

転炉鉄皮用長寿命化材料の開発と水素切断工法による工期短縮

Development of Long Life Material for Converter Shell and Shortening of Construction Period by Hydrogen Gas Cutting Method

川越 雅嗣 KAWAGOE Masashi JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) 製鋼部 連铸建設班 主任部員 (課長)
細川 晃 HOSOKAWA Akira JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 設備部 製鋼設備室長 (課長)
古川 航平 FURUKAWA Kohei JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 設備部 設備技術室

要旨

転炉鉄皮は長期間の使用の中でクリープ変形し、トラニオンリングとのクリアランスが限界値に至る前に更新工事を行う必要がある。今回、転炉鉄皮用長寿命化材料を開発し、また、水素切断工法による工期短縮も行った。

Abstract:

Converter shell can be deformed by creep in a long period of operation and must be renovated before clearance between furnace shell and trunnion ring reaches the limit value. JFE Steel has developed long life material for converter shell and shortened construction period by hydrogen gas cutting method.

1. はじめに

転炉鉄皮がクリープ変形によりトラニオンリングと接触し、トラニオンリングの亀裂や破損といった設備故障や倒壊事故に至るのを防止するため、転炉鉄皮とトラニオンリングのクリアランスを測定し限界値に至る前に転炉鉄皮の更新工事を行っている。転炉鉄皮の更新工事は転炉製作費や工事費が数億円規模となるうえ、長期間の設備停止が必要となるため生産への影響も大きい。それゆえ、転炉鉄皮の長寿命化対策と更新工事の工期短縮が求められてきた。

このような背景の中、クリープ強度を確保しつつ溶接割れ防止も考慮した転炉鉄皮用長寿命化材料を開発した。また、水素切断工法を用いることで工期短縮も行ったので報告する。

2. 転炉鉄皮用長寿命化材料

2.1 転炉鉄皮用長寿命化材料の開発

2.1.1 SM400C-Mod. の材料設計の考え方

従来、福山や倉敷など各地区の製鋼工場転炉の鉄皮材料は、鉄皮溶損時の補修や変形・亀裂部位の部分更新時の溶接性を考慮し、溶接構造用圧延鋼材 (JIS 規格: SM400C) が使用されていた。SM400C は、溶接性に優れるものの耐クリープ強度は劣位であり、クリープ変形により鉄皮とトラニオンリングが接触するリスクを回避するため、随時転炉鉄

皮の部分更新や全更新を行わねばならなかった。そこで2002年、2003年に福山3製鋼1, 2号転炉の鉄皮全更新を行う際、耐クリープ変形性材料として0.5% Mo-低C鋼 (SM400C-Mod. と命名) を採用したが、使用開始から2年後に、出鋼口近辺の煉瓦受け金物用現場溶接部に再熱割れと思われる亀裂が発生した。

福山3製鋼1, 2号転炉の鉄皮全更新で採用したSM400C-Mod. の材料設計の考え方を図1に示す。まずクリープ強度を高めるためにMoを添加した。鋼は一般的にMoの添加量に比例してクリープ強度が向上するが、Mo 0.5%程度でその効果は頭打ちとなるため、Mo添加量はSB450Mと同等の0.5%とした。また、転炉鉄皮は煉瓦異常溶損等による鉄皮穴あき発生時に溶接補修する必要があり溶接性が求められる。従来材であるSM400C並みの溶接割れ感受性 (PCM) を得るためにはC量を減らす必要があるが、一方でC量は機械強度に影響するため、一定量は必要となる。上記理由により、溶接性があり、かつ一定の機械強度を確保するようCを0.1%程度に決定した。このように材料設計されたSM400C-Mod. は高クリープ強度を有し、なおかつ溶接性をも兼ね備えた材料であり、転炉鉄皮用材料としては最適なものであった。

しかしながら、先に述べたように、現場溶接部に再熱割れと思われる亀裂が発生した。今回、Moを添加したことで結晶粒内の強度が上昇した結果、相対的に結晶粒界の強度が低下したことが要因と考えられる。この対策として、応急措置としては現場溶接方法を改善したが、あわせて恒久対策として、耐再熱割れ性材料の開発を行うこととした。

2019年2月28日受付

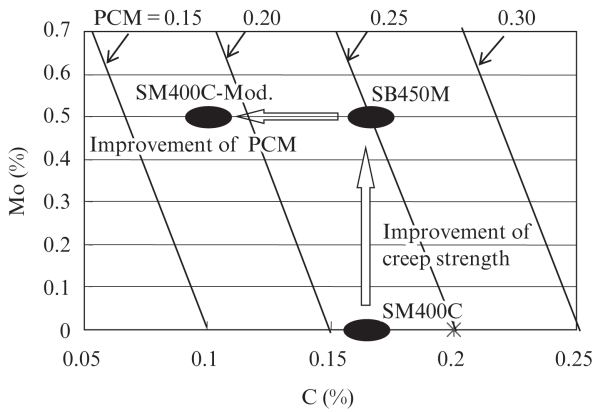


図1 材料設計の考え方
Fig. 1 Approach to material design

2.1.2 耐再熱割れ性材料の開発と成分設計

耐再熱割れ性の指標としては、一般的に Nb を含有しない Cr-Mo 鋼の場合は (1) 式で表される ΔG の指標を、Nb を含有する Cr-Mo 鋼の場合は (2) 式で表される PSR の指標を使用し、ΔG<0, PSR<0 となるように成分設計する¹⁾。

$$\Delta G = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2 \dots\dots\dots (1)$$

$$PSR = Cr + 2Mo + Cu + 10V + 7Nb + 5Ti - 2 \dots (2)$$

今回、表 1 に示すとおり、新材料の候補材として候補材 1 (Mo は 0.5% とし、Nb, V を無添加としたもの)、候補材 2 および候補材 3 (Mo は 0.3% とし、Nb, V を添加したもの、既存鋼種および開発鋼種) を考えた。SM400C, SB450M, SM400C-Mod. 等の従来材を含め、Nb が含有されているものと含有されていないものがあり、耐再熱割れ性を比較評価するのに適当な指標がないため、成分ごとに ΔG と PSR の係数の大きい方とて両方の式を合成した指標、PSR-Mod. を用いて評価することとした。これを (3) 式に示す。PSR-Mod.<0 であれば耐再熱割れ性ありと評価できる。

$$PSR-Mod. = Cr + 3.3Mo + Cu + 10V + 7Nb + 5Ti - 2 \dots\dots\dots (3)$$

PSR-Mod. を用いて各材料の耐再熱割れ性を評価すると、図 2 に示すように、SM400C-Mod. は PSR-Mod.=0 となり、SB450M と同様に、再熱割れする可能性があることがわかった。一方、候補材については問題がないことが確認できた。

なお、各候補材に Ca を 20 ppm 添加しているが、これも再熱割れ防止対策のためである。再熱割れとは、高温使用中、応力集中を受けた溶接熱影響部粗粒域に発生する粒界割れであり、防止対策としては、不純物元素の低減や熱処理が有効である。不純物元素の低減方法としては、Ca 添加が効果的である。Ca を添加することで (4) 式に示すような化学

表 1 候補材の材料成分
Table 1 Chemical component of sample

Material	C	Si	Mn	Mo	Nb	V	Ca (ppm)
SM400C	0.12	0.23	1.11		0.00	0.00	
SB450M	0.24	0.25	0.87	0.52	0.00	0.00	
SM400C-Mod.	0.10	0.25	0.85	0.49	0.02	0.02	
Sample 1 (additive-free Nb, V + Mn + Ca)	0.10	0.25	1.05	0.49			20
Sample 2 existing material (0.3%Mo) + Ca	0.09	0.25	1.50	0.29	0.01	0.05	20
Sample 3 (0.3%Mo + Nb, V + Ca)	0.10	0.25	1.05	0.30	0.02	0.02	20

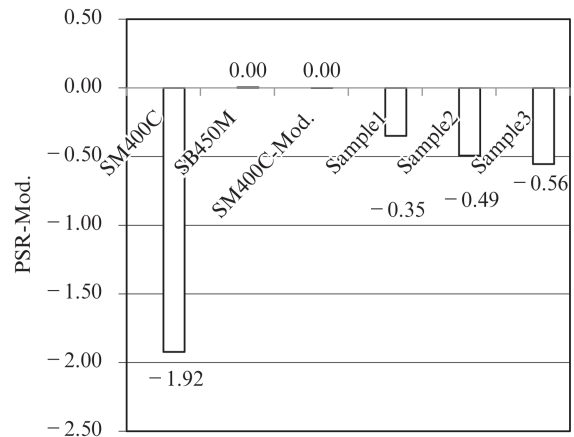
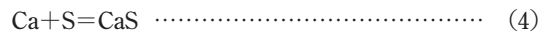


図2 各材料の PSR-Mod.
Fig. 2 PSR-Mod. of materials

反応により CaS (カルシウムサルファイド) を生じさせ、MnS (マンガンサルファイド) の生成を抑制することで、靱性の低下や割れを防止できる。



2.1.3 クリープ試験およびシャルピー衝撃試験結果

表 1 に示す従来材、候補材、計 6 つの材料に関してクリープ試験を行い、耐クリープ変形性を評価した。具体的には、別途行った伝熱解析と応力解析の連成解析結果から求めた温度と応力に近い範囲 (温度は 530~620℃, 応力は 60~130 MPa) で、クリープ変形による累積歪み量が 2% に到達する時間で評価した。2% は、転炉鉄皮がクリープ変形シトラニオンリングに接触するのを防止するために設定している許容変形量に相当する。この結果を (5) 式で表される L.M.P. (ラーソン・ミラー・パラメータ) を用いてグラフ化したものが図 3 である。

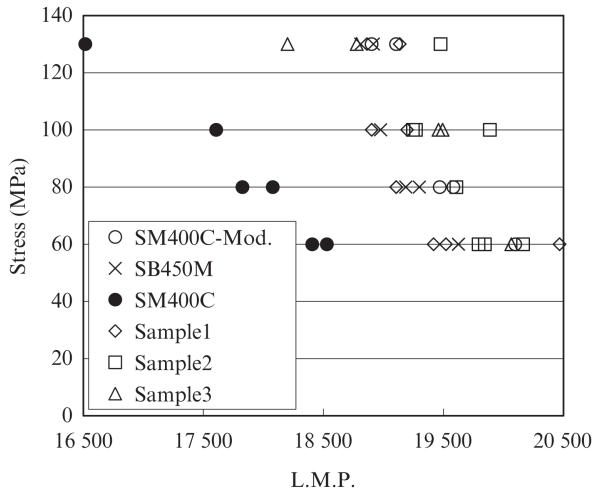


図3 クリープ試験結果
Fig. 3 Result of creep test

$$L.M.P.=T(\log t+C) \dots\dots\dots (5)$$

T: 温度 (K), t: 時間 (h), C: 定数 (一般的な耐熱鋼は 20)

図3で同じ応力でプロットが右側にある(L.M.P.が大きい)ものは、2%の累積歪み量に到達する雰囲気温度もしくは負荷時間が大きいことから、耐クリープ性に優れていると言える。この結果から、候補材1~3どれもSM400Cよりは大幅に優位であり、SM400C-Mod.と同程度かそれ以上となりおり問題ないと言える。

次に、耐再熱割れ性を、実操業を想定し、高温使用後の低温靱性で評価した。評価方法としては、先に述べた従来材、候補材、計6つの材料に関して母材と溶接熱影響部(Heat Affected Zone, 以下HAZと略)各々にステップクーリング(Step Cooling, 以下SCと略)法による加速試験を行いシャルピー衝撃値を測定した。結果を図4に示す。候補材2,3ではHAZにおいてシャルピー衝撃値の急激な低下が確認され、図5に示す通り遷移温度も30℃近辺となり、炉修等の低温時に靱性低下による低温脆性破壊に至る可能性が示された。

2.1.4 転炉鉄皮用長寿命化材料の選定

以上のように高クリープ強度を有し溶接性も兼ね備えたSM400C-Mod.に、さらに耐再熱割れ性に優位な材料を開発すべく成分設計を行った候補材1~3についてクリープ試験やシャルピー衝撃試験を行った結果、HAZのSC後のシャルピー衝撃値の結果から候補材1が最適との結論に至った。

このことから、当時次に更新を予定していた福山2製鋼2,3号転炉鉄皮用材料として候補材1を選定した。候補材1は低(0.1%)C、0.5%Mo添加、20ppmCa添加、Nb、Vフリーの特徴的要素記号の頭文字を取ってCMC鋼と命名した。CMC鋼を転炉鉄皮用材料として採用することで、耐変形性、

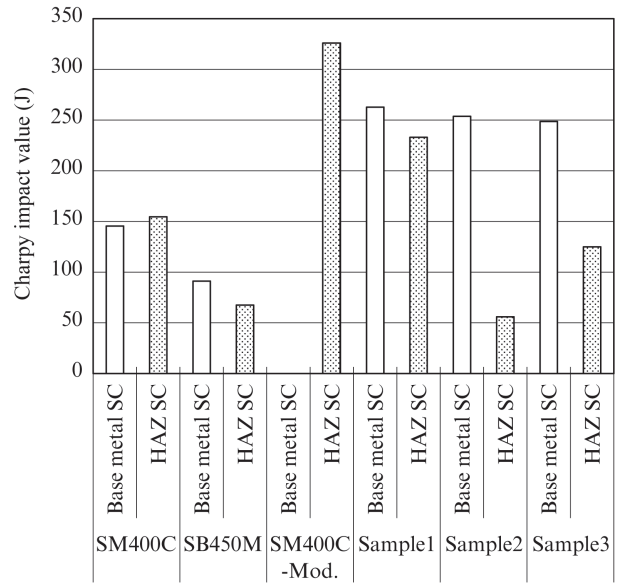


図4 20℃におけるシャルピー衝撃値
Fig. 4 Charpy impact value at 20°C

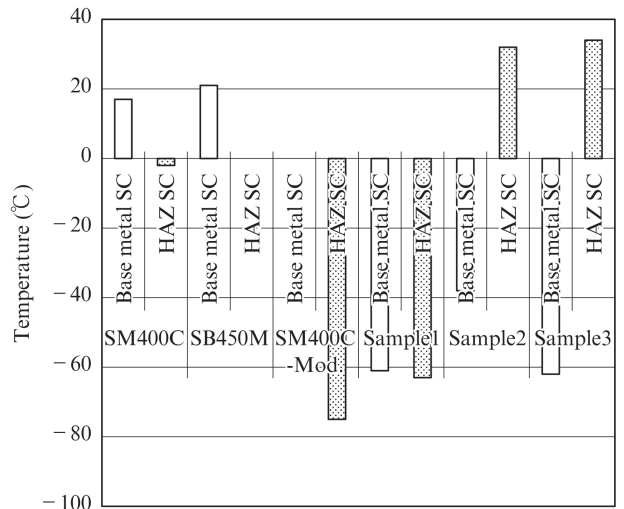


図5 遷移温度
Fig. 5 Transition temperature

耐亀裂性に優れた長寿命な転炉となることが期待できた。

2.2 長寿命化材料の効果

2.2.1 福山3製鋼転炉鉄皮全更新前後の変形量実績

図6に福山3製鋼工場のSM400C-Mod.採用前後の鉄皮変形トレンドを示す。採用前は約10万ch使用後に変形量が100mmを超えているが、採用後は20~40mm程度の変形量であった。鉄皮変形速度は採用前の20~40%程度になっている。

2.2.2 福山2製鋼転炉鉄皮全更新前後の変形量実績

図7に福山2製鋼工場のCMC鋼採用前後の鉄皮変形トレンドを示す。採用前は約10万ch使用後に変形量が80mm程度であった。採用後は8万ch使用し50mm程度

の変形量であった。鉄皮変形速度は、採用前の78%になっている。

2.2.3 今後の展望

SM400C-Mod.を採用した3製鋼では、転炉鉄皮の変形は減少しており、炉寿命の延長が期待できる。CMC鋼を採用している2製鋼でも変形速度は減少しているが、2.1.3項で述べたクリープ試験結果ほどの効果は出ていない。今後、クリープ試験と比較して2製鋼転炉鉄皮の変形量実績が増加した原因を調査し、CMC鋼の有効性を評価していく。

3. 水素切断工法による工期短縮

3.1 転炉鉄皮部分更新

1章で述べたように、転炉鉄皮の全更新は、鉄皮中部が高温クリープ変形しトラニオンリングと接触するのを防ぐために行う。一方、鉄皮に局所的な変形が生じた場合には部分更新を行う。至近では、福山3製鋼で転炉鉄皮上部の部分更新を行った。部分更新では、再使用する既設鉄皮の切断面を可能な限り平滑にすることでグラインダーによる研磨量を削減でき、工期短縮が可能となる。福山3製鋼転炉鉄皮の部分更新においては、水素ガス切断を適用し切断面の平滑化を図った。

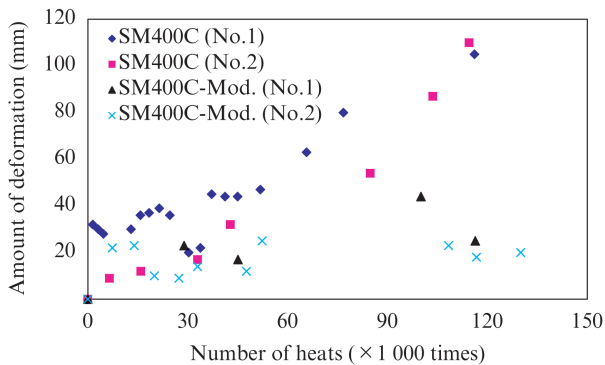


図6 SM400C-Mod. 使用前後の変形量

Fig. 6 Amount of deformation after using SM400C-Mod.

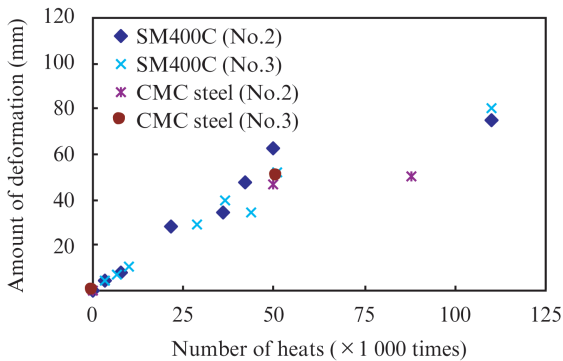


図7 CMC鋼使用前後の変形量

Fig. 7 Amount of deformation after using CMC steel

3.2 水素ガス切断

水素ガス切断は、水素ガスにより予熱した鋼板に切断酸素を吹き付けることで鋼が酸化し、酸化熱によって溶融した鋼を酸素の噴流によって吹き飛ばすガス切断方法である²⁾。水素ガス切断の特徴は、一般的なプロパンやアセチレンを用いたガス切断と比較して切断速度が速いことがあげられる。その理由は、水素炎の燃焼速度がプロパンやアセチレンの炎の燃焼速度より早いいため、火炎が細くなり熱エネルギーが集中して切断材料に伝えられるからである²⁾。図8に水素ガス切断とアセチレンガス切断の切断速度とノッチ深さの関係を示す。アセチレンガス切断は切断速度を増加させると160 mm/minの速度で限界速度に達したが、水素ガス切断では320 mm/minで限界速度に達した。また、ノッチ深さはアセチレンガス切断では最小1.5 mmであったのに対し、水素ガス切断は最小0.5 mmであった。このことから、水素ガス切断の方がアセチレンガス切断に比べ切断速度が速く、切断面も平滑であることが分かった。

写真1にアセチレンガス切断による切断面、写真2に水素ガス切断による切断面を示す。水素ガス切断の切断面はアセチレンガス切断のものと比較して、凹凸が少なく平滑であることが分かる。このことから、切断面の手入れ時間の短縮が期待できる。切断面が平滑になるのは、火炎が細く単位面積当たりの熱エネルギーが大きいいため、安定的に切断できるからである。

3.3 水素ガス切断の実機適用

福山3製鋼転炉鉄皮上部の部分更新工事において水素ガス切断を適用した。水素ガス切断適用による工期短縮結果を図9に示す。これは実際の工程と当初予定していたアセチレンガス切断による工程を比較したものである。その結果、切断速度が20%向上し、切断時間が10時間短縮できた。また、切断面の平滑化により手入れ時間が22時間短縮できた。

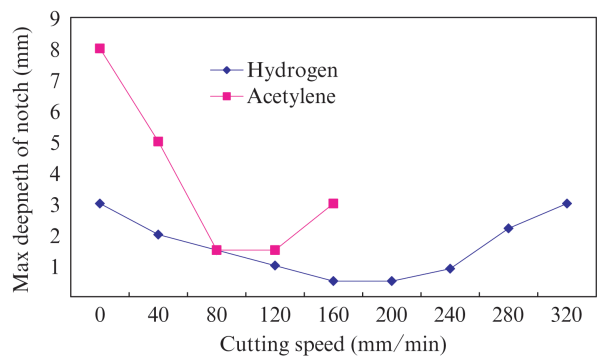


図8 切断速度とノッチ深さの関係

Fig. 8 Relationship between cutting speed and notch depth

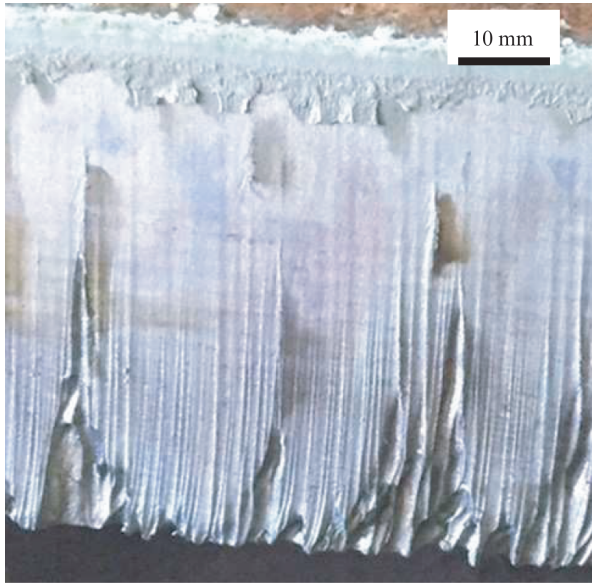


写真1 アセチレンガス切断の切断面
Photo 1 Cutting surface by acetylene gas

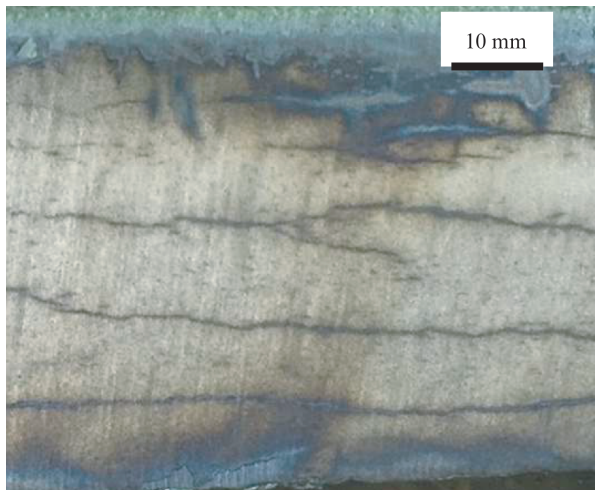


写真2 水素ガス切断の切断面
Photo 2 Cutting surface by hydrogen gas

4. おわりに

本稿では転炉鉄皮用長寿命化材料の開発と水素切断工法による工期短縮について紹介した。

(1) 転炉鉄皮用長寿命化材料の開発においては、福山3製鋼1, 2号転炉で採用したSM400C-Mod. で問題となっ

	12 hr	24 hr	36 hr	48 hr	60 hr	72 hr	84 hr
Marking	••• —					← 32 hr →	
Equipment installation	••• —						
Cutting	 —————					
Polishing					—	

···Past schedule of acetylene gas cutting

— Schedule of hydrogen gas cutting

図9 短縮実績

Fig. 9 Shortening achievement

た再熱割れを改善するため、PSR-Mod. の指標を用いて成分設計を行い、さらに粒界割れ防止のためCa添加も行った。候補材1~3についてクリープ試験とHAZのSC後のシャルピー衝撃試験を行い、候補材1をCMC鋼と命名し、2製鋼2, 3号転炉鉄皮用材料として選定した。

(2) 転炉鉄皮用長寿命化材料の効果は、SM400C-Mod. では鉄皮変形速度が採用前の20~40%に低減し、CMC鋼では78%に低減した。

(3) 水素切断工法を用いて、切断速度の向上と切断面の平滑化を図り、過去実績と比較し32時間の工期短縮を実現した。

参考文献

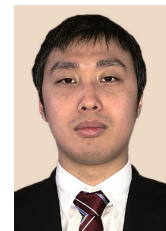
- 1) 中村満. 鋼溶接熱影響部の再熱割れ感受性評価に関する研究. 1994, p. 1-2.
- 2) 宮崎建雄, 中島義男, 中東博. 造船における水素ガス切断の評価事例. 日本船舶海洋工学会誌 KAIRIN (威臨). 2009, no. 22, p. 2-8.



川越 雅嗣



細川 晃



古川 航平