

鑄片の2次冷却条件適正化による表面疵改善及び 密集疵発生メカニズムの解明

The optimization of the secondary cooling conditions on continuous casting.

河本達也*1 高田昌一*2 北出真一*3 高須一郎*4

Tatsuya Kawamoto, Shoichi Takada, Shinichi Kitade and Ichiro Takasu

Synopsis: Gathered short cracks are observed on billet surface. These surface defects are often observed on high Ni alloy steel ($Ni \geq 2.5\%$), leaded-free cutting steel and vanadium added steel.

In this study, the generation mechanism of these gathered short cracks were clarified by using CAE analysis and its amount were reduced by the optimization of the secondary cooling conditions on continuous casting.

連続鑄造鑄片から製造される鋼片には、様々なタイプの表面欠陥があり、その内の1つに密集疵と言われる、10mm程度の疵が集まって発生する疵がある。この欠陥は鋼種性があり、高Ni鋼 ($Ni \geq 2.5\%$)、鉛快削鋼やバナジウム添加鋼などに多く見られる。

本研究では、密集疵の発生メカニズムを明確にし、連続鑄造での2次冷却条件の適正化により、密集疵の著しい低減を図った。

Key words: continuous casting, secondary cooling, gathered short crack, spray cooling, mist cooling, specific water ratio

1. 緒言

連続鑄造により製造される鑄片は、モールド（1次冷却）からブルームクーラー（3次冷却）に至るまでに冷却される間に鑄片表面に働く応力や歪の影響で割れ疵が発生する。当社の150t-CC工程では、鑄片段階でのグラインダー疵取りや圧延時のホットスカーフなしで鋼片を製造しており、鑄片での欠陥が表面疵として残存する場合があります。鑄片での良好な表面性状が要求される。

鋼片に残存する疵は、線状疵、割れ疵、密集疵及びかぶり疵の4種類に大別される。線状疵及び割れ疵については、モールド構造の見直し、モールドパウダーの高粘度化¹⁾、ブルームクーラーの最適化²⁾などの取り組みにより、また、かぶり疵については、加熱条件及び分塊圧延条件の適正化により改善した。そこで今回、密集疵に関する改善を行った。

密集疵（Fig.1）は、鑄片の広面中央部付近に発生する長さ10mm程度の小さな疵で、鉛快削鋼をはじめ、V添加鋼、高Ni鋼 ($Ni \geq 2.5\%$) などが発生しやすい。これらの鑄片を加熱し、 $\phi 167$ 鋼片に圧延すると特定の面に長さ

10~20mm程度の疵がある幅をもって密集状に発生する。

本研究では、密集疵発生メカニズム解明を目的とし、密集疵に影響を及ぼす2次冷却条件の最適化を行ったので以下に報告する。

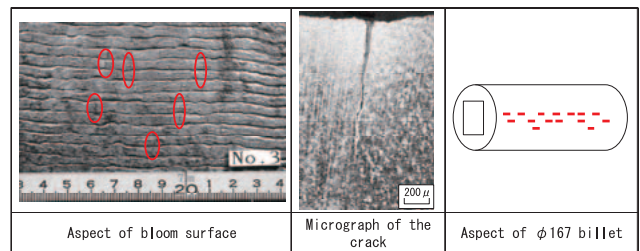


Fig.1 An example of observed gathered-short-cracks.
図1 密集疵の一例

2. 連続鑄造2次冷却設備

連続鑄造における鑄片の冷却設備は、主に1次冷却（モールド）、2次冷却（モールド直下の冷却帯）、3次冷却（ブルームクーラー、浸漬冷却など）の3つに大別される。モールド

*1 研究・開発センター 製鋼プロセスグループ
*2 技術企画管理部 製鋼グループ長
*3 60T連続鑄造設備建設本部
*4 研究・開発センター 製鋼プロセスグループ長、PhD

ドでは、モールドパウダーを介して溶鋼を銅板で冷却し、凝固シェルを形成させ、2次冷却では、モールド直下の鋳片表面を水スプレーで水冷し凝固シェルを成長させる。その後、空冷にて溶鋼を完全に凝固させた後、鋳片を所定の長さで切断し、加熱炉に装入される直前に、鋳片表面の組織を微細化させることにより、加熱炉での結晶粒の粗大化を防止するために3次冷却で冷却される。

2次冷却設備について、Fig.2に示す。モールド直下から7段のスプレーノズルを各面に配置し、鋳片表面を水冷する設備となっている。冷却水量 (Q:l/min) は、ブルーム単重 (kg/m) × 鋳造速度 (Vc:m/min) × 比水量 (l/kg) で与えられ、広面 (南北面)、狭面 (東西面) に配分し、それぞれ7段のスプレーノズルの選定により、各スプレー位置での水量が決定される。Table 1に各位置での水量配分を示す。モールド直下の上2段は、溶鋼のブレイクアウト防止の観点から水量を増量し、残りの5段については均等配分としている。

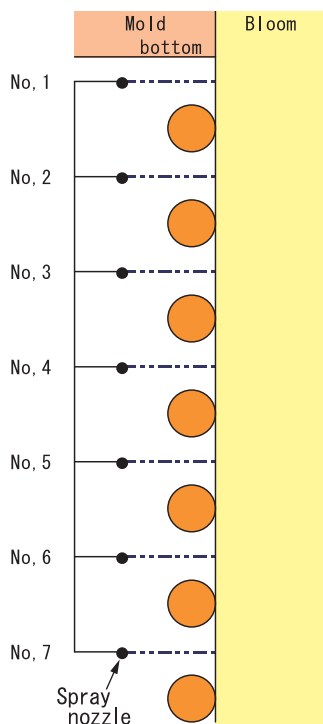


Fig.2 Schematic illustration of the secondary cooling system.
図2 2次冷却のイメージ図

Table 1 Water distribution of the secondary cooling
表1 2次冷却における水量配分

	wide face		narrow face	
	south	north	west	east
	60%		40%	
No. 1	7%	7%	5%	5%
No. 2	6%	6%	4%	4%
No. 3	3%	3%	2%	2%
No. 4	3%	3%	2%	2%
No. 5	3%	3%	2%	2%
No. 6	3%	3%	2%	2%
No. 7	3%	3%	2%	2%

3. 実験方法

供試材の化学成分をTable 2に示す。供試材として、密集疵の発生しやすいはだ焼鉛鋼、高Ni鋼、中炭V添加鉛鋼の3鋼種を用いた。

密集疵の発生しやすい高Ni鋼は、Table 3に示す鋳造条件にて鋳造を行い、鋳片及びφ167鋼片を製造した。比水量を現行水量の±0.05 l/kgと増減させ、ストランド間で条件を変更してテスト鋳造を行った。試験鋳造にて製造した鋳片をφ167鋼片に圧延し、磁粉探傷にて疵を検出し表面疵 (密集疵) の発生状況を調査した。

また、他の鋼種についても同様のテストを行い、密集疵の発生状況を調査した。

Table 2 Chemical compositions
表2 化学組成

Grade	(mass%)							
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Pb
SNCM616	0.17	0.20	0.87	2.80	1.45	0.40	-	-
SCR420 (L)	0.20	0.20	0.86	-	0.97	-	-	0.06
SMNV40 (L)	0.39	0.82	1.15	-	-	-	0.07	0.10

Table 3 Casting conditions
表3 鋳造条件

casting speed	0.40~0.55m/min
oscillation stroke	±2mm
negative strip ratio	75%

4. 実験結果

高Ni鋼 (SNCM616) で、現行条件に対して、比水量を0.05 l/kg増減し、鋳造速度0.46~0.50m/minとした条件で試験鋳造を行った。φ167鋼片での密集疵の発生状況をTable 4に示す。比水量を増量した条件では、現行条件に比べ密集疵の発生が多くなり、比水量を低減した条件では、密集疵の発生は見られなかった。また、鋳造速度が速い条件で、その程度が悪化する傾向が見られた。メニスカス下15m位置での鋳片の表面温度は、比水量を増減して

Table 4 Evaluation results of gathered short cracks
表4 密集疵の評価

ch	Vc	specific water ratio		
		standard -0.05	standard	standard +0.05
A	0.50	○	×	××
B	0.46	○	△	×
C	0.46	○	△	×

も±20℃の範囲内で収まっており、内質についてもバルジングなどによる内部割れの発生は見られなかった。また、鋼片圧延前の鑄片表面観察では、比水量増量で疵個数が増加し、比水量低減で疵発生は見られず、鋼片での密集疵発生状況と傾向が一致していた。

また、密集疵の発生しやすい他の鋼種（はだ焼鉛鋼、中炭V鋼、中炭鉛V鋼）についても、高Ni鋼での結果同様、比水量低減により密集疵の改善傾向が見られた。

以上の結果から、密集疵の低減には比水量の低減が非常に有効であることが確認された。現在、密集疵の発生しやすいはだ焼鋼、中炭鋼については、比水量低減操作を実施し、密集疵発生を防止している。

5. 気水（ミスト）冷却の導入

比水量低減により密集疵発生を低減できることが確認された。しかし、既設の設備では、比水量基準-0.05 ℓ/kg以下では、安定注水できない問題があり、また、低比水量操作を続けると、鑄片表面に付着しているモールドパウダーが2次冷却帯直下に著しく堆積し、この堆積物が鑄片表面にカキ疵を生成するケースがあった。これらの問題を解決するため、2次冷却方法を、従来の水スプレー（1流体）方式から気水（2流体）方式に変更し、更なる低比水量化とモールドパウダー堆積の問題をクリアするための設備導入を行った。

気水冷却に変更するにあたり、スプレー方式に比べ、幅方向の水量分布の改善と比水面積の拡大を考慮し、気水ノズルの選定を行った。従来のスプレーノズルは、幅方向に水量が均一ではなく、鑄片表面の幅方向で不均一冷却が見られた。また、注水範囲の高さ方向の厚みが小さく、ロール間での冷却、復熱を繰り返すため、熱応力が鑄片表面性状が及ぼす悪い影響が懸念されていた。これらを改善すべく、幅方向の均一性と注水範囲の拡大（高さ方向の厚み確保）を指向した。もう1つの問題点であるモールドパウダー

の堆積については、サポートロールの背面からミストを吹きつけモールドパウダーの堆積を防止するロール背面冷却技術を導入し、この解決を図った。

気水冷却装置を導入後、密集疵の発生しやすいはだ焼鋼、中炭鋼については、更に比水量を低減し、比水量基準-0.07 ℓ/kgで操作を実施している。密集疵の改善効果をFig.3に示す。スプレー方式での比水量低減、ミスト冷却による均一緩冷却化により、密集疵の発生は大幅に低減した。

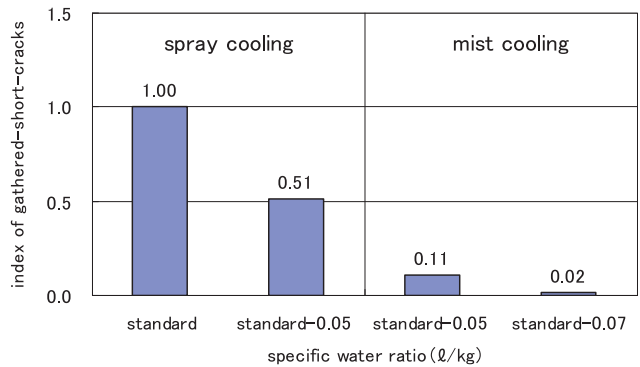


Fig.3 Comparison between spray and mist cooling on gathered-short-cracks in 167mm round billet.

図3 スプレー冷却とミスト冷却における鋼片密集疵の比較

6. 2次冷緩冷却化による密集疵改善についての考察

6.1 密集疵発生メカニズム

密集疵発生メカニズムを以下のように考えた。当社は従来2次冷スプレーノズルにフラットパターンノズルを使用しており、このタイプのノズルの特徴として幅方向の水量分布が生じていた。また、比水量一定方式の2次冷却を行っていたため、鑄造速度が速いほどスプレー水量が多くなり、鑄片の幅方向で見た場合、面中央側では強冷却、コーナー側では緩冷却となり、結果として幅方向の冷却が不均

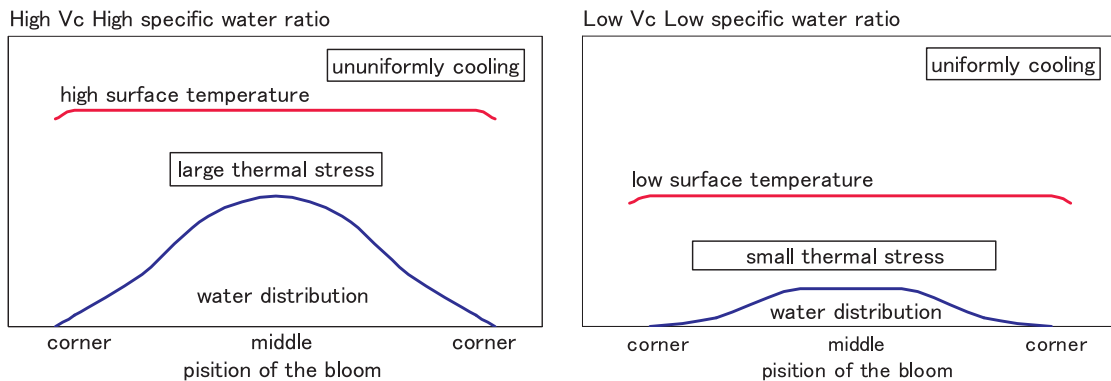


Fig.4 Thermal stress on bloom surface with two types of the secondary cooling.

図4 2次冷却における密集疵の生成メカニズム

一であったと考えられる。また、鋳造速度が速いほどスプレー帯到達時の表面温度は高くなり、面中央部は中間部(D/4位置)、コーナー部に比べ強冷却、熱応力大の状態となり、密集疵となる微小な割れが発生していると考えた(Fig.4)。また、ミスト方式にすると、スプレー方式に比べて冷却能が1.4~2.0倍程度大きくなると言われている³⁾~⁶⁾。密集疵発生メカニズムを冷却方式の違いを含めて応力の観点から解明するため、次節にて鋳片冷却時の熱応力解析を行った。

6.2 2次冷却帯での鋳片表面の温度、応力、歪の数値解析

2次冷却時の熱応力の影響を調べるため、モールド直下~2次冷却帯初期における冷却時の鋳片のモデルを作成し、スプレー冷却及びミスト冷却を想定した弾塑性解析を行った。解析条件をTable 5,6に、モデルをFig.5に示す。モールド直下から2次冷却帯3段目までのモデルとし、スプレー冷却のモデルは、冷却範囲を各10mm厚、水量分布を考慮して幅方向に面中央部から強冷却(80mm)、中冷

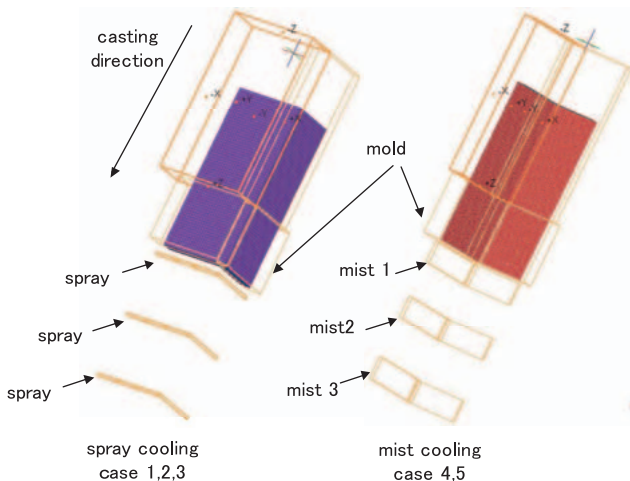


Fig.5 Analytical model of the secondary cooling.
図5 解析モデル

Table 5 Analytical conditions
表5 解析条件

CAE code	DEFORM 3D
Model	Thermo-mechanical coupling analysis (1/4)
Material	SCM440
Bloom size	380 × 530mm
Thickness of shell	40mm (const)
Casting speed	0.50m/min
Temperature of inside	1500°C
Surface temperature of bloom	about 1260°C
Heat transfer coefficient (spray or mist cooling)	Table 6
Heat transfer coefficient (air cooling)	0.02kcal/m ² ·s·°C

Table 6 Heat transfer coefficient
表6 スプレー冷却とミスト冷却の熱伝達係数

	cooling method	position	h (kcal/m ² ·s·°C)		
			middle	1/4	corner
case 1	spray strong	1	2.52	1.77	1.29
		2	1.38	0.97	0.70
		3	1.38	0.97	0.70
case 2	spray	1	2.02	1.42	1.03
		2	1.10	0.77	0.56
		3	1.10	0.77	0.56
case 3	spray weak	1	1.38	0.97	0.70
		2	0.75	0.53	0.39
		3	0.75	0.53	0.39
case 4	mist strong	1	0.20		
		2	0.14		
		3	0.14		
case 5	mist weak	1	0.14		
		2	0.10		
		3	0.10		

却(80mm)、緩冷却(105mm)の3つの冷却ゾーンを設定した。また、ミスト冷却では、冷却範囲を80mm厚、幅方向均一冷却のモデルとした。冷却範囲の熱伝達係数は、スプレー冷却の場合は式(1)、ミスト冷却の場合は式(2)を用いて与え、水冷以外の部分は空冷とした。解析は、Table 6に示した通り、スプレー冷却3パターン、ミスト冷却2パターンの5パターンで実施し、表面温度、応力、歪、歪速度などを評価した。

熱伝達係数(スプレー)

$$h = 2.25 \times 10^4 \times W^{0.55} \times (1 - 7.5 \times 10^{-3} \times T_w) \dots \dots \text{式 (1)}$$

h:熱伝達係数 (kcal/m² · hr · °C)
W:水量密度 (ℓ/cm² · min)、Tw:冷却水温 (°C)

熱伝達係数(ミスト)

$$h = 10^{2.34} \times W^{0.32} \times Q_a^{0.20} \times T_s^{-0.136} \dots \dots \text{式 (2)}$$

h:熱伝達係数 (kcal/m² · hr · °C)
W:水量密度 (ℓ/m² · min)
Qa:空気流量 (m³/hr · ノズル)、Ts:鋳片表面温度 (°C)

Fig.6に鋳片広面表面の温度推移を示す。解析の結果、表面温度は、スプレー冷却に比べ、ミスト冷却のほうが緩やかに冷却され、温度変化も小さいことが分かった。これは、水冷範囲の増加による水量密度の低減による緩冷却化及び非水冷範囲の減少による復熱時間の低減によるものと考えられる。

密集疵の発生要因と考えられる2次冷却時の応力について、破壊条件式⁹⁾で用いられるダメージ値の考え方に基づいた、幅方向の応力(σx)と歪(εx)の積(ダメージ指数)を指標として使い、モールド直下の1つ目の冷却位置での評価を行った。Fig.7にダメージ指数で各条件を評価した結果を示す。ダメージ値の評価では、冷却パターン1

～3の比較からスプレー冷却で比水量を低減するほど明確にダメージ値は下がっており、密集疵の発生指数とも対応した。また、冷却パターン4,5の比較でも比水量低減によりダメージ値が下がっている。これらの解析結果及び実機での密集疵の発生状況との対応から、2次冷却方式及び条件変更による密集疵低減のメカニズムは、比水量低減によりダメージ値で表される鋳片表面に働く力学的エネルギーが減少することによる鋳片表面の微小な割れの抑制であると推定される。また、ミスト冷却とスプレー冷却の比較では、ダメージ値は、ミスト冷却の方がスプレー冷却に比べて同一水量では小さくなっていることが分かる。

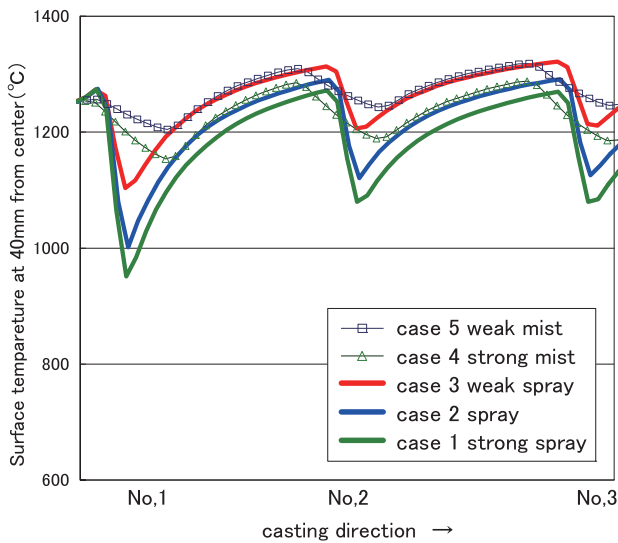


Fig.6 Temperature change of bloom surface.
図6 鋳片表面温度の推移

最大歪速度について比較した結果をFig.8に示す。これより最大歪速度は、スプレー冷却の方がミスト冷却に比べて大きいことが分かる。これは、Fig.6に示した温度推移からも分かるように、ミスト冷却では、スプレー冷却に比べて広い範囲を冷却するため、緩やかに冷却されることとなり、結果として歪速度が低減したのものが考えられる。

以上より、密集疵の低減には、2次冷比水量低減及び冷却方式の変更が寄与しており、ダメージ値が低減し、鋳片表面に働く力学的なエネルギーを低減したこと及びスプレー冷却からミスト冷却の変更で鋳片表面の歪速度を低減したこと、すなわち緩やかに変形させることの複合効果によって大幅に密集疵が低減したと考えられる。

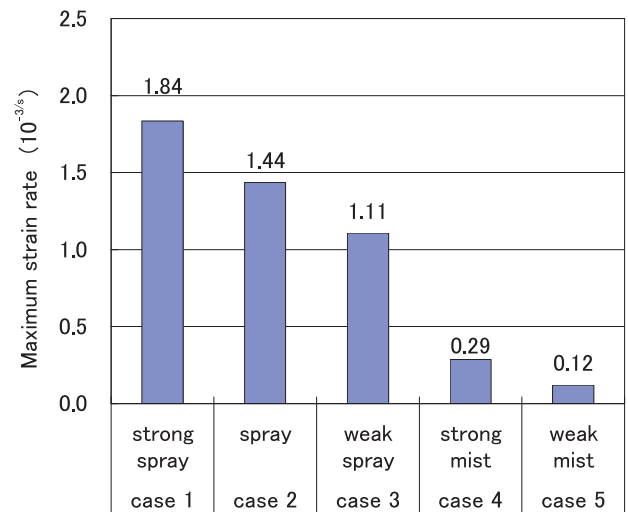


Fig.8 Effect of cooling conditions on the maximum strain rate.
図8 最大歪速度の比較

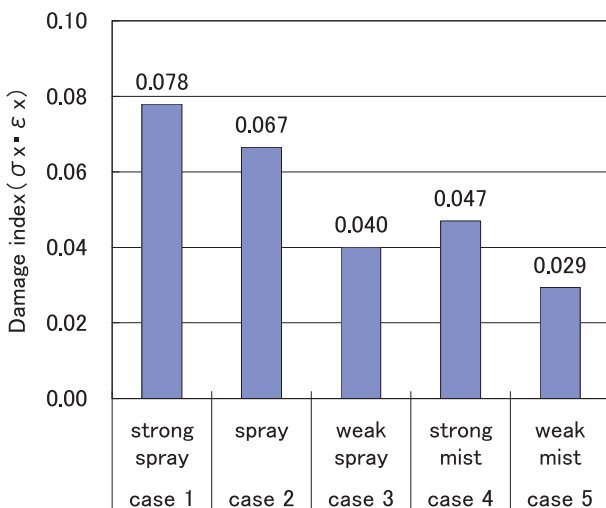


Fig.7 Effect of cooling conditions on damage index.
図7 ダメージ指数の比較

7. まとめ

鋳片の面中央付近に発生する密集疵は、連続鋳造2次冷却時の鋳片表面に働く力学的なエネルギー及び歪速度の影響により発生する。比水量低減やミスト冷却の採用などの2次冷却での均一緩冷却化により、密集疵の発生を抑えることができ、製品の表面品質向上を図ることができた。

参考文献

- 1) 大場康英、高須一郎、北出真一、下口晴之:鉄と鋼, 92 (2006), 7,29
- 2) 大場康英、北出真一、下口晴之、高須一郎:鉄と鋼, 93 (2007), 4,7
- 3) 河野拓夫、島孝次、桑原達郎、他:鉄と鋼, 68 (1982), 13,1792
- 4) 半明正之、辻野雅章、瀬良泰三、他:鉄と鋼, 69 (1983), 12,S924
- 5) 岸田達、友野宏、坂本弘樹、田中勇次:鉄と鋼, 69 (1983), 4,S165
- 6) 中尾正和、高塚公郎、村上昌平、安中弘之:鉄と鋼, 69 (1983), 4,S166
- 7) 松野淳一、中戸参、大井浩:鉄と鋼, 60 (1974), 7, 1026
- 8) M.G.Cockcroft&D.J.Latham:J.Inst.Met, 96 (1968) ,33-39

■ 著者



河本 達也



高田 昌一



北出 真一



高須 一郎