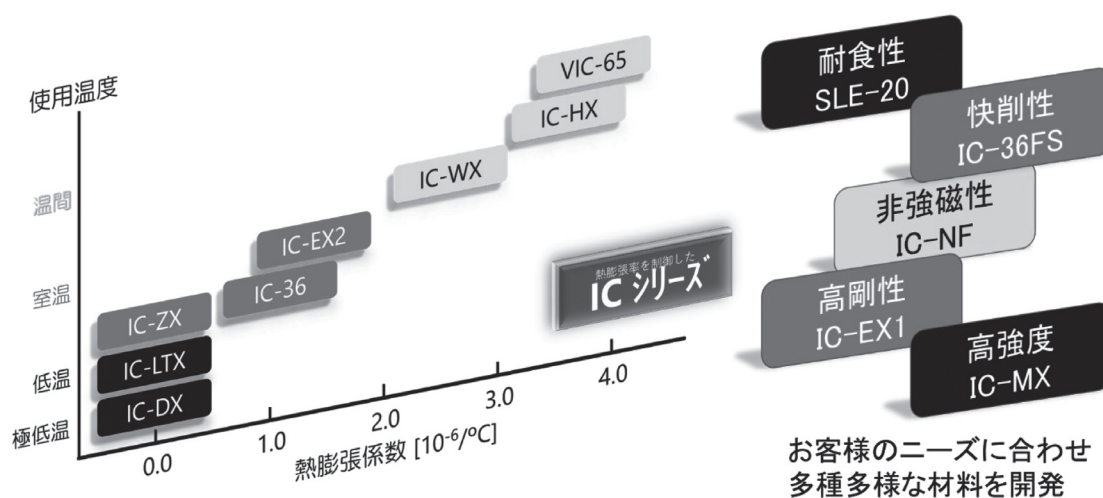


図2 新報国マテリアルのインバー合金ラインナップ

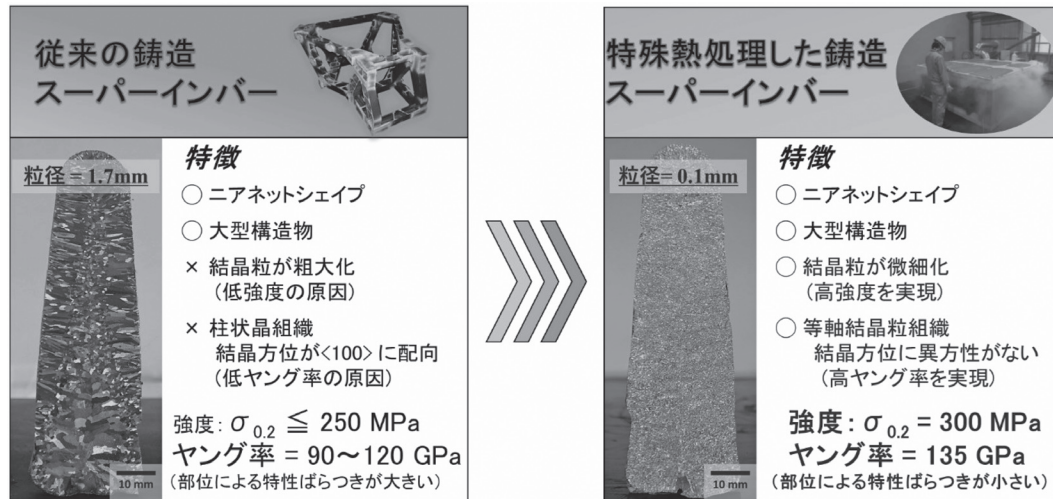


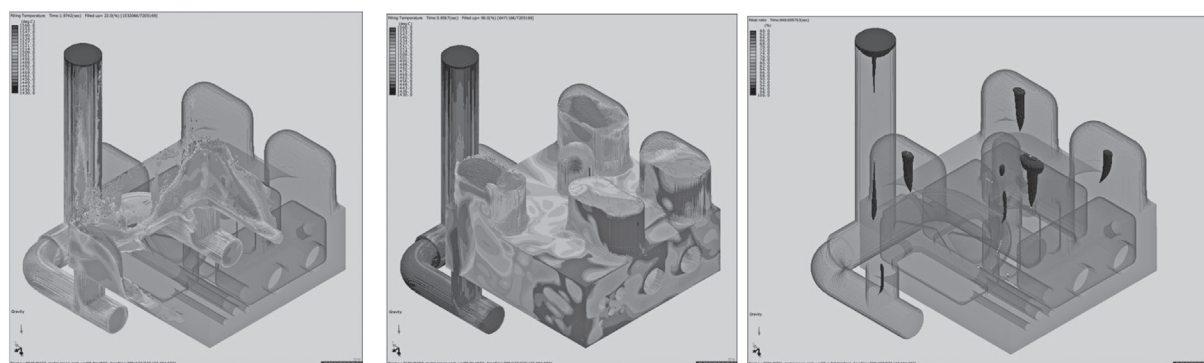
図3 高剛性スーパーインバー鋳鋼

bcc-fcc マルテンサイト逆変態は、インバー合金やマルエージング鋼などの高合金鋼でも発現し、特にマルエージング鋼では、この逆変態を活用して高密度の転位を含むオーステナイトを生成し、焼入れによって強靱なマルテンサイトを得る技術が確立されている⁶⁾。当社では、塑性加工を必要としないスーパーインバー鋳鋼の剛性率改善手法として、このサブゼロ処理によるfcc-bcc マルテンサイト変態と、その後の焼鈍によるbcc-fcc 逆変態を利用する特殊熱処理法を開発した。この手法により、集合組織の解消と微細粒化を同時に達成し、従来の鋳鋼品では得られない高強度かつ高剛性のインバー鋳鋼を実現した(図3)⁷⁾。本手法により半導体製造装置用大型部材として実用化に成功している。

2.2 鋳造シミュレーション技術による鋳造欠陥の低減と構造最適化の提案

鋳物の品質を左右する重要な工程の一つに「鋳造方案設計」がある。この設計は、鋳物技術者がこれまでの経験やデータを基に、押湯や湯道の配置、

燃焼ガスの排出方法、凝固の順序など、多くの要素を総合的に考慮しながら、品質とコストの両立を目指して行う高度な作業である。しかし、この作業は一朝一夕で習得できるものではなく、技術者ごとに異なる設計が生まれるなど、鋳物の品質に大きな影響を与える要因となっていた。新報国マテリアルでは、この課題を解決するために、鋳造シミュレーションソフト ADSTEFAN⁸⁾ を活用し、熟練技術者の鋳造方案設計レベルを若手技術者でも再現できるように整備を進めている。しかし、シミュレーションで実際の製造における様々な現象を全て合理的に再現するのは容易でなく、特に熔融金属と砂型表面の境界面で起こる挙動の再現に問題があった。そこで、膨大な境界条件データを収集してソフトへ反映することで、世界トップレベルの鋳造シミュレーション技術が確立することができた。現在では、「湯流れ解析」「凝固解析」「応力解析」を駆使して、製造前に最適な鋳造方案設計が可能となり、品質向上と短納期化の両立を実現している。図4は鋳造シミュレーションによる湯流れ解析と引け巣解析の一例である。



(a) 湯流れ解析（充填率 22%） (b) 湯流れ解析（充填率 90%） (c) 引け巣解析（健全度 60% 以下の部位）

図4 鋳造シミュレーション解析の一例

湯流れ解析では、溶湯温度の低下による湯じわ、湯境の予測、鋳型内空気残存による空気の巻き込み、初期に流入した溶湯による酸化物巻き込みを予測することが可能である。また、引け巣解析では鋳物から押し湯への指向性凝固が阻害されると、鋳物内部に空隙（引け巣）が発生する状況を予測できるが、実際に解析結果で健全度 60% 以下と判定された部位には、実体でも引け巣が確認される確率が高いことを確認している。

このような解析を繰り返すことで、鋳鋼品の品質向上と最適な構造設計を実現してきた。また、当社ではお客様の設計構想段階から鋳造シミュレーションを活用した技術支援を行い、例えば最適ナリブ構造の提案など、鋳造技術の観点からお客様の製品品質向上とコスト削減に寄与するパートナーとしての役割を果たすべく取り組んでいる。

2.3 環境関連事業の展開：ごみ焼却炉から次世代水素製造装置まで

日本の廃棄物の中間処理は、諸外国と比べて焼却処理の比率が高く、約 80% の廃棄物が焼却処理されている。焼却処理の特徴は、減量化、無害化、無臭化のほか、発電や熱利用によるエネルギー回収があげられる。焼却処理の方式は、ストーカ方式、流動床方式、ガス化溶融方式の 3 種類に分類されるが、現在ではストーカ方式が主流である。ストーカ方式では、燃焼炉内に廃棄物を移送するための火格子が設置されており、火格子の材料には JIS G 5122 で規定された耐熱ステンレス鋼鋳鋼品（SCH 材）が一般的に使用されている。SCH 材は高クロムであるため、 Cr_2O_3 被膜の生成により、高温酸化を抑制することができる。しかし、プラスチックなどを多く含む産業廃棄物から生じる高濃度の塩素ガス環境下では

クロムが塩素と反応して蒸発するため Cr_2O_3 被膜の生成が不十分となり、耐食性が著しく低下して火格子が早期に損傷・廃却に至る場合がある。そのため、火格子の長寿命化に向けて、冷却効果を高めた形状の最適化や、耐食性を向上させるための材料開発が行われている。当社では SCH 材に比較して Si 量を大幅に高めた材料をベース組成とし、お客様個々の環境に応じた耐食性を確保できる合金 EGNIS[®] をシリーズ開発し、実機試験でも高評価を得ている⁹⁾。図 5 はごみ焼却炉の火格子、並びにバイオマスボイラのエアーノズルとして使用された EGNIS[®] 合金シリーズと既存材との耐食性の比較結果を示す。EGNIS[®] 材は何れの環境においても既存材に比べて優れた耐食性を示し、長寿命化に貢献している。

この高 Si 添加ニッケル基合金 EGNIS[®] の他用途への展開として、次世代の水素社会実現に不可欠な水素の安価大量製造が可能な熱化学水素製造法 IS プロセスへの適用が検討されている¹⁰⁾。このプロセスは JAEA（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構）が開発したシステムであるが、その実現には 800℃ 以上の高温硫酸分解環境下で優れた耐食性を有する材料が必要であり、高 Si 添加 EGNIS[®] 合金をベースとしてさらなる高耐食化、高強度化に JAEA に協力して取り組んでいる。なお本開発は「熱化学水素製造法 IS プロセスでの強酸環境下に耐える耐食合金の開発」として、令和 7 年度埼玉県次世代ものづくり技術活用製品開発費補助金に採択されたことから、今後開発を益々加速させていく。

この他にも、液化水素の貯蔵、運搬に不可欠な極低温まで低熱膨張のインバー合金へのニーズも高まっており、その実現に向けて関連企業と共同取り組みを開始している。

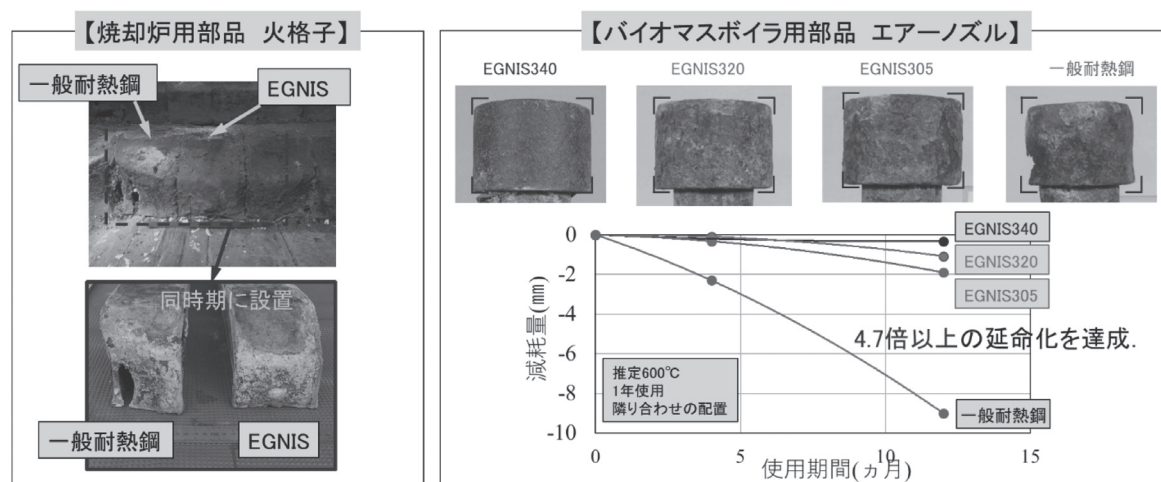


図 5 ごみ焼却炉の火格子、並びにバイオマスボイラのエアーノズル用 EGNIS[®] 合金と既存材との耐食性比較

2. 4 3D 積層造形による高機能鋳造品の開発

3D 積層造形技術は次世代の鋳造技術として注目されて久しいが、装置の革新と様々な分野への適用が世界中で進展している。図6は当社が検討してきた3D 積層造形方法の特徴を造形速度と造形精度で整理したものである。PBF (Powder Bed Fusion : 粉末床溶融結合) 方式は最も早く普及した造形方法であるが、造形精度は高いが造形速度が遅い難点がある。一方、L-WAM (Laser Wire Additive Manufacturing : レーザーワイヤ積層造形) 方式は造形速度は速いが造形精度に難点がある。P-DED (Powder Directed Energy Deposition : 粉末指向性エネルギー堆積) 方式はその中間的な位置づけであるが、粉末を複数のノズルから供給可能なため、要素粉末からの合金製造、あるいは金属-セラミックスの複合化等のポテンシャルを有する。BJT (Binder Jetting : バインダージェット結合剤噴射) 方式は、粉末に液体バインダーを吹き付ける工程を繰り返して造形するため、複雑形状の高速成形が可能であるが、金属等では造形後に熱処理にて融着させる必要があるため、造形物が収縮・変形する場合がある。

当社ではPBF方式を東金属産業株式会社と共同して、開発を進めてきた。さらにP-DEDとL-WAMの装置を自社に導入し、新たな商品開発に取り組んでいる。また、BJTについても独自機能を有する新製品の開発を進めている。

3. まとめと今後の課題

当社では2029年の80周年に向けて、新たな取り組みを展開しているが、経済安全保障環境の変化、米国の関税措置等による予期せぬ経営環境の変化もあり、顧客の需要動向も影響を受けている。そのような状況下でも当社としては開発の歩みを止めることはなく、インバー合金グローバルニッチトップを目指して、中長期視点で開発を着実に進め、新商品の拡販による中期目標の達成と、顧客から信頼され、また地域とも共生して社会に役立つ企業を目指し絶えざる努力を続けていく。

参考文献

- 1) Ch. Ed. Guillaume: Compt. Rend., 125 (1897), 235.
- 2) 増本量: 金属の研究, 8 (1931), 237.
- 3) H. T. Fujii, 他: Proceedings of SPIE Vol. 12188 (2022), 1218806-1-12.
- 4) H. T. Fujii, 他: CAMX Proceedings TP24-237 (2024), 1-19.
- 5) G. Krauss: Acta Metall., 11 (1963), 499.
- 6) 牧正志, 他: 鉄と鋼, 65 (1979), 1598.
- 7) 坂口直輝, 他: 鉄と鋼, 105 (2019), 629.
- 8) 日立製作所, “ADSTEFAN 鋳造シミュレーションソフトウェア”, <https://www.adstefan.com/>
- 9) 稲毛基大, 他: 材料と環境, 74 (2025), 1.
- 10) 広田憲亮, 他: 材料と環境, 68 (2019), 137.

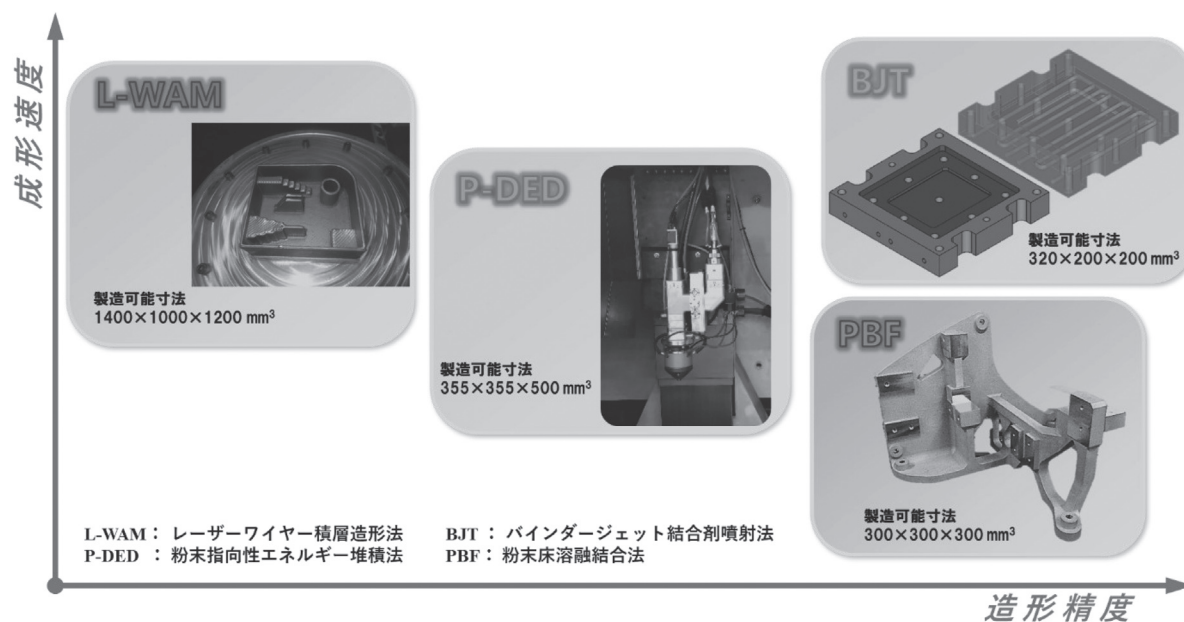


図6 新報国マテリアルが取り組む3D 積層造形技術