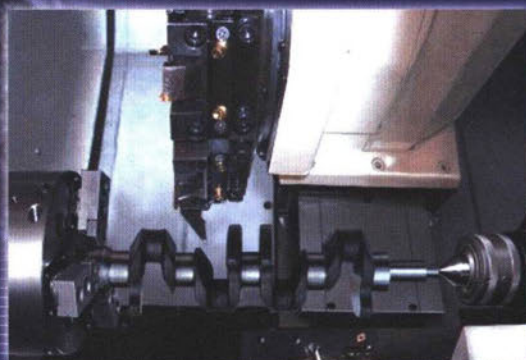


鉄鋼材料で進む 鉛フリー化

鉛は、鉄鋼材料の添加元素として、また鉄鋼製品と深いかわりを持つ元素として、これまで幅広く使用されてきた。近年、有害物質の使用削減の動きが世界的に活発化し、鉛もその1つとして指摘されている。これまで使ってきた鉛を使用しないという「鉛フリー化」は、材料や製品の開発の大きなテーマとなりつつある。



鉛フリー化を図った快削鋼は、自動車、電気・電子機器の部品への適用拡大が期待される。
(写真は切削加工のイメージ、写真提供:オークマ(株))

鉛の利用と人体への影響

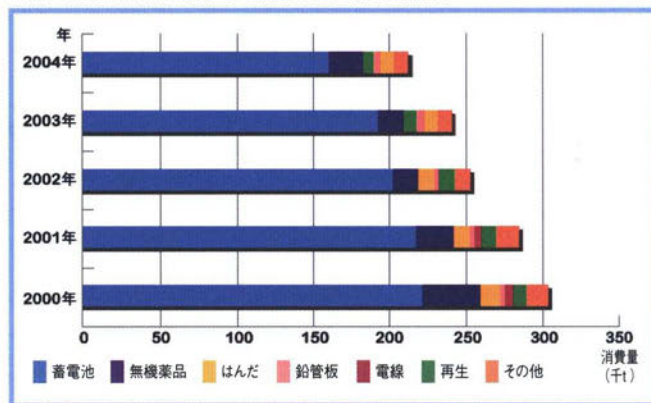
古代ローマの都市には、鉛でできた水道管が使われていたという。鉛は、昔から人間の生活の中で、いろいろな形で利用されてきた金属である。

鉛は、加工しやすい、比重が大きい(11.34)、放射線透過遮蔽能が高い、などの特徴を持っている。用途としては、自動車などの鉛蓄電池、原子力発電所や病院などで使われる放射線防護材、免震ダンパーや遮音材、また金属やガラスの添加元素としての利用が知られている。身近な用途としては、釣りのおもりなどにも使われている。人体では臓器や組織に通常わずかに存在し、骨などに沈着する。

世界の鉛地金需要は年間約700万に及んでいる。日本国内では、年間20~30万t程度の鉛が消費されているが、その量は徐々に減少傾向にある。用途としては、70%以上が蓄電池向けとなっている。

しかし、鉛の体内への異常蓄積によって起る各器官の障害、とくに小児の神経や脳への障害は「鉛中毒」と呼ばれ、以前から大きな問題となってきた。19世紀には、鉛の製錬、加工の工場で鉛中毒が多く発生し、問題となったことがある。これは、空気中

■鉛の用途別需要推移(電気鉛・再生鉛の合計)

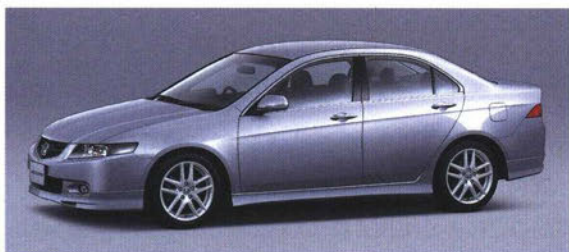


(資源統計年表より作成)

に浮遊する鉛粉や鉛化合物が体内に入り、大量の鉛が摂取されたことが原因であった。もし人体に鉛及び鉛化合物が大量に摂取された場合、大部分は自然に排出されるが、尿中鉛が0.2~0.4mg/lを超えると、人体への悪影響が現れるといわれている。現在日本では、労働安全衛生法の規定に基づき「鉛中毒予防規則」が定められ、健康診断を重視した対策がとられている。また大気や水質、土壌などに含まれる鉛の基準値は関係法令に定められている。



カラー複合機「iR C6800N」は、RoHS指令に先駆け、すでに2003年の段階で対応し、鉛フリー素材を多用した。
(資料提供:キヤノン(株))



2002年発売のホンダ・アコードは、燃料タンク材料を従来のすず-鉛めっき鋼板から鉛を使用しないすず-亜鉛めっき鋼板に変更し、さらにボディ電着塗装の脱鉛を可能にする塗料を開発するなどの取り組みを行った。これ以降鉛フリー材料の適用が進んでいった。(資料提供:本田技研工業(株))

また、散弾銃の銃弾から流出した鉛が、野鳥に鉛中毒を引き起こし、ひいては自然環境汚染の原因となることも指摘されている。

世界的に広がる鉛フリー化の動き

さまざまな化学物質が合成され、利用が進展する一方で、有害物質の人体や環境への影響が問題となっている。有害物質使用削減、あるいは使用停止の動きは、世界各国で進んでいる。EUでは、「6物質を電気製品に使用することを原則禁止する」という有害化学物質の規制(RoHS指令)を、2006年7月から開始した(一部に除外項目あり)。ここでいう6物質とは、鉛、水銀、六価クロム、カドミウム、ポリ臭化ビフェニール、ポリ臭化ジフェニルエーテルである。日本の電気・電子機器メーカーもこのような動きに対応し、RoHS指令開始に先立って6物質の含有を全廃あるいは低減する体制を整えた。(社)電子情報技術産業協会では、特定化学物質の含有表示規格(J-Moss)を実施し、6物質とその含有率基準値を規定し、基準値を超えた場合の表示方法を定めている。また鉛フリーの定義について、同協会では「鉛フリー化すべき所定の部位の鉛含有率を0.1mass%未満とする」としている。

このほか自動車業界では、EUの使用済み自動車に関する指令による重金属4物質(鉛、六価クロム、水銀、カドミウム)の使用制限が、2003年7月から段階的に始まっている。日本では、自動車リサイクル時にシュレッダーダストに混入する有害物質を削減

■(社)自動車工業会における新型車の「環境負荷物質削減目標(四輪車)」

鉛削減目標は、1996年レベルの10分の1以下となっている。

削減物質	四輪車(自動車リサイクル法対象車両)の目標	備考
鉛	2006年1月以降:10分の1以下(1996年比)ただし大型商用車(バスを含む)は4分の1以下とする	(1)削減の基準は、従来通り、1996年の1台当たりの鉛使用量代表値である1,850kgとする。したがって、2006年の10分の1以下は185kg以下とする (2)バッテリーは除く
水銀	自動車リサイクル法施行時点以降:以下を除き使用禁止 <交通安全上必須な部品の極微量使用を除外する> ・ナビゲーション等の液晶ディスプレイ ・コンビネーションメータ ・ディスチャージヘッドランプ ・室内蛍光灯	・除外部品(極微量に含有)も、代替技術の積極的な開発を行う
六価クロム	2008年1月以降:使用禁止	・ボルト等の安全部品で長期使用のための防錆処理に含有
カドミウム	2008年1月以降:使用禁止	・電気、電子部品(ICチップ等)で、極微量に含有

するべく、(社)日本自動車工業会が「環境負荷物質削減目標」を定め、自動車メーカーが使用量削減を進めている。

このような動きに対応し、材料を供給する鉄鋼メーカーでも鉛を使用しない製品の開発に取り組んでいる。鉄鋼材料・製品と深いかかわりがある塗料、はんだなどでも、鉛が使用されているが、鉄鋼材料にとって鉛は添加元素の1つである。生産現場においても、鉛を含んだ鋼種の製鋼や鉛を含んだ鉄鋼材料の切削加工などの工程において鉛ヒュームが発生する可能性があり、労働環境保全の面でも鉛フリー化を望む声がある。

被削性を向上させる鉛の働き

材料に鉛を使用した代表的な鉄鋼材料が快削鋼である。快削鋼とは、鉛、硫黄、カルシウムなどの成分を添加し、切削性能を向上させた特殊鋼である。現在日本国内では、快削鋼が年間約100万t生産されているが、そのうち50%以上が鉛快削鋼だと言われている。

「快削鋼」という名称はいかにも切削加工しやすい印象を与えてくれるが、そもそも「快く削る(切削する)」とはどういうことだろうか。

切削加工とは、「刃物(切削工具)を加工作物に当てて動かし、その内部に局所的に発生する大きな応力で破断を起させることによって、不要部分を切りくずとして分離し、所望の形状の新表面を持った製品を作ること」と定義されている(「切削加工論」中山一雄、1978)。そして、材料において「切削加工のしやすさ」を示す特性は、一般に「被削性」と呼ばれている。被削性を左

右する要素には、単位時間当たりの切削量の大きさ、工具寿命の長さ、仕上げ面の精度(粗さ)、切り屑の処理しやすさ、などが挙げられる。

たとえば自動車のクランクシャフトなどの部品の場合、材料の被削性が高ければ生産性が向上し切削加工費が節減できるため、大きな利点となる。また切削加工後の仕上げ面の精度が向上すれば、仕上げ工程の工数削減が図れる。また、自動化した切削加工ラインにおいて、切り屑が長くつながって工具に絡みつき生産効率が低下することは大きな問題であり、切り屑の処理性にすぐれていることが必要となる。快削鋼は、このような特性にすぐれた特殊鋼であり、その代表格が鉛快削鋼である。

鉛快削鋼が被削性にすぐれている理由は、いくつか挙げられる。1つには、鉛快削鋼の鋼中の鉛の粒子が母材である鋼より弾性係数が低いため、鉛の粒子の周囲に外力による応力集中が生じやすく、切削抵抗低減や切り屑の分断性が高まるから

である。また切削加工中に材料の温度が上がり、鉛の融点(327℃)以上に熱せられると、工具と切り屑の間にあって鉛は潤滑材の役割を果たし、摩擦抵抗を下げる作用をする。同様に温度が上がったとき、鋼中の鉛が溶融することにより、被削材のせん断強度を下げる。このような理由から、鉛快削鋼は、被削性の要素の中でも、切り屑処理性やドリルなどの工具寿命を長くする効果が大きいといわれている。

硫黄を活用した快削鋼の開発

現在使用されている快削鋼は、大きく2種類に分類される。

1つは、機械的特性に重点を置いた機械構造用快削鋼であり、自動車部品などに多く使用されている。機械構造用快削鋼は、部品として求められる機械的特性(靱性、疲労特性など)を満足することが重要である。それに加えて、被削性を向上させるという目的で鉛や硫黄が添加されている。日本では、昭和40年ごろ二輪車や四輪車の生産が増加したことがきっかけとなり、部品の材料として機械構造用快削鋼の需要が増加した。

2つ目は、被削性に重点をおいた低炭素硫黄および硫黄複合快削鋼であり、代表的なものにAISI12L14、JISではSUM23などがある。ナットや口金などの電気部品などに使用される。成分としては鉛と硫黄が添加されている。鉛快削鋼に関する研究は、1900年代前半に米国及びヨーロッパで本格化している。すでに量産されていた硫黄快削鋼の被削性をさらに向上させるため、鉛と硫黄を複合した快削鋼の開発が進んでいった。

快削鋼の鉛使用量を低減しても鉛快削鋼に匹敵する被削性が発揮されるために、有望な被削性向上元素と目されているのが硫黄である。

硫黄複合快削鋼の金属組織では、鋼中にあるマンガンと硫黄による硫化マンガン系の介在物が分散して存在する。被削性が向上する理由は、切り屑せん断域における硫化マンガンの応力集中源としての作用と、工具と切り屑の間の潤滑作用によると考えられている。しかし鉛快削鋼に見られるような溶融金属脆化の効果はないため、鉛快削鋼と同等の切り屑処理性を得るのは難しい。硫化マンガン系介在物は、圧延、引抜きなどの加工時に加工方向に長く変形する。そのため、加工方向とその直角方向とで、機械的性質が異なるという、材質の異方性が大きくなる難点がある。そこでこれまで、硫化マンガンの形状やサイズを最適にコントロールする試みが多く行われている。

一例として、硫化物のサイズを大型化することにより、被削性を向上させた快削鋼がある。これは従来の硫黄複合快削鋼(JIS

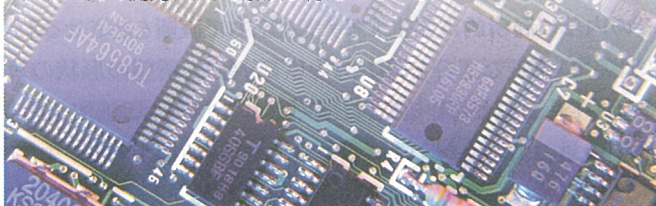
日本がリードする鉛フリーはんだ

EUのRoHS指令を始め、日本のJ-Moss、アジア諸国におけるRoHS相当規制の検討、アメリカの鉛含有はんだに関する規制検討などの動きを受け、はんだ材料の鉛フリー化は急速に進んでいる。日本の電子機器メーカーは世界に先駆けて鉛フリーはんだの使用を進めている。

はんだは、電子・電気機器において、プリント配線基盤への電子部品の実装や、電子部品内の配線などに広く使用されている。はんだはすずと鉛の合金であり、電子機器の廃棄・リサイクル時に除去できないことから大きな問題となっていた。

そこでこれまで、NEDOによる「鉛フリーはんだ規格等研究開発」(1999~2000年度)を始め、その後の経済産業省のプロジェクトなどが実施され、技術課題の研究や標準化に向けた活動が進められてきた。

これまでの研究を通じて、鉛フリーはんだとしてはすず・銀・銅系、すず・亜鉛系、すず・ビスマス系などが有望視されている。しかし実用化における技術課題はいくつかあり、たとえば鉛フリーはんだは時間経過とともにひげ状の結晶(ウィスカ)が発生し隣のピンと短絡する問題や、温度に敏感な電解コンデンサやマイクロプロセッサ(MPU)などの電子部品に適した低温鉛フリーはんだの開発、などの解決が待たれている。



SUM24L)をベースとし、鉛を使用せず、硫黄の添加量を増量し、さらにクロムを添加し、硫化物系介在物(クロム-マンガン-硫黄)を生成させたものである。硫化物のサイズおよび分布を制御することにより、硫化物を大型化させ、同時に微細硫化物数の増加、組織の微細化に成功した。これにより被削性を大幅に向上させ、すでにプリンタ及びコピー機用トナーカートリッジシャフト用材料として採用されている。

新しい被削性向上物質の検討

従来は使用されていなかった被削性物質を使用して、鉛快削鋼と同等の被削性を確保しようとする試みも進んでいる。その一例が、六方晶窒化ホウ素である。

被削性を高める物質として黒鉛は古くから知られているが、鋼中の炭素量に影響を及ぼすことからあまり使用されていない。

六方晶窒化ホウ素は、黒鉛に似た結晶構造と物理的性質をもつ物質である。そこで、機械構造用鋼の鋼中に微量のホウ素と窒素を添加して、六方晶窒化ホウ素を晶出させ、均一に分散させた快削鋼が開発されている。この開発鋼では、鉛快削鋼と同等以上の被削性を発揮することに成功している。

ステンレス鋼においても、被削性向上のニーズは大きい。従来のステンレス鋼(とくにオーステナイト系)は加工硬化を起こしやすく、被削性が比較的劣るため、これまで鉛を添加して被削性を向上させ、主に耐食性を要求される精密機器部品などに多く使用されてきた。鉛を使用しない手法としては、硫黄の添加が一般的だったが、硫黄を添加した快削ステンレス鋼には耐食性、冷間加工性、磁気特性が劣るという欠点があった。そこで、硫黄以外の成分として、チタン炭硫化物などを添加した快削ステンレス鋼が開発されている。

さらに、硫黄も鉛も含まない快削ステンレス鋼として、六方晶窒化ホウ素を使用する研究が進められている。オーステナイト系

■鉛フリー快削鋼の開発例

硫化物サイズ・分布を制御した硫黄複合快削鋼

硫化物系介在物(クロム-マンガン-硫黄)の大型化と微細硫化物数の増加、さらに微細組織を制御することにより、被削性を向上している。OA機器メーカーのプリンタ及びコピー機用トナーカートリッジシャフトに、鉛フリー快削鋼として世界で初めて採用された。



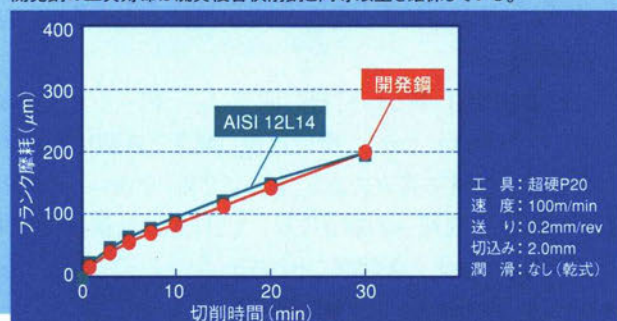
トナーカートリッジ用シャフトの例



開発鋼(左)の硫化物は硫黄複合快削鋼(右)に比べ大型化している。

●工具寿命(旋削)

開発鋼の工具寿命は硫黄複合快削鋼と同等以上を確保している。



六方晶窒化ホウ素を添加した機械構造用快削鋼

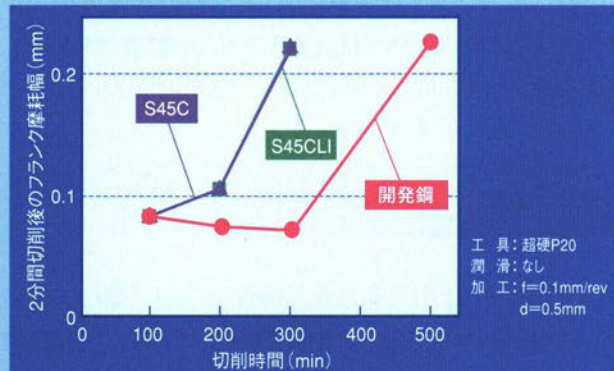
鋼中にホウ素が単独で存在すると焼入れ性が高まるため、これを防ぐようにホウ素と窒素の添加量を調整し、ホウ素と窒素の大部分が窒化ホウ素非金属介在物として存在する組織が得られた。これにより、低速のドリル加工から超硬工具での高速切削までの広い範囲で、鉛快削鋼と同等以上の被削性を有することがわかった。



モーターシャフト(左)とホース口金部品(右)の例

●旋削工具摩耗(超硬工具)

旋削工具摩耗ではとくに300m/min以上の高速ですぐれた被削性を示している。

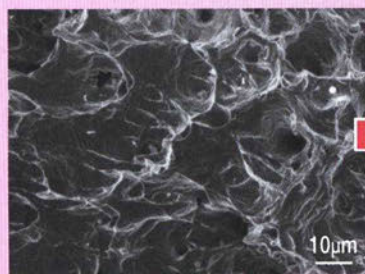


資料提供: JFE 条鋼(株)

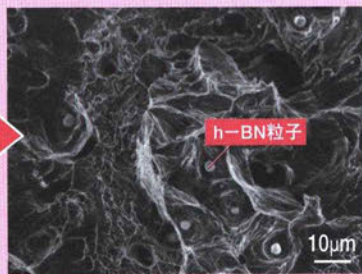
オーステナイト系ステンレス鋼の被削性を大幅に向上した快削ステンレス鋼

一般にオーステナイト系ステンレス鋼は被削性が劣るといわれているが、六方晶窒化ホウ素を添加して、被削性を大幅に高めたステンレス鋼の開発が進められている。

(独)物質・材料研究機構では、オーステナイト系ステンレス鋼にホウ素と窒素を添加してインゴットを製造し、これを熱間加工して素材とした後、1,250℃、0.5h保持後冷却の固溶熱処理を行い、さらに1,050℃、1h保持後冷却の析出熱処理を行うことにより、六方晶窒化ホウ素を析出、分散させた。これにより高速切削時の切削抵抗が従来より20%以上小さい快削ステンレス鋼の製造に成功した。



1,250℃、0.5hで固溶熱処理



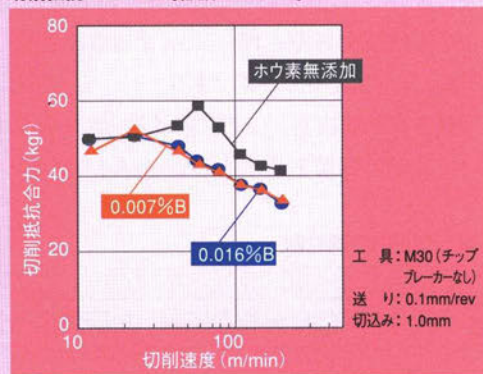
1,050℃、1hの析出熱処理後の粒子。球形の六方晶窒化ホウ素粒子が、破断面全面にわたり析出している。

六方晶窒化ホウ素はきれいな球状となり、組織内に均一に分布している。このため材料の機械的性質は異方性を示さない。また硫黄を添加しないので、ステンレス鋼の最大の特徴である耐食性が劣化することがない、通常のステンレス鋼製造法と同じ設備とほとんど同じ工程で製造可能、六方晶窒化ホウ素は高融点のため鉛快削ステンレス鋼のように使用温度の制限がない、などの特徴がある。

このように鉛フリー化に加え多くの特長が期待できることから、今後実用化に向けた研究が進むことが期待される。

●開発材の被削性

棒材の旋削試験において、ホウ素増量により高切削速度では切削抵抗が20～25%低減されている。



(資料提供: (独)物質・材料研究機構)

ステンレス鋼にホウ素 (0～0.016mass%) と窒素 (0.18～0.20mass%) を含むインゴットをあらかじめ製造し、これを高温で固溶させてから、次に焼戻し熱処理を行うことにより、ステンレス鋼中に六方晶窒化ホウ素が均一に分散することがわかった。この方法では、六方晶窒化ホウ素の形状は球形に近く、硫化マンガンのような針状でないため、材料の機械的性質が異方性を示さないという特徴がある。この材料では、切削速度が高い (200m/min程度) 場合には、切削抵抗が20%以上低減した。この材料は研究室レベルながらきわめてすぐれた性能が確認されており、従来のステンレス鋼製造工程に熱処理を1回追加するだけで製造できるため、今後実用化レベルに向けた研究が進むことが期待される。

今後予想される規制強化への対応

ここまで見てきたように、鉛は有害物質として広く知られるようになり、鉄鋼を含めた材料の研究開発において、鉛フリー化は環境対応技術の一つとして取り上げられるようになった。しかしながら、鉛フリー化した材料は、一部の電気製品などを除いて、あま

り実用化が進んでいないのが現状である。

その背景として、現在の一部の製品群であれば、現行規制の使用削減目標がクリアできることが挙げられる。前述したEUのRoHS指令では「鉛の使用禁止」が謳われているものの、現在の適用除外項目として「合金成分として、鋼材に含まれる0.35重量%以下の鉛」は規制を受けないことになっている。一方、JISでは硫黄複合快削鋼の鉛成分量は0.10～0.35%程度であり、現状のままでもRoHS指令の適用除外範囲となっている。現在鉛を使用している部品から鉛を削減することにより、電気機器や自動車の機能が低下したり、別のリスクが発生してはいけないということもあり、今後も規制内容の検討が続けられると思われる。いずれにせよ将来的には現在よりさらに厳しい基準となることが予想される。

これまでにない新しい材料の開発は、一朝一夕に成果が現れるものではない。しかし、環境対策に関する鉄鋼技術で、日本は世界をリードする存在である。鉛をはじめ、今後いっそう厳格なる有害物質削減への動きに対して、日本の鉄鋼技術の果たす役割はますます大きくなることだろう。

●取材協力 JFE条鋼 (株)

●文 杉山香里