

ステンレス鋼の レアメタルは減らせるか？

ステンレス鋼にはクロム、ニッケル、モリブデンなどのレアメタルが使用されているが、レアメタルには2000年代以降、価格変動や供給不安への懸念が高まっている。そこで期待されるのがレアメタルの使用量を減らした省資源型ステンレス鋼である。最近では、特長ある開発鋼が次々と登場している。



幅広い用途で使われるステンレス鋼において、レアメタルを削減した新鋼種の開発が進んでいる。
写真はシステムキッチンの構造材に使用された例 (写真提供: クリナップ(株))

高まるレアメタルの供給リスク

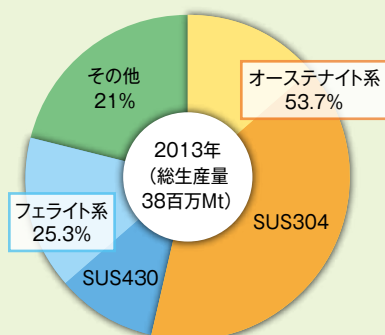
真っ赤に輝く宝石、ルビー。その美しさにレアメタルが関わっていることをご存じだろうか。そのレアメタルとはクロムである。ルビーは酸化アルミニウムの結晶であり、美しい色を決めるのはわずか1%程度入っているクロムのはたらきといわれている。クロムの量が少ないと色はピンクになり、逆に多すぎると灰色になり宝石としての価値がなくなる。他に、エメラルドの緑色の美しさもクロムの量で決まるそうだ。クロムは18世紀に発見され、いろいろな色の化合物があることから、ギリシャ語のクロマ(色の意味)に因んで名付けられた。クロムイエロー、クロムレッドなどの顔料もクロムの化合物である。

現代ではクロムの最大の用途は、ステンレス鋼を始めとする特殊鋼である。鋼にクロムを添加したステンレス鋼が発明された

のは、1910年代のことであった。最大の特徴は、Stainlessの名のとおりさびにくいことである。ステンレス鋼とは「クロムを10.5%以上含む特殊鋼」と定義されているが、クロム以外にもニッケル、モリブデンなどのレアメタル元素が添加される。JISでは約90種類のステンレス鋼が規格化されており、開発鋼種を含めると200種類にも達するといわれる。用途も、日用品、構造材、機械部品など幅広く、世界のステンレス鋼の粗鋼生産は3,800万tに達している(2013暦年)。

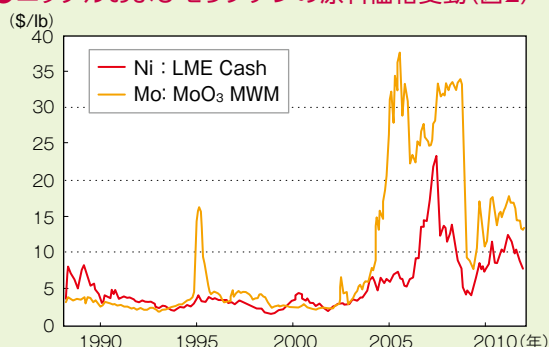
2000年代半ば、多くのレアメタルの価格が高騰する事態が発生した。例えばニッケルは、以前の5\$/lb前後から急騰し、2007年に20\$/lbを超えるまでになり、2008年のリーマンショック後に急落した。同様なことは、他のレアメタルでも起こっている。レアメタルの生産国は特定の資源国に偏在しており、生産する企業が限定されていることなどから、高い供給リスクを抱えてい

●世界のステンレス鋼の粗鋼生産(図1)



(まてりあ第54巻第7号(2015)、p356を基に作図)

●ニッケルおよびモリブデンの原料価格変動(図2)



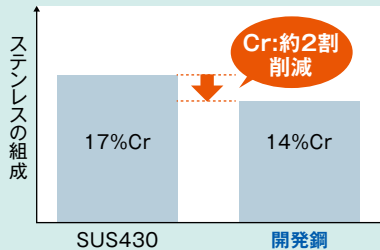
2005年ごろからニッケル、モリブデンなどの価格が高騰し、その後のリーマンショックなどを経て、激しい価格変動が続いている。

(出典: 第215・216回西山記念技術講座(2013)、p21)

省クロム
省ニッケル

新たにスズに着目し、耐食性と使いやすさを両立(省クロム型フェライト系ステンレス鋼)

●微量スズ添加によるレアメタルの節減効果(図3)



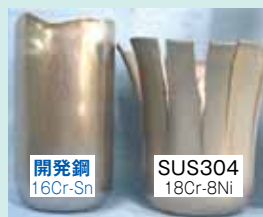
レアメタルのクロムを節減するため、開発鋼では微量のスズを添加した。これによりSUS430(17%クロム)と比較して開発鋼(14%クロム-スズ)はクロムを約2割削減することができた。



クロムの使用量を減らした省資源型ステンレス鋼が採用されたシステムキッチンの構造材(写真提供: クリナップ(株))

●円筒深絞り加工後の外観の比較(図4)

SUS304では3段円筒深絞り後に時期割れが発生するが、開発鋼(16%クロム-スズ)では深絞り加工性を向上し、さまざまな形状への適用が期待される。



(資料提供:新日鐵住金ステンレス(株))

る。これを解決するため、新たな鉱山開発による供給源の多様化や、リサイクルや資源備蓄の推進、代替材料の技術開発などが進められてきた。鉄鋼業から見れば、大きな需要のあるステンレス鋼を安定的に生産することは重要なミッションである。そこで取り組んでいるのが、レアメタルの使用量を減らした、いわゆる省資源型ステンレス鋼の開発である。今回は、特徴ある開発鋼の例を紹介する。

SUS304の代替を目指し耐食性を確保

省クロム、省ニッケル

ステンレス鋼は金属組織により「フェライト」「オーステナイト」「マルテンサイト」の3つがある。このうち、粗鋼生産の5割以上をオーステナイト系ステンレス鋼が占めており、代表的な鋼種がSUS304である。スプーンなどに「18-8」と刻印されていることからわかるように、成分は18%クロム-8%ニッケルである。SUS304は、優れた耐食性、耐熱性、低温靱性などの特性を持ち、加えて深絞りや曲げ加工などの冷間加工性にすぐれ、溶接性もよいなど多くの特徴を持つ。日用品や建築内外装材、自動車部品、化学プラント設備など、多くの製品に広く用いられており、ステンレス鋼全体の約40%を占めている。

しかもSUS304はレアメタルの一種であるニッケルを多く含んでおり、価格や供給リスクの問題からニッケルを含まない省資源型ステンレス鋼の開発が望まれていた。

そこで注目されたのがフェライト系ステンレス鋼である。もともとフェライト系ステンレス鋼はニッケル成分を含んでおらず、省資

源型のステンレス鋼である。これまでも日本の鉄鋼メーカーは、高い精錬技術を生かし、鋼中の不純物元素を低減した省資源型ステンレス鋼の製造技術を蓄積してきた。この結果の一例として、2010年にはSUS304と同等の耐食性を持つSUS443J1がJIS化された。

しかしこれまでのフェライト系ステンレス鋼では、耐食性を高めるためにクロムを活用し、用途や目的に応じてクロム量を調整し、必要な耐食性能を確保してきた。

そこで、重要な成分のクロムを削減した、省クロム型フェライト系ステンレス鋼が開発された。ポイントとなったのは、スズの活用である。

そもそもスズは、昔から耐食性に優れる元素として知られている。有名な15世紀の名画「最後の晩餐」に描かれている卓上の食器は、いつまでも美しいスズでできているといわれている。また身近な用途では、缶詰の内側表面のスズめっきがあるが、缶の耐食性を維持し、食品を長期保存することができる。

そこで、これまで鉄鋼材料の生産性を阻害することから顧みられなかったスズを、積極的に活用する技術開発を推進し、クロムを減らしても十分な耐食性を確保できるような材料を開発した。スズの添加により、従来のフェライト系ステンレス鋼(SUS430)と比較して、クロム量は約2割削減を果すことができた。またSUS304と比較した場合には、ニッケルとクロムを合計して約4割削減を果たすことができた。

同様のシリーズでクロム量がやや多い鋼種は、より高い耐食性と加工性を両立している。たとえば円筒の深絞り加工をした場合、SUS304では時期割れが発生するが、開発鋼では滑らかな深絞り形状が実現する。

●**省ニッケル
省モリブデン**

窒素を活用し、優れた耐食性と溶接性を兼ね備えた開発鋼(省合金型二相系ステンレス鋼)

●二相ステンレス鋼の金属組織(図5)



高クロム鋼に適量のニッケルを添加することにより、オーステナイトとフェライトの二相が混合した組織を持つステンレス鋼を開発した。



海水淡水化装置タンク

●省合金型二相ステンレス鋼の薄肉軽量化の例(図6)



同等の強度を持つH形鋼の重量を比較した場合、SUS304は10kgに対し、開発鋼は6kgで、45%程度の軽量化が図れる。耐食性を保ちつつ軽量化と材料コスト削減を実現し、プラント設備やケミカルタンカー部材などに適用されている。



ケミカルタンカー

(資料提供:新日鐵住金ステンレス(株))

この材料はすでに、システムキッチンの構造部材に採用されている。導入当初からキッチンメーカーのアピールするところとなり、環境配慮型商品として消費者からも好評を得ているという。省資源だけでなく、比較的安価で加工性がよいため、SUS304に替わる汎用ステンレス鋼としての適用が進んでいる。

構造材として期待される二相ステンレス鋼

省ニッケル、省モリブデン

SUS304は土木構造物や化学プラント部材などにも使われるが、このような用途では日用品などと比べると要求される耐食性レベルはやや厳しくなる。このような分野で期待される材料に二相ステンレス鋼がある。

二相ステンレス鋼は、オーステナイトとフェライトという2つの金属組織が混合したステンレス鋼である。特性も、それぞれの良い点を併せ持っている。例えば、二相ステンレス鋼は厚板として使用できるが、これはオーステナイト系ステンレス鋼が韌性に優れるためだ。フェライト系ステンレス鋼は韌性が低いため、厚板としては使われない。また二相混合の微細組織と窒素添加によって優れた強度を有するため、二相ステンレス鋼は、フェライト系ステンレス鋼やオーステナイト系ステンレス鋼に比べ約2倍の強度を発揮する。さらに溶接性にも優れており、溶接構造用材料として使用できる。

しかし、従来の代表的な二相ステンレス鋼であるSUS329J3Lは、モリブデンを多く含むことから高価であり、その用途は特殊なものに限られていた。

そこで開発されたのが、省合金型(リーン)二相ステンレス鋼である。ニッケルおよびモリブデンの量を減らす一方で、クロム、マンガン、窒素を添加することにより、SUS304と同等の耐食性を確保した。その結果、例えばニッケルについては、SUS304の8%から鋼種によっては2%以下にまで大幅に減らすことができ、材料コストを大きく削減することができた。

この材料の開発のポイントは、窒素をうまく活用した点である。空気にも含まれる窒素は安価であり、強度や耐食性の向上のために有用な元素である。しかし溶接構造材として使用する場合、大入熱溶接では耐食性が低下するという問題があった。そこで開発鋼では、耐食性劣化の原因となる窒化物の析出プロセスを分析し、性能低下の原因となる窒化物の析出を抑制できるような最適成分を見出した。

また窒素を添加すると製造時に表面疵が発生しやすいなどの問題があったが、 casting 条件や熱間工程での条件最適化などにより、一般のステンレス鋼と同等の生産性を確保した。

この材料では、厚板の生産が可能であり、すでにケミカルタンカー用タンク材、海水淡水化プラント部材、ソーラーパネル架台などに採用され、JIS規格になっている。

自動車部品の熱疲労に有効な元素の探索

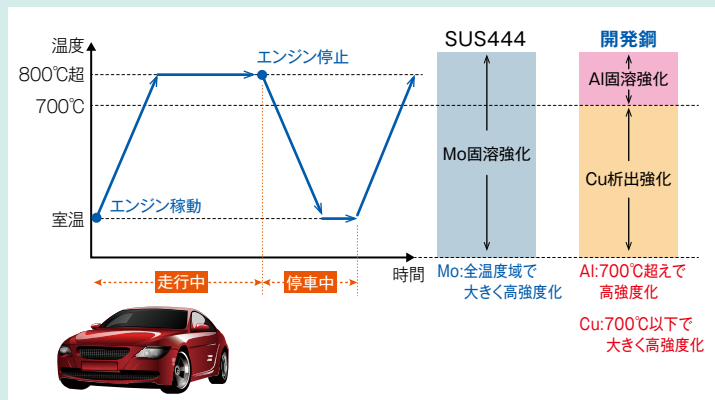
省モリブデン

ステンレス鋼の代表的な用途に自動車排気系部品があるが、これには高いレベルの耐食性と耐熱性が求められる。例えばエンジンからの排気ガスを集めるエキゾーストマニホールドは、エ

省モリブデン

銅とアルミニウムにより自動車排気系部品の高温度強度を確保(省資源型高耐熱ステンレス鋼)

●実使用環境に応じた熱疲労特性の向上の考え方(図7)



自動車の実使用環境を想定した熱履歴を考慮し、銅の析出強化とアルミニウムの固溶強化を組み合わせること、全温度域で鋼を強化し、熱疲労特性が向上するように設計している。

●開発鋼の成形例(図8)



排気系部品であるコンバータケースでは、従来はカップ形状を分割し、それぞれの部材をステンレス鋼薄板でプレス成形して曲面形状を作り、溶接組立していた。この開発鋼は加工性が優れているため、分割することなく一体でプレス成形することができ、自動車部品メーカーの部品点数削減、溶接工数低減に寄与することができた。

(資料提供:JFEスチール(株))

エンジン稼働時には約800°Cを超える高温となり、停止時には室温まで下がる。このような昇温と降温の繰り返しに伴う破壊は「熱疲労」と呼ばれ、これに耐えるため材料には優れた高温強度が求められていた。

排気系部品には1980年代以前は鋳鉄が使われていたが、その後自動車の軽量化要求が高まり、ステンレス鋼板に代替された。その後も燃費向上を目的としてエンジンの高温化が進み、それまでの汎用ステンレス鋼からさらに耐熱性に優れたSUS444(19%クロム-2%モリブデン-ニオブ)などが使用されるようになった。この鋼種では、高温強度を発揮するため、モリブデンの添加が有効であった。

ところが2000年代中ごろ、モリブデンは世界的な供給不足に陥り、自動車メーカーからモリブデンの使用量を減らした開発鋼へのニーズが高まった。

そこで開発されたのが、モリブデンをまったく使用しない省資源型高耐熱ステンレス鋼である。この鋼種は、実際の自動車の使用環境における温度の変化を考慮して開発された。自動車がスタートし、走行、停車という一連の流れの中で、排気ガスの温度は、室温から上昇し、走行中には700°Cを超え、停車時には再び室温にもどるという熱変化を経る。

従来のSUS444では、室温から高温までの全温度域でモリブデンが高強度化に寄与していた。そこで、これに代わる元素として注目されたのは銅である。銅を添加すると600~700°Cで微細な析出物が生成され、析出強化により700°C以下の温度域でモリブデンを含む従来材に比べて強度が向上する。また、銅が固溶する700°Cを超える高温域において、固溶強化能が優れる元素はモリブデンの他にタングステン、ニオブなどがある

が、いずれもレアメタルである。そこで、これらの元素と同様な効果を発揮する元素として着目されたのがアルミニウムである。アルミニウムは従来、強化元素としてあまり注目されていなかったが、700°Cを超えた高温域で、大きな固溶強化能を発揮する。しかもレアメタルでなく、経済性の点からも有利である。

この銅とアルミニウムの組み合わせにより、銅が析出する温度域では従来材よりも高強度で、銅が固溶する温度域ではアルミニウム添加により従来材と同等の強度を有するステンレス鋼が開発された。

加工性については、モリブデンが含まれていないため、自動車部品メーカーにおいて高い成形加工性を発揮する。含まれている銅は部品製造時には固溶しているが、自動車に搭載されて初めて温度が上がり、その後析出し、強化されることになる。

ちなみに、海外では排気系部品を、特性の異なるステンレス鋼パイプを二重にして使用するなどして対応している例もあるという。これに対し日本では、新しい鋼種を開発し、最適な生産技術を編み出している。海外とは異なるアプローチから生まれた省資源型ステンレス鋼。このような取り組みが、ステンレス鋼の需要拡大をもたらし、新たな世界を開拓していく原動力になっていく。

●取材協力 新日鐵住金ステンレス(株)、JFEスチール(株)
●文 杉山 香里