

# 技術論文

## 連続鋳掛け法の開発及び高機能複合材料の実用化

### Development of CPC Process and Practical Application of High-performance Composite Material



代表取締役会長  
博士（工学） 山本 厚生  
Atsuo Yamamoto

#### 要 旨

連続鋳掛け法（CPC 法）は当社が独自に開発した高機能複合材料を製造する画期的な製造法であり、各種ローラー及びロールの製造に用いられている。とりわけ 1990 年代に日本で実用化された高速度工具鋼系（ハイス）ロールの開発において注目され、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との評価をいただいた。本ロールは従来比 5 倍以上の極めて優れた性能を発揮し、圧延製品の品質向上とともに圧延操業上のロール起因の制約が大幅に解消され、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、使用済の同ロールを再生する技術を開発し、経済的なコストで高性能ロールを実現した。この結果、ロールの完全リサイクルシステムを構築し、CO<sub>2</sub> 排出量を 55% 削減して社会的要求に込えている。

#### Abstract:

The continuous pouring process for cladding (CPC process) is epoch-making manufacturing method for high-performance composite materials originally developed by FUJICO CO.,LTD., and it is used to various rollers and rolling mill rolls. Especially, it attracted attention in the development of high-speed tool steel type rolls that were put into practical use in Japan in the 1990's. it was evaluated as an ideal method for composite rolls that can freely manufacture high-performance materials and adopted a strong core material. CPC rolls display the excellent performances more than 5 times for the conventional rolls. 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 roll contributed to the progress of the rolling technology. Recently 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 has established a complete recycling system and the reduction of CO<sub>2</sub> emissions by 55%, and they are responding to social demands.

Keywords: rolling mill roll, cladding, high-speed tool steel, hot rolling, wear, toughness

#### 1. はじめに

当社は製鉄工程における鋼塊製造に使われていた鋳鉄製鋳型の補修技術を開発して立社した。本技術は当時は困難とされていた鋳鉄の溶接を可能とし、鋳型関連コストを 1/3 程度に削減するとともに資源保護に貢献する画期的なものであった。その結果、国内の主要製鉄所より高い評価と信頼を得て招聘され、1952 年の創業以来グループ会社を含め事業を拡大した。一方、1970 年代に登場した連続鋳造法の急速な普及によ

り、鋳型を用いた鋼塊製造が姿を消すことになり、新しい事業基盤の創出が急務となった。そこで、製鉄所構内の付帯作業やメンテナンス事業に業態を移行するとともに、難しい材料の溶接技術をもとに、耐摩耗性ならびに耐食性を高めた複合商品の製造に積極的に取り組む。この結果、肉盛溶接法、溶射法、鋳掛け法による種々の商品を開発し、提供することができた<sup>2)</sup>。さらに、これらの複合化技術の蓄積を集約し、連続鋳掛け法（以下 CPC 法と称す）<sup>3)</sup>を独自に開発し

た。この結果、熱延工程におけるランナウト・テーブルローラーをはじめ各種ローラーが実用化され高い評価を得た。また、1980年代末の熱間圧延分野において、耐久性（摩耗、肌荒れ）とともに高負荷圧延に耐える強靱性の兼備ならびに向上が要求され、多合金系白鑄鉄（いわゆるハイス）ローラーが日本で開発され普及した<sup>4)</sup>。その開発過程において多くの複合製造法が試みられた中で、CPC法は最も適した製造法とされ、高機能ローラーが製造可能であると評価されている<sup>5)</sup>。

そこで、本報では当社が独自に開発したCPC法を概説し、本法を用いて開発された製品について、品質および実機使用での性能を紹介する。さらに、近年の最大の社会ニーズである環境保護ならびにカーボン・ニュートラルへの貢献について紹介する。

## 2. CPC法の開発

### 2.1 歴史的背景と開発推移

ローラーおよびローラーには耐摩耗性や耐食性が強く求められ、高炭素・高合金鑄鉄が広く使用されている。一方、強靱性を兼備することが望まれることも多いが、これまで実用化された材料ではこの両者を単一材料で兼備することが難しかった。そこで、これまで多くの複合化プロセスが試みられ、1960年代に実用化された遠心鑄造法<sup>5)</sup>が普及した。同法はその後鑄鉄系に限ることなく、鋼系およびアダマイト系材料（C含有量が1.2%～2.2%程度の鑄鋼と鑄鉄の中間的材料）<sup>6)</sup>に、さ

らには一体型ロールのみならず組立式ロール<sup>7)</sup>の中空スリーブの製造にも広く適用され、現在もロール製造法の中核をなしている。しかしながら、複合材料の製造においては鑄鉄ならびに合金鋼を外層（肉盛）材として採用する場合には、健全な境界を形成するために芯材（内層）には融点の低い鑄鉄を採用せざるを得ず、強靱性において大きな制約があった。また、芯材が高Cであるため境界の組織偏析及び脆弱化が生じ易く、課題が残った。そこで、耐久性と強靱性を兼備する複合ロール製造法の開発要求が生じた。前述のとおり、ハイス系の複合ロールの実用化においては、耐摩耗性と強靱性の兼備ならびに向上が強く望まれ、新しいロール製造法への期待が高まった。

当社は前述したとおり実用化された鑄鉄製の鋼塊鑄型の補修技術の確立を経て、鉄鋼製造用ローラーへの鑄鉄材料の肉盛溶接による補修再生を実用化した。さらに、肉盛層の均質性及び肉盛効率の改善が強く望まれ、肉盛効率の向上と肉盛材料の自由度の拡大を目指して改善を進めた。その推移をFig.1<sup>8)</sup>に示し時系列的に述べる。肉盛溶接は先ず横式(Fig.1a)でスタートした後、槽式縦式肉盛溶接(Fig.2b)を採用した。次に自動回転降下式(Fig.1c)とし、さらにアーク熱を利用した鑄掛け肉盛方式(Fig.1d)に移行した。その後、連続鑄掛け方式(Fig.1e)とし、高周波誘導加熱装置を導入し(Fig.1f)、現在のCPC法の原型となった。

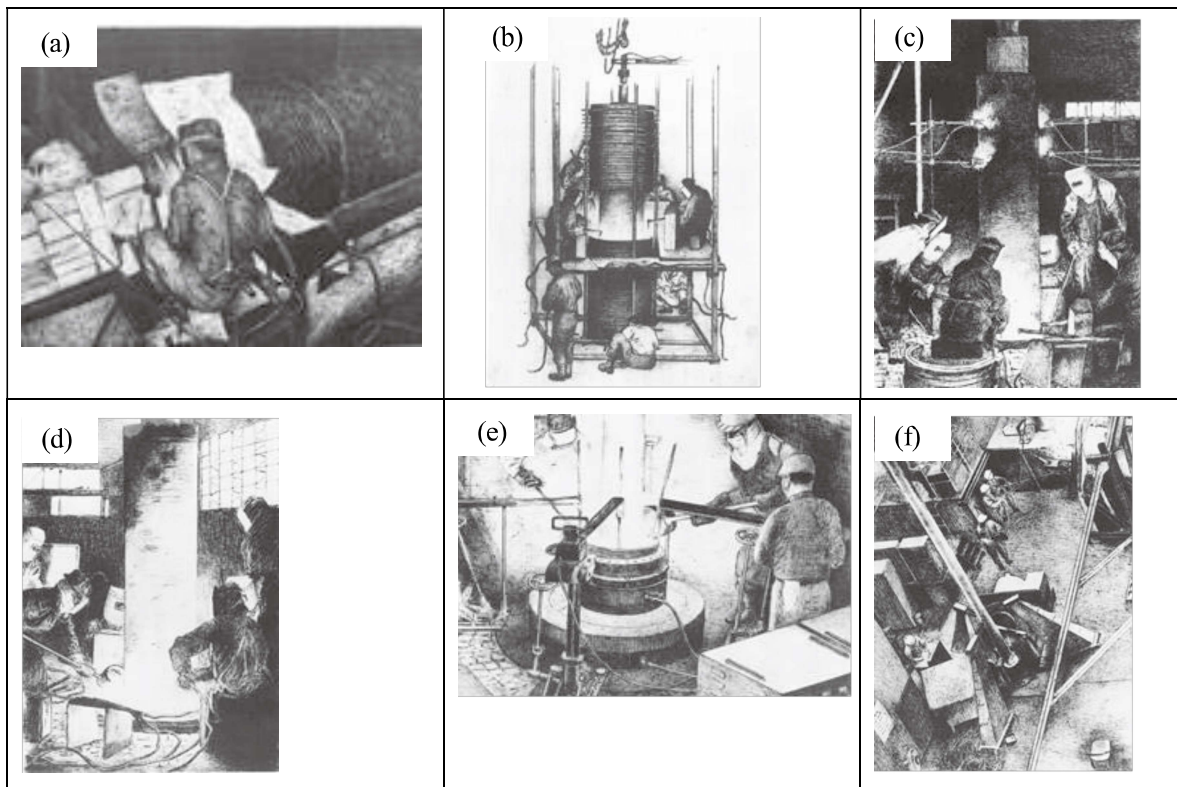


Fig.1 Development process of CPC-process, (a) conventional over-laying welding, (b) scaffold type vertical overlay welding, (c) rotation descent overlay welding, (d) rotation descent type cast welding, (e) same method cast welding with arc heating, (f) continuous pouring cast welding with induction heating.

## 2.2 CPC 法の理論的解説

### 2.2.1 溶湯の清浄性<sup>8)</sup>

肉盛材料（ロールおよびローラーの場合には外層材とも呼ばれる）は大別して鉄系と鋼系の2種類があり、それぞれの溶湯の清浄性の確保について述べる。

まず主に採用される鉄系溶湯の清浄性について述べる。鉄系には酸素との親和力が高いC, Si, Mnがかなりの量含まれている。したがって、溶湯中に侵入した酸素はこれらと反応して氧化物となりやすい。Ca, Mg, Al, Ti等の強酸化性合金元素を含有していない通常の鉄系では、大気圧下においてSiO<sub>2</sub>ならびにMnOの還元平衡温度より高い1823K(1550°C)程度以上の高温では、溶融鉄内には炭素(C)が飽和状態まで含有されている。したがって、酸化反応と還元反応が同時に起こり、飽和状態のCのため酸化反応で生成された氧化物は直ちに還元される。溶融鉄内のMnを引例する。

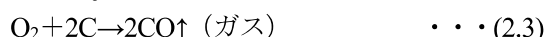
酸化反応により



還元反応により



上記の両反応が同時に起きるので、その和をとり両辺より重複する2Mnおよび2MnOを削除すると次のとおりである。



したがって、

- ① 溶融鉄内のCは常に酸化されて常時CO↑ガスとなって燃焼している。
- ② COガス↑が常時発生するため、溶湯を高温に保持して湯の流動性を確保し、ガスを大気中に上昇させねばならない。なお、ガスが大気中に上昇し得ない場合は肉盛層中に鑄巣が発生する。
- ③ C以外のMnや他の合金成分には増減がない。Mnとともに鉄系中に多く含有されるSiについても、同様である。

次に、鋼溶湯における清浄性について述べる。鋼には鉄系のように飽和C%ではなく少量のCしか含んでいないので、自己のCで氧化物を還元するいわゆる自己脱酸の力がない。したがって、溶融鋼の表面には溶融滓（スラグ）を構成して大気中の酸素と遮断する必要がある。また、溶融鋼は種々のガスを吸収しており、凝固時にこれ等のガスを吐き出すため、溶湯温度を高温に維持することにより酸化を促進するとともに流動性を良好にして、大気中に逃さなければ肉盛層内にガスによる鑄巣として残る。

### 2.2.2 凝固組織

肉盛速度の確保を目的に連続鋳造方式を採用する。連続鋳造法は一般の鉄鋼製造<sup>9)</sup>および一部鉄系材料の鋳造<sup>10)</sup>で採用されているが、いずれも単一材料の鋳造である。一方、本法においては二種の材料による複合

材料の製造を行う。すなわち、溶湯下方に緩衝材の黒鉛を挿入した水冷鋳型を設置し、芯材との間に溶湯を補給しながら凝固させ、下方に引抜き複合材料を製造する。製品は断続的に引抜き、溶湯表面との間に相対運動を行い、オシレーションを製品表面に付与する。肉盛部については水冷鋳型と芯材両者による抜熱に加えて、凝固した下方の凝固肉盛層による抜熱により肉盛層を形成させていく。鋳型と芯材の間隙における肉盛材の凝固の模式図をFig.2に示す。Fig.2(a)に理想的な凝固形態を示すが、凝固界面を下方に凸状のなだらかなU字曲線を形成し、維持することが望ましい。これは肉盛層内に最終凝固部を生成させず、常に上方の溶湯を凝固界面に補給することで押湯効果を付与し、凝固収縮巣やガス巣の生成を抑制させ、健全な肉盛層を形成させる。したがって、水冷鋳型、芯材、下方の凝固層からの冷却と十分な溶湯熱量、さらに引抜き速度とのバランスにより良好な界面形状を維持させることが重要である。なお、引抜き速度には限界があり、これを超える高速で引き抜いた場合には、鉄鋼製造における連続鋳造と同様に凝固界面の形状はFig.2(b)に示すようなV字状となり、肉盛層内部に最終凝固部が生じる。さらに、水冷鋳型からの抜熱に対して芯材の抜熱が十分でない場合には、最終凝固部が肉盛層中心付近から芯材側に移行し(Fig.2(b<sub>1</sub>), (b<sub>2</sub>))、顕著な場合には芯材表面近く(Fig.2(b<sub>3</sub>))になると考えられる。この場合には、凝固収縮巣に加えて芯材表面のコーティング材および酸化皮膜等の不純物の溶湯中での浮上分離ができず、これを咬み込むことにより鋳造欠陥を生じさせる危険がでてくる。

さて、本法は断続的に製品を引き抜くことにより、一般鋼材の連続鋳造法と同様に鋳型と製品間に相対運動を付与する。これにより凝固組織、一般的にはデンドライトの過剰な成長が抑制され、凝固割れが防止され、組織の微細化ならびに均質化がなされる。

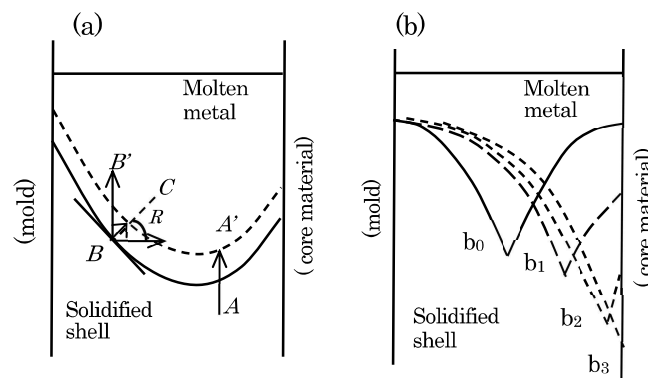


Fig.2 Interface shape and rate in continuous casting type with composite material, (a) ideal shape, (b) alternative shape.

### 2.2.3 肉盛材と芯材の溶着

本法は固相の芯材周囲に肉盛材を鋳掛けて複合材料を製作するものであり、使用時の機械的ならびに熱的負荷により境界部が破壊しないため、芯材と肉盛材は冶金的に完全に溶着していることが不可欠である。したがって、化学成分の拡散に加えて、十分な熱量による芯材表面の溶損を要する。このため、熱的には①芯材表面を 1173K(900°C)程度に加熱、②溶湯との接触時間の確保に加えて、③芯材表面に塗布したガラス質の高温溶融とともに、芯材の加熱によりその表面に生じた高融点の酸化皮膜、主に  $Fe_3O_4$  もしくは  $Fe_2O_3$  の還元を図り、溶着を容易にする。なお、溶着時の芯材の溶損は、肉盛材への希釈の観点から小さいことが望ましい。この観点で、本法は高融点の鋼系固相芯材を用いることで溶損量が抑制される。また、高炭素の鋳鉄が芯材として採用される遠心鋳造法の場合には、肉盛材料の合金元素と芯材の炭素の拡散及び混合によって富化が生じ、炭化物もしくは黒鉛の凝集した異常組織が生成されやすい。しかしながら、本法においては低Cの芯材の希釈であるため、この種の異常組織は全く生成されない利点がある。

### 2.2.4 誘導電流の利用

本法においては、肉盛金属の溶湯を高温に保持するとともに、芯材表面の一部を少量溶損させつつ溶着させるために、溶湯および固相芯材表面への熱量の供給を要する。そこで、大容量の熱を効率よく均質に供給できる誘導電流を用いる。肉盛溶湯への誘導電流の負荷は加熱と同時に溶湯の攪拌効果を有し、いわゆる電磁攪拌による溶湯内不純物の浮上分離効果があり望ましい。誘導電流による芯材表面の加熱深さ(浸透深さ)ならびに溶湯の攪拌力は、いずれも周波数の平方根に逆比例する<sup>11)</sup>。過度の溶湯攪拌は凝固界面での溶湯の流れを生じ、安定した凝固を損ない組織偏析を生ずる悪影響を及ぼし、芯材の表面加熱についても加熱浸透深さ浅く、溶損量が小さいことが望ましく、併せて熱効率の観点からも高い周波数が望ましい。

Fig.3 に本プロセスの概略図<sup>12)</sup>を、Fig.4 に鋳造状況ならびに鋳造後の製品外観を示すが、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ならびに向上の要求に合致する理想的なプロセスと言える。

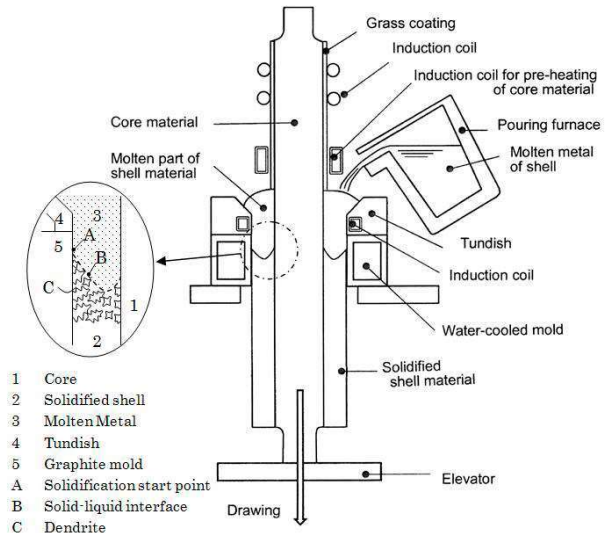


Fig.3 Illustration of CPC process.



Fig.4 CPC process in operation, (a) Overview of pouring, (b) Appearance of just as-cast product.

## 3. CPC法による代表製品の品質と性能

### 3.1 テーブルローラー

13%Cr系材料を肉盛材料に採用し、鋼系中空母材の周囲にCPC法を用いて複合スリーブを製造した<sup>13)</sup>。その切断面の写真をFig.5に示す。薄肉であるにもかかわらず、外内面と境界はほぼ同心円で製造される。境界部の顕微鏡組織の例をFig.6に示すが、左側は肉盛材(Cr系合金)、右側は母材(STKM13A)である。境界部には一般の遠心鋳造法による複合鋳鉄材料にみられるような炭化物や黒鉛の凝集や凝固収縮巣は全く認められず、健全な複合材である。

本ローラーと、遠心鋳造法で製造された代表的な従来材料である鋳鉄を実際の圧延作業に供して比較評価を行った。使用後の本ローラー表面の外観はFig.7に示すとおり美しい肌を呈す。Fig.8に示すとおり消耗は従来ローラーの1/5程度と極めて少なく、





さらに回転に伴う溶湯のスリップによる層状偏析が生じやすく製造に困難があり、抑制するために合金元素を制限する必要がある<sup>16)</sup>。一方、本法はこの種の制約が全くなく、自由に製造できる。ハイス系材料を肉盛材料に採用し、鋼系中実母材（SCM440）の周囲にCPC法を用いて複合ロールを製造し、切断面の写真をFig.10に、境界組織をFig.11に示すが、同心円の健全な複合材となっている。

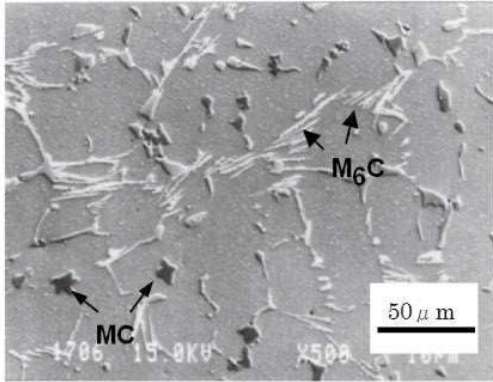


Fig.9 Typical microstructure of high speed steel tool type shell material manufactured by CPC process.

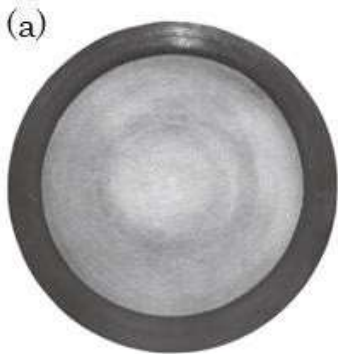


Fig.10 Sectional macrostructure of roll manufactured by CPC process.

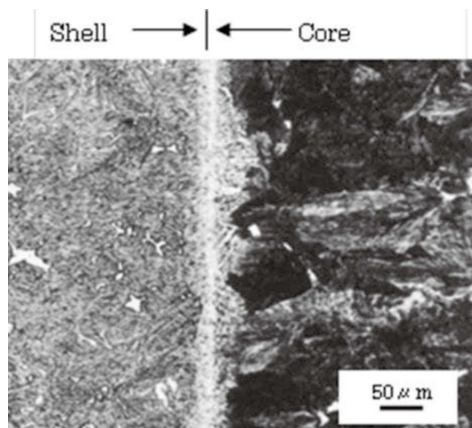


Fig.11 Microstructure of CPC roll boundary.

次に、CPCロールが最も普及し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<sup>17)</sup>。

先ず本ロールの普及の契機となったホットストリップミル仕上げ圧延用ロールについて、最も重要な摩耗について調査し、圧延負荷をパラメータ化して材質別の比較をFig.12に示す。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.13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皮膜（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少なく抑えられた。さらに、酸化膜の成長を抑える特殊潤滑油<sup>18)</sup>の併用により長時間連続圧延を実現した。

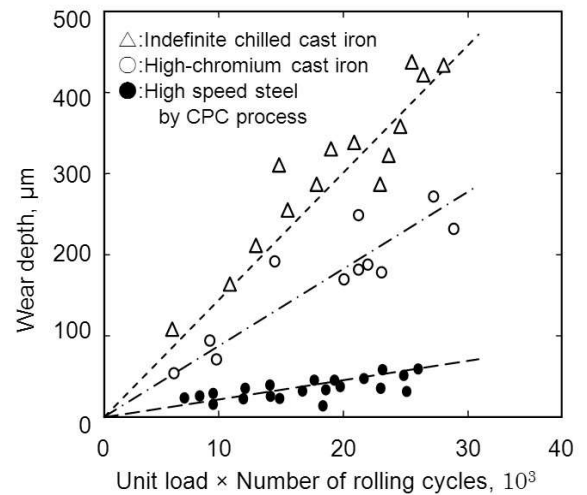


Fig.12 Wear of rolls during finish rolling in hot strip mill.

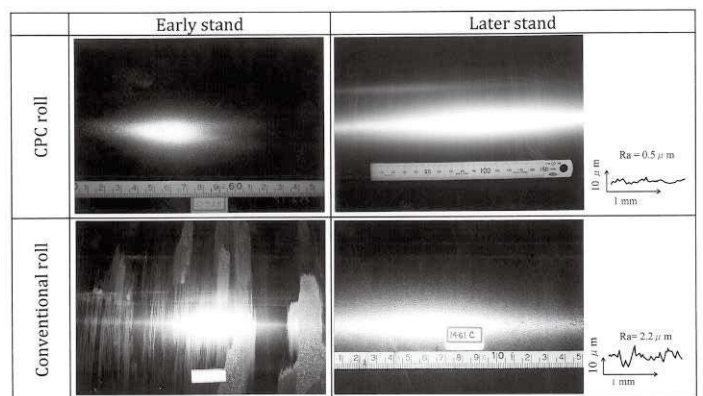


Fig.13 Comparison of surface appearance of rolls used in hot strip finishing mill, conventional roll: high-chromium cast iron (early stand) and indefinite chilled cast iron (later stand).

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<sup>14)</sup>。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.14 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。

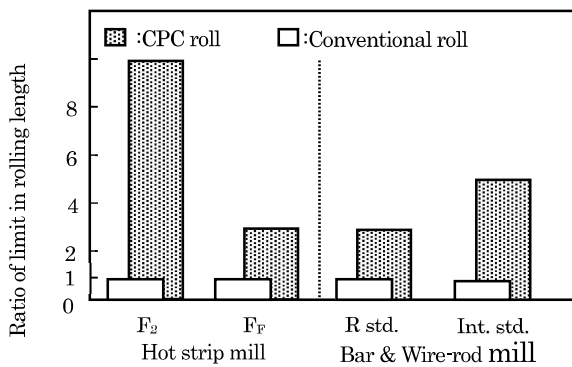


Fig.14 Change of roll performance CPC rolls for typical rolling mills.

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、ロールの材質及び管理面での改善に加え、圧延操業の適正化を進めてきたが、さらなる改善が望まれる。

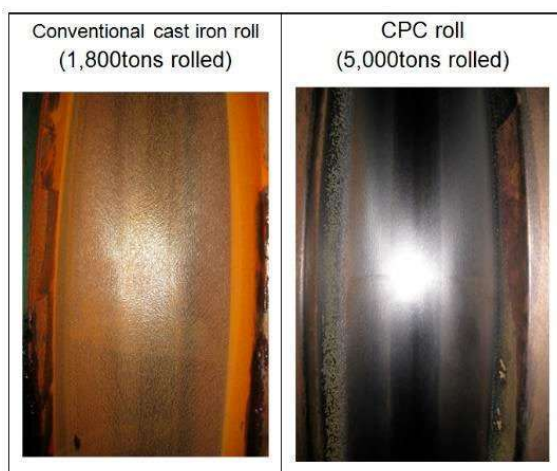


Fig.15 Comparison of surface appearance of rolls used in bar mill 10th stand.

次に棒鋼、線材圧延用ロールについて述べる。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ため、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.15 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、従来ロールの 3 倍近い大量圧延にもかかわらず美しいロール肌を呈している。Fig.14 中に併示したとおり、性能向上による連続圧延の拡大がなされた。なお、高い性能を維持するには十分な冷却水が不可欠である。また、高負荷での過剰圧延時には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。

#### 4. 最近の技術開発成果と社会的貢献

CPC ロールは極めて優れた性能を発揮する一方、強靱な鍛鋼製芯材の採用はコスト増をもたらしていた。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<sup>19)</sup>を開発した。Fig.16(a)に軸部の肉盛溶接の作業状況を示す。また、同図(b)には摩擦圧接法による軸部の接合<sup>20)</sup>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 CPC 製造素材より多数本の胴部を採取し、軸部形状及び寸法が確保できる新規調達 of 軸部を接合し、最終的には所定の形状に加工される。軸部は胴部芯材に比較して小径であり、比較的安価な圧延鋼材を採用できる利点もある。生産性の向上に加えて製造コストの削減が可能となった。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。

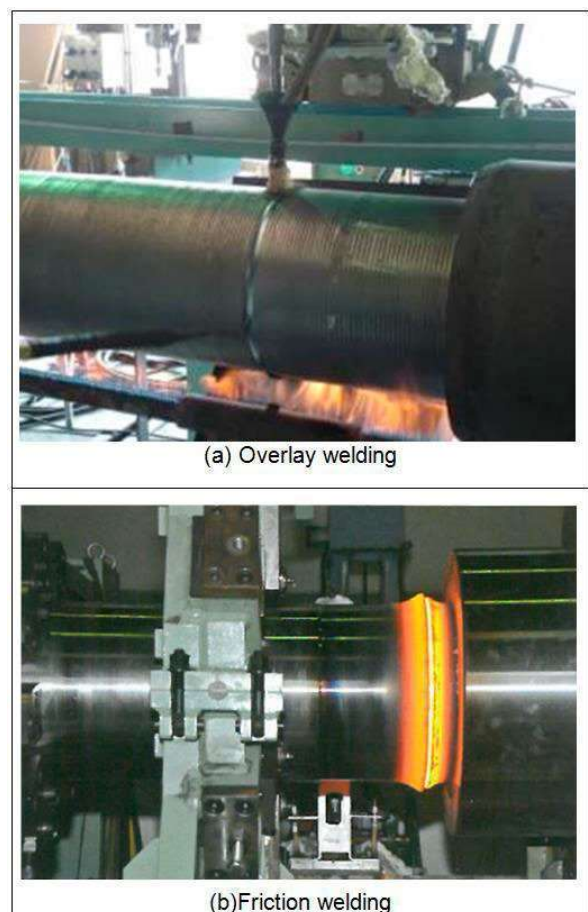


Fig.16 Overviews of re-birth operation in journal of CPC roll.



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、新規製造ロールと全く同一条件にて製造されるため性能は全く同じである。Fig.17 に再生ロールの外観を示す。製造コストはFig.18 に示すとおり本法の採用により約 20%が低減された。Fig.19 に再生によるCO<sub>2</sub> 排出量の削減を示すが、約 55%削減された<sup>19)</sup>。

CPC ロールの再生は経済的なコストで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完全リサイクルシステムとCO<sub>2</sub>排出量の著しい削減を確立し、新しいロールはまさに ECO タイプのロールである。



Fig.17 Apparatus of re-birthed CPC roll for hot strip rolling.

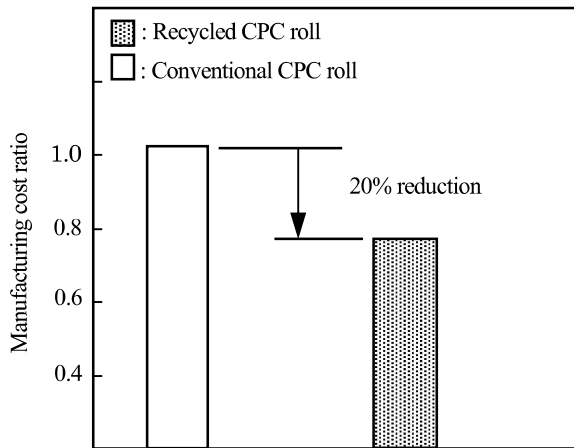


Fig.18 Change of manufacturing cost by re-birthing of CPC roll.

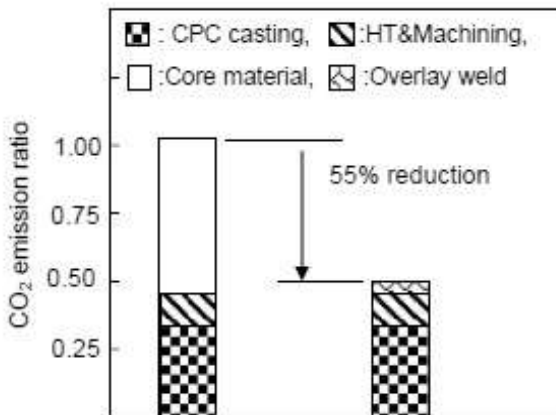


Fig.19 Reduction of CO<sub>2</sub> emission with re-birth of CPC roll.

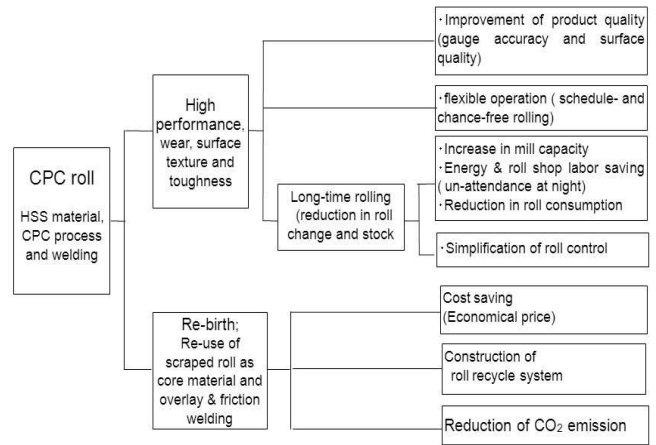


Fig. 20 Benefits obtained by introduction of re-birthed CPC rolls with re-birth into rolling mill.

### 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.20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、大きな成果が得られたが圧延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CO<sub>2</sub>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) 日本特許 241118 号
- 2) 実用新案第 830886 号
- 3) 日本特許 552637 号, US 特許 3455372
- 4) 倉橋隆朗ほか：塑性と加工 31-352(1990) 632
- 5) Rolls for the Metalworking industries, ISS (2002 ) 181
- 6) 宮下格之助：鉄と鋼 57-5(1971) 696
- 7) Rolls for the Metalworking industries, ISS (1990) 121
- 8) 富士工業所 20 年の歩み(1975) 163
- 9) 日本鉄鋼協会編：第 3 版鉄鋼便覧Ⅱ製鉄・製鋼、丸善(1979),pp611-670
- 10) 鋼鋳物・鋳鉄鋳物：地人書館(1979),pp36--371
- 11) 高橋勘次郎ほか：高周波の基礎と応用、東京電機大学(1990) 4
- 12) 株式会社フジユー パンフレット
- 13) 山本厚生ほか：鋳造工学 91-2 (2019) 94
- 14) Rolls for the Metalworking industries, ISS (2002) 187-189
- 15) 松原安宏ほか：鋳造工学 69(1997) 917



- 16) T.Tanaka et.al., 39th MWSP Conf. Proc. ISS, Vol. XXXV, (1998) 435-444
- 17) 山本厚生ほか：フジコー技報 No.26(2018)26
- 18) 伊原ほか：CAMP-ISIJ 15(2002) 309
- 19) A.Yamamoto et al: Mater.Trans.60(2019) 770
- 20) 国際公開特許 WO2014/168142

本報は著者が九州大学に提出し、学位(博士[工学])を授与された論文の主たる内容に一部加筆したものである。また、写真は本法の開発及び実用化を協力して行った当社創業者である父山本秀祐(左)とともに、本法による製品の製造を行っている山陽工場の建設(岡山県浅口市 1974年)に当たり、予定地を視察した折のものである。

