

レードルからの溶鋼注入における光学方式スラグ 流出検知装置の開発

徳田 将敏*

Development of Detection System by Optical Method for Slag Entrained to
Teeming Stream in Continuous Casting Process

Masatoshi TOKUDA

Synopsis : In a continuous casting process, it has been desired to detect slag entrained to a teeming stream from a ladle to a tundish under sealed condition in order to protect molten steel from reoxidation. "Detection system for slag entrained to teeming stream" which enables to detect slag in the teeming stream effectively by an optical method is developed.

The principle of the slag detection is based on the difference in emissivity and a stream diameter between slag and steel. Both the emissivity and the stream diameter of slag are larger than those of steel.

This system was tested in continuous casting processes. The mean value of the optical power from slag is about 1.54 times of that from molten steel only. Its mean value from molten steel mixed with slag is about 1.2 times of that from molten steel only. The timing of alarm outputs from the system were compared with the timing of visual detection for 35 times. 97% of alarm output timing appeared in 5 secs before visual detection. And successful results were also obtained from all of the sealing pour tests without visual detection.

Developed detection system for slag entrained to teeming stream by the optical method which has the features of simple probe structure, easy operation and high accurate slag detection, is expected to contribute to stable operation and casting of good quality products in continuous casting machines.

Key words: slag; optical fiber; optical powermeter; detection system; continuous casting process; judgement; computer.

1. はじめに

鉄鋼の連続 casting においてレードルからタンディッシュへ溶鋼を注入する際、溶鋼の酸化による品質低下を防止するために外気から完全にシールした状態を保つことが望まれている。レードル内には溶鋼の約 1/3 の比重であるスラグが溶鋼上に浮いているため、レードルからの溶鋼注入が終了するとスラグ流となる。注入管方式の設備においてはレードルの残鋼量が少なくなるとシール状態を破り、レードルからタンディッシュへの溶鋼注入流をオペレータが目視し、スラグ流に変化したことを検出することで溶鋼の終了判定を行う方法が用いられていた。この場合、溶鋼が外気に触れて酸化することによる品質低下が問題となった。また、オペレータは目視により溶鋼流からスラグ流への変化をとらえ、溶鋼の終了を経験的に判定していた。したがって、溶鋼からスラグへの切り替わり時点を見逃すとスラグが変わったことに気づかず、大量にタンディッシュ内にスラグが流出してしまい、鑄片の品質低下や連続操業の停止による製造工程の混乱という問題も発生した。

そのため、これまでにレードルからタンディッシュへの

スラグ流出を検知するいくつかの方法が開発されてきた。溶鋼とスラグの比重・粘度の違いに着目した注入ノズル振動測定方式¹⁾はノズルの開閉や工場内のクレーン等の振動影響による過検出やスラグの混入率が高くないと検出しにくいという感度の問題等があった。また、レードルのノズルにコイルを設置し溶鋼とスラグの導電率差により検出する方式²⁾はノズルの開閉に伴うノズル内の溶鋼充填率の影響やコイルの温度変化による影響を受けた。レードルにコイルを設置し溶鋼とスラグの導電率差により検出する方法^{3,4)}は、レードルごとにコイルを設置しなければならず装置改造が大掛かりであることや、レードル耐火物の溶損に伴う耐火レンガの交換等の保守対応等にも問題があり、レードル交換ごとに配線の着脱を行わなければならないという操作性にも問題があった。

そこで、筆者らは①溶鋼とスラグの放射率が異なることと②注入管方式ではレードルのノズル下の溶鋼とスラグの注入流径が異なることから、注入流の放射エネルギーを測定することで、高感度にスラグの流出を検知可能な光学方式スラグ流出検知装置を開発した。また、この開発した装置はシール状態を保ちながらレードルからタンディッシュ

への溶鋼注入の末期時のスラグ流出を検知できるため、溶鋼の酸化防止による製造铸件の高品質確保が可能という特長をあわせ持つ。本装置を用いて、連続铸造装置の実機で検出能と操作性の評価を行った。本論文ではその結果を報告する。

2. 測定原理

溶鋼とスラグでは放射率とノズル下の注入流の径が異なることから、レードルからタンディッシュへの注入流の放射エネルギーを測定し、スラグ流出を検知する。

波長 λ における熱放射のエネルギーはその物体の温度に依存し、物体が黒体の場合にはその分光放射輝度 $L(\lambda, T)$ と温度 T との関係は、プランクの放射則により次式で表される⁵⁾。

$$L(\lambda, T) = \frac{2C_1\lambda^{-5}}{\exp(C_2/(\lambda T)) - 1} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

$L(\lambda, T)$: 温度 T [K] の黒体の波長 λ [m]における分光放射輝度

$$C_1 = 5.9548 \times 10^{-17} \text{ [W} \cdot \text{m}^2]$$

$$C_2 = 0.014388 \text{ [m} \cdot \text{K]}$$

である。また、温度 T の黒体表面の単位面積から、単位時間に鉛直方向の単位立体角あたりに放射される放射エネルギーのうち、波長 λ のものは $L(\lambda, T) \cdot d\lambda$ で与えられるので、実際に測定する波長域 λ_1 から λ_2 における放射束は次式で表される。

$$W(\lambda, T, t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(t) \cdot L(\lambda, T) \cdot K(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda, T) d\lambda \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

$S(t)$: 時刻 t における測定面積

$K(\lambda)$: 波長 λ における光電変換素子の感度特性

$\varepsilon(\lambda, T)$: 波長 λ , 温度 T における測定対象の放射率

である。

レードルからタンディッシュへの注入流の放射束は光パワーメータを用いて測定され、スラグ流出の判定がなされる。スラグ流出の検出は①溶鋼よりもスラグの放射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ の方が大きく、②光パワーメータの視野に占める流体の面積 $S(t)$ が溶鋼よりもスラグの方が大きいため、スラグ時の放射束が溶鋼時に比べ大きくなることを原理としており、①と②の相乗効果で高感度にスラグ流出を検出する。

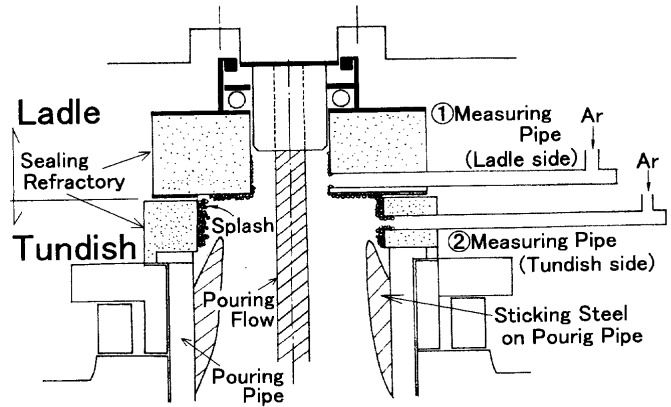


Fig. 1. Comparison of measuring position.

3. 測定装置の構成

3.1 測定検出端

3.1.1 設置位置

注入管方式のレードルからタンディッシュへの溶鋼流の測定検出端の取り付け可能位置は Fig. 1 に示す①レードル側シール材部か②タンディッシュ側シール材部である。そこで、これらの2箇所にて測定管を挿入し、Arガスによるパージを行いながら铸造中の(1)注入管からの地金堆積、(2)溶鋼スプラッシュの測定管への付着による測定視野の妨害影響を確認した。約5時間铸造後に結果を確認したところ、(1)注入管からの地金堆積は②タンディッシュ上部のシール材近くまで達しているが①レードル側の測定管位置までは成長せず、(2)溶鋼スプラッシュ付着については①レードル側の測定管ではほとんどなかったが、②タンディッシュ側の測定管には溶鋼スプラッシュが付着し測定視野を妨げられることが分った。溶鋼スプラッシュの付着は(a)溶鋼流からの直接スプラッシュ、(b)溶鋼流のタンディッシュ湯面落下時の跳ね返りによるものが考えられ、それを防ぐには(a)溶鋼流より遠く、(b)タンディッシュ湯面位置より高く離れた位置に測定検出端を設置するのが有利である。そこで、溶鋼流から検出端位置を遠ざけ、タンディッシュ湯面位置より高く離れた位置とするため、レードルシール材の測定管設置位置に切り欠きを施し確認テストを行った。切り欠き加工後の概要図を Fig. 2 に示す。約5時間铸造後に確認を行ったが、測定管へのスプラッシュ付着は Fig. 1 の①の位置よりさらに少なく良好な結果が得られた。

レードル側に測定管をつける場合、レードル交換ごとに測定管の着脱を必要とし、手間が掛かる。しかし、レードルとタンディッシュの位置ずれによる溶鋼流の視野外れの問題がなく、測定時の視野確保を安定して行える利点を有するため、測定管はレードル側のシール材に切り欠き加工を施した場所に設置した。

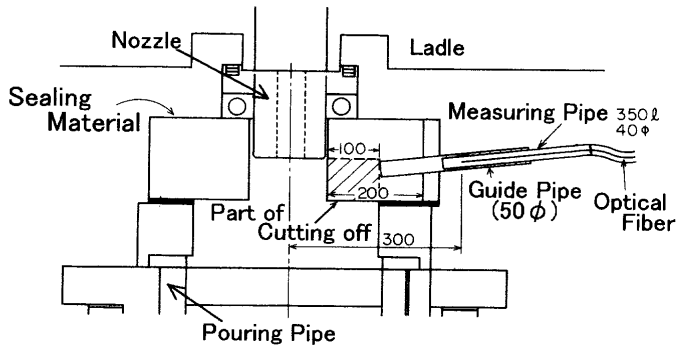


Fig. 2. Measuring position under the ladle.

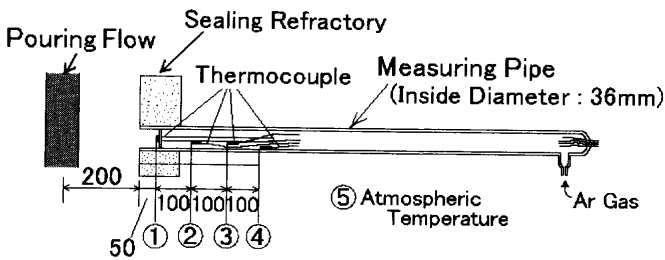


Fig. 3. Points for measuring temperature.

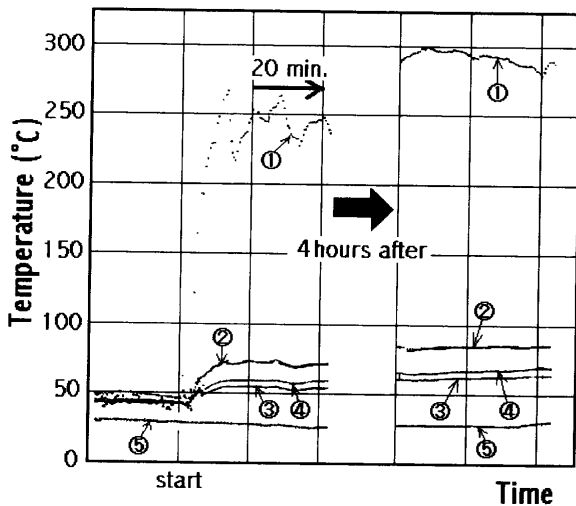
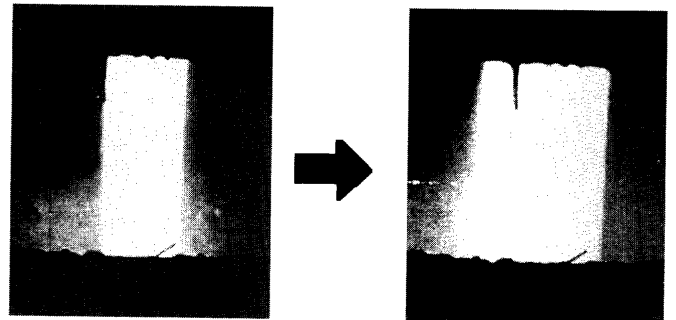


Fig. 4. Temperature in measuring pipe.

3.1.2 検出端の構成

(1) 耐熱の検討

測定検出端は高温の溶鋼の近傍に設置するので、測定管が高温になることが考えられるため、測定管内の各位置における casting 時の温度を測定した。テスト時の測温位置は Fig. 3 の①~⑤の5箇所とし、後部より Ar ガスを流して冷却した。Fig. 4 に casting 開始時と4時間後の温度を示す。溶鋼流の放射エネルギーを直接受ける溶鋼流中心から250 mm 離れた①先端位置では高温となるが最高温度は300°C 程度であり、それより溶鋼流から離れた位置である測定管内部の②, ③, ④では100°C 以下であった。この結果より、高温にさらされる先端部には、連続使用時の耐熱温度が600°C あり耐熱性に優れた光ファイバーであるオプティカ



(A) Steel Flow (B) Slag Flow

Fig. 5. Comparison about flow diameter (steel and slag).

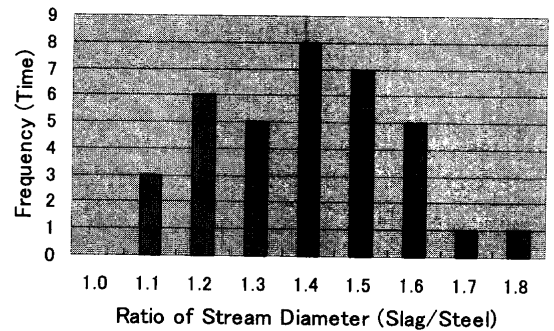


Fig. 6. Ratio of stream diameter (slag/steel).

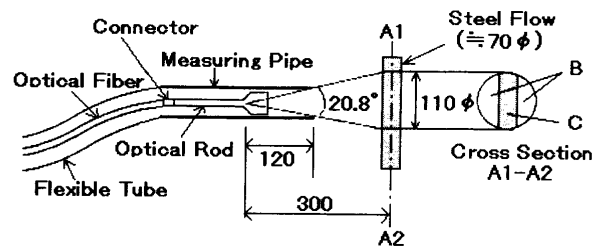


Fig. 7. Setting position of measuring head.

ルロッド (材質: 石英系ガラス) を、100°C 以下で高温にならない後ろ側の部分には、連続使用時の耐熱温度が150°C で屈曲性に富む光ファイバーのバンドルファイバーケーブルを用いて、放射エネルギーを光パワーメータに伝送した。

(2) 光学系の設計

レードルからの溶鋼注入末期時の溶鋼流を撮影し、溶鋼注入時とスラグ流出時の流径を測定することにより適切な測定視野を設計した。撮影結果例を Fig. 5 に示す。この写真の溶鋼注入時とスラグ流出時におけるスライディングノズル開度は同じであるが、スラグ流出時は溶鋼注入時の流径に比べ50%程度の増加が見られる。この溶鋼注入時とスラグ混入および流出時の流径の比を36チャージビデオ撮影した結果を Fig. 6 に示す。スラグ流径は溶鋼注入時の流径の約1.1~1.6倍程度になっており、溶鋼注入時の流径約60~70 mm に対し、約70~110 mm 程度のスラグ流径となる結果が得られた。

そこで、これまでに述べた溶鋼スプラッシュの付着、検

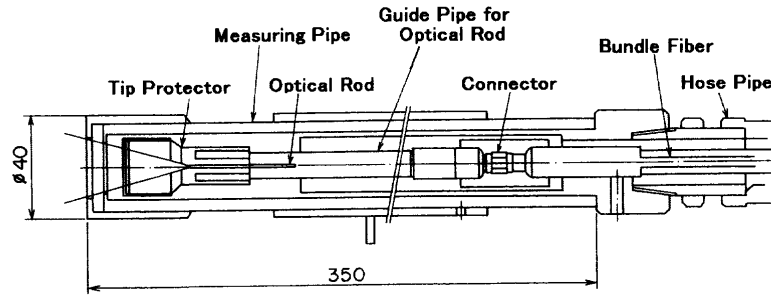


Fig. 8. Construction of measuring head.

出端各部温度、溶鋼流とスラグ流の流径を考慮し、光学系の視野を決定した。すなわち、Fig. 7 に示すように溶鋼流センター位置から検出端先端のオプティカルロッドまでの距離を 300 mm とし、溶鋼流位置での視野を 110 mmφ とし、スラグ流出時に注入流径が大きく増加しても注入流のほぼ全幅が視野内に入るようにした。先端部の光学系の詳細図を Fig. 8 に示す。

3.2 測定放射エネルギーの伝送

測定光を光電変換する光検出器の温度仕様は 45°C 以下であり、常温の場所に設置する必要があるため、測定時に高温となる検出端から光検出器まで光ファイバーケーブルで測定放射エネルギーの伝送を行った。本方式は 1 チャージごとに測定管をレードル下部のシール材部に着脱する必要があるため、光ファイバーケーブルには屈曲に有利な 49 心のバンドルファイバーを用いた。なお、検出端のオプティカルロッドと光ファイバーは測定管内のコネクタで結合される (Fig. 8 参照)。測定放射エネルギーの伝送の概略構成を Fig. 9 に、オプティカルロッドとバンドルファイバーの概略仕様を Table 1 に示す。

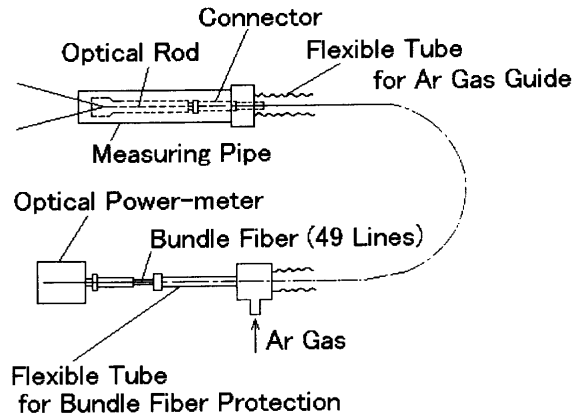


Fig. 9. Flow of optical energy transmission.

Table 1. Specifications of optical fiber.

Item	Optical Rod	Bundle Fiber
1. Diameter		
(1) Core	1.3mm	100 μm
(2) Glad	1.8mm	140 μm
2. Numerical Aperture	0.28	0.28
3. Heatproof Temperature	600°C	150°C
4. Transmission Loss	<0.05dB/m	<0.025dB/m

3.3 信号変換部

溶鋼流からの測定放射エネルギーはオプティカルロッド、光ファイバーを通して光検出器に伝送され、光電変換されたあと光パワーメータで溶鋼流、スラグ流からの放射束が測定される。近赤外域の溶鋼やスラグからの放射エネルギーを測定するための光検出器の波長感度特性を Fig. 10 に、光検出器と光パワーメータの仕様を Table 2 に示す。

3.4 信号処理部

光電変換された測定信号は光パワーメータから信号処理コンピュータに入力され、スラグ流出判定処理が行われる。スラグ混入、スラグ流出と判定されれば警報が出力される。

信号処理コンピュータでは測定放射束の光パワー信号以外にレードル残鋼量信号とレードルからタンディッシュへの溶鋼の供給を制御するレードルスライディングノズルの開閉信号が 0.1 秒ごとに取り込まれる。スラグ流出の判定はレードル残鋼量が設定値以下になれば開始される。判定は光パワー信号の増加のレベル (相対値) により、①スラグ混入と②スラグ流出の 2 段階に区別され、おのおのにつ

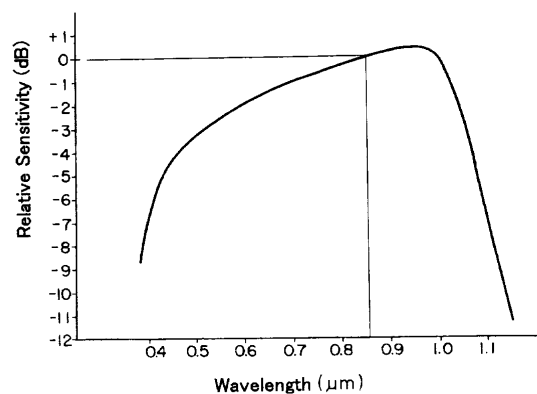


Fig. 10. Relation between optical sensitivity and wavelength for optical detector.

Table 2. Specifications of optical powermeter.

Item	Optical Powermeter
1. Diameter of Sensor	10mm
2. Kind of Sensor	Si Photodiode
3. Wavelength of Sensitivity	0.4 ~ 1.0 μm
4. Accuracy of Measurement	2%
5. Time Response	0.2sec. (99%)

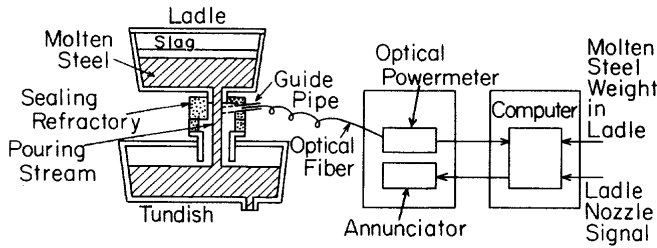


Fig. 11. Schematic system configuration.

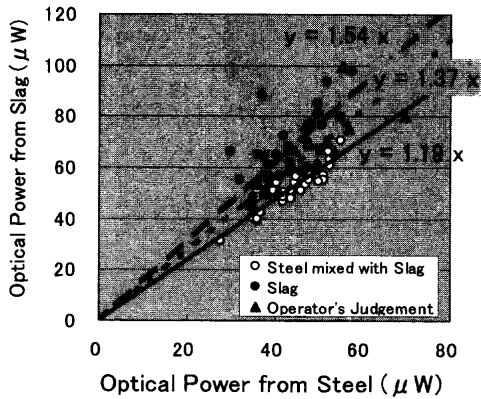


Fig. 12. Relation between optical power from steel and that from slag.

いて警報が出力される。また、光パワー信号が設定値以下になった場合にはシステムに異常が発生したと判断し、判定不可を知らせる警報が出力される。

3.5 全体システム構成

3.1~3.4で述べた各部により構成される全体システムの概要をFig.11に示す。

4. 実機での判定結果

4.1 オペレータ目視と光パワー測定値

オペレータの目視による①スラグ混入、②スラグ流出判定結果および判定前後の溶鋼注入時、スラグ混入・流出時の光パワー測定値の出力結果をFig.12に示す。スラグ混入・流出判定前後の溶鋼注入時とスラグ混入・流出時の光パワー測定値の比（光パワー（スラグ）/光パワー（溶鋼））はオペレータがスラグ混入（Fig.12の○印）と判定したときは約1.19、スラグ流出（Fig.12の●印）と判定したときは約1.54であり、オペレータ目視判定と光パワー変化は良く対応している。

測定した光パワーのスラグ/溶鋼の比は放射率と流径の変化の大きさに依存する。このうち、流径についてレードルからの溶鋼注入末期時とスラグ混入・流出時の注入流をビデオ撮影し、整理した。結果をFig.13に示す。オペレータがスラグ流出と判定した場合はスラグ/溶鋼の流径比は1.4~1.5程度となり、流径比の増加が見られる。また、Fig.7で示した光学系で、流径と受光パワーに影響を及ぼす視

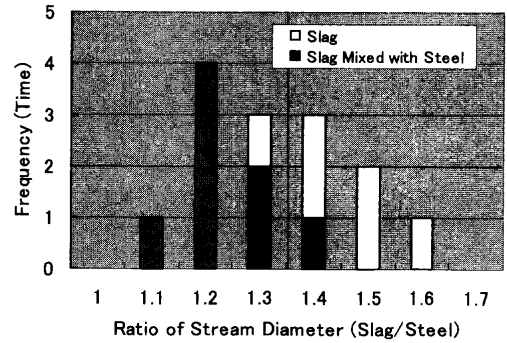


Fig. 13. Ratio of stream diameter (slag/steel).

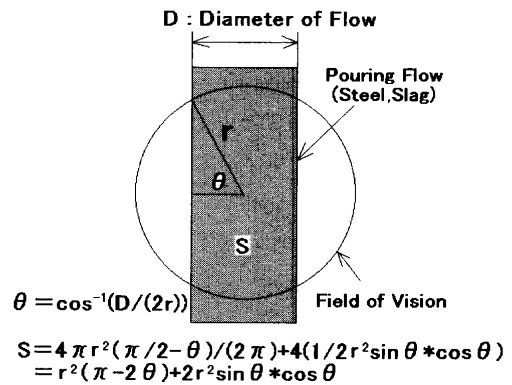


Fig. 14. Area of flow in field of vision.

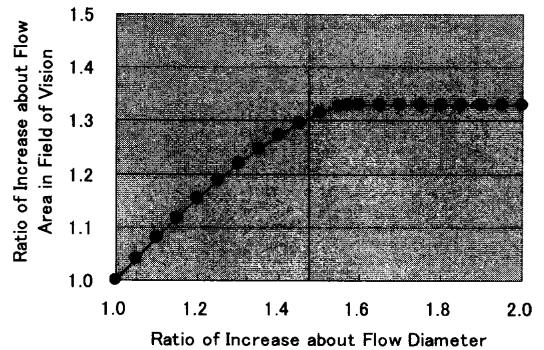


Fig. 15. Relation between ratio of increase about flow diameter and area.

野内の溶鋼・スラグ流の面積の関係をFig.14, 15に示す。50%以上流径が増加しても流れの位置では110φの視野であるため、視野内の流れの面積は30%以上増えることはない。その結果、スラグ流出時のスラグ/溶鋼の流径比は1.4~1.5程度であるため、スラグ流出時の面積比は溶鋼注入時に比べ1.27~1.30程度となる。スラグ流出時の測定光パワーのスラグ/溶鋼はFig.12より約1.54であるため、スラグ流出時の光パワー測定値の増加は①スラグ流時の流径の増加と②スラグの放射率が溶鋼よりも大きいことの両者によるものと考えられる。

一方、オペレータがスラグ混入と判定した場合のスラグ/溶鋼の流径比はFig.13より約1.2であるため面積比では約1.15になるのに対して、測定光パワーのスラグ/溶鋼

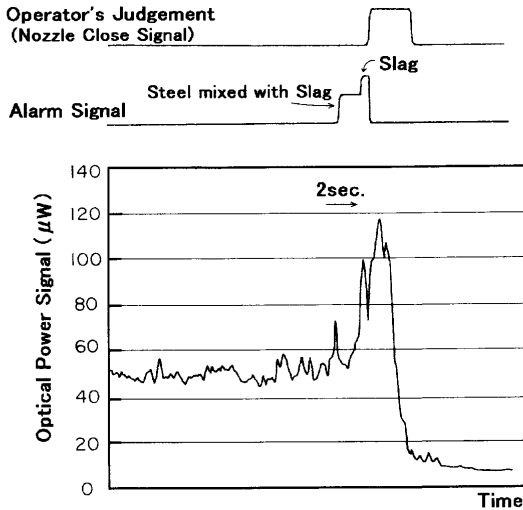


Fig. 16. Example of comparison between alarm output and operator's judgement.

はFig.12より約1.19である。したがって、スラグ混入時も放射率の増加が寄与しているといえる。ただし、スラグ混入時はスラグ流出時よりも視野内のスラグ割合が小さいために放射率の増加による影響が小さいと考えられる。

以上の結果に基づき、3・4で示したスラグ流出判定のロジック、しきい値を定めた。光パワー出力とスラグ混入、スラグ流出警報出力例をFig.16に示す。

本測定装置による光パワー信号を用いて、この判定ロジックによる警報出力を参考にしながら、シールを破らずオペレータが目視なしにスラグ流出判定を行ったシール鑄込みの結果をFig.12の△印で示す。シール鑄込み時の本判定方法におけるスラグ流出前後の溶鋼注入時とスラグ流出時の光パワー測定値の比（光パワー（スラグ）／光パワー（溶鋼））は1.37程度であり、シールを破るオペレータ目視によるスラグ流出判定時の1.54よりも小さい。その理由は、シール鑄込み時は溶鋼流以外の視野範囲がシール材であり、溶鋼からの熱放射を受けたシール材からの反射によるエネルギーも受けるので、溶鋼流からの受光エネルギー以外にシール材からの受光エネルギーが載っており、光パワー測定値の比の分母と分子にその値が加わったため比が小さくなったものと考えられる。

一つの例として Fig.17 にレードルからの溶鋼注入末期時のシールを破る前後の光パワー測定値の出力を示す。シール時の光パワー測定値は $45[\mu\text{W}]$ であるが、シールを破った後は $37[\mu\text{W}]$ に低下している。その差 $8[\mu\text{W}]$ がシール材からの反射によるものと考え、シールを破った場合は溶鋼流時の光パワー測定値 $37[\mu\text{W}]$ がスラグ流時に $37[\mu\text{W}] \times 1.54 = 57[\mu\text{W}]$ となるが、シールした場合には溶鋼流時の光パワー測定値 $45[\mu\text{W}]$ がスラグ流時に概算で $(37 \times 1.54 + 8) = 65[\mu\text{W}]$ となり、同条件の場合でも $65/45 = 1.44$ 倍の変化になると考えられる。ただし、スラグ流出時の視野範囲に占めるシール材面積は溶鋼流時よりも小さい

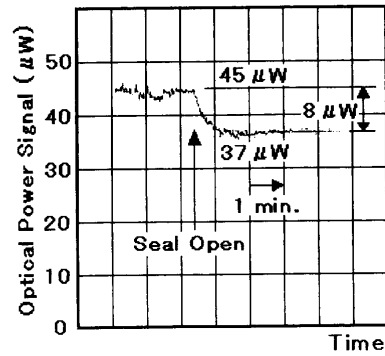
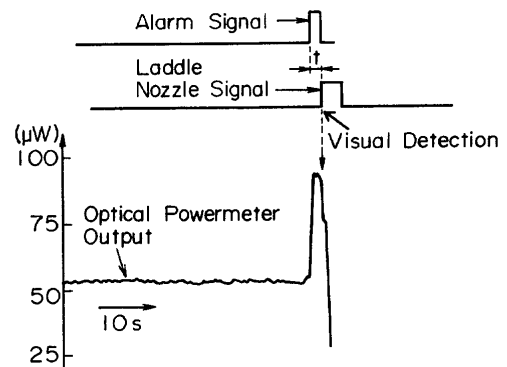


Fig. 17. Change of optical power after seal open.



(a) Example of Alarm Timing of This Method and Operator

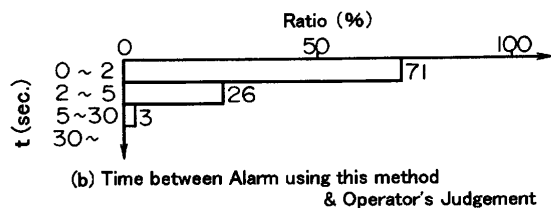


Fig. 18. Comparison of alarm timing between this method and operator.

ので、シール材からの反射の寄与は $8[\mu\text{W}]$ より小さく、実際の比は1.44倍より小さいと予想される。

また、シール鑄込み時は信号処理装置からの警報判定出力と光パワー測定信号以外にオペレータが判断する手段がないため、光パワー測定信号の記録計出力の変化を見ての判断となるので、通常のオペレータの目視によるスラグ流出判定よりも早かったと考えられる。なお、シール鑄込み時のスラグ流出判定は、判定後のレードル内の残留物がスラグであることが確認され、適正であったことが分っている。

4.2 オペレータ目視とスラグ流出判定の比較

35チャージについてオペレータの目視判定と本検知装置のスラグ流出判定の対応を確認した。結果をFig.18に示す。本検知装置のスラグ流出判定の警報出力は、35回のすべてのテストにおいてオペレータのスラグ流出判定（スラグ流出時のレードルスライディングノズルの閉信号）より遅れることはなく、両者の警報出力タイミングの時間差が97%まで5秒以内に入るという良好な対応が確認され

た。また、スラグ流出の見逃しはなかった。

なお、連続鋳造機の型式、スラブ・ブルーム・ピレットの鋳片形状、鋳造鋼種等により異なるが、通常の連続鋳造機においては1チャージ150~250トン程度のレードルの溶鋼を30分~1時間程度で鋳造するため、平均的には40~140kg/秒程度の溶鋼をタンディッシュへ供給することになる。実際には、溶鋼注入の末期時にはレードル内の溶鋼ヘッドがレードル交換直後の溶鋼注入初期時より低いいため、タンディッシュへの単位時間あたりの溶鋼供給量も平均的供給量よりも小さくなることや、スラグの密度が溶鋼のその約1/3であること等により、単位時間あたりのスラグのタンディッシュへの流出量は上記した溶鋼のタンディッシュへの単位時間あたりの平均供給量より小さい。しかし、本方式によるスラグ流出検知タイミングはすべてオペレータ判定よりも早いため、オペレータより早く検出できた時間分のタンディッシュへのスラグの流出を防止することが可能であり、タンディッシュへのスラグ流出量を減少することによる鋳造鋳片の品質向上が期待できる。

5. おわりに

鉄鋼の連続鋳造プロセスにおけるレードルからタンディッシュ間のスラグ流出を検知する光学方式スラグ流出

検知装置の開発について報告した。この装置は溶鋼とスラグの放射率が異なることとレードルのノズル下の溶鋼とスラグの注入流径が異なることから、注入流の放射エネルギーを測定することで、高感度にスラグの流出を検知可能なもので、検出感度と検出率に優れている。また、容易に着脱可能な検出端を有する簡易な構造のため操作性も良好であるという特長を持つ。

本スラグ流出検知装置を連続鋳造機に適用し、検出能・操作性・耐久性およびスラグ流出検知判定の妥当性の評価を行った。その結果、良好な検出能・操作性・耐久性およびスラグ流出検知判定とオペレータ判定との良好な対応が確認された。

本スラグ流出検知装置は連続鋳造機の安定操業と製造鋳片の高品質の確保に役立つものと期待する。

文 献

- 1) T.Itoh, T.Koshikawa, S.Takahashi and T.Imai: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), S847.
- 2) Y.Iida, M.Maeda, K.Emoto, J.Yamazaki, K.Shimoto, K.Hirata, M.Ueda and S.Takahashi: *Kawasaki Steel Giho*, **12** (1980), 514.
- 3) H.Sekiguchi, K.Noguchi, H.Umada, M.Kawagoe, H.Okamoto and N.Bessho: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 197.
- 4) K.Horikawa, T.Saitoh, K.Ehato, M.Kimura, K.Tanigawa, M.Azuma and S.Hosokawa: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 1212.
- 5) 新編温度計測, 計測自動制御学会温度計測部会編, 計測自動制御学会, 東京, (1992), 187.