

ふえらむ

*Bulletin of
The Iron
and Steel
Institute of
Japan*

Vol.16 / No.7 / 2011

(社)日本鉄鋼協会会報

ISSN1341-688X

鉄と鋼

Tetsu-to-Hagané

Vol.97 / No.7 / 2011

ISSN0021-1575

世界のPSA技術

住友精化は、PSAガス分離精製装置の専門メーカーです。

O₂、N₂、H₂、CO₂、Ar、CH₄、など先進の各種PSAガス分離精製技術により
数多くの納入実績を有しています。

■ PSAガス分離精製装置

夢をはぐくむ
化学の力

住友精化は、夢を語り、
未来の化学を語る
企業であり続けたいと
考えています。



O₂-PSA



H₂-PSA



N₂-PSA

 住友精化株式会社

ガス事業部 機器システム部

本社(東京) 〒102-0073 東京都千代田区九段北1丁目13番5号(ヒューリック九段ビル)

TEL.03-3230-8576 FAX.03-3230-8528

<http://www.sumitomoseika.co.jp/>

ふえらむ

Vol.16 (2011) No.7

C O N T E N T S

目 次

Techno Scope	タングステンに頼らない新しい工具材料の開発	456
鉄の点景	マイクロメータ	461
特別講演 (経営トップ 兼 渡辺義介賞受賞記念)	住友金属工業における技術経営 友野 宏	463
(西山賞受賞記念)	育まれ 鉄と歩みし 半世紀 浅井滋生	474
(浅田賞受賞記念)	鉄鋼分析のための分離技術の開発 平出正孝	479
入門講座	鋼を接合するー2 溶 接 中西保正	483
解 説	受賞技術ー9 超高層ビルの安心・安全に対応した 550N/mm ² 級高耐震性高強度鋼の開発 加村久哉、鈴木伸一、石川 操	495
アラカルト	日本におけるスラグカット技術の進歩 沖森麻佑巳	499
会員へのお知らせ		506
海外鉄鋼関連最新論文		522

Techno Scope

新興国における自動車産業の成長によって、自動車部品などの加工に多用される超硬工具の需要が伸びている。超硬工具は炭化タングステンとコバルトから成る超硬合金を使用した工具のことで、抜群の性能を持つ。特に鉄系材料の切削には不可欠である。

超硬工具の主原料であるタングstenは、そのほとんどを中国1か国から輸入しており、最近、価格が高騰している。そのため、超硬工具におけるタングstenの使用量低減、または代替をめざした新材料の開発が進行している。

写真は超硬工具によって鋼が高速切削されているところ。
金色の四角いチップが超硬工具。

(写真提供：住友電気工業(株))

タングstenに頼らない 新しい工具材料の開発

タングstenに依存する超硬工具

今年4月1日から、超硬工具メーカー各社は一部製品の値上げに踏み切った。主原料であるタングstenの国際価格が高騰しているためである。2005年以降、急激に価格が上昇し、現在は過去最高値を更新している。世界において超硬工具の需要が増加していることや、最大の供給国である中国が輸出制限を行っていることなどが影響している。

タングstenは、その名をスウェーデン語のTung(重い)Sten(石)に由来し、最も重い元素の一つである。その融点は約3400℃と金属中最も高く、耐食性、熱伝導性、電気伝導性に優れ、高温下において金属中最も高い引張強度を発揮する。また、タングstenの合金や炭化物は、優れた切削性と耐摩耗性を持ち、超硬合金や特殊鋼、照明のフィラメント等に使用されている。

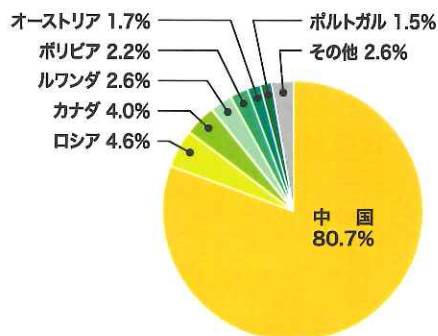
超硬合金とは、一般に炭化タングstenとコバルトなどの粉末を混合して焼き固めた材料である。剛性、強度、靱性、熱衝撃性が抜群に優れることから、工具に多用されている。例えば最も硬

い工具用材料としてダイヤモンドがあるが、耐摩耗性に優れるものの、数百℃で鉄と反応するため、アルミニウムや銅には使用可能だが、鉄系材料には不向きである。鉄系材料の加工には靱性と強度、熱伝導率の

高い工具が必要となる。超硬合金を使用した工具は、材料の切削加工を高精度かつ短時間で行え、切刃の耐久性も優れている。そのため鉄系材料の切削加工には不可欠となっている。

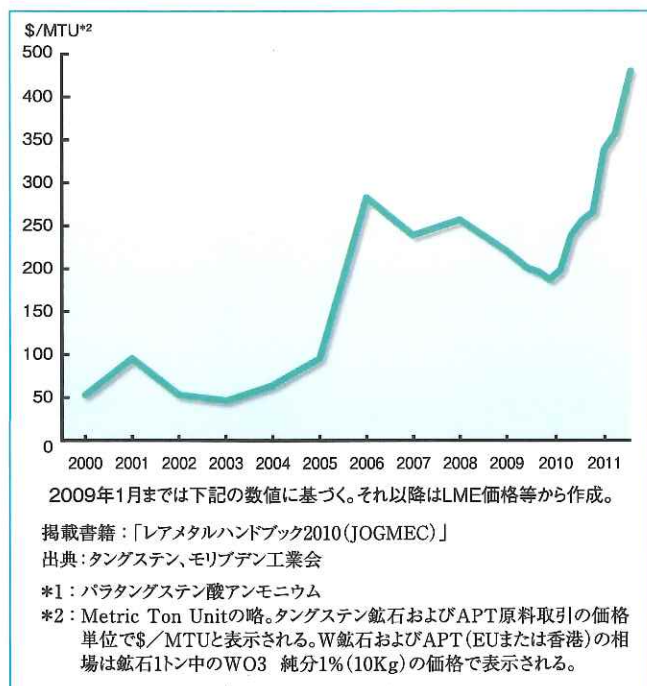
超硬工具に多用されるタングstenは、現在、供給のほとんどを中国に依存している。中国は世界一のタングsten供給国であり、最近では世界一の需要国ともなっている。中国はタングsten

■世界のタングsten鉱石生産量(2008年)



掲載書籍：レアメタルシリーズ2009クロム及びタングstenの需要・供給・価格動向等(JOGMEC)
出典：World Metal Statistics Yearbook

■タングステン中間原料APT*1の価格推移



鉱石での輸出を禁止し、中間原料での輸出、さらには最終素材や製品での輸出へ移行する政策をとっており、その動向は大きな影響力を持つ。今後の安定供給への不安から、「タングステンが入手できなくなったら超硬工具は成り立たなくなる」と危惧するメーカーもいる。資源に乏しい我が国においては、タングステンに頼らない工具材料の開発が急務となっている。

■これまでの要素技術を生かした省タングステン化

現在、超硬工具向けタングステンに関する研究開発には二つのアプローチがある。一つはタングステン使用量の低減であり、もう一つは代替材料の開発である。

超硬工具を用途で分けると切削工具が7割を占め、次いで耐磨耗工具、鉱山土木工具などがある。最も多い切削工具に使用される超硬合金の主体は、WC-(Ti,Ta)C-Co合金で、WC含有率(mass%)は70~90%となっている。切削工具には刃先交換チップやドリル、エンドミル等があるが、チップは多量に使用され、切削工具の大半を占める。このチップをターゲットとし、タングステンの使用量低減が進められている。

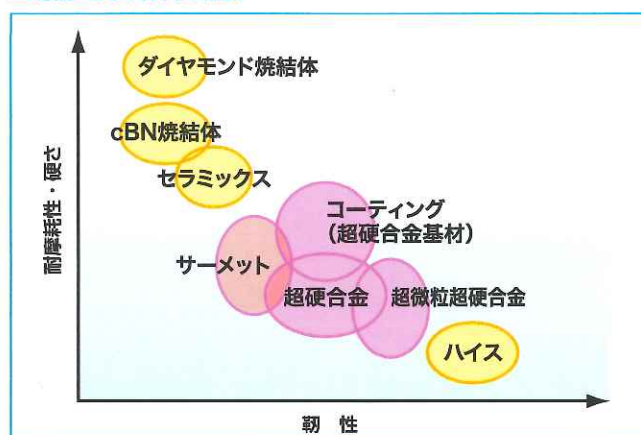
チップの種類は膨大である。被削材や加工部位の形状、使用環境に合わせて開発されており、1社で2万種以上のチップを取り扱う超硬工具メーカーもある。また新製品が次々と登場し、入れ替えも激しい。背景には、高強度鋼や鉛フリー鋼など難切削な被削材が増加していることや、ユーザーからの高速、高能率加工への強い要求がある。これまで日本はチップを長持ちさせるため他国に比べ低速加工が主流であったが、国際競争の厳しい現在



刃先交換チップ

バイトに取り付けられ、切削に使用されるチップは形状や刃先の角度、材質、厚みなど、被削材や使用環境に合わせて数多くの製品が開発されている。表面の凹凸模様はチップブレーカで、切り屑処理を行う。写真は鋼用高速切削チップ（資料提供：住友電気工業(株)）

■切削工具の材料と特長



■進行するレアメタル対策技術の開発

今後のレアメタルの安定供給に対する不安があることから、タングステンの他にもレアメタルの使用量低減または代替材料技術の確立をめざすプロジェクトが進行している。

2007年度より始まった(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「希少金属代替材料開発プロジェクト」では、インジウム、ジスプロシウム、タングステン、白金族、セリウム、テルビウムおよびユーロビウムをターゲットとし、それぞれに使用原単位の低減目標値を定め、実現するための要素技術や製造技術の開発を行っている。

タングステンに関しては「超硬工具向けタングステン使用量低減技術開発」と「超硬工具向けタングステン代替材料開発」が進行しており、使用量低減の技術開発では、2009年度の間目標(20%削減)を達成し、2011年度の間最終目標であるタングステン使用量30%削減をめざし開発が進められている。また、タングステンのリサイクルも進んでおり、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)では2007年度より、廃超硬工具からタングステンを回収する技術の開発が開始されている。

では、生産性向上のため高速加工へ移行しつつある。通常、鋼材を切削すると、摩擦によって刃先は約1000℃に近い高温にさらされるが、高速加工に伴い使用環境はさらに高温、高圧になっており、厳しい条件に耐えるため数々のチップが開発されてきた。

これらのチップが持つ要素技術を生かしながら使用量低減を図るのが、複合構造という考え方である。(独)産業技術総合研究所と住友電気工業(株)の研究グループ*では、チップの上下面だけを超硬合金を使用し、真ん中はサーメットとする、複合構造のチップを研究開発している。サーメットとはセラミックスと金属の合成語で、炭化チタンや炭窒化チタンの粉末を遷移金属とともに焼き固めた材料である。

この構造だと、刃物となる表面は従来の技術を生かすことができ、内部はタングステンの使用量低減が図れる(下図参照)。特に表面が超硬合金であるため、チップブレーカのプレス成形が可能となる。チップブレーカは、切り屑処理を行う表面の凹凸のことで、切り屑がブレーカにあたり切り離される。特に鉄系材料の切削には重要で、例えば鉛フリー鋼などは切り屑がのびやすく切れにくいので、チップブレーカが不可欠となる。長年にわたって被削材に合わせた3次元形状が追求されてきたため、ノウハウが詰まったチップブレーカの機能を付与できるメリットは大きい。

*NEDO「超硬工具向けタングステン使用量低減技術開発」(2007～2011年度):
参加機関は(独)産業技術総合研究所、住友電気工業(株)、三重大学

タングステン使用量30%減をめざす

複合構造チップの製造方法は、まずサーメット粉末をプレスし、これを挟むように上下に超硬合金粉末を入れプレスを行った後、焼結する。しかしサーメットと超硬合金との熱膨張率や焼結温度などが異なるため、亀裂が入ったり剥離するなど、異種硬質材料の焼結は非常に難しい。そこで、剥離を抑えるため、焼結時に界面で反応層を発生させるような原料組成を調整し、かつ積層プレス成形技術を開発することにより、異種硬質材料の同時焼結を成功させた。

試作チップの表面には3次元チップブレーカが付与され、通常のCVD、PVDコーティングが施された。このチップの切削性能について調べたところ(下試験結果参照)、指標となる刃先の摩耗量、欠けやすさ等は従来品と同等であった。タングステン使用量は20%削減されており、今後は30%削減をめざす。

チップは使用される切削工程で分けると、重切削、荒削り、中仕上げ、軽切削、仕上げ用に分かれるが、複合構造チップはこ

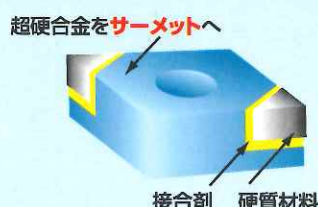
超硬工具のタングステン使用量低減

●考え方

●複合構造〈汎用切削用〉



●基材をサーメットへ〈焼入鋼の仕上げ工程用〉



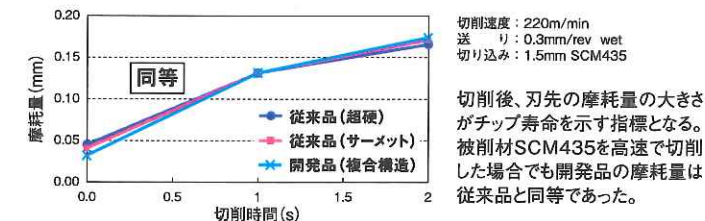
●複合構造の試作チップ



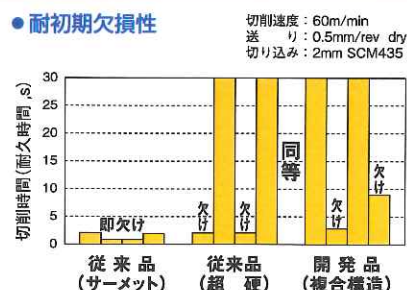
写真左はPVDコーティング、右はCVDコーティングを施したもの。

●複合構造チップの切削性能試験結果

●耐摩耗性



●耐初期欠損性



耐初期欠損性は刃の欠けやすさをみるもので、低速切削で抵抗値を大きくし、刃が欠けやすい条件で4回テストしたところ、サーメットは数秒ですべて欠け、開発品は超硬チップと同等の耐久性がみられた。

(資料提供: 住友電気工業(株))

れら全てへの適用が考えられおり、汎用的に使用されるには製造コストを低く抑えることが重要となる。タングステン使用量の低減で原料価格が抑えられる他、現状の製造コストと同等となる焼結技術の開発が進んでおり、今後の実用化が期待される。

一方、焼入鋼の仕上げ切削は特殊で、焼入で表面が硬化するため、これまでは研削加工が行われていたが、近年、硬度の高いcBN（立方晶窒化ホウ素）等を利用することで切削加工が行われるようになってきている。この焼入鋼等の仕上げ工程に使用されるチップについても同グループでは研究開発を行っている。

このチップは刃先部分にcBNやダイヤモンド焼結体を用いて、基材には超硬合金が使用されている。硬く脆い焼入鋼は切り屑が切り離されやすいため、チップブレーカは不要である。チップブレーカが不要なため、上下面も含め、まるごと基材部分をサーメットに置き換えようという試みである。

通常はcBN焼結体と超硬合金はろう付け接合されるが、サーメットは熱電導性が低く熱がこもりやすいため、ろう付けができない。そこで熱による影響を抑えるため、瞬時に接合可能な接合技術を開発した。試作チップの切削性能は従来品と同等で、その質量は約半分、タングステン使用量は30%削減している。

タングステン代替をめざすサーメットの開発

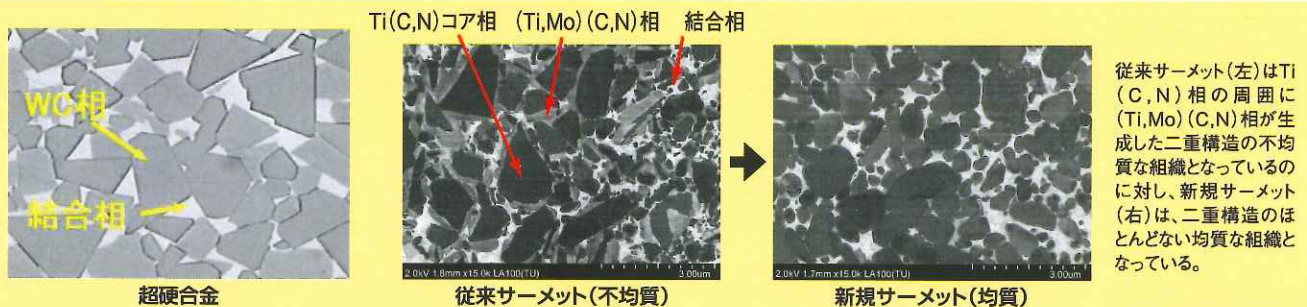
一方、タングステン代替をめざす研究も進んでいる。超硬合金の代替材料として期待が寄せられているサーメットの標準成分系は、Ti(C,N)-WC-TaC-Mo₂C-Ni-Coで、WC含有率（mass%）は5～20%である。

すでにサーメットは切削工具として使用されており、日本では

■サーメットと超硬合金の主な材料特性

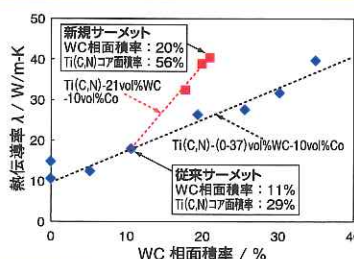
		粒径 mm	硬さ Hv	抗折力 (室温) GPa	KIC MNm ^{-3/2}	抗折力 (1000℃) GPa	クリープ 変形抵抗 (相対比較)	熱衝撃抵抗 (相対比較)	熱伝導率 W/mK
サーメット	TiC系	1.5 ~ 2.2	1180 ~ 1280	2.2 ~ 2.4	13 ~ 15	0.6 ~ 0.7	1	1	10
	Ti(C _{0.7} ,N _{0.3})系	0.8 ~ 1.3	1300 ~ 1410	2.7 ~ 3.4	10 ~ 12	0.65 ~ 0.75	0.3	1.5	15
	Ti(C _{0.5} ,N _{0.5})系	0.6 ~ 0.9	1400 ~ 1480	2.8 ~ 3.2	9 ~ 11	0.7 ~ 0.85	0.1	1.6	18
超硬合金	WC-10%Co	1.0 ~ 2.0	1200 ~ 1300	3.0 ~ 3.8	13 ~ 20	0.6 ~ 0.8	1.1	8	80

■超硬工具のタングステン代替材料開発



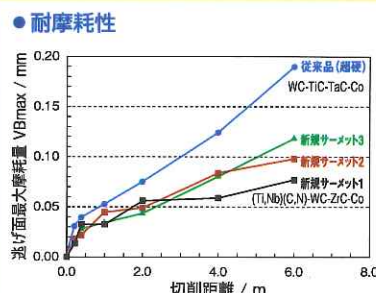
従来サーメット(左)はTi(C,N)相の周囲に(Ti,Mo)(C,N)相が生成した二重構造の不均質な組織となっているのに対し、新規サーメット(右)は、二重構造のほとんどない均質な組織となっている。

●高熱伝導サーメット



チップは摩擦熱で高温にさらされるため放熱性が求められるが、組織制御によってTi(C,N)コアの面積とWCの面積を大きくすることで、同じW添加量でも、40W/mKまで熱伝導率を高めることができた。

●新規サーメットの切削性能試験結果



＜切削条件＞ フライス加工
切削速度：200m/min
送り：0.25mm/t
切り込み：2mm
被削材料：S55C

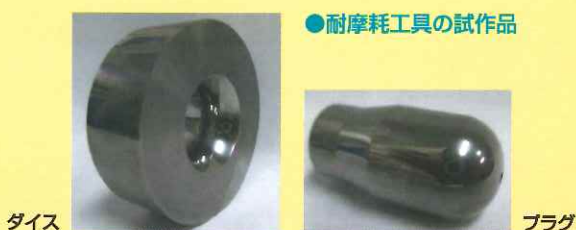
摩耗量は超硬合金に比べ、新規サーメットの方が少なかった。



超硬合金

新規サーメット

●耐摩耗工具の試作品



試験試料	超硬合金	新規サーメット		
		1	2	3
WC量 (vol%)	58	21	21	10
結合相量 (vol%)	11.3	12	14	12
Hv	1552	1540	1486	1654
K _{IC}	11.1	8.7	9.4	8.2

(資料提供：(財)ファインセラミックスセンター、(株)ダンガロイ、富士ダイス(株))

切削工具全体の約15%を占めている。しかし韌性、熱衝撃抵抗、熱伝導率で超硬合金に劣り、軽切削での使用にとどまっている。いわば超硬合金に次ぐ二番手の存在だ。1920年代に超硬合金が登場してから、長年にわたって工具材料が探求されてきたものの、いまだ超硬合金を凌ぐ材料は現れていない。この抜群に優れる超硬合金の性能に少しでも近づけ、中・軽切削でのサーメット適用を広げようというのが代替材料研究の考え方である。

通常、サーメットは混合粉末を焼結するが、現在の方法では混合が不十分なため、不均質な組織となり、これが特性の低下やバラツキに繋がる。そこで、(財)ファインセラミックスセンターを中心とする研究グループ*は、あらかじめ成分調整した固溶体粉末を焼結することで、均質な組織を得ることに成功した(前ページ組織写真参照)。これにより従来に比べ高い熱伝導率、破壊韌性を持つサーメットを開発することができた。新規サーメットの切削性能を調べたところ(前ページ試験結果参照)、耐摩耗性は従来品に比べ良好であった。材料設計にあたっては、焼結時の金属液相の組織変化を予測するシミュレーション技術を確立するなど、材料設計の基盤となる手法を開発し、サーメットの組織制御を可能とした。

また、サーメットのもう一つの課題はコーティング技術の確立である。通常、超硬合金チップは表面にCVDやPVD法で、Ti(C,N)やアルミナ等をコーティングしているが、サーメットにCVD

コーティングのような高温で表面処理を行うと、チップの性能が劣化するため、現状サーメットはCVDコーティング無しで使用されている。今後のサーメットの適用拡大には、耐久性の向上が必要であり、低温で成膜可能なレーザーCVD法を用いたコーティング技術が開発されている。

さらに同研究では、切削工具だけでなく、金型等の耐摩耗工具におけるサーメット代替も研究している。耐摩耗工具に使用されている超硬合金のWC含有率(mass%)は80~90%と高い。この耐摩耗工具でのサーメットへの代替は初めての試みとなる。大型焼結体の製造など、難易度の高い技術開発が必要とされ、これまでに大型部品焼結のための粉末成形技術の開発等が行われている。

現在、タングステン是中国一国の政策に供給が左右されるリスクを抱えているが、タングステンに代わる材料技術を保有することは、今後の価格上昇や輸出制限の抑止力となる可能性を秘めている。そのため、タングステンの使用量低減、代替材料の開発、そしてこれらの実用化は重要な意味を持つ。

日本では、次々と優れた鉄鋼材料が生まれ、また高性能な工作機械が登場し、これに対応すべく新しい工具材料が開発されてきたが、被加工材、工作機械の性能向上が著しいために、工具にはより高い特性が要求されている。そのため新しい工具材料の実用化には、省タングステンあるいは代替を図りながら、いかに工具の性能を追求していくかが、重要となるだろう。

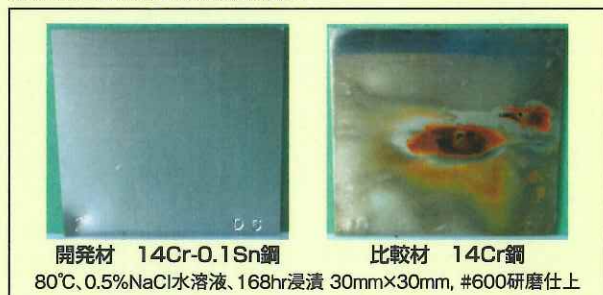
*NEDO「超硬工具向けタングステン代替材料開発」(2007~2011年度):
参加機関は(財)ファインセラミックスセンター、(独)産業技術総合研究所、
(株)タンガロイ、富士ダイス(株)、東北大学

●取材協力 (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(独)産業技術総合研究所、
住友電気工業(株)、(財)ファインセラミックスセンター、新日鐵住金ステンレス(株)
●文 藤井美穂

レアメタルの大幅削減を達成したステンレス鋼

レアメタルの需給ひっ迫は鉄鋼業界でも大きな問題であり、各社はレアメタル代替材料の開発やレアメタル使用量を低減した製品開発に積極的に取り組んでいる。

例えば、微量の錫を添加することで、レアメタルであるニッケル、クロムの使用量を大幅に削減したステンレス鋼板が開発されている。ブリキをはじめ錫の耐食作用はよく知られているが、普通鋼では製造性を阻害するため錫は添加しないことが常識と耐食性におよぼす錫添加の効果

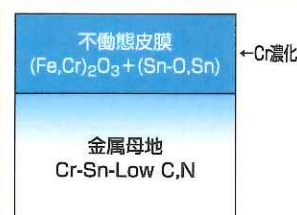


なっている。しかし普通鋼と異なり、クロム系ステンレス鋼では錫の阻害作用が極めて小さいことがわかり、この開発では錫を活用することとした。錫添加により開発された高純度フェライト(クロム)系ステンレス鋼は、ニッケル、モリブデンは不使用、クロム含有量を17%から14%まで約2割削減して

も、17%Cr鋼と同等の耐食性を発揮する。さらに、同技術の錫添加量を増やし、耐食性をより向上させた製品も開発されている。耐食性はステンレス鋼の代表鋼種であるSUS304に相当し、クロムやニッケルの含有量は4割削減された。

新たに開発されたステンレス鋼は加工性が良く、価格安定性にも優れていることから、幅広い用途での使用が期待されている。

(資料提供: 新日鐵住金ステンレス(株))



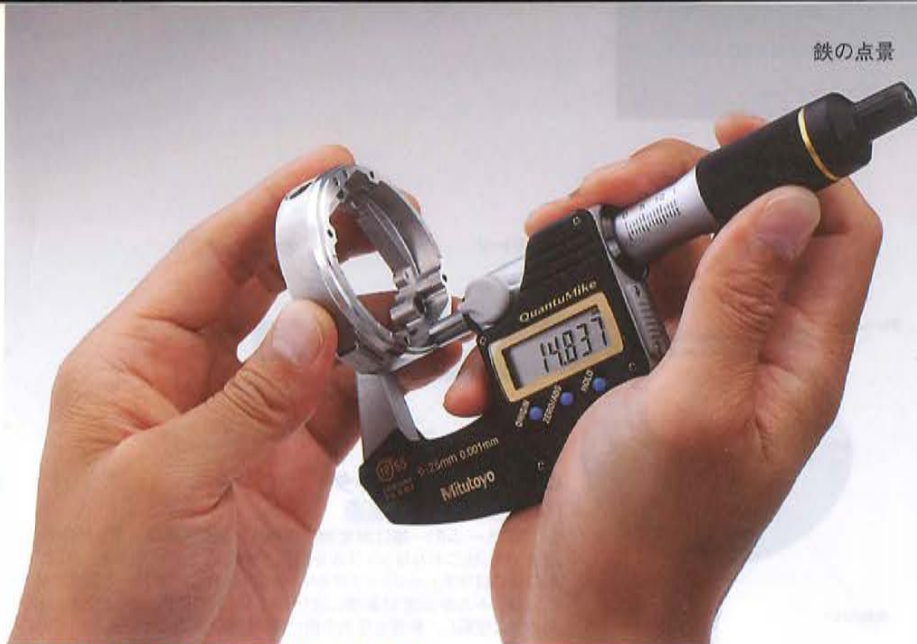
錫添加による耐食性向上の図(推定)

Snは、不働態皮膜の中に酸化物および金属状態で存在し、不働態皮膜の保護性と安定性を高め、また不働態被膜の再生能力にも寄与しているものと考えられている

Steel Landscape

鉄の点景

精密なねじ機構を用いて、微小な長さをねじの回転角に置き換えて測定する用具がマイクロメータである。工業生産の現場で精度を担うハンドツールとして欠かせないマイクロメータの機構と技術、素材について紹介する。



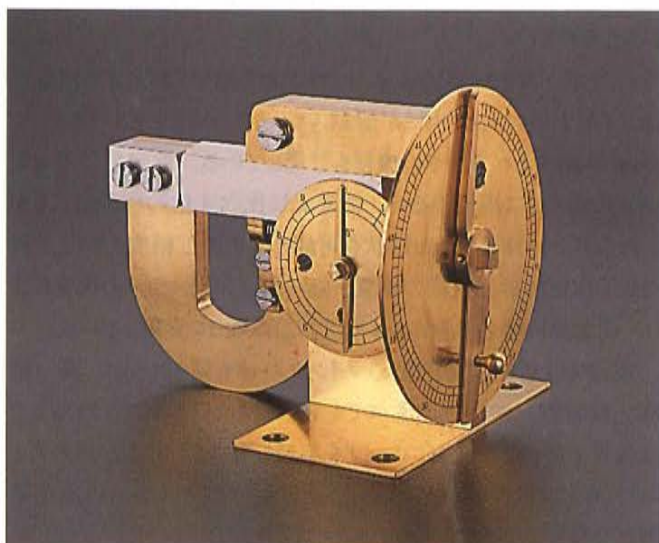
デジタル式マイクロメータによる測定

シムブル 1 回転でスピンドルが 2.0mm 移動する最新のデジタル式マイクロメータ（ミットヨ、カンタマイク MDE-25MJ）。シムブル部全体がラチェット機構を持つため、写真のように片手での操作が容易になっている。フレーム根元の側面には、測定データ出力用の接続部がある（デジタル表示窓右、上下がねじ止めされたカバーの部分）。

マイクロメータ

■マイクロメータの歴史

、ねじを用いて物の長さを測定する仕組みは、17 世紀前半、イギリスの天文学者 W. ガスコインが初めて考案したと言われる。1772 年には、“蒸気機関の父” J. ワットが、ねじとピニオンラックを組み合わせた本格的な卓上マイクロメータを開発している。今日のような手持ち式のマイクロメータを発明したのはフランスの J. パーマー（パルメール）で、1848 年に特許を取得している。これは



●ジェームズ・ワットの卓上マイクロメータ（複製品）

ねじを利用した初めての本格的な測定器。蒸気機関の蒸気の漏れを最低限に抑えるため、精度の高い部品製作に必要だったことが開発の理由であったといわれる。

シムブルを 10 等分した目盛りしかもたず、作りも雑だったが、アメリカのブラウン&シャープ社がこれを改良、当時製品板厚の不安定さが問題であった金属板の二次加工業向けに「ポケット式板厚測定器」として 1868 年に商品化した。

大量生産は、同一寸法の部品を効率よく、精度高く作ることを前提とする。そのためマイクロメータは、ミシンの製造用など機械部品の精密加工に必須の測定具として普及していくこととなる。

日本でマイクロメータが使われ始めたのは明治末期と考えられている。当初は輸入品であり、限られた先進的な工場で使われているのみだったが、大正時代から国産化の試みが始まり、昭和初期には多くの企業が製造を開始した。

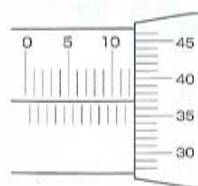
戦後の復興期から高度成長期にかけて、「MADE IN JAPAN」の工業製品は世界で高い信頼を得た。これは国産マイクロメータの普及と改良が進んだ時期とも符合し、自国で高性能なマイクロメータを開発・生産し得たことが、日本の製造業の発展を支えた要因のひとつであったとも考えられる。

現在ではマイクロメータを超える精度の計測器も多いが、簡便で低コストなハンドツールでありながら 0.001mm まで測れるマイクロメータは、主に機械部品の生産、管理に関わる現場で他の何にも替え難い地位を確立している。国内のマイクロメータのユーザーでは自動車関連産業が大きな割合を占めるが、これは日本の機械産業の中で自動車関連の規模が大きいため、自動車のみならず、電機、産業機械などさまざまな分野で使用されている。



●外側マイクロメータ (アナログ式)の構造

U字のフレームの一端は測定物に接触させる固定部分／アンビルで、反対側のスピンドルはシンプルを回転させることで前後動する。シンプルの端にはラチェットストップがあり、測定時にはここを持って回転させる。スピンドルが測定対象物に当たり一定以上の圧力となるとラチェットストップは空転し、無理な圧力を掛けない仕組みになっている。



●マイクロメータの読み取り方

スリーブには横方向の基準線を挟んで0.5mmの移動量を示す目盛り、シンプルには1周を50等分した0.01mmの移動量を示す目盛りがあり、この組み合わせで数値を読む。図の状態では、スリーブの目盛り12mm + シンプルの目盛り0.37mmで、12.37mmを示す。最小目盛りは0.01mmだが、目盛りのずれから目測で0.001mm単位の計測が可能である。

■マイクロメータの仕組みと素材

最も一般的な、測定対象物を挟み込む「外側マイクロメータ」の構造と各部名称を上図に示す。

マイクロメータの測定範囲は一般に最小で0～25mm、対象物の大きさに合わせフレーム形状を変えることで、25mm刻みで測定範囲を選択できるようになっているのが普通である。

外側マイクロメータのアンビルおよびスピンドル先端部形状は、測定対象に合わせてさまざまな形状のものがある。また対象を挟み込むのではなく、穴の内径を測定する「内側マイクロメータ」、基準面からの深さを測る「デプスマイクロメータ」、自動測定機器や精密送り装置に組み込む「マイクロメータヘッド」ではU字フレーム構造をもたないものもある。

マイクロメータの材料としては、フレームには主にダクタイル鋳鉄や機械構造用炭素鋼、スピンドルには硬く磨耗しにくい高炭素クロム軸受鋼などが用いられる。特にスピンドルは、磨耗、経年変化を防ぐために、残留オーステナイトを安定化させるサブゼロ処理を挟む熱処理を行い、ねじ切りも精度向上のため研削によって加工を行う。被測定物を挟む測定面には磨耗の少ない超硬合金チップが用いられる。また、測定器を手にとって測定する場合には、使用時にユーザーの体温に影響されないよう、フレームに樹脂製防熱素材のカバーが装着されているものもある。

■マイクロメータの進化と発展

欧米の製品をなんとか国産化するところから始まった日本のマイクロメータだが、高度成長期にその性能は大きく向上し、世界で優秀性が認められ、輸出品としても地位を確立した。

機構・機能面では、日本が得意とするエレクトロニクス技術を応用し、数値の読み取りにユーザーの熟練を要しないデジタル表示式が登場した。当初はメカ式の数字表示機を付けただけだったが、シンプルの回転を電気信号で読み取るロータリーエンコーダと組み合わせることで、より正確に測定値を表示することが可能となった。また、生産現場のFA化によるデータのコンピュータ管理が進んで



●スピンドル

一般的な0.5mmピッチのマイクロメータ用スピンドル(下)と、0.1mmピッチのファインピッチマイクロメータヘッド用スピンドル(上)。技術の向上により、従来より微細なピッチや、逆に大きなピッチでも精度の高いねじ加工が可能になっている。

いることに対応して、デジタル式マイクロメータは測定値の出力機能も備えるようになった。ただしその一方で、現在でもアナログ式マイクロメータはスタンダードな機種として広く用いられている。

素材および加工法の進化としては、温度変化に影響されにくい耐環境性に優れた素材、スピンドルねじ部の熱処理や研削加工、超硬合金チップの導入などを挙げることができる。特にスピンドルのねじ精度はマイクロメータの性能の鍵であり、加工技術の向上が続けられている。一般的なマイクロメータのねじリード（ねじの1回転でスピンドルが移動する長さ）は0.5mmだが、マイクロメータヘッド用には、その1/5の精密動作が可能な0.1mmピッチのものも作られている。

一方で、大きさが異なる多くの対象物を素早く測定する用途には、ねじリードが大きいほうが望ましい。このためシンプル1回転で2mm移動するハイリードの機種も登場している。移動量の増大と測定の詳細さは相反するが、従来品に比べ4倍の移動量にもかかわらず、特殊なねじ山形状を可能にする加工精度の向上と新たな工作精度評価技術の確立、高分解能回転センサの開発により、従来品同様の0.001mm単位の読み取りを実現している。

現在では新興工業国製のマイクロメータも見られるが、高い精度、信頼性、操作性のすべてを兼ね備えた日本製マイクロメータは世界で評価され、高いシェアを維持している。日本が優れたものづくり力で世界をリードして行くためにも、マイクロメータの進化発展は今後も欠かせないものであると言える。

[取材・文＝川畑英毅]

取材協力・画像提供＝株式会社ミツトヨ

特別講演

□経営トップ兼渡辺義介賞受賞記念特別講演

住友金属工業における技術経営

MOT in Sumitomo Metal Industries

友野 宏

住友金属工業(株) 代表取締役社長

Hiroshi Tomono



*脚注に略歴

1 はじめに

このたびは荣誉ある渡辺義介賞を戴き、厚く御礼を申し上げます。また経営トップ特別講演の機会も賜りましたことも併せ、これまでの業績への賞というより、これからも日本鉄鋼業のために粉骨砕身努力せよとの諸先輩方からの叱咤であると受け止め、一層身の引き締まる思いであります。従いまして、本日は、これまでの私の目指してきたことの紹介と、これから向かうべき方向につきまして日ごろから考えている事を皆さんに紹介させていただき、多少なりともご参考いただけたら幸いと存じます。

2 鉄鋼の技術開発に向かい合う姿勢

まず最初に強調しておきたいことは、「鉄鋼業は成長産業である」ということです。それも著しい市場拡大を控えたエネルギー溢れる産業であります。

図1は、経済成長の指標のひとつであるGDP(国内総生産)と鋼材消費の関係为国ごとにプロットしたものです。これらはリーマン・ショック以前の2005年から2008年の3ヶ年の世界71カ国を対象にしたもので、図中の線は平均的な統計近似曲線です。この曲線はまさに先進国の経済発展の歴史をそのまま表わしているようで、初期の経済発展では社会インフラの整備などで大量の鋼材が使われ始めますが、経済が成熟すると鋼材消費はピークアウトして安定したものになっています。この曲線から大きく外れている国もあり、その代表格が韓国です。韓国は我々日本の感覚からすれば経済の発展が工業の発展にかなり依存したものと映ります。他の先進国は概ね安定期にあります。日本は比較的上位にあり、先

進国のなかでは経済を工業が支えている構造を持った国であると言えます。

ここで注目したいのがBRIC'sと呼ばれる国々を中心とした新興国です。図2はその国々を拡大したのですが、概ね平均的成長曲線に沿って成長しているのがわかります。これらの国々の人口規模を考えると鋼材消費量の伸びは推して知るべしです。また今後の鋼材消費量の伸びにつきましては想定を超える可能性を感じずにはいられません。

図3は、ここ60年間の世界の粗鋼生産量の推移を示したものです。粗鋼生産量は短期的に変動しつつも増加基調にあり、1970年から2000年は一旦踊り場にあるものの、再び増加に転じているのがわかります。この増加基調は新興国が牽引しているものですので、長期的な視点に立てば更に増えていくことが予想されます。

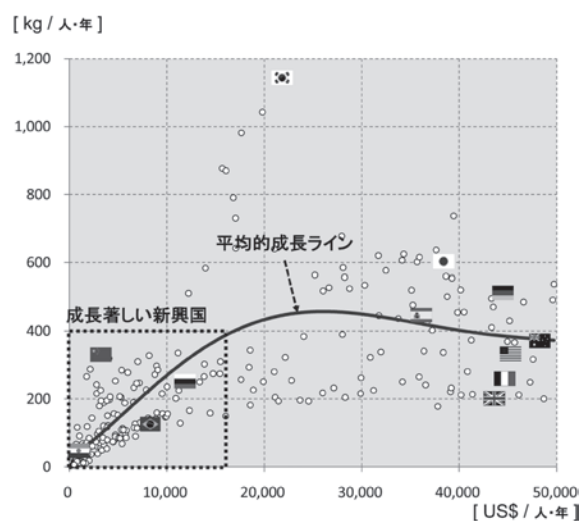


図1 鉄鋼の市場動向：一人当たりGDPと鋼材消費量(05～08年)

* 昭和46年3月京大大学院金属加工工学専攻修士課程修了後、住友金属工業(株)へ入社。54年9月スイス連邦工科大学工学博士号受位。平成13年6月鹿島製鉄所長、17年6月代表取締役社長に就任し、現在に至る。

ご存知の通り鉄鋼業は巨大な装置産業であり、設備の耐用年数も10年を超えます。従って、設備投資をする際には10年を超える視野で投資の意志決定が必要です。仮に高炉などの上工程の設備償却年数(14年)と圧延などの下工程の設備償却年数(12年)の平均である13年間の移動平均で見ると、13年間の世界の粗鋼生産量の増加幅は50%を超えていますので、戦略的なプロセス投資や技術開発をするには最低でもそのくらいのタイムスパンでの判断が必要です。

また、13年間の移動平均に対する各年の変動幅は±10%はあり、短期的な視野での合理化努力やダウンサイドリスクへの備え(例えば、市場規模に応じた体制の整備、コンパクトな資産構造、財務体質の強化など)も併せて必要です。

本稿では、戦略的なプロセス投資や技術開発を中心に話を進めて行きたいと思います。

3 製造工程から見た技術開発

鉄鋼業は巨大な装置産業であるとともに極めて高効率な製

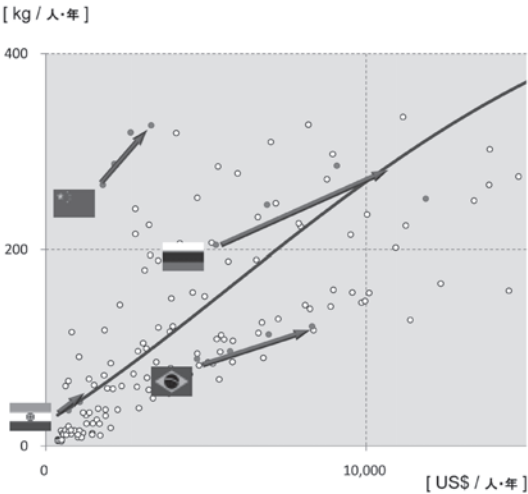


図2 BRICsの市場動向：一人当たりGDPと鋼材消費量(05～08年)

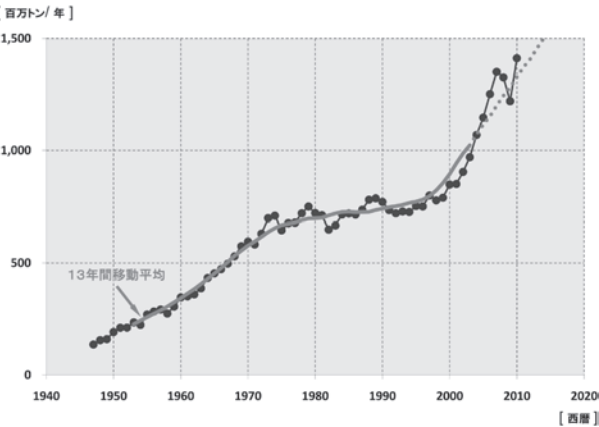


図3 世界粗鋼生産量の推移

造プロセスを有していますので、製造工程に軸足を置き、その工程的意義を踏まえた技術開発を考えるのが常套です。

表1は高炉一貫製造ラインの製造工程ごとに、主要装置、工程的意義、求められる技術開発を整理したものです。製造工程は、①製鉄工程、②製鋼工程、③熱間圧延工程、④それ以降の冷間圧延・熱処理・表面処理に大別されます。これらの工程に求められる技術は表に記載の通りで、これがしっかりしていないと事業全体の基盤が確保できません。また、これらの工程に共通した総合的な視点が求められる技術もあります。その代表的なものとして、⑤グローバル化する市場に対応した海外事業展開や地球環境問題に対する技術があります。

ここで、私が研究者・技術者として、担当者の立場、企画立案者の立場、そして経営者の立場から、深くかかわってきた技術開発のなかから、上記①から⑤に係る主な事例を紹介したいと思います。

4 【事例紹介①】 高炉長寿命化技術の開発

高炉は、製鉄所のシンボルであり鉄鋼業の事業規模を定め、その本分は長期に安定した銑鉄の生産に尽きます。これは、和歌山製鉄所第4高炉の連続稼働日数において、世界新記録である10,001日(27年4か月)を実現した技術です。

図4は、和歌山製鉄所の高炉寿命の推移を示したもので、第4高炉を火入れした1982年当時は炉寿命は概ね7年前後というのが常識でした。この図から見ると第4高炉の炉寿命が突然伸びたように見えますが、この27年4か月は厳しい経済環境のなか生き残りをかけた不退転の努力の積み重ねでもありました。

高炉は、おそらく人類史上最大の化学反応容器であり、その基本形は19世紀にはできあがっていましたが、その内部はブラックボックスと言っても過言ではないくらい定量的把握

表1 製造工程から見た、プロセス技術開発・製品技術開発

工程	製鉄	製鋼	熱間加工	冷間加工 組織制御、等
主要装置	高炉	転炉、二次精錬 連続精造	熱間ミル	冷間ミル、 熱処理、 表面処理
工程的意義	事業規模	製品の基本範囲、 (基本品質、 化学的組成)	製品の商品価値(納期含む)	
			形状・基本特性	機械特性他 顧客要求実現
工程毎に 求められる技術	①長期安定生産	②高純度高清浄 な鋼の高速精錬	③高効率圧延 制御圧延	④従来の限界を 越える特性
総合的に 求められる技術	⑤海外事業展開および地球環境保全(低CO ₂ 、ゼロエミッション)			

が難しいものです。

高炉（溶銑炉）の内部を把握する研究は古くからその時代の最新の理論を用いて行われて来ており、私が留学したスイス連邦工科大学の大先輩であるアインシュタインの研究でも有名な一連の量子力学理論が、キルヒホッフやプランクによる溶銑炉内の温度測定の研究から生まれたことは一般には案外知られていない事実です。しかも、現代の最新理論を駆使してもまだまだわからないことが残っています。

住友金属工業（以下、住友金属）は、1974年から当時実用レベルになったコンピューターによるシミュレーション技術を用いた高炉炉内現象の定量化にいち早く取り組みました。

それでも、実操業の指針や新しい高炉の設計に対して十分な精度と信頼性を有するレベルにするには30年以上の期間を要し、ようやくできたのが

- ・「実炉データとの比較による定量的検証が十分になされた、高炉炉内の相変化を含む化学反応や運動挙動等を気・液・固相について精緻に解き、3次元非定常状態を記述する炉内解析モデル」
- ・「高炉の充填層内応力場推定モデル」
- ・「炉底部の溶銑流れ・伝熱挙動を解析し煉瓦の損耗過程を記述する炉底溶銑流れ・煉瓦浸食モデル」

などからなる、一連の高度・高精度な高炉数学モデルです。

もちろん、高炉は炉体本体が長寿命であればよいわけではなく、図5に示すように原料装入設備、熱風炉設備、ガス清浄設備など付帯設備を含めた全体の寿命を延ばさなければ意味がありません。これを実現するために、高炉の炉命延長技術の開発に1991年より取り組み、前述の数学モデルの力を借りて、図6に示すように

- ・「ステープを高炉改修せずに交換するため、炉内の安定状態を保ちながら、炉内容物の層高を該当ステープレベルまで下げる操業技術。および熱間で炉内のステープを交換する工事技術。」

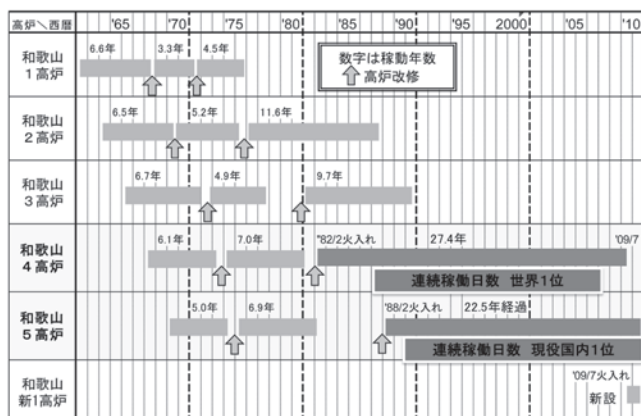


図4 炉命延長推移

- ・「高炉の寿命を律する炉底煉瓦の浸食を防ぐために、溶銑やスラグの炉底での流れ方を制御する操業技術。」
- ・「高炉に熱風を吹き込む熱風炉を高炉の操業を止めずに補修するため、少ない熱風炉基数での高炉操業技術。および短期間で熱風炉を補修する工事技術。」

など的高炉長寿命化技術を確立しました。（図6）

また、この数学モデルの計算結果を用い高炉の低還元材操業を推進しており、2009年実績で鹿島製鉄所の高炉還元材比は溶銑トン当たり485kg～488kgと極めて低いレベルを実現しています。

この還元材比レベルは、全国平均との差で見ると年間粗鋼1億トンで540万トンのCO₂削減に相当するものです。

5 【事例紹介②】 世界一の高効率を実現した 次世代製鋼プロセス

次に、次世代製鋼プロセスですが、製鋼工程は製品の基本範囲、即ち基本品質や化学組成範囲を定めるという工程的意義があり、加えて、製鉄所の能力を規定する工程でもあります。

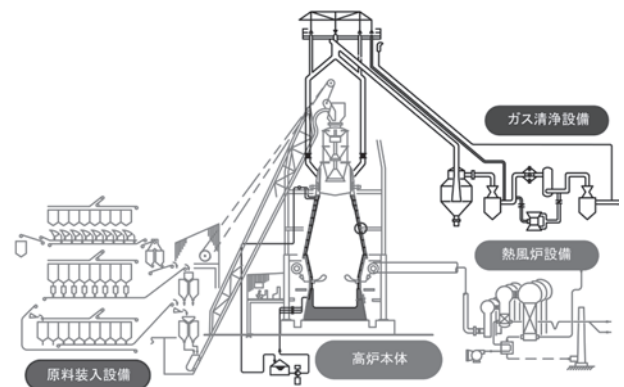


図5 高炉システム

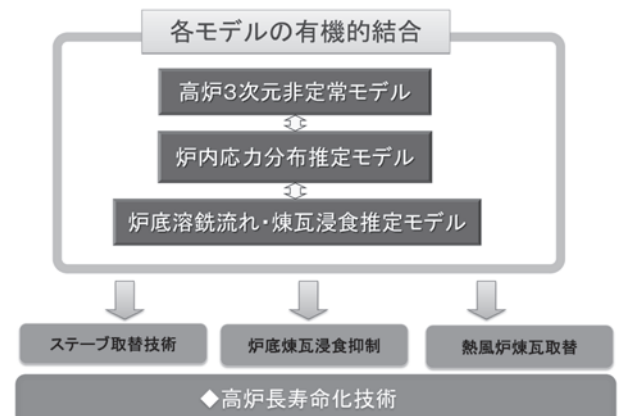


図6 高炉長寿命化技術の開発

す。従って、製品市場ニーズ動向の影響を直接受けることになります。

私が入社した1970年前後、日本の一貫製鉄所群が成立した時代には、鋼に含まれるPは、どんなに下げても、およそ数百ppmというのが精一杯というところでした。当時としてはそれで充分だったのです。ところが、その後、製品への品質要求が厳しくなり、現在ではおよそ10ppmのオーダーまで低減することが求められています。Sに至っては、更に厳しく数ppmの水準を満たさねばなりません。図7に工程の追加によってP、Sが低減した様子を示します。

この様な要請に応えるため、既存の製鋼工場の建屋の中に、新しいプロセスを次々と追加してきました。市場からの要求レベルが上がるに従ってそれに対応するプロセスや設備が完成していくということ自体は素晴らしいことで、結果として日本の鉄鋼技術が世界をリードできるまで向上する事となりました。

しかし、一方で、本来溶鋼のPを除去する脱Pの役割を担う転炉を既存のままとして、その前後の工程にそれを補完するプロセスを追加するやり方は、一見して設備投資コストを下げる反面、図8に示すように工程を時間と手間のかかる複雑な

ものとし、製造プロセスの効率を下げる結果を招いたのです。

更に、これらの追加された設備は、少量のハイエンド品種にのみ使われたため、その固定費の回収はハイエンド品種のコストを圧迫したことから、ハイエンド品種の製造は可能であったもののコスト競争力を低下させ、結果的には、これらの設備を使わないで製造する努力をするという、悪循環を惹起したのです。

このような状況の下で、製鋼工場長として働いていた私は、なんとかしてハイエンド品種からミドル品種、汎用品種まで、全ての鋼を一つのシンプルな工程で製造できないかと考えました。まず、従来一つの転炉で脱Pと脱炭を行っていたものを、脱P専用転炉と脱炭専用転炉の二つの転炉で別々に行いました。一見無駄に見えるこのやり方は、精錬の機能をそれぞれ専用化することで飛躍的な精錬効率の向上を生み出し、さらには、その後のプロセスも全ての品種を処理することとし、スラブCCとブルームCCで铸造するというように、工程を完全に一つにしたのです。図9にレイアウト図を示します。

図10は、製造工程の新旧比較を示したものです。

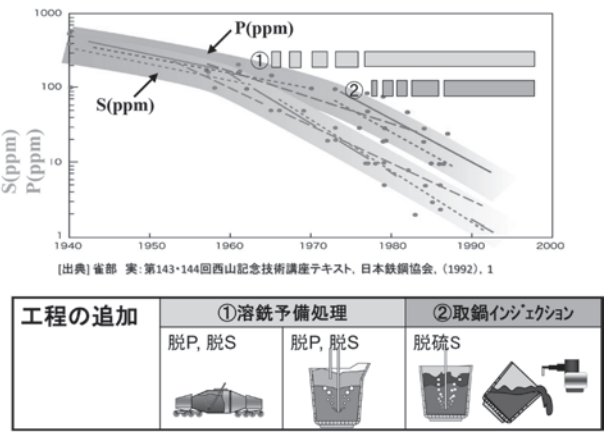


図7 顧客の高清浄度鋼要求の変化

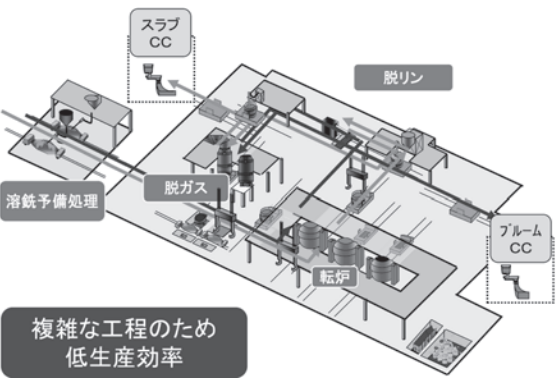


図8 従来の製鋼工場のレイアウト

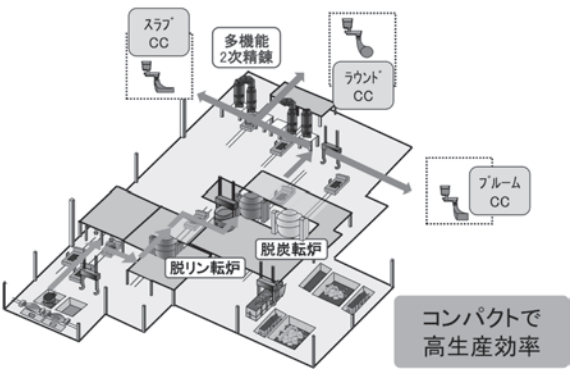


図9 革新的次世代製鋼工場のレイアウト

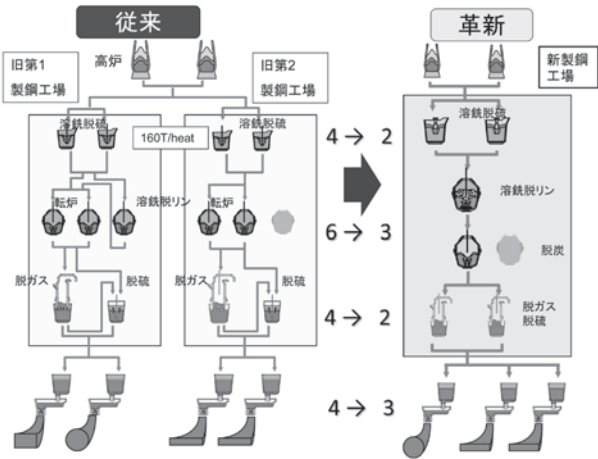


図10 新プロセスの導入

従来は、既存の能力の転炉を中心に、専用のプロセスが追加され、それぞれのプロセスを必要とする品種にのみ適用していました。一見賢い方法に思えるこのやり方は、工場内の工程を複雑にし、生産能力を低下させ、多くの設備を非効率に使うことになりました。

一方、新しい方法は、高い精錬機能を有する一つの工程で高効率で全ての量をまかなっています。その結果、従来は、年間約400万トンの鋼を製造するために製鋼工場が二つ必要であったのが、一つの製鋼工場の中で、ほぼ半分の炉しか使わず、シンプルな製造を可能としました。

1970年代に完成したものの、その後の設備追加で複雑になったプロセスも、知恵の限りを尽くせば、シンプルな工程に変革できるという一つの事例です。

この革新的な改善の基盤を成す脱P・脱炭転炉について、効率向上を具体的に解説すると、転炉の一回の吹錬に要する時間は、平均的におよそ15分、和歌山では19分必要だったものが、当プロセス導入後は9分に短縮され、世界最速となりました。これは、他社を含めた従来の転炉工場と比べても、ほぼ2倍と目覚ましい生産効率の改善です。

6 【事例紹介③】 革新的中径継目無製管プロセス

熱間圧延工程では、住友金属の代表的な製品である継目無鋼管について紹介したいと思います。

この新プロセスにおける非常に大きな革新は、連続铸造機と鋼管製造ラインを直結したこと。従来は連続铸造機は鋼管製造ラインと別の場所にあったこと、また、品質も不安定であったことから、鋳片を冷却後に検査して欠陥部分を削り、再度、加熱炉で温度を上げて鋼管製造ラインで圧延を行っていました。また、圧延後の鋼管の、ほとんどについて焼入れ・焼戻しの熱処理が行われますが、それは別棟に運搬して行っていました。

今回の新プロセスでは、これらを直結化したことで連続して製造することが可能となりました。その背景には、それぞれのプロセスで完璧に造り込むことにより、鋳片欠陥が発生しなくなり、一旦冷やして手入れすること無く、高温のまま圧延できるようになったという品質改善があります。我々は、1マイル工場 (1 mile shop) と呼んでいます。図11のように世界で初めて約1.6kmの中に全てのラインをおさめることが可能となりました。また、ラインの直結化、高交叉角穿孔技術、マンドレルミルとサイザー、インライン熱処理などの革命的な技術を組み合わせることにより、良品率も図12に示すように100%に近くまで向上しました。

和歌山製鉄所の継目無鋼管の場合、高炉からの出銑以降、

製鋼工場、圧延ラインを経て出荷するルートは、実に20km以上に及んでいました。これが今回の革新的プロセスの導入により、総移動距離は約8km、主要な工程は1マイル工場の中に入るようになったのです (図13)。

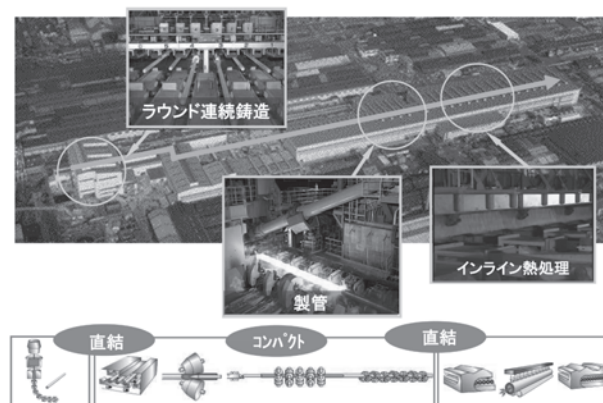


図11 連続铸造と中径継目無製管の工程直結化

革新技術	
連続铸造と中径製管工程の直結化	世界初
高交叉角穿孔技術 (20度)	世界初
マンドレルミルとサイザー	世界最大
インライン熱処理	世界初

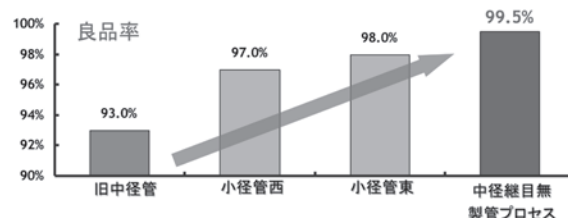


図12 最終製品品質の飛躍的向上

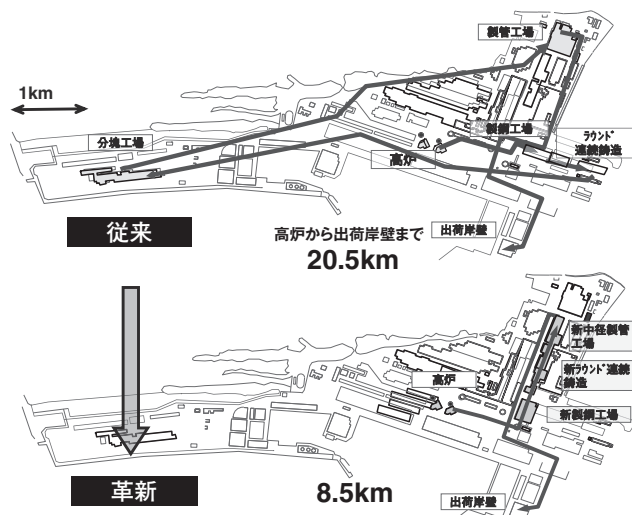


図13 革新技術による製鉄所内物流の改善

以上の結果、和歌山製鉄所の事例におけるエネルギー原単位、ならびにCO₂排出量は、運用開始時で22%削減可能となりました。その後、更なる操業技術の改善を行い、CO₂排出の削減率は34%に達しています。

日本の一貫製鉄所の特徴でもあります。製鉄所の建設期に日本の高度経済成長を経験したような製鉄所は、後から逐次プロセスを追加した結果、製鉄所内の物流ルートが複雑になります。この事例は、相当経年した製鉄所においても、大幅な効率改善が完遂できることを示しています。

7 【事例紹介④】 超々臨界圧石炭火力発電用 ステンレスボイラーチューブ

冷間圧延工程～材料開発につきましても、住友金属が世界をリードしてきたステンレスボイラーチューブについての事例を挙げたいと思います。このボイラーチューブは図14に模式的に示すように火力発電所のボイラーの過熱器管と呼ばれる部位で使用される鋼管ですが、ボイラーは当然のことながら蒸気の圧力と温度を上昇させると発電効率が上がります。しかし、高温・高圧の環境に対応できる材料ができなかったために、図15に示すようにこの約30年間は570℃・24MPaの超臨界圧のレベルで留まり、発電効率も過去に比べれば向上したものの、40%程度水準で止まっていた。それを今回、様々な工夫を重ねて600℃・25MPaの超々臨界圧に対応したパイプの製造が可能になったのです。

この開発におけるキーテクノロジーは、一言でいうと高温強度と高耐食性の両立です。ボイラーチューブの内部を高温・高圧の水蒸気が通過するときボイラーチューブの内面は水蒸気酸化でダメージを受け、これに耐えうる耐食性が要求されます。一方、発電効率の向上のため、より高温・高圧での環境に耐える高温強度が必要となります。ところが、従来

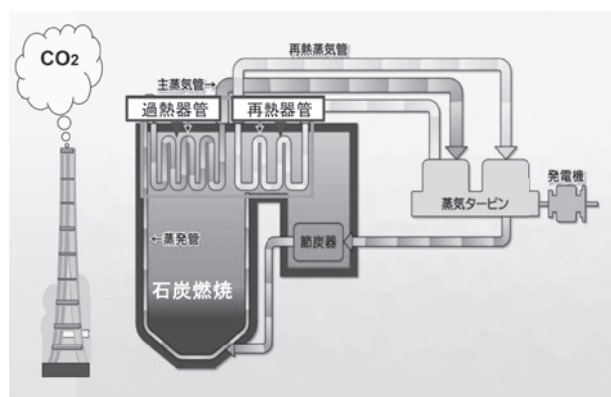


図14 石炭火力発電用ステンレスボイラーチューブの部位

の常識からすると高温強度と耐食性はトレードオフの関係にあり、高温に強い鋼は耐食性が劣るというジレンマがありました(図16)。

これをブレイクスルーした開発の内容を多少詳しく紹介します。

一般にステンレス鋼の高温強度を上げるには、冷間加工後の熱処理を高温で行って炭化物を固溶させ、使用温度で再び微細に析出させる析出強化が用いられていますが、高温での固溶化熱処理により結晶粒は粗大化してしまいます。

一方ステンレス鋼の耐食性を担うCr酸化物の皮膜は、Crが結晶粒界を拡散移動して表面に供給されることで形成されるため、結晶粒が細かいほどCrの供給が促進され安定したCr酸化物皮膜が形成され耐食性が向上します。

今までの研究では、このトレードオフの関係から抜け出せない状況でした。

今回の開発では、Nb炭化物が他の炭化物に比べて高温まで細粒組織を安定して保つ作用を有することに着目し、製造プロセスを見直し、Nbをうまく固溶させつつ冷間加工後の熱処理工程で逆に細粒化を促進することに成功しました。こ

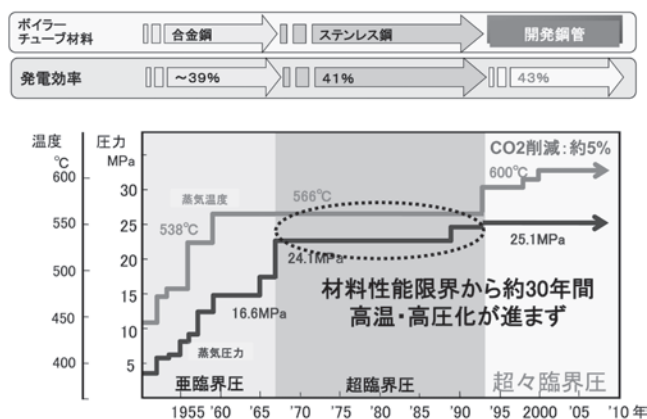


図15 発電効率を支えるボイラーチューブ材料開発
(火力発電ボイラーの蒸気条件変遷)

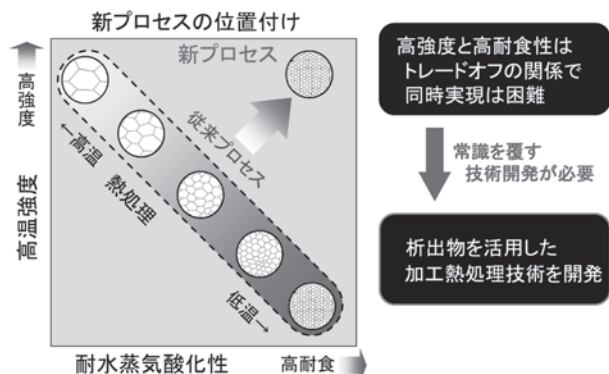


図16 キーテクノロジー：新18% Cr含有鋼
(高温強度と耐水蒸気酸化性の同時実現)

のような析出物を制御した加工熱処理技術により、トレードオフの関係から大きく飛び出して、高温強度と耐水蒸気酸化性を同時に実現できる成分系を開発しました。

加えて、使用される条件においてはCuを適正量添加することで高温強度を著しく向上させることも見出し、新18%クロム鋼が生まれたのです。

現在、世界経済の発展に伴い、電力の供給能力の増強のため火力発電所は数多く建設されており、世界全体で約200基の超々臨界圧ボイラーが使われています。特に中国は短期間に電力供給を増やす目的から石炭火力を多用しており、ボイラー用パイプの最大の利用国です。これら超々臨界圧ボイラーで使用されるパイプの中で住友金属のシェアは約80%に達しています。

CO₂削減の観点からは、住友金属鋼管の使用で発電効率が向上することによって、石炭の使用量が年間約2800万トン減少し、排出されるCO₂も約6600万トン減ります。これは日本が排出しているCO₂の約1/20、換言すればポルトガル一国が排出しているCO₂を削減する規模に相当します。このように、超々臨界圧ボイラーに適用できる鋼の成分系を開発することによって、世界のCO₂削減に大きく貢献できたわけですが、製造プロセスのみならず製品を通じた社会貢献も、社会全体の主だった素材を支える鉄鋼業の大きな役割、やりがいの一つと考えています。

8 【事例紹介⑤】 ブラジル高炉一貫 シームレスパイプミルの建設

最後の事例として、海外事業展開および地球環境保全（低CO₂、ゼロエミッション）について面白い話題をご紹介します。それは、住友金属がブラジルで建設している粗鋼規模100万トンの製鉄所での事例です。

従来であると石炭からコークスをつくり、このコークスを高炉に装入してCO₂が発生するといった仕組みの中で、CO₂を如何に減らすかということに注力してきました。

しかし、ブラジル立地の100万トンのコンパクトな一貫製鉄所で可能になったことですが、今回は、ユーカリの木を植えて木炭を製造し、この木炭を高炉に入れて銑鉄をつくることにしました。

結果、高炉でCO₂は発生するのですが、このCO₂はユーカリが生長する際に全て吸収してしまうということでオフセットできるという仕組みを取り入れることにしたのです。図17に炭素循環の模式図を示します。

また、今回利用するユーカリは、バイオテクノロジーで成長速度を揃えて同じ高さ同じ大きさの木だけの森になるよう

にし、さらに成長を促進させて5～7年で利用できるようにしたものです。加えて面白いのは、ユーカリは7年でコストになり伐採しますが、その伐採後の根から再び芽が出て、3回は利用できるという、何やら得した感じにさせてくれます。

図18は、空からユーカリ林の状況を視察したのですが、バイオテクノロジーを活用した成果で、ユーカリの林が高さも幅も整然と揃っている様子が見て取れます。

また、ユーカリは非常に広大な森林になっており、ちょうど琵琶湖一枚分の面積を管理し、それを7等分して7年経過すると順番に木炭として利用するといった運用を行っています。

9 事例の総括

以上ご紹介した①から④の技術は、いずれも私が経営に参画した2003年以降に相次いで大河内記念会から誠に過大な評価を頂いたもので、そのうちの二つは企業に授与される最高賞でした。加えて、住友金属の代表的な製品である継目無鋼管の製造ラインである和歌山製鉄所および尼崎特殊管製造所において、精錬から加工そして製品開発まで全てが揃いました。図19に示すこれらの技術は、全て一朝一夕に成し得たものではなく20年30年の地道に積み重ねた研究の成果がハ

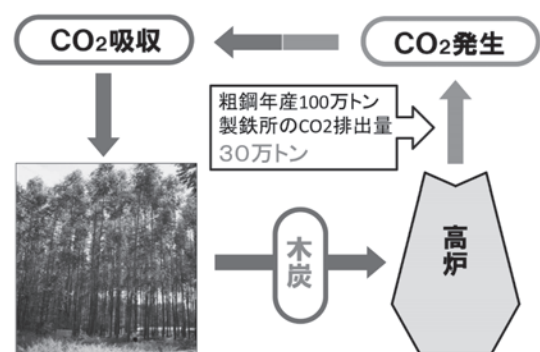


図17 環境に配慮したブラジル高炉一貫シームレスパイプミル

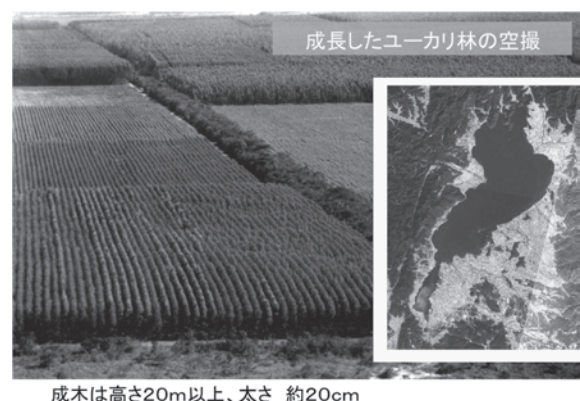


図18 木炭原料プランテーション（62400ha ⇄ 琵琶湖の面積）

イエンド技術として結晶したものと言えます。

これらの賞を連続で頂いた結果、俗な言い方で申し訳ないのですが、テニスで言えばグランドスラムを達成したような幸せな気分になりました。

ところが、自分でも意外でしたが、手放して喜びたい気持ちとは裏腹に、「はたして、これで安心していられるのだろうか」という疑問が漠とした形で湧き上がってきたのです。もう少し具体的に言えば「ハイエンド技術だけで戦えるのか」という課題意識です。

この疑問は、現在日本の鉄鋼業が直面している状況にも通じ、これからの技術経営として向かうべき方向とも言えるものです。そこで私自身反芻しているこの課題について皆さんとともに考えてみたいと思います。

10 これからの鉄鋼業の課題

図20は、BRIC'sの代表とも言える中国、インドとの比較

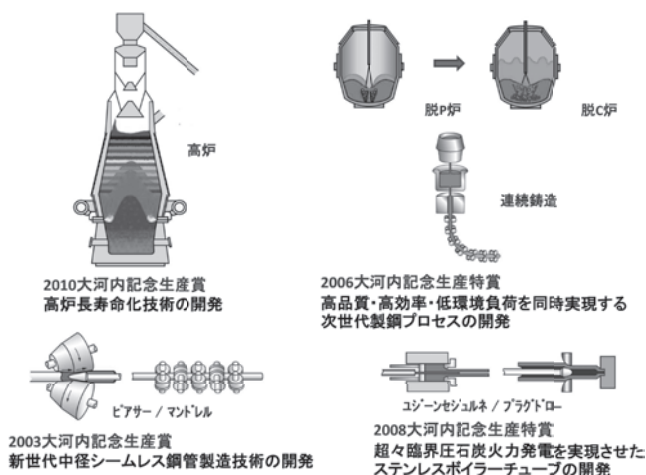


図19 【事例総括】継目無鋼管工程の一連のハイエンド技術群

で、日本国内の鋼材需要を示したもので、一目で成長が滞っている状況が見て取れると思います。これを打破するための一つの方向として我々はハイエンド品へのシフトに邁進してきたわけです。薄板を例に上げると、高張力鋼などの自動車用高級鋼板を指向してきた経緯が図21より明確に見て取れます。

しかし、経営の立場で改めて眺めると、本当に打破できているのかといえ、必ずしもそうではありません。鉄鋼業の売上高利益率を長期的に見れば、長期国債の利回りと比較すると、図22に示すようにあまり変わらないか、むしろ下回っているようにも見えるのです。

ここで誤解して頂きたいのは、今まで歩んできた道のりが間違いだったというつもりはさらさら無いということです。確かに無謬であったと断言する気はありませんが、それでも正しい方向を選択してきたことに違いはありません。むしろ、大きな転換期にあると言った方がいいかもしれません。

即ち、従来のハイエンド品シフトだけの延長上には将来の絵姿が描き難い状況にあるわけです。そして、ここでの舵取

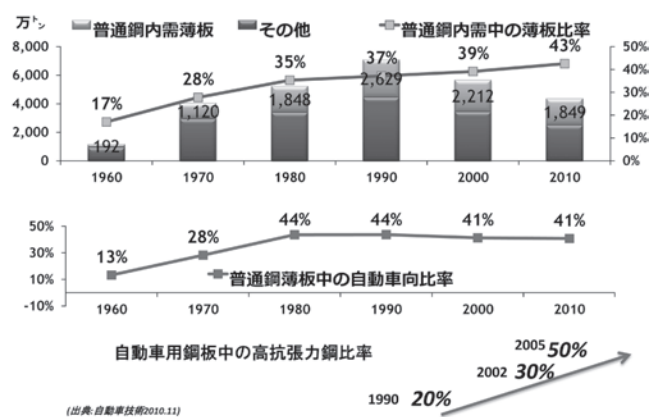


図21 ハイエンド品へのシフト

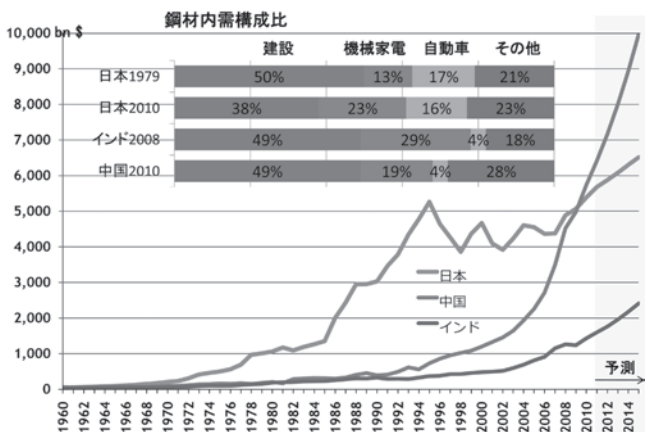


図20 成長しない国内需要

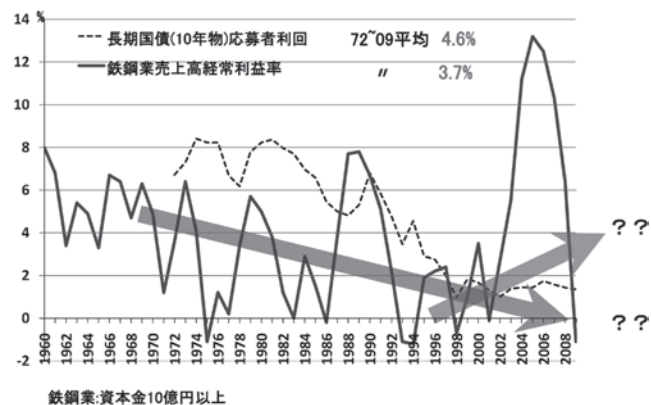


図22 国債利率並みの利益率

りが大変重要になっています。

そうした視点から、もう一度ハイエンド技術というものを
見直してみたいと思います。

「ハイエンド」から連想する言葉は「上級」であり「高価」
ですので、寿司屋でいうとさしづめ大トロといったところであ
りましょう。この大トロなるものは、捌いたマグロの3%しか
なく、回転率が低くロスが大きい、つまり原価率が高い。その
割に「大トロ」という看板を出しておかないとレピュテー
ションリスクが発生するので仕入れの質は落とせない。何か
しら鉄鋼業に符合するものがあります。ちなみに、寿司屋に
とっての理想的なオーダーとは、大トロ3%、中トロ12%、
その他85%で、これでいけば理想的なコスト構成となるそう
ですが…。

余談はさておき、ハイエンド技術が絶対的な優位性を生み
だすのかどうかを要素別に整理したのが図23です。結論を
言えば、ハイエンド技術は最終的には歩留・コストに収斂し
てしまい、それだけでは一時的な優位性にすぎないと思えま
す。そしてコスト勝負ともなれば、表2に示す通り、ハイエン
ド技術を保有しているだけというのはとても安心などしてい
られないことになります。

このようなことは何も鉄鋼業だけでなく、垂直統合による
情報共有と洗練されたコスト合理化で市場を開拓し、日本型

- 薄板ハイテン
- 方向性電磁鋼板
- 高強度(>X80)大径管
- 高級OCTG
- 自動車向け特殊鋼
- 高速鉄道用車輪 ……

ハイエンド品を造るのに必要な要素

1. 設備(機械系・電気制御系)… (自作以外は)COPY可能
2. 成分系 …… COPY可能
3. 製造方案 …… 組合せ、スリ合わせ、
タイトコントロール等
リタイア技術者の流出もあるが
Black-box化可能か???
4. 一貫製鉄所のマネジメント …… Gray-box?

製造方案 ≡ 歩留・コスト勝負

図23 「ハイエンド」だけで戦えるか？

表2 コスト勝負の状況

	日本ミル	新興国一流ミル
人件費	× → 長期円安で△	◎ → 為替高で○
環境コスト	× × ×	◎
政策支援	×	○
市場構造	過当競争 × ×	SPOT売り主体 ○
市場規模	○ → ×	◎
原料コスト	×	△ → ×
製鉄所の効率	今は◎だが…	△

ビジネスモデルの独壇場であった液晶パネル・DVDプレー
ヤー・カーナビ・太陽光パネルなどが、今や世界水平分業に
よる効率的生産で低コストを実現した欧米先進国と新興国に
よるグローバル型ビジネスモデルに全く太刀打ちできない状
況にあります。

こうした産業では、早急な新しいビジネスモデルの構築が
求められておりますが、鉄鋼業としても決して他人事ではあ
りません。

話を整理しますと、ハイエンド技術が存在意義を失ってそ
れに代わるものを探すというのではなく、いかにハイエンド
技術を保有しつつ、いかにそれをビジネス戦略の有効なカー
ドとして使うのかということです。

資源の無い我が国にとってハイエンド技術を失う日が競争
力を失う日になることは明白です。ハイエンド品シフトに対
する過剰な反省からハイエンド技術を軽視すること無く、ビ
ジネス戦略を練り上げていくことが求められるべきなのだと
思います。

11 これからの技術経営

私はスキーが大好きで、今でもシーズンになり山々が白く
なるとどうも気がそぞろになります。ところが、やっと時間
を見つけてスキー場のリフトに座って青空を眺めていると現
実が忘れられるかというところも行かず、何かの拍子に仕事
のことを考えてしまうのは損な性格なのかマメな性格なのか
はわかりませんが、雪原の斜面に雪俵を見つけると技術開発
を連想したりします。

雪俵というのは、なんらかの起点で雪の小片が風の影響や
斜面の状態で雪原を転がり落ち、雪だるまのように成長して
いく自然現象で、小規模のものなら街中の屋根などでも起き
ることがあります。大規模なものは図24に示す北米の雪原
のSNOW ROLLERが有名です。

この雪俵が転がって成長する様が、これからの技術開発の
ありようを示していると言ったら、さぞや戸惑われると思い
ますが、最後にそれを示したいと思います。

これはちょっとした物理学というか数学に興じたものです
が、案外示唆に富んだ結果になりました。

内容としてはさほど難しいものではなく、2次元の斜面を
転がる円盤の運動量収支計算です。

斜面を並走落下する円盤の中心速度 v と回転する円盤の角
速度 ω を、円盤に滑りが無いと仮定して連立して運動量の収
支を取ると、単純に転がり落ちる場合は、

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2}{3} g \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

転がりながら成長する場合は、

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2}{3} g \sin \theta' - \frac{7v}{3R} \frac{dR}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

が得られます。ここで、雪俵の半径 R 、斜面の傾斜角 θ です。

(2) 式右辺第2項は、半径が変化することによるモーメント変化の項で、時間が充分経過し雪俵が充分巨大になると、落下する雨粒が最終的に等速度落下するように、雪俵も最終的には等速度で転がることになります。ここでは、そこまでは考えず、転がるときに付く雪の量を、転がった距離 x と斜面に垂直な荷重 $mg \cos \theta$ に比例するとしますと、雪俵の質量 m の経時変化を表す基礎方程式は、

$$m = m_0 \exp \left(\frac{1}{3} \alpha g^2 \cos \theta \sin \theta \cdot t^2 \right) \dots\dots\dots (3)$$

となります。ここで α は雪の付き方を表す定数です。

この基礎方程式を用いて日本と新興国の比較を計算しますが、それに用いた条件を図25に示します。これは冒頭に示した国ごとのGDP(国内総生産)と鋼材消費の関係のグラフに基づいたものですが、このグラフが各国の経済の状況をよく表していると考えました。

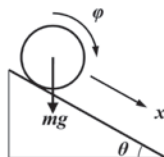
図26が初期条件ともいうべき図で、図27はその計算結果です。また、経時変化のグラフが図28ですが、日本と新興国の彼我の勢いの差は歴然で、ものの見事に追い抜かれてしまいます。しかも、しばらくの間優位性を保っているようでも、追い抜かれるときはいきなり一瞬にやってきます。

新興国の追い上げに対する漠とした危機感のイメージはまさにこのようなものだと思います。

技術の成長は、スキー場で見かける雪俵のようなもの。
⇒転がりながら大きくなっていく。

成長の基礎方程式

$$m = m_0 \exp \left(\frac{1}{3} \alpha g^2 \cos \theta \sin \theta \cdot t^2 \right)$$



雪原を転がる 雪だわら(SNOW ROLLER)

図24 技術の優位性を維持するもの(技術成長イメージ)

これでは、日本鉄鋼業として、いつか必ず来る不都合な未来となりますが、私は、そうとは限らないと考えています。

もう一度図25を見てください。ポイントは、日本は先進国のグループのなかで上位に位置し製造業が経済を牽引している点です。ここにハイエンド技術を生み出し続けてきた日本

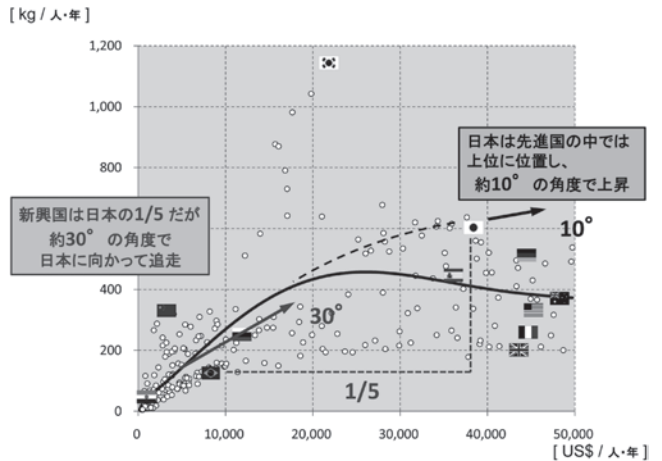


図25 鋼の市場動向から見た彼我の勢いの差(鋼材消費 vs GDP)

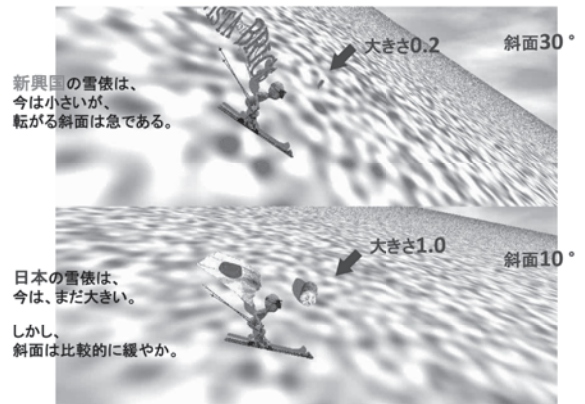


図26 計算の初期条件 (t=0)

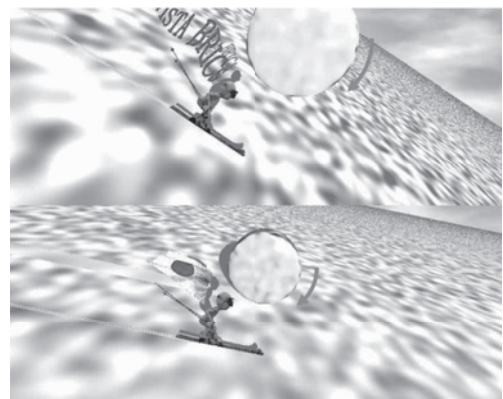


図27 計算結果の一例 (t=7)

の製造業が持つポテンシャルの高さがあるはずで、言うなれば見えない資産ともいべき蓄積があります。一方、新興国が先進国の模倣という形で成長を続ける限り、その成長は平均的成長曲線をたどることになり、斜面の傾斜角 θ も 30° であり続けることはなく、図29に示すようにちょうど平均的成長曲線を上下反転させたようなものになるでしょう。その場合の再計算結果のグラフが図30です。つまり、そう簡単には追いつかれないということになります。私の持っているイメージは、まさにこのようなもので、決して悲観したものではありません。

大切なことは、日本鉄鋼業が傾斜角 $\theta = 10^\circ$ であり続けることで、厳しい経済状況や経済予想に臆することなく粛々とハイエンド技術を生み出し続けることと、それを活かすビジ

ネスモデルを早期に確立することこそが、これからの技術経営に求められていることです。

では、傾斜角 θ を定める要素は何か…、国勢、税制といった外的要因もありますし、大学制度を含めた人材育成もあります。表裏一体としてビジネスモデルも影響しますし、今までの意志決定のスピードでは駄目かも知れません。

これは経営者だけの課題ではなく、ともに日本鉄鋼業に身を置く皆さんと一緒に知恵の限りを尽くして解決するものです。私自身も今までの成果に固執することなく積極的に新たな挑戦をしていきたいと思います。来るべき新しい時代をまた皆さんとともに歩むことを楽しみにしています。

(2011年5月10日受付)

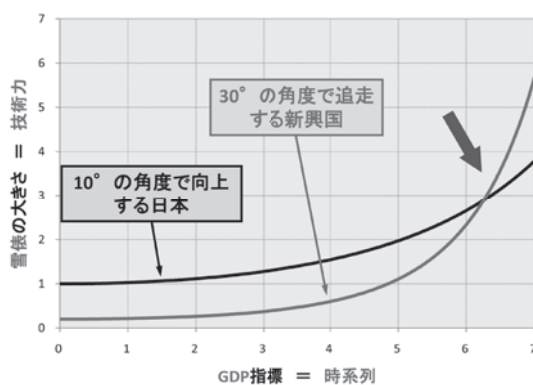


図28 技術力逆転のシミュレーション結果（角度の差の影響）

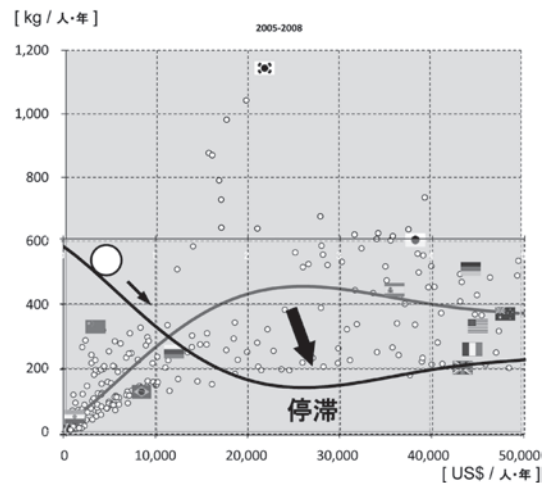


図29 鉄鋼の市場動向から見る技術開発スピード（平均成長角度）

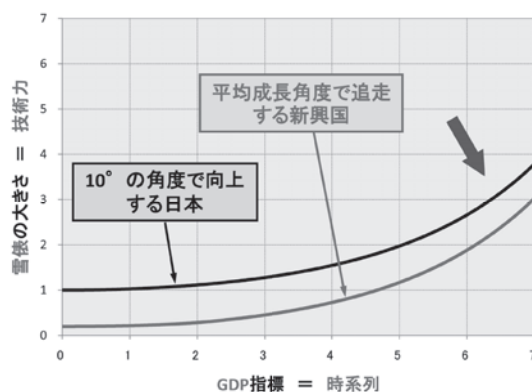


図30 再計算結果（日本が今の技術開発スピードを維持）

特別講演

□西山賞受賞記念特別講演

育まれ 鉄と歩みし 半世紀

Half a Century of Growing and Walking with Iron

浅井滋生

(独) 科学技術振興機構
JST イノベーションプラザ東海 館長

Shigeo Asai



*脚注に略歴

東北地方太平洋沖地震の被害により亡くなられた方々に謹んでお悔やみを申し上げますと共に、被災された皆様に心よりお見舞いを申し上げます。

この度の大震災を受けて、日本鉄鋼協会第161回春季講演大会は中止となりましたが、去る3月25日、総会・名誉会員推挙式・表彰式は執り行われ、西山賞を受賞することができました。しかし、受賞記念講演は行われませんでしたので、予定した講演内容の一部をここに記すことにします。

1 鉄を通した材料電磁プロセッシングとの関わり

1962年名古屋大学工学部に新設された鉄鋼工学科に、その第一回生として入学したのが鉄との関わりの始まりであり、今年はそのから数えて50年目に当たる。この50年は日本鉄鋼業の正に隆盛期から定常期に相当していたことが図1より読み取れる。日本鉄鋼協会との本格的な関わりは名古屋大学工学部助手に採用された1971年からの40年間となるが、その内、後の30年間は“材料電磁プロセッシング (Electromagnetic Processing of Materials = EPM)”の構築と普及に携わった。1965年、鉄鋼工学科の4年生となり鞭巖先生が担当する特殊精錬工学講座に配属された。鞭先生は化学工学を冶金分野に導入した先駆者であり、高炉の数学的モデルの提唱者として注目を集めていた。私に与えられた研究テーマは“LD転炉の数学的モデル”で、溶鋼の流動解析に関心を向けていたところ、鞭教授は助手となって2年目の私を、乱流下の流動解析等を手がけ、鉄鋼プロセスの数値解析の分野で脚光を浴びていた米国、ニューヨーク州立大学のSzekely (シッカリーと発音していた) 教授の下にポ

ストドクトラル・フェローとして派遣した。そこで初めて電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics) に接する機会を得た。振り返ってみれば、これがEPMを始める切っ掛けとなった。2年間の留学を終えて帰国後、溶鋼の凝固の研究に携わっていたところ、1982年に、IUTAM (International Union Theoretical and Applied Mechanics) 主催の“Application of Magnetohydrodynamics to Metallurgy”と題するシンポジウムがイギリスのケンブリッジ大学で開催されるとの情報を川崎製鉄 (現: JFE スチール) の江見俊彦氏より得、同氏の紹介で参加した。日本からの参加者は4名であった。本シンポジウムを通じて熔融金属に及ぼす電場・磁場の機能を再認識すると共に、後に、我々と共にEPM構築に関わることと

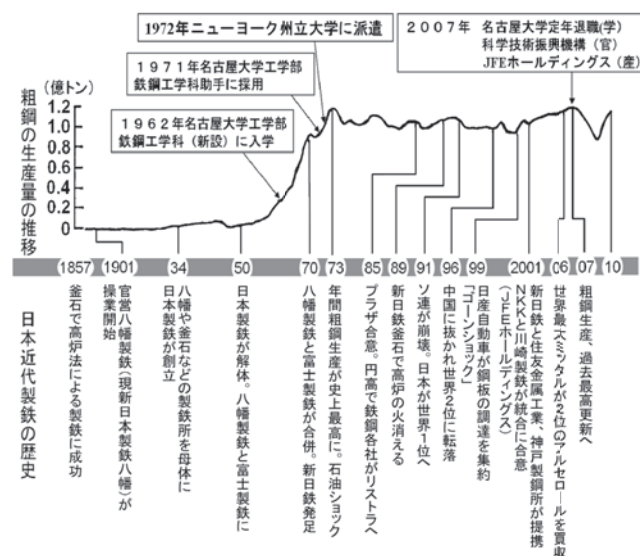


図1 近代製鉄の歩みに重ねた自己の履歴

* 昭和46年名大大学院工学研究科鉄鋼工学専攻博士課程修了後、直ちに同大学工学部助手に採用され、63年4月教授に昇任、平成19年3月同大学を定年退職した。同年4月科学技術振興機構イノベーションプラザ東海の館長に就任、現在に至る。

なったフランスのMADYLAM研究所 (CNRS) のGarnier博士、Moreau教授等と知遇を得ることができた。MADYLAM研究所は電磁流体力学に長け、かたや鉄鋼協会は材料工学に優れ、EPMの構築においては相補の関係にあった。したがってEPMはこのシンポジウムを起点として始まったと言っても過言ではない。帰国してから鉄鋼協会に電磁気冶金と銘打った特定基礎研究部会の立ち上げをお願いしたが、なかなか認められなかったところ、川上公成氏 (NKK)、大橋徹郎氏 (新日本製鐵)、加藤哲男氏 (大同特殊鋼) 等の支援を得て3年後の1985年に「電磁気冶金の基礎研究部会」の発足に漕ぎ着けることができた。当時、特定基礎研究部会の部会長は教授の先生と決まっていたにも拘わらず、助手の私が指名されたことで、おおいに発奮したものである。また、新日本製鐵の梶岡博幸氏は助手の私に奨学寄付金を付け、自信を与えてくれた。1986年の春季講演会において、初めてセッション名として電磁気冶金を掲げた (図2参照)。しかし、このセッションの会場に現れた聴講者は講演数と同じ5名であった。私は思い入れが強かった分、落胆も大きく、“もうこんな研究は止めよう”、と思ったものである。それを諫めてくれたのも上記の先輩方であった。その後、製鋼分野、特に連铸工程

への電磁攪拌、電磁ブレーキ等、電磁気力の導入・応用期と重なったこともあり多くの技術者・研究者が関心を持ってくれた。それに伴い、名称も“電磁気冶金 (Electromagnetic Metallurgy)”から“材料電磁プロセッシング (EPM)”に変更された。協会の支援状況を表1に示す。協会の支援無くしては今日のEPMの姿はない。1998年には科学研究費補助金の特定領域研究に採り上げられ、後に述べる強磁場の分野にも進出した。2000年には我が国の全主要鉄鋼会社が参加したNEDOの国家プロジェクトが立ち上がった。更に、2006年には日本学術振興会アジア拠点事業に採択された。上記したフランスのMADYLAM研究所も、今ではその名称をLe Laboratoire EPM du CNRSと変え、中国では東北大学にEPMの国家重点研究室が設置されている。その間、1994年に名古屋で開催された第1回のEPM国際シンポジウムを皮切りに、3年毎にパリ、名古屋、リヨン、仙台と日・仏間で交互に開催され、第6回はドイツのドレスデン (2010) で行われた。日本鉄鋼協会は日本で開催された3回を主催、外国開催の3回を共催して、その発展に尽力してくれた。そのお陰で、いずれの開催も20カ国以上から3～400名の参加者が見られた。以上からお分かりいただけるとおり、材料電磁プロセッシングは1980年代に我が国に始まり、1990年から今日まで日本鉄鋼協会の庇護の下、日本―フランスとの密な協力により発展してきた希有な学術・技術分野である。

2 材料電磁プロセッシングの展開

ここでは材料電磁プロセッシングの構築過程でなされた種々の研究の中から、私なりに関心を持った二つの成果を選び、紹介する。

2.1 鋳型振動を必要としない溶鋼の連铸

アルミニウムの電磁鋳造 (鋳型無し鋳造) は1966年のGezelev¹⁾に始まる。その原理は交流磁場が溶湯に及ぼす電磁気圧 $P_m = B^2/2\mu$ (B : 磁束密度、 μ : 透磁率) を溶湯の静圧 $P = \rho gh$ (ρ : 溶鋼の密度、 g : 重力加速度、 h : 溶鋼の保持高さ) に均衡させるものである。アルミニウムではこの原理

日本鉄鋼協会第111回講演大会 (1986年4月2, 3, 4日東京大学)	
—— 電磁気冶金・センサー (第4会場・4月3日) ——	
(13:20～14:00) 座長 浅井 滋生 (名大)	
714 パルス放電による凝固組織の制御	鋼管中研 ○中田正之、MIT Ph・D M.C.Flemings, 工博 塩原 融
715 Li ⁺ イオン含有酸化物薄膜のPVDによる生成の物理化学的研究	東工大工 Ph・D 工博 後藤和宏、張 力偉 沼津高専 工博 小林 陸弘
(14:00～15:00) 座長 牛尾 誠夫 (阪大)	
716 溶融金属表面波動の抑制に及ぼす直流磁場の効果	名大院 ○小塚敏之、名大工 工博 浅井滋生、工博 巖 巖
717 高真空・高温精錬による金属の蒸発 (金属の蒸発現象-2)	鋼管中研 ○川上公成
718 真空中におけるプラズマアーク特性の検討	新日鐵広畑 桑原達朗、平岡照祥、 新日鐵特基2研セ 工博 大橋徹郎、工博 武田純一 新日鐵広畑技研 梅沢一誠、広畑 ○市川 馨

図2 昭和61年、日本鉄鋼協会春季講演大会プログラム抜粋

表1 日本鉄鋼協会における材料電磁プロセッシングに関わる部会の開催状況

1985～1989年	「電磁気冶金の基礎研究部会」部会長: 浅井滋生
1990～1994年	「材料電磁プロセッシング部会」部会長: 浅井滋生
1995～1998年	「電磁ノーベルプロセッシング研究会」主査: 谷口尚司
1999～2002年	「高度電磁気力利用マテリアル・プロセッシング研究会」 主査: 谷口尚司
2002～2005年	「強磁場を利用した鉄鋼材料の組織制御研究会」主査: 大塚秀幸
2003～2006年	「交流強磁場利用環境・材料プロセス研究会」主査: 安田秀幸

での casting が可能であるが、溶鋼を想定した場合、密度と保持高さの違いから工業的に入手可能な磁束密度ではその実現は叶わない。この点を克服するため casting 型の外側から磁場を印加して、溶鋼の静圧を電磁気圧と casting 型壁の両方で支える原理の下に、先に述べた NEDO のプロジェクトが実施された。この場合、溶湯と casting 型との接触圧力は軽減されることになり、このような条件下での凝固を軟接触凝固²⁾と呼ぶことにした。ほぼ時を同じくして POSCO (株) も同じ原理の下でプロジェクトを実施しており、その成果の一例を写真1に示す³⁾。写真 (a) は通常の casting であり、表面にはオシレーション・マークが見られる。一方、写真 (b) は casting 型の振動を止めた状態で、 casting 型の外側から磁場を印加して casting を行ったものである。表面にはオシレーション・マークは見られない。モールド・フラックスの消費量の比較を図3に示す。 casting 型振動下で軟接触凝固を行った場合 (A) の消費量が一番多く、 casting 型振動下で磁場を印加しない通常の casting での凝固の場合 (B) と軟接触凝固下で casting 型振動を止めた場合 (C) の消費量はほぼ等しい。このような試験操業は約1.5時間に渡り実施されたと聞く。鋼の casting は1949年、Junghans (ドイツ) と Rossi (アメリカ)

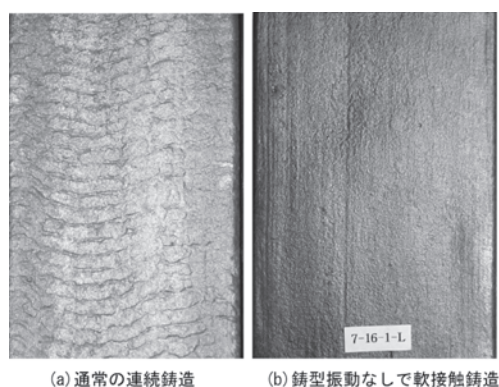


写真1 鋳片の表面性状の比較³⁾

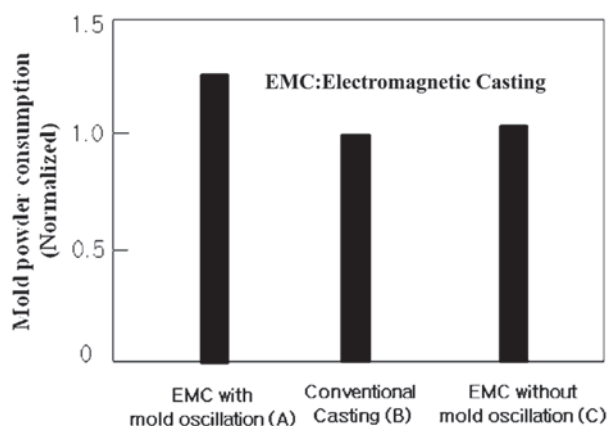


図3 鋳造形態の違いによるモールド・フラックス消費量の比較³⁾

が casting 型振動を導入することにより、初めて成功に導いた。それ以来、鋼の casting には casting 型振動とフラックスの使用は不可欠とされてきた。今後、 casting 型振動を必要としない casting 機の開発がなされるか否かは経営判断に因るところではあるが、可能性のある一つの技術が示唆されたものとして、敢えてここに紹介した。 casting 技術の流れから見れば、興味深い。

2.2 磁場印加による結晶配向

1990年に入ると冷媒としてのヘリウムガスを必要としない超伝導磁石が開発され、その普及に伴い、強磁場を用いる研究が化学、物理、生物の広い科学分野で活発化した。強磁場は磁石が鉄を引きつける力として知られる磁化力を非磁性物質においても顕在化させる。その理由は「磁化力は $F = \chi (B \cdot \nabla B / \mu)$ (χ : 磁化率) と表され、通常、非磁性物質においては磁化率 χ の値は極めて小さいが、磁束密度 B を高めることにより $(B \cdot \nabla B / \mu)$ の値が大きくなり、両者の積で決まる磁化力が無視できなくなる」にある。磁化率は電子の軌道およびスピンによって決まることから、非対称構造の結晶では電子軌道も非対称となり、結晶方位によって磁化率が異なる。そのため、強磁場を用いて結晶の方位を揃えること、すなわち結晶配向が可能となる。先に述べた科研費の特定領域研究はこの点を謳い採択された。材料電磁プロセスの守備範囲はローレンツ力利用の熔融金属から磁化力利用によって固体の金属、セラミックスおよび有機材料へと大きく拡大した。

ここでは室温セラミックレーザーを採り上げ結晶配向の成功例を示す。Akiyamaら⁴⁾はフッ素アパタイトセラミックス(六方晶系)の微粉を磁場によって結晶配向させた後、焼結を行い、高度に結晶方位の揃った疑似単結晶を作製した。次に、この疑似単結晶を用いてレーザー発振させることに世界で初めて成功した。アパタイト系の物質は大きな単結晶を作製する事が極めて困難であり、上記の方法は大型のレーザー用媒体作製に一つの道を拓いたものであり、国内外から大きな注目を集めている。この仕事は私が大学で定年退職を迎えた年度に学位を授与した指導生が、その後、分子科学研究所にて結晶配向の研究を継続し、4年の歳月を経てなされた成果である。そのため、私にとっては殊の外感慨深いものがあり、ここに採り上げた。

3 産・官・学との係わり

学生時代を含めれば45年間、学の世界にどっぷり漬かってきた者が定年を機に財団法人科学技術振興機構 (JST) の出先機関であるイノベーションプラザ東海館の館長に就任した。本財団は文科省の外郭団体であり、官の世界である。ま

た、その年の6月からはJFEホールディングス（株）の社外取締役として産の世界の一端にも触れる機会が与えられた。産・官・学、それぞれに異なる目的関数を異なる境界条件で解いている、というのが私の実感である。そして共通する基軸は知恵と信（誠実）であると見た。一人の人間が産・官・学、それぞれ異なる世界を体験できる喜びを噛みしめている。

学にあった時代の思い出として残るのは、鞭先生の下からシッカリ先生の下に派遣された2年間の留学生活であった。二人の先生にはお名前（鞭でシッカリ）の文字どおり厳しく指導していただいた。二人とも故人となられたが、奥様方とは今も文通が続いており、お目に掛かる機会も同窓生と共に得ている。京都の妙心寺で営まれた鞭先生の十七回忌法要に際して撮影した写真2と名古屋で開催したSzekely/Muchi Memorial Symposiumに際してのDr. Mrs. Szekelyとの写真3を示す。また、留学時代の下宿の隣家に住んでいた家族とは40年に渡り文通や相互訪問を続けている。さらに、EPMの6回のシンポジウム、足かけ20年に渡る研究者との交流を通じて、国内外に多くの友を得た。たまたま私が定年

を迎える年度に第5回のEPMシンポジウムが仙台で開催された。そのため組織委員長であった東北大学の谷口尚司教授がわざわざ私のためにセッションを設けて下さった。写真4はその折り撮影されたものである。これらの写真に見られるお一人お一人および私が担当させていただいた名古屋大学の研究室を巣立った卒業生141名、学位を授与した者20名等、真に多くの人間との知遇が得られた。これこそが学に在籍した間に得た私の宝である。このような皆様と共に30年かけて築いたEPMの種々の知見や情報は科学書籍の出版社であるオランダのSpringer社から2011年中に教科書として出版される運びである。その巻頭言には“In this sense I am not the only author of this book, but share that role with all of my colleagues in world EPM community.”と記した。偽らざる私の心境である。

官の在籍は5年目に入ったところである。JSTは「科学技術による地域振興」をスローガンに掲げ大学で生まれるシーズを地域の企業のニーズに結びつける地域事業も行っている。ところが政権交代に伴い2010年に始まった事業仕分けで、「地域のことは地域で」となり、JSTが地域事業を目的に全国に展開している16館は2011年度をもって総て閉館と決定した。国の政策変更とは言え、構成員の士気を維持しつつ閉館を迎えることの難しさを味わっている。しかし、これはめったに遭遇できない仕事であり、最近はこれを楽しむことにしている。

産においては取締役会の一員として企業経営の一端を見聞し、経営における技術開発の位置づけを知る等、得難い体験をさせていただいた。指揮命令系統の明確な企業組織の中で、トップに至った人間はその発言に重みがあり、かつ魅力に富んでいた。今流行りの謎かけで言えば、鉛筆のような人間である。中心に一本芯が通っていて、周りに木（気）を使っている。特に、数土文夫前社長はじめ昨年から中国大使となられた丹羽宇一郎氏等、日本を代表する経営者の発言には触



写真2 鞭先生の十七回忌法要、妙心寺にて



写真3 Szekely/Muchi Memorial Symposium（2001年名古屋）にて

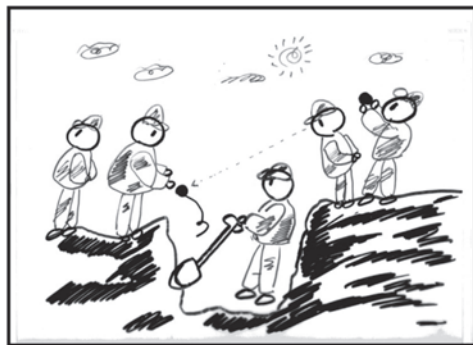
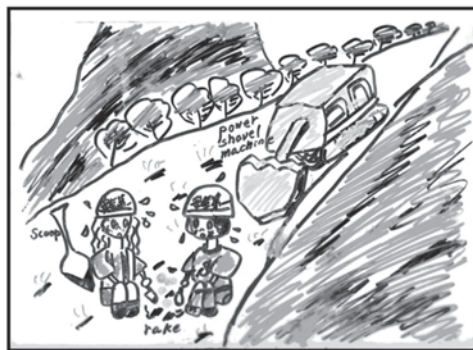
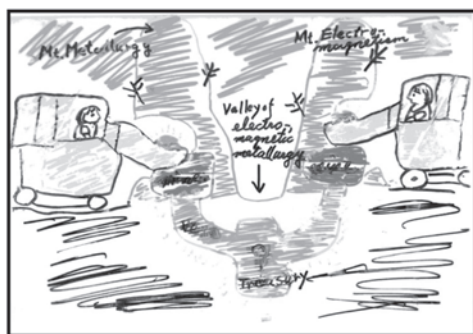


写真4 第5回のEPMシンポジウムのセッション風景

発されるところ大であった。このような機会が得られたのも、私個人の力にあるのではなく、日本鉄鋼協会会長を経験した事によるものと認識している。

4 おわりに

材料電磁プロセッシングをなんとか協会の中で位置づけようと、講演大会分科会委員であったのをいいことに、強引に電磁場関連の発表を著者の希望セッションを無視してかき集め、電磁気冶金のセッションに入れた。時の分科会主査であった鈴木朝夫先生や雀部実先生は見ても見ぬふりをしてくださった。そんな講演発表の折り、オーバーヘッド・プロジェクターで写した3コマ漫画を図4に示す。一番目は冶金の山



大手5鉄鋼会社のEPMの取り組み姿勢(1983)

図4 電磁気冶金の売り込みに用いた3コマ漫画

と電磁気の山の間の電磁気冶金の谷に宝が眠っている様、二番目はそこに子供(我々の研究部会)が小さなシャベルを持って現れ掘っている様とその成果次第では大型掘削車の出動が期待される様、三番目は日本の鉄鋼大手5社の内、真剣に掘っているのは1社のみで、後はその成果物を調べている者、全く無関心にソッポを向いている者等、まちまちの態度を揶揄している様、である。当時、小学生であった娘に描かせたものであるが、その娘も40歳に近づきつつある。また、専務理事であった島田仁氏は特定領域研究の成果をかなり強引に新聞発表し、NEDOの国家プロジェクトに繋げてくれた。等々、学に在籍した46年間はその大半がEPMとの係わりであったし、それを強力に支援してくれたのが日本鉄鋼協会であった。定年後の4年間はEPMと共に全力で駆けたその慣性の期間とも言えよう。

半世紀、心身共に健康に過ごせたのは「鉄」の縁で知り得た皆様の温かい支援があったからであり、もう一つは趣味の川柳とテニスのお陰である。テニスの腕前の方はお見せできないのが残念であるが、川柳はここに書かせていただくので、ご笑読いただければ幸いである。

「コートでは 仕事で見せぬ エース打ち」、「科研費を大きく当てたら 小さく育ち」、「委員会 こんなにあっていいんかい」、「顔にしわ 増やして脳は すべすべに」、「歳かなあ 妻という字を 毒と読み」

世界におけるEPMの普及度を見るために、Googleで“Electromagnetic Processing of Materials”と打ち込み、そのヒット数を調べた。2011年4月17日の時点で42,700ポイントであった。30年間の成果として、このヒット数を多いと見るか少ないとみるかは人それぞれであろうが、私にとっては望外の数値である。

参考文献

- 1) Z.N.Gezelev : U.S. patent 3467166.
- 2) 浅井滋生 : 第129, 130回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1989) , 51-77.
- 3) J.Park, H.Kim, H.Jeong, G.Kim, M.J.Cho, J.-S.Chung, M.Yoon, K.P.Kim and J.Choi : ISIJ Int., 43 (2003) , 813-819.
- 4) J.Akiyama, Y.Sato and T.Taira : Appl. Phys. Express, 4 (2011) , 022703-1.

(2011年4月25日受付)

特別講演

□浅田賞受賞記念特別講演

鉄鋼分析のための分離技術の開発

Development of Separation Techniques for the Analysis of Iron and Steel

平出正孝

名古屋大学 大学院工学研究科
教授

Masataka Hiraide



*脚注に略歴

1 はじめに

1950～1960年代、微量成分分析のための分離濃縮法が盛んに研究され、今日の分離化学の基礎が築かれた。その後、この半世紀の間に、対象とする微量元素の濃度は益々低下する傾向にあり、これに伴い、分析機器の開発・改良が絶え間なく続けられてきた。しかし、これらの高感度分析法をもってしても、極微量元素の定量には、依然として化学的前処理が必要な場合が多い。すなわち、計測を干渉・妨害する主成分元素（マトリックス元素とよぶ）を除去し、目的微量元素をさらに濃縮する。こうすることにより、分析機器の優れた性能が遺憾なく発揮され、精度・正確さに共に優れた信頼性の高い分析値を得ることができるのである。

鉄鋼分析において、マトリックス元素である鉄を分離除去することは、鉄の化学反応性が高いため、他の金属試料の分析と比較して容易ではない。筆者らは、鉄鋼分析（特に高純度鉄の分析）をマイクロトレースアナリシス¹⁾と環境調和型分離分析の観点から研究し、いくつかの有用な新規分離技術を開発してきた。本稿では、これらの分離法について、原理と特徴を概説する。

2 分離技術の評価項目

分離技術を設計する場合、満たすべき重要な条件は、目的微量元素が完全に回収できること、良好な分離係数が得られること、コンタミネーションの恐れが少ないこと、である²⁾。回収率は、95%以上（場合によっては90%以上でも可）が要求される。分離係数は、分離前後のマトリックス元素の量を A_M^0 及び A_M 、分離前後の微量元素の量を A_T^0 及び A_T とする

と、 $(A_M/A_T) / (A_M^0/A_T^0)$ と定義され、マトリックス元素がいかに効率よく分離除去されたかを示す尺度となる。組み合わせる計測機器に大きく依存するが、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ で良い場合が多い。コンタミネーションは、試薬、容器、器具、実験室の大気雰囲気、実験者等から、目的微量元素が分析系に混入して起こる。分析結果の再現性や検出感度に大きく影響するため、適切な対策を講じてコンタミネーションを無視できるレベルにまで減少させる必要がある。

そのほか、多元素が同時分離できること、分離操作が迅速簡便であること、環境に配慮した操作・試薬を用いていること、等々が分離の評価項目としてあげることができる。

3 界面活性剤を用いる分離技術

3.1 界面活性剤支援吸着分離（アドミセル分離）

鉄マトリックスの典型的な分離技術は、鉄のクロロ錯体をイオン対（例えば H^+ 、 $FeCl_4^-$ ）としてジエチルエーテルやジイソプロピルエーテルに抽出する方法³⁾であろう。しかし、揮発・引火性で悪臭のする有機溶媒が必要であり、さらに鉄の抽出率は塩酸濃度に大きく依存する。筆者らは、Fig.1に示すポリオキシエチレン系非イオン界面活性剤（PONPEやTriton X）がジエチルエーテルと類似した構造の親水基を持つことに着目し、Fig.2のようなアドミセルを調製した⁴⁾。通常のアドミセルは、陰イオンまたは陽イオン界面活性剤を固体粒子表面に静電的に吸着させて調製する⁵⁻⁷⁾が、本法では疎水性相互作用を用いている。非イオン界面活性剤で修飾したXAD樹脂（スチレンジビニルベンゼン共重合体、粒径 $0.1 \sim 0.2mm$ ）は小さなカラムに充てんし、分離に使用した。Fig.3に示すように、鉄マトリックスは6～10M塩酸溶

* 昭和51年名古屋大学大学院工学研究科博士課程を修了（工学博士）後、昭和52年名古屋大学工学部助手、昭和59年講師、同年マックスプランク研究所高純度材料部門研究員（1年間）、平成2年助教授を経て平成9年工学研究科教授に昇任し、現在に至る。

液からアドミセルカラムにほぼ完全に吸着捕集され、最適濃度8Mでは99.9%以上の鉄が除去できた。一方、多種類の微量元素はカラムを完全に通抜けため、流出液を蒸発乾固後0.1M硝酸溶液とし、誘導結合プラズマ-質量分析法 (ICP-MS) または黒鉛炉原子吸光分析法 (GFAAS) により定量し

た。Table 1に示すように、本法の検出下限 (鉄鋼試料中の含有率) はいずれの元素も ppb レベルに達しており、なかでも Mn、Co、Ag、Cd、Bi は特に高感度測定が可能であった。本法の正確さを評価するため、NIST 及び CMSI の鉄標準試料を分析した結果を、Table 2に示す。多種類の微量元素が ppb

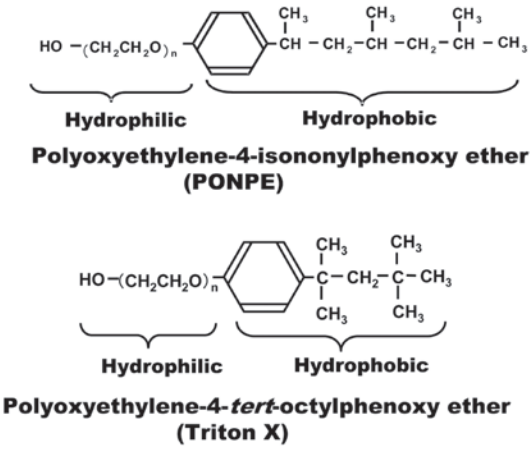


Fig.1 Chemical structure of polyoxyethylene-type nonionic surfactant

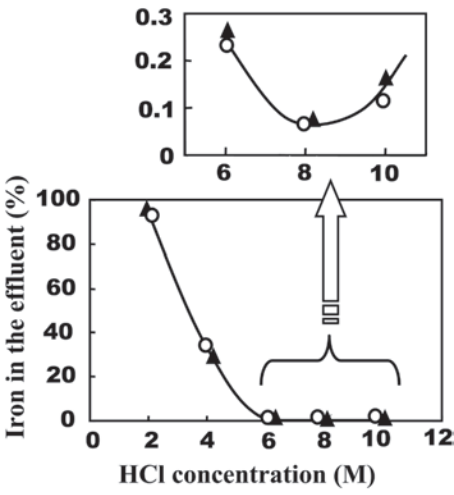


Fig.3 Iron removal as a function of acidity of hydrochloric acid

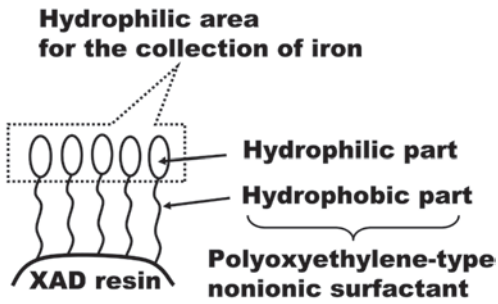


Fig.2 Surfactant aggregate formed on XAD

Table 1 Detectability of the admicellar separation method (μg/g)

Ag	0.003	Bi	0.001	Cd	0.002
Co	0.002	Cr	0.04	Cu	0.03
Mn	0.004	Ni	0.03	Pb	0.06
Ti	0.03	Zn	0.2		

Table 2 Determination of trace elements by ICP-MS

Element	Concentration (μg/ g)			
	NIST 2168		CMSI 1010b	
	Certified	Determined	Certified	Determined
Ti	< 3	< 0.03	< 1	0.55 ± 0.05
Cr *	3	3.0 ± 0.1	2.1	2.1 ± 0.1
Mn	6	5.8 ± 0.2	1.3	1.3 ± 0.1
Co	6	5.8 ± 0.2	1	0.93 ± 0.03
Ni	12	11 ± 1	15	15 ± 1
Cu	5	4.9 ± 0.2	1.4	1.4 ± 0.1
Zn	< 5	4.7 ± 1.6	1	1.5 ± 0.6
Ag	—	0.045 ± 0.005	—	0.072 ± 0.003
Cd	< 1	0.23 ± 0.03	< 1	0.35 ± 0.01
Pb	< 1	0.63 ± 0.07	1	1.0 ± 0.1
Bi	< 3	0.12 ± 0.02	< 1	0.21 ± 0.01

* Determined by GFAAS.

レベルまで精度良く定量でき、保証値ともよく一致した。

なお、試料溶液の酸性度をpH1.5にすると、鉄マトリックスはアドミセルカラムを素通りし、一方、PとAsのヘテロポリ酸は、カラムに吸着されることを見出した⁸⁾。水酸化テトラメチルアンモニウム溶液で脱着後、高速液体クロマトグラフィー(HPLC)で計測したところ、PとAsのピークは、過剰のモリブデン酸塩の大きなバックグラウンドから良好に分離できていることがわかった。PとAsは保持時間が重なるが、Asのヘテロポリ酸をクエン酸であらかじめ分解することにより、分別定量が可能となった。

3.2 w/oエマルション分離

液-液界面に界面活性剤を配置することにより、有機相の液滴中に微細な水相が分散するw/oエマルションを調製することができる。筆者らは、このエマルションに粒度識別能があることを見出し⁹⁾、これを鉄鋼分析に応用した¹⁰⁻¹²⁾。w/oエマルションは、トルエン、*n*-ヘプタン、非イオン界面活性剤Span-80(ソルビタンモノオレイン酸エステル)、1M塩酸、キレート試薬(8-キノリノール、kelex-100など)をバイアルに取り、超音波ホモジナイザー(20kHz)で激しく混合して調製した。これを鉄の試料水溶液(pH3.5)に添加し、マグネチックスターラーでかき混ぜて微細な液滴とした。微量元素はキレート試薬と反応し、有機相を経由して塩酸相へと移行した(Fig.4参照)。一方、鉄マトリックスは、含水酸化鉄(III)コロイドとなっているため、有機相に侵入できず、試料水溶液中に残留した。本法の分離係数は 10^{-2} であり、エマルションを解乳化後、ICP-MSにより各種微量元素(Ti、Cu、Ga、In、Biなど)が定量できた。

3.3 凝析捕集分離

非イオン界面活性剤の水溶液に多量の塩類を添加すると、

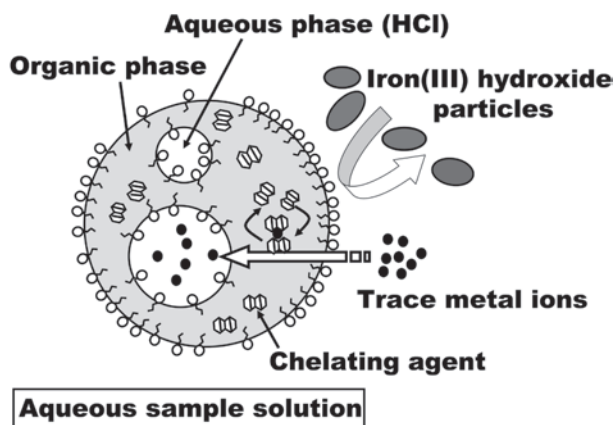


Fig.4 Separation of iron with w/o emulsion

界面活性剤が凝集し析出してくる。この現象は古くから知られているが、界面活性剤がポリオキシエチレン系のPONPEやTriton Xである場合、凝析と同時に鉄マトリックスが捕集分離される可能性がある。PONPE-7.5を用いた場合の鉄の除去率を、Fig.5に示す¹³⁾。塩化リチウム、塩化カルシウム、塩化マグネシウムのいずれかの添加により界面活性剤は凝析し、同時に鉄マトリックスがほぼ完全に除去された。鉄を含有した界面活性剤相は遠心分離により除去され、溶液中には多種類の微量元素が残留した。この溶液をイミノ二酢酸型キレート樹脂層に通して微量元素を濃縮し、同時に多量の塩類から分離した。各種微量元素(Ti、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Bi)は、5M硝酸と水で脱着後1M硝酸溶液とし、ICP-MSとGFAASで定量した。

なお、非イオン界面活性剤の曇点抽出を利用した鉄マトリックス除去法も検討した¹⁴⁾。鉄はチオシアナト錯体にあらかじめ変換し、EDTAを添加して微量元素の損失を防いだ。本法は界面活性剤(PONPE-7.5)の析出に加熱が必要であるが、多量の塩類を必要とせず、用いるチオシアナト酸アンモニウムもGFAASを妨害しないため、直ちにMn、Ni、Biなどが定量できた。

4 その他の分離技術

4.1 電解析出

従来から行われている水銀陰極電解法³⁾を、マイクロレースアナリシス¹⁾の観点から改良し、コンタミネーションの極めて少ないフローシステム電解析出法を提案した¹⁵⁾。Fig.6に示すように高純度鉄試料そのものを陽極としており、電解と同時に電解液(塩化カリウムを含む酢酸緩衝液)中で鉄は徐々に溶解し、直ちに水銀表面に析出した。水銀は、少量ずつ連続的に供給されているため、常に清浄な表面で効

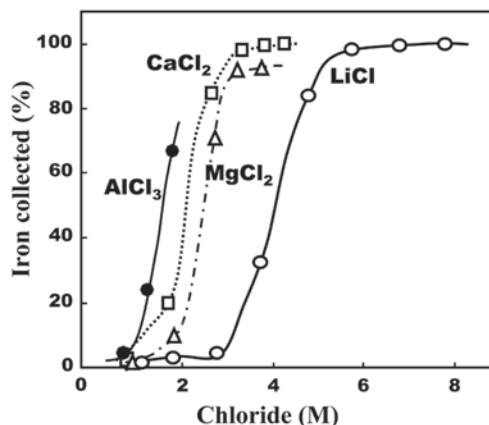


Fig.5 Collection of iron by salting-out of nonionic surfactant

率のよい電着分離が達成できた。電解液に残留する微量元素は、GFAASなどで直ちに定量が可能である。なお、環境調和の観点から水銀の使用を避ける傾向にあるが、水銀は水素過電圧が大きく、精製が容易、さらにポーラログラフィーの従来の豊富なデータが参考になる。注意深く管理された環境下、電極としての優れた特長を活かすことが望まれる。

4.2 温度感応性ポリマー捕集

水溶性高分子であるポリ(N-イソプロピルアクリルアミド)やポリビニルメチルエーテルは、加熱により凝集して塊状となり、同時に疎水性化合物を捕集する。容易な操作で高度に濃縮できる特長があり、すでにアルミニウムマトリックスからの微量元素(あらかじめ疎水性キレートに変換)の分離に応用した¹⁶⁾。しかし、使用したキレート試薬(ピロリジンジチオカルバミン酸アンモニウム)は鉄とも反応するため、鉄分析に適用することはできない。現在、選択的キレート試薬の探索と、鉄マトリックスのマスキングの両方面から実験を行っている。

4.3 イオン液体抽出

種々の分野でイオン液体の応用が盛んに研究されているが、筆者らもイオン液体の不揮発性と捕集特性に魅力を感じ、鉄鋼分析への応用を試みている。例えば、Si、P、Asをヘテロポリ酸に変換後、 μl 量の1-ブチル-3-メチルイミダゾリウムビス(トリフルオロメタンスルホニル)イミドに抽出し、HPLCで分析した¹⁷⁾。アドミセル分離法と比べ、脱着操作が不要なため微量元素の回収率が完全であり、かつSiのコンタミネーションが極めて少なかった。なお、イオン液体を用いる微量重金属元素の多元素同時分離についても、現在検討中である。

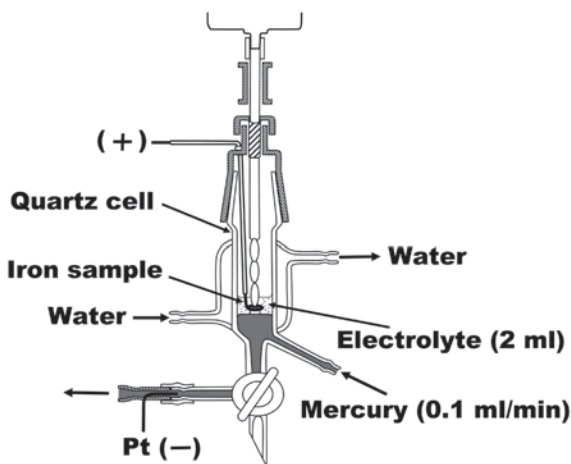


Fig.6 Flow-system electrodeposition of iron matrix

5 おわりに

今日までに多数の分離技術が研究され、報告されてきた。対象とする微量元素の種類・数・含有率、用いる分析機器、実験室環境等を考慮し、分離の化学を理解した上で、最も適した分離法を選ぶ必要があろう。なお、分離濃縮法と高感度分析機器を組み合わせれば、どんな低濃度の超微量元素でも定量できるかということ、そうではない。分離操作中に起きるコンタミネーションが、分析の成否を大きく左右する。コンタミネーションがなく、分離係数の優れた、新しい原理に基づいた分離技術の創出が強く期待される。

参考文献

- 1) G.Tölg, A.Mizuike, Yu.A.Zolotov, M.Hiraide and N.M. Kuz'min : Pure & Appl. Chem., 60 (1988) , 1417.
- 2) 平出正孝 : ふえらむ, 7 (2002) , 436.
- 3) A.Mizuike : Enrichment Techniques for Inorganic Trace Analysis, Springer, Berlin, (1983) .
- 4) H.Matsumiya, S.Furuzawa and M.Hiraide : Anal. Chem., 77 (2005) , 5344.
- 5) M.Hiraide, J.Iwasawa, S.Hiramatsu and H.Kawaguchi : Anal. Sci., 11 (1995) , 611.
- 6) M.Hiraide, J.Iwasawa and H.Kawaguchi : Talanta, 44 (1997) , 231.
- 7) M.Hiraide and W.Shibata : Anal. Sci., 14 (1998) , 1085.
- 8) H.Matsumiya, T.Kikai and M.Hiraide : Anal. Sci., 25 (2009) , 207.
- 9) M.Hiraide, M.Ogoh, S.Itoh and T.Kageyama : Talanta, 57 (2002) , 653.
- 10) 景山知洋, 平出正孝 : 分析化学, 51 (2002) , 741.
- 11) T.Kageyama, H.Matsumiya and M.Hiraide : Anal. Bioanal. Chem., 379 (2004) , 1083.
- 12) 松宮弘明, 平出正孝 : 鉄と鋼, 93 (2007) , 85.
- 13) H.Matsumiya, Y.Sakane and M.Hiraide : Anal. Chim. Acta, 653 (2009) 86.
- 14) 松宮弘明, 黒宮雅大, 平出正孝 : 鉄と鋼, 97 (2011) , 61.
- 15) M.Hiraide , P.Tschöpel and G.Tölg : Anal. Chim. Acta, 186 (1986) , 261.
- 16) M.Hiraide, A.Morishima and H.Kawaguchi : Anal. Sci., 13 (1997) , 295.
- 17) 稲垣育亮, 松宮弘明, 平出正孝 : 材料とプロセス, (2010) , 85.

(2011年4月25日受付)



入門講座

鋼を接合するー2

溶 接

Welding Technology

中西保正

(株) IHI フェロー
技術開発本部 技監

Yasumasa Nakanishi

1 はじめに

「溶接・接合」技術は現在多くの構造物の製作に使用されている。溶接・接合の主な目的には、①素材・鋼材の大面积化・長大化、②立体化・密閉構造化、③強度の確保（引張強度、圧縮強度、座屈強度、曲げ剛性など）、④高機能化（性能・目的に応じた材料の組み合わせ）、⑤補修・補強などがある。

現在各種構造物の製作・建造において溶接は当たり前の技術であるが、溶接は古くて新しい技術である。溶接なしでは製作できない構造物が多々ある。また、溶接に必要とされる技術は材料、設計、力学、溶接プロセス、電気、機械、制御、非破壊評価など非常に多岐にわたり、専門技術者以外にはブラックボックスに見えるようである。本稿では、溶接の全体観、すなわち溶接の歴史、各種接合法との相違、溶接法の種類と適用対象などについて紹介する。

2 日本における溶接の歴史

日本で最初に大形構造物に溶接が適用されたのは大正後期であり¹⁾、図1に示すように同時期に海軍佐世保工廠と三菱重工で船舶に適用された²⁾。船体の強度部材への本格的な溶接の適用は昭和初期であり¹⁾、その様相を図2に示す^{3,4)}。溶接変形、溶接割れなど到大変苦労したほか、疲労き裂の問題

も生じた。これらは現在も主要な研究テーマである。なお、現在世界的に有名な造船のブロック建造は、昭和初期に考案された日本独自の工法である。鉄道への溶接適用も昭和初期であり¹⁾、図3に例を示す蒸気機関車は压力容器であるボイラ周りおよび車体が全溶接構造である¹⁾。橋梁、建築への適用も昭和初期である。その後、戦艦「大和」をはじめとした大型艦船、電気機関車車体・台枠、電車、潜水艦、クレーンなどに適用され、さらに、第二次世界大戦後には鋼材の高性能化・高品質化と併せて溶接技術は大きく発展し、貯槽（タンク）、ボイラ、ペンストック（水圧鉄管）、海洋構造物、原子力压力容器など溶接技術がないと製作できない各種構造物が製作されたことはいうまでもない⁵⁾。また、航空宇宙の主要部材にも溶接が適用されている。

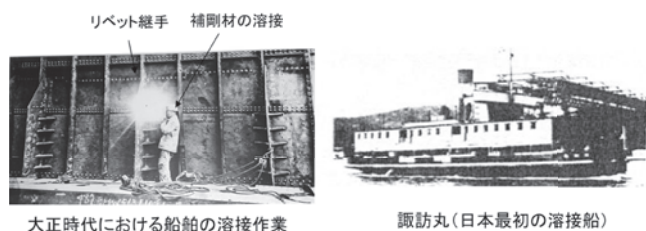


図1 大正時代の船舶の溶接（1920年代）

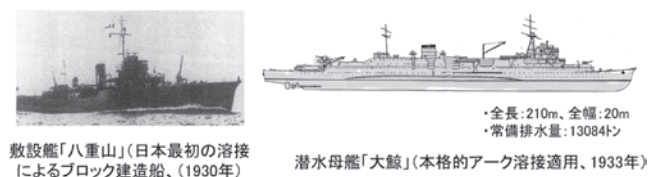


図2 船体構造への本格的アーク溶接適用（1930年～）

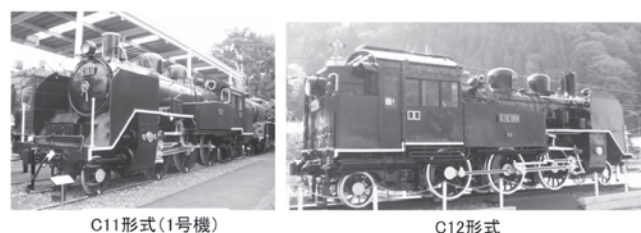


図3 蒸気機関車への最初の溶接適用(缶胴継手および車体、1930年～)

3 溶接と各種接合法との相違および特性

図4に溶接を含む各種接合法（リベット、ボルト、接着剤、ろう付）の断面の様相を示す。溶接とは、材料（金属）同士を溶かす（溶融させる）ことによりつなぐ（接合する）技術であるが、大形構造物では溶接技術が実用化されるまではリベット接合が主流であり、現在も一部で使われている。

図5に各種接合法の強度特性を⁶⁾、図6にろう付と接着剤の破断特性を示す。リベット継手は支圧接合であり、リベットの軸と母材に開けた孔の間の支圧によりせん断モードで荷重を伝達する。リベット継手はリベットの冷却・収縮による引張軸力が入るため摩擦力が生じるが、一般に高力ボルト継手や母材降伏点より低い荷重ですべりが生じる。最終強度はリベット材のせん断強度（リベット軸に対して直角方向の荷重モード）に依存するが、リベット継手は母材にリベット孔を開けるため、継手効率（継手強度／母材強度）は図中に示すようにリベット径とピッチとのかねあいでもまり、たかだか80%程度である。

高力ボルト接合は一見リベット接合と似ており支圧接合継手もあるが、一般にはボルトの軸力により生じた母材と添接板との間の摩擦力による摩擦接合継手であり、摩擦が切れて

滑り始めるすべり荷重が存在する。十分な締付力を与えた高力ボルト継手のすべり荷重は母材の降伏荷重と同程度かそれ以上であるが、最終継手効率はボルトが支圧により破断するか母材・添接板の有効断面で決まる。支圧ボルト接合の最終強度も同様である。

プラスチックの接着に使用するスチロール樹脂系接着剤は有機溶媒により接合面が融けて凝固するので、ある意味で溶接と同じである。金属にはエポキシ樹脂系接着剤などが使用されているが、有機溶媒で母材は融けず、接着剤は隙間に入り込んで固まるだけである。そのため、せん断には耐えられるが、直断面強度は劣る。

溶接とよく混同される接合法に「ろう付（はんだ付を含む）」がある。ろう材に「はんだ」（半田、Zn-Pb合金）を使用する場合には、とくに「はんだ（半田）付」と称される。ろう付は広義の溶接であるが、接着に分類されることもある。ろう付は接合面にろう材をはさみ、加熱してろう材を溶融させて接合を行う。被接合部材間にはろう材が溶融・凝固しただけであり、接着剤同様にせん断には耐えられるが直断面強度は劣る。

一方、「材料同士を溶融させて接合する」溶接は接合界面の

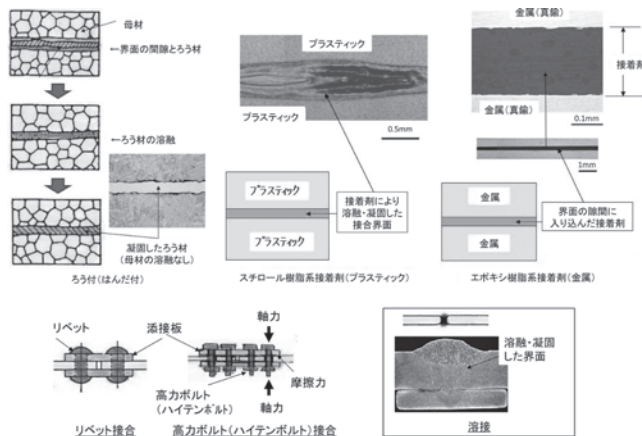


図4 溶接を含む各種接合法（リベット、ボルト、接着剤、ろう付）の断面の様相

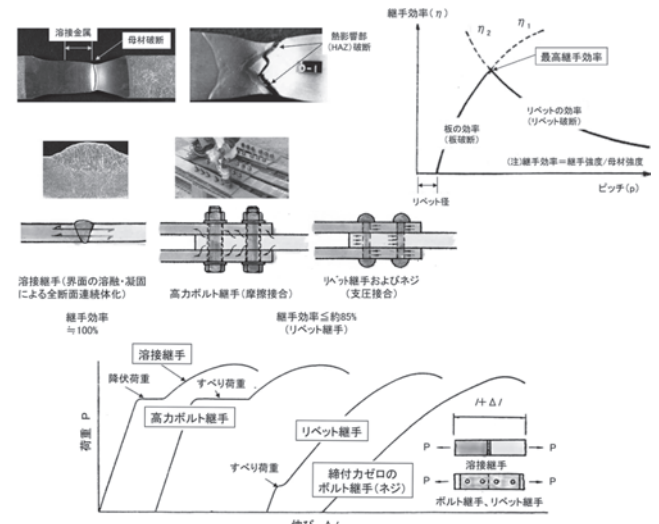


図5 各種接合法の強度特性

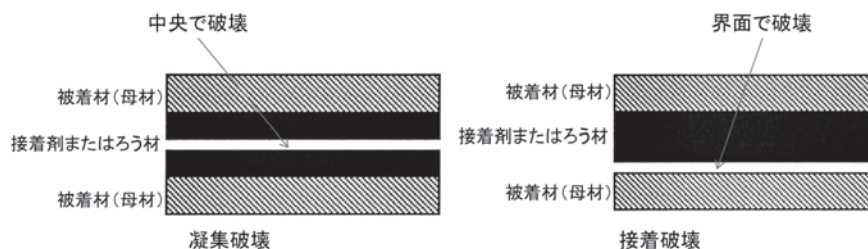


図6 ろう付と接着剤の破断特性

溶融・凝固による全断面連続体化であり、適正な条件で施工を行った溶接継手は板厚に関係なしに母材と同等の直断面強度（継手効率＝100%）が得られる。

しかし、適正条件で溶接施工を行わないと、図7に例示す溶接欠陥^{7,8)}が生じ、所定の継手強度が得られない。また、図8に例を示す溶接割れ^{7,8)}が生じることもあり、継手強度が低下する。

低温環境などで母材（鋼材）のじん性が低い場合や、溶接熱影響により溶接部のじん性が低下していると、降伏点以下の低応力で図9に例を示すぜい性破壊が生じることがあり⁹⁾、注意を要する。高温で長時間使用する場合には、図10に例を示すクリープ損傷¹⁰⁾を防止するため許容応力は常温強度に対して低く抑えられる。また、繰り返し応力を受ける溶接継手は、図11に例を示す疲労損傷⁷⁾を防止するため許容応力は降伏点より低い。さらに、使用環境によっては、図12に例

を示す応力腐食割れ⁷⁾ほかなどの損傷が生じることがある。使用中の損傷に対しても溶接施工条件の影響は大きい。これらの詳細については、溶接継手の強度に関しては他の文献・資料を参照されたい。

4 溶接方法の種類と適用事例

図13に、エネルギーにより分類した溶接法の種類を示す。溶接法には非常に多くの種類があり材質、品質、能率、コストなどから適した溶接法を選定する。今回のシリーズでは熔融溶接・アーク溶接、レーザ溶接、摩擦攪拌溶接、抵抗スポット溶接に関してメカニズムも含めた詳細な紹介があるため、ここでは適用状況を中心に概略を紹介する。略称はAWS（アメリカ溶接協会）に従った。

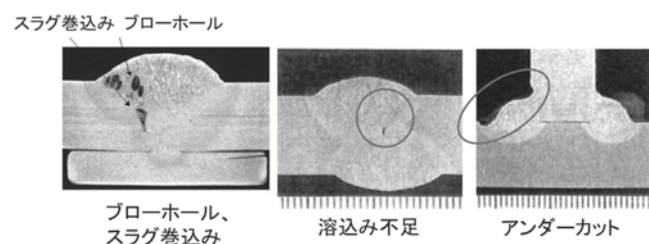


図7 継手強度に影響を及ぼす溶接欠陥の例

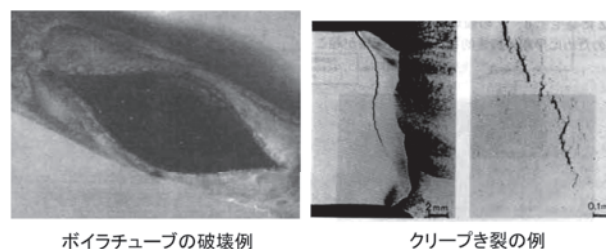


図10 クリープ損傷の例（ボイラ）

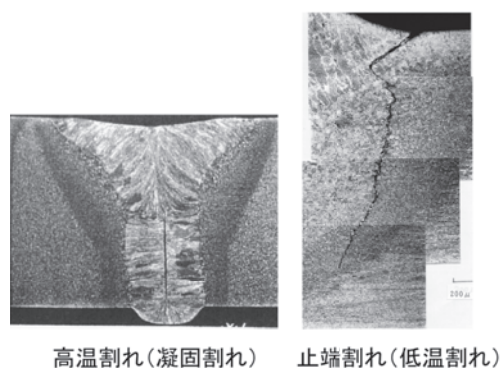


図8 継手強度に影響を及ぼす溶接割れの例

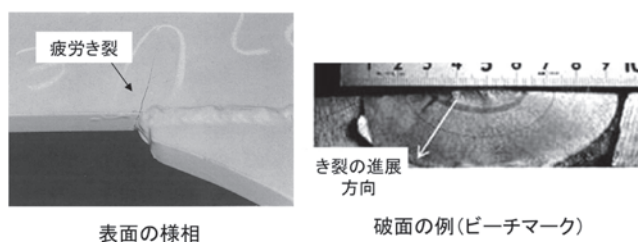


図11 疲労損傷の例

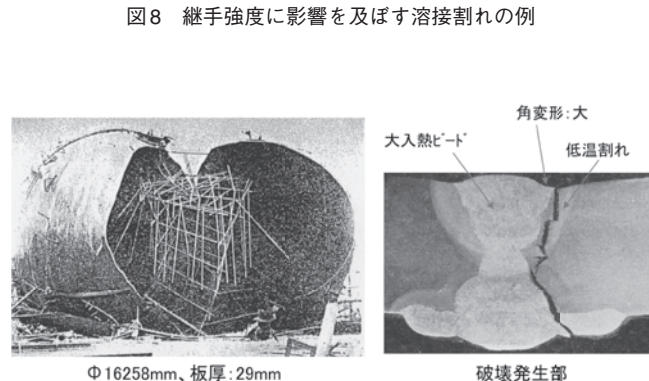


図9 ぜい性破壊の例（780MPa 級高張力鋼製球形タンク、1968年）

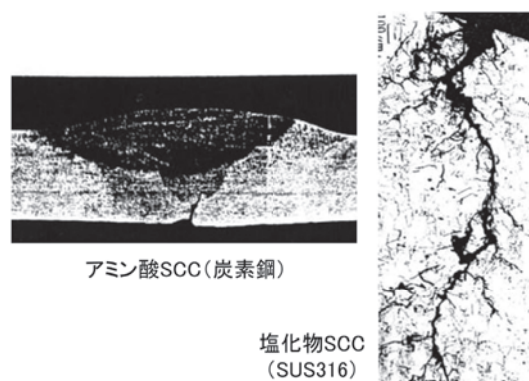


図12 応力腐食割れの例

4.1 被覆アーク溶接法 (SMAW)

SMAW (Shield Metal Arc Welding) では溶接棒に塗布した被覆剤の役割は重要であり、図14に示すように発生させたガスによるアークおよび溶融金属の大気からの保護、溶融金属の脱酸精錬、溶接金属への合金元素の添加、生成したスラグによる大気からの溶融金属の保護などが挙げられる。

図15にSMAWの適用例を示す。日本では時代遅れとされる溶接法であり、後述の半自動溶接（とくに、CO₂溶接）に置き換えられた。しかし、海外のパイプライン¹¹⁾やLNGタンク⁷⁾のような辺鄙な場所における現場溶接では、シールドガス（後述）が不要であるため、海外ではまだ多く使用されている。レールの現場溶接に使用させる「エンクローズド溶接」も一種であり^{12,13)}。溶接箇所の周囲を水冷銅当金で囲い、内部を溶接で盛り上げる。球形タンクも屋外で溶接作業を行うため、風に強い被覆アーク溶接が用いられてきた⁷⁾。

4.2 サブマージアーク溶接 (SAW)

SAW (Submerged Arc Welding) は図16に示すように母材上にあらかじめ散布した粉粒状フラックスのなかに電極ワイヤを送り込み、アークを発生させて溶接を行う。シールド効果はフラックスで得ており、アークがフラックス内で発生して見えないため潜弧溶接とも呼ばれる。ワイヤを自動送給すると同時に走行台車により自動走行するため、最初の本格的自動溶接として知られる。本溶接法は大電流が使用できるほか、多電極化により溶着量を増加させられるため、SMAWと比較して厚板を少ないパス数で片面自動溶接ができる高能率施工法となる。

図17にSAWの圧力容器と橋梁における適用例を示す⁷⁾ほか。
図に示した例のほかに、船舶、建築鉄骨（ボックス柱）、タンク、ペンストックなど多くの構造物に適用されている。

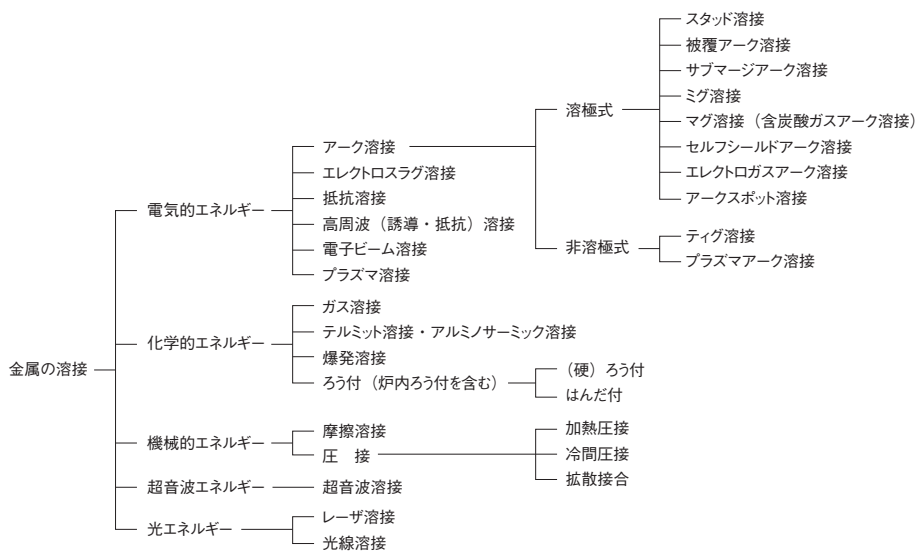


図13 エネルギーにより分類した溶接法

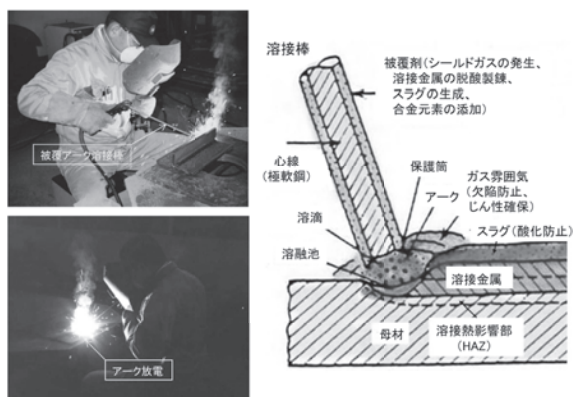


図14 被覆アーク溶接法 (SMAW)

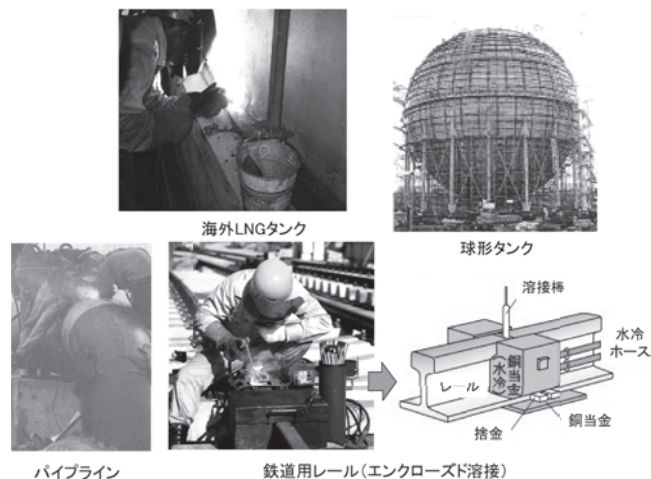


図15 被覆アーク溶接（SMAW）の適用例

4.3 ガスシールド消耗電極式アーク溶接法 (GMAW)

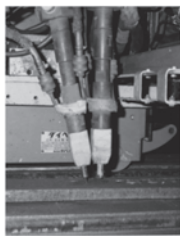
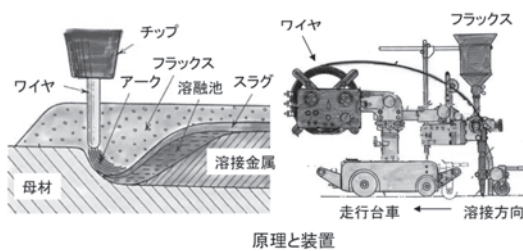
GMAW (Gas Metal Arc Welding) は図18に示すように、アルゴンや炭酸ガスなどのシールドガス中でワイヤと母材との間にアークを発生させて溶接するものである。アルゴンなどの不活性ガス (数%の酸化性ガスを混ぜたものも含む) を用いる場合はミグ (MIG: Metal Inert Gas Welding) 溶接、炭酸ガスを用いる場合は炭酸ガスアーク溶接 (CO₂溶接)、アルゴンと炭酸ガス (または酸素) の適当な割合の混合ガスを用いる場合はマグ (MAG: Metal Active Gas Welding) 溶接と呼び、GMAWは総称である。安価な炭酸ガスをシールドガスに使用するCO₂溶接の普及により、手溶接 (被覆アーク溶接: SMAW) から半自動を含む自動化が進んだ。

GMAWは多くの構造物に適用されているが、図19に造船におけるCO₂溶接の適用例を示す (エレクション溶接: ドック内の溶接)⁷⁾。鉄道車両やLNG船のタンクなどに使用され

ているアルミニウム合金はSMAWやSAWが困難であり、ミグ溶接が多用されている。

4.4 セルフシールドアーク溶接法 (FCAW-G)

GMAWに対して、ワイヤに内包したフラックスによるシールド効果を利用するセルフシールドアーク溶接 (FCAW-S: Self-Shielded Flux Cored Arc Welding、ノンガス溶接) があり、図20に原理と適用例を示す。シールドガスが不要のため、海外では屋外の現場溶接に多く用いられている。図には鋼管杭および建築現場における溶接の様相を示したが^{14,15)}、RC橋脚の鋼板巻立て補強にも適用されている。しかし、ヒュームが多く、溶接金属のじん性が必ずしも高くないことなどから、日本では海外と比べて使用されることは少ないようである。

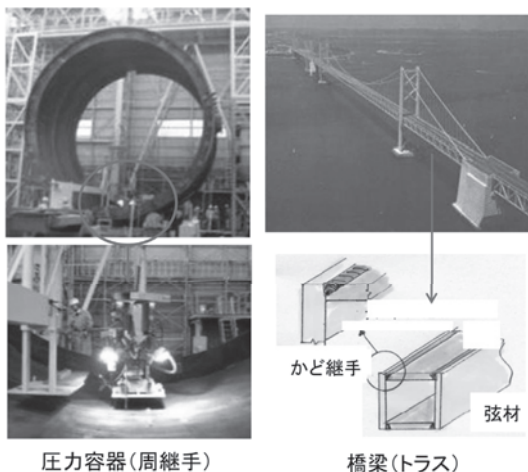


トーチとフラックス (2電極)



溶接状況 (工場板継溶接)

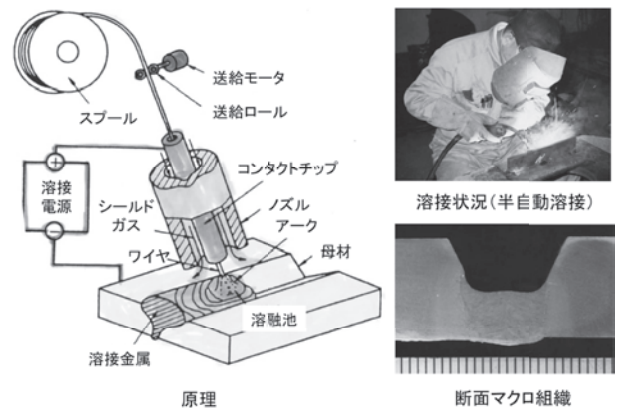
図16 サブマージアーク溶接 (SAW)



圧力容器 (周継手)

橋梁 (トラス)

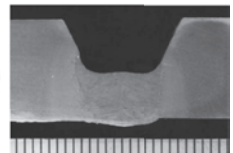
図17 サブマージアーク溶接 (SAW) の適用例



原理

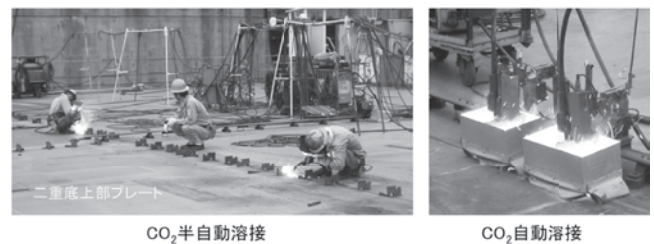
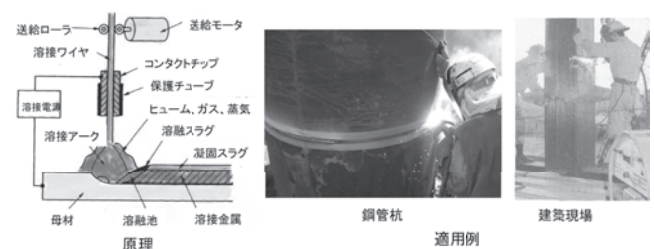


溶接状況 (半自動溶接)



断面マクロ組織

図18 ガスシールド消耗電極式アーク溶接法 (GMAW)

CO₂半自動溶接CO₂自動溶接図19 造船におけるCO₂溶接の適用例

原理

適用例

図20 セルフシールドアーク溶接 (FCAW-S) と適用例

4.5 ガスシールド非消耗電極式アーク溶接法 (GTAW)

GTAW (Gas Tungsten Arc Welding, 総称) は図21に示すように不活性ガス中でタングステン電極と母材との間にアークを発生させて溶接する方法であり、ティグ溶接 (TIG 溶接: Tungsten Inert Gas Arc Welding) 法はその一つである。GTAWは能率は劣るが高品質で各種材料の溶接が可能であり、全姿勢溶接にも適している。図21には配管全姿勢溶接装置の例も示した。図22にGTAWの適用事例として地下メンブレン式LNGタンクを示す¹⁶⁾。ほかにもジェットエンジンをはじめとして多くの構造物に使用されている。

4.6 プラズマアーク溶接法 (PAW)

プラズマアーク溶接法 (PAW: Plasma Arc Welding) の原理を図23に示す。動作ガス (アルゴン) と拘束ノズルでアークに熱的ピンチ効果 (Thermal pinch effect) と磁場ピンチ効果を与え、アークを絞ることにより得られた高エネルギー密度の高温プラズマ流を高効率溶接熱源とするものである。

図24にプラズマ溶接の適用例を示す¹⁷⁾。図に示した例のほか、化工機、自動車ボディの部品などにも使用されている。

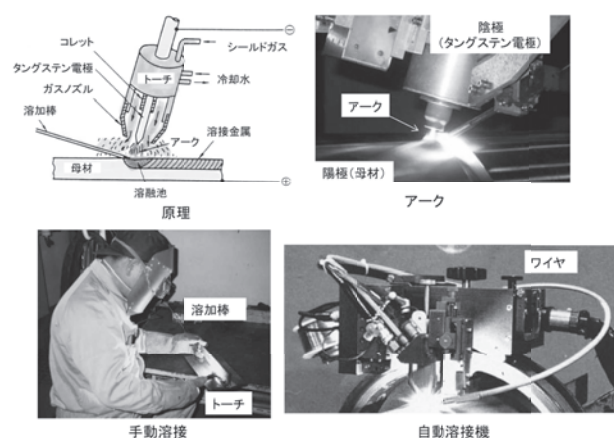


図21 ガスシールド非消耗電極式アーク溶接法 (GTAW)

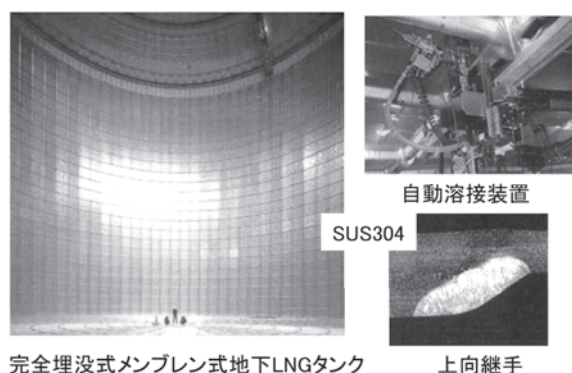


図22 タンクにおける自動TIG溶接の適用例

4.7 スタッド溶接 (SW)

スタッド溶接 (SW: Stud Welding) は、ボルトや丸棒などを母材に直接アーク溶接する方法であり、原理を図25に示す¹⁸⁾。最近ではコンタクト方式が使用される。シールドは行わないが、フェルールでアークシールドと余盛成形を行う。複合構造の鋼桁における鋼とコンクリート桁との連結部 (力の伝達: PC棒鋼とスタッドによる) などにも適用されている。

図26にスタッド溶接の適用例を示す⁷⁾。また、LNGタンクなどボルトの固定にも多く使用されている。

4.8 エレクトロガス溶接法 (EGW)

EGW (Electro-Gas Welding) は立向専用のCO₂溶接である。図27に示すように母材を適当な間隔をあけて垂直に設置し、溶接箇所母材両側面に摺動式の水冷銅当金を取りつけて炭酸ガスのシールドガス中でアークを発生させ、溶接を行う。1電極で厚板の1パス溶接が可能であり、電極を揺動させたり多電極とすることにより80mm程度の厚板にも適用可能である。しかし、大入熱のため溶接金属および熱影響部

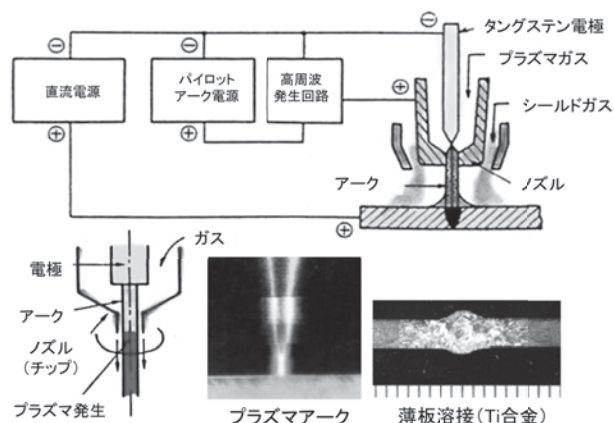


図23 プラズマ溶接 (PAW)

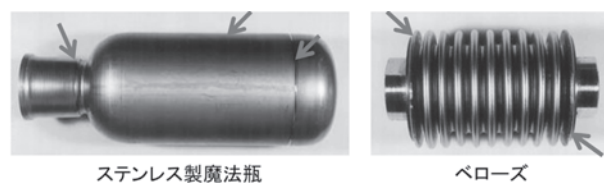


図24 プラズマ溶接 (PAW) の適用例

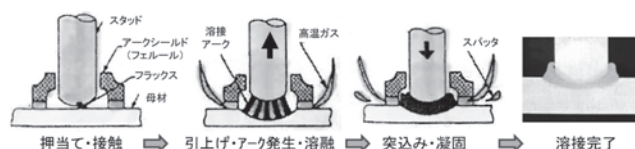


図25 スタッド溶接 (SW)

の材質劣化が生じ易く、注意を要する。

図28にEGWの適用例を示す^{7,19)}。これら以外に、船舶の船側外板エレクトロslag溶接や橋梁ウェブの現場溶接などへの適用例がある。

4.9 エレクトロslag溶接 (ESW)

図29にEGWに類似の立向専用溶接であるESW (Electro-

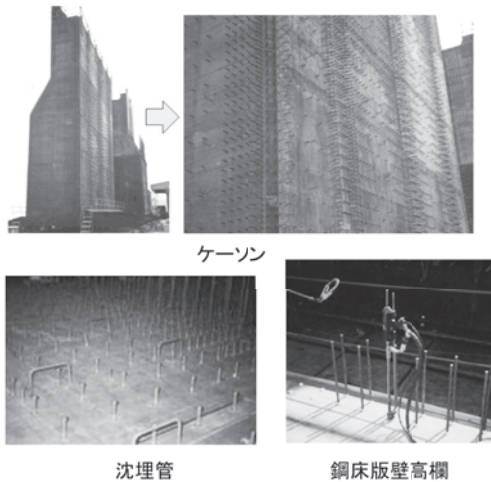


図26 スタッド溶接 (SW) の適用例

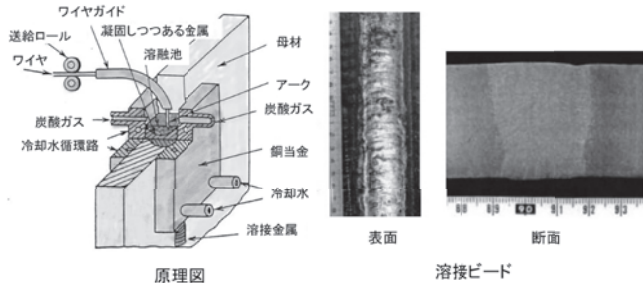


図27 エレクトロガス溶接 (EGW)



図28 エレクトロガス溶接 (EGW) の適用例

Slag Welding) 法を示す。ESWの熱源はEGWと異なりアークではなく、溶融slag浴中を流れる電流による抵抗発熱である。ワイヤ数を増やすことにより、数百mmの極厚板の溶接も可能である。摺動式水冷銅当て金に代り固定式的水冷銅当て金を用い、送給ワイヤに代り溶接長に相当する長さの鋼管の固定消耗ノズルを用いるのが消耗ノズル式エレクトロslag溶接法 (ESW-CG: Consumable Guide Electro-Slag Welding) である。ESWはEGWより相対的に入熱が大きく、鋼材および溶接金属のじん性確保が必要である。

図30にESWの適用例を示す⁷⁾。図に示したのは水冷式銅当て金の代りに永久裏当て金を用いる方法であり、予め溶接で組んだボックス柱ウェブに穴をあけ、エレクトロslag溶接によりダイアフラムを当て金ごと溶接・一体化する工法である (ビル鉄骨)。また、図中には圧力容器内部への带状電極によるエレクトロslag溶接による肉盛溶接法を示す⁷⁾。従来は带状電極によるサブマージアーク溶接が適用されていたが、エレクトロslag溶接は溶込深さを浅く均一にコントロールすることができ、希釈が小さいメリットがある。

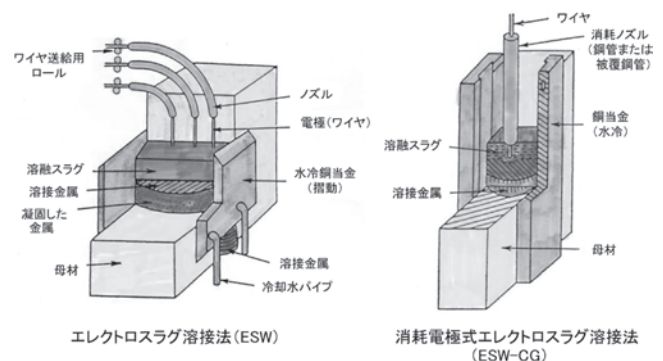


図29 エレクトロslag溶接 (ESW)

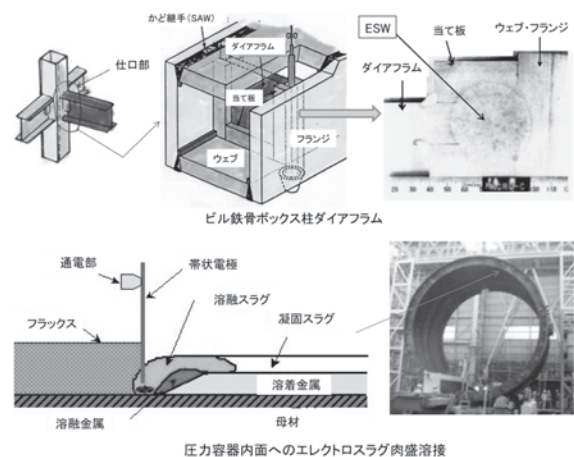


図30 エレクトロslag溶接 (ESW, ESW-CG) の適用事例

4.10 電子ビーム溶接 (EBW)

EBW (Electron Beam Welding) は図31に示すように真空中で発生させた高速の電子ビームを熱源とする溶接法である。陰極から放出させた電子を加速・収束させて溶接箇所へ衝突させると、電子の運動エネルギーは熱エネルギーに変換し、一瞬のうちに表面が加熱・溶融・蒸発する。ビームは次々と当たるので空孔があき(キーホール)、表面張力、重力などのバランスにより維持されているうちに周囲から凝固が始まり、溶接金属が形成される。EBWはエネルギー密度が高く、図に示すような幅の狭いきわめて深い溶込みが得られる。溶接変形が小さく抑えられて、精密溶接ができるのも特徴である。真空中で溶接するので、高純度の溶接が可能である。

図32にジェットエンジンにおけるEBWの適用例を示す^{7,20)}。Ti合金およびNi基合金である。その他の適用例としては、深海艇「しんかい6500」のTi合金耐圧殻にも適用された。電子ビームは非常に高効率・高精度・高純度の接合法であるが、真空を必要とすることがネックである。

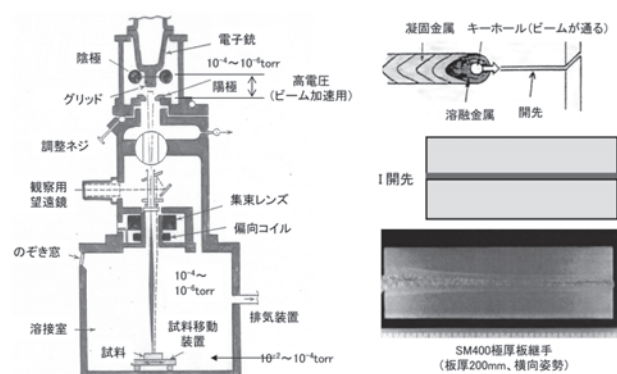


図31 電子ビーム溶接 (EBW)

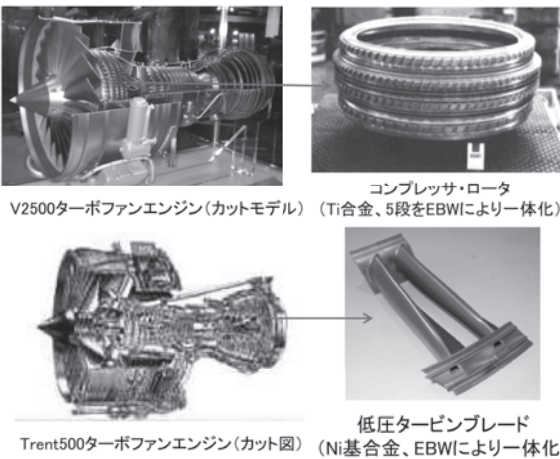


図32 電子ビーム溶接 (EBW) の適用例

4.11 レーザ溶接 (LBW)

LBW (Laser Beam Welding) は図33に示すように熱源に光(レーザー光: 増幅された波長の整ったビームエネルギー)を用いる深溶込み溶接法であり、近年普及が進んでいる。数mm以上の板厚に用いるレーザー溶接にはかつてはCO₂(ガスレーザー)が用いられていたが、現在はYAGレーザー(固体レーザー)を経てファイバーレーザーに移行しつつある。また、ディスクレーザーや半導体レーザーも適材適所に使用されている。さらに、近年はレーザーとアークを組み合わせたレーザー・アークハイブリッド溶接も開発され、適用が増えている。

図34にレーザー溶接の適用例を示す^{7,21)}。これ以外に、自動車、航空機、鉄道車両、船舶、原子力など多くの構造物に適用されている。

4.12 抵抗溶接

代表的抵抗溶接は抵抗スポット溶接(RSW: Resistance Spot Welding)であり、図35に示すように重ねた板の間の抵抗発熱で溶接を行う。図には鉄道車両への適用例²²⁾ほかにも示し

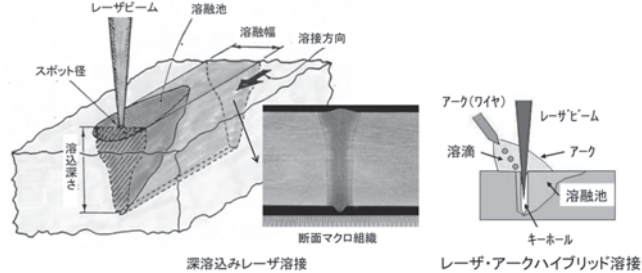


図33 レーザ溶接 (LBW)

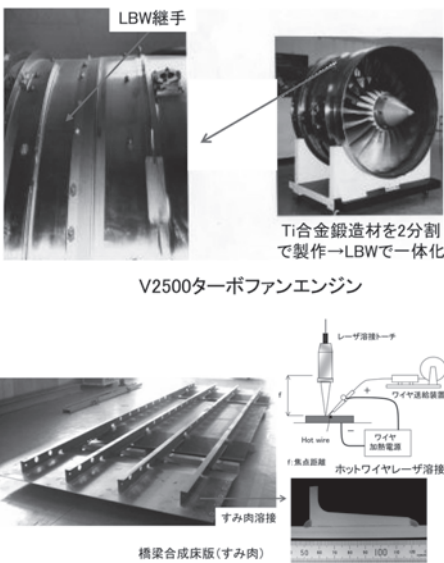


図34 レーザ溶接 (LBW) の適用例

たが、自動車の車体の組立てにも多く用いられている。また、航空機エンジンにも使用されている。

図36は抵抗スポット溶接の電極を円盤状にし、連続重ね溶接を行うシーム溶接 (RSEW : Resistance Seam Welding) の例²²⁾ ほかである。この他に、自動車の燃料タンク、メンブレンタイプLNG船、ビールタンク、ドラム缶など多くの構造物・製品に適用されている²³⁾。

4.13 フラッシュ溶接 (FW)

図37にフラッシュ溶接 (FW : Flush Welding) の原理と適用例²⁴⁻²⁶⁾ を示す。小刻みに前進・後進を繰り返して接合面にアークを発生させ、最後は加圧により接合が完了する。大断面の接合が可能である。図に示した鎖、レール、パイプラインのほか、自動車部品、飛行機の脚柱などに適用されている。フラッシュ溶接は入熱が大きく、溶接部のじん性に考慮する必要がある。

4.14 摩擦溶接法 (FRW)

図38に示す摩擦溶接法 (FRW : Friiction Welding) は、部材を突合せて相対的に回転運動をさせ、接触面で発生する摩擦熱を溶接熱源として利用するものであり、突合せ面近傍が適当な温度 (圧接温度) に達したとき、相対運動を停止させ

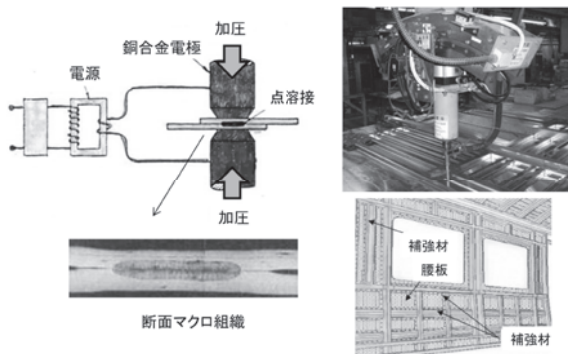


図35 抵抗スポット溶接 (RSW) と鉄道車両への適用例

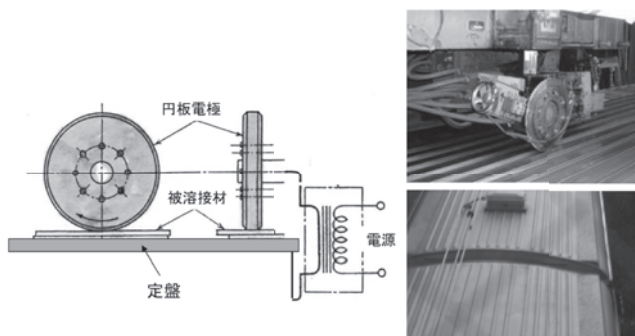


図36 シーム溶接 (RSEW) と鉄道車両への適用例

て圧接する。同様の接合法に、図38に示したイナーシャボンディングがある。フライホイールに被接合物を取り付けて回転させ、もう一方の非接合物を所定の圧力で押しつけて回転が停止すると接合が完了する。摩擦溶接部の様相とジェットエンジン部材へのイナーシャボンディングの適用例を図に示す⁷⁾。

4.15 ガス圧接法 (PGW)

図39に模式図を示すガス圧接 (PGW : Pressure Gas Welding) は、継手部を酸素アセチレン炎などのガス炎によって加熱し、加圧・接合させる方法である。図に示すように、鉄筋などの丸棒、角棒やレールなどの接合に使用される^{13,27,28)}。

4.16 拡散接合 (DFW)

図40に示す拡散接合 (DFW : Diffusion Welding) は母材

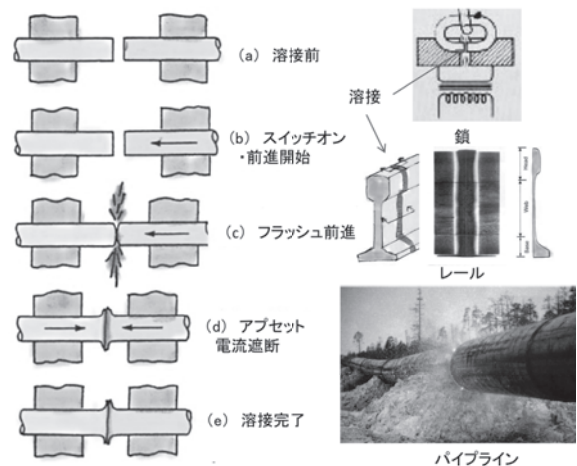


図37 フラッシュ溶接 (FW) と適用例

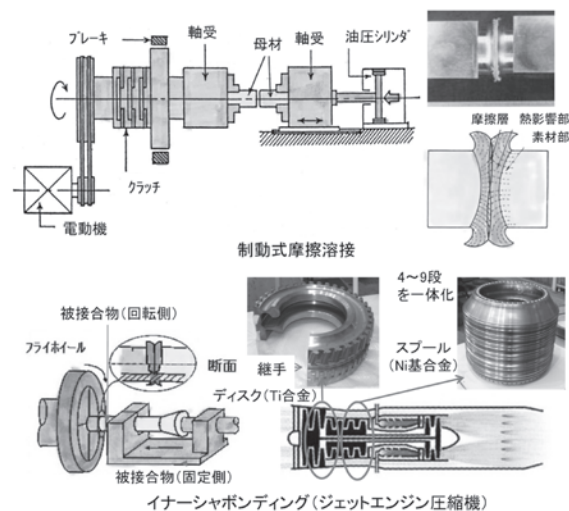
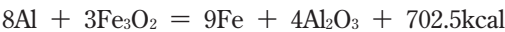


図38 摩擦溶接 (FRW) と適用例

を溶融させることなく固相状態で、しかも著しい変形を生じさせないで加熱・加圧して接合する精密溶接法である。界面は平坦かつ清浄にして、真空中で接合を行う。被接合部材の組み合わせによっては、接合界面にバフ材をはさんで接合することもあり、とくにバフ材層が溶融する場合には液相拡散接合という。用途の例を図41に示す^{7,29)}。

4.17 テルミット溶接 (TW)

微細なアルミニウム粉末と酸化鉄との混合物をるつぼに入れ、その上に酸化バリウム、マグネシウムなどの混合粉末を乗せて点火すると、次式に示す反応により約2800℃の純鉄の湯とアルミナになる。



このテルミット反応を利用して鉄鋼を溶接する方法をテ

ルミット溶接 (TW : Thermite Welding) という。図42に示すように溶接箇所の周囲に鑄型を作り、接合箇所は800～900℃に予熱しておいて溶融金属と母材との融合を促進する。図にはレールの溶接への適用例¹³⁾を示したが、車軸などへの適用例もある。

4.18 摩擦攪拌溶接 (FSW)

FSW (Friction Stir Welding) は接合部に機械的な回転力を与えて塑性流動を誘起し、材料同士を攪拌・接合する。図43にFSWの接合機構の概念図と接合部の様相を示す³⁰⁾。接合に際しては、先ず板厚とほぼ同じ長さのピンがついた接合ツールを用意し、高速で回転しながら挿入する。ピンおよび接合ツール下面と接する母材が摩擦熱により急速に温度上昇し、塑性変形に対する抵抗力が低下する。ピンの外面には溝状の凹凸が設けられており、変形抵抗の低下したピン周りの

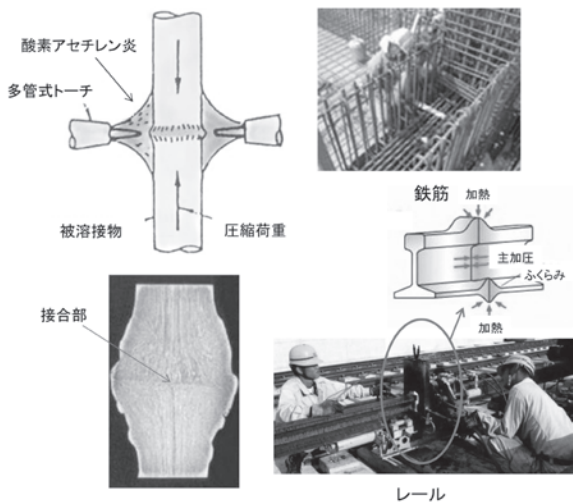


図39 ガス圧接 (PGW) と適用例

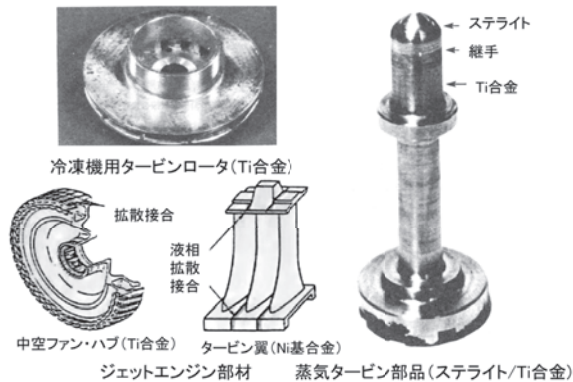


図41 拡散接合 (DFW) の適用例

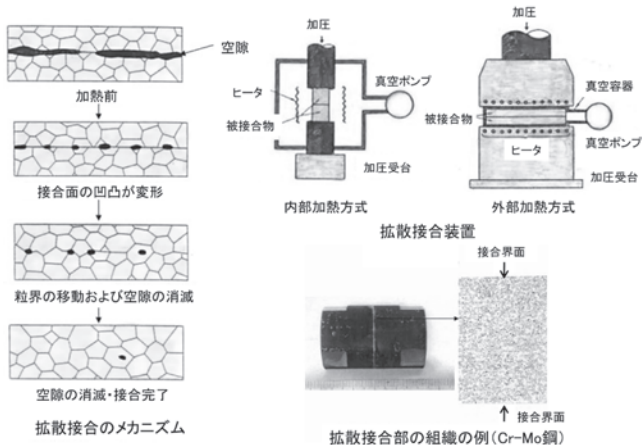


図40 拡散接合 (DFW)

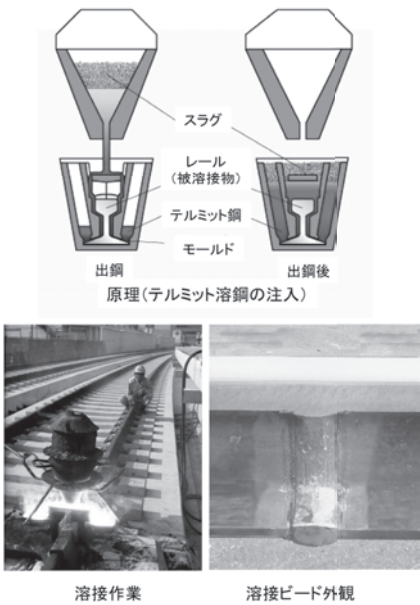


図42 テルミット溶接 (TW) とレールの接合への適用

母材はツールおよびピンの回転に引きずられる形で回転する。これにより、母材の一部が攪拌・一体化され、接合が行われる。

図44に適用事例を示す^{7,31-33})。アルミニウム合金を主体に各種構造物への適用が始まり、ヨーロッパでは客船や高速船の補剛材に多く使用されている。日本では鉄道車両への適用実績が多く、新幹線ではFSWにより組み立てたアルミニウム合金製ダブルスキン構体が主体となった。FSWは航空機機体、自動車部品、ロケット推進薬タンクなどにも適用されている。また、最近では鉄鋼材料に対するFSWの研究・開発も進んでいる。

4.19 その他の溶接法

前項までに紹介してきた溶接法以外にも各種溶接法があり、概略を述べる。

図45に相様を示すガス溶接 (OFW: Oxyfuel Gas Welding) は、アーク溶接が実用化される前から使用されていた溶接法である。燃料ガスと酸素の混合物の燃焼熱を利用して溶接す

る方法であり、薄板の溶接が可能である。溶接部の硬化も少ない。

高周波溶接法 (USW: Ultra Sonic Welding) には、接点により通電を行う高周波抵抗発熱とコイルに通電して高周波誘導加熱がある。ともに、パイプの製造などに用いられ、通電・加熱後に加圧ロールを通して溶接が完了する。

超音波溶接法は接合面に与える超音波振動を利用する。加圧下の振動により界面の酸化膜は破壊・除去されて清浄面の接触が生まれ、温度の上昇と併せて接合が完成する。金属箔、金属板、電気接点、用いられている。

表面機能材の一種であるクラッド鋼 (合せ材) の製造も溶接・接合プロセスにより、かつては図46に示すように爆発溶接法により製造されていた。爆発溶接法は火薬の爆発によって生じる瞬間的な高エネルギーを利用する溶接法である。近年は、図46に示すように鍛接法の一種であるロール圧接法 (ロール溶接、Roll welding) に移行した。また、鋼管杭ではシーム溶接 (RSW) によりクラッド材を表面に貼り付ける

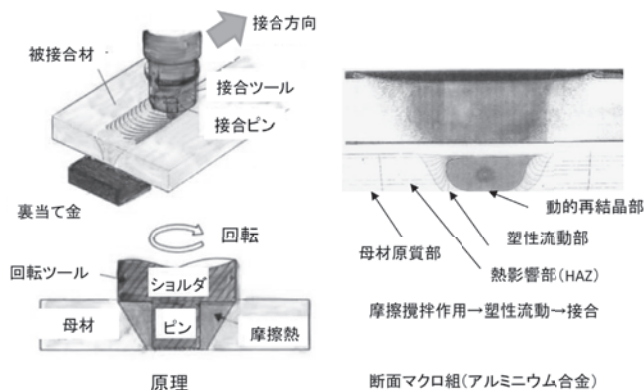


図43 摩擦攪拌溶接 (FSW)

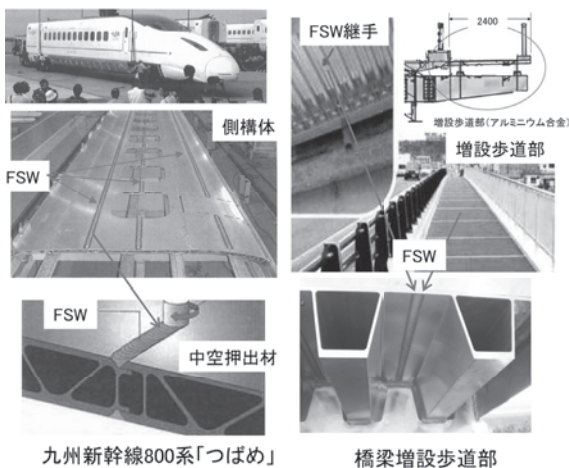


図44 摩擦攪拌溶接 (FSW) の適用例

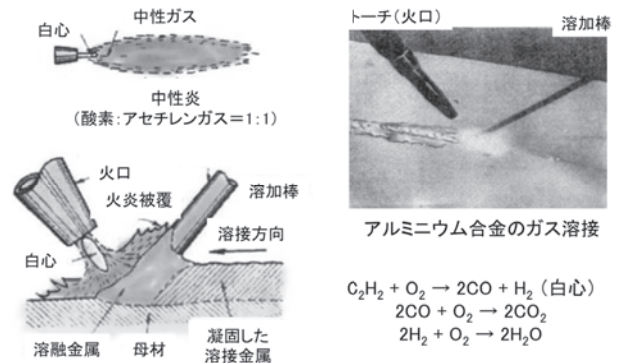


図45 ガス溶接 (OFG)

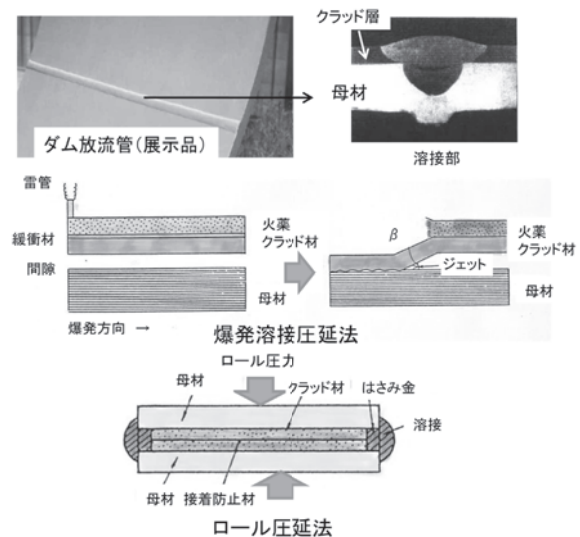


図46 クラッド鋼

例もある。鍛接法は接合すべき部分を加熱し、圧力または打撃を加えて接合する方法である。鍛接法には、日本刀の製造過程である槌打溶接法 (Hammer welding) もある。

5 おわりに

溶接の全体観、すなわち溶接の歴史、各種接合法との相違、溶接法の種類と適用対象などについて紹介してきた。溶接法には非常に多くの種類があり、適用対象も非常に多岐にわたる。紙面の関係でごく一部と概略しか紹介できなかったが、参考になれば幸いである。また、溶融溶接・アーク溶接、レーザ溶接、摩擦攪拌溶接、抵抗スポット溶接については、次回以降に継手の特性なども含めた詳細な紹介が行われる予定である。最後に貴重な資料を参考にさせていただいた諸氏および各社に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中村春雄：日本溶接協会，日本溶接技術史，溶接百年史 第一編総説，(1997)
- 2) 船の科学館展示品
- 3) 福田烈ほか：軍艦開発物語，光人社NF文庫，(2002)
- 4) 前間孝則：戦艦大和誕生 (上) (下)，講談社，(1999)
- 5) 中西保正：溶接技術者から見た日本の大型溶接構造物の歴史と変遷，溶接学会誌，74 (2005) 6.
- 6) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，技報堂，(1966)
- 7) IHI 私信
- 8) 神戸製鋼所私信
- 9) 高圧ガス保安協会：球形タンク破裂事故調査報告書 (概要)，(1969)
- 10) 左近淑郎：火力発電プラント溶接部のクリープ損傷事例と寿命管理，溶接学会誌，67 (1998) 4.
- 11) 川崎製鉄：20世紀・鉄の名作 I および II，(1999)
- 12) 日本エンジニア社私信
- 13) JFE 工建私信
- 14) 日鉄住金溶接工業私信
- 15) 大田孝二，深沢誠：橋と鋼，建設図書，(2000)
- 16) 井口雅之，飯島亨，牧田昌之，今村和久：メンブレン溶接への画像倣いシステムの適用，IHI 技報，39 (1999) 4.
- 17) 三田常夫氏私信
- 18) 西川和一：スタッド溶接の最新事情，ダイヘンスタッド社技術資料
- 19) 河野武亮，片山典彦：特集 日本の溶接技術の現状と展望－貯槽－，溶接技術，34 (1986) 5.
- 20) 海外軽金属溶接の展望－2002年－，軽金属溶接，軽金属溶接協会編，41 (2003) 11.
- 21) 大脇桂，猪瀬幸太郎，杉野友洋，松本直幸，山本元道，篠崎賢二：半導体レーザを用いたホットワイヤ隅肉溶接プロセスの開発，溶接学会全国大会講演概要，第86集，(2010)
- 22) 東急車両私信
- 23) 古川一敏：片面溶接施工等新しい重ね抵抗溶接法，溶接学会誌，78 (2009) 4.
- 24) 新日本機械製鎖私信
- 25) 上田正治，岩野克也：貨物鉄道用レールの最近の進歩，溶接学会誌，76 (2007) 7.
- 26) 小溝祐一：特集「超高強度鋼とその溶接技術」NEDOプロジェクト「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」の概要と枠組みについて－主として高強度溶接金属について－，溶接学会誌，78 (2009) 6.
- 27) 松栄工業私信
- 28) 東洋ガス圧接私信
- 29) 鈴木春義：溶接ハンドブック，山海堂，(1962)
- 30) 古賀信次：特集 21世紀の溶接施工技術の展開 3 新接合技術への期待，溶接学会誌，69 (2000) 3.
- 31) フォトレポート，溶接技術，51 (2003) 11.
- 32) クラビア：軽金属溶接，43 (2006) 1.
- 33) 日立製作所私信

(2011年5月16日受付)



解説

受賞技術-9

超高層ビルの安心・安全に対応した 550N/mm²級高耐震性高強度鋼の開発

Development of 550N/mm² Class High Strength Steel for Seismic Design of High-rise Buildings

JFE スチール (株) スチール研究所
土木・建築研究部 部長

加村久哉

Hisaya Kamura

JFE スチール (株) 東日本製鉄所
商品技術部厚板室 室長

石川 操

Misao Ishikawa

JFE スチール (株) 厚板セクター部
主任部員

鈴木伸一

Shinichi Suzuki

1 緒言

最近の超高層建築では、耐震安全性などの安心・安全と建設費低減の両立を図るため、柱・梁などには変形性能の大きな低降伏比 (降伏強さと引張強さの比=YR) 型の高張力鋼を使用 (図1参照) することが多くなっている。

建築物に使用される鋼材は、引張強さ490N/mm²級が一般的である。しかし超高層建築では、板厚が厚くなるため鋼材重量の増加や溶接施工時における負荷、管理コストの増加の問題がある。このため、超高層建築では、耐震性 (低降伏比、高溶接性) を有する高張力鋼の使用により、耐震安全性とコストダウンの両立が望まれている。しかし、従来の耐震性を有する高張力鋼材は、鉄骨コストの上昇や溶接施工者の制限などからその使用は限定的であった。

この安心・安全と建設費低減の両立の要求に答えるため、JFE スチールでは業界に先駆けて、高張力鋼でありながら良好な耐震性を有しかつ鉄骨コストを低減できる、引張強さ550N/mm²級の建築構造用鋼材HBL[®]385を開発した¹⁾。

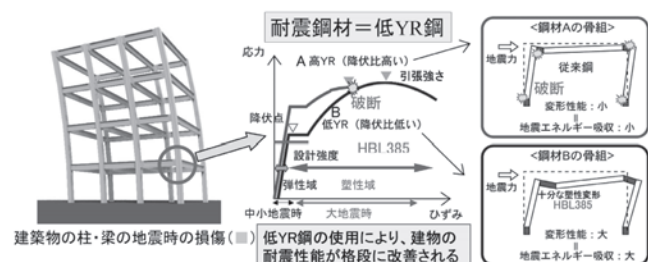


図1 建物の耐震性能と鋼材の低降伏比特性

この鋼材は『限界冷却速度によるオンライン加速冷却技術 Super-OLAC[®] (On-Line Accelerated Cooling)^{2,3)}』を用いて実現した従来にはなかった鋼材で、2010年第42回市村産業賞貢献賞を受賞している。本稿では、開発技術の内容とこの鋼材のメリットについて紹介する。

2 開発技術の内容

2.1 従来の建築構造用高張力鋼材の課題

最近の超高層建築の耐震設計では、図2のように、地震エネルギーを吸収するダンパーなどの制震デバイスを設置し、柱・梁などには弾性範囲の大きな高張力鋼を使用することにより耐震安全性とコストダウンの両立を目指す傾向にある。

代表的な低降伏比の高張力鋼材としては引張強さ590N/mm²級の鋼材があるが、製造工程において合金元素の添加や複雑な熱処理が必要なほか、溶接施工においても予熱、入熱制限など特別な管理が求められており、限定的な使用に留まっていた。

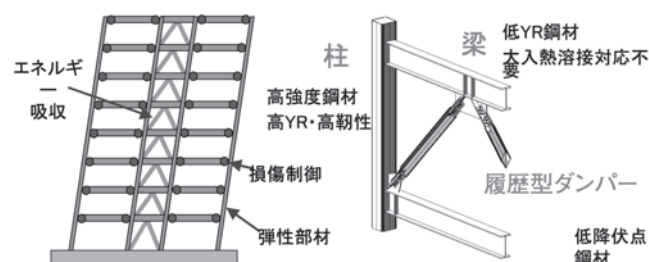


図2 最近の高層建築の構造的特徴 (高張力鋼と制振ダンパーの使用)

* 2010年第42回市村産業賞貢献賞受賞技術

こうした背景のもと、JFE スチールでは高張力鋼でありながら良好な溶接性と耐震性を併せ持つ引張強さ 550N/mm²級の建築構造用低降伏比鋼の新たなコンセプトを提案し、TMCP型の新規鋼材を開発した。

2.2 本開発鋼の特徴

本開発鋼の特長を以下に記す。

(1) 高強度、高耐震性、高溶接性の実現

製造過程において高い冷却速度と均一な冷却が可能な加速冷却装置 Super-OLAC[®] を活用することにより、降伏強度 385N/mm²、引張強さ 550N/mm²でありながら低降伏比 (YR ≤ 80%)、高靱性 (0℃のシャルピー吸収エネルギー 70J 以上) を実現しており、耐震性に優れた鋼材となっている (図3、表 1)。また、溶接性も良好であり、従来鋼 (SN490 など) と同等

の溶接施工、溶接管理が可能である (図4)。その結果、従来の低降伏比の高張力鋼材が技量の特に優秀な限定されたファブリケーター (鉄骨加工業者) のみに許されていた建築鉄骨の加工が、より幅広いファブリケーターにおいて鉄骨加工が可能である。さらに、SAW などの大入熱溶接が適用される溶接組立箱型断面柱の角部でも高い靱性の確保が可能となっている。これは、ミクロ組織の制御と、溶接部の性能を考慮した高度な成分設計の組合せで初めて達成された技術⁴⁾ である。開発鋼板の設計基準強度は 385N/mm² と TMCP 型の耐震性高強度鋼材としては最高強度を達成している。

(2) コストダウンの実現

建設基礎資材として多量に使用される鉄鋼製品は、そのコストパフォーマンスおよび流通性の両立が望まれる。本開発鋼は、図5のように、オンラインで TMCP 製造が可能なたため、製造工期の短縮が可能である。また、高張力鋼が本来持っている性能、すなわち高強度化による使用鋼材量の低減を享受することができる。引張強さ 550N/mm²級の鋼材は、490N/mm²級鋼に比べ設計強度が 18% アップしているの、鋼材重量を 12 ~ 20% 程度低減可能である。さらに、溶接工数の低減等の効果もあわせ、鉄骨コストを約 20% 低減することができる (図6)。その他に、輸送コストや建設時のクレーン揚重量の低減にもつながる。

(3) 高い耐震性能

JIS規格材以外の特別な鋼材は、その使用にあたり国土交

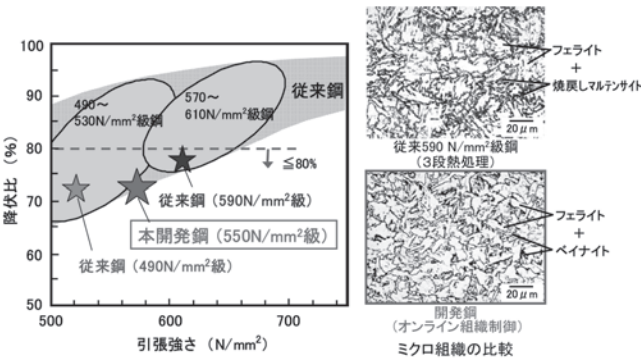


図3 鋼材の強度と降伏比の関係およびミクロ組織

表1 母材の化学成分および機械的性質の例

種類の記号	厚さ mm	化学成分 (wt%)					C _{eq} %	P _{CM} %
		C	Si	Mn	P	S		
HBL385C	35	0.14	0.21	1.26	0.013	0.002	0.37	0.21
	70	0.14	0.34	1.37	0.014	0.002	0.39	0.22
	100	0.14	0.34	1.37	0.014	0.002	0.39	0.22

種類の記号	厚さ mm	引張試験						シャルピー衝撃試験		厚さ方向特性	
		方向	試験片	降伏点 または耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	降伏比 %	方向	吸収エネルギー (vEo) J	試験片	絞り %
HBL385C	35	C	JIS 5 号	465	600	45	78	L	318	1)	73
								C	269		
	70	L	JIS 4 号	442	589	32	75	L	290	1)	75
		C	JIS 4 号	443	595	31	74	C	242		
	100	L	JIS 4 号	425	574	31	74	L	247	1)	71
		C	JIS 4 号	435	580	31	75	C	205		

1) JIS G 3199 タイプC 10mmφ

通大臣の認定を取得することが義務付けられており、そのためには図7に示す実験・解析などを通じて本鋼材の耐震性能を実証⁵⁾ する必要がある。図8は柱－梁接合部実験により、本開発鋼と従来鋼（低降伏比490N/mm²級鋼および高降伏比の590N/mm²級高張力鋼）の耐震性を比較した例⁶⁾ を示している。本開発鋼は、高降伏比の高張力鋼に比較して耐震性に優れ、強度の低い490N/mm²級の従来鋼と遜色ない性能を有していることがわかる。

(4) 幅広い用途展開

本開発鋼は、図9のように、厚板のみならず柱部材として使用する円形鋼管「P-385」や角形鋼管（コラム）「PコラムG385」（（株）セイケイ殿との共同開発）などの加工建材や建築基準法に対応した設計法の国土交通大臣の認定・評価機関

の一般評定を取得⁷⁾ しており、幅広いユーザーのニーズに対応することが可能となっている。

3 HBL[®] 385の適用状況

本鋼材は優れた経済性、耐震性、溶接性を兼ね備えているため、建築構造物の設計自由度が拡大するとともに、安心安全や環境対応など多様化する社会的ニーズへの対応が可能である。平成22年度末で、その適用物件は累計受注件数約90件、累計受注量約7万トンを達成している。

4 おわりに

このような、技術開発が認められた結果、第42回市村産業

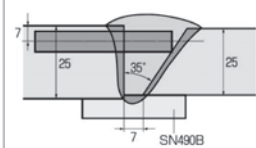
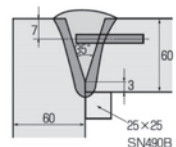
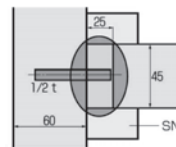
溶接方法	開先、継手形状及び シャルピー衝撃試験片採取位置	種類の記号と厚さ	継手引張試験		シャルピー衝撃試験	
			引張強さ N/mm ²	破断位置	切欠位置 (ノッチ方向)	vEo J
炭酸ガスアーク溶接 溶接材料： JIS Z 3312 YGW18 1.2mmφ 入熱：30.2kJ/cm バス間温度：250℃以下 予熱：なし		HBL385C 25mm	580 584	母材 母材	溶接金属 ボンド部 HAZ1mm HAZ3mm (断面ノッチ)	156 208 278 280
サブマージアーク溶接 溶接材料： JIS Z 3183 S502H 5.1mmφ 6.4mmφ (KB-55I×KW-55) 入熱：550kJ/cm		HBL385C 60mm	溶接金属引張試験 降伏点 または耐力 N/mm ² 428		引張強さ N/mm ² 610	溶接金属 ボンド部 HAZ1mm HAZ3mm (断面ノッチ) 92 55 40 71
エレクトロスラグ溶接 溶接材料： JIS Z 3353 YES62/FS-FG3 1.6mmφ (KF-100×KW-101B) 入熱：660kJ/cm		●柱 HBL385C 60mm ●ダイアフラム HBL325C 45mm	溶接金属引張試験 降伏点 または耐力 N/mm ² 438 428		引張強さ N/mm ² 606 600	溶接金属 ボンド部 HAZ1mm HAZ3mm (断面ノッチ) 33 78 80 163

図4 継手性能試験結果

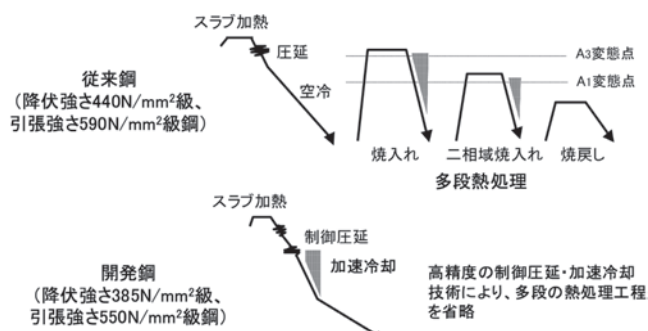


図5 従来鋼と本開発鋼の代表的な製造方法の比較

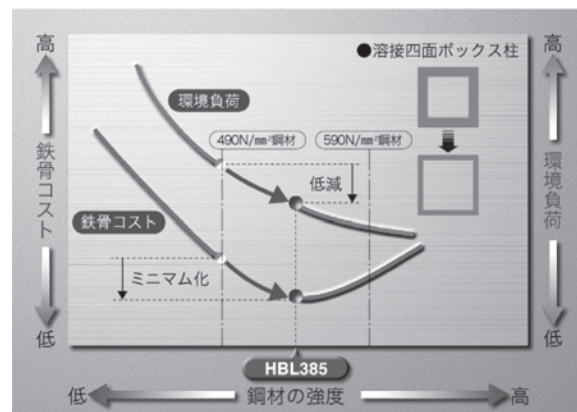


図6 鉄骨製作コスト、環境負荷の低減効果

賞貢献賞を受賞させて頂くことができた。我国の耐震技術の向上にいささかなりとも貢献することができた喜びを感じている。益々研究を進め、都市の安心安全に寄与し、社会に貢献し得る新しい技術の開発に全力を傾けたいと考えている。

参考文献

1) 林謙次, 藤沢清二, 中川一郎: JFE技報, 5 (2004), 45.
2) 小俣一夫: ふえらむ, 16 (2011), 239.
3) 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘: NKK技報, 179 (2002), 57.

4) 角博幸, 林謙次, 加村久哉, 猪砂利次, 塚本裕昭: 日本鉄鋼協会 第145回春季講演大会概要集 (CAMP-ISIJ), 16 (2003) 2, 344.
5) 中川圭, 加村久哉, 藤澤一善, 村上行夫, 平野攻: 日本建築学会 大会学術講演会梗概集, (2008) C-1, 549.
6) 村上行夫, 藤沢清二, 藤澤一善: JFE技報, 10 (2005), 35.
7) 石井匠, 藤沢清二, 大森章夫: JFE技報, 21 (2008), 1.

(2011年5月16日受付)

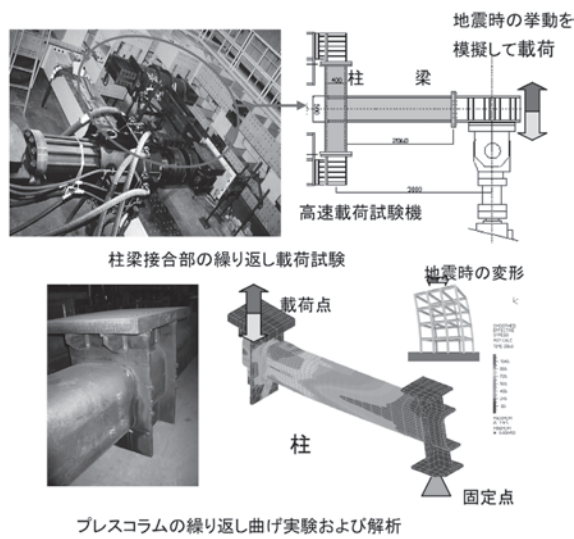


図7 HBL® 385の耐震性の実証のための実験・解析

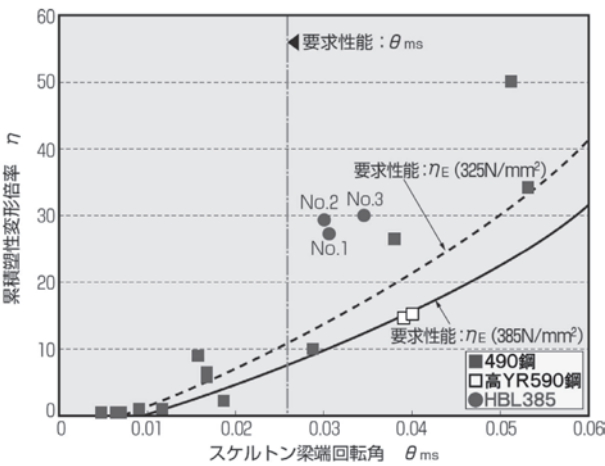


図8 HBL® 385の耐震性の実証 (柱梁接合部の繰り返し載荷試験)

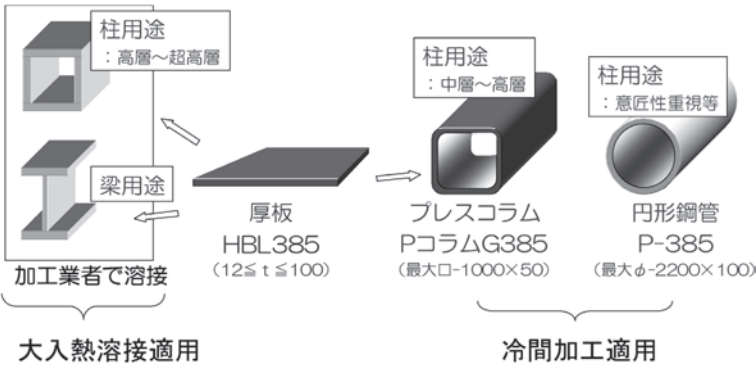


図9 本開発鋼の用途展開



アラカルト

日本におけるスラグカット技術の進歩

Development of Slag Cut Technologies in Japan

沖森麻佑巳

(株) 日鉄テクノリサーチ 顧問

Mayumi Okimori

1 緒言

転炉精錬ではCaO、SiO₂、MnO、FeOなどを含む高塩基性(C/S=4程度)のスラグが生成する。スラグはFeOを含むため酸化能力を有し、転炉や取鍋の耐火物と反応してその溶損を速めるばかりか、AlやMn、Si合金鉄と反応して、合金鉄の添加歩留を下げ、スラグとの反応で生成したAl₂O₃を主体とする介在物は、圧延後の製品において表面や内部の欠陥疵を誘起する。以上のようなスラグに起因する諸課題を克服するために、転炉～取鍋、取鍋～タンディッシュ、タンディッシュ～鑄型の各プロセス間でスラグ流出を防止する技術(スラグカット技術)の開発が進められてきた。本記事では、日本におけるスラグカット技術の変遷をトレースし、より一層強力なスラグカット技術について展望する。

2 渦の発生によるスラグ巻き込み

2.1 転炉の出鋼孔と渦の発生

1856年にヘンリー・ベッセマーが発明した底吹きベッセマー転炉は梨型炉で、出鋼時に炉が回転してスラグと溶鋼は混合し、懸濁した状態で取鍋の中に流出せざるを得なかった。その後、1957年に日本に導入された純酸素上吹きLD転炉法は当初ベッセマー型であったが、1960年に転炉の肩部に出鋼孔を取り付けるアイデア¹⁾が採用されて以降、溶鋼とスラグが混合して取鍋に大量に流出することはなくなった。新たな課題は図1のモデル図に示すように出鋼孔周辺で発生する出鋼流による渦(Vortex)が溶鋼上に浮いているスラグを巻き込み、さらに末期に取鍋にスラグが流出する現象²⁾であった。

2.2 取鍋のスライディングノズルと渦の発生

取鍋では、従来はストッパーを設置して取鍋ノズルから溶

鋼を鑄型に注湯する方式が採用されていた。しかし、注湯中にストッパーと取鍋ノズルとの間で芯がずれると溶鋼流出トラブルが発生した。対応策として2枚の耐火物を摺り合わせるスライディングノズル(以降SNと記述)が1969年に導入された³⁾。ところが後述のようにストッパーではスラグの流出が防止されていたが、逆にSNでは図1のように渦が発生し、溶鋼面に浮いているスラグが渦に巻き込まれて流出することが新たな問題になった。

2.3 渦発生の機構

現場操業の経験から、転炉や取鍋の内部で溶鋼メニスカス位置が高い時点でも図1のように流出する溶鋼が渦を発生させることが明らかになった。この現象は容器の径の大きさ、ノズルの径の大きさと位置によって渦の発生が異なることに起因することが、図2に示す水モデル試験で明らかになった。特にノズルの位置が容器の中央で、かつノズル径が大きい場合に溶鋼のヘッドが高い段階でも渦が発生することが実証された⁴⁾。この課題を解決するためには溶鋼に混合するスラグを分離するスラグカット技術の開発が必要であり、現場で様々な視点で新しい方法が試行されることになった。

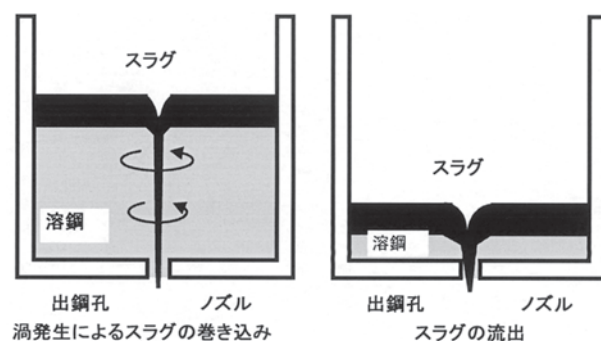


図1 渦発生によるスラグの巻き込みと流出の模式図

3 スラグカット技術の構成と変遷

3.1 技術の構成

日本ではLD転炉の導入後、溶鋼成分の的中、合金歩留まりの安定化、介在物の減少等を目的とした、下記 (1)～(4) のスラグカット技術の開発が進められた⁵⁾。

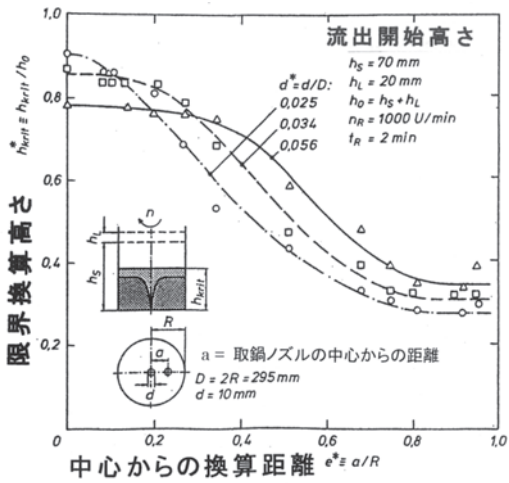
- (1) 分離：LD転炉への出鋼孔設置によって溶鋼とスラグを分離して出鋼する技術。
- (2) 栓止と固化：出鋼孔の出口側（転炉外部）と入口側（転炉内部）において、孔内に栓を入れて栓止してスラグの流出を防止する技術や転炉内でスラグを固化して渦による巻き込みが起きないようにする技術。
- (3) 検知：スラグが溶鋼内に混入することによって生じる物理特性の変化を検知する技術。本技術では出鋼孔の周辺

に設置したコイルによる電磁気的変化や放射温度計による放射率変化の計測、赤外線計とCCDによる画像処理などが可能となり、得られた情報信号がスラグの流出を防止する様々な装置を制御した。

- (4) 排出：サイフォンや真空を活用してスラグをそのまま排出する技術。

3.2 技術の変遷

種々のスラグカット技術の変遷を図3に示す。1960～1970年代は主にスラグ固化、スラグボール、転炉や取鍋のスライディングノズル、サイフォン、放射温度計測などが試みられ、1980年代では転炉でのエア・ジェット法、取鍋での振動検知方法、取鍋やタンディッシュでは真空吸引法の実機化が進められた。1990年代は電磁式スラグ流出検知とエアジェット法の組み合わせが転炉と取鍋で広く採用され、2000年代は赤外線検知CCDの適用が進められた。



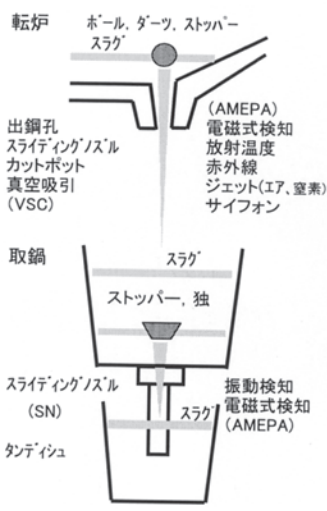
© 1987 Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, Germany
図2 モデル実験による渦発生高さとのノズル位置の関係⁴⁾

4 主要技術の内容と効果

4.1 転炉における主要技術

転炉における代表的スラグカット技術について、技術上のポイントを述べる。下記の (1) から (5) は、出鋼孔に対して転炉の内部から様々な方法を適用する技術である。

- (1) 出鋼孔のデザイン：通常出鋼孔の内径部は直管であるが、例えば内径は転炉内側では240mmで出口側は185mmのようにテーパが付けられ、出鋼中の外気の巻き込みが減少することによる窒素のピックアップ防止や、Alロスの削減（後述図7参照）が図られた⁶⁾。
- (2) 出鋼孔のサイフォン化^{7,8)}：図4-Aのように出鋼孔を象の鼻のようなサイフォン形状とし、出鋼末期にスラグと溶



個別技術		転炉		年次は文献発表年を表示		現在
				'50 ~ '79	'80 ~ '89	
分離	出鋼孔	○		'50 転炉出鋼孔		'91 出鋼孔形状 (NKK福山)
栓止と固化	出鋼孔	○	○	'77 スラグボール (NSC八幡)	'83 転炉ストップ (日新鉄)	'90 取鍋ストップ (NSC君津)
	ストップバー	○	○			
	ダーツ	○	○	'77 石灰投入機 (神鋼神戸)	'86 取鍋独楽 (NSC広畑)	'94 転炉ダーツ (住金と歌山)
	独楽	○	○			
	スラグ固化	○	○			
検知と流出防止	スライディングノズル	○	○	'67 取鍋SN (スライディングノズル) (八幡、他)	'80 転炉 エアジェット (NSC君津)	取鍋AMEPA
	振動検知	○	○			'90 NKK福山
	電磁式検知	○	○	'67 出鋼孔SN (NSC八幡)	'81 取鍋振動法 (川鉄千葉)	'90 大同星崎
	エア、窒素ジェット	○	○	'78 放射温度 (川鉄水島)		'90 神鋼加古川
	放射温度	○	○	'77 カットポット (川鉄水島)		転炉AMEPA & 窒素ジェット
	赤外線	○	○			'92 川鉄水島
	カットポット	○	○			'92 NKK福山
排出	サイフォン	○	○	'75 取鍋サイフォン (NSC八幡)	'83 取鍋VSC (NKK福山)	'92 NSC室蘭
	真空吸引	○	○	'75 転炉サイフォン (川鉄水島)		'92 川鉄千葉
						'94 取鍋/振動法 (NSC光)
						'07 赤外線 (NKK福山)

図3 スラグ流出防止技術開発の変遷⁵⁾

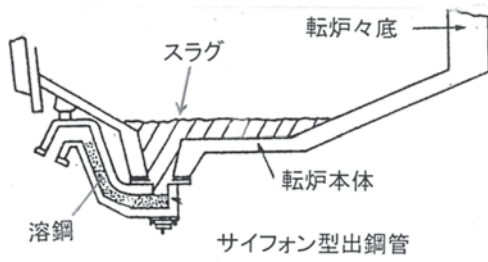


図4A 出鋼孔のサイフォン化⁷⁾

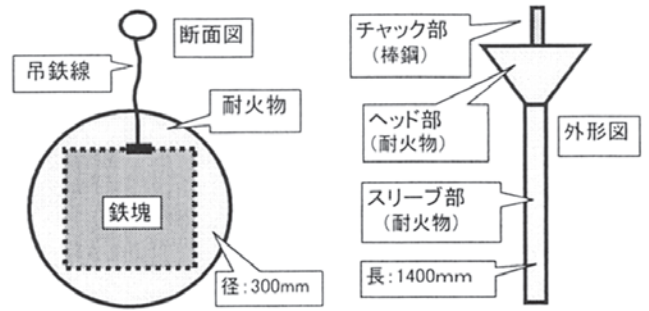


図4B スラグボール及びダーツ

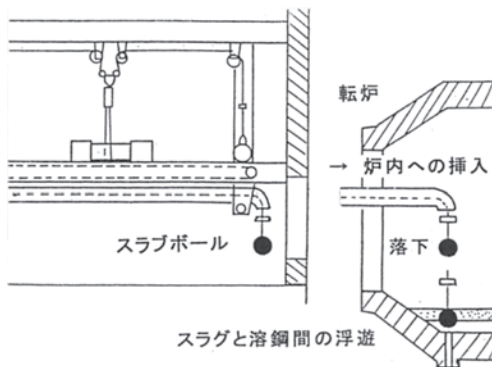


図4C スラグボール投入法^{10,11)}

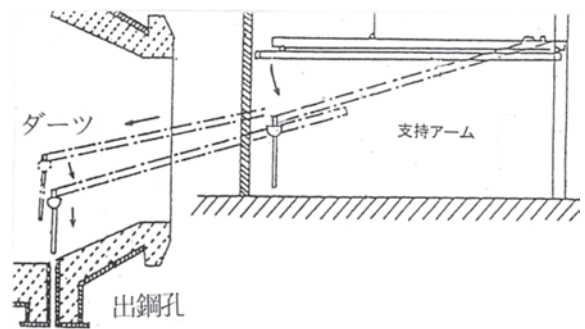


図4D ダーツ装入法¹²⁾

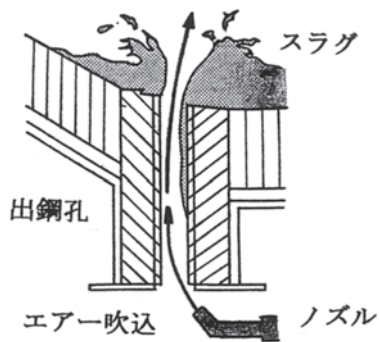


図4E エアージェット法¹⁵⁾

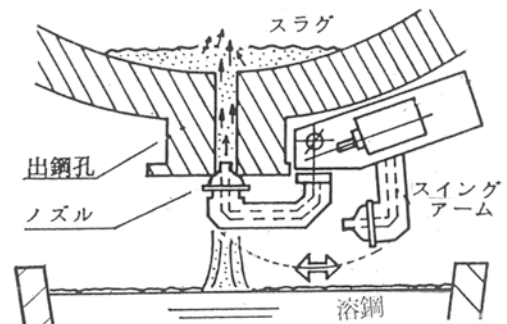


図4F PSS法¹⁷⁾

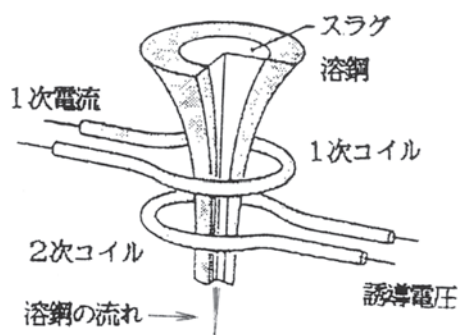


図4G 電磁力によるスラグ流出検知法²¹⁾

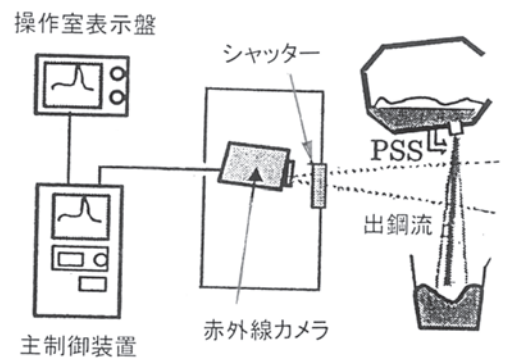


図4H 赤外線法とPSS法の複合法²³⁾

図4 転炉におけるスラグ流出防止技術

鋼の比重差によりスラグ流出を防止する技術である。取鍋内スラグ厚みは、従来の125mmから本方式によるスラグカットで30mm以下に減少し(図5)、復リンは皆無になった(図6)。しかし、耐火物と高いメンテナンスコストのために有効な技術としては普及しなかった。なお、スラグ厚みは、鉄製のパイプをスラグと溶鋼中に装入し、パイプに付着したスラグの長さを測定し決定された。

- (3) 出鋼時の生石灰投入⁹⁾：出鋼作業時に出鋼孔の直上のスラグにブロッキング用生石灰を投射機によって投げ入れてスラグを固めて、スラグが渦に巻き込まれるのを防止

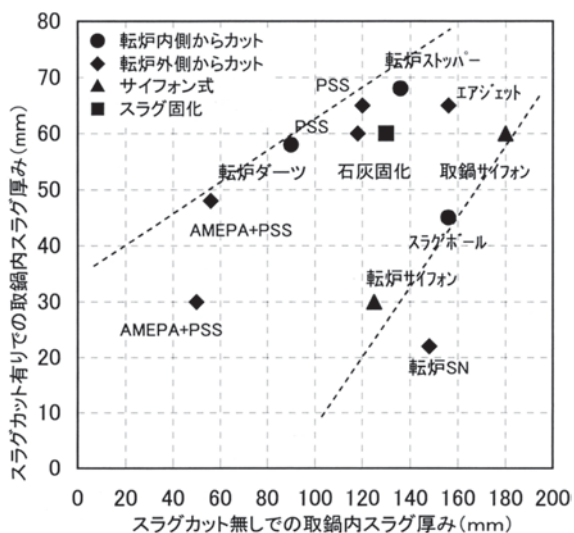


図5 各種スラグカット技術によるスラグ厚み減少効果^{7-18,20)}

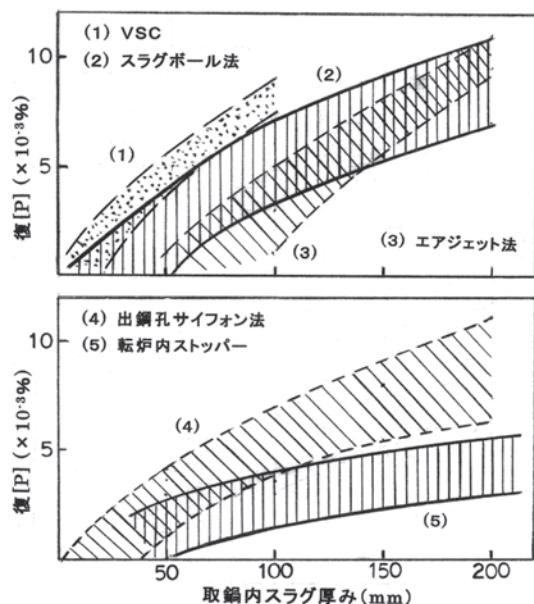


図6 各種スラグカット技術による復リンの防止効果^{7,11,13,15,33)}

する技術である。スラグカットの効果はスラグの厚みが50～70mmにまで薄くなり(図5)、復リン量は0.003%であった。ブロッキング法は大型炉では投入装置も大型化せざるを得ず、実機化は進まなかった。

- (4) スラグボール法、ダーツ法、ストッパー法：出鋼完了直前にスラグが流出しないよう、転炉の内部から出鋼孔に栓をする技術である。スラグボールは図4-Bのように中心部に鉄芯があり周囲は耐火物で被覆され比重はスラグよりやや大きめに調整してあり、鉄線が付いている。ボールを図4-Cのように出鋼末期に出鋼孔の真上に配置すると鉄線が溶けてボールは落下する^{10,11)}。溶鋼上に浮かんでいるボールは、発生した渦に巻き込まれて、孔に入り込むスラグを排除する。効果としてスラグ厚みは約150mmから40mm(図5)まで減少し、復リンが防止された(図6)。ダーツは図4-Bのようにヘッドと先端スリーブ部から構成されている。図4-Dのようにヘッド上の鉄芯を片持梁で保持して出鋼の末期にダーツのスリーブ部を出鋼孔の中に差し込んで装入する¹²⁾。効果としてスラグの厚みは90mmから57mm(図5)に減少し、Alのロス量は0.1kg/t減少(図7)した。ボール法に対して本方式では強制的にスリーブが孔に入るのでもスラグ排除が確実に実行でき、ボール法はダーツ法に置き換わってきている。ダーツは毎回消耗するが、非消耗型のストッパーそのものを出鋼孔の上に押し込んでスラグを排除する方式¹³⁾も試みられ、復リン防止に効果(図6)を発揮したが、大型炉では装置が巨大化するので広く採用されなかった。

- (5) 出鋼孔でのSN：取鍋で実機化されたSNを転炉に応用した技術¹⁴⁾。スラグの厚みの減少効果は大きく148mmが21mmまで減少(図5)した。一方、小型の50トン転炉でもその重量は2トン以上で、一層大きな転炉には操作性の問題とコスト増により実機には採用されなかった。

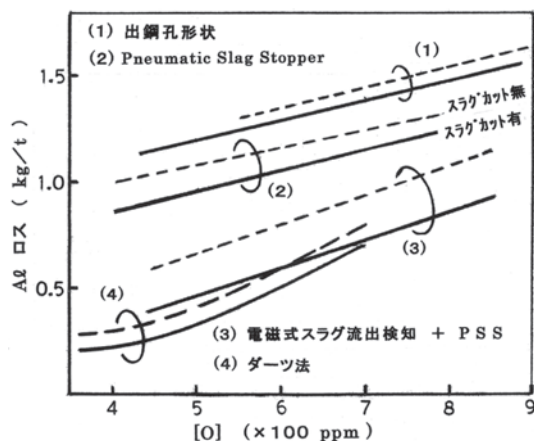


図7 各種スラグカット技術によるAlロス低減効果^{6,12,19,21)}

次に出鋼孔に対して、転炉の外部からスラグ流出防止に対処する技術を(6)から(11)までに述べる。

- (6) **エア・ジェット法**：スラグの流出開始時点を作業者が目視で確認し、出鋼孔の外側でアームの先端に取り付けられたノズルから出鋼孔の内側に高圧エアーを吹き込んでスラグカットする技術¹⁵⁾で、図4Eのような機構である。本技術では、従来のスラグ厚み157mmは65mmまで減少し(図5)、復リン防止、Al合金歩留まり向上が得られた(図6、7)。しかしノズルの先端に溶鋼やスラグが付着して効果が減ずるという課題があったため対策が進められた。
- (7) **ガス吹き込み法**：PSS (Pneumatic Slag Stopper) 法¹⁶⁾は上記のエア・ジェット法と同じ原理で、図4Fのようにアーム先端に取り付けたノズルを出鋼孔までスウィングさせて、窒素ガスを出鋼孔の内部に吹き込む方式である。本方式では、スラグ厚みが120mmから60mmに半減し(図5)、Alロスは0.1kg/t減少した(図7)。
- (8) **電磁式スラグ流出検知とPSSの適用**：電磁式スラグ流出検知法は、図4-Gのように出鋼孔の周辺に1次コイルと2次コイルを配置して、1次コイルに電流を流して磁界を発生させ、出鋼流からスラグに変化したときの透磁率変化を2次コイルの誘導電圧変化によって検知し、スラグ流出を確認する技術¹⁷⁻²¹⁾である。この方式によればオペレーターによる判定に対して約1秒早くスラグを検知することが可能で、流出スラグを検知した電磁信号を入手してPSS法のノズルからの窒素吹き込みを実行する。取鍋内のスラグ厚みは56.9mmが49mmまで約8mm減少した(図5)。成分のリンに関しては、 $\Delta [P]$ (上限 $[P]$ - 実績 $[P]$) が0.0069 % から0.0078 % になり、復リンが約0.0010 % 減少し、Alロスは約0.2kg/t減少した(図7)¹⁹⁾。電磁気作用を基にした本法は再現性が高く、現場で広く採用が進んだ。
- (9) **放射温度計と転炉復起システム**：高温の溶鋼とスラグの放射率の違いを利用してスラグの流出を検出する技術である。転炉の周辺に設置された放射温度計によって、スラグが流出した信号を取り込んで自動的に転炉を復起するシステム²²⁾が開発され、本方式ではスラグ厚みは93mmから74mmまで約20mm減少した。しかし、本法は溶鋼にスラグが懸濁混在する状態変化をシャープに決定することができなかった。
- (10) **赤外線による温度検出とPSS**：CCD赤外線センサーでスラグの流出を検知してPSSに連動する技術である。本方式は図4-Hに示すように出鋼流のスラグ比率を画像処理で算出し、比率が閾値以上になった瞬間にPSSを作動させると同時に転炉を復起させる技術が開

発された^{23,24)}。本法で適用前のスラグ厚み27.6mmは16.2mmにまで減少し、従来の電磁式よりも早い検知が可能になり、Alロスは0.035 % から0.025 % と低減した。

4.2 取鍋における主要技術

取鍋のスラグは、CC工程のタンディッシュを経由して鋳型に流出し、凝固した鋳片の清浄度を下げするため、高級薄板の製造にはスラグの流出防止が大きな課題である。本課題の解決策として取鍋からタンディッシュへスラグが流出することを防止する技術開発が進められた。

- (1) **取鍋ストッパー**：取鍋でSNを採用する前に注入量を制御していたストッパーを積極的にスラグ流出防止技術として活用する試みがなされた。ストッパー径、ストッパーとノズルのクリアランス、取鍋内の溶鋼ヘッドの組み合わせ条件によって取鍋の注入終了時点を決定でき、スラグのタンディッシュへの流出を防止できた²⁵⁾。しかし、実操業においてはコストと効果評価から本方式は採用されなかった。
- (2) **フローティングバルブ**：転炉のスラグボールに相当するバルブを取鍋ノズルの真上にセットして効果を出すことが試みられたが、バルブの取鍋内への装入が困難なことや転炉と違ってスラグが固化しているためバルブがスラグ内に差し込まれない等の欠点があり、実用化には至らなかった²⁶⁾。
- (3) **取鍋～タンディッシュ間ノズルの振動測定**：取鍋～タンディッシュ間で空気酸化を防止するロングノズルの中を溶鋼が流れている状態からスラグが混入するとノズルの振動状況が変化することを検知して、取鍋SNを閉じる技術である^{27,28)}。しかし、ロングノズル周辺の諸設備の振動などの外乱が避けられなかったため測定精度が劣り、現場での採用は進まなかった。
- (4) **電磁力によるスラグ流出検知**：前述の転炉における方式と同様に図8のように、取鍋のノズルの周りに1次コイルと2次コイルを設置し、溶鋼からスラグへの移り変わりにおける電磁場変化を検知してSNを迅速に閉じてスラグ流出防止を図る技術である^{29,30)}。本方式ではオペレーターの目視よりも約1.6秒早めにスラグが検知でき、図8のように連々鋳での取鍋からタンディッシュ内へのスラグ流出は抑制され、鋳片の清浄度が向上した。
- (5) **スラグのサイフォン吸引方式**：1975年に取鍋のスラグをサイフォンでの吸引する方式が試みられたが、石灰の多用によって硬化したLDスラグをサイフォンで吸引するには軟化剤が必要であり、実用化には至らなかった。一方、別の方式として図9のように真空装置でスラグを吸引するVSC (Vacuum Slag Cleaner) が1983年頃に稼動

し、取鍋やタンディシュからスラグを良好に排出することが可能となった³¹⁾。図9のようにタンディシュ内のスラグは完全に除去できたが³²⁾、本装置は巨大で真空装置の整備も必要であり、吸引したスラグの冷却に使用する水に起因した爆発トラブルも発生し、様々な現場で試みがあったものの実用化には至らなかった。

5 まとめ

以上のようにスラグカット技術は、機械的要素から電磁気力的要素を取り込みながら進展してきた。スラグカットによって、取鍋内やタンディシュ内でのスラグ厚みが減少し、復リン減少、Alなどの成分歩留まり向上、清浄度向上、耐火物溶損減少等が促進された。品質の高級化に対して、厚板や

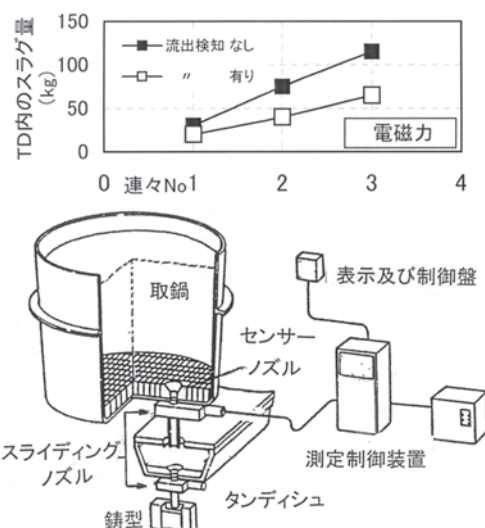


図8 電磁力による取鍋中のスラグカットの設備配置と連々鑄におけるTD内スラグ厚の変化²⁹⁾

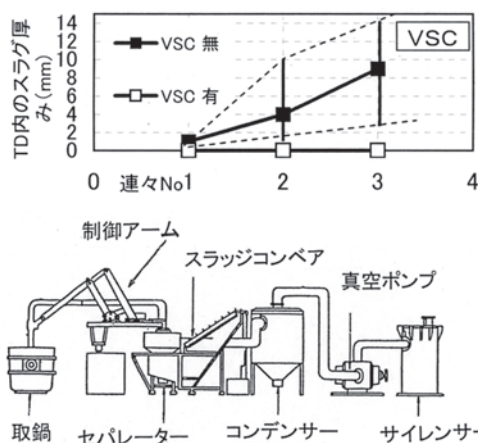


図9 真空吸引VSC法の設備配置と連々鑄におけるTD内スラグ厚の変化^{31,32)}

鋼管材等での低P鋼製造や薄板での高純鋼製造にはスラグカットは不可欠な技術となった。今後とも、安定したスラグカットを実現するためには、出鋼孔やノズルの形状を常に一定に保持する耐火物補修技術の充実や、実機では把握しにくい出鋼孔やノズルからのスラグの流出挙動をコンピュータシミュレーションによる予測技術^{33,34)}などを駆使して明らかにし、より正確かつシャープなスラグカット技術の開発が望まれる。

参考文献

- 1) わが国における酸素製鋼法の歴史, 日本鉄鋼協会編, (1982), 116.
- 2) Heinz Sperl : Stahl und Eisen, 108 (1988) Nr2, 68.
- 3) わが国における酸素製鋼法の歴史, 日本鉄鋼協会編, (1982), 325.
- 4) H.H.Jewasinski and D.Sucker : Stahl und Eisen, 107 (1987) Nr23, 30.
- 5) 沖森麻佑巳 : 日本金属学会, 要りあ, 38 (1999), 728.
- 6) 桜井栄司, 内尾政人, 水岡誠歴, 田中久 : CAMP-ISIJ, 4 (1991), 1304.
- 7) 大森尚, 三崎規生, 玉田滋基, 中井一吉, 寺田孝男, 小高幹男 : 川崎製鉄技報, 15 (1983), 166.
- 8) 大森尚, 山田博右, 藤山寿郎, 柴山卓真, 中西恭二, 斉藤健三 : 鉄と鋼, 1981, S 227.
- 9) 沢村信幸, 原田俊雄, 伊藤修二, 池田辰雄 : 鉄と鋼, 1977, S 131.
- 10) 王寺睦満, 村瀬昭次, 沖森真弓, 木村弘之, 長通知, 鹿子木公春 : 鉄と鋼, (1977), S 130.
- 11) 第66回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭52年3月) : 新日鉄, 八幡製鉄所.
- 12) 堤啓, 三木裕貴, 吉野省三, 家田幸治, 永幡勉, 深川信 : CAMP-ISIJ, 7 (1994), 235.
- 13) 第85回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭58年7月) : 日新製鋼, 呉製鉄所.
- 14) 坂本正博, 高橋稔昌, 山口豊明, 徳永庸夫 : 鉄と鋼, (1975), S 122.
- 15) 第77回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭55年11月) : 新日鉄, 君津製鉄所.
- 16) 高橋岳彦, 柏孝幸, 鍋島祐樹, 野村寛, 奥山悟郎 : CAMP-ISIJ, 11 (1998), 152.
- 17) 第97回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭62年9月) : 神戸製鋼, 加古川製鉄所.
- 18) 田中秀栄, 亀水晶, 小平悟史, 小松喜美, 水岡誠史 : CAMP-ISIJ, 7 (1993), 1065.
- 19) 須田守, 水藤政人, 蓮沼純一, 大宮茂, 浅野孝志, 岡本浩

- 志：CAMP-ISIJ, 5 (1992), 218.
- 20) 佐々木英彰, 石井博美, 田中勉, 石川厚, 荒井雅之：CAMP-ISIJ, 11 (1998), 145.
- 21) 第109回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (平5年9月)：NKK, 福山製鉄所.
- 22) 第70回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭53年7月)：川鉄, 水島製鉄所.
- 23) 森田幸代, 川畑涼, 田中秀栄, 小平悟史, 納雅夫, 川島章治：CAMP-ISIJ, 15 (2002), 141.
- 24) 久永知慶, 渡辺敦, 鷺尾勝, 八幡稔文：CAMP-ISIJ, 17 (2004), 158.
- 25) 真沢正人, 山口悟, 稲岡数磨, 吉村秀男, 中村勇氣男：CAMP-ISIJ, 3 (1990), 1209.
- 26) 妙中隆之, 横井真一, 溝口良平, 伊藤良, 原田武, 藤井博務, 綾部綴：鉄と鋼, (1986), S 259.
- 27) 秦弘毅, 河合浩之, 小菅俊洋, 山田信夫：CAMP-ISIJ, 7 (1994), 316.
- 28) 伊藤俊之, 越川隆雄, 高橋暁, 今井卓雄：鉄と鋼, (1981), S 847.
- 29) 堀川健一, 斉藤忠, 江波戸紘一, 木村雅保, 谷川完武, 東洵, 細谷誠一：CAMP-ISIJ, 3 (1990), 1212.
- 30) 中山傑, 中坪修一, 鹿嶋忠幸：CAMP-ISIJ, 3 (1990), 1211.
- 31) 宮脇芳治, 半明正之, 白谷勇介, 松田安弘, 小松喜美：鉄と鋼, (1984), 1697.
- 32) 第84回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭58年8月)：NKK, 福山製鉄所.
- 33) 高橋功一, 関春彦, 石井俊夫, 村井剛, 久保田淳：CAMP-ISIJ, 20 (2007), 201.
- 34) Karim Badr and Marcus Kirschen, et al.：Stahl und Eisen, 129 (2009) Nr11, 59 ~ 66.

(2011年4月20日受付)

会員へのお知らせ目次

行事等予定	506頁
総合	
東日本大震災被災者2012年会費減免のお知らせ	510頁
日本鉄鋼協会研究会 I 平成24年度募集案内	511頁
日本鉄鋼協会研究会II 平成24年度募集案内	512頁
平成24年度「産発プロジェクト展開鉄鋼研究」募集案内	513頁
日本鉄鋼協会日方斉メモリアル国際会議助成受給会議決定のお知らせ	514頁
材料の組織と特性部会平成23年度新規「自主フォーラム」追加発足および参加へのご案内	515頁
評価・分析・解析部会ロードマップ改訂版公開のお知らせ	515頁
イベント情報	
第63回白石記念講座「低炭素化社会実現のための超伝導技術-超伝導線材化技術の発展」開催案内	516頁
高温プロセス部会 ベースメタル研究ステーションシンポジウム「耐火物と製精錬反応」開催案内	516頁
環境・エネルギー・社会工学部会「第21回歴史を変える転換技術研究会」開催案内	517頁
環境・エネルギー・社会工学部会 第16回公開研究発表会、平成23年度フォーラム総会、被災地復興支援講演会開催案内	517頁
技術部会技術開発型 (B型) 研究会最終報告会「リスクアセスメント手法による設備管理方法」シンポジウム開催案内	518頁
支部	
北海道支部 平成23年度日本鉄鋼協会、日本金属学会合同サマーセッション開催案内	518頁
関西支部 平成23年度本多光太郎記念講演会開催案内	518頁
中国四国支部 講演大会開催案内	519頁
報告事項	519頁
次号目次案内	520頁
会員欄 (入会者・死亡退会者一覧)	521頁
海外鉄鋼関連最新論文	522頁
ブックレビュー	509、523頁

行事等予定

太字は本会主催の行事。国際会議で○は協会にてサーキュラー等入手できます。

開催期日	行事 (開催地/詳細掲載号および頁)	主催者	問合せ・連絡先
2011年7月			
4~6日	粉末X線解析の実際2011 (東京)	日本結晶学会	Tel. 03-5389-6372 crsj - xray@bunken.co.jp
6, 7日	第39回日本ガスタービン学会定期講演会 (長野)	日本ガスタービン学会	Tel. 03-3365-0095 gtsj - office@gtsj.org http://www.gtsj.org/
7日	鉄鋼工学セミナー「凝固専科」 (神奈川 6号401頁 申込締切6月7日)	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
7, 8日	第31回防錆防食技術発表大会 (東京)	日本防錆技術協会	Tel. 03-3434-0451 jacc@mbf.sphere.ne.jp http://www1.sphere.ne.jp/jacc
7, 8日	第45回X線材料強度に関するシンポジウム (東京)	日本材料学会	日本原子力研究開発機構 秋田貢一 Tel. 029-282-5478 http://www.jsms.jp
6~8日	第48回アイソトープ・放射線研究発表会 (東京)	日本アイソトープ協会	Tel. 03-5395-8081 gakuju@jrias.or.jp http://www.jrias.or.jp/
10~14日	The First World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME) (U.S.A)	TMS	http://www.tms.org/Meetings/Specialty/ICME2011/
13日	平成23年度計測自動制御学会関西支部講習会 (大阪)	計測自動制御学会関西支部	奈良先端科学技術大学院大学 野田 賢 Tel. 0473-72-5361 http://www.sice.or.jp/~kansai/index.html
13~15日	SURTECH2011 (東京)	表面技術協会	Tel. 03-3663-0456 info@surtech.or.jp http://www.surtech.or.jp/
14, 15日	トライボロジー入門講座 (東京)	日本トライボロジー学会	Tel. 03-3434-1926 jast@tribology.jp
15日	関西支部 平成23年度本多光太郎記念講演会 (大阪 本号518頁)	日本鉄鋼協会 関西支部	関西支部事務局 Tel. 06-6443-5326 n-kansai@ostec.or.jp
19, 20日	第24回プラズマ材料科学シンポジウム (大阪)	日本学術振興会第153委員会	spsm24@jwri.osaka-u.ac.jp http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~conf/spsm24/
19~21日	NIMS Conference 2011 (茨城)	物質・材料研究機構	Tel. 029-851-3354 (内線3886) http://www.nims.go.jp/nimsconf/2011/
21日	高温プロセス部会 ベースメタル研究ステーションシンポジウム「耐火物と製精錬反応」 (仙台 本号516頁 申込締切7月13日)	日本鉄鋼協会	東北大学 多元物質科学研究所 丸岡伸洋 maruoka@tagen.tohoku.ac.jp

開催期日	行事（開催地／詳細掲載号および頁）	主催者	問合せ・連絡先
22日	日本鉄鋼協会第21回（平成24年度助成開始）鉄鋼研究振興助成締切	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-5209-7013
22日	平成23年度日本鉄鋼協会、日本金属学会両北海道支部 合同サマーセッション（室蘭 本号518頁）	日本鉄鋼協会 北海道支部	北海道支部事務局 Tel. 0143-47-2651 mu_tekkyo@nsc.co.jp
23日	環境・エネルギー・社会工学部会 鉄の技術と歴史フォーラム 第16回公開研究発表会、平成23年度フォーラム総会、被災地復興 支援講演会（千葉 本号517頁 申込締切7月15日）	日本鉄鋼協会	千葉工業大学 工学部 寺島慶一 Fax. 047-478-0329 keiichi.terashima@it-chiba.ac.jp
24～29日	第37回鉄鋼工学セミナー（蔵王 3号196頁 申込締切5月9日）	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
25～29日	The Making, Shaping and Treating of Steel (Australia)	AIST	http://www.aist.org/conf/11_mst.htm
27～29日	平成23年度溶接工学夏季大学（大阪）	溶接学会	Tel. 03-3253-0488 jws-info@tg.rim.or.jp
26～28日	第121回塑性加工工学講座（愛知）	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
29日	環境・エネルギー・社会工学部会 鉄の技術と歴史フォーラム 「第21回歴史を変える転換技術研究会」（東京 本号517頁）	日本鉄鋼協会	東京藝術大学 永田和宏 Fax. 03-5685-7780 nagata@mtl.titech.ac.jp
2011年8月			
4日	「リスクアセスメント手法による設備管理方法」シンポジウム （東京 本号518頁）	日本鉄鋼協会	新日本製鐵(株)技術開発本部 山村和人 Tel. 0439-80-3033 yamamura.kazuto@nsc.co.jp
8日	中国四国支部講演大会（岡山 本号519頁）	日本鉄鋼協会 中国四国支部	岡山理科大学 機械システム工学 中川恵友 Fax. 086-256-9561 nakagawa@mech.ous.ac.jp
6～8日	日本混相流学会年次講演会2011（京都）	日本混相流 学会	京都大学 河原 Tel. 075-753-5842 http://www.jsmf.gr.jp/nenkai/
8～10日	第24回DV-X α 研究会（静岡）	DV-X α 研 究協会	静岡大学 関根理香 Tel. 054-238-4754 http://imac.eng.kagawa-u.ac.jp/dvxa2011/
23日	第4回腐食防食セミナー（大阪）	腐食防食協会	大阪大学 土谷博昭 Tel. 06-6879-7470 tsuchiya@mat.eng.osaka-u.ac.jp
30～1日	日本実験力学学会2011年度年次講演会（奈良）	日本実験力学 会	大阪市立大学 加藤健司 Tel. 06-6605-2665 http://www.jsem.jp/event/Annual11/
31日	ISIJ International 特集号“Cutting Edge of Mathematical Models for Predicting Microstructures and Mechanical Properties of Steels”原稿締切（1号40頁）	日本鉄鋼協会	編集グループ Tel. 03-5209-7012
31日	日本鉄鋼協会研究会Ⅰ平成24年度応募締切	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-5209-7013
31日	日本鉄鋼協会研究会Ⅱ平成24年度応募締切	日本鉄鋼協会	技術企画・部会グループ Tel. 03-5209-7014
31日	平成24年度「産発プロジェクト展開鉄鋼研究」応募締切	日本鉄鋼協会	技術企画・部会グループ Tel. 03-5209-7014
31～2日	VACUUM2011-真空展（東京）	日本真空工業会、 日本真空協会	(株)シー・エヌ・ティ Tel. 03-5297-8855 event.11@jvia.gr.jp http://www.jvia.gr.jp
2011年9月			
4～9日	International Conference on Martensitic Transformations (ICOMAT)（大阪）	日本金属学会	http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/icomat/
5～9日	Dynamics and Design Conference 2011（高知）	日本機械学会	Tel. 03-5360-3505 otake@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/dmc/DD2011/
6, 7日	第27回分析電子顕微鏡討論会（千葉）	日本顕微鏡 学会	九州大学 金子賢治 Tel. 092-802-2959 bunseki@tem.zaiko.kyushu-u.ac.jp
7～9日	The 6th European Oxygen Steelmaking Conference (EOSC2011) (Sweden)	JERNKONTORET	http://www.jernkontoret.se
8～10日	平成23年度工学教育研究講演会（北海道）	日本工学教育 協会	Tel. 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp http://www.soc.nii.ac.jp/jsee/
9日	第42回塑性加工フォーラム（広島）	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
12～14日	第122回塑性加工工学講座（愛知）	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 jstp@jstp.or.jp
16日	鉄鋼工学セミナー「強化機構専科」（神戸 6号402頁 申込締切8月5日）	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
16日	もう一度学ぶ機械材料学（東京）	日本機械学会	Tel. 03-5360-3502 ishizawa@jsme.or.jp
20～22日	第162回秋季講演大会（大阪 6号336頁）	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-5209-7013
25～28日	International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting (France)	Institut Jean Lamour	日本製鋼所 室蘭研究所 梶川耕司 Tel. 0143-22-0147 http://www.lmpc2011.org/
26, 27日	第18回アコースティック・エミッション総合コンファレンス（東京）	日本非破壊検 査協会	Tel. 03-5821-5105 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/sciences/index3_1.html
26～28日	2nd International Conference and Exhibition on Clean Technologies in the Steel Industry (Hungary)	OMBKE	http://www.cleantech11.com/
2011年10月			
2～5日	50th Anniversary of MetSoc's Annual Conference of Metallurgists (COM2011) (Canada)	MetSoc	http://www.cim.org/com2011/
5～7日	European Conference on Aluminium Alloys (Euro ECAA2011) (Germ any)	DGM	http://www.dgm.de/ecaa
7～9日	第2回工学教育に関するアジア会議（徳島）	実行委員会	徳島大学 英崇夫 Tel. 088-656-8235 http://www.me.tokushima-u.ac.jp/ACEE2011/

開催期日	行事（開催地／詳細掲載号および頁）	主催者	問合せ・連絡先
12～14日	第7回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCROSSAR2011) (東京)	日本学会議	東京大学大学院工学系研究科 糸井達哉 http://park.its.u-tokyo.ac.jp/tkdlab/JCROSSAR2011/
12～14日	国際セラミックス総合展2011 (東京)	日本セラミックス協会、他	Tel. 03-5297-8855 info2011@ceramic-expo.jp http://www.ceramic-expo.jp/
16～20日	Materials Science & Technology 2011 Conference and Exhibition (MS&T'11) (U.S.A.)	TMS、他	http://www.matscitech.org
19～21日	第55回材料工学連合講演会(京都)	日本学会議	日本材料学会 Tel.075-761-5321
20～22日	第19回鉄鋼工学アドバンスセミナー（神奈川 6号399頁 申込締切6月17日）	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
21～23日	第47回熱測定討論会（群馬）	日本熱測定学会	Tel. 03-5821-7120 netsu@mbd.nifty.com
25日	塑性加工基盤技術シリーズ①塑性力学の基礎、金属材料の塑性変形と降伏応力、変形抵抗（東京）	神奈川科学技術アカデミー	Tel. 044-819-2033 ed@newkast.or.jp http://www.newkast.or.jp/kyouiku/kj_boshu.html
27～29日	第62回塑性加工連合講演会（愛知）	日本塑性加工学会	Tel. 03-3435-8301 tatemukai@jstp.or.jp
28, 29日	第47回X線分析討論会（福岡）	日本分析化学会	九州大学 横山拓史 Tel. 092-642-3908 yokoyamatakushi@chem.kyushu-univ.jp
30～2日	第12回耐火物統一国際会議（京都）	耐火物技術協会	Tel. 03-3572-0705 yoshii@tarj.org http://www.unitecr2011.org/
31日	「鉄と鋼」特集号「加工硬化特性への新たな要求と基礎研究」原稿締切(6号389頁)	日本鉄鋼協会	編集グループ Tel. 03-5209-7012
2011年11月			
2～5日	6th ISEM” 11-Sendai (宮城)	日本実験力学会	東北大学 高橋 弘 Tel. 022-795-7394 htaka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp
10日	第207回西山記念技術講座「鋼板製造プロセス技術の進歩と今後の展望」（東京 4号262頁）	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
16, 17日	INCHEM TOKYO 2011 (東京)	化学工学会、日本能率協会	Tel. 03-3434-0587 http://www.jma.or.jp/inchem/index.html
16～18日	ものづくりNEXT↑2011 (東京)	日本能率協会	Tel. 03-3434-0587 http://www.jma.or.jp/next/guide2011/
17日	第208回西山記念技術講座「鋼板製造プロセス技術の進歩と今後の展望」（東京 4号262頁）	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
21, 22日	第17回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム（愛知）	化学工学会	名古屋大学 成瀬一郎 Tel. 052-789-2710 http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/scej_fluidize_fbl7/
22～25日	Plasma Conference2011 (石川)	JSPF	http://www.jspf.or.jp/PLASMA2011/eng/index.html
28～30日	「持続可能社会のための材料科学と技術革新 - 地球環境持続性のためのエコマテリアルズとエコイノベーション -」 (ECO-MATES2011) (大阪)	大阪大学接合科学研究所、他	Tel. 06-6879-4193 maeda@casi.osaka-u.ac.jp http://eco-mates2011.com
19, 20日	第54回自動制御連合講演会（愛知）	計測自動制御学会	豊橋技術科学大学 寺嶋一彦 Tel. 0532-44-6699 http://rengo54.me.tut.ac.jp/
21～23日	第32回日本熱物性シンポジウム（神奈川）	日本熱物性学会	慶應義塾大学 田口良広 Tel. 045-566-1809 http://jstp2011.naga.sd.keio.ac.jp/
22～25日	Plasma Conference2011 (略称PLASMA2011) / プラズマ・核融合学会第28回年会/ 応用物理学会第29回プラズマプロセッシング研究会/ 日本物理学会 (領域2) 2011年秋季大会 (石川)	プラズマ・核融合学会 (幹事学会)、他	Tel. 052-735-3265 plasma@jspf.or.jp http://www.jspf.or.jp/PLASMA2011/
25日	第63回白石記念講座「低炭素化社会実現のための超伝導技術－超伝導線材化技術の発展－」（東京 本号516頁）	日本鉄鋼協会	育成グループ Tel. 03-5209-7014
30～2日	EcoDesign2011- 第7回 環境調和型設計とインバースマニファクチャリングに関する国際シンポジウム（京都）	エコデザイン学会連合	Tel. 03-3500-4891 ecd11@mstc.or.jp http://www.ecodenet.com/ed2011/index.htm
2011年12月			
4～7日	Fray International Symposium (Mexico)	Flogen Technologies Inc	http://www.flogen.com/FraySymposium/
12～17日	The16th International Conference on the Textures of Materials (第16回材料集合組織国際会議ICOTOM16) (India)	Indian Institute of Technology Bombay	http://www.icotom16.in/ icotom16@gmail.com
14, 15日	第10回評価・診断に関するシンポジウム（大阪）	日本機械学会	京都工芸繊維大学 増田新 Tel. 075-734-7381 masuda@kit.ac.jp
2012年1月			
20日	International Workshop on CO ₂ Reduction Insteel Industry (東京)	日本鉄鋼協会	http://www.isij.or.jp/Bukai/GakuJutsu/Kopuro/112103.html
2012年3月			
28～30日	第163回春季講演大会（横浜）	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel. 03-5209-7013
2012年4月			
11～14日	2012国際ウエルディングショー（大阪）	日本溶接協会	産報出版 保谷公人 Tel. 03-3258-6411 http://www.weldingshow.jp

開催期日	行事（開催地／詳細掲載号および頁）	主催者	問合せ・連絡先
2012年6月			
3～7日	1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging (ICRF2012) (Germany)	VDEh	http://www.ICRF2012.com
10～13日	4th International Conference on Progress Development in Iron and Steelmaking (SCANMET IV)	MEFOS	http://www.scanmet.info
2012年9月			
10～12日	IFAC Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industries (IFAC MMM 2012) (岐阜)	日本鉄鋼協会	http://www.ifacmmm2012.org/
17～19日	第164回秋季講演大会（愛媛）	日本鉄鋼協会	学術企画グループ Tel.03-5209-7013
2012年10月			
14～18日	2012年粉末冶金国際会議（略称：PM2012 YOKOHAMA）（神奈川）	日本粉末冶金工業会、他	Tel.03-3219-3541 pm2012@ics-inc.co.jp http://www.pm2012.jp/

ブックレビュー

ネオジム磁石のすべてーレアアースで地球を守ろうー

佐川真人 監修

アグネ技術センター 2011年4月30日発行

A5判 204頁 定価 2,940円（税込み） Tel.03-3409-5329

今から約30年前、今日世界最強の永久磁石であるネオジム磁石が佐川真人博士によって発明された。本多光太郎博士がKS磁石鋼を発明してから約70年を経て誕生した革新的磁石材料であり、磁石の開発で常に世界をリードしてきた日本の磁性材料研究者の真骨頂とも言えよう。

時代は当に、省資源、省エネルギーが希求され、自動車、電機、機械、情報などあらゆる産業分野で、環境に優しい技術開発が推進されている。その中でも、ネオジム磁石は、駆動モータや各種アクチュエータなどの小型化・省エネ化に不可欠の金属材料であり、今なお進化し続けている。

本書では、ネオジム磁石の誕生から実用化までのドラマが、様々なシーンで主役を演じた第一人者によって判り易く解説されている。そこでは、革新的金属材料が工業材料として汎用的に使われるまでには、材料の優れた性能は勿論であるが、性能発現の科学的裏付け、経済的かつ安定した製造技術、それを適用する応用技術、新たな市場開拓など、様々なロードブロックを乗り越える必要があった。

本書は、金属材料の研究・開発に携わる多くの研究者・技術者、さらには金属の密林に挑もうとする若者達に、金属材料開発の醍醐味を実感させる絶好の書である。

（JFEスチール(株)スチール研究所 理事・主席研究員 細谷佳弘）

編集後記

6年ぶりに編集委員会に復帰し、早速編集後記を書く機会をいただきました。ふえらむ創刊から15年あまり、鉄鋼一般記事から専門的解説まで、本会会員にとって非常に有益な記事が提供されてきました。しかし、個人的にはどの程度消化できたのか、さらに言えば、どれだけ口にしたのかを省みると、忸怩たる思いです。情報氾濫時代を言い訳に、必要に迫られた情報しか収集しなくなりつつある今、ふえらむだけは、全会員が毎月楽しみに完食する学術雑誌であり続けられるよう、特に学生や若手教員、若手技術者にとって魅力ある“鉄の情報ネットワーク”基盤となるよう努力すべく、編集委員

として決意を新たにす次第です。また、入門講座など、過去の教育的財産をWEBで共有化することも重要なミッションかと感じておりますが、勝手なマニフェストを作ると委員長に叱られそうなのでこの辺にいたします。

今月号には、従来の諸企画記事に加え、震災による講演大会中止で拝聴できなかった大変貴重な受賞講演内容が掲載されておりますので、皆様方の志の肥やしにいただければ幸いです。

(K. M.)

会報委員会 (五十音順)

委員長	細谷 佳弘 (JFEスチール (株))		
副委員長	森田 一樹 (東京大学)		
委員	韋 富高 (日本冶金工業 (株))	小野 嘉則 (物質・材料研究機構)	梶野 智史 (産業技術総合研究所)
	芝田 智樹 (大同特殊鋼 (株))	杉本 卓也 (愛知製鋼 (株))	埴本 敏江 (日新製鋼 (株))
	田嶋 淳平 (住友金属工業 (株))	戸高 義一 (豊橋技術科学大学)	中嶋 宏 (三菱重工業 (株))
	野崎 精彦 (UDトラックス (株))	早川 朋久 (東京工業大学)	林 重成 (北海道大学)
	林 幸 (東京工業大学)	前田 恭志 ((株) 神戸製鋼所)	三木 貴博 (東北大学)
	山内 昭良 (日本鉄鋼協会)	横井 龍雄 (新日本製鐵 (株))	

ふえらむ/鉄と鋼 合本誌 定価 4,000円 (消費税等込・送料本会負担)

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan/Tetsu - to - Hagané: Unit Price ¥4,000 (Free of seamail charge)

1996年5月10日第三種郵便物認可 2011年6月25日印刷納本、2011年7月1日発行 (毎月1回1日発行)

編集兼発行人 東京都千代田区神田司町2-2 新倉ビル2階 (社) 日本鉄鋼協会 専務理事 小島 彰

Tel: 学会・生産技術部門事務局: 03-5209-7012(代) Fax: 03-3257-1110(共通)

(会員の購読料は会費に含む)

印刷所 東京都文京区本駒込3-9-3 (株) トライ

©COPYRIGHT 2011 社団法人日本鉄鋼協会

複写をご希望の方へ

本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター ((社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体) と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません (社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先: 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL. 03-3475-5618 FAX. 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

複写以外の許諾 (著作物の引用、転載、翻訳等) に関しては、(社)学術著作権協会に委託致していません。

直接、本会へお問い合わせください。

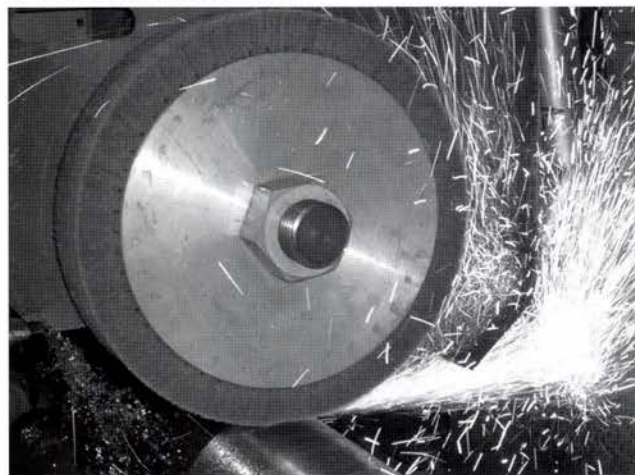
また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

©Copyright Clearance Center, Inc

TEL. 1-978-750-8400 FAX. 1-978-646-8600

「世界にひとつ」を届けたい

高研削性研磨材 GF ホイール



GF ホイールはスリーエフ技研が開発した高研削タイプの研磨布ホイールです。高耐食油井管やインコネルパイプといった難削材の研磨の現場で、永年高い評価を得てきました。

一般的なフラップホイールのようなバタつきが無く、弾性砥石感覚で使える研磨布ホイールです。馴染み性が高く、特にセンタレス研磨で高評価を頂いています。

お客様ごとに仕様を決める徹底した顧客志向。世界のオンリーワン製品を是非お試し下さい。

ISO9001 認定工場 研磨材料製造販売
RED HORSE 株式会社 **スリーエフ技研**
〒571-0002 大阪府門真市岸和田1-3-11
TEL 072-881-8400 FAX 072-881-8590 E-Mail info@tfg.co.jp
URL▶▶▶http://www.tfg.co.jp

《海外出荷実績》

中国、韓国、台湾、タイ、マレーシア、インド、ブラジル、アルゼンチン、オーストラリア、アメリカ、イタリア、ドイツ、スペイン

日本鉄鋼協会発行誌 広告のご案内

ふえらむ・鉄と鋼

- 前付1色 1頁/120,000円
- 後付1色 1頁/100,000円 1/2頁/60,000円
- 2色刷り/上記金額に40,000円加算
- 4色刷り/上記金額に140,000円加算

ISIJ International

- 1色 1頁/120,000円
- 1色 1/2頁/70,000円
- 2色 1頁/170,000円
- 4色 1頁/250,000円

※料金に消費税は含まれておりません。

※上記広告についてのお問い合わせ、お申し込みは下記までご連絡下さい。

詳しい資料をご用意しています。

株式会社 明報社

〒104-0061 東京都中央区銀座7丁目12番4号(友野本社ビル)
TEL.03(3546)1337(代) FAX.03(3546)6306
<http://www.meihosha.co.jp> E-mail: info@meihosha.co.jp

ELTRA
Analysers made in Germany

業界注目!!
この機能で低廉価格(500万～)発売中!!

炭素／硫黄分析装置 CS-800

システム概要



CS-800はJIS燃焼—赤外線吸収法に準拠した炭素/硫黄分析装置です。鋼、鋳鉄、銅、鉍石、セメント、セラミックスその他の材料中の炭素及び硫黄を高速同時定量します。CS-800は最大で4機の独立した赤外線セルを備えることができ、それぞれが分析用例に応じて最適な赤外線吸収長に設定されます。16ビットマイクロプロセッサにより誘導燃焼炉のパワー制御や赤外線セル検出器のゼロ及び感度調整を行います。

特 徴

- ソリッドステート赤外線セル 4 機搭載
- 燃焼炉の自動クリーニング機構
- 誘導炉出力制御
- 単独及び外部PC制御による運転
- 助燃剤なしでの最大20gまでのCu試料分析

DSI

Dynamic Systems Inc.



グリーブル試験機シリーズ

熱・機械プロセスの物理シミュレーションのための業界基準となります。

高速加熱と広範囲の機械能力により、溶接HAZシミュレーション、ゼロ強度、熱サイクル、熱処理研究、低力試験、高温引張り試験、さらには高速圧縮・引張り試験、多衝撃高温変形試験、溶融および凝固、そしてストリップ焼なましなどの試験に理想的です。

性能パラメータ	Gleeble 3800	Gleeble 3500	Gleeble 3180 (New)
最高加熱速度	10,000°C/sec	10,000°C/sec	8,000°C/sec
最高焼入れ速度	10,000°C/sec	10,000°C/sec	8,000°C/sec
最大ストローク	100 mm	100 mm	100 mm
最高ストローク速度	2000 mm/sec	1000 mm/sec	1000 mm/sec
最大力	20 tons	10 tons	8 tons
最大サンプル寸法	20 mm diameter	20 mm diameter	20 mm diameter

※加熱方式：直接抵抗加熱システムを採用しています。



日本総代理店

ジャパンマシナリー株式会社
JAPAN MACHINERY COMPANY

第三営業部 〒143-0015 東京都大田区大森西 5-27-4 (ファームストンビル)
TEL.03-3730-6061(代表) FAX.03-3730-3737

〒530-0002 大阪府大阪市北区曽根崎新地 1-3-16(京富ビル)
TEL.06-6342-1551 FAX.06-6342-1555