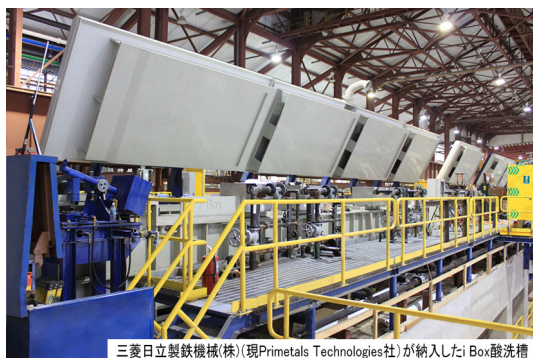


# 省エネルギーで高速酸洗を可能にした 熱延鋼板向け i Box 酸洗槽の開発

Development of i Box Pickling Tank for Hot Rolled Strip  
to Save Energy and Achieve High De-scaling Performance



三菱日立製鉄機械(株)(現Primetals Technologies社)が納入したi Box酸洗槽

辻 孝誠\*<sup>1</sup>  
Kosei Tsuji

中司 龍輔\*<sup>2</sup>  
Ryusuke Nakatsuka

末盛 秀昭\*<sup>3</sup>  
Hideaki Suemori

丹原 正雄\*<sup>4</sup>  
Masao Tambara

水田 桂司\*<sup>5</sup>  
Keiji Mizuta

松田 直彦\*<sup>6</sup>  
Naohiko Matsuda

近年、製鉄鋼板分野で増産されている高い抗張力をもった高張力鋼板は、酸洗に要する時間が普通鋼板より長く、お客様である製鉄所において、熱延鋼板の酸洗工程が高張力鋼板の増産のボトルネックの一つとなってきている。一方、生産原単位の低減、環境負荷低減も求められており、高速酸洗がますます重要になってきている。このニーズに対応するため、Primetals Technologies Ltd.(以下、PT)では電動ポンプを用いて強制対流を起こす従来式の噴流式酸洗槽とは異なり、鋼板が酸洗槽内を進行する駆動力のみで強制対流を起こし、噴流式酸洗と同等の生産性を実現した省エネルギー、省メンテナンスの i Box 酸洗槽を開発した。

## 1. はじめに

熱間圧延鋼板用酸洗槽は塩酸、硫酸、硝酸やフッ酸を槽内に充満し、その酸液中に熱間圧延鋼板を通過させることで、熱間圧延中もしくは冷却過程で発生した鋼板表面の酸化皮膜(以下スケール)を除去する設備である。本稿では自動車用高張力鋼板等の低炭素熱延鋼板用の塩酸を使用した酸洗槽を対象としている。

近年、自動車から排出される CO<sub>2</sub> 削減及び省エネルギーを目的とした車体軽量化の要求にこたえるために、お客様である製鉄所は高い加工性を持ち高強度の高張力鋼板(TRIP 鋼や DP 鋼)の増産を進めている<sup>(1)</sup>。この高強度高張力鋼板には従来鋼板に比べケイ素が多く含まれており、ケイ素酸化膜は従来の鉄系酸化膜より酸洗時間がかかる。そのため、高張力鋼板の生産性向上のためには、高速酸洗できる酸洗槽が不可欠である。

一般的に、酸洗槽内を走行する鋼板の表面には、鋼板が同伴する酸液の境界層が形成され、鉄と反応を終えた低塩酸濃度の酸液が鋼板表面上に滞留して酸洗時間を増大させることは周知である。そこで、この境界層を薄くするため、酸洗槽内に噴射ノズルを設置して鋼板表面に酸液を噴射する強制循環式酸洗槽が従来採用されてきた。しかしながら、この方法は酸液循環用の電動ポンプの電力が必要になること、及び酸洗槽に堆積するスラッジ状のケイ素酸化物が巻き上げられて循環配管に詰まるなどメンテナンス性を悪化させる問題がある。そこで、PT では、これらの課題を解決するために、噴流酸洗槽(参考文献(2)参照)と同等の酸洗性能をもち、循環用の電動ポンプを必要としない新しい酸洗方式である i Box 酸洗槽(Immersed Box Pickling Tank)を開発した。本稿ではこの i Box 酸洗槽の特徴、利点に関して述べる。

\*1 Primetals Technologies Japan(株)プロジェクト統括部 首席技師 技術士(機械部門)

\*2 Primetals Technologies Japan(株)プロジェクト統括部

\*3 Primetals Technologies Japan(株)プロジェクト統括部 首席技師

\*4 Primetals Technologies Japan(株)プロジェクト統括部 室長

\*5 総合研究所伝熱研究部 首席研究員 工博

\*6 総合研究所 首席プロジェクト統括

## 2. i Box 酸洗槽の構造

図1に i Box 酸洗槽の模式図を示す。一般的に、酸洗槽は3～4槽構成となっている。

i Box 酸洗槽は、1槽の酸洗槽長さにもよるが1槽あたり3～5個の浸漬ボックスと呼ばれる高さが低い箱を酸洗槽中に設置し、熱延鋼板がその箱の中を走行する構造となっている。各浸漬ボックスの出側には、走行する熱延鋼板を下面から支持するグラナイトスキッドと熱延鋼板上面側にはディバイダロールと呼ぶロールが設置されている。このグラナイトスキッドとディバイダロールの間の狭い空間に熱延鋼板を通過させることで、鋼板表面に同伴している境界層を一度削り取る。更に後続する浸漬ボックスの上下壁面により、鋼板表面に成長してくる境界層の厚みを鋼板と浸漬ボックス内面までに抑制することで、後述する鋼板表面への物質移動が促進され、濃度の濃い塩酸が熱延鋼板に到達しやすくなり、酸化皮膜の溶解反応が促進される。また、図1の断面図に示すように酸洗槽側面、浸漬ボックス外側に浸漬式の蒸気熱交換器を配置し酸洗槽内の酸液を加熱するようになっている。一方で、操業が停止した際には鋼板が酸液に浸かったままになるので過酸洗や母材の腐食による板切れが発生する可能性がある。その操業停止中は酸洗槽内の酸液を各槽近傍に設置された貯蔵タンクに液抜きし、酸液面を下げ鋼板が酸液に浸からないようにする構造となっている。操業を開始する前にポンプで酸液を酸洗槽に戻すことで、液面を操業のレベルに戻す操作を行う。i Box 酸洗槽ではこのポンプ動作はこの液上げのためだけに使用する。

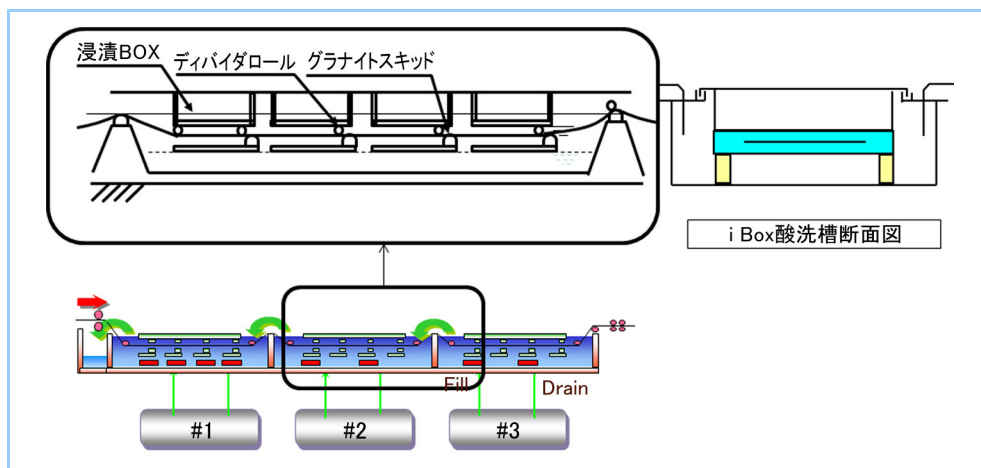


図1 i Box 酸洗槽の模式図

図2に従来タイプである強制循環式酸洗槽(PT では噴流式酸洗槽と呼称)を示す。このタイプの酸洗槽では、前述のように酸液を循環するために電動ポンプが設置されており、更に循環配管中に熱交換器が設置されている。酸洗槽と循環タンクの間液抜き配管が設置されており、酸洗槽内から常に酸液が抜け落ちることになるので、その分循環ポンプの負荷がかかる。i Box 酸洗槽ではこの課題も解決している。

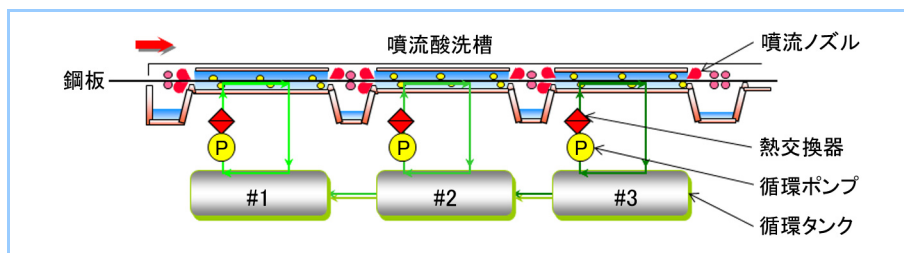


図2 循環式酸洗の例(噴流酸洗)

### 3. 高速酸洗性能

#### 3.1 酸洗槽中の脱スケール過程

酸洗槽中で起きる脱スケール現象の化学反応を示す。

熱間圧延で発生したスケールは一般的に、**図3**に示すように母材近くから、FeO (Wüstite), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetite), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Hematite) から構成されており、各酸化物は塩酸により溶解される。一般的に Magnetite, Hematite と塩酸の反応では、FeCl<sub>3</sub> が生成されるはずであるが、実機酸洗槽内の酸液中の FeCl<sub>3</sub> の濃度は想定される量よりも少ない傾向がある。よって母材の鋼板が塩酸と反応し、電子が供給されることにより、Fe<sup>3+</sup>の一部は Fe<sup>2+</sup>に溶液内で還元されていることが類推される。これから考えると実際の酸洗槽内で起こっている化学反応は下記の化学式が妥当と考えられる。

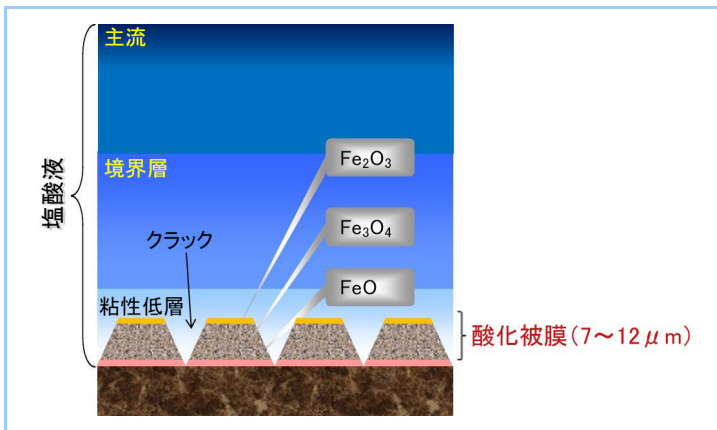
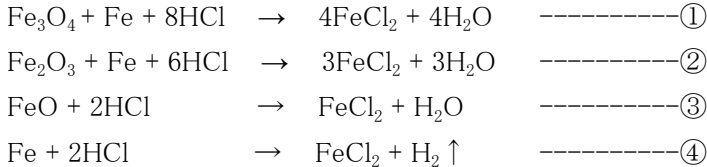


図3 スケール組成とクラック

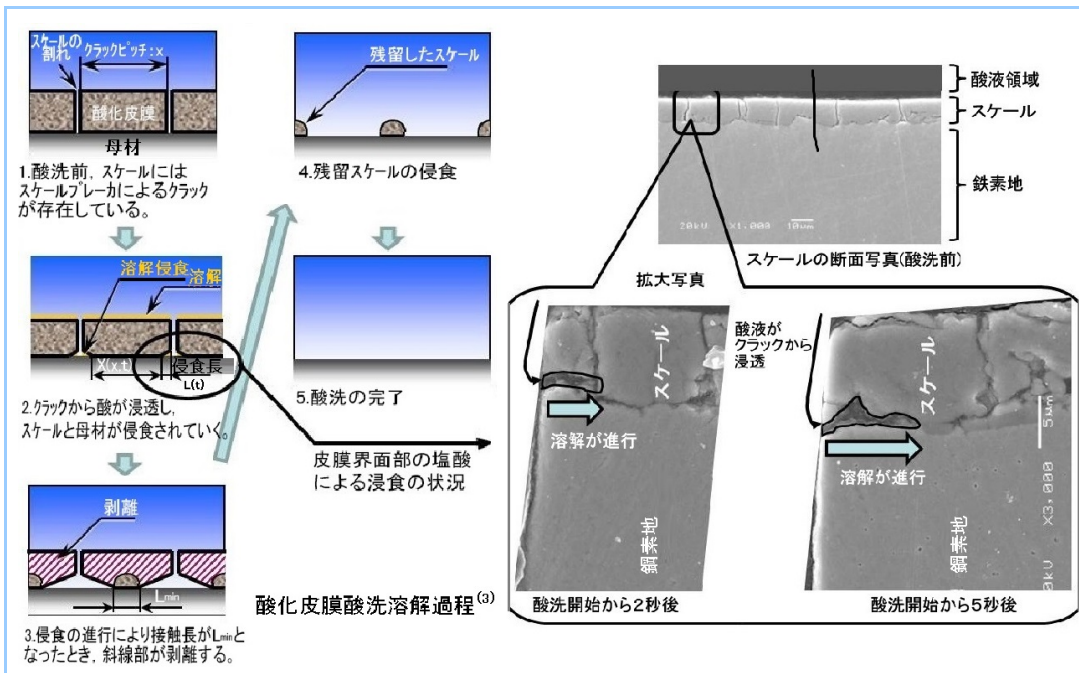


図4 酸洗溶解の様子

以前に本技報前報<sup>(3)</sup>で報告した化学式では、酸素が発生するような記載を行っていたが、この場を借りて訂正したい。

脱スケール過程に関しては、前報に概略説明している<sup>(3)</sup>が、酸洗初期の段階では、予め酸化

皮膜部にテンションレベラー式スケールブレーカーで作られたクラックへ酸液が侵入して母材と酸化皮膜の界面部(母材及び FeO)が先に溶解。その溶解がある程度進行した時点で酸化皮膜が前記界面部から剥がれることが説明されている。

溶解途中の酸化皮膜(スケール)を酸洗時間ごと(2秒, 5秒)に採取して、酸化膜の断面部を観察した写真を図4に示す。酸化皮膜と母材(鉄素地)の界面部が選択的に溶解進行している様子が分かる。これは上記③式の反応が最も早いことと④の母材の反応も発生していることを裏付けている。

### 3.2 酸洗槽内と鋼板表面近傍の酸液濃度

前述の酸洗メカニズムから言えることは、高速酸洗の設計には、高濃度の酸液をいかにして鋼板表面まで到達させるかを予測する技術が不可欠であり、それを計算予測した事例は少ない。PTJではi Box 酸洗槽の設計において、酸洗槽内での流動状態と酸液の濃度拡散状況の数値解析を行っている。

図5に示す解析結果は、酸洗槽全体の酸液濃度分布である。i Box 酸洗槽では鋼板が進行する力でのみで酸液対流を発生させおり、当初は酸液攪拌が不足して、ボックス内外側で酸液濃度差が発生することを懸念していた。しかし、解析結果からその差は操業に問題ない程度であることが分かった。

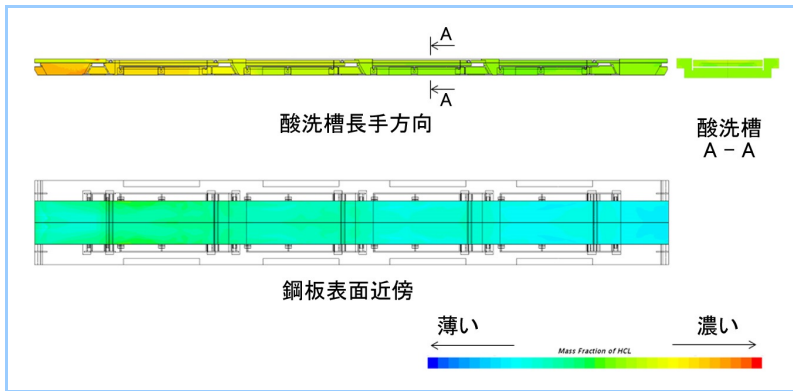


図5 酸洗槽内の酸液濃度分布

また、浸漬ボックス内の鋼板表面近傍の濃度分布に着目すると、ディバイダロール通過後は境界層が薄いため鋼板近傍の酸液濃度は高くなり、その後流のボックス中央部では境界層厚みの増大に伴い酸液濃度の低下が予測される。この状態も数値解析を行い、図6のように、鋼板表面極近傍の物質伝達率を酸洗槽長手方向にグラフ化して設計に活用している。図中には噴流酸洗槽及び Deep 酸洗槽の解析結果も併記している。解析中の物質伝達率が高ければ、鋼板表面に高濃度の酸液が到達していることを示し、i Box 酸洗槽は噴流酸洗槽と同等の酸洗速度が出せると予測できる。今後はこの数値解析を更に進めて i Box 酸洗槽の改良を行っていく。

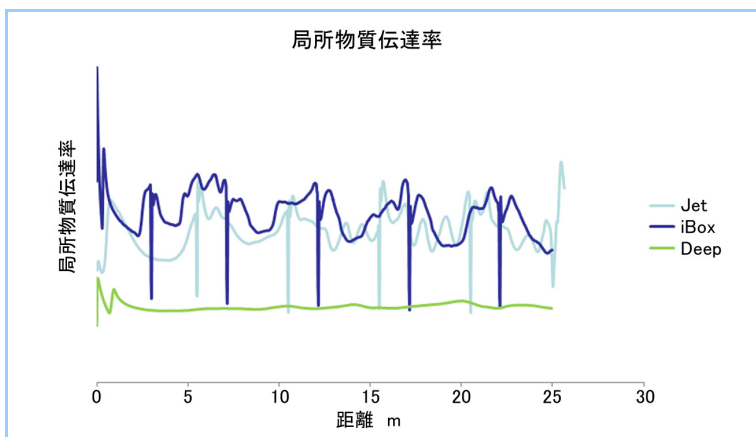


図6 酸洗槽物質伝達率

## 4. 省エネルギー性とメンテナンス性

### 4.1 循環システムを使用しないことによる省エネルギー

酸洗槽中の酸液温度は一般的にスケールと酸液の化学反応を促進するために、酸液温度を85～90℃程度に昇温し、常温で酸洗槽内に入ってくる熱延鋼板の温度も酸洗槽中で酸液からの熱伝達で同様の温度まで昇温する。そのため、常に酸液を一定の温度に維持するために蒸気を熱媒体とした熱交換器で酸液を昇温している。従来タイプの循環式酸洗槽では噴流を発生させるための酸液循環システムの途中、酸洗槽の外に熱交換器を設置する必要がある。そのため、循環式酸洗槽では次のエネルギーロスが発生していた。

- ① 循環ポンプを駆動するために必要な電気エネルギーのロス
- ② 循環配管及び循環タンクからの放熱エネルギーのロス

一方 i Box 酸洗槽では、走行する鋼板に同伴された酸液がボックス内を入口から出口に向けて流れるため、ボックス出口近傍の酸液水位がボックス入口近傍より高くなる。そのままではボックス入口近傍の水位が鋼板位置を下回り鋼板が露出するため、ボックスの両側（酸洗浴内）に酸液を戻す空間を設けている。この空間部に浸漬型の熱交換器を設置して酸液の昇温を行うため、熱交換器に酸液を送り込むためのポンプ及びその動力も不要となる。唯一の問題は、この空間を確保するために酸洗槽が大きくなり酸洗槽表面からの放熱が増大するも、不要になった配管、循環タンクからの放熱量低減により全ての機器からの合計放熱量は少なくなる。

さらに、従来の酸洗槽では酸液表面が空気に触れ酸液が蒸発しやすいが、i Box 酸洗槽ではボックス部の上面カバーで液面を閉じる構造となっており、液面からの酸液蒸発を抑制する効果があり、その熱ロス分も低減効果が期待できる。

実機では、操業条件により大幅にエネルギー消費量が変化するためその比較は難しいが、これらの省エネルギー効果の計算結果を噴流酸洗槽と比較した一例として表1に示す。

表1 エネルギー消費比較（噴流酸洗槽を100としたときの比率を記載）

項目		循環式 (噴流酸洗)	i Box
電気エネルギー	平均	100	18
	酸洗槽	100	162
酸洗槽と循環システムからの放熱 (鋼板昇温熱量を除く)	循環システム	100	0
	総計	100	76

### 4.2 メンテナンス頻度の低減

近年の高張力鋼板増産により、塩酸溶液に溶解せず粒子状で浮遊する酸化ケイ素のスラッジが増加傾向にある。このスラッジは循環式酸洗槽の熱交換器、酸洗槽内の噴流ノズル等に堆積結晶化して、酸液の循環流量減少を引き起こし、酸洗速度つまり生産量を減少させることになる。また、閉塞による異常圧力の発生のために、FRP やポリプロピレン製の樹脂配管のフランジ部からの噴出しや最悪の場合破裂の問題が生じることもある。このような状況を防ぐために定期的な熱交換器の洗浄が必要となるが、結晶化した酸化ケイ素は簡単には取り除くことができず困難を極めている。

一方、i Box 酸洗槽では、前述のように酸洗槽が大きいためスラッジが酸洗槽下層に沈殿しやすく操業に悪影響を与えにくい。また、熱交換器に対しても i Box の熱交換器は浸漬型で循環式のように熱交内部でスラッジが閉塞することがない。熱交換器表面への付着に対しては、熱交換器を酸洗槽1槽に複数設置することで、順次酸洗槽から取り出して表面付着物を除去することが可能であり、操業休止時間の短縮に貢献できる。

## 5. i Box 酸洗槽の省スペース化への対応

現在、特に先進国の多くの製鉄会社の連続酸洗設備は、1950年代頃の長年の使用により老朽化して更新時期を迎えている。更に、高張力鋼などの難脱スケール材への増産への対応、環境・生産性からの省エネルギー化の要求から、i Box 酸洗槽への更新需要が期待できる。

このニーズに対応するために、更新工事に適した i Box 酸洗槽の開発も同時に行ってきた。老朽化した酸洗槽のほとんどは深い槽に熱延鋼板をカタナリで浸漬するディープ酸洗槽と呼ばれる最も初歩的な酸洗槽であるために、i Box で必要とされる操業停止時に過酸洗を防ぐための廃液設備が備え付けられていない酸洗槽である。そのため、i Box を導入するためには廃液貯蔵設備を設置するスペースが必要となり、投資コストが増大する問題が生じる。PT では既設の背の高いディープ槽に対して、上部に i Box 酸洗槽を配置し、残った下部に廃液貯蔵設備を配置して設置面積を最小限にとどめる方式を開発し図7のような形で納入している。

また、既設のディープ酸洗槽を継続利用する場合は、i Box のボックス部のみをディープ槽中に設置する工事を実施している。このように、i Box 酸洗槽は新設工事のみならず、改造更新工事にも適した形に対応でき、今後お客様の要求を満たすために柔軟な設計でラインナップを増やす予定である。

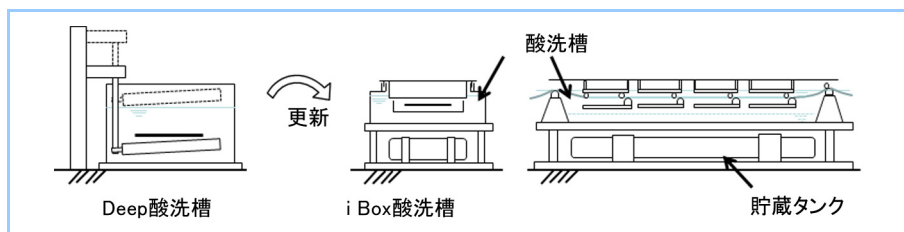


図7 改造型 i Box 洗酸槽

## 6. まとめ

本稿では、i Box の酸洗性能の高さを数値解析等の手法を用いて説明してきた。今回用いた数値解析手法により、i Box 酸洗槽内の流動状態を最適化することが、設計の一助となると考える。また、省エネルギー性、省メンテナンス性に対するお客様のニーズは高いため、さらなる改善が期待されている。

また、酸洗済鋼板や冷延鋼板の製造においては、酸洗工程は不可欠な工程ではあるにも関わらず、他のプロセス設備と比較すると研究開発が少ない。国内外の連続酸洗設備に占める PT グループのシェアは高く、今後もこの技術優位性を維持し研究開発を行うことで、お客様の生産性向上やコストダウンに対する一助となるべく努力し続ける。

## 参考文献

- (1) 中垣内 達也ほか、低合金 TRIP 鋼板の機械的特性に及ぼす Si 及び Al の影響、鉄と鋼 Vol.97 No.5 (2011) p.35~43
- (2) 柴(しば) 富 信博ほか、新型噴流酸洗設備の開発、三菱重工技報 Vol.29 No.1 (1992) p.24~29
- (3) 平井 悦郎ほか、酸洗技術の現状と今後の動向、三菱重工技報 Vol.36 No.6 (1999) p.308~311