

熱間圧延におけるコイラー周り用ロールの開発

Development of Rolls for Coiler Equipments at Hot Strip Mill

博士（工学） 園田 晃大
Akio Sonoda

1. 緒言

製鉄所での熱間圧延設備におけるコイラー設備は、圧延された鋼板をコイル状に巻き取るためのものである。本稿における熱延コイラー周り用ロールとは、鋼板を巻き取るための押さえであるラッパーロールや、巻取り時の鋼板の誘導や張力を確保するための上下ピンチロールを指し、一般的に、耐腐食性、耐焼付き性、耐摩耗性、耐熱衝撃特性及び耐打ち疵性など多種の耐久性能が要求されている¹⁾。これは、コイル状に鋼板を巻き取る際には、高温の鋼板とロールの接触によって起きる現象のためである。

熱延コイラー周り用ロールの性能が向上すれば、設備のメンテナンスに費やす時間の短縮、コスト削減、鋼板品質の観点でも当然優位に働く。ロールを使用する製鉄所にとっても熱延コイラー周り用ロールの位置づけは非常に重要な要素となっている。

当社では、連続注入クラッド法である CPC 法 (Continuous Pouring process for Cladding) によって、熱延コイラー周り用ロールの材質改善の取り組みを行ってきた^{2)~4)}。CPC 法は、1 層盛りのため材質の偏析が少なく、肉盛溶接のようなビード模様の出現がないことや、厚肉盛が容易であることから、耐腐食性や耐衝撃性が必要な熱延コイラー周り用ロールの製造に適した製法といえる。

本稿では、熱延コイラー設備で用いられる、ラッパーロールと上下ピンチロールについて、当社の CPC ロール取組み事例として、材質開発によって生み出されたラッパーロール用材質 FKS-KC5 (以下、KC5 と記す) と、下ピンチロール用材質の FKS-KC7 (以下、KC7 と記す) について、代表的な特性や適用されている実機ロールへの使用状況を報告する。

2. 熱延コイラー設備用ロールの使用条件

熱延工程のコイラー設備とは、鋼板が加熱炉、粗圧延および仕上げ圧延、ホットランテーブル上を通過した後、コイル状に巻き取られる設備のことである。このコイラー設備は、一般的に、上下ピンチロール、ラッパーロール、マンドレルおよびコイル抽出機からなり、この代表的な構成図を Fig.1 に示す⁵⁾。

仕上げ圧延機を通過した鋼板は、板の速度に対して 5~20% のリード速度で回転する上下ピンチロールによりマンドレルへと送り込まれる。この上下ピンチロールは、通常 10~20% のオフセット角にセットされており、ピンチロールに噛み込んだ鋼板は先端が下に曲げられ、ラッパーロールとマンドレルの間へ導かれる。このラッパーロールは、鋼板の先端をマンドレルの周囲に沿って確実に搬送する役目を果たし、適切な圧力で鋼板をマンドレルに押し付ける。このため、鋼板に曲げ変形が生じ、その結果、巻き取られ易い形状となる。

熱延コイラー周り用ロールは、鋼板との接触や衝突によりロール表面に損傷を受けるばかりでなく、繰り返しの加熱冷却を受ける過酷な使用環境下で使われている。そのため、ラッパーロールや上下ピンチロールに要求される特性としては、耐焼付き性、耐摩耗性、耐打ち疵性、耐熱衝撃性、耐腐食性などが挙げられる。

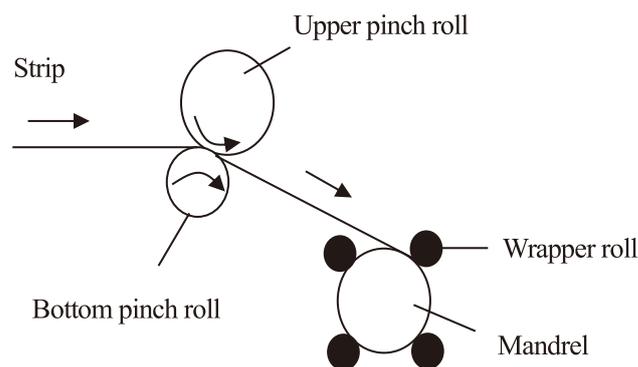


Fig.1 Construction of down coiler at hot strip mill.

特に、下ピンチロールでは、ラッパーロールとは違い、鋼板の押付けによる張力付与が常時必要のため、高温の鋼板と常に接触しロール表面温度が上昇する点では、下ピンチロールの方がラッパーロールよりもより過酷な使用環境といえる。

3. ラッパーロール

3.1 ラッパーロールの現状

現状、各製鉄所におけるラッパーロールには、Fig.2 (a) に示すような溶接肉盛りを下地として、表面に耐摩耗材である Ni 基自溶性合金を基材とした溶射ロールが多く使用されている。この溶射ロールは耐摩耗性や耐焼付き性、耐腐食性などの特性が非常に優れているため、ラッパーロール交換周期の長期化に大きく寄与している。ただし、溶射被膜そのものが耐衝撃性を持たないことから、下地に肉盛り溶接を処理して耐衝撃性を補っていることが特徴であり、一部の編鋼板を巻取るラインなど、ラッパーロールに高負荷が掛かる箇所では、不特定な時期に溶射被膜が剥離する懸念から使用を控えられていることも実情である。

Fig.2 (b) には、CPC ロールについても示すが、硬化層の厚さは、溶射層は1~2mm程であるのに対して、CPC層は10mm以上の厚さがあり、肉厚である事が特徴である。

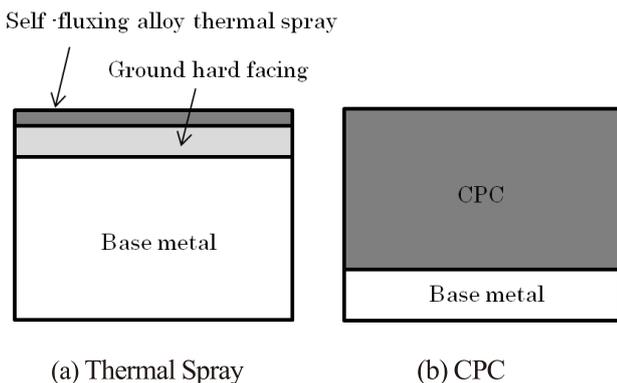


Fig.2 Cross section of thermal spraying roll and CPC roll.

3.2 CPC 法で製造したラッパーロール

当社では、CPC法と特殊熱処理法を用いて Table1 に示す組成の合金 KC5 としてラッパーロールの製造を行っている⁹⁾。Fig.3 に示すように、Cr 量と腐食量には大きな関係があり、10%程度まで Cr 量が増加するとともに腐食量は減っていることがわかる。KC5 では少なくとも 10%以上の Cr 量は確保することとし、製造上での多少の成分バラツキがあっても十分に耐腐食性を確保できる 14%Cr の成分を基本としている。さらに、Co や Cu の添加や、Si を比較的多く添加することによって基地の耐熱・耐腐食性や耐酸化性の強化を図っている。また、MC 炭化物生成元素として Nb を適量添加することにより、粒界及び粒内へのクロムカーバイドの析出を抑制させ、固溶 Cr 減少による耐食性の低下防止を狙った。

Fig.4 に KC5 のマイクロ組織代表例を示す。基地は焼戻しマルテンサイトで構成されており、旧 γ 粒界には M_7C_3 炭化物が観察される。また、基地(旧 γ 粒内)には 2 次析出炭化物が粒状に観察される。

Table 1 Typical chemical composition of KC5

	Composition (wt%)							
	C	Si	Cr	Ni	Mo	Co	Cu	Nb
KC5	0.64	2.94	13.8	2.73	0.8	1.08	0.96	0.36

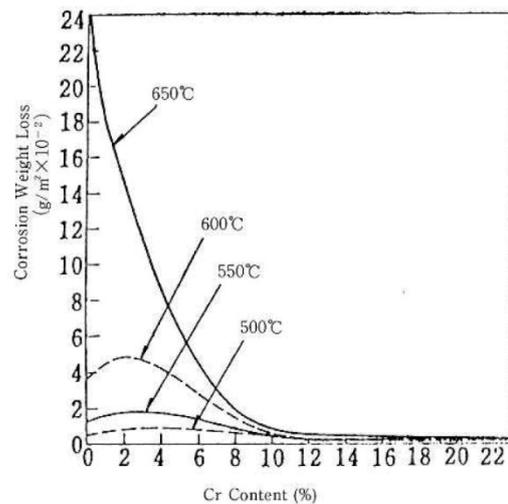


Fig.3 Relation between Cr content and corrosion weight loss in superheated steam.¹⁾

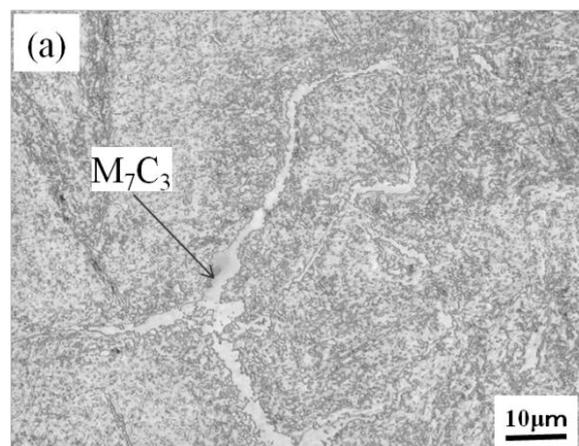


Fig.4 Typical microstructure of KC5.

これら組成やマイクロ組織で構成された KC5 は、ラッパーロールでの使用時に必要な特性である耐焼付き性、耐摩耗性、耐腐食性等を当社従来の CPC 材質と比べて高レベルを有している。

さらに、CPC ロールの特徴としては、10mm 以上厚肉の硬化層を有しているため、耐衝撃性に優れており、使用中も硬化層が剥離するという懸念は無いという事が挙げられる。そのため、厚肉用縞鋼板のコイラー設備のようなラッパーロールに高負荷が掛かる環境においても、CPC ロールは問題なく使用されている。

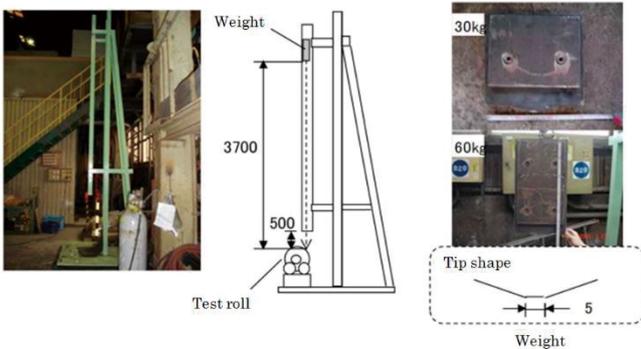
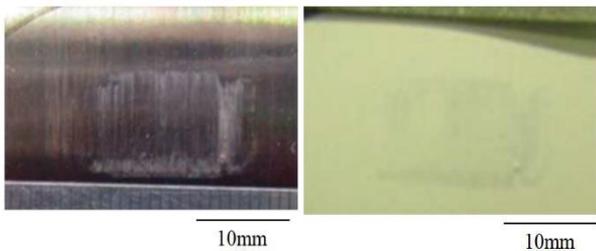
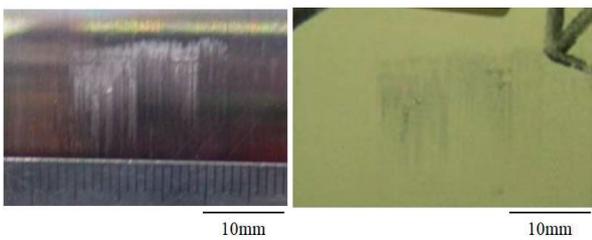


Fig.5 Appearance of drop weight impact test.



(a) Drop weight impact test at 30kg

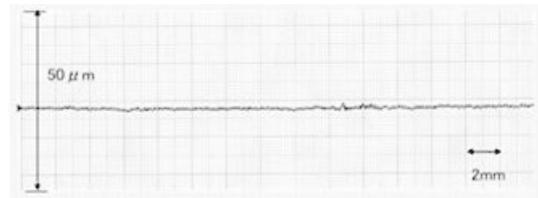


(b) Drop weight impact test at 60kg

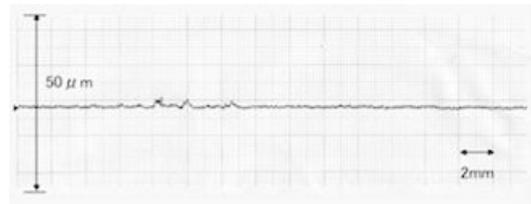
Fig.6 Roll surface after drop weight impact test

ここで、耐衝撃性を評価した試験として、Fig.5 に示すような落重衝撃試験を行った結果について報告する。重さ 30kg および 60kg の鋼板を模擬した相手材を 3.7m の高さから落下させ、ロール状のサンプル(KC5)に衝突させる。この衝突エネルギーは、相手材が 30kg のとき、鋼板が 482m/min で衝突したエネルギーに相当し、相手材が 60kg のときは鋼板が 681 m/min で衝突したエネルギーに相当する。Fig.6 は、衝突疵の深さや割れの有無について評価した結果であるが、衝突疵の外観 (左写真) と、浸透探傷検査 (右写真) を

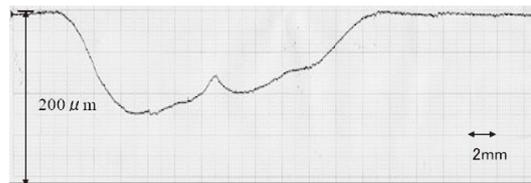
実施したところ、衝突による割れは確認されなかった。さらに、Fig.7(a)、(b)は KC5 の衝突疵の形状を測定したものであるが、凹状の変形は確認されなかった。Fig.7(c)は、溶射層のみのサンプルにおける衝突疵の形状であるが、約 130 μ m の凹みが確認された。衝突による応力 (300MPa~400MPa と推定) が溶射層下の母材まで作用したため、母材が変形した結果と考えられる。溶射層自体は硬質で高強度であるが、耐衝撃性には厚さの要素が重要であることが確認された。これらの結果からも、CPC ロールは厚肉であるため、ラッパーロール実機における鋼板の衝突においても、問題なく使用できることを裏付けている。



(a) Drop weight impact test at 30kg (KC5)



(b) Drop weight impact test at 60kg (KC5)



(c) Drop weight impact test at 60kg (Thermal spray)

Fig.7 Roll surface shape after drop weight impact test

3.3 ラッパーロール使用例

Table 2 に製鉄所におけるラッパーロール使用実績の一例を示す。ロールに掛かる負荷が比較的到低い製鉄所では、溶射ロールが CPC ロールと比べても摩耗量が少なく長期に使用可能である。なお、当社が実施した熱間摩耗試験からも、耐摩耗性は溶射材の方が KC5 よりも約 1.6 倍優れていることがわかっており、耐摩耗性では溶射ロールが CPC ロールよりも優位である。ただし、CPC ロールは、溶射ロールが使用で

きない高負荷の製鉄所においても安定的に適用されており、低負荷の製鉄所と同様に、高負荷の製鉄所でも同等の摩耗量で使用可能となっていることがわかる。

Fig.8 は、ある低負荷の製鉄所における CPC ロールと溶射ロールのロール消費量（再研磨する場合は再研磨量と摩耗量を足し合わせたもの）の一例を示している。CPC ロールは、硬化層が 10mm 以上と厚肉であるため、1 本のロールを 5 回再研磨して 6 年間使用することができる。溶射ロールは CPC ロールよりも消費量が少なく、再溶射を 2 回、すなわち 3 本分のロールを 6 年間で使用することを仮定している。ロールコストの観点では、再溶射に掛かる費用よりも、再研磨に掛かる費用の方が各段に低く、約 1/20 と推定されるため、1 年あたりのロール 1 本分の費用で考えれば、CPC ロールの方が溶射ロールよりも 1.7 倍～2.0 倍程のコストメリットがあると想定される。

Table 2 Comparison results of wear resistance for wrapper Roll (mm/Month)

	Low operation load	High operation load
Thermal spraying roll	Φ0.05～0.06	-
CPC(KC5)	Φ0.08～0.1	Φ0.06～0.1

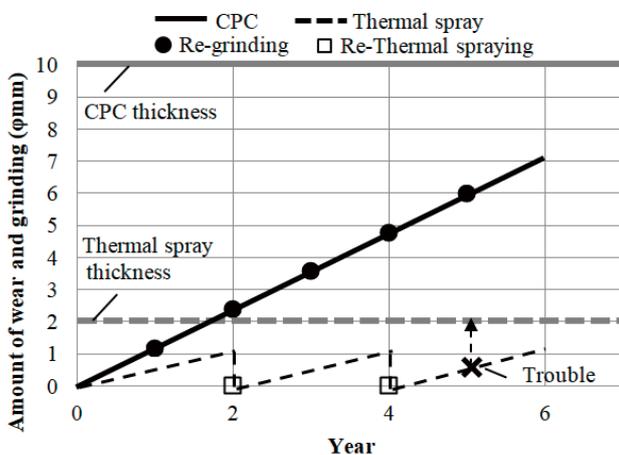


Fig.8 Amount of wear and grinding at CPC roll and thermal spraying roll.

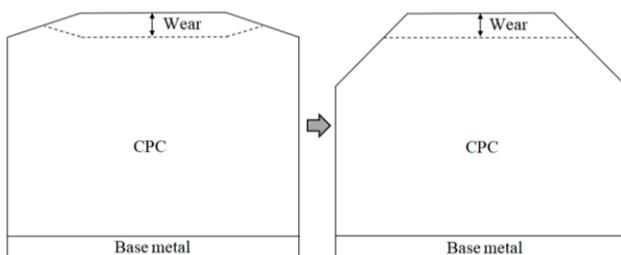


Fig.9 Tapered shape of CPC roll.

また、溶射ロールの場合、負荷条件によっては稀に発生する剥離等のトラブル (Fig.8 で×印で表示) によって、ロールが突然に使用できなくなってしまう懸念もある。硬化層の厚さが約 2mm と薄いこともあり、熱応力や、鋼板との衝突によるき裂が瞬間的に硬化層内部まで到達してしまうからである。このような耐事故性に関しては、CPC ロールの方が前述の落重衝撃試験結果や、実際に高負荷の製鉄所で使用されていることから優位であるといえる。

ラッパーロールでは、適正な押付け圧力を確保するためにテーパ形状が採用されていることが多い。ロール使用中の摩耗によって、このテーパ形状が崩れてくると、鋼板巻取り時に不具合を発生させてしてしまう場合がある。CPC ロールにおいても、適正な交換周期を超えて使用した結果、テーパ形状が崩れ、局所的な段差の影響で鋼板へ転写疵が発生する事例があった。テーパ形状を維持しつつロールを使用するには、適切なロール形状管理と再研磨するタイミングが肝要であり、それらを見極めることが使用上の課題となってくる。厚肉の CPC 層を活用し、Fig.9 のように、予め可能な限り高低差のあるテーパ形状を採用すれば、摩耗に対してもより長期にテーパ形状を維持できる可能性もあり、テーパ形状の変更も重要な要素になると考えられる。この点については、当社では各製鉄所での使用中ロールの定期的な詳細調査を行っており、ロールの最適な運用方法やテーパ形状を提案できる体制を整えて対応している。

4. 熱延下ピンチロール

4.1 下ピンチロール用材質 KC7

次に、下ピンチロール用の材質 KC7 について報告する。下ピンチロールに適用される材質には様々な特性が要求される。これらはラッパーロールの材質にも共通の特性といえる。下ピンチロールとラッパーロールの大きな違いの一つは、下ピンチロールの方は高温の鋼板と常時接触しロール表面温度が上昇しやすいという点である。そのため、高温での硬度がラッパーロールの材質よりも高いということが重要である。つまり、常温においてもラッパーロール用の材質よりも高硬度化が望ましく、ラッパーロール用の優れた諸特性は維持することを指標として材質開発を行うこととした。下ピンチロール用の材質 KC7 は、KC5 をベースとして、特殊微量元素を添加したものとなる。

ラッパーロール用材質と下ピンチロール用材質は、ともに析出硬化型ステンレス鋼であり、固溶化熱処理後に続いて析出硬化処理を行うことにより、過飽和に固溶していた析出硬化元素が析出し、高い硬度が得られる。KC5 及び KC7 の熱処理条件と硬さの関係を Fig.10 に示す (サンプル評価テスト)。いずれも 460℃～480℃の時効硬化処理で最高硬さを示しており、特

特殊元素の添加量が増加するにつれて、最高硬さも高くなる傾向が確認された。これは、主に基地中の Cr と特殊元素との析出物が多くなった影響と考えられる。特殊元素を 2.0% レベルで添加すると、高硬度は得られるものの、耐熱衝撃抵抗が大幅に低下してしまい、実機使用が困難であると判断される。そのため、0.5%~1.0% 特殊元素添加したものを下ピンチロール用の材質 KC7 とした。

Fig.11 に KC7 の熱処理後の組織写真を示す。特殊元素の添加によって、結晶粒界に共晶の析出炭化物が大きく生成されているのが特徴である。基地は、焼き戻しマルテンサイトであり、結晶粒界には M_7C_3 の炭化物が確認されている点は、KC5 と同様であるが、結晶粒内の 2 次析出炭化物は、KC5 よりも多く確認された。

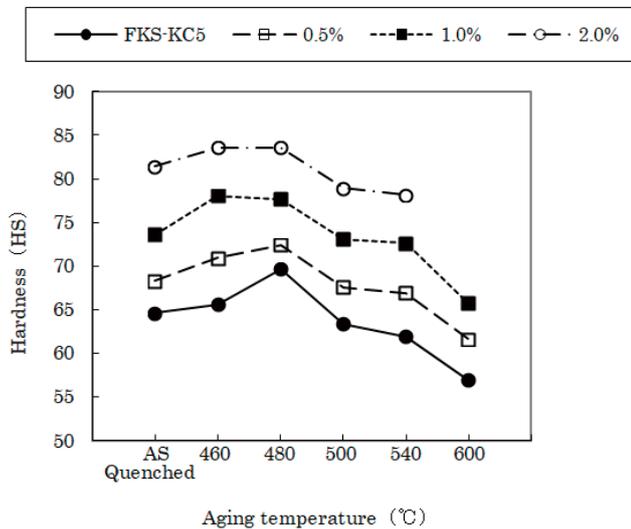


Fig.10 Relationships between hardness and aging temperatures.

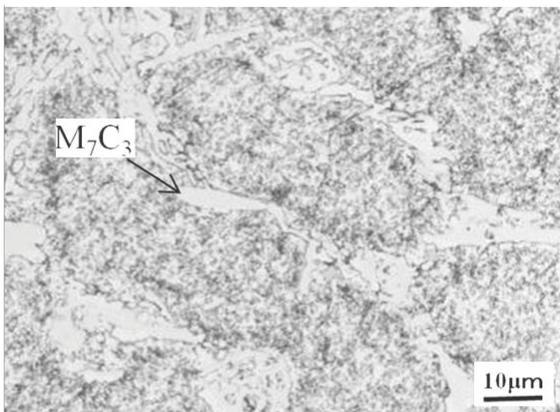
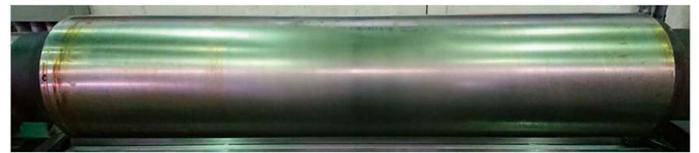


Fig.11 Typical microstructure of KC7.

4.2 下ピンチロール適用事例

CPC 法にて KC7 を表面処理した下ピンチロールは近年製鉄所にて使用され始めている。Fig.12 は、別々の製鉄所にて実際に使用されている下ピンチロールの外観写真である。それぞれ、適用された製鉄所ラインにおける従来ロールの交換周期となったタイミングでの外観であるが、ロール表面は金属光沢を維持し、肌荒れや打ち疵は確認されなかった。

本ロールは、従来ロールよりも長期の使用に耐えるものとして、今後も多くの製鉄所において使用されることが期待される。



(a) Bottom pinch roll used for mill A



(b) Bottom pinch roll used for mill B

Fig.12 Photos showing appearance of bottom pinch rolls.

5. 上ピンチロール開発状況

最後に、熱延コイラー設備用ロールの一つである上ピンチロール製造の取り組みについて紹介する。上ピンチロールは一般的に直径 900mm 以上のサイズであり、ラッパーロールや下ピンチロール（直径 400~500mm 程）と比べてもはるかに大きな直径となっている。当社では、上ピンチロールに近い大径ロールの CPC 法による製造実績も多数持ち合わせており、現在は上ピンチロール開発に取り組んでいる（Fig.13）。この上ピンチロール製造については、2024 年度中には各製鉄所へお届けする計画で開発を推進している。

このように、ラッパーロールや上下ピンチロールなど、熱延コイラー周り用ロールすべてが CPC ロールとして運用され、製鉄所における鋼板の製造コスト低減や品質向上に貢献できるように、当社では重点的に開発に取り組んでいる。



Fig.13 Photo showing typical manufacturing scene of upper pinch roll by CPC.

6. 結論

熱延コイラー周り用ロールの開発について要約すると次の通りである。

- 1) KC5 による CPC ラッパーロールは、溶射ロールより耐摩耗性が劣るものの、厚肉で再研磨しての使用が可能であることから、トータルのロールコスト面では優位である。また、溶射ロールが使用できない高負荷環境でも使用することができる。
- 2) KC5 への特殊元素の添加によって硬度の上昇が確認され、下ピンチロール用の KC7 を開発した。

- 3) KC7 による下ピンチロールは、適用された製鉄所ラインにおける従来ロールの交換周期に達しても、焼付きや疵の無いロール表面を維持しており、ロール長寿命化に期待できる。
- 4) 当社では大径である上ピンチロールの CPC 法による製造も取り組んでおり、熱延コイラー周り用ロール全体の CPC ロール化を推進している。

参考文献

- 1) 坂本、玉川、津田、森高：フジコー技報No.1(1993)9
- 2) 姜、園田、嵩、永吉：フジコー技報No.16(2008) 25
- 3) 園田、花田、肖、永吉：フジコー技報No.22(2014) 25
- 4) 園田、姜、古田、宮崎、永吉：フジコー技報No.24(2016) 24
- 5) 尾崎、姜、園田：フジコー技報No.13(2005)54
- 6) 姜、園田、永吉、山本、恵良： casting 92(2020) 521