

技 術 論 文

熱間圧延用 CPC ロールの開発と現状

Development and Current Situation of CPC Roll for Hot Rolling



代表取締役会長
山本 厚生
Atsuo Yamamoto

技術開発センター
副センター長
博士(工学) 姜 孝京
Hyo-Gyoung Kang

技術開発センター
商品・生産技術開発室長
博士(工学) 園田 晃大
Akio Sonoda

技術開発センター
センター長
博士(工学) 永吉 英昭
Hideaki Nagayoshi

取締役製品事業本部長
石井 芳雄
Yoshio Ishii

ロール拡販部
顧問
博士(工学) 橋本 光生
Mitsuo Hashimoto

要 旨

高速度工具鋼(ハイス)系ロールの開発と普及は、圧延ロールの分野だけでなく、鉄鋼圧延分野においても変革のひとつであった。新しいハイス系材料と連続鋳掛け法(CPC法)の2つのシーズ技術によって本ロールは開発された(CPCロールと称す)。CPC法は当社が独自に開発した複合材料の製造方法で、高機能材料を自由に製造でき強靱な芯材を採用する理想的な複合ロールの製造法である。CPCロールは熱間圧延用に耐摩耗性と表面性状に極めて優れた性能を発揮し、現在広く適用されている。この結果、圧延製品の品質が向上するとともにロール起因の制約条件が大幅に解消され、圧延技術の進歩に貢献した。さらに、溶接技術との連携により、使用済のCPCロールを再生する技術を新たに開発し、経済的なコストで高性能ロールを実現した。この新しいロールはECOタイプのロールであり、ロールの完全リサイクルシステムを構築し、CO2排出量を55%削減して社会的要求に応えている。

Synopsis:

The development and widespread of high-speed tool steel (generally called as HSS) type rolls has been one of the important innovations not only in the field of rolling mill roll but also in the steel rolling field. This roll was developed by two seed techniques with the new HSS material and the CPC process (Continuous pouring Process for Cladding), and the roll was referred to as CPC roll. The CPC process has been developed by FUJICO CO., LTD originally as manufacturing method of composite material, which is an ideal process capable of freely manufacturing highly performance materials and adopting a strong and tough core material. CPC rolls display the excellent performances on wear resistance and surface texture mainly on hot rolling, and they are widely applied currently. As a result, the quality of the rolled product was improved and the constraints caused by the rolling mill roll were remarkably eliminated, and the CPC roll contributed to the progress of the rolling technology. In addition, we developed a new technology to re-birth the used CPC roll through cooperation with welding. As a result, we achieved high performance rolls at economical cost. This new roll is an ECO type roll, establishing a complete recycling system for rolls, reducing CO2 emissions by 55% and they are responding to social demands.

1. はじめに

20世紀末に起こった高速度鋼系ハイスロールの出現ならびにその普及は、鉄鋼圧延分野における変革のひとつであり、現在においても高機能ロールの中心に

位置する。ハイス系材料と連続鋳掛け法(CPC法と称す)の二つの中核シーズ技術より本ロールの開発はなされた(以下CPCロールと称す)。CPC法は当社が独自に開発した複合材料の製造法であり、ハイス系材料

の有する極めて高い性能を圧延用ロールとして具現化し、その最適な製造法と評価されている。また、海外からの導入技術に頼ってきた圧延ロールの歴史の中で、本ロールは初めて世界に先駆けて日本で実用化された画期的なものであった。現在、国内外でホットストリップミル仕上げ圧延機列用ならびに棒鋼・線材中間圧延機列用を中心に使用されている。そこで、CPC ロールについて開発の経緯、現状評価及び最近の技術改善について述べる。

2. CPC ロールの開発経緯

2.1 歴史的背景

圧延ロールの主要な変遷をホットストリップ分野における圧延技術の進歩と対比して Fig.1 に示す。高度成長時代の大量消費に対応した大型化ならびに高速化を経て、1970 年代以降には省エネルギー及び高付加価値製品の生産へと移行した。操業技術面では連続鋳造との連続化に加え鋼材の低温加熱圧延が指向され、設備的には板形状を高度に制御できる種々の圧延機が実用化された。CPC ロールとの関係で特筆すべきは、1980 年代後半にエッジ・ドロップ（鋼板端部で厚みが急激に薄くなる現象）の低減を目的に、小径のロールを用いて曲げ機構を積極的に利用した実用化試験が実施されたことである。本試験においては、ロールに負荷される曲げ応力、接触応力及び回転数のいずれもが著しく増大した。そこで、高性能なロールの開発要求が顕在化し、ハイス系材料と CPC 法の組み合わせによる新ロールが開発される契機となった。

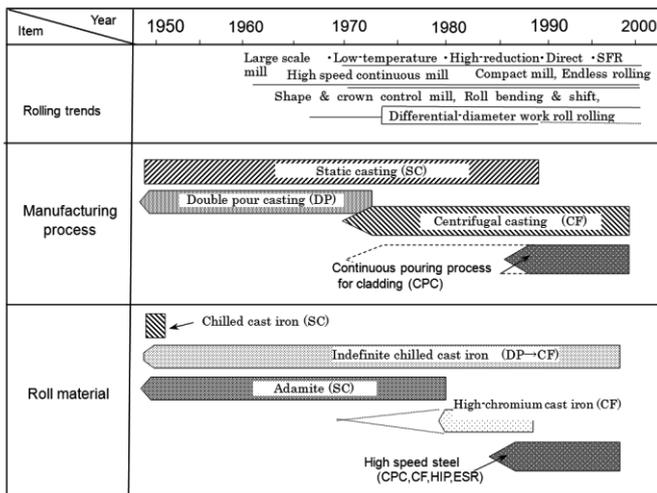


Fig.1 Transitions of work rolls for hot strip mill finishing train.

2.2 CPC 法の開発

ロールの製造は単一材質による静置鋳造法により始まったが、重要な具備特性であるがしばしば相反する耐摩耗性と強靱性の兼備を目的に、複合ロールが製造されるようになった。現在は遠心鋳造法がもっとも広く採用されている。しかしながら、耐摩耗性に優れる

合金鋳鉄材料を外層材として用いた場合には、健全な境界を確保するためには、より融点の低い鋳鉄を芯材として採用せざるを得ず、強靱性において制約があった。

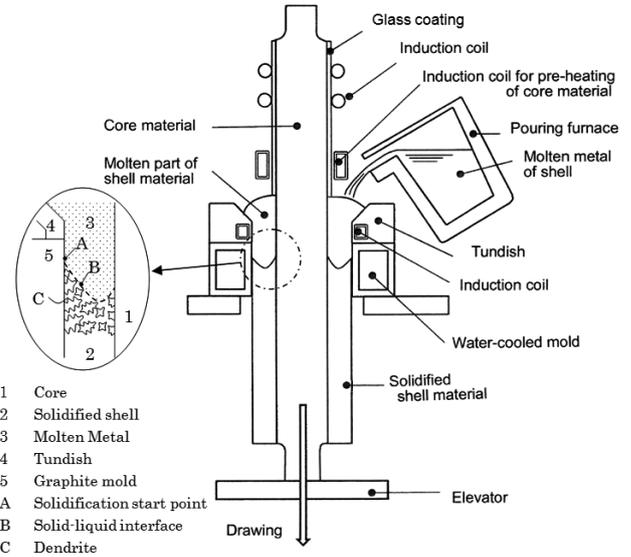


Fig.2 Illustration of CPC process.

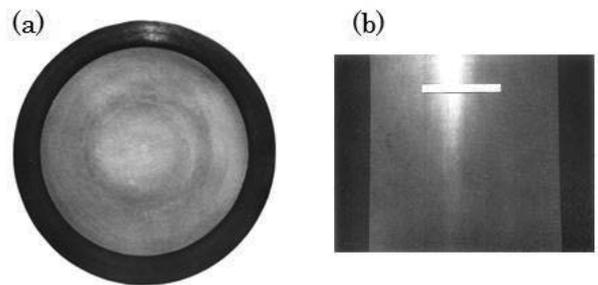


Fig.3 Sectional macrostructure of roll manufactured by CPC process, (a)Cross section, (b)Longitudinal section.

一方、山本秀祐によって実用化された鋳鉄製の鋼塊鋳型の補修技術の確立²⁾を経て、当社は鉄鋼製造用ローラーへの鋳鉄材料の肉盛溶接による補修再生を実用化した³⁾。しかしながら、肉盛層の均質性及び肉盛効率の改善が強く望まれ、肉盛施工効率の飛躍的な向上と肉盛材料の自由度の拡大を目指して CPC 法が開発された^{4)~6)}。Fig.2 に本プロセスの概略図⁷⁾を、Fig.3 に製造したロールの断面写真を示すが、連続鋳造方式により複合材料を製造するものである。溶湯の清浄性を確保して、厚肉の 1 層盛により健全な肉盛層を形成する。さらに、誘導電流を用いて芯材と完全に溶着させ、水冷鋳型と引抜き条件のバランスによって微細で均一な肉盛層を可能とした。また、芯材には鋼系の強靱材料を採用し、近年の高負荷圧延から要求される強靱性の確保に合致する。このプロセスの最大の特徴は次の 3 点である。

- ①外層材の高合金化及び多合金化が偏析することなく可能である、
- ②外層材の冷却速度が大きく、緻密な凝固組織が得られる、
- ③芯材に強靱な鋼系材料を使用できる。

これらはロールに要求される性質の中で最も重要な耐摩耗性、耐肌荒れ性及び強靱性の兼備・向上の要求に合致する理想的なプロセスと言える。

2.3 ハイス系材料の開発

ロール材料は大きく分類すれば鋳鋼、鋳鉄及びその中間的なアダマイトがある。熱間圧延用ロールは高温鋼材を圧延するために、耐摩耗性の要求が特に強く、硬い鋳鉄が一般に用いられてきた。19世紀初頭に欧州でチルド鋳鉄が導入され、1924年に米国で高速連続圧延のホットストリップミルが出現し、硬い炭化物と適度の黒鉛を有して耐摩耗性と耐焼付き性に優れた高合金グレン鋳鉄（インデフィニッド・チルド鋳鉄とも呼ばれる）ロールが実用化され、現在も多く使用されている。一方、仕上げ前段圧延機用には高クロム鋳鉄が欧州では直接的に、日本ではアダマイトを経て高クロム鋳鉄ロールが導入された。さらに、高性能ロールの開発要求に応じて、高速度工具鋼に類似したハイス系材料（多合金系白鋳鉄）が実用化された。本材料はCr, Mo, V, W, Co等含有し、高硬度の合金炭化物（MC, M₂C, M₇C₃等）を利用したもので、高温においても高い硬さを示す。Table1に代表的なロール材の化学組成及び冶金的な特性を、Fig.4に典型的なハイス系材料のミクロ組織写真を示す。

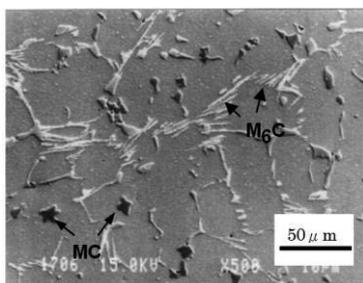


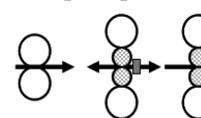
Fig.4 Typical microstructure of high speed steel tool type shell material manufactured by CPC process .

2.4 CPC ロールの適用状況

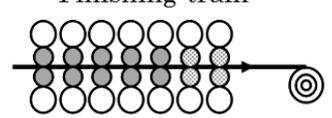
Fig.5にCPCロールの普及が進んでいるホットストリップミル及び棒鋼・線材ミルでの適用状況を示す。一般的には、最終圧延に近い後方のスタンドほど製品の表面性状や寸法精度に与えるロール性能の影響が大きく、摩耗が大きいため耐摩耗性及び耐肌荒れ性が強く求められる。したがって、CPCロールは中間から仕上げ圧延機列でその性能が発揮され、効果が得られる。本ロールの開発の契機となったホットストリップミルの仕上げ圧延機列で最も適用が進んで来た⁸⁾。とりわけ、前段圧延機列では早期にほぼ100%が従来ロールより置き替わった。一方、後段圧延機列では本ロールの有する耐摩耗性が最も製品品質の向上に寄与するが、圧延トラブル時に発生するき裂によるロールの消耗を避けるため、現在では中段圧延機を中心に使用されている。次に、良好な寸法・形状精度と連続圧延が望まれる棒鋼・線材ミルにおいても中間列を中心に広く普及している。仕上げ圧延列では超硬合金が主に適用されているが、耐事故性に課題があるスタンドではCPCロールが使用されている。一方、熱負荷が大きな粗圧延機列では、耐熱き裂性の確保が必要で、詳細は後述するが組織の微細化と適正な硬度によって改善されたロールが普及している。

Hot strip mill

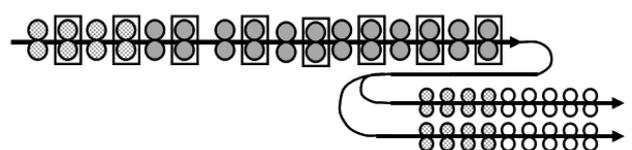
Roughing train



Finishing train



Bar and wire-rod mill



- :CPC roll major applied,
- :partially or other process roll supplied.

Fig.5 Application of high speed steel rolls in typical rolling mills.

Table 1 Chemical compositions, metallurgical features and hardness of main type rolls.

Roll material	Chemical composition (mass %)							Microstructure Graphite, Carbide, Matrix	Hardness (HS)
	C	Ni	Cr	Mo	V	W	Others		
Chilled cast iron (CI)	3.0 -3.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	None, Fe ₃ C, Fine pearlite, Bainite	60-85
Indefinite chilled cast iron (IC)	3.0 -3.5	4 -5	≤2	≤1	NA	NA	NA	≤ 5 %, Fe ₃ C, Bainite	75-85
Adamite (AD)	1.5 -2.0	≤1	≤2	≤1	NA	NA	NA	None, Fe ₃ C, Fine pearlite	50-55
High-chromium cast iron (HiCr)	2.5 -3.0	1 -2	15 -20	1 -3	≤3	NA	NA	None, M ₇ C ₃ , Tempered martensite	70-80
High speed steel (HSS)	1.5 -2.5	≤1	2 -10	2 -10	2 -10	≤ 10	Nb, Co	None, MC+M ₆ C(M ₇ C ₃), Tempered martensite	80-90

Note) Hardness of typical carbides; Fe₃C:HV840-1,340, (Cr,Fe)₇C₃:HV1,600-2,410, VC:21,00-2,800, (Fe,Mo)₆C:HV1,820-1,950.

形鋼分野では種々の孔型を有し、圧延製品と接触が広くて熱負荷が大きい。そこで、十分なロール冷却条件下で限定的に適用されている。とくに仕上げ圧延では摩耗が少ないため良好な製品形状が得られた。鋼管圧延では深い孔型を有するマンドレルミルで適用が進んでおり、平鋼圧延においても評価をいただいている。冷間圧延では、鍛鋼ロールが独占的に使用されているが、CPC ロールの微細な組織による優れた粗度保持性で連続圧延が達成されるも、製造安定性の観点より普及するまでには至っていない⁹⁾。

さて、ハイス系ロールの開発時には CPC 法に加えて HIP 法、鍛造法、回転 ESR 法等により試験ロールが製造されて評価が行われた。なかでも、粉末冶金による HIP 法では合金自由度が広く、かつ組織が極めて微細であり CPC 法に劣らず良好な成績を収めたが⁸⁾、製造コストが高いことと高温加熱容器の制約により、現状では小径のロールに限って少量使用されるに留まっている。また、既存ロールの製造に最も広く適用されている遠心鑄造法は強靱性及び合金組成の制約はあるが、製造コストに見合う性能で供給されている。とくに、圧延作業上の利用で CPC ロールの性能を十分発揮できない条件下で採用されており、また大径の形鋼用及び熱間圧延鋼板用の粗ロールで使用されている⁸⁾。

3. 適用ミルにおける評価

CPC ロールが最も普及されているホットストリップミル及び棒鋼・線材ミルでの評価を述べる。

3.1 熱延仕上げ圧延機列用ワークロール^{10)~12)}

先ず圧延ロールとして最も重要な摩耗について調査した結果として、Fig.6 に摩耗を含めた圧延中のロール形状を、Fig.7 に圧延負荷をパラメータ化して材質別の摩耗比較を示す。CPC ロールの摩耗が従来ロールに比べて 1/5 程度と極めて少ないことが明瞭にわかる。もう一つの重要なロール肌について、前段ならびに後段圧延機列での使用後の典型的なロール肌例を従来ロールと比較して Fig.8 に示す。前段圧延機では高温の圧延材との接触によりロール表面に酸化スケール(黒皮)が生成されるが、CPC ロールでは皮膜が薄く、成長が抑制されたため、剥離によるロールの損傷が小さく抑えられた。さらに、酸化膜の成長を抑える特殊潤滑油の併用により長時間連続圧延を実現した。一方、アブレーション摩耗の形態を示す後段圧延機においては、耐摩耗性の向上に加えて、CPC 法による微細な結晶組織により小さな表面粗度が安定的に維持された。ロール性能は従来比で 5 倍以上の向上が達成され、ロール研削間の圧延量は Fig.9 に示すとおり、2.5~10 倍に増大した。これに伴いロール研削回数が減少しコストが削減されるとともに生産性の向上が図れた。本圧延機列での課題は前述のとおり圧延トラブル遭遇時に発生

したき裂によるロール消耗であり、圧延作業ならびにロール材質両面から改善を進めてきたが、さらなる改善が望まれる。

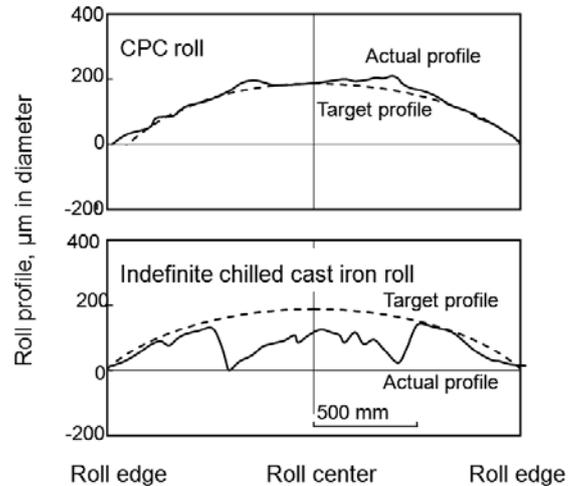


Fig.6 Roll profiles measured by using on-line profile meter during rolling.

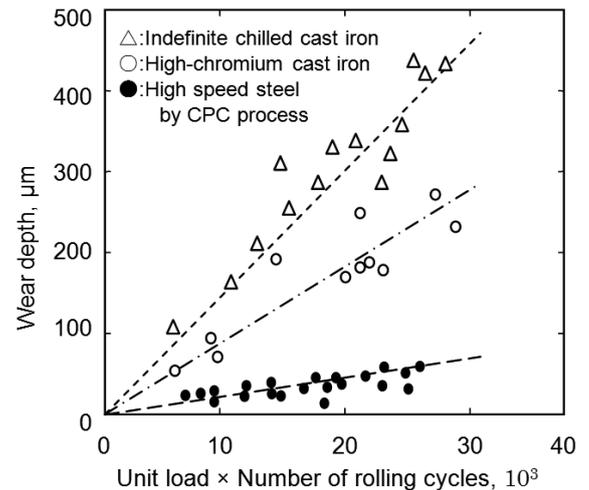


Fig.7 Wear of rolls during finish rolling in hot strip mill.

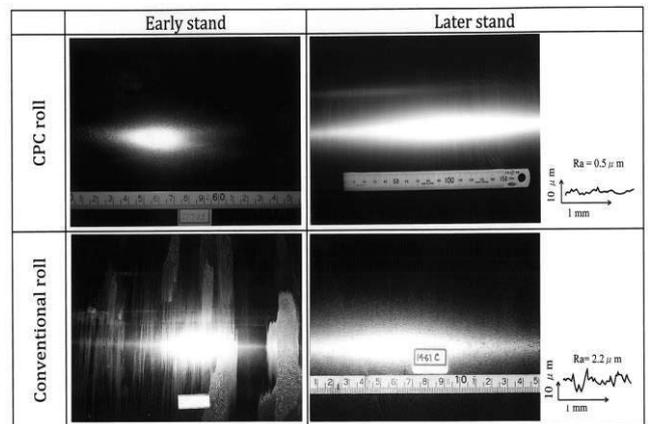


Fig.8 Comparison of surface appearance of rolls used in hot strip finishing mill, conventional roll: high-chromium cast iron (early stand) and indefinite chilled cast iron (later stand).

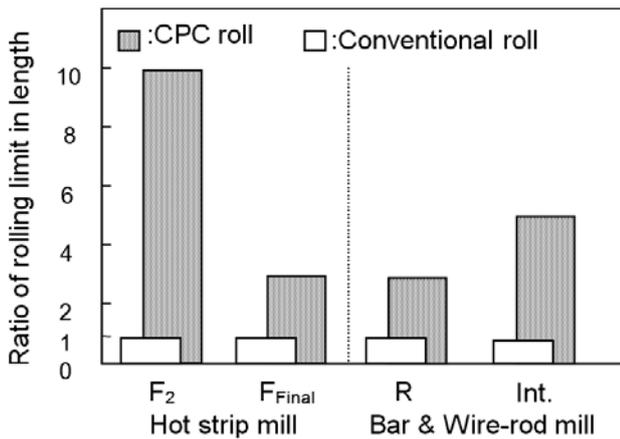


Fig.9 Change of roll performance for CPC rolls in typical rolling mills.

3.2 棒鋼・線材中間列^{8), 13), 14)}

粗列後段から中間列にかけての課題は主として耐摩耗性であった。さらに、棒鋼・線材圧延では鋼板圧延以上に美しい表面肌要求が高いため、摩耗に加えて使用後の孔型表面の粗度にも留意する必要がある、CPC ロールの導入はこれらの要求に適したものであった。Fig.10 には中間列でCPC ロールを使用した際のロール肌写真を従来ロールと比較して示したが、美しいロール肌を呈している。Fig.9 右欄に併示したとおり、性能向上による連続圧延の拡大がなされた。なお、性能レベルを維持するには十分な冷却水が不可欠である。また、高負荷での大量圧延時における小突起状肌荒れの発生が課題であり、これまでの経験則に加えて圧延負荷の定量化による限界値の設定が望まれる。

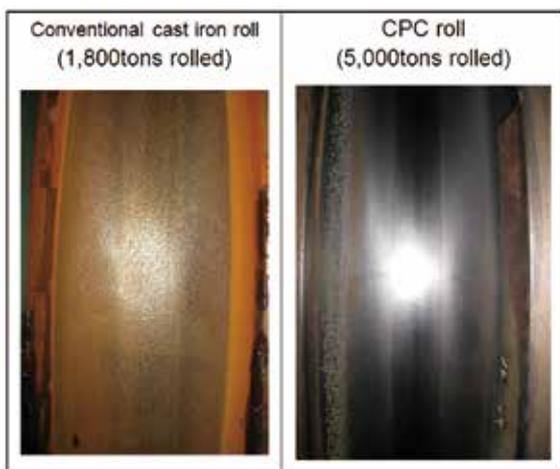


Fig.10 Comparison of surface appearance of rolls used in bar mill 10th stand.

4. 最近の技術開発成果

4.1 再生技術の確立^{15), 16)}

CPC ロールは極めて優れた性能を発揮する一方、強靱な鋼系芯材の採用はコスト増をもたらしている。そこで、鋼系芯材は溶接が可能であることに着目し、CPC 法と溶接技術の連携により、使用終了して廃棄された

CPC ロールの再生技術を開発した。Fig.11(a)に肉盛溶接の作業状況、同図(b)には摩擦圧接法における加熱・負荷時の最終段階（アップセットと呼ばれる）の外観写真を示す。前者は軸部形状に沿って後工程の変形及び酸化を考慮して完成形状が確保できるように、軸部の全表面が高強度材で肉盛溶接される。一方、後者においては、軸部形状及び寸法が確保できる新規調達の軸部を接合し、最終的には所定の形状に加工される。軸部のみの場合は胴部芯材に比較して小径となり、比較的安価な圧延鋼材を採用できる利点もある。なお、再生された部分は欠陥のない健全で十分な強度を有する。

圧延鋼材と直接接触し圧延作業に供される胴部については新規製造ロールと同一条件にて鑄掛けされるため性能は同等である。一方、製造コストは本法の採用により約 20%が低減された、Fig.12 に再生による CO₂ 排出量の削減を示すが、約 55%削減された。

この CPC ロールの再生により、経済的なコストでの高性能ロールを実現した。さらに、この技術は、作働ロールの全リサイクルシステムと CO₂ 排出量の著しい削減を確立し、この新しいロールはまさに ECO タイプのロールである。

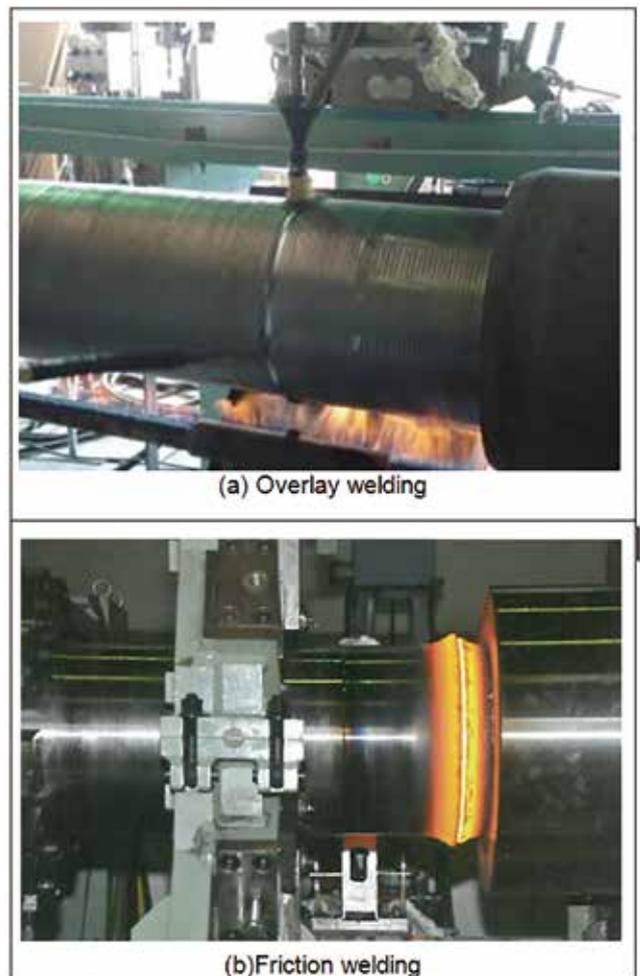


Fig.11 Overviews of re-birth operation in journal of CPC roll.

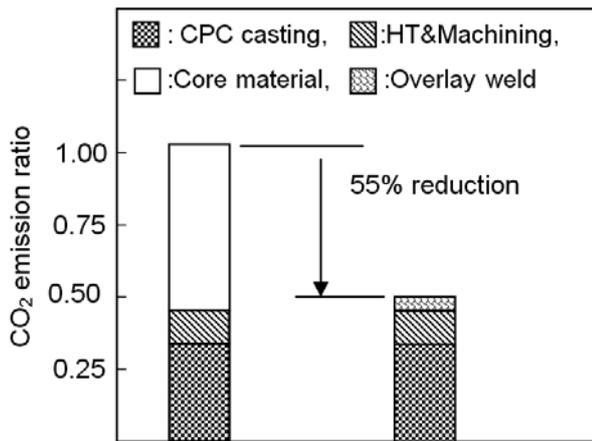


Fig.12 Reduction of CO₂ emission with re-birth of CPC roll

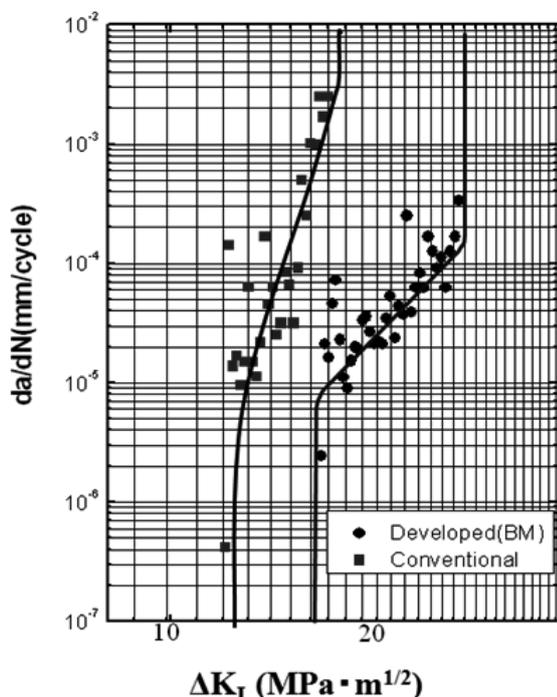


Fig.13 Fracture crack propagation property of new developed high-speed steel type roll for ΔK_I , developed(BM): 1.7C-6V-3Cr-2Mo-1W-3Co alloy inoculated with Ti, conventional: 2.0C-7.5V-4Cr-2Mo-3W-1.5Co alloy.

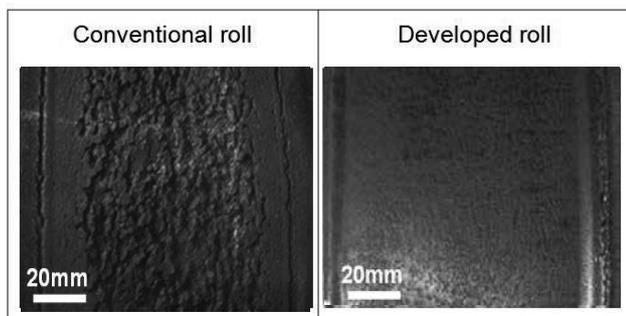


Fig.14 Comparison of surface appearance of CPC rolls used in bar mill 4th V stand.

4.2 特殊合金添加による組織改善^{17,18)}

Ti 等の特殊元素を組織制御の接種核として用いる技術が鉄鋼製造に利用されているが、CPC ロールのハイス系外層材への応用を試みた。具体的には MC 炭化物を中心に炭化物の微細分散化と硬さの適正化により破壊力学的特性の改善を行った。この結果、Fig.13 に示すとおり、き裂の進展が開始する下限応力拡大係数幅 (ΔK_{th}) が向上し、き裂の進展速度 (da/dN) が小さくなり、最終的に不安定破壊する疲労破壊じん性値 (K_{cf}) が向上してき裂伝播特性が著しく改善された。本材料は、棒鋼及び線材の粗圧延機用に適用し、Fig.14 に大量圧延した後の従来材との比較でロール表面肌を示すが、耐クラック性ならびに耐スポーリング性において改善がなされた。本技術は、ホットストリップミルの仕上げ後段圧延機での大圧下圧延による微細粒鋼の圧延の実現にも寄与した。

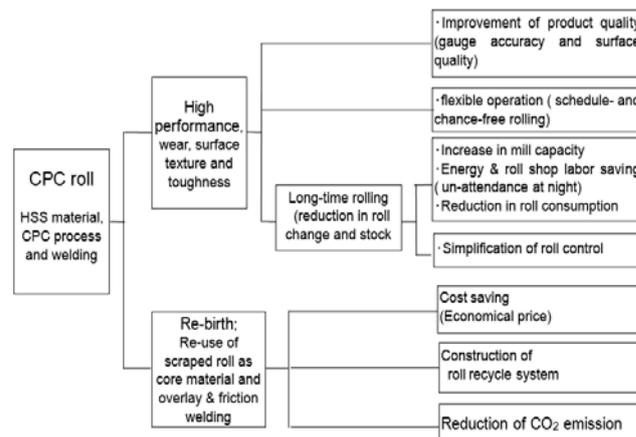


Fig. 15 Benefits obtained by introduction of CPC rolls with re-birth into rolling mill.

5. 得られた成果と今後の方向性

CPCロールの主な利点と得られた成果をFig.15に要約する。CPCロールは優れた性能、特に極めて小さな摩耗及び美しいロール表面肌を示す。CPCロールの出現により、ロール性能は著しく向上し、これにより、①長時間連続圧延、②圧延操業の自由度の拡大が可能になるなど圧延分野においても多くの成果が得られた。一方、優れた結果が得られたが工場間で違いがあり、引続きロール材の更なる機能向上や、CPCロールの特性を活かした圧延技術が望まれる。また、当社の技術的特徴を生かした再生技術によるCO₂発生量の削減に代表されるように、社会的要求に応えつつ、高性能ロールを経済的に供給していきたい。

参考文献

- 1) 倉橋隆朗ほか：塑性と加工 31-352(1990), p632
- 2) 日本特許 241118 号
- 3) 実用新案第 830886 号
- 4) 富士工業所 20 年の歩み(1975),p163
- 5) 日本特許 552637 号, US 特許 3455372
- 6) M.Hashimoto : Rolls for the Metalworking industries, ISS(2002),p182
- 7) 株式会社フジコー パンフレット
- 8) 滝川浩ほか：新日鉄技報 364(1997),p60
- 9) 田中拓ほか：新日鉄技報 376(2002),p.74
- 10) 坂本眞一ほか：フジコー技報 3(1995),p10
- 11) 坂本眞一ほか：フジコー技報 4(1996),p20
- 12) 橋本光生ほか：新日鉄技報 355(1995),p76-83
- 13) 坂本眞一ほか：フジコー技報 4(1996),p24
- 14) 大野京一郎ほか：フジコー技報 10(2002),p48
- 15) M.hashimoto et al., : AISTech2011(2011),p1793
- 16) 国際公開特許 WO2014/168142
- 17) 姜孝京ほか：フジコー技報 15(2007),p38
- 18) 日本特許第 5025315 号