

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol.19 (1987) No.1

連铸鑄型の長寿命化技術

Technology for Extending Service Life of Continuous Casting Mold

多田 吉男(Kichio Tada) 笠井 聡(Satoshi Kasai) 市原 晃(Akira Ichihara) 大西 廣(Hiromu Onishi)

要旨：

鋼の高連铸造や連続幅変更など連続铸造技術の進歩にともなって、連铸鑄型を取り巻く環境は苛酷なものとなった。そこで当社では、連铸鑄型の高信頼性と長寿命化を目的として研究を重ね、新しい設備技術を開発し実用化してきた。第1に、鑄片幅に応じてクランプ力を制御するシステムの開発により、幅変更傷や幅収縮を防止することができた。第2に、優れた耐熱、耐摩耗製を兼ね備えた Ni-Fe および Ni-W-Fe 被覆法の開発により、鑄型寿命を大幅に向上させた。第3に伝熱解析に基づく鑄型冷却システムの開発により、高速铸造時の操業トラブルを激減させた。第4に操業情報を取り入れた設備診断システムの開発により、鑄型の正確な寿命予測が可能となり寿命延長にも寄与できた。

Synopsis：

The high quality continuous casting mold has been increasingly required by continuous casting techniques such as high speed casting, automatic width control, and sequential casting of different steel grades. The authors have developed several equipment techniques to establish high reliability and long life on the continuous casting mold, as follows: (1) cramp force control system depending upon slab width which ensures against scratch forming on the mold due to automatic width changing and shrinking of the narrow face edge at meniscus in width directions, (2) highly heat and wear resistant Ni-Fe and JNi-W-Fe mold platings which realize prolongation of the mold life, (3) uniform cooling system based on heat transfer and the stress analysis which ensures reliable and continuous operation, (4) facility evaluation system of the mold based on variable operation factors which prolongs the mold life and enhances accuracy in estimation of the service life of the mold.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Technology for Extending Service Life of Continuous Casting Mold



多田 吉男
Kichio Tada
千葉製鉄所 保全部保
全技術室



笠井 聡
Satoshi Kasai
千葉製鉄所 保全部保
全技術室 主査(掛長)



市原 晃
Akira Ichihara
千葉製鉄所 保全部保
全技術室 主査(課長)



大西 廣
Hiromu Onishi
水島製鉄所 設備部製
鋼・厚板整備課 課長

1 緒 言

最近の連続铸造技術の進歩はめざましく、異鋼種連铸技術や高速自動幅変更技術が開発、実用化¹⁾されて生産性が大幅に向上した。

また高速铸造による温片装入技術は省エネルギーに大きな成果をもたらし、さらに連铸・圧延直結化のための無欠陥温片製造技術や高温温片製造技術も確立しつつある²⁾。

これら技術の変遷とともに、連铸鑄型に対する機能要求はより厳しく、使用条件はますます苛酷になってきている。

当社においても、昭和43年から連铸化を進め、昭和60年度では連铸比率95.4%を達成した。この中において、連铸鑄型の各種機能の拡充と長寿命化を目的とした技術開発を併せて行ってきた。

本稿は、連铸鑄型長寿命化技術に関する研究成果について述べたものである。

要旨

鋼の高速铸造や連続幅変更など連続铸造技術の進歩にともなうて、連铸鑄型を取り巻く環境は過酷なものとなった。そこで当社では、連铸鑄型の高信頼性と長寿命化を目的として研究を重ね、新しい設備技術を開発し実用化してきた。第1に、鑄片幅に応じてクランプ力を制御するシステムの開発により、幅変更傷や幅収縮を防止することができた。第2に、優れた耐熱、耐摩耗性を兼ね備えたNi-FeおよびNi-W-Fe被覆法の開発により、鑄型寿命を大幅に向上させた。第3に伝熱解析に基づく鑄型冷却システムの開発により、高速铸造時の操業トラブルを激減させた。第4に操業情報を取り入れた設備診断システムの開発により、鑄型の正確な寿命予測が可能となり寿命延長にも寄与できた。

Synopsis:

The high quality continuous casting mold has been increasingly required by continuous casting techniques such as high speed casting, automatic width control, and sequential casting of different steel grades. The authors have developed several equipment techniques to establish high reliability and long life of the continuous casting mold, as follows: (1) clamp force control system depending upon slab width which ensures against scratch forming on the mold due to automatic width changing and shrinking of the narrow face edge at meniscus in width directions, (2) highly heat and wear resistant Ni-Fe and Ni-W-Fe mold platings which realize prolongation of the mold life, (3) uniform cooling system based on heat transfer and the stress analysis which ensures reliable and continuous operation, (4) facility evaluation system of the mold based on variable operation factors which prolongs the mold life and enhances accuracy in estimation of the service life of the mold.

2 連铸鑄型に要求される機能

2.1 要求機能の変遷

連铸鑄型(長辺および短辺で構成された組み合わせ鋼板)に要求される基本機能としては以下のものがある。

- (1) 長辺と短辺の接触部に隙間が生じないこと
- (2) 各面とも形状に狂いがなく、平滑であること
- (3) 冷却能が十分でかつ均一であること

この基本機能に対する要求度合は、連铸プロセスの変遷とともに厳しくなってきた。プロセスの発展にともなう鑄型への要求機能の変化を、Fig. 1に示す。

連铸プロセス導入の頃は、安定した鑄造の実施がまず必要であった。その為に溶鋼の地金差しによる拘束性のブレイクアウトの主因となる長短辺接触部の隙間管理が重要であった。

* 昭和61年10月25日原稿受付

Development of continuous casting

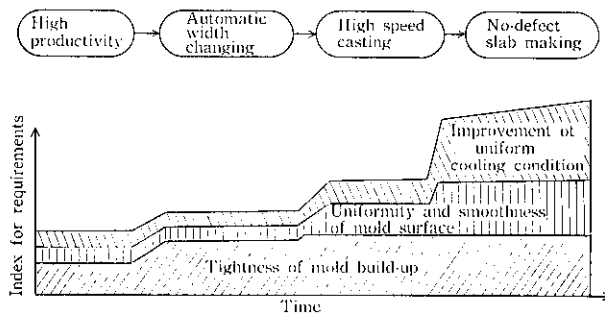


Fig. 1 Developments of continuous casting and requirements for mold specifications

次に自動幅変更技術を開発してから、鋳型長辺面に幅変更疵^{3,4)}が発生し、これもまたブレイクアウトの主因となり、そのメカニズムの究明とクランプ方式の研究が行われた。

さらに高速鋳造および無欠陥高温鋳片の製造を行うにもなると、鋳型の高温化が生じ、高温で強度を有する銅板の研究や、表面被覆の開発および冷却能向上や均一冷却技術の開発が必要となった。

2.2 機能低下現象と問題点

連鋳鋳型の主要な要求機能が低下した場合の現象を Fig. 2 に示す。基本機能低下の一つである隙間の増加、具体的には鋳型短辺の幅収縮や長辺の幅変更疵によるコーナー隙間の増加は、溶鋼の侵入を引き起こし、その地金がフィン状に凝固し拘束されてブレイクアウトを発生させる。

また鋳型表面被覆の剝離、き裂、すなわち平滑性の低下は、鋳片との潤滑性を損なわせ、焼付性のブレイクアウト⁵⁾を発生させる。一方、鋳片表面ではオキシレーションマークが乱れ、そこを起点として割れが発生しやすくなる。

鋳型下部被覆の摩耗が進み銅素地が露出すると、拡散により、銅が鋳片表面に侵入し、スタークラックと呼ばれる表面欠陥あるいは Nb 入り鋼種では粒界脆化割れを引き起こす。

さらに銅板水冷溝へのスケールや水路の腐食が生じると、幅方向の冷却能が不均一となり、溶鋼の凝固過程において凝固厚が不均一となり、ある限界を超えると応力集中により鋳片表面に縦割れ⁶⁾が

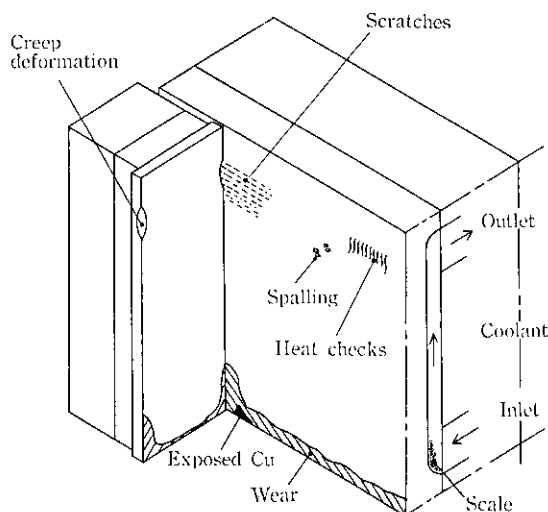


Fig. 2 Typical examples of surface deterioration of mold

発生する。

2.3 長寿命化の基本的な考え方

連鋳鋳型の長寿命化を図るためには、前述した機能低下のメカニズムを徹底的に究明し、この原因に対して機能維持向上策を実施し、確実にフォローすることが重要である。さらに総合的に長寿命化を図るためには、取替基準を明確にし、設備の状態を監視する診断技術が重要となる。

以下の考え方のもとに、長寿命化のための主な技術的課題を連鋳プロセスの変遷に対応して述べると以下のとおりである。

- (1) 自動幅変更にもなう幅変更疵と短辺鋳型の幅収縮防止技術
- (2) 鋳造の高速化にもなう鋳型表面被覆の耐熱、耐摩耗技術
- (3) 無欠陥高温鋳片製造のための鋳型の冷却技術
- (4) 高品質を保証するための精密かつ総合的な診断技術

3 鋳型クランプ力制御技術

3.1 開発の経緯

鋳込中に幅変更を行う連鋳鋳型の寿命は、幅変更時の長辺上部の掻き傷に支配され、設備維持費に占める鋳型費用の割合は、約 30% と大きい。また鋳型取替による鋳造時間の低下を招き、生産性を阻害する。

従来のソフトクランプ方式を Fig. 3 に示す。この方式は以下の条件が達成できれば、幅変更傷を防止できる可能性がある。

$$S > S_n$$

ただし、

$$S_n \geq S - S_a$$

ここで S : ソフトクランプが可能な初期設定値 (Fig. 3)

S_n : 短辺の熱膨張による幅方向伸び量

S_a : あらゆる条件で許される最大コーナー隙間

一般に S_n は約 0.7 mm (幅 200 mm, 温度 250°C), S_a はブレイクアウト防止のため 0.2~0.3 mm となり、したがって S は 0.7 mm 以上 0.9~1.0 mm 以下となる。

ところが、鋳造開始時や異鋼種連鋳、さらに幅狭材の鋳造時には溶鋼の湯面上昇により静鉄圧が急上昇し、この圧力で鋳型が設定値 (S) まで押し広げられ、この結果コーナー隙間 ($S - S_n$) が許容値 (S_a) を超えることが計測された⁷⁾。したがって、設定値 (S) は

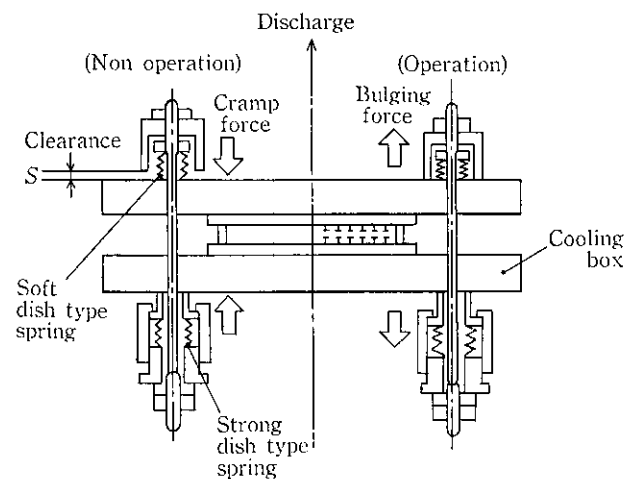


Fig. 3 Original arrangement for soft cramp system

0.2~0.3mm とせざるをえず、後述するように、鋳型上辺に幅変更傷が発生するようになり、常に鋳造条件や鋳片幅に対して防止できる技術確立が必要となった。

3.2 新クランプ制御システムの開発と特徴

前述したニーズに対応するため、幅変更疵発生過程を追求し、以下のようなメカニズムを確認し、幅変更疵を防止する知見をえた。

- (1) 鋳造の際に短辺側面が熱膨張し、長辺との面圧が高くなり、銅板がクリープ変形する。さらに、このクリープ変形は、冷却されて収縮し、いわゆる幅収縮現象を引き起こす。
- (2) この結果、長辺との間に隙間が生じ、溶銅の微粒地金が入る。
- (3) この地金は銅板より硬く、幅変更の際に傷がつく。
- (4) またクランプ力は静鉄圧を常に上廻り、かつ許容最小値を保つこと、さらに短辺の熱膨張に追従することが必要である。

以上の知見のもとに、常に操業プロセスと、鋳片幅に応じてクランプ力を自動的に制御するシステムを開発した。このシステムを Fig. 4 に示す。またこのシステムの特徴は以下のとおりである。

- (1) 常に、鋳造条件を満足するクランプ力を維持している。
- (2) 鋳片幅に応じてクランプ力を制御し、許容最小値としている。
- (3) 短辺幅の熱膨張に追従できる油圧制御としている。
- (4) 幅変更時には、静鉄圧が減少するので、クランプ力も制御する。
- (5) 油圧故障が生じてクランプ力が解放しないスプリング方式を併用している。

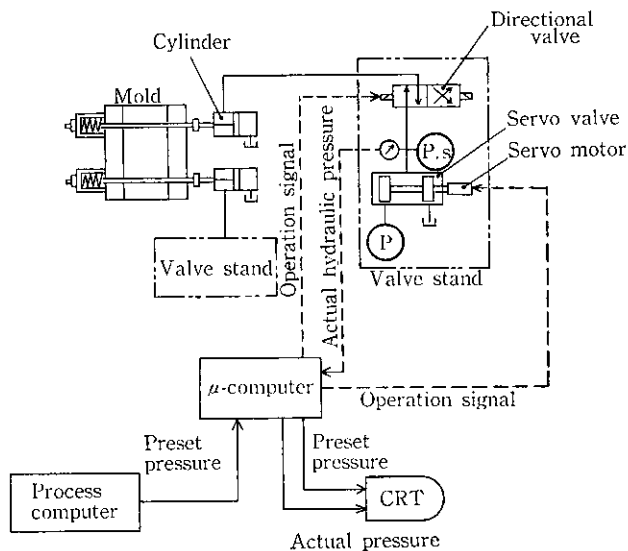


Fig. 4 Schematic illustrations for the arrangement of controlled clamp system

4 鋳型表面被覆技術

4.1 開発の経緯

鋳型被覆に要求される機能としては、耐スプラッシュ性、耐熱き裂性、耐スポーリング性、さらには高抜熱性がある。またとくに鋳型下部では耐摩耗、耐腐食性が要求される。

鋳型被覆仕様の変遷と、その当時の問題点を Fig. 5 に示す。初

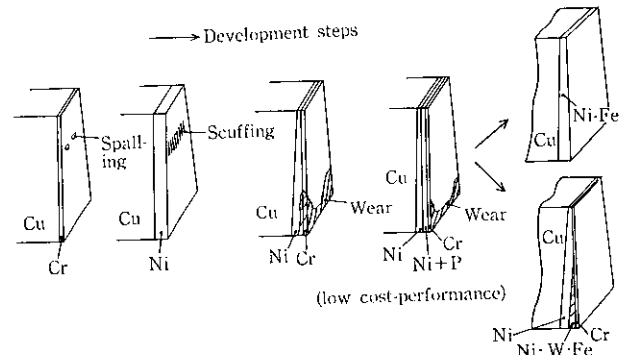


Fig. 5 Development steps of plating specifications on mold surface

期の鋳型被覆には、耐摩耗性と耐スプラッシュ性の点から Cr 被覆を採用したが、剝離によってブレイクアウトの危険が高まることおよび品質欠陥に結びつきやすいことなどで中止した。

次に、これを補うものとして被覆厚みを大きくすることが可能で、密着性に優れた Ni+Cr 被覆を採用したが、抜熱性能低下によるブレイクアウトの発生や、偏摩耗による精度の維持管理が困難となるなど問題があった。

その後、変動因子である厚みと冷却能を適正化し、テーパー状の被覆を採り入れたが鋳型下部の被覆寿命が短く、さらに耐摩耗性を必要とした。一方、マルチコーティングと呼ばれる 3 層被覆法⁹⁾ (Ni-NiP-Cr) を試用したが、高価格の割には寿命が伸びないことが判明した。

そこで、安価で、かつ長寿命が期待できる被覆の開発ニーズが高まり、後述する Ni-Fe 法⁹⁾ および Ni-W-Fe 法¹⁰⁾ を開発し、実用化に成功した。

4.2 Ni-Fe 被覆の開発と特徴

Ni 中に Fe を含有させた場合と Ni 中に W と Fe を含有させた時の被覆の硬度分布を Fig. 6 に示す。

Ni-Fe 法は、Ni 中に Fe を含有させると硬度が上昇し、高い耐摩耗性が得られることに着目して開発したものである。なおこの過程でテーパー付被覆法⁹⁾ を考案し、機械加工時の研削量を少なくすることができた。

この被覆法の特徴は、次のとおりである。

- (1) 硬度は Fe 含有率によって HV 250~550 まで調整できる。

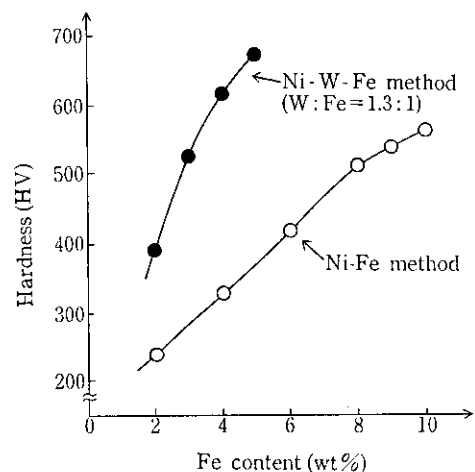


Fig. 6 Relation between Fe, W contents of Ni-based plating and hardness

- (2) 高温引張り強度 (400°C) は Ni の 2.5 倍と強い。
 (3) 単層でかつ厚被覆が可能であり、比較的成本が安い。

4.3 Ni-W-Fe 被覆の開発と特徴

Ni 中に W と Fe を含有させると Fig. 6 のとおり被覆硬度をさらに高めることができる。Ni-W-Fe 法は、この原理を応用し、Cr の耐スプラッシュ性を生かしつつ、厚み方向の硬度を調整することで、高硬度厚被覆の特徴を失わず、耐熱き裂性をも改善したものである。

具体的な Ni-W-Fe 法による施工例と、厚み方向の硬度分布の例を Fig. 7 に示す。鋳型上部は、薄 Ni+Cr 法、鋳型下部に Ni-W-Fe 被覆を介在させたものである。

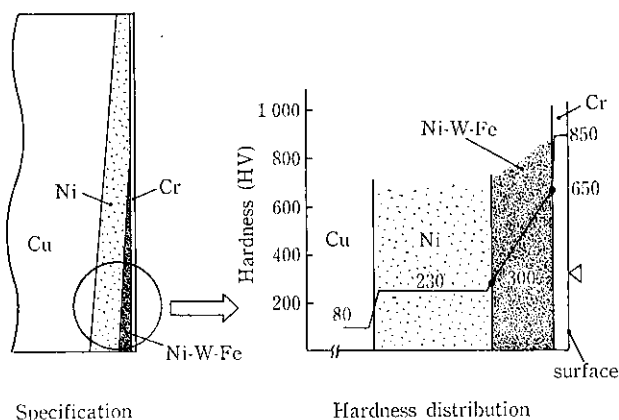


Fig. 7 Example of plating specifications and hardness

以下にこの被覆法の特徴についてまとめた。

- (1) 硬度は、W, Fe の含有率により HV 300~650 まで調整できる。
 (2) 高温強度 (400°C) は、Ni-Fe 法の 1.5 倍とさらに高い。
 (3) 熱膨張係数、熱伝導率は、Ni-Fe と同様で優れている。

なお、当社においては、メニスカス部の熱負荷が比較的少ない中速用 (0.6~0.8 m/min) 鋳型に Ni-Fe 被覆法を適用し、高速用 (1.4~2.0 m/min) 鋳型には、鋳型下部のみに、硬度勾配をつけた Ni-W-Fe 被覆法を適用している。

5 鋳型銅板の冷却技術

5.1 冷却能力向上ニーズと改善技術

鋳造の高速化にともない、鋳型銅板への熱負荷が増大した。とくに鋳型短辺側のメニスカス部では、300~350°C にもなる¹¹⁾。この結果、短辺は熱膨張しようとするがクランプ力に拘束されているためクリープ変形し、冷却時には幅収縮が起こることは前述のとおりである。

この問題を解決するもう一方の手段として、冷却能力を向上させる研究に取り組んだ。その具体例を水冷溝の構造をスリットタイプ¹¹⁾と丸孔タイプ¹²⁾に分けて、改造前後の温度分布を示したのが Fig. 8 である。

スリットタイプでは、メニスカス部のみにスペーサーを新設し、流速を高め、熱伝達率を向上させた。丸孔タイプでは、補助冷却孔を増設し、厚み方向の伝熱抵抗を少なくし、冷却能力を向上させた。

これらの改造により鋳型被覆の表面温度は、250°C に低下し、そ

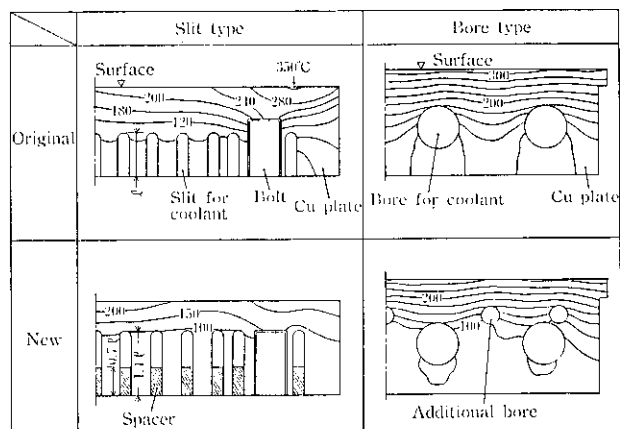


Fig. 8 Comparison of temperature distribution in a horizontal cross section between original and new type molds

の結果、クリープ変形を防止することができた。また、この技術は鋳型長辺銅板の変形防止対策にも活用している。

5.2 冷却の均一化ニーズと改善技術

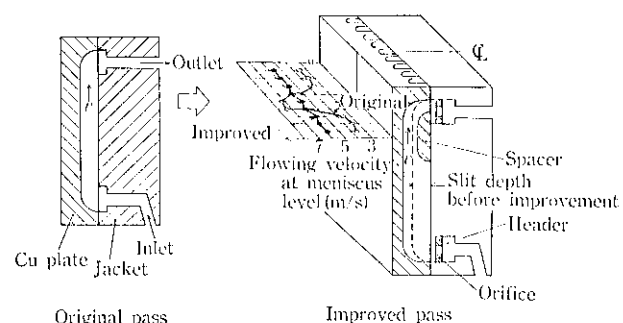
一般に銅板に供給される冷却水は、背面にある固定枠にヘッダーを設け、そこから銅板に設けられた水冷溝または水冷孔を通る。

ここで、冷却水量が不均一な場合や流速分布が偏った場合には、流速の遅い所の抜熱が悪くなり、鋳片が焼付き、ブレイクアウトを誘発する。この現象は高速鋳造の際にはとくに顕著である。また冷却の不均一により、鋳片の縦割れなど品質の低下を招きやすい。

以上の背景から、各鋳型の流速を測定すると、不均一流速が顕在化したので、流速を等しくする課題と取り組んだ。その具体例として、改造前後の鋳型短辺の断面構造と流速の分布を Fig. 9 に示す。従来タイプの場合には、幅方向中央部の流速が、約 2 倍となっていた。この原因として、冷却水の入・出口が中央に位置していること、また、固定枠のヘッダー容積が小さいことによるものと判断した。

そこで新タイプでは、冷却水の入・出口の影響を無視できる程度にヘッダー部を改造し、容積を大きくした。また厳密に流速が等しくなるように、オリフィス孔を新設した。その結果、Fig. 9 に示したように、メニスカス部においても、流速をほぼ等しくすることができた。

さらに冷却能力維持の管理面での研究を行い、銅板水冷溝の定期洗浄法の確立を図り、腐食防止対策をも実施している。



6 鋳型の設備診断技術

6.1 開発の経緯

鋳型の長寿命化を達成する手段として、前述したハード上の改善の他に、ソフト上の改善がある。ここでいうソフト上の改善とは、すなわち設備の劣化を定量的に把握し、許容基準に至る寿命を予測し、その直前の適切なタイミングで取り替える設備診断技術の適用である。例として、鋳型被覆の改善前後の摩耗量を稼働時間とともに表わしたのが Fig. 10 である。図中、A と B の差は従来の管理レベルでのハード上の改善による効果である。また、C と B の差は、設備診断技術を確立した時の寿命延長量となる。したがって、この診断技術を併用することにより、ハード上の改善効果をより顕著にすることができる。

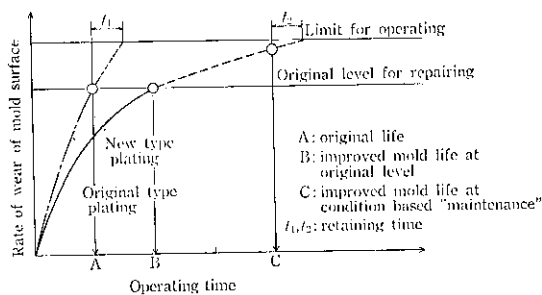


Fig. 10 Example of control technology of mold

6.2 設備診断システムの開発

近年の小ロット多品種製造あるいは圧延工程との同期化などの理由により、鋳型の交換は頻繁になっている。一方、鋳型の種々の使用条件により、個々の銅板の機能維持状況の把握は多大な労力を必要とする。したがって現実的には困難であり、将来の残存寿命予測もきわめて安全側に設定され損失を招きやすい。

そこでこの問題を解決し長寿命化に貢献したシステム開発の例を Fig. 11 に示す。このシステム¹³⁾は上位のプロセスコンピューターと直結した設備診断用マイコンを使用したもので、連鋳設備の鋳型や鋳片のサポートロール、さらには冷却水など重要な部位を診断するものである。鋳型について言えば、その使用計画などの操作データに基づき、銅板の摩耗予測や適性寿命の解析が可能である。

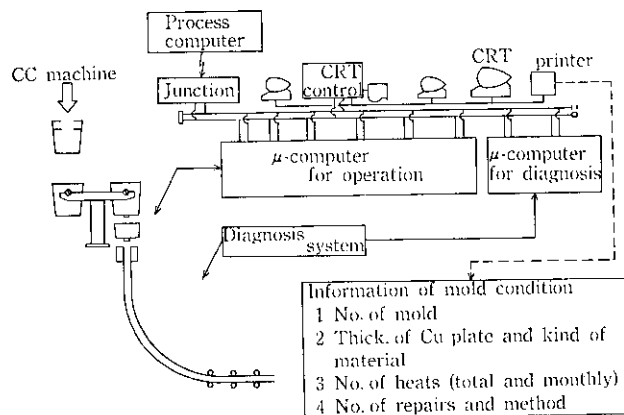


Fig. 11 Computer aided systems of machine diagnosis and maintenance

一方、ユーティリティ機器の稼働状況などをも加えた連鋳プロセス全体の診断システムを開発した¹⁴⁾。このシステムは、広範囲に分散している多くの情報を収集することができ、設備異常の早期発見やデーター解析に基づく設定水量の削減など成果を収めている。

7 効 果

前述した各種対応技術を開発・改善した結果、種々の効果を得ることができた。各種の具体的な事例の実施時期と鋳型被覆寿命とを対応づけて示したのが Fig. 12 である。

第1には、鋳造幅に応じてクランプ力を制御するシステムの開発により、鋳型短辺のクリープによる幅収縮がなくなり、その結果、幅変更疵が減少し連続使用の寿命は250 ヒートから750 ヒートとすることができた。

高速鋳造化に対しては、冷却能力の増加策が有効であった。すなわち熱負荷の増大によるクリープ変形を防止することができ、連続使用寿命は1050 ヒートまで期待できるようになった。

また、鋳型被覆開発の効果として、Ni-Fe 法および Ni-W-Fe 法があり、被覆の特徴を生かした連鋳機に採用した結果、いずれも1200 ヒートへと大幅に向上することができた。

次に冷却能力の増強と冷却の均一化を併用した対策を施した場合のブレイクアウト発生回数の推移を、260 mm 厚×900~1300 mm 幅、鋳込速度1.5 m/min で焼付性のコーナーブレイクアウト発生回数を例として示したのが、Fig. 13 である。この操業条件では、冷却の不均一度、冷却不足の熱解析結果によって、ブレイクアウト発

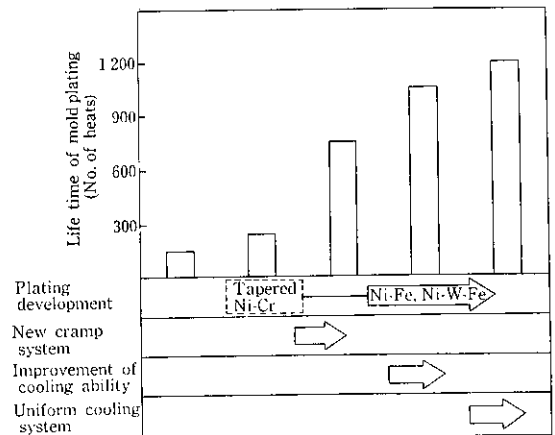


Fig. 12 Change in mold life time

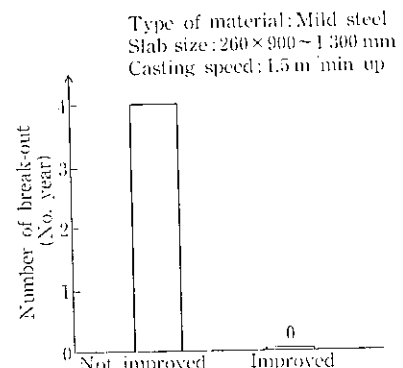


Fig. 13 Comparison of numbers of break-out between after and before improvement of cooling system

生の確率が高くなることが実証された。この解析結果に基づき対策を実施した結果、改善前の57年と改善後の58年の各1年間の比較において、焼付性ブレークアウトを4回/年から0にすることができた。

8 結 論

高品質の連鑄鋳片を製造でき、かつ鋳型の長寿命化を目的とした種々の研究開発を進め、実用化を図ってきた。この結果、以下のような成果が得られた。

- (1) 鑄造幅に応じたクランプ力制御システムの開発、実用化により、鑄込中の幅変更疵をなくすことができ、鋳型被覆寿命は約3倍に伸ばすことができた。
- (2) 冷却能の増強策および冷却能の均一化策により、高速鑄造での鋳型の高温化によるクリープ変形をなくすことが可能とな

り、鋳型被覆寿命をさらに延ばすことができた。

- (3) Ni-Fe法およびNi-W-Fe法による鋳型被覆の開発、実用化により、この被覆法の特徴を生かした連鑄機に採用した結果、鋳型被覆の平均寿命を1200ヒートとすることができた。
- (4) 鋳型冷却能の増強策と冷却能均一化の併用により、無欠陥高温鋳片の製造の際に発生しやすいブレークアウトを回避することができ、高品質の鋳片を安定して生産できるようになった。

今後も操業プロセスは著しく変化することが予想され、新しい課題も生まれつつある。これらのニーズを素早く調査し、鋳型の長寿命化への研究をつづけて行く予定である。

最後に本報で紹介した鋳型被覆のNi-Fe法については、株式会社野村鍍金に、またNi-W-Fe法については、硬化クローム工業株式会社の関係諸氏に種々のご協力を頂いた。ここに深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 飯田義治, 大森 尚, 前田瑞夫, 小島信司, 越川隆雄: 川崎製鉄技報, 12 (1980) 3, 1~9
- 2) 椿原 治: 第110, 111回西山記念技術講座, (1986), 93~141, [日本鉄鋼協会]
- 3) 工藤和也, 挾間繁宏, 岡本 稔, 南 憲次, 今村 晃: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S855
- 4) 森 孝志, 半明正之, 白谷勇介, 宮原 忍, 鈴木幹雄, 石川 勝: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S855
- 5) 糸山誓司, 垣生泰弘, 反町健一, 川原田 昭, 矢部 直: 鉄と鋼, 68 (1982) 7, 784~793
- 6) 川上公成: 鉄と鋼, 67 (1981) 8, 1090~1092
- 7) 大西 廣, 中村勝美, 伊藤 斉, 藤沢昭雄: 鉄と鋼, 69 (1983) 12,

S282

- 8) 岡田義夫: 実務表面処理技術, 5 (1981), 12~15
- 9) 金山 博, 市原 晃, 渡辺祐次, 服部源二, 鈴木康治: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 4, 12-19
- 10) 大西 廣, 弓手崇生, 藤沢昭雄: 鉄と鋼, 70 (1984) 4, S210
- 11) 日本鉄鋼協会共同研究会第30回鉄鋼設備分科会, (1984), 私信
- 12) 白石伸司, 市原 晃, 下戸研一, 後藤信孝, 岡本改造, 植田恵子: 鉄と鋼, 70 (1984) 4, S207
- 12) 中村勝美, 大西 廣, 後藤国浩, 工藤敏夫, 柿原節雄, 福原 涉: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 3, 286
- 14) 下戸研一, 池田圭吾: 川崎製鉄技報, 18 (1986) 1, 25-29