

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.33 (2001) No.2

環境対応鋼材特集号

川崎製鉄における環境調和型鋼材の開発

Development of Environmentally Harmonized Products in Kawasaki Steel

小原 隆史(Takashi Obara) 山下 孝子(Takako Yamashita)

要旨：

川崎製鉄における環境調和型鋼材の研究開発の姿勢について、各製品分野ごとにその概略を紹介する。21世紀を迎えて、すべての企業において地球環境問題に対してどう取り組むかが大きな課題となっている。従来から、川崎製鉄は鉄鋼製造に際して、(1) 省エネルギー、(2) 資源のリサイクルを積極的に進めてきた。また、近年においては、(1) 省エネルギー・二酸化炭素発生削減、(2) リサイクル・廃棄物削減、(3) 有害な物質の発生、使用を抑制する環境保全の3つの観点から、鉄鋼製品開発を通じて地球環境の改善に寄与できるよう努力している。

Synopsis：

This paper describes the research and development of environmentally harmonized steel products. Dealing with environmental problems is one of the biggest issues facing corporate businesses in the 21st century. Kawasaki Steel has vigorously been promoting both (1) energy conservation and (2) recycling of resources, through its steel production processes. In recent years, Kawasaki Steel has been engaged in developing steel products effective to the following three environmental issues; (1) energy conservation and reduction of CO₂ emissions, (2) recycling and reduction of wastes, and (3) environmental protection.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Environmentally Harmonized Products
in Kawasaki Steel



小原 隆史
Takashi Obara
技術研究所 副所長・
工博



山下 孝子
Takako Yamashita
技術研究所 主任研究
員(課長補)・工博

要旨

川崎製鉄における環境調和型鋼材の研究開発の姿勢について、各製品分野ごとにその概略を紹介する。21世紀を迎えて、すべての企業において地球環境問題に対してどう取り組むかが大きな課題となっている。従来から、川崎製鉄は鉄鋼製造に際して、(1)省エネルギー、(2)資源のリサイクルを積極的に進めてきた。また、近年においては、(1)省エネルギー・二酸化炭素発生削減、(2)リサイクル・廃棄物削減、(3)有害な物質の発生、使用を抑制する環境保全の3つの観点から、鉄鋼製品開発を通じて地球環境の改善に寄与できるよう努力している。

Synopsis:

This paper describes the research and development of environmentally harmonized steel products. Dealing with environmental problems is one of the biggest issues facing corporate businesses in the 21st century. Kawasaki Steel has vigorously been promoting both (1) energy conservation and (2) recycling of resources, through its steel production processes. In recent years, Kawasaki Steel has been engaged in developing steel products effective to the following three environmental issues; (1) energy conservation and reduction of CO₂ emissions, (2) recycling and reduction of wastes, and (3) environmental protection.

1 緒 言

地球環境保持は、近年、極めて深刻かつ重要な問題となっている。鉄鋼業は日本のエネルギー消費の約1割を使用し、かつ鋼材も物質総生産量の約1割を占めており¹⁾、環境問題への対処は鉄鋼業にとって重要な課題である。川崎製鉄でも、環境対応を企業活動における重要な課題と位置付けて種々の取り組みを行っている。

川崎製鉄における地球環境問題への取り組みの概念図を Fig. 1 に示す²⁾。川崎製鉄では、まず、事業活動の全段階で環境負荷・エネルギー消費を低減する努力を継続している。さらに、廃棄物を地域社会から受け入れ再資源化する、循環型社会構築への取り組みも積極的に行っている。

従来から、鉄はそのリサイクル性の良さおよび全製造エネルギーコストの低さから優秀なエコマテリアルであることが知られており、さらなる環境負荷軽減に向けて、鉄鋼製品の果たす役割への期待も増大している。

林ら³⁾によれば、製品の軽量化、長寿命化などに資する自動車用・建設用高張力鋼板、ボイラー用耐熱鋼管、飲料缶用薄板など11品種の高機能化鋼材(年間使用量650万t)が使用されていることによって、日本鉄鋼業の全消費エネルギーの10%(重油換算で

年間500万kl以上)に相当するエネルギー節約が達成されていると推定されている。これら高機能鋼材が最大限普及すれば、さらに7%(重油換算にして年間380万kl)のエネルギー節約が可能になり、強さ、靱性などの品質特性が向上すれば、追加的に7%(年間350万kl)以上のエネルギー節約が可能であると推定されている³⁾。したがって、高機能化鋼材の普及がもたらす省エネルギーや二酸化炭素の排出抑制効果は非常に大きく、その推進の重要性が増している。

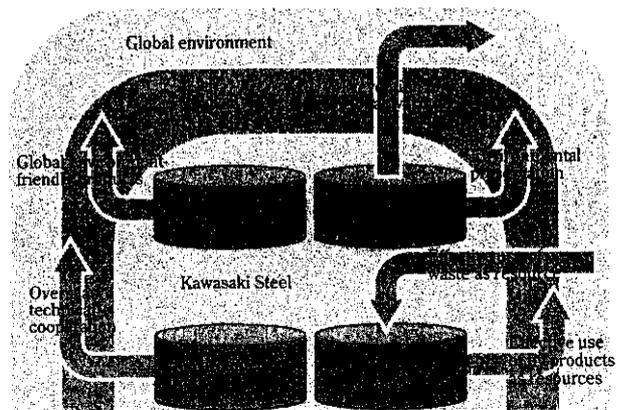


Fig. 1 Basic policy for preservation of the global environment in Kawasaki Steel

*平成13年3月13日原稿受付

る。

このような社会の要求に応えるため、すでに川崎製鉄では数多くの新しい環境負荷低減型鉄鋼製品を開発して提供している。

本報告では、このような取り組みの中から、代表的開発例の概略を紹介する。その詳細についてはすでに他に発表済みであるので、引用文献を参照していただきたい。

2 川崎製鉄の環境対応鋼材

素材としての鋼材への要求は、(1) 使用状況まで考慮したトータルコストの低減、(2) 強度、加工性、寿命の延長などの特性の向上、(3) 加工、リサイクル、リユースへの適正、(4) 有害元素の減少などにある。さらに追加すべき最近の製品開発の特徴は、環境調和を考慮するという社会ニーズへの対応が必要になってきたことである。

環境調和策は (1) 省エネルギー・二酸化炭素削減、(2) リサイクル・廃棄物削減、(3) 環境保全の3つに大別される。省エネルギー化の観点からは、磁気特性向上によるモータのエネルギー変換効率向上に資する鋼材、自動車軽量化によるエネルギー効率向上に資する鋼材、および製造工程とユーザーでの製造工程でエネルギー使用原単位の少ない鋼材などがある。リサイクル性の観点からは、メンテナンスが容易で長期間安全に使用できる鋼材および再生過程で制御が容易な合金元素のみを含む鋼材などがある。最近当社が開発した製品例を、環境調和対策および需要分野ごとに Fig. 2 に示す。また、上記技術が諸学協会から表彰された例として、最近の5年間に日本金属学会技術開発賞を受賞した新技術、新製品を次に示す。

- (1) 2000年
「一定マイクロ組織制御と析出強化を統合した新しい鋼材製造思想 (TCP) の構築とそれによる非調質型新高強度鋼の開発」
「耐ヒートクラック性に優れた炭化物強化型遠心铸造製ハイスロールの開発」
- (2) 1999年
「Fine Inclusion Metallurgy を導入した第3世代の TMCP 法による高耐震性極厚 H 形鋼の開発」
- (3) 1998年
「疲労強度と加工性に優れたハイブリッド強化型自動車ホイール用複合組織鋼板の開発」
- (4) 1997年
「熱間潤滑圧延技術の適用による超高 r 値冷延鋼板の開発」
「製缶特性に優れた窒素固溶強化型の極薄缶用鋼板の開発」
「高効率モータ用無方向性電磁鋼板 (50RMA350) の開発」
- (5) 1996年「自動車用衝撃吸収高張力鋼板の開発」
「耐食性・高加工性フェライト系ステンレス鋼 (River Lite SX-1) の開発」
「CBR 成形ミルによる高品質・高加工性電線鋼管のフレキシブル高生産技術の開発」

このように、環境調和型鋼材の開発に注力している結果として、それらの製品は顧客から高い評価を受けており、その使用量が増加している。

製品分野ごとにそれぞれの改善した特性と着目した要素技術を紹介する。

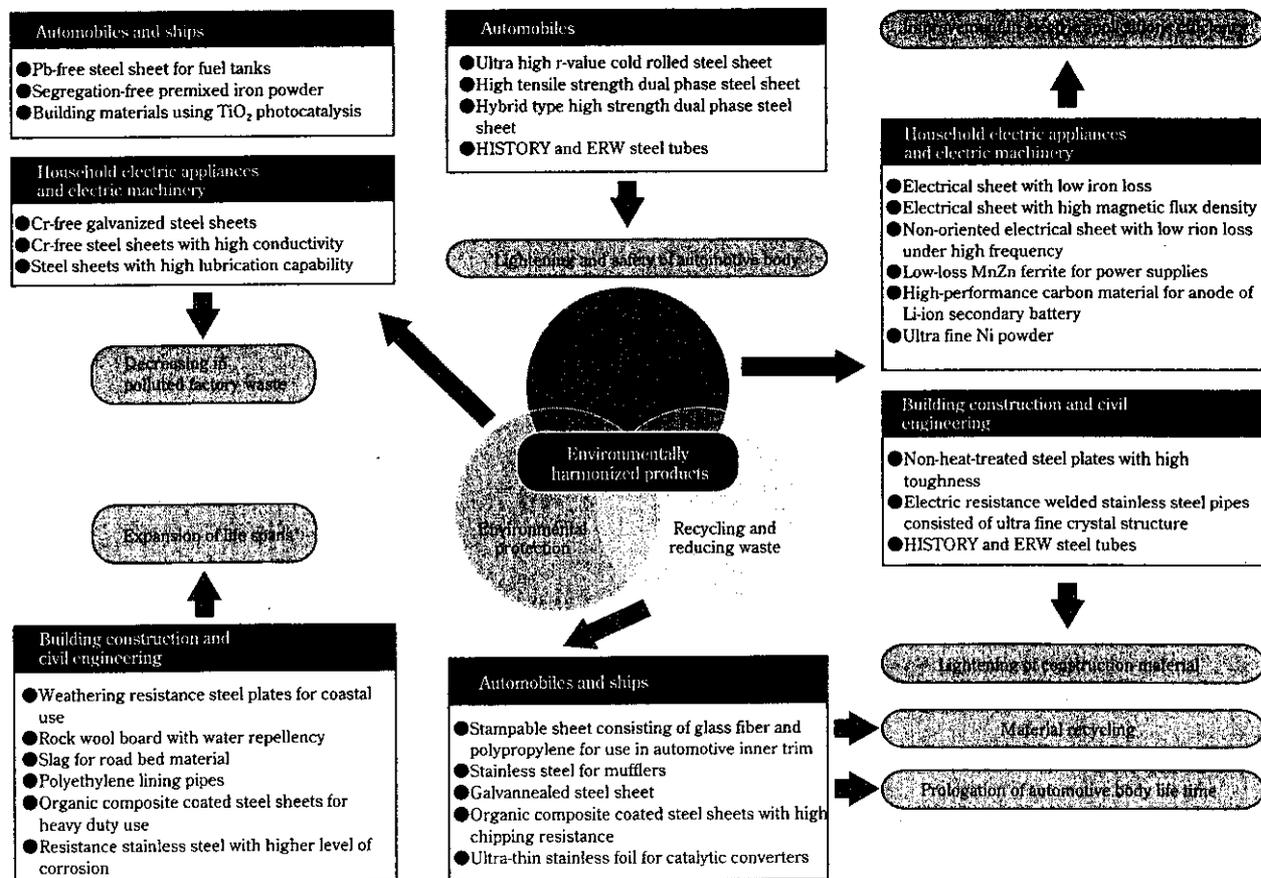


Fig. 2 Environmentally harmonized products developed recently at Kawasaki Steel

3 各分野における環境対応鋼材開発の概要

3.1 自動車用薄鋼板

自動車分野における環境対応への最大の課題は、車体軽量化による省エネルギーである。近年、鋼板を高強度化することによって部材の強度を向上させると同時に鋼板板厚を減少させて軽量化を図ることが可能となっており、自動車車体への高強度鋼板の適用による軽量化と衝突安全性向上の相反する特性の両立が検討されている。

鋼板を高強度化すると、プレス成形時のしわの発生や材料の破断、スプリングバック、反りによる成形形状の凍結不良などが発生しやすくなる。一般に鋼板を高強度化するための手段としては、固溶強化、析出強化、結晶粒微細化による強化、マルテンサイト相やベイナイト相とフェライト相の複合相にする変態強化、および加工強化がある。プレス成形性の代表的な指標である引張り試験における全伸びと、これらの強化機構を用いた高強度鋼板との関係を Fig. 3 に示す⁴⁾。いずれの強化機構においても鋼板の引張強さ (TS) が高くなると全伸び (EI) が低下する。すなわち、強度を向上することによる伸びの低下をいかに低減できるかが素材開発におけるポイントとなるが、図より、変態強化した鋼板は他の強化機構のものよりも

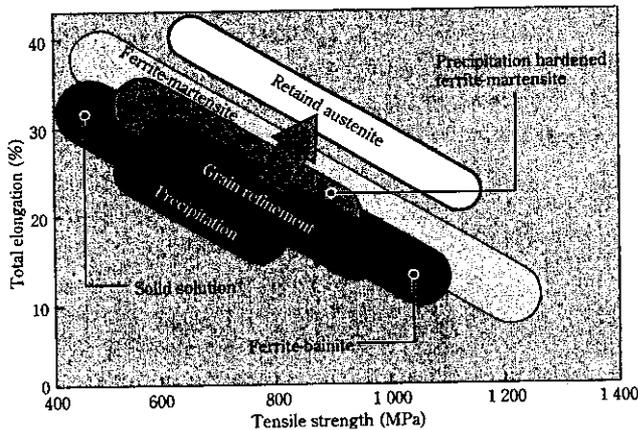


Fig. 3 Relationship between tensile strength and elongation of high strength steels

全伸びが向上することがわかる。特に良好な全伸び値を示すのは、仕上げ圧延後の高精度冷却制御技術を適用することにより残留オーステナイト相からの歪み誘起マルテンサイト変態を利用した鋼板であり、張り出し成形が主体的である部位へ適用されつつあり。

一方、高強度鋼板のプレス成形時に要求されるもう一つの特性として穴広げ性がある。Fig. 4 に、強度 590 MPa 級の高強度鋼板における前述の強化機構ごとの強度×伸びと強度×穴広げ率 (λ) の関係を模式的に示す。一般に、穴広げ性は均一な硬度を有する組織で形成される鋼板が良好であることが知られており、母相を析出強化した鋼板が有効である⁵⁾。最近の研究では、結晶粒を微細化することにより伸びを損なわずに穴広げ性を改善できることが明らかとなっており⁶⁾、強度および高い穴広げ性が必要な部材への適用が期待される。また、強度部材は衝突エネルギーの吸収能が大きいことが要求されるが、応力-歪み曲線のしめる面積が大きい鋼板ほど高速変形時の吸収能が大きいと考えられる。そのためには、 n 値が高い、TS が高い、加工硬化能が高い鋼板が要求される。

このように、自動車車体の軽量化を推進するには高強度鋼板の適用拡大が必須であり、それには高強度鋼板の組織を相変態など金属学的理論を駆使して制御し、さらに、微細化技術を活用することによって部材に必要な特性を得ることと、それらを組み合わせて利用する技術が必要である。最近では、自動車構造部材の高速変形特性の有限要素法による解析を始めとする成形部材の解析および、プレス成形性の解析への計算機シミュレーションの適用も積極的に行われている⁷⁾。

3.2 ステンレス鋼板

自動車車体において、その重量の多くを占めるのがエンジンである。エンジンはその排気ガスを含めて非常に高温になるために、エンジンまわりの部材には耐熱疲労性の良好な焼結材が使用されることが多かった。一般的に耐熱疲労性がよい鋼材としては、従来からステンレス鋼板が知られているが、合金元素の添加量が多いために加工性に乏しく、その用途は大型の圧力容器などに限られていた。しかし、ステンレス鋼板は高い耐食性を持つ優れたライフサイクルコストの素材であるため、Fig. 5 に示すように製品の寿命延長という観点で、さらに利用が拡大されるべき素材である。したがって、より高い耐食性を追求する一方で、ステンレス鋼板の加工性の改善を行うことによって適用範囲の拡大をもたらすと考えられる。そこで、集合組織を制御することにより r 値の良好な耐熱性ステンレス

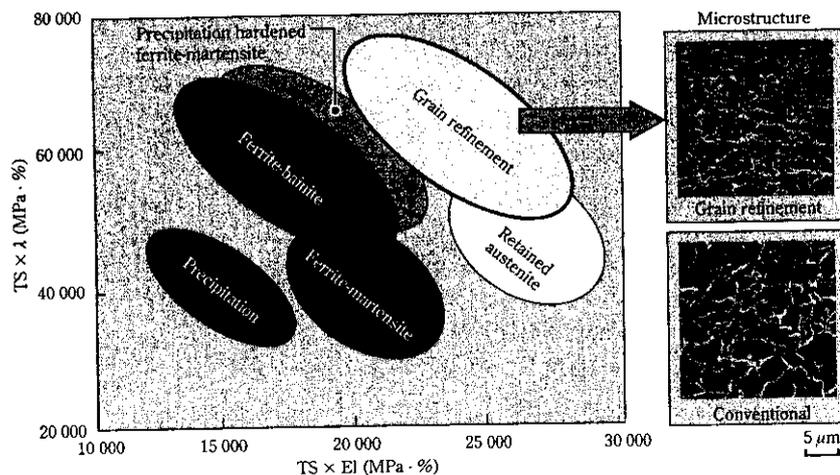


Fig. 4 Relationship between tensile strength × elongation and tensile strength × hole expanding of 590 MPa TS grade steels

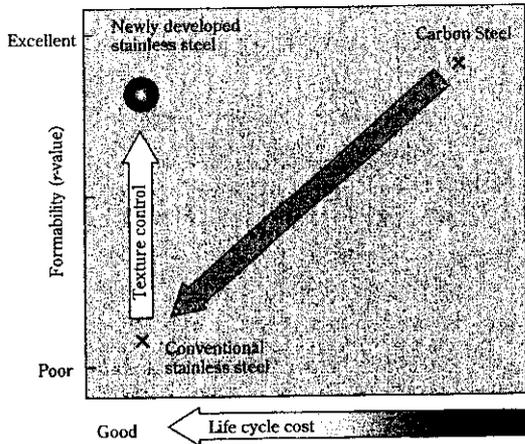


Fig. 5 Relationship between life cycle cost and r -value of carbon steel and stainless steel

鋼板を開発し、エキゾーストマニフォールドに適用した。これにより部品の薄肉化が図れ、軽量化と同時に低熱容量化を達成することが可能となる⁹⁾。

一方、エキゾーストマニホールド素材を電縫管で提供することも可能である。造管時の付加的成形歪みを低減して高い2次加工性を得るとともに、厳しい2次加工に耐える溶接品質を確保し、造管後の熱処理を省略して製造コスト削減を図ることのできる CBR (change free bulge roll) 成形ミルを開発し実用化した⁹⁾。さらに、高強度で加工性に優れた鋼管のニーズに応えるべく HISTORY (high speed tube welding and optimum reducing technology) 鋼管が開発さ

れた¹⁰⁾。HISTORY 鋼管は、温間域で大きな圧延歪みを受けるために組織が微細化し、前述の組織微細化効果により延性が著しく向上するものである。すなわち、川崎製鉄はより高い加工性が得られる素材を開発すると同時に、プロセス改良による鋼板の特性改善も積極的に進めている。

また、マフラー用ステンレス鋼板は加工性、溶接性のみならず NH_4^+ 、 Cl^- を含んだ腐食性の高い凝集水（排気ガスの結露水）による穴あき腐食に対抗するために優れた耐食性が要求される。凝集水腐食機構の解明に取り組み、腐食促進のメカニズムを明らかにする¹¹⁾と同時に穴あき腐食には Cr と Mo が有効であることを見だし、18%Cr 鋼に Mo を添加した高耐食性のマフラー材を開発した¹²⁾。これによりマフラーの穴あきが減少し、穴あきによる騒音・排気ガスの漏れ防止に貢献したほか、自動車車体の寿命延長にも役立っている。

上述のステンレス鋼板開発のコンセプトは、建材用あるいはラインパイプ用ステンレス鋼の開発においても同様であり、使用環境に応じた優れた耐食性を得ることによって建物の寿命を延長すること、同時に加工性を向上させることを主眼において研究開発が行われている。

3.3 電磁鋼板

電磁鋼板は発電機、電動機、変圧器など多くの電力の供給・変換システムの鉄心に使用される機能材料である。したがって、これらの機器の効率を高めることは使用電力の低減に大きく寄与し、地球温暖化防止などに貢献できる。電磁鋼板に必要な特性は、高磁束密度および低鉄損の2点であり、環境対応の観点からも、これらの目標は変わらない。まず、無方向性電磁鋼板の分野で、現在注

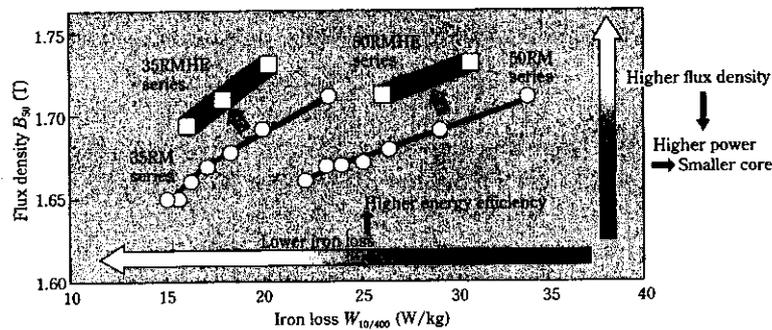


Fig. 6 Iron loss at 1.0 T, 400 Hz and flux density at 5000 A/m of RM and RMHE series

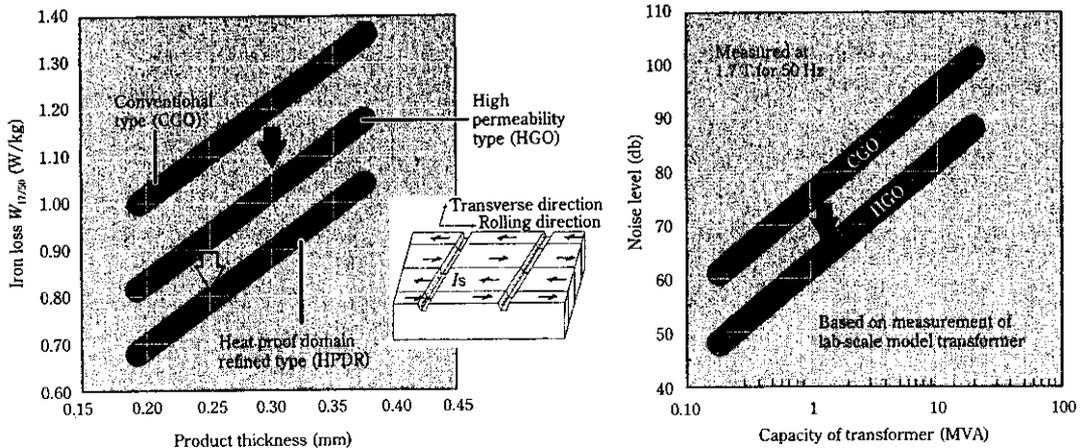


Fig. 7 Grain-oriented electrical steel saves energy by improving iron loss of transformers

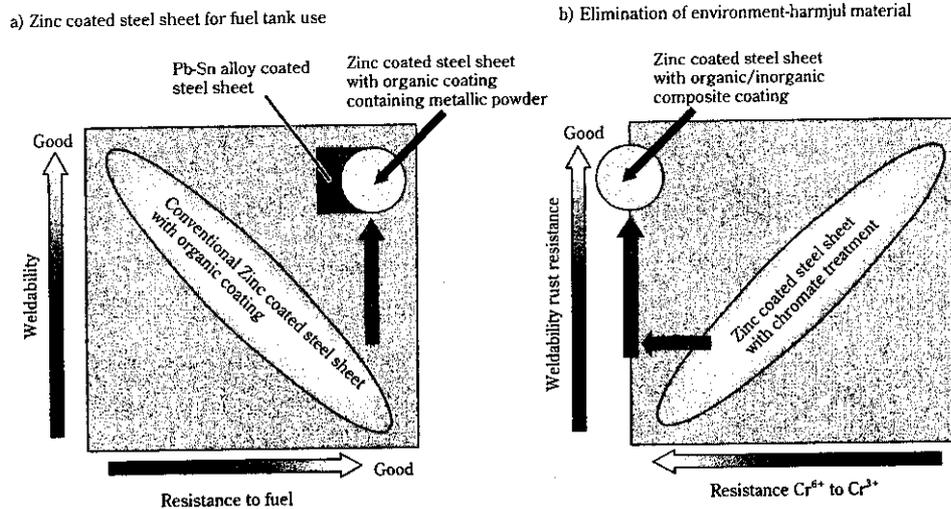


Fig. 8 Relationship between weldability and resistance to fuel (a), and white rust resistance and reducing chromium oxide (b) of zinc coated steel sheets

目されているのはモータ効率の向上である。Fig. 6 に示すように、モータのコアとして電磁鋼板を用いる場合、それが高磁束密度であればモータとしてのパワーが大きくなり、コアを小さくすることが可能になる。また、低鉄損であればエネルギーの変換効率が向上し、システム全体のエネルギー消費量を下げることができる。川崎製鉄では、従来から低鉄損・高磁束密度を達成する製品を開発してきたが、これらを両立させる製品として「RMA シリーズ」を、さらに低い鉄損と高透磁率を有する「RMHE シリーズ」を新たに開発した¹⁰。また、高周波数領域で低鉄損を得ることのできる無方向性電磁鋼板の開発も行っている¹⁰。

一方、方向性電磁鋼板は、主に電力輸送の際に電力変換を担う変圧器の鉄心材料として使用されている。この変圧器のエネルギー効率は現状でも約 98% と極めて高いが、電力使用量の多い今日ではわずかな効率改善でも多大な省エネルギー効果が生じるため、一層の低鉄損化が進められている。Fig. 7 に方向性電磁鋼板開発の概要を示す。従来の方向性電磁鋼板 (CGO) は、鋼板厚の低減および結晶方位の高集積化により低い鉄損を得て来た (HGO)。さらに、鋼板表面に多数の溝を形成した磁区細分化により渦電流損の低減を図った HPDR を開発した¹⁰。この製品は、飛躍的な鉄損低減により変圧器の励磁電流および騒音の低減を可能にする。また、HGO は低鉄損と同時に高磁束密度を達成する高級方向性電磁鋼板であり、変換器の騒音防止対策にかかる費用削減にも貢献している^{16,17)}。

3.4 表面処理鋼板

溶融めっきあるいは有機被覆といった表面処理技術は、鉄鋼製品の寿命を延長するばかりか、プレス成形時の潤滑油の省略、塗装省略、洗浄省略などの特殊な機能を付与する目的で幅広く利用されている。特に、近年では、これらの表面処理に有害物質を含まない材料やリサイクルしやすい材料を使用することで環境負荷を低減するよう努力している。

たとえば、Fig. 8 (a) に示すように燃料タンク用材料には優れた耐劣化ガソリン性 (耐酸性) が要求される。耐食性を向上させるためには一般的に厚い有機被膜が必要となるが、被膜を厚くすると溶接性が劣化する。そこで、耐食性と溶接性という相反する特性を同時に満足する製品を開発し、有機被覆中へ金属粉末を分散させる技術を活用して被膜の厚みを低減せずに溶接性を確保することに成功

した¹⁰。この製品は、従来の燃料タンク用材料であるターンシート (Pb-Sn 合金めっき鋼板) にとって代わるものであるため、自動車の最終処分される段階における有害物質の発生の低減にも貢献できる。

同様に、家電製品用の亜鉛めっき鋼板の耐食性向上 (白錆発生防止) にも有機被膜が使用されているが、耐食性確保のためには有機被膜を厚くする必要があり電気伝導性劣化の原因となっていた。これらの材料の電気伝導性劣化を防止するために、非常に優れた耐食性を持つ有機樹脂と無機防錆剤を混合した被膜を開発した。薄い被膜で従来材の耐食性を確保することで耐食性と溶接性を同時に付与することを可能にした。一方、家電製品用亜鉛めっき鋼板は、一般に環境負荷物質である 6 価クロムを含むクロメート処理により有機被膜との密着性を向上させて耐食性を確保している。しかも、Fig. 8 (b) にクロメート付着量と耐食性の関係を模式的に示すが、良好な耐食性を得るためにはクロムの 6 価/3 価の比率を大きくする必要があった。しかし、上述の新規開発被膜は鋼板との密着性良好であるためクロメート処理を施す必要がない。このように、溶接性が良好で、しかも環境負荷物質を使用しない家電製品用鋼板の供給が可能となった¹⁰⁾。

3.5 厚鋼板、条鋼、線材・鋼棒

厚鋼板の主要な用途である溶接構造物は、安全性、環境対応、コスト削減などの要求の中でますます高度化している。近年における厚鋼板開発は、次の 3 点によるトータルコスト削減および環境負荷低減に注力するものである。すなわち、(1) 溶接性を阻害しない高強度化を図ること、(2) 組立時の省工程あるいは溶接時の余熱低減による作業負荷軽減すること、あるいは、(3) 構造物の長寿命化によるメンテナンスコスト削減の 3 点によるトータルコスト削減および環境負荷を低減することである。

中でも極低炭素ベイナイト鋼板は、高強度化にともなう溶接性の劣化を改善するために、TCP (thermo mechanical precipitation control process) を用いた組織一定制御という新しい概念のもとに開発された製品である。この製品は鋼の炭素量を約 0.02 mass% 以下として、圧延により鋼板の組織を比較的高強度のグラニュー・ベイニティック・フェライト単相に制御するものであり、従来製品と同等の強度を有する。その製造プロセスの概略を従来の焼入れ・焼

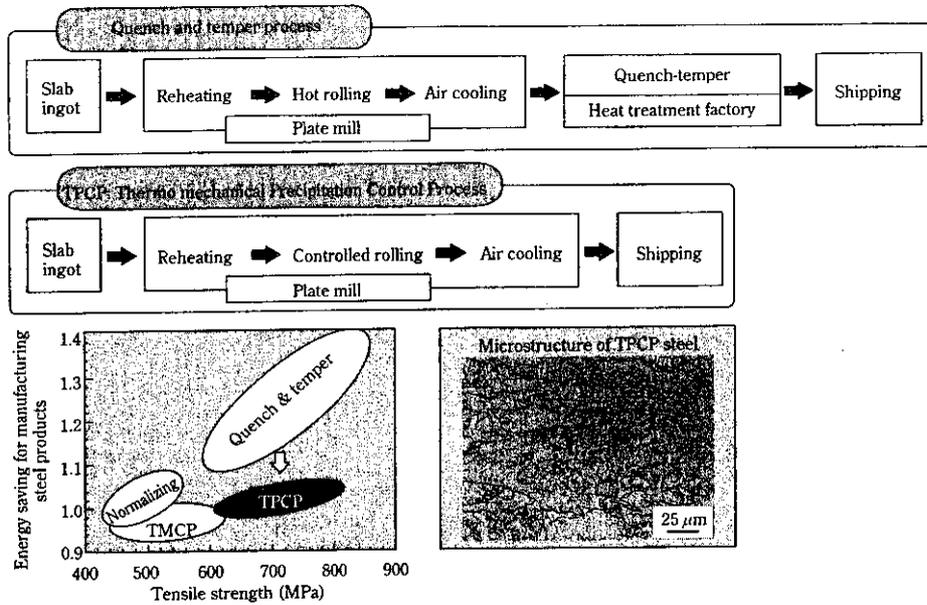


Fig. 9 Outline of TCP and quench and temper process, and the typical properties. The required energy have been calculated on the basis of the NRIM's database for evaluation of LCA and normalized by the value for the normalizing process.

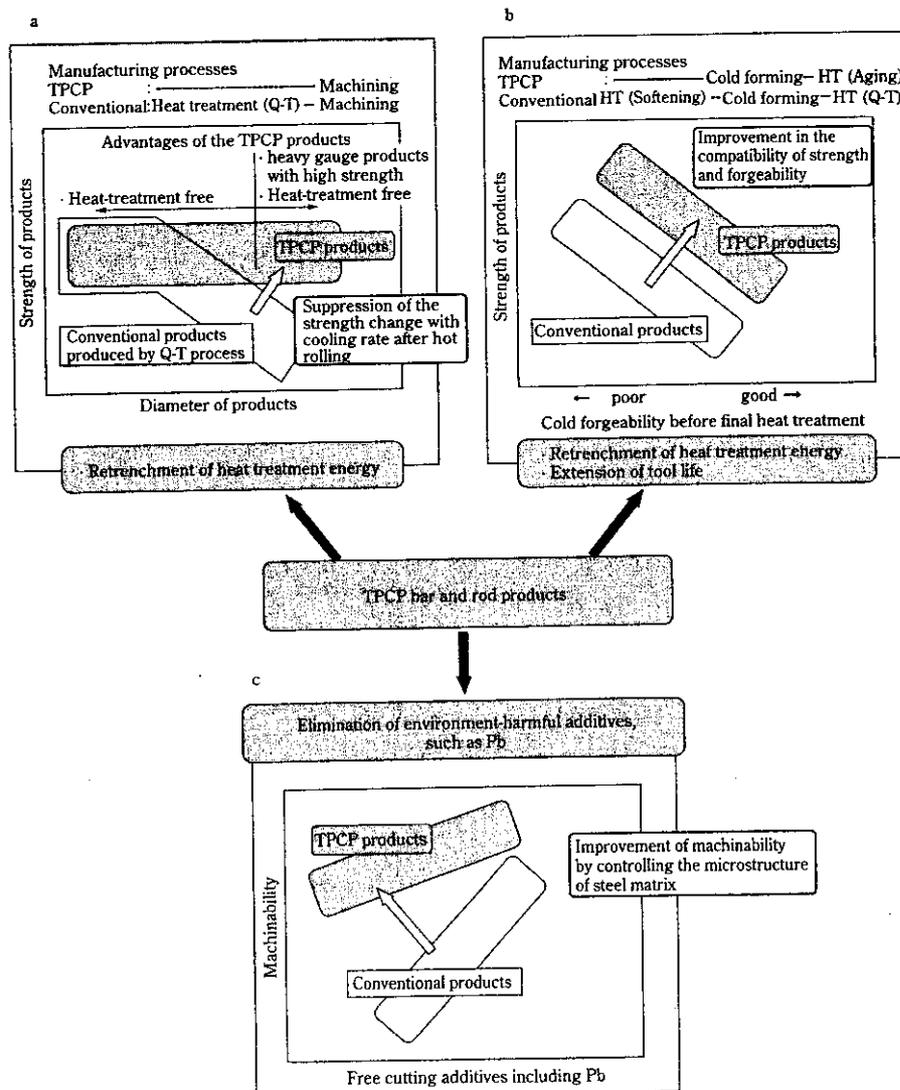


Fig. 10 Effects of TCP at bars and wire rod steels

戻し材と比較して Fig. 9 に示す。図より、焼入れ・焼戻しというプロセス省略による省エネルギーおよび工程省略による製造コスト削減に寄与していることが分かる。さらに、TCP の活用により板厚に関係なく均一なベイニティック・フェライト単相組織が得ることが可能になったために、溶接施工においても完全予熱フリーが可能となった²⁰⁾。

一方、棒鋼・線材として使用される特殊鋼は、顧客で鍛造・機械加工・熱処理などの複雑な 2 次加工処理を経て最終製品となる。このため、環境負荷の低減の観点からは鋼材製造のみならず 2 次加工まで含めて考慮することが必須である。棒鋼・線材の 2 次加工は主に焼鈍、加工、焼入れ、焼戻し工程からなり、省エネルギーのためには工程中の熱処理の省略が効果的である。川崎製鉄では、焼入れ・焼戻し処理の省略ができる各種非調質鋼を開発し、顧客での省エネルギーおよび製造コストの削減に役立っている。棒鋼・線材分野における TCP プロセス活用の概要および製品の特長をまとめて Fig. 10 に示す。図中 (a) は焼入れ・焼戻し処理の省略、(b) は焼鈍し処理の省略による省エネルギーが図られる。(c) は機械構造用鋼の機械加工性改善のために添加される人体に有害な Pb を除去することを目的として、化学組成および熱間圧延条件の最適化により鋼中に黒鉛を微細分散させた機械構造用黒鉛鋼の開発コンセプトを示している。TCP により鋼材製造時の省エネルギーが図られると同時に有害物質を排除できる²¹⁾。

3.6 その他の製品

最後に主な製品分野以外での環境対応鋼材の開発例を示す。近年、TiO₂ の光触媒作用を利用した大気中の NO_x、SO_x の浄化、水処理、化学物質の分解などの研究が注目されている。これらは TiO₂ の活性酸素発生作用による汚染物質の分解、および、超親水性による防汚性によるもので、実用化が検討されている。川崎製鉄では、いち早く光触媒技術に着目し、ガードレールや防音壁などの土木建材やビルの内外装に使用する建築建材を開発した。これらは、自動車の排ガスや工場の排煙の浄化を行い、かつ、ほこりや油脂分、かびが雨水により洗い流されることによるメンテナンスフリーの機能を兼ね備えるものである²²⁾。Fig. 11 に光触媒による大気浄化、抗菌・

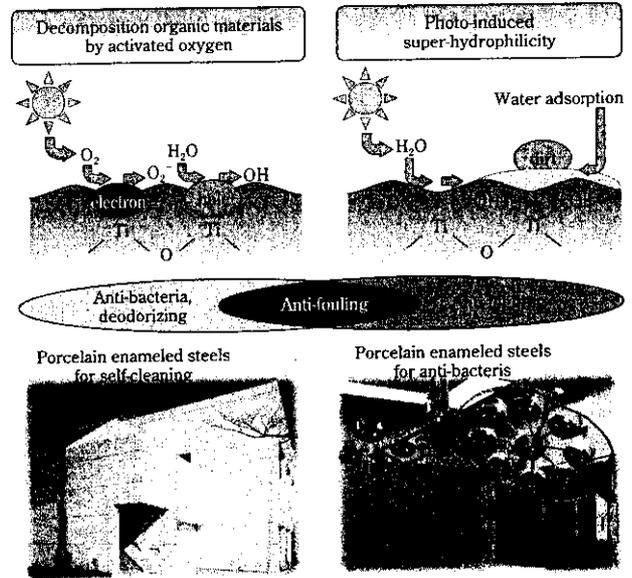


Fig. 11 Building materials using TiO₂ photocatalysis

殺菌作用および防汚作用原理の概略と、珪瑯材に添加して建家の内外装に使用した例を示す。これらは、環境負荷を低減するばかりでなく「環境浄化」を可能にし、鉄鋼製品以外への展開も期待される。

4 結 言

環境負荷の軽減に寄与できる特性、あるいは化学成分を有する新規開発鋼板の代表例を紹介した。

鉄鋼は量、価格、強度、リサイクル性などの面で他の素材を圧倒する優位性を有しており、鉄の可能性、将来性は今後ますます拡大していくと考えられる。

川崎製鉄は社会的要求にしたがって、鉄鋼材料の可能性を最大限に活かした製品群を開発し続け、環境負荷軽減に積極的に寄与していく所存である。

参 考 文 献

- 1) 林 明夫：ふえらむ、2(1997)5, 320
- 2) 川崎製鉄(株)：環境報告書、(2000)
- 3) 林 明夫：第 35 回白石記念講座、「地球環境・地域環境と鉄鋼業」、(社)日本鉄鋼協会、(1998)、61
- 4) 清水哲雄、比良隆明、飯塚栄治：川崎製鉄技報、32(2000)1, 14
- 5) 清水哲雄、青柳信男：川崎製鉄技報、31(1999)3, 185
- 6) 安原英子、坂田 敬、古君 修、古角文雄、菱沼 至：まてりあ、40(2001)1, 82
- 7) 比良隆明、平本治郎、坂田 敬：川崎製鉄技報、33(2001)2, 66
- 8) 宮崎 淳、郡司牧男、馬場幸裕：川崎製鉄技報、33(2001)2, 72
- 9) 豊岡高明、橋本祐二、郡司牧男：川崎製鉄技報、32(2000)1, 49
- 10) 豊岡高明、依藤 章、板谷元晶、西森正徳、河端良和：CAMP-ISIJ、12(1999)2, 302
- 11) 宇城 工、北沢 真、佐藤 進：材料、45(1996)11, 1192

- 12) 宮崎 淳、平澤淳一郎、佐藤 進：川崎製鉄技報、32(2000)1, 32
- 13) 高島 稔、小野智睦、西村恵次：川崎製鉄技報、29(1997)3, 185
- 14) 近藤 修：電気学会講演予稿集、(2000)
- 15) 石田昌善、中野 恒、本田厚人、佐藤圭司：日本応用磁気学会誌、18(1994)、809
- 16) 小松原道郎、日名英治、中野 恒：川崎製鉄技報、29(1997)3, 174
- 17) 黒沢光正、名村夏樹、山田茂雄：川崎製鉄技報、29(1997)3, 174
- 18) 尾形浩行、鈴木幸子、望月一雄：川崎製鉄技報、32(2000)1, 21
- 19) 海野 茂、尾形浩行、加藤千昭：川崎製鉄技報、33(2001)2, 82
- 20) 岡津光浩、林 透、天野慶一：川崎製鉄技報、30(1998)3, 131
- 21) 今村晴幸、天野慶一、笹田幹雄：川崎製鉄技報、32(2000)3, 234
- 22) 川鉄建材(株)：「川建の環境浄化型防音壁(セルフクリア)」、製品カタログ