

元素のチカラで鉄の高機能化を極める 新日鉄住金の先進技術

鉄にさまざまな元素を添加することで、より優れた特性を引き出すことができます。新日鉄住金は元素のチカラで鉄の高機能化を極める研究開発に取り組んでいます。その4つの事例を紹介しましょう。

加工性

耐食性

靱性

強度化

Pb

鉛フリー

マンガン硫化物 (MnS) を微細に均一に配置することで、鉛を含む従来鋼と同等以上の被削性を実現。

MnS

快削鋼

削られやすさと 環境負荷の低減を追求

自動車の部品やOA機器に使われる精密部品の鋼材には、硬くて強い上に、加工しやすい削られやすさ(被削性)が求められます。削られやすいということの特徴として大きく4つあります。①切りくずの分断性(切りくず処理性が良いこと)、②加工中に工具にかかる力(切削抵抗)が小さいこと、③加工する工具が摩耗しにくい(長寿命)こと、④加工後の仕上がり(面性状)がきれいなことです。いずれも、生産性や品質の向上につながり、こうしたニーズに応える材料として、鉛快削鋼がこれまで多く使われてきました。

鉛快削鋼とは、鉄(Fe)に炭素(C)やマンガン(Mn)を含んだ合金に、少量の鉛(Pb)や硫黄(S)を加えて、被削性を向上させた鋼材で、特に鉛は被削性改善に重要な役割を担っています。しかしEUでは、2000年10月に廃自動車のリサイクル部品に含まれる特定物質の制限(ELV指令)、2006年7月には電子・電気機器における特定有害物質の使用制限(RoHS指令)が始まるなど、鉛の規制が進みつつあります。鋼材中で使用が許される鉛の含有量は重量割合で0.35%以下と規定されているため、大半の製品に鉛快削鋼を継続使用できますが、さらなる環境負荷の低減を目指して、新日鉄住金は鉛を含まない快削鋼(鉛フリー快削鋼)の開発に挑みました。

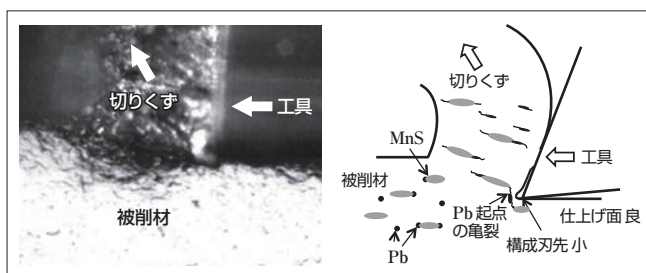
「鉛が被削性改善に有効であることは知られていましたが、なぜなのかを真

ここがポイント! 「規制戦略」
鉛フリー化で環境に影響を及ぼす元素の少ない
快削鋼を開発しました。

写真2 快削鋼の用途

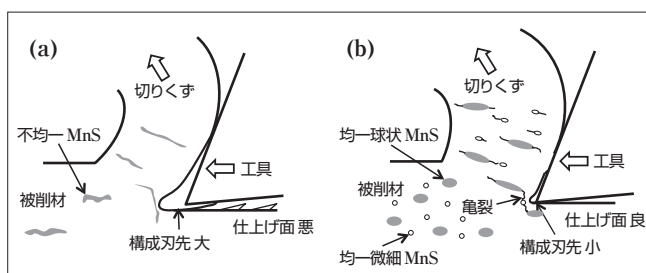


写真1 切削加工の高速カメラによる鉛快削鋼観察



鉛が含まれている鋼は、切削中に鉛介在物を起点に亀裂が発生し、少ない切削抵抗と小さい構成刃先で、スムーズに削られていくことがわかった。

図1 鉛を含まない鋼の切削メカニズム



マンガン硫化物(MnS)の形状や分散が不均一だと構成刃先が大きくなりがち(a)だが、球状・微細化して均一に分散させることで構成刃先を最小限に抑えることができた(b)。

その結果、鉛快削鋼は従来の考え方である切削加工中の温度上昇で鋼中から融点の低い鉛が溶け出して工具と切りくずの間で潤滑剤の役割を果たすだけでなく、切りくず内部で鉛を起点に亀裂が発生し、切削抵抗の減少と切りくず処理性の改善を両立させていたことがわかりました(写真1)。一方、鉛を含まない鋼では、工具の先端で構成刃先(※1)と呼ばれる付着物を生み出し、工具が表面を粗く削り出していました。

ここで注目したのは、鉛快削鋼中の硫黄によって形成されるマンガン硫化物(MnS)でした。マンガン硫化物は鉛ほどではありませんが、切削抵抗の低減や切りくずの分散性を向上させます。ただし、通常の溶鋼を固めて高温で棒状に圧延する製造プロセスでは、鋼材中で不均



新日鉄住金(株)技術開発本部
鉄鋼研究所 棒線研究部
渡里 宏二 主幹研究員

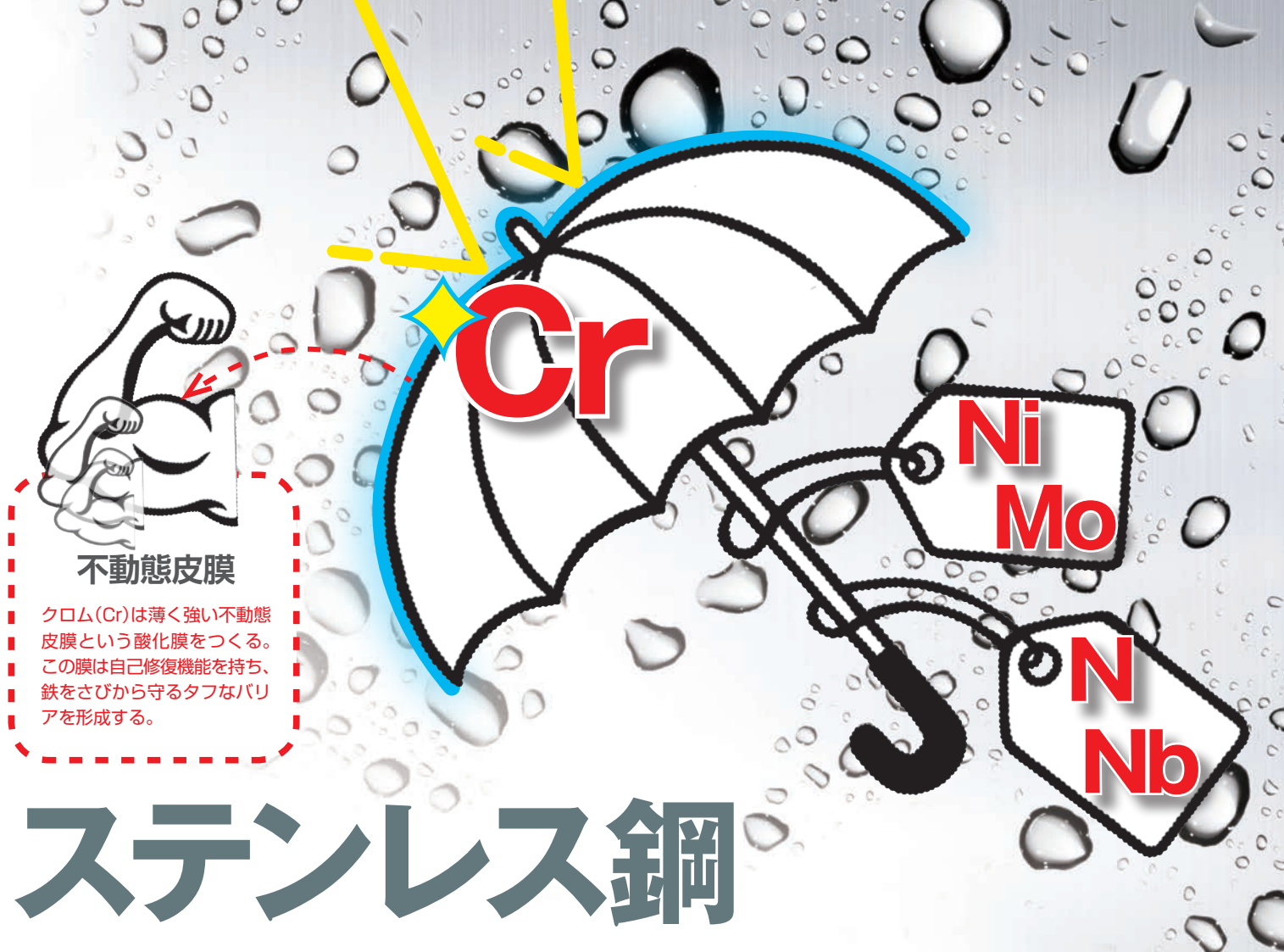
に理解することが鉛フリー快削鋼の開発の鍵と考えました。そのうえで、高速ビデオカメラなどで切削現象を見える化し、鉛の改善メカニズムを探りました(渡里宏二主幹研究員)

「鉛フリー快削鋼は一昨年から新日鉄住金で掲げています棒線事業ブランドSteelink®(スティーリンク)の下で開発強化している高機能商品群の代表的な商品です。またこの鉛快削鋼の開発で培った切削技術を軸にしたソリューション提案で、お客様の材料特性に合わせた切削条件の最適化にも貢献していきます」(渡里主幹研究員)

このように新日鉄住金の鉛フリー快削鋼は、面性状や切りくず処理性が鉛快削鋼との比較で同等以上であるため、環境にやさしく高性能な特長が評価され、2015年度文部科学大臣表彰で科学技術賞(開発部門)を受賞しました。また富士ゼロックス(株)から高評価取引先として調達プレミアパートナーに認定されました。

※1 構成刃先：切削の過程で、切りくずが工具へ付着し、あたかも新しい刃先ができたようになること。一般的に被削性を阻害する。

※2 マイクロメートル(μm)：1マイクロメートルは100万分の1メートルに相当する。



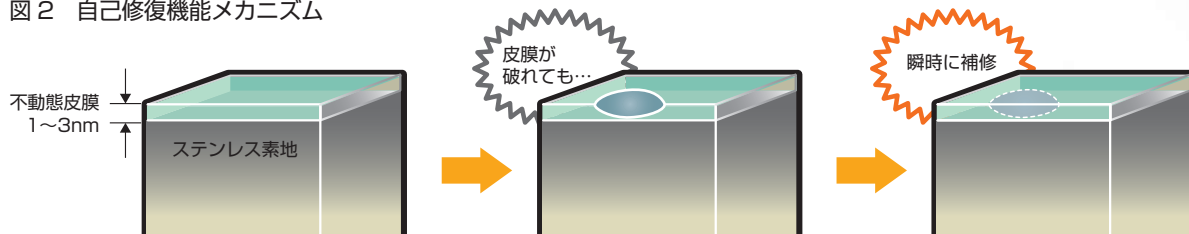
不動態皮膜

クロム(Cr)は薄く強い不動態皮膜という酸化膜をつくる。この膜は自己修復機能を持ち、鉄をさびから守るタフなバリアを形成する。

ステンレス鋼

自己修復機能で鉄をさびから守る

図2 自己修復機能メカニズム



ステンレス表面にクロム(Cr)が不動態皮膜をつくる。加工中や使用中に皮膜が破れても、鋼中のクロムと大気中の酸素、水が反応して瞬時に再生する。ただし、繰り返し強い力がかかり皮膜に疵が付いたときは、モリブデン(Mo)が表面のクロム量を高め、皮膜の再生力を強める働きをする。また、万一皮膜が破れさびが発生しても、ニッケル(Ni)がその進行を抑える働きをする。

鉄の弱点はさびることです。これまでさびにくい鋼がつくられてきました。その一つがステンレス鋼です。ステンレス鋼とは、鉄(Fe)を主成分として、炭素(C)を1・2%以下、クロム(Cr)を10・5%以上含む合金鋼「JIS G 0203 (2009)」で、耐候性※3に優れています。

さびから鋼を守るポイントとなる元素はクロムです。鉄は大気中の酸素と結びついて酸化することで、さびが発生します。クロムの表面でも大気中で酸化物が形成されます。しかしクロムの場合、表面に1・3ナノメートル※4という非常に薄い酸化膜ができます。この膜は不動態被膜と呼ばれ、酸化進行を防ぐバリアとなります。そのため膜ができたあとは、さびが進まず安定する性質を持っています(図2)。

不動態皮膜の最大の特徴は自己修復機能です。加工中や使用中に不動態皮膜が破れても、鋼中のクロムと大気中の酸素、水が反応して皮膜を瞬時に再生する機能であり、その機能は何度でも繰り返し発揮されます。不動態皮膜をつくるクロム以外にも、ステンレス鋼の耐食性を高める元素にモリブデン(Mo)があります。モリブデンは不動態皮膜が疵ついたとき、表面のクロム量を高め皮膜の再生力を強める働きを担っています。

しかしステンレス鋼は絶対にさびないわけではありません。特に海水などに

※3 耐候性：建築材料などを屋外で使う際の耐久性。

※4 ナノメートル(nm)：1ナノメートルは10億分の1メートルに相当する。

写真3 ステンレス鋼の用途例



システムキッチン

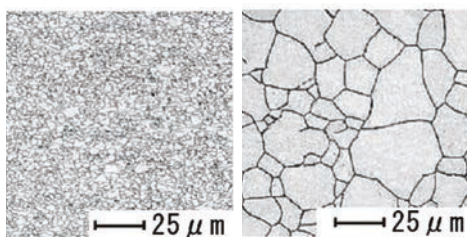


鉄道車両



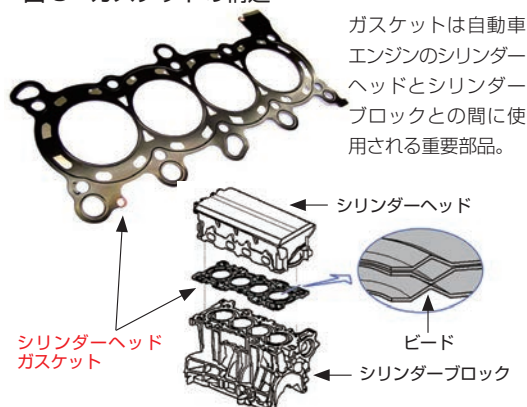
プラント設備

写真4 結晶粒径の超微細化



従来鋼の20マイクロメートル(右)から2マイクロメートル以下(左)に組織の結晶粒径を超微細化することで、新しい高強度ステンレス鋼の開発に成功した。

図3 ガasketの構造



ここがポイント！「省資源戦略」
窒素(N)とニオブ(Nb)を添加し、独自の製造技術により、超微細結晶粒の高強度ステンレス鋼を開発しました。

「当社が技術開発指針として、希少元素であるクロムやニッケル、モリブデンの低減を目指しています。そのため高強度化(薄肉化)による最終使用量の削減を図るとともに、希少元素に代わる元素として窒素(N)に着目した新しい(写真3)。

耐食性に優れた新日鉄住金グループのステンレス鋼は、システムキッチンから建築物、鉄道車両、プラント設備まで、さまざまな用途で使われています。含まれる塩は大敵です。塩素が不動態皮膜に入り込み、自己修復が間に合わず、局部的に素地の鋼が侵食され、さびていくことがあります。そこでクロム、モリブデンのほかに、ニッケル(Ni)を添加しています。ニッケルはさびの進行を抑制する働きがあり、さびによる孔を開きにくくするとともに加工性や溶接性を高めます。

耐食性に優れた新日鉄住金グループのステンレス鋼は、システムキッチンから建築物、鉄道車両、プラント設備まで、さまざまな用途で使われています。



新日鉄住金(株)技術開発本部
鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部
寺岡 慎一 上席主幹研究員

「高強度ステンレス鋼の開発に取り組んでいます」(寺岡慎一上席主幹研究員) その代表例の一つが、高燃焼圧シリンダーヘッドガスケット用ステンレス鋼 NSMCI-NAR1-301LHS1の開発です。自動車エンジン内でガソリンが燃焼すると、その圧力でシリンダーヘッドは微かに浮き上がり、シリンダーブロックとの間にすき間を生じます。燃焼ガスの漏れを防ぐガスケットの材料には、シリンダーヘッドの動きに耐える疲労強度とエンジンの冷却水に対する耐食性が求められます(図3)。

NSMCI-NAR1-301LHS1の開発では、炭素(C)の含有量を低減し、窒素と微量のニオブ(Nb)を添加して、製造工程を総合的に調整することで組織の結晶粒径を超微細化(写真4)し、高いばね特性と疲労特性を持ちながら、従来鋼と同じ良好な加工性を確保することに成功しました。特に疲労特性は従来鋼の1.4倍という飛躍的進歩を遂げ、2010年度文部科学大臣表彰で科学技術賞(開発部門)を受賞しました。現在、多数の自動車メーカーに採用され、燃費の向上とCO₂や環境汚染物質の排出削減に貢献しています。

「ステンレス鋼は機能性を活かして常に新しい用途を開拓することで発展してきました。国際競争が一層激しくなるなか、継続的な研究開発で特殊ステンレス鋼のさらなる機能性向上を追求していきます」(寺岡上席主幹研究員)

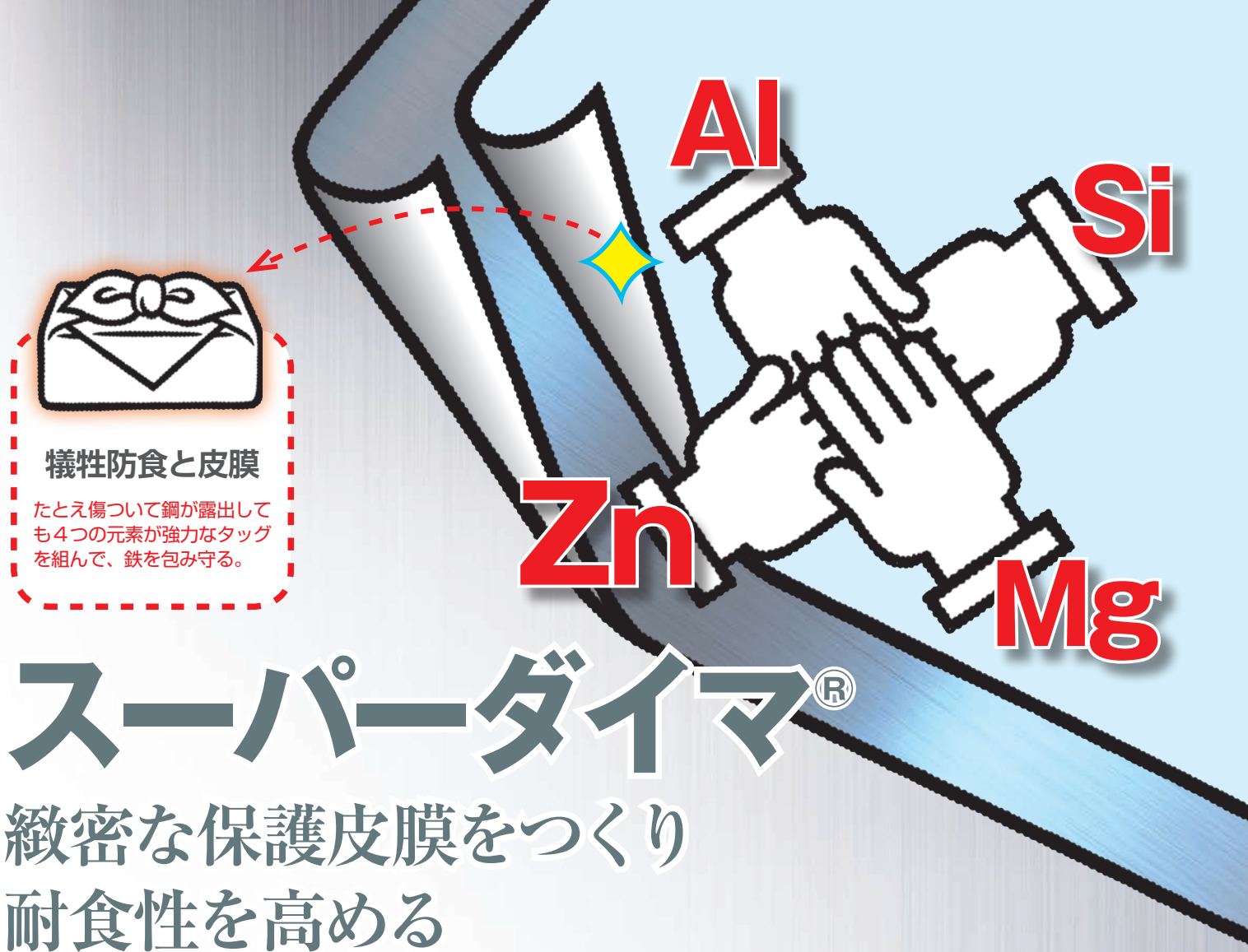
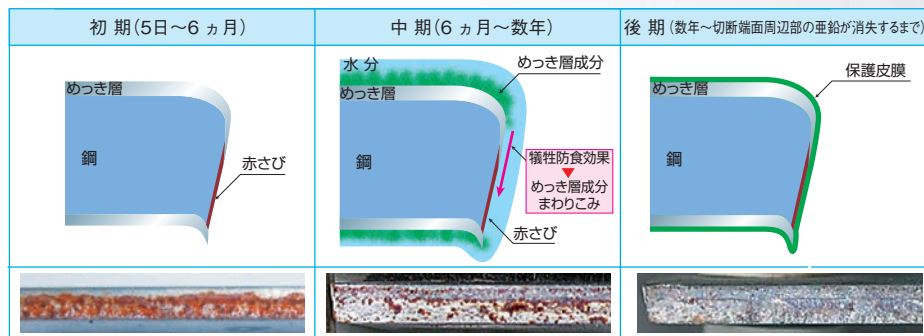


図4 端面防食メカニズム



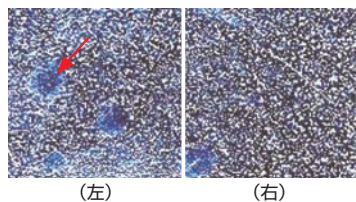
初期には赤さびが発生するものの、めっきの犠牲防食効果で緻密な保護皮膜を形成し、耐食性を確保している。

さびとの戦いはステンレス鋼だけにとどまりません。もう一つの代表例として、鋼の表面に化粧のようにめっきを施す表面処理鋼板があります。めっき層の亜鉛(Zn)やアルミニウム(Al)は、鉄を守る犠牲防食※5型の保護皮膜を形成します。しかし保護皮膜が粗いと、水分や酸素を素地の鋼に通してしまい、どうしても腐食が進み、さびてしまいます。耐食性をさらに高めるためには、保護皮膜を緻密にする必要があります。そこで新日鉄住金は、表面に亜鉛を主成分とした約11%のアルミニウム、約3%のマグネシウム(Mg)、微量のケイ素(Si)からなる合金めっきを施した新しい表面処理鋼板「スーパーダイマ®」を開発しました。ケイ素はアルミニウムを含有するめっき層の加工性や、マグネシウムとの複合作用で腐食を抑える効果を高める役割を果たし、緻密な保護皮膜を形成します。しかし切断端面部は素地の鋼が露出してしまったため、赤さびが発生することがあります。そのとき切断端面周辺部のめっき成分が溶け出す犠牲防食効果を發揮して、緻密な保護皮膜で端面部を覆っていきます(図4)。ここでも、めっき層に含まれるケイ素が保護皮膜の形成を促進する働きをします。こうした防食メカニズムによって、通常の亜鉛めっきに比べ約4倍の耐食性を誇っています。

「住宅や工場などの屋根や壁に表面処理鋼板は広く使用されてきました。近年は三世代が暮らせる100年住宅に

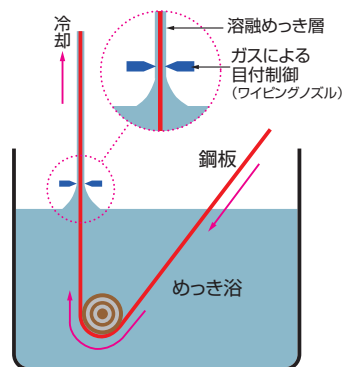
※5 犠牲防食：めっき層に万一疵が発生し、素地の鋼が露出しても、疵の周囲の亜鉛が鉄より先に溶け出して、腐食しないよう保護する仕組み。

写真5 めっき層組織均一技術



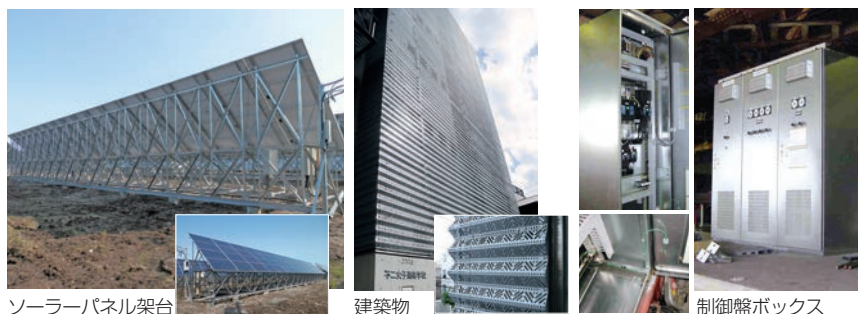
世界で初めて外観を安定化させるめっき層組織均一技術を確立した。(左矢印：不均一な組織、右：均一なめっき組織)

図5 溶融めっきの仕組み



溶けた金属に鋼板を浸して表面にめっきを付着させ保護皮膜をつくっている。

写真6 スーパーダイマの適用例



ソーラーパネル架台

建築物

制御盤ボックス

象徴されるように、建材製品の長寿命化ニーズが高まっています。こうしたニーズに応える高耐食性を実現するため、研究開発と製造現場の総力を結集して、2年という短期間で開発に成功しました」(末宗義広室長)

開発の最大のポイントは多成分系の複雑な金属元素を使いこなし、めっき処理する製造工程の設計にありました。めっき処理は溶けた金属(めっき浴)に鋼板を浸して表面にめっき金属を付着させています(図5)が、めっき浴溶解温度は、構成する4つの元素の添加量によって大きく異なります。亜鉛にアルミニウムを55%添加した従来の表面処理鋼板では製品耐食性には優れるものの、めっき浴溶解温度が高く、製造コストと操業性に課題がありました。そこでスーパー



新日鉄住金(株)鹿島製鉄所
設備部 プロセス技術室
生産技術部 生産技術室 上席主幹 兼務
末宗 義広 室長

ダイマでは溶解温度が低くなる各元素添加量の組み合わせを見だし、これらの課題を克服できました。

しかし、多成分系めっきの外観を安定化させるためのプロセス制御技術の開発が必要になりました。スーパーダイマは4つの元素を使うため、不均一なめっき層を形成することがあります。この結果、表面外観を損ねることがあることがわかりました。この課題を克服するため、研究者、設備技術者、操業技術者が一体となり日々協議を重ね、4元素からなるめっき生成プロセスを制御する仕組みをつくり上げました。この結果、めっき組織を安定化させ写真5、美しい外観をつくり込むことができるようになりました。

スーパーダイマは優れた高耐食性によって鋼材の長寿命化を図ることも、鋼板の厚みを薄くすることで鋼材使用量を大幅に低減することも可能で、省資源化に貢献します。この環境負荷低減に配慮した特性が高く評価され、2013年度に文部科学大臣表彰で科学技術賞(開発部門)、エコプロダクツ大賞で推進協議会会長賞を受賞しました。用途も建築・土木、道路・鉄道、電力・通信、農業・畜産など多岐に広がっています(写真6)。

「用途によってめっきの成分は異なります。スーパーダイマ開発の経験を活かして、さらなる高機能な表面処理鋼板の開発に取り組んでいきたいと考えています」(末宗室長)



-162°C

靱性(粘り強さ)

結晶の微細化とマンガン(Mn)モリブデン(Mo)の添加でニッケル(Ni)量を9%から7%に低減。極低温下で従来と同様の靱性を実現し、脆性亀裂の伝播を防ぐ。

9%

Ni 7%

Mo

Ni

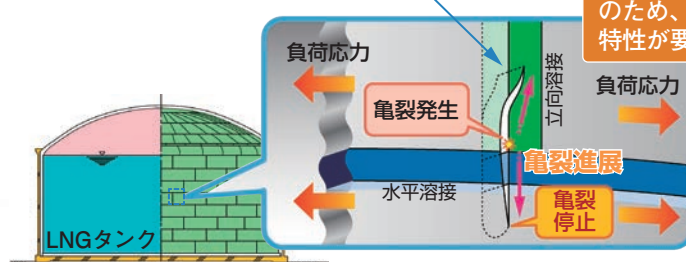
Mn

LNGタンク用 7%ニッケル鋼 半世紀ぶりの技術革新を実現

図6 LNGタンクに求められる対破壊特性

LNGタンク用鋼板には、図のように万一亀裂が発生しても停止させる性能が求められる。

立向溶接に沿って進展する脆性亀裂は、発生後すぐに溶接金属に逸れる

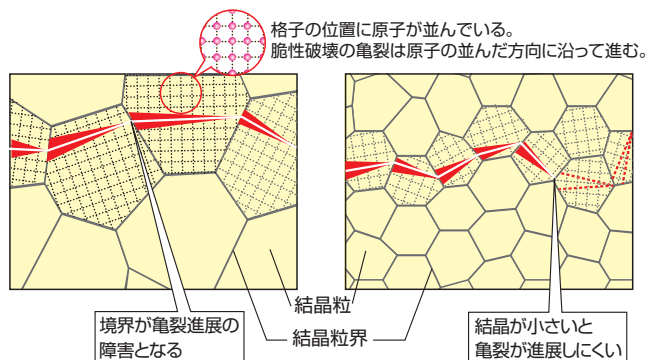


タンクの全体崩壊防止のため、亀裂伝播停止特性が要求される

地球規模の環境問題からクリーンエネルギーである液化天然ガス(LNG)の需要が増えています。LNGは約マイナス162°Cで貯蔵されるため、タンク用鋼板には極低温での高い破壊安全性と強度が必要とされます。この要求特性に対してニッケル(Ni)を9%含む鋼板が、これまで半世紀にわたり使われていました。しかし希少元素であるニッケルはもともと高価である上に、2000年ごろに価格が高騰し、タンクの建設コストを圧迫するようになりました。そこで新日鉄住金は、ニッケル量を削減しながら9%ニッケル鋼と同じ高い安全性と強度を持ち、省資源と高性能を両立させたLNGタンク用7%ニッケル鋼を開発しました。

材料開発では破壊安全性に貢献する鋼の粘り強さ(靱性安定化)を重視した成分設計を行っています。9%ニッケル鋼でも適用されている低炭素(C)化と、リン(P)や硫黄(S)の不純物元素の低減に加えて、ニッケル低減による強度低下をマンガン(Mn)やモリブデン(Mo)などで補っています。さらに溶接部の靱性安定化のためにケイ素(Si)を低減しています。マイナス162°Cの極低温下では、地震などにより衝撃的な力がかかった場合、鋼でさえも突然ガラスのように破断することがあります(図6)。この現象は脆性破壊と呼ばれています。脆性破壊が発生すると、

図 7 脆性破壊の亀裂進展と結晶粒サイズの関係



結晶粒の微細化は、数多くの結晶と結晶の境界が強度を高めると同時に、それらの境界で脆性破壊の亀裂の進行を止めて靱性を高めている。

写真 7 7%ニッケル鋼板の適用例



世界最大規模の大阪ガス(株)泉北製造所第一工場5号タンク

音速を上回る速さで鋼板に亀裂が進展し、LNGタンクの大規模破壊事故につながる恐れがあります。この脆性破壊を防ぐために欠かせない特性が靱性です。

靱性の向上には、製造工程で鋼の結晶粒を微細化させることが最も有力な手法です。結晶粒が小さいと、結晶粒の境界が亀裂進展の障壁となるために亀裂が進展しにくくなり、破断をくい止めることができるからです(図7)。

理想の結晶粒をつくり込むためには、製造工程での制御技術が重要になります。そこで着目したのが、造船やライナーパイプの厚板製造で適用が進んでいたTMCP(熱加工制御)技術でした。TMCPは従来の製造法に比べて、金属組織制御の範囲を大きく広げ、結晶粒の飛躍的な微細化を可能にしました。最適な合金設計とTMCP技術の融合



新日鉄住金(株)技術開発本部
鹿島技術研究部 厚板グループ
加茂 孝浩 主幹研究員

によって、7%ニッケル鋼の材料開発は実現したのです。

「7%ニッケル鋼の実用化に至るまでには材料開発だけでなく、実用化判断、実機量産化の3つのハードルを乗り越えなければなりませんでした」(加茂孝浩主幹研究員)

実用化判断では、新日鉄住金と施主の大阪ガス(株)、ファブ(タンク建設業者)のトヨカネツ(株)が連携して、新材料の実適用における課題を検証したことで、極めて高い安全性が要求されるLNGタンクへの新材料の適用が承認されました。また実機量産化については、鹿島製鉄所における製鋼から厚板まで一貫での制御技術の最適化により、新材料の実機量産化を実現しました。

7%ニッケル鋼板は世界初適用である大阪ガス(株)泉北製造所第一工場(大阪府)(写真7)をはじめ、東邦ガス(株)知多緑浜工場(愛知県)、石油資源開発(株)相馬LNG基地(福島県)の3物件への適用が進んでいます。さらにニッケル添加量が6・0〜7・5%の範囲で、国内外における規格化も進んでいます。

「将来的にさらなるニッケル低減も十分考えられます。ニッケルの効果だけに頼り切らず、各種組織制御技術を駆使することで、さらなる省資源化や高機能化の可能性を追求し続けていきます」(加茂主幹研究員)