

© 1989 ISIJ

技術報告

鋼片加熱炉用セラミックス複合材製 スキッドボタンの開発

高木 清*・内藤 肅*・小橋 正満*
井上 利夫*・平石 久志*²

Development of New Skid Buttons with Ceramic Composite Metal for Slab Reheating Furnace

Kiyoshi TAKAGI, Tadashi NAITOU, Masamitsu OBASHI,
Toshio INOUE and Hisashi HIRAISHI

Synopsis :

In a walking beam-type, furnace skid marks caused by skid buttons should be minimized, thus stabilizing slab quality and reheating performance. Not strong enough at high temperatures, the conventional cobalt-base resistance alloy develops compressive deformation after a short period of operation, entailing a gradual increase in skid marks.

In reconstructing the slab reheating furnace at the Mizushima hot strip mill from pusher-type with hot skids to walking beam-type, newly-developed 200 mm tall-profiled and 50 mm wide skid buttons of ceramic composite metal were put into service in March, 1986. These skid buttons contribute to improving slab quality by reducing skid marks, and minimizing troublesome deformation and other such damage.

Key words : skid button ; skid mark ; ceramics ; composite metal ; shadow ; heat resistant-alloy ; cobalt ; creep-deformation.

1. 緒 言

鋼片加熱炉の被加熱材には、スキッドボタンと称される金物によつて、スキッドマークと呼ばれる低温部が発生し、圧延製品の板厚および板幅寸法精度と熱原単位に悪影響を及ぼしている。

水島製鉄所熱間圧延工場¹⁾の加熱炉は、昭和45年の操業開始以来、水冷スキッドビームとスライダーとの間に断熱材を入れたホットスキッド²⁾を装備したプッシャー炉³⁾で操業を行っていた。

しかし、近年の需要家ニーズの高度化、多様化や品質、コスト競争力向上に対して、従来のプッシャー炉では対応することが困難になり、昭和59年からウォーキングビーム化の検討を開始した。ウォーキングビーム化によりスラブ裏面品質の向上や省エネルギーに関する性能は飛躍的に向上することが判明したが、従来の耐熱合金製⁴⁾スキッドボタンを装備したウォーキングビーム炉で

は、スキッドマークの大幅な低減が望めなかつた。

そこで、新しい耐熱・高強度材料を開発、適用して、水冷ビームの水冷やシャドウの影響がなくなるまで、スキッドボタンを高くし、幅を狭め、スキッドマークを極限まで小さくすることを目的とした研究に着手した。約2年間の研究期間を経て、セラミックス複合材料による新スキッドボタンを久保田鉄工株式会社と川崎製鉄で共同開発し、61年3月に熱延加熱炉へ適用した。操業開始後約2年が経過し、当初のねらいどおりスキッドマークの大幅な低減と圧縮変形の少ないスキッドボタンであることが確認された。

本稿では、スキッドマーク低減に関する伝熱解析内容と、セラミックス複合材の特質およびセラミックス複合材製スキッドボタンの特徴を中心に報告する。

2. スキッドボタンに要求される特性

代表的な熱間圧延工場のレイアウトを Fig. 1 に示す。

昭和62年10月本会講演大会にて発表 昭和63年6月13日受付 (Received June 13, 1988)

* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasakidori Mizushima Kurashiki 712)

*2 久保田鉄工(株) (Kubota, Ltd.)

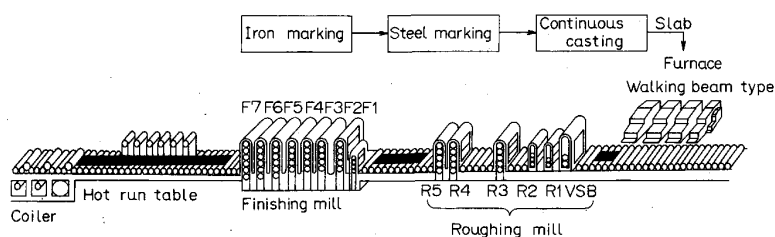


Fig. 1. Layout of hot strip mill.

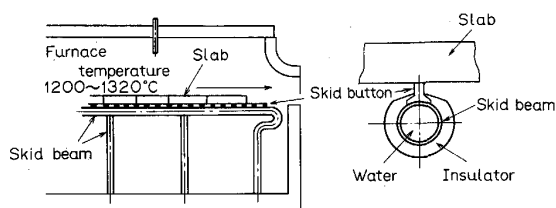
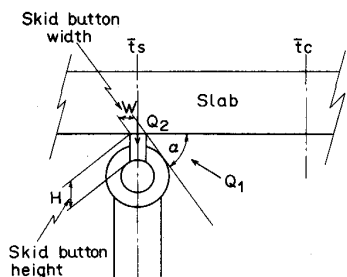


Fig. 2. Schematic view of heating furnace.



t_s : Average temperature along the slab thickness on skid button
 t_c : Average temperature along the slab thickness between skid buttons

Fig. 3. Schematic view of slab contact with skid button in a reheating furnace.

鋼片加熱炉は、前工程の連続铸造機によつて製造された鋼材を、後工程の熱間圧延を行うため、必要な温度に加熱、均熱し供給することを目的とした設備である。スキッドボタンは Fig. 2 に示すごとく、ウォーキングビーム式鋼片加熱炉内の水冷スキッドビーム直上に設置され、通常 1200°C から 1300°C の高温の炉内で鋼材を支持する金物である。スキッドボタンは水冷ビームからの影響を受けて冷却されるので、鋼材下面のスキッドボタン接触部は局部的に低温となり、スキッドマークが鋼材に発生する。このスキッドマークを小さくするには、水冷ビームからの水冷の影響を少なくすることであり、そのためには、スキッドボタンの背の高さを大きくする必要があるのである。しかし従来の耐熱鋳鋼材では、高温強度不足から、早期に圧縮変形が生じ、実炉で 1.5 年使用後の状況を Photo. 1 に示す。

一方、高温強度が高くかつ断熱特性のあるファインセラミックス焼結材の適用が試みられたが、じん性不足から鋼片との接触、非接触の繰返し機械的負荷により「割



Photo. 1. View of conventional skid button after 1.5 years of service.

れ」「欠け」の問題をもっている。

これらのことより、望ましいスキッドボタンとして、金属のじん性とセラミックスの強度とを兼ね備えた材料特性が要求される。

一方スキッドマークの発生機構について考察する。Fig. 3 に鋼片加熱炉の鋼材とスキッドビームおよびスキッドボタンの位置関係を示す。鋼材下面での熱移動を示すと次のようである。炉内燃焼ガスおよび炉壁からの放射伝熱量 (Q_1) は、スキッドビームに遮られ、ビームに近づくほど角度 (α) が小さくなり、遮られる割合(以下シャドウと称す)が増加し Q_1 は小さくなる。またスキッドボタンとの接触部は、スキッドボタンを介して、スキッドビーム冷却水への熱伝導 (Q_2) により冷却される。これらの原因により、鋼材下面のスキッドボタン接触部は局部的に低温となる。このスキッドマークを低減するためには、その発生機構から次のような構造にすればよい。

(1) シャドウを小さくし、放射伝熱量 Q_1 を増加させるために、ボタン高さ H を高くする。

(2) 接触熱伝導 Q_2 を小さくするために、ボタン幅 W を小さくする。またボタン高さが高くなれば、ボタ

ン頂部温度が上昇し、これによつても接触熱伝導 Q_2 は小さくなる。

しかしながら、いずれの場合も、ボタン頂部温度は上昇することになり、ボタン材料には過酷な負荷となることは容易に想像できる。

3. 耐熱合金製ボタンにおけるスキッドマークの限界⁵⁾

水島製鉄所熱延加熱炉をプッシャー炉からウォーキングビーム炉に改造した場合について検討を行った。既設プッシャー炉において、抽出時の鋼材長手方向の板厚方向平均温度の分布を Fig. 4 に示す。図中の t_c - t_s を本文ではスキッドマークと称する。なおスキッドビームは抽出側へシフト⁶⁾を行い、スキッドマーク低減対策を講じている。一方、ウォーキングビーム炉に改造した場合のスキッドマークシミュレーション⁷⁾の結果をボタン高さおよび幅をパラメータとして Fig. 5 に示す。既設プッシャー炉でのスキッドマークを A に示すが、ウォーキングビーム炉において、ボタン高さを 200 mm、幅を 50 mm とするならば、スキッドマークは 1/2 から 1/3 に

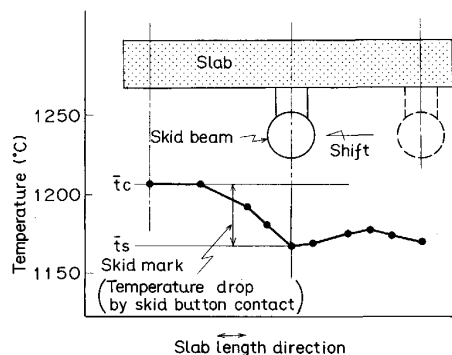


Fig. 4. Slab temperature deviation.

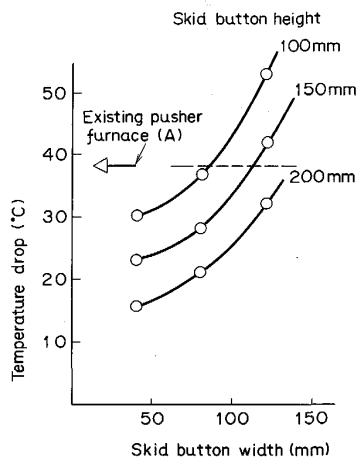


Fig. 5. Calculated values of temperature drop caused by skid beams in walking beam furnace.

することが可能である。

ところがスキッドボタンに使用している耐熱合金には熱間強度に限界があり、ボタン頂部温度での熱間圧縮強度と、ボタン面圧との大小関係によりボタンの変形が支配される。

耐熱合金の熱間圧縮強度からの制約を重ね合わせると Fig. 6 となる。すなわち、従来の耐熱合金では面圧をその熱間圧縮強度で支配される限界値以上に上げられないことから、スキッドマーク低減に限界があり、水島熱延加熱炉の場合は P 点が限界となる。この時のスキッドボタン高さは 120 mm、幅は 80 mm である。したがって従来の耐熱合金製ボタンを装備したウォーキングビームのスキッドマークの性能は、既設プッシャー炉に比較して大幅に向上することはできないことが明確である。

4. 新耐熱材料の開発実験とその結果⁸⁾

4.1 新耐熱材料の具備すべき条件

新耐熱材料を開発するうえで、スキッドボタンとして

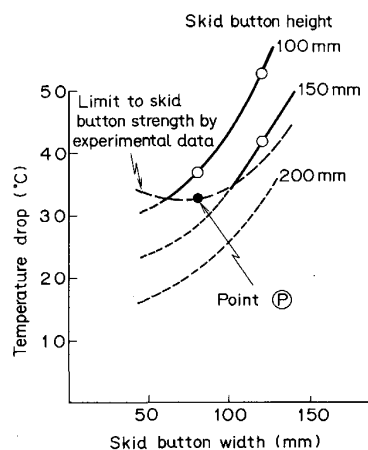


Fig. 6. Calculated value of temperature drop in walking beam furnace in consideration of skid button strength.

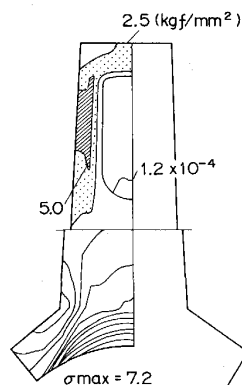


Fig. 7. Principal stress of skid button obtained by FEM analysis.

必要な強度特性値を定量化することが必要である。ボタンの熱的および機械的負荷条件を考慮した境界条件を設定し、ボタンが鋼材と接触する時に発生する応力解析結果を Fig. 7 に示す。炉温 1280°C において、背の高い幅の狭い新スキッドボタンに発生する最大主応力は 7.2 kgf/mm² と計算された。この値を参考にして、新耐熱材料の具備すべき熱間疲労曲げ強度特性値⁹⁾を 10 kgf/mm² 以上に設定して、新耐熱材料の開発実験に着手した。

一方、スキッドボタンによつて軟質鋼材の裏面が凹むことを防ぐために、ボタン面圧は 0.2 kgf/mm² 以下が望ましいことが高温下での鋼材載荷実験にて判明したので、熱間圧縮クリープ強度特性値は 0.2 kgf/mm² 以上に設定した。

4.2 セラミックスの強度特性と新耐熱材料

エンジニアリングセラミックスの代表格である窒化珪素セラミックスの曲げ強さは、1200°C で 20~30 kgf/mm² を示す。一方、高温下での 3 点片振り曲げ疲労試験結果を Fig. 8 に示すが、10⁶ サイクルで 2~3 kgf/mm² と曲げ強度の約 1/10 に低下した。一般に窒化珪素は、酸化被覆にき裂やピットが発生し、これがフローサイズを大きくして強度低下を招くことが知られており、高温下で高応力が作用する工業部品への適用は難しいと思われる。

しかしこの劣化は、寸法効果（ワイブル係数）、結晶粒間に存在する粒界相の耐熱性等に影響されるものであり、高温強度セラミックスであるための必要条件である結晶粒径の微細化、均一化等を改良することでかなり改善されるので、微細化、均質化したセラミックスを活かした新耐熱材の開発方向を選択した。

微細化、均質化したセラミックスを耐熱合金の生地へ均一に分散させれば、分散強化形複合材料が出現することは種々の文献¹⁰⁾にて明らかなので、セラミックスと耐熱合金との複合材料のテストピースを製作し高温下で

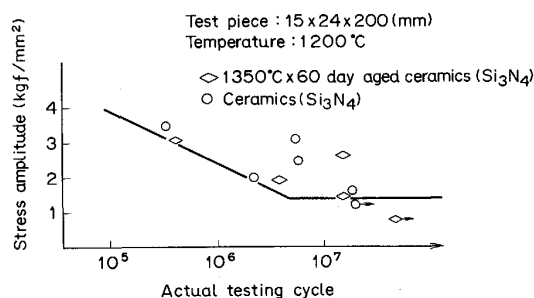


Fig. 8. Fatigue strength of ceramics at high temperature.

の 3 点片振り曲げ疲労試験を実施した。その結果 10⁶ サイクルで約 17 kgf/mm² 以上の驚異的な強度を有し、スキッドボタンとしての強度上の条件を満足している。

一方、複合材料の生地である耐熱合金の選定や、複合材料の酸化劣化、時効劣化等の特性を評価するために、既設プッシャー炉のスライダ¹¹⁾に適用して、長期間実炉の熱負荷にさらした。耐熱合金にニッケル・クロム合金を採用した複合材料の組織写真を Photo. 2、コバルト・クロム・ニッケル合金を採用したものを Photo. 3 に示す。ニッケル・クロム合金の複合材は、長期間の熱負荷によりセラミックスが飛散しており、複合材の特性を有していない。

しかし、コバルト・クロム・ニッケル合金の複合材では、セラミックスが均一に分散したままで、分散強化形複合材料の組織がそのまま残り、強度低下も生じないことが判明した。なおセラミックスは、合金金属のぬれ性、比重、熱膨張係数および 1300°C 前後の酸化性雰囲気での耐食性を考慮し、炭化物系セラミックスを選択した。

4.3 新耐熱材料の動荷重による強度特性

新耐熱材料の基本研究から開発されたセラミックス複合材料と従来のコバルト基耐熱合金の特性比較を Table

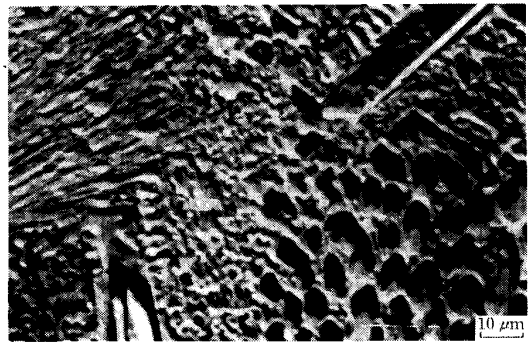


Photo. 2. Micro structure of ceramic composite metal (Ni-Cr alloy + ceramics).

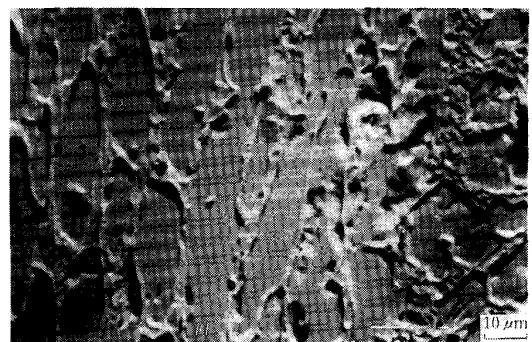


Photo. 3. Micro structure of ceramic composite metal (Cobalt alloy + ceramics).

1に示す。強度に関する安定性、熱伝導率等十分であるが、シャルピー衝撃値は低い。そこでスキッドボタンとして望ましい複合比を設定してから、炉温1280°C、圧下速度はウォーキングビーム炉での実体速度に合わせて、動荷重での高温繰返し圧下試験を継続した。Fig. 9に結果を示すが、面圧0.2 kgf/mm²では、実炉で約十年に相当する10⁶回まで、圧縮変形や割れがないことが実験で検証された。

一方、製造方法については、Fig. 10に示すように金属チューブにセラミックスと金属とを複合して造粒した粒体を充填した棒状の複合棒を用いて、不活性ガス中で自動TIG溶接機により複合材を溶着させる方法であ

Table 1. Comparison of material characteristics between conventional and ceramic composite metal.

Chemical composition (wt. %)		Conventional metal	Ceramic composite metal
		Cobalt alloy ($<0.15\%C$ 27.0Cr 40.0Co 17.0Ni)	Cobalt alloy + Ceramics
Creep compressive strength (kgf/mm ²)	1000°C	0.37	0.60
	1200°C	0.12	0.25
	1300°C	0.05	0.21
Oxidation resistance (mm/year)	1000°C	0.12	0
	1200°C	0.21	0.10
	1200°C	0.70	0.26
Impact value (kg-cm/cm ²)	RT	100	22
	1000°C	210	25

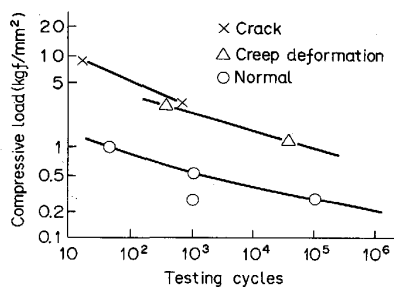


Fig. 9. Relationship between actual compressive load on skid button and testing cycles.

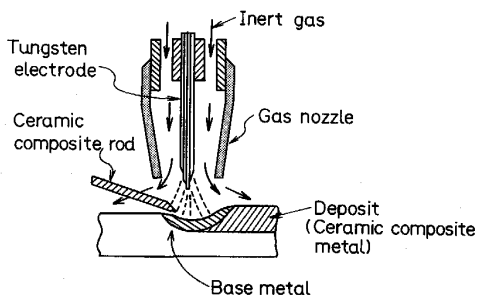


Fig. 10. Welding procedure ceramic composite metal.

る。セラミックスを含有させた複合材であることおよび多層溶着を行う必要がある点より、従来の方法では製造が非常に困難であつたが、予熱から後熱に至るまでの熱管理、シールド方法、運棒の自動化など製造方法の開発を行つて複合材の品質、性状を満足することができた。

5. 新スキッドボタンの最適形状設計と伝熱特性の解析

5.1 形状設計

新スキッドボタンのコストを低減する設計が重要である。Fig. 11にボタン断面形状、温度および圧縮強度の関係を示している。従来のコバルト基耐熱合金の圧縮強度が不足する上面の外周および頂部のみセラミックス複合材を適用することで、ボタン全体として十分な圧縮強度を確保し、複合材料の使用量を最小にして、低コスト化を達成している。

このような最適形状の研究から設計された新スキッドボタン形状を、従来のボタン形状と比較してFig. 12に示す。背の高さ、幅の狭さが明瞭である。Photo. 4は、セラミックス複合材を溶着する前の母体と、溶着後の外観写真である。

5.2 伝熱特性の評価

スキッドボタンの形状と水冷ビーム配列のスキッドボ

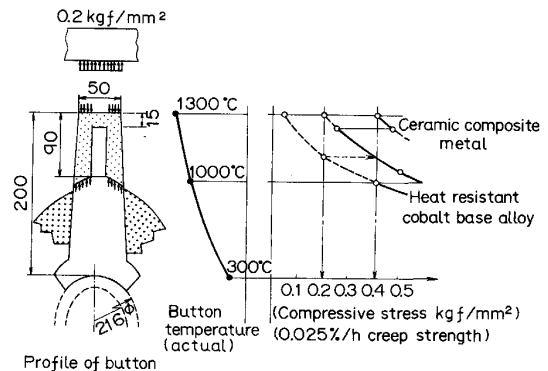


Fig. 11. Change in temperature and compressive stress with position on the new type button.

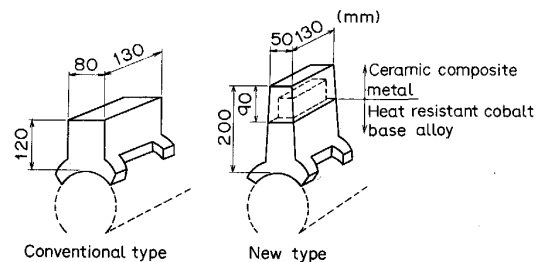


Fig. 12. Comparisons of profiles between conventional and new type skid buttons.

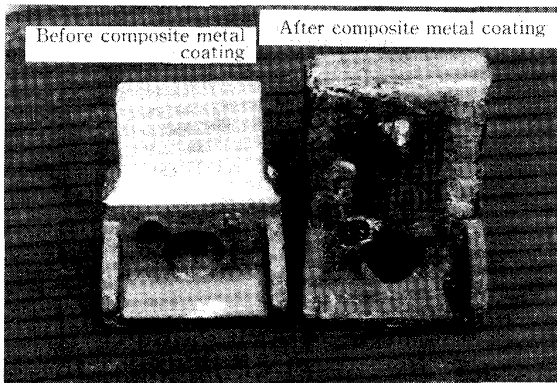


Photo. 4. View of new skid button by ceramic composite metal.

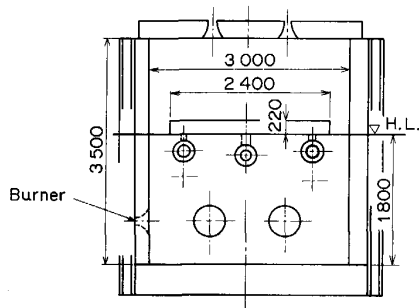


Fig. 13. Experimental device for measurement slab temperature.

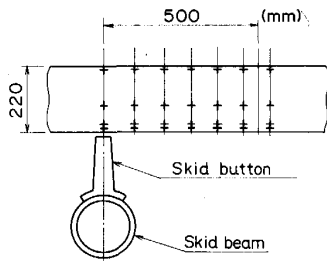


Fig. 14. Measured points of slab temperature.

タンへ与える影響および実炉での伝熱特性を把握し、3項でのスキッドマークの限界に関する解析精度を検証するために、Fig. 13 に示す実験装置を製作した。

鋼材は実鋼材厚みのものを採用し、伝熱特性を解析できるようにボタンと鋼材にそれぞれ PR 熱電対を埋め込んだ。Fig. 14 に鋼材寸法と測定位置を示す。実験は実炉と同じ加熱速度で昇温を行つた。ボタンとの接触面の鋼材下面温度の実測値を Fig. 15 に示す。新スキッドボタン (200 mm 高さ、50 mm 幅) は、従来のボタン (120 mm 高さ、80 mm 幅) と比べて、ボタン回りの昇温は早くなり、均熱時において、ボタン直上とビーム中間 (500 mm 離れた点) との温度差が半減した。

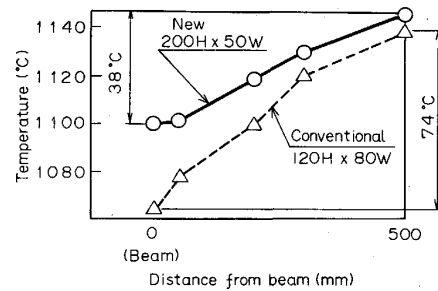
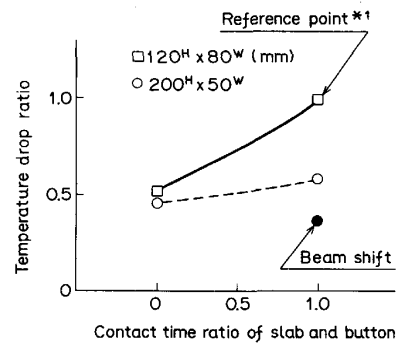


Fig. 15. Comparison of slab temperatures between conventional and new type skid button.



*1: The area supposed to keep contact at all time with the 120 mm height and 80 mm width skid button

Fig. 16. Relation of temperature drop ratio and contact time ratio slab and button.

この昇温曲線から、スキッドボタンの伝熱係数やシャドウ係数を定量化するとともに、ボタン高さおよび幅寸法とスキッドマークの伝熱解析結果、3項の Fig. 6 とほぼ一致した。

6. 実炉への適用とその評価¹²⁾

6-1 新スキッドボタンの採用範囲

新スキッドボタンを実炉に採用するにあたり、スキッドマークを極限まで低減するために、その採用範囲やビームレイアウトを検討した。Fig. 16 に同一加熱条件のもとで、新スキッドボタンと従来のボタン別に、鋼材とボタンの接触時間比率を変えた場合のスキッドマーク比について示した。一般的にウォーキングビーム炉では、鋼材とボタンの接触時間比率の小さい場合は移動ビームに相当し、逆に大きい場合は固定ビームに相当する。この関係から、新スキッドボタンは、鋼材とボタンの接触時間が長い固定ビームに採用した方が効果的であるが、接触時間が短い場合には従来のボタンとほとんど差がないことが明瞭である。

水島製鉄所熱間圧延工場の加熱炉の場合は、移動ビームの接触時間比率は約 30% で、固定ビームは 70% に

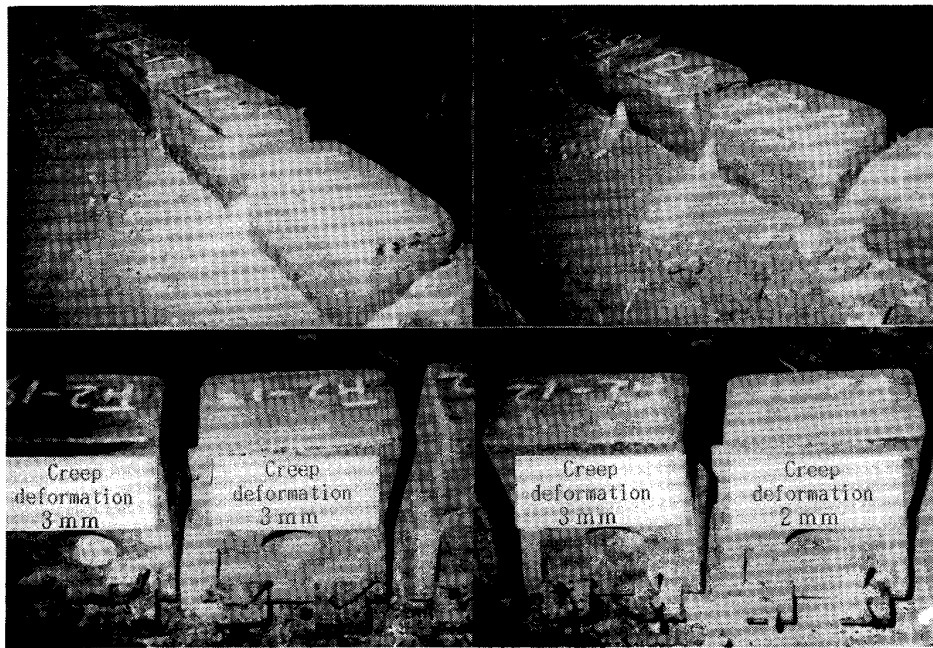


Photo. 5. View of new button after 1.5 years of service (Value of creep deformation about 2~3 mm).

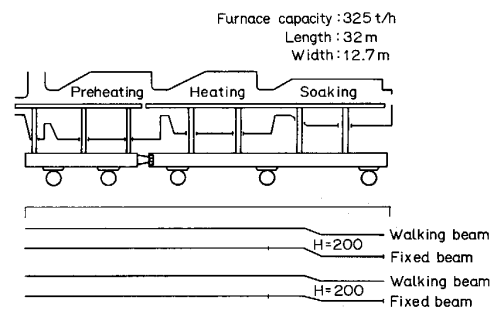


Fig. 17. Specifications and profile of reheating furnace of Mizushima hot strip mill.

相当する。固定ビームのみに採用しても、移動ビームによつて生ずるスキッドマーク量にはほぼ等しくなる。

なおスキッドビームを炉長方向の適切な位置でシフトさせることは、ビームによつて生ずるシャドウの影響を分散する効果があり、ボタン形状や鋼材とボタンの接触時間に無関係に有効な手段である。

以上の検討結果をふまえ、水島製鉄所熱間圧延工場加熱炉では、スキッドマーク低減に最も効果的な均熱帯の固定ビームのみに新スキッドボタンを採用した。また、炉幅が 12.7 m と広い割に、スキッドビームを八本で構成しており、ビーム間の間隔も十分で徹底的にスキッドマークを低減した加熱炉として計画した。Fig. 17 に新スキッドボタンを採用した加熱炉仕様¹³⁾¹⁴⁾を示す。

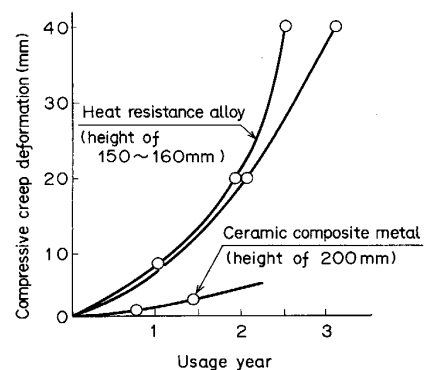


Fig. 18. Comparison of values of compressive creep deformation between heat resistant alloy and ceramic composite metal.

6.2 実炉での効果

No. 3 加熱炉は稼働後約 2 年、No. 4 加熱炉は約 1 年経過している。Photo. 5 に 1.5 年経過後の新スキッドボタンの状態を示す。当初懸念したボタンの割れもなくボタンの圧縮変形量も 1.5 年で 3 mm と極めて少ないことがわかった。Fig. 18 に従来の耐熱合金の圧縮変形量の実績と対比して新ボタンの変形量を示すが、極めて良好な性能である。

一方、鋼材加熱後のスキッドマークについて、粗ミル出側の温度計より調査した一例を Fig. 19 に示す。ヒートパターンは既設プッシャー炉に比べて加熱帯炉温を約 40°C 下げている。このようにした場合でも、スキッドマークは、10°C から 15°C を達成している。全体的に

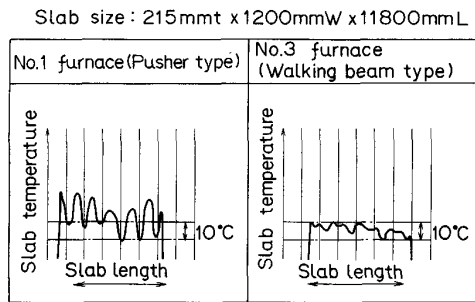


Fig. 19. Comparison of slab temperature at the delivery roughing mill between pusher type and new walking beam type furnaces.

みた場合、今回の新スキッドボタンを装備したウォーキングビームにより、既設ホットスキッドを装備したプッシャー炉に比して、約50%のスキッドマーク低減をもたらしている。

7. 結 言

水島製鉄所熱間圧延工場加熱炉のホットスキッドプッシャー炉からウォーキングビーム炉への改造に際して、スキッドマークの伝熱特性を解析した結果、従来のコバルト基耐熱合金スキッドボタンを装備したウォーキングビーム炉では、スキッドマーク低減には寄与しないことが明確になった。品質、コスト競争力を維持、向上するためおよびウォーキングビーム化の投資効率を最大限向上させるためにも、スキッドマーク低減技術の確立が必須条件であった。

これらの要求に応えるべく、炭化物系セラミックスとコバルト基耐熱合金の分散強化形複合材料の開発実験を行った。あわせて、スキッドボタンの最適形状、構造に対する研究、炉本体の伝熱特性、ビーム配列およびボタン配列の研究を行い、飛躍的に背の高い、幅の狭い「セラミックス複合材製スキッドボタン」を開発し、実用化

した。

実炉への適用結果、当初心配したボタンの割れもなく、圧縮変形も極めて小さいことが確認された。一方、スキッドマークの伝熱特性も良好に発揮して、品質の向上、省エネルギー、炉保全コスト低減に寄与している。

今後は、スキッドボタンの耐久性評価のフォローを継続するとともに、さらに背の高いスキッドボタンに挑戦して、スキッドマークのいつそうの低減を図ってきたい。

最後に、ウォーキングビーム化に対して、ご尽力をいただいた中外炉工業株式会社の担当者の方々に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 清水勇夫, 武田利式, 梅本純生: 川崎製鉄技報, 5 (1973), p. 263
- 2) 濤崎 忍, 香月正人, 武田利式, 篠原慶章: 川崎製鉄技報, 3 (1971), p. 517
- 3) 三芳 純, 三宅祐史, 篠原慶章, 小橋正満, 高木 清, 川崎義則: 川崎製鉄技報, 14 (1982), p. 548
- 4) 平石久志, 篠崎 斌: クボタ技報 (1983) 14, p. 78
- 5) 小橋正満, 高木 清, 井上利夫, 内藤 肅, 新宅尊征, 坂本庄一: 鉄と鋼, 73 (1987), S 1130
- 6) 三宅祐史, 藤原煌三, 高木 清, 小橋正満, 山田信男, 川崎義則: 鉄と鋼, 67 (1981), S 364
- 7) 小橋正満: 鉄と鋼, 65 (1979), S 725
- 8) 高木 清, 内藤 肅, 井上利夫, 小橋正満, 平石久志, 篠崎 斌: 鉄と鋼, 73 (1987), S 1131
- 9) 窯業協会編集委員会講座小委員会, セラミックスの機械的性質 (1979), p. 21
- 10) 林 毅: 複合材料工学 (1971) [日科技連出版社]
- 11) 高木 清, 内藤 肅, 小橋正満, 河内 登, 平石久志, 山上喜昭: 鉄と鋼, 71 (1985), S 342
- 12) 小出正人, 井上利夫, 小橋正満, 中谷 修, 高木 清, 内藤 肅: 鉄と鋼, 73 (1987), S 1132
- 13) Y. SHINOHARA, Y. MIYAKE, K. TAKAGI and M. OBASHI: Fachberichte Hittenpraxis Metallweiterverarbeitung, 20 (1982), p. 873
- 14) 三芳 純, 三宅祐史, 高木 清, 篠原慶章, 堀田正雅, 小橋正満: 鉄と鋼, 68 (1982), S 1186