
顧客ニーズに応える新機能，高機能薄鋼板

Newly Developed Steel Sheet with New and Advanced Functions to Meet Customers's Needs

戸部 俊一(Toshikazu Tobe) 清野 芳一(Yoshikazu Seino)

要旨：

川崎製鉄が顧客のニーズを的確に捉え、タイムリーに開発し、供給してきた新機能および高機能薄鋼板について顧客分野ごとに述べた。これらの鋼板は熱間圧延鋼板，冷間圧延鋼板およびこれらを母材にした表面処理鋼板である。ニーズの多様化にともない相反する特性を満たすという命題が課せられることが多くなったが，既成の概念にとらわれることなく，自由な発想で開発に取り組んできた。今後，地球環境保全という人類共通のニーズに応える薄鋼板を開発し供給してゆくためには，顧客とともに考えることが重要である。

Synopsis：

Kawasaki Steel has presented newly developed steel sheets with new and advanced functions to each customer field. Such steels are developed timely based on the customers's needs grasped precisely by Kawasaki Steel. These are hot rolled steel sheets, cold rolled steel sheets and coated steel sheets. As the customers's needs are diversifying, the subjects to satisfy the contrary properties are increased. However, Kawasaki Steel has been tackling these subjects free from accepted ideas. In order to develop and provide the new steel sheets to satisfy the ecological requirements as the common needs for the human, it is very important that Kawasaki Steel considers together with customers.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Newly Developed Steel Sheet with New and Advanced Functions to Meet Customers' Needs



戸部 俊一
Toshikazu Tobe
薄板セクター室 主査
(部長)



清野 芳一
Yoshikazu Seino
薄板セクター室長
(現 川鉄コンテナ
一(株) 取締役)

要旨

川崎製鉄が顧客のニーズを的確に捉え、タイムリーに開発し、供給してきた新機能および高機能薄鋼板について顧客分野ごとに述べた。これらの鋼板は熱間圧延鋼板、冷間圧延鋼板およびこれらを母材にした表面処理鋼板である。ニーズの多様化にともない相反する特性を満たすという命題が課せられることが多くなったが、既成の概念にとらわれることなく、自由な発想で開発に取り組んできた。今後、地球環境保全という人類共通のニーズに応える薄鋼板を開発し供給してゆくためには、顧客とともに考えることが重要である。

Synopsis:

Kawasaki Steel has presented newly developed steel sheets with new and advanced functions to each customer field. Such steels are developed timely based on the customers' needs grasped precisely by Kawasaki Steel. These are hot rolled steel sheets, cold rolled steel sheets and coated steel sheets. As the customers' needs are diversifying, the subjects to satisfy the contrary properties are increased. However, Kawasaki Steel has been tackling these subjects free from accepted ideas. In order to develop and provide the new steel sheets to satisfy the ecological requirements as the common needs for the human, it is very important that Kawasaki Steel considers together with customers.

1 緒言

世の中の進歩発展とともに、薄鋼板を素材とするさまざまな商品に対する社会のニーズも多様化してきた。これにともない、顧客が川崎製鉄の薄鋼板に求める機能も当然のことながら多様化している。川崎製鉄はこれらのニーズに応える多くの薄鋼板を顧客に提供してきた。また、将来供給するべく中・長期的展望に立った開発に取り組んでいる。

従来の製品開発は素材供給者のシーズ技術立脚型 (products out) のものが多かったが、川崎製鉄は顧客との常日頃の交流から汲み取った顧客が求める機能追求型 (market in) の製品開発を志向してきた。川崎製鉄が先駆的に開発した潤滑鋼板 (リバージック FS) は market in 型製品開発の一例である¹⁾。顧客における全社員挙げてのプレス工場のクリーン化運動に端を発した開発であった。鋼板のプレス成形時に揮発したプレス油が工場内の床といわず壁といわずあらゆる場所を汚染していた。プレス油を使用せずとも深絞り成形ができる鋼板が欲しいというニーズに応じて開発した。プレス油を使用しないことによりプレス成形後の脱脂洗浄を不要とすることができ、その後のフロン系脱脂剤使用禁止という環境保全ニーズにもマッチした製品となった。

本報では、川崎製鉄が取り組んできた、製品分野ごと (自動車、

容器、電機) の顧客のニーズに応える新機能、高機能薄鋼板について紹介する。

2 自動車用薄鋼板

人間にとって最大の文明の利器である自動車に対する社会のニーズは、従来は走行性と利便性が主流であった。しかし近年、2つの側面からのニーズがクローズアップされてきた。1つの側面は地球埋蔵資源を燃料とし二酸化炭素を排出するという機構に対する地球環境保全ということである。もう1つの側面は交通手段としての過密の普及により発生確率の高まった不慮の事故に対する安全性向上ということである。

燃料を効率的に使用し (省エネルギー)、従来の走行性能を維持するための手段の一つに車体重量の軽減化 (軽量化) がある。一方では衝突事故などの不慮の事故の際の搭乗者の安全性向上のための車体構造強化、および利便性向上のための付帯装置 (たとえばエアコン、パワーステアリングやパワーウィンドウのためのモーター、カーステレオなどの音響装置) により、車体重量が増加する傾向にある。車体軽量化と安全性確保の両立が自動車メーカーでの重要課題の一つとなっている。

車体軽量化のために原素材としてアルミニウム、マグネシウムあるいは樹脂などの軽量材料も検討されているが、リサイクル性、適用性、信頼性、経済性などの観点で解決すべき点が多く、車体構成材料の主流はやはり薄鋼板である。部品の一体成形化が可能となる

*平成12年5月29日原稿受付

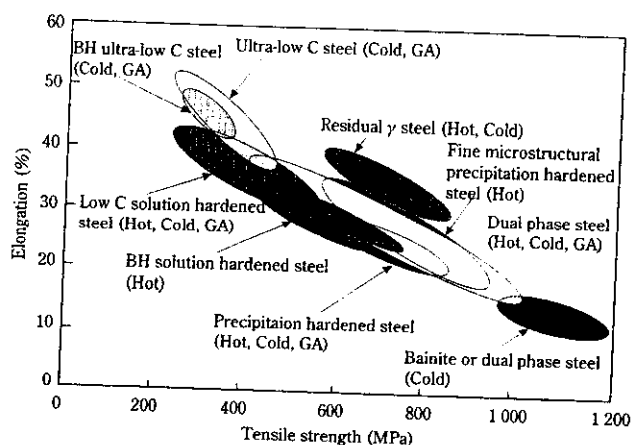


Fig. 1 Kind of steel for automotive use categorized after tensile strength and elongation

Table 1 Mechanical properties of surface-coated cold-rolled sheet steels with extra-deep drawability and bake-hardening

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\bar{r}$	BH (MPa)
Hot-dip galvanized	208	357	41	1.9	42
Organic composite coated	196	353	42	2.0	39

Steel thickness: 0.7 mm

高成形性、薄肉化できる高強度化などが車体軽量化における薄鋼板へのニーズである。

Fig. 1 に川崎製鉄がこれまでに開発してきた自動車用鋼板の種類をまとめて示す²⁾。強度（引張強さ）と成形性（引張試験における全伸び値で代表）のバランスで各鋼種を示している。これらの薄鋼板はいずれも自動車メーカーのニーズに応じて開発、量産化してきたものである。以下に代表的な鋼種を紹介する。

2.1 自動車外板用焼付硬化型高強度冷延鋼板

プレス成形時には強度は低く成形性に優れ、その後の塗装焼付加熱での歪み時効硬化で強度が増加し、外板部品として十分な耐 Dent 性が得られる鋼板である。

この種の薄鋼板は従来から知られていたが、引張強さが 340 MPa 以上の高強度でかつ深絞り性を示す Lankford 値 (r 値) が 2.0 を超える超深絞り性を有するものはなかった。C を 0.003% 以下とし、Nb と C の原子比 (Nb/C) が約 1.0 となるように Nb を添加した組成で 850°C 以上の高温焼鈍と 30°C/s 以上の急冷により、 r 値 2.0 以上、焼付硬化量 (BH) 約 40 MPa の冷間圧延鋼板が得られる。また、冷間圧延鋼板と同等の特性を有する合金化溶融亜鉛めっき鋼板および有機複合被覆鋼板も量産している。Table 1 にこれらの材料特性の一例を示す³⁾。

Nb/C 比を厳格に管理することにより、時効保証期間を 6 ヶ月とすることができ、輸出も可能である。

2.2 590 MPa 級合金化溶融亜鉛めっき鋼板

フェライト主相中にマルテンサイト組織を有する dual phase 鋼板 (DP 鋼) は、高延性を維持しつつ 590 MPa 以上の高強度が容易に得られ、低降伏比であるので形状凍結性に優れている。また、第

Table 2 Chemical compositions of the developed steel (mass%)

C	Mn	P	S	Al	Mo
0.080	2.00	0.010	0.005	0.042	0.15

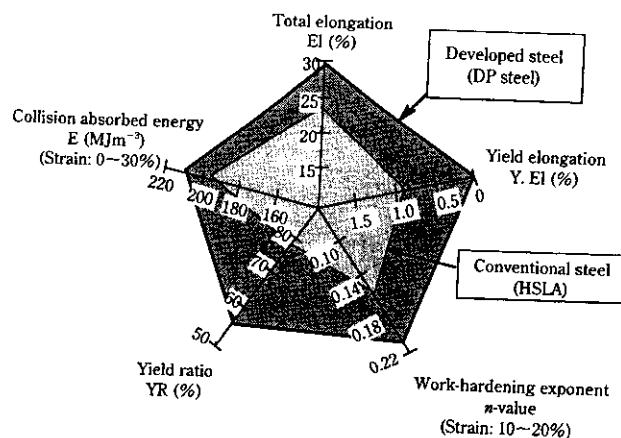


Fig. 2 Mechanical properties of the developed steel

2 相マルテンサイトの微細分散化により、同じ強度の他の鋼種と比べ高歪み速度時における吸収エネルギーが大きいため、衝突対応部材に適している^{4,5)}。DP 鋼は熱間圧延鋼板や冷間圧延鋼板では既存の品揃えとして従来から自動車部品に供されている。しかし、国内の防錆鋼板の主流である合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (GA) については熱履歴的に組織制御での、また鋼板組成的にめっき性状での問題があった。世界的な防錆強化ニーズの高まりの中、590 MPa 級 DP 溶融亜鉛めっき鋼板の供給が求められている。

Table 2 に新たに溶融亜鉛めっき対応として開発した鋼の組成を、また Fig. 2 には機械的性質を析出強化鋼 (HSLA 鋼) と比較して示す⁶⁾。GA 製造プロセスにおいてもマルテンサイト組織が得られ、めっき性も問題なく、30% という高い全伸び値が得られている。

2.3 高疲労強度、良成形性 780 MPa 級熱間圧延鋼板

ロードホイール材は 590 MPa 以下の高張力熱延鋼板が主流であったが、車体軽量化への対応の一つとして 780 MPa 級の熱間圧延鋼板の採用が望まれた。

ロードホイール材のうちディスク材は難成形部品のひとつであるとともに、ピア加工などにより開けられた切り欠き部の疲労強度が重要な機能として要求される。

川崎製鉄では、熱間圧延鋼板の組織をフェライト相とマルテンサイト相の複合組織とした上で、フェライト相を Ti により析出強化させることにより、成形性と疲労強度の両立した 780 MPa 級熱間圧延鋼板を開発し、量産している。Table 3 に化学組成の一例を、Table 4 に機械的性質の一例を、また Fig. 3 に平面曲げ疲労試験における平滑試験片、切り欠き試験片の疲労限と母材強度との関係を従来鋼と比較して示す⁷⁾。従来の析出強化鋼、DP 鋼と比較して優れた疲労特性を有していることが明らかである。

Table 3 Chemical compositions of newly developed 780 MPa TS grade steel

C	Si	Mn	Ti	P	S	Al
0.08	1.50	1.80	0.10	0.010	0.001	0.030

Table 4 Mechanical properties of newly developed 780 MPa TS grade steel

Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
3.2	653	816	24
4.5	638	832	22
6.0	659	834	22

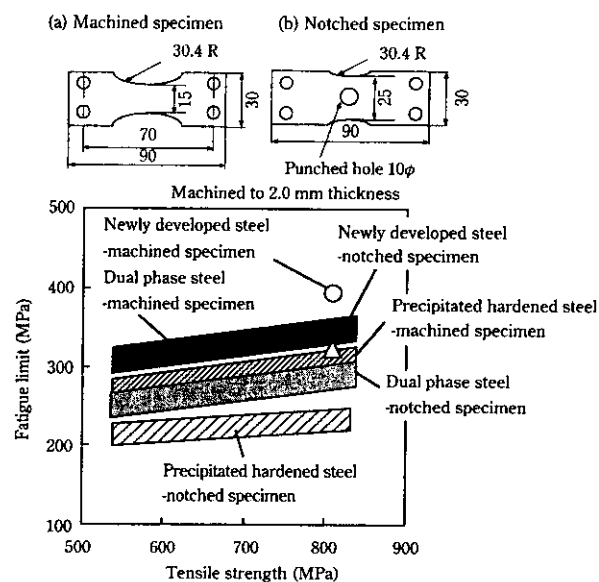


Fig. 3 Effect of microstructure and tensile strength on fatigue limit

3 容器用薄鋼板

飲料缶をはじめとした金属容器は、その構造様式から2ピース缶と3ピース缶に大別される。2ピース缶は各種プレス加工法で成形された缶体と天蓋の二つの部品で構成され、DI缶 (drawn and ironed can) と薄肉絞り缶に代表される。塗装印刷は成形後に行われる。3ピース缶はあらかじめ塗装印刷された鋼板を円筒状に成形後、溶接法あるいは接着法で接合した缶胴と天蓋および底蓋の3部品で構成される。

全世界で生産される食缶は年間約800億缶であり、その種類は1200程度にも及ぶと言われている。大量に消費される食缶においては、内容物の保存という基本性能に加えて、軽量缶化やネックイン加工という合理化ニーズがある。軽量缶化のためには、素材鋼板の薄肉化とともに缶体強度を確保するための高硬質性能と高ネックイン加工性という相反する特性を兼ね備えた素材が必要となる。

3.1 軟質缶用極薄鋼板

極薄鋼板と呼ばれる板厚が0.2mm程度の缶用鋼板においても高い生産性を有し、均一な材質が得られる連続焼鈍の適用が求められてきた。

極低炭素鋼を素材とし極微量のNbを添加することにより、絞り成形時のイヤリングに影響する Δr (r 値の異方性)を低減し、かつ時効性が抑制できる。

この微量Nb添加極低炭素鋼に0.5%程度のMnを加えると、通常の熱間圧延、冷間圧延および連続焼鈍を行うことにより優れた加工性を有する軟質な缶用鋼板が得られる。Table 5に本鋼板の機械

Table 5 Typical mechanical properties of the developed steel

	Steel	Grade	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Y. El (%)	r -value
Batch annealing	Low C	T1	225	348	37	0	1.3
Continuous annealing	Ultra-low C	T1	225	348	41	0	1.8

Thickness: 0.25~0.32 mm

Table 6 Typical mechanical properties of the developed steel comparing with conventional steel

Steel	As temper rolled			After aging (at 210°C)		
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
Conventional	314	416	25	402	409	27
With 100 ppm N addition	408	454	26	427	445	26

Thickness: 0.18 mm JIS No. 5 specimen (longitudinal direction)
Base steel: 0.04%C-0.2%Mn-0.04%Al

的特性の一例を示す⁸⁾。比較対象の低炭素箱焼鈍材に比べ良好な延性を有することから、張り出し成形性に優れること、また r 値が高いことから優れた深絞り性が期待できる。

3.2 硬質缶用極薄鋼板

3ピース缶に使われる硬質極薄鋼板においても高硬度化が進んでいる。たとえば従来190g飲料缶の缶胴用鋼板は調質度T4、板厚0.20mmであったが、最近では調質度T5で板厚0.18mmのものが使われている。

高硬度化の手段としては、鋼中のC、Mnなどの強化元素の増量や焼鈍後の2次冷間圧延により加工硬化させるなどの方法がある。CやMnを増量すると、熱間および冷間圧延における変形抵抗が高まり極薄鋼板の製造が困難になる。また、溶接缶用途では溶接部が著しく硬化しフランジ加工性の低下をまねく。2次冷間圧延による加工硬化は鋼板の硬度上昇と同時に板厚低減が図れるという利点があるが、均一伸びが著しく低下することおよび降伏比の上昇によるスプリングバック性の増大という問題を引き起こす。

これらの問題を解決するために、従来は積極的に使用されていなかった強化元素であるNを活用した鋼板を開発した。この鋼板では、N添加による時効性の増大にともない懸念されたフルーティング (円筒成形時に生ずる折れ)などの製缶上のトラブルも回避でき、成形時には軟質で製缶後は急速な重み時効により有効に硬質化するという極めて優れた特長を有する。Table 6に代表的な特性を従来鋼と比較して示す⁹⁾。塗装後の焼付に相当する時効処理後に、固溶Nによる重み時効硬化により大きな強度増加を示している。本鋼板は、缶体強度を維持したまま薄肉化を達成する目的で広く活用されている。

4 電機用薄鋼板

ここでは、パソコン周辺機器や複写機を含めた家庭用電気機器用途の薄鋼板について述べる。

従来、家庭用電気機器用薄鋼板としてはごく一般的なJIS規格冷間圧延鋼板が使用され、耐食性の必要な部品はプレス成形後部品形状でめっきが施されていた (後めっき)。家庭用電気機器の普及と

Table 7 Performance of "RIVER ZINC FX"

Test item	Test condition	Result		
		RIVER ZINC FX	RIVER ZINC F*	RIVER ZINC C**
Finger print resistance	Discoloration measurement with artificial sweat solution	1.0 under	0.8 under	3.5 under
Corrosion resistance	Salt spray test 5% NaCl at 35°C (JIS Z 2371)	120 h over***	144 h over***	48 h over***
Chemical resistance	Immersion test in gaseous trichloroethylene at 50°C for 4 min	No change	Slightly changed	No change
	Immersion test in gaseous trichloroethylene at 90°C for 4 min	No change	Slightly changed	No change
Conductivity	Electric resistance measurement on the surface	0.1 Ω under	0.5 Ω over	0.1 Ω under

*Finger print resistant steel sheet (resin coated type)

**Conventional chromate treated steel sheet

***Time to generate white rust covered more than 5% of the surface

ともに、合理的な生産プロセスが求められるようになり、めっき鋼板の需要が拡大した。家庭内で使用されるため、めっきの厚みはそれほど必要なく、電気亜鉛めっき鋼板が主流となった。亜鉛めっきのままの表面には亜鉛の錆（白錆）が発生し外観が損なわれるので、通常はクロム酸皮膜処理（クロメート処理）などの化成処理が施される。

家庭用電気機器の内部部品は塗装されずに鋼板表面が裸のままで使用されるのが通常であるため、消費者が素手で触っても指紋の跡が目立たないこと（耐指紋性）が要求される。耐指紋性を得るために、クロメート皮膜上に有機樹脂皮膜で被覆した鋼板が多く使用されている。しかし、鋼板表面を有機樹脂皮膜で覆ってしまうと、鋼板特有の電気伝導性の良さが失われ、溶接性やアース性が損なわれる。このように、顧客の要求機能を付与しようとする、他の機能が犠牲となる場合がある。したがって、顧客の立場に立って、使い勝手のよい製品を提供することを大前提に製品開発に取り組むことが重要である。

4.1 高耐食性塗布型クロメート処理鋼板

前述の通り、有機樹脂皮膜を被覆した耐指紋鋼板が多く使用されているが、有機樹脂皮膜が絶縁体となり鋼板表面の電気伝導性は通常の電気亜鉛めっき鋼板に比べ著しく劣る。最近、電磁波障害防止のため電磁波ノイズ規制が厳しくなっており、家庭用電気機器に使用される薄鋼板の選択基準のひとつとして表面導電性が取り上げられるようになった。

有機樹脂被覆型の耐指紋鋼板と同等の耐指紋性および高耐食性を維持し、かつ通常の電気亜鉛めっき鋼板と同等の表面導電性を有する鋼板が高耐食性塗布型クロメート処理鋼板「リバーズンク FX」である。

下地亜鉛めっきとの反応を抑制し、かつ高温乾燥処理により安定したクロメート皮膜を形成させているため、従来のクロメート処理材に比較して、リバーズンク FX は耐食性および耐指紋性に優れる。Table 7 にリバーズンク FX の品質特性を、有機樹脂処理耐指紋鋼板リバーズンク F および従来のクロメート処理材リバーズンク C と比較して示す¹⁰⁾。

4.2 良導電性潤滑鋼板

職場環境の劣悪化やプレス加工後の脱脂に使用されるフロン系溶剤によるオゾン層破壊問題に対応するため、プレス油を使用しなくても従来と同等のプレス成形性の得られる潤滑鋼板が普及してい

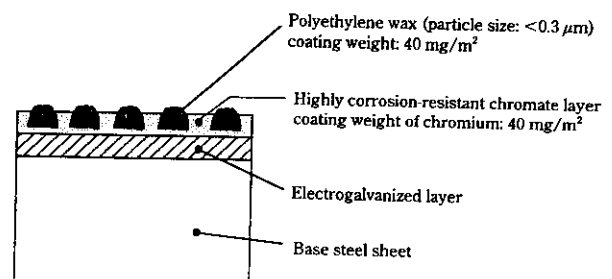


Fig. 4 Schematic diagram of RIVER ZINC FE

る。しかし、この潤滑鋼板は有機樹脂を主成分とする皮膜で被覆されているため、表面の電気抵抗が高く表面導電性が従来材に比べて劣る。従来鋼板並みの表面導電性を有する潤滑鋼板が良導電性潤滑鋼板「リバーズンク FE」である。

Fig. 4 にリバーズンク FE の皮膜構成図を示す。電気亜鉛めっき鋼板上に潤滑剤である粒子径約 0.2 μm のポリエチレンワックスを含有した塗布型クロメート層が形成されている。ポリエチレンワックス粒子は島状に分散されているので、皮膜中に通電点が確保され表面導電性が損なわれない。Table 8 にリバーズンク FE の品質特性を、有機樹脂皮膜型潤滑鋼板リバーズンク FS と前述のリバーズンク FX と比較して示す¹¹⁾。リバーズンク FE は、リバーズンク FS と同等の潤滑特性を有し、かつリバーズンク FX と同等の耐食性および導電性を実現している。

4.3 延性と耐二次加工脆性に優れた深絞り用熱間圧延鋼板

冷蔵庫やエアコンの冷凍機用コンプレッサのシェルには延性に優れた熱間圧延鋼板が使用されている。コンプレッサシェル用材には深絞り成形できる高延性はもとより、部品の信頼性の観点から耐二次加工脆性についても優れた特性が要求される。二次加工脆性は、一次加工を行った材料に二次的に衝撃力が加わった場合に生ずる脆性現象であり、いわゆる「縦割れ」と呼ばれる円筒成形時の成形方向に沿って直線的に割れる破断形態を示すことが多い。

地球環境問題で冷凍機の冷媒としてフロンが使用できなくなったことで、コンプレッサが大型化しシェル材の板厚が厚くなっている。深絞り成形の過酷化および板厚の増大はともに耐二次加工脆性に対しては不利であり、より優れた耐二次加工脆性を有する熱間圧

Table 8 Comparison of performance of RIVER ZINC FE with those of RIVER ZINC FS and FX

Property	Test item	Result		
		RIVER ZINC FE	RIVER ZINC FS	RIVER ZINC FX
Conductivity	Surface electric resistance	0.2 Ω under	1~100 Ω over	0.1 Ω under
Consecutive spot weldability	Number of spot welding of electrode tip life ^a	3 000 over	150	3 000 over
Lubricant property	Friction coefficient by drawing test	0.15~0.25	0.10	0.35~0.45
Press formability	LDR by cup drawing test ^b	2.09	2.33	1.8 under
Corrosion resistance	Time to the occurrence of 5% white rust area in the 5% NaCl salt spray test at 35°C	120 h over	200 h over	120 h over

^aElectrode: Cu-Cr, CF (5 mm ϕ) type
Electrode force: 1960 N
Welding current and time: 8.5 kA $\times$ 10 cycles
Sheet thickness: 1.0 mm

^bBlank holder force: 19.6 N
Punch diameter: 33 mm ϕ
Drawing speed: 60 mm/s

Table 9 Chemical compositions of hot-rolled mild sheet steels (mass%)

	C	Mn	P	S	Others
SPHE	0.04	0.3	0.01	0.01	Al-killed
KFN3	0.002	0.1	0.01	0.003	Ti, B added
KFN5 (Newly developed)	0.002	0.1	0.01	0.003	Ti, B added

Table 10 Mechanical properties of hot-rolled mild sheet steels

	Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Average r -value
SPHE	4.5	225	335	48	0.8
KFN3	4.5	185	285	56	0.9
KFN5 (Newly developed)	4.5	203	295	56	0.9

延鋼板が求められている。

このようなニーズに応えるため開発されたのが、極低炭素鋼を熱間圧延工程での最適な加工熱処理により均一微細組織化しかつ析出炭化物を微細分散させて、延性と耐二次加工脆性の両特性を従来の熱間圧延鋼板と比べ格段に向上させた深絞り成形用高延性熱間圧延鋼板「KFN5」である。Table 9 および 10 に KFN5 の化学組成と機械的性質の一例を従来鋼 (SPHE) および従来型の深絞り用熱間圧

Table 11 Results of secondary embrittlement test

	Testing temperature (°C)						
	-100	-120	-130	-140	-150	-180	-196
SPHE		×	×				
KFN3		○	○	×	×		
KFN5 (Newly developed)	○	○	○	○	○	○	○

○ : Ductile × : Brittle

延鋼板 KFN3 と比較して示す。また、Table 11 には耐二次加工脆性試験の結果の一例を示す。SPHE が -120°C で脆性割れを生ずるのに対し、KFN5 は -196°C でも脆性割れを生じず、優れた耐二次加工脆性を示している¹²⁾。

5 結 言

川崎製鉄は、常に market in の立場に立ち、顧客のニーズを的確に汲み取り、顧客に必要な時期に、より経済的に新機能薄鋼板および高機能薄鋼板を提供してきた。

今後の世の中の最大関心事はもっぱら地球環境保全である。地球と人間が共存共栄して行くための技術開発が求められている。このような観点で、川崎製鉄の薄鋼板がいかに貢献できるのかを、顧客とともに考えて行かねばならない。

参 考 文 献

- 鈴木幸子, 戸塚信夫, 栗栖孝雄, 市田敏郎, 毛利泰三: 川崎製鉄技報, 23(1991)4, 340
- 安田 顕, 古君 修, 清野芳一: 川崎製鉄技報, 32(2000)1, 7
- 佐藤 進, 岡田 進, 加藤俊之, 橋本 修, 花澤利健, 恒川裕志: 川崎製鉄技報, 23(1991)4, 293
- 三浦一哉, 高木周作, 加藤俊之, 松田 修, 谷村真治: まてりあ, 35(1996), 570
- 高木周作, 三浦一哉, 古君 修, 小原 隆, 加藤俊之, 谷村真治: 鉄と鋼, 83(1997), 748
- 飛山洋一, 大沢一典, 平田基博: 川崎製鉄技報, 31(1999)3, 181
- 清水哲雄, 青柳信男: 川崎製鉄技報, 31(1999)3, 185
- 登坂章男, 奥田金晴, 荒谷昌利: 川崎製鉄技報, 31(1999)3, 165
- 登坂章男, 荒谷昌利, 久々湊英雄: 川崎製鉄技報, 27(1995)3, 169
- 戸塚信夫, 栗栖孝雄, 市田敏郎, 津川俊一, 川合真人: 川崎製鉄技報, 23(1991)4, 349
- 尾形浩行, 馬淵昌樹, 成瀬義弘: 川崎製鉄技報, 27(1995)3, 190
- 登坂章男, 古君 修, 桑子 浩: 川崎製鉄技報, 32(2000)1, 69