

明しうる。また、[N]については母材と溶加材の含有量にほぼ比例し、大気からの混入は一般に少ない。ただ、アークが不安定となる条件(約 2m/min 以上の高速溶接、極低 C ワイヤの使用等)では大気からの混入を無視できず、[N] > 100 ppm になることもある。[河野]は、反応時間と溶接入熱は比例関係にあり、[O]量は溶接入熱量に関係するが、スラグ・メタル反応の仮定の仕方によつては今回の実験事実をうまく説明できない。また [O]量は母材希釈率にも関係することを指摘した。

[勝本]は厚肉材溶接技術に関して次のように提言した。最近の需要動向は、現地溶接割れ性の改善や HAZ 靱性要求の高度化から、低 C_{eq} ・低 P_{cm} 化は必須条件(例えば 1.375 in 厚で $P_{cm} \leq 0.15$)であり、 $C=0.02\%$ のような極低 C 鋼材の実用化が進んでいる。シーム溶接部の靱性改善には、MIG+SAW 法、多層溶接法などの採用があるが、入熱分散の適正化と溶材開発が必須となることが表明された。

[平]の提言でフラックスタイプによる適用板厚上限につき意見交換されたが、熔融型では 38~(50)mm を上限とする発言が多かった。勝本の提言に対し、鋼材の極低 C 化による凝固割れの危険性の評価、MIG の高速化技術開発、SAW におけるビード表層性状改善も共通的な検討課題であることが認識された。

極低温用鋼管(-100°C 以下)の対応溶接技術に関し、[阿草]より次の提言があつた。9%Ni 鋼管製造を考えると、高 Ni 溶材では拡管時の歪み集中が問題となる故、合金 MIG 溶接を適用して良結果を得た。また、別の方法として溶接後、鋼管全体を QT する方法が考えられる。この場合 SAW 法では、低 [O]・低 [H] フラックスの開発が前提となり、MIG 法ではアーク安定性の向上対策を現場的に確立する必要がある。更にこの種の鋼管では、現状の現地溶接法を適用することが困難であり新技術開発が必要となろう。この提言に対し、[小泉]より MIG 法の高速度化(交流 MIG 他)、多層・多ラン SAW 溶接技術の開発等も必要という提言が附加された。

討19 中径電縫鋼管電縫溶接における溶接現象監視と自動制御

新日本製鉄(株)製品技術研究所 芳賀博世 他

中径電縫管溶接における溶接現象と欠陥発生との関係を明確化し、最適溶接現象の維持を周波数変動を利用して制御する方式の開発と実用化が紹介された。V 収束点と溶接点と一致する第 1 種溶接現象では冷接を生じ、溶接点と V 収束点とスクイズ中心の比較的長い範囲の距離を周期的に移動する第 3 種溶接現象では大きなペネトレータ(スラグ巻き込み)を生ずる。この中間の第 2 種溶接現象では、V 収束点と溶接点の距離は小さく、エッジが絶えず分離接触を繰り返して欠陥発生率は極小となる。溶接欠陥の発生形態の差異が加熱熔融現象から説明され、第 2 種溶接現象の僅少なインダクタンスの変化周期 $1/f$ を監視し $41/f$ を設定範囲内に収めるような入熱制御を中心とした自動制御システムが説明された。

本発表の質疑に対し、板厚に対する補正が行われている装置であること、V 角度の影響は小さいこと、制御は 10 msec の平均値を用いて行うこと、温度制御方式は一般的な方法であり本方式は第 2 種溶接現象のみに適用で

きる方法であること、等が回答された。

討20 ホットストリップ接続用フラッシュバット溶接技術

新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 大矢 清 他

熱延鋼板の通板に耐えうる品質レベルの継手を短時間・高信頼度で作成するため、独特の機械加工機構を有する矩形波フラッシュバット溶接機が開発・実用化された内容が紹介された。端面切断にはダブルロータリヤを適正配置し、直線度の確保、縁部そり防止、高速送行を実現した。溶接電源に矩形波電源を用いてフラッシュ発生頻度を増し接合品質(曲げ試験による割れ長さで評価)の向上が計られ、稼働実績として 11% の効率向上と溶接部破断がほぼ皆無になつたことが示された。

本発表に対し、板幅の影響、ロータリヤにおけるスクラップ処理法、トリマにおけるバイト材質や管理法等について質疑が行われた。さらに正弦波を用いても 2 次インピーダンスを小さくすることにより、休止時間の減少、短絡時間の増加および小さなフラッシュ発生が可能となり、接合品質の向上が計れるとの提言が行われた。

討21 鉄鋼プロセスへのレーザー溶接の適用

川崎製鉄(株)技術研究所 佐々木弘明 他

レーザー溶接の特徴(加工点の小、深溶け込み、小溶接入熱、余盛がつかない等)を利用したコイルビルドアップ溶接装置の開発と溶接技術が紹介された。電磁鋼板への利用は、溶接 HAZ 延性の向上をレーザーを用いて可能にしたものである。対象板厚が平均 0.3 mm と小さいため、溶接条件の選定、始末端処理等にレーザー特有の溶接技術を開発した。また溶接開先の切断、センシングには高精度が要求されるので、独自の治具・機構が開発され、実用に供された。さらに、0.4~2.3 mm 厚の冷延コイルのビルドアップ溶接に適用した場合の開先調整、溶接条件選定指針等が紹介された。以上の溶接継手はいずれも溶接のまま、タンデム圧延可能なことが示された。

本発表に対し、レーザー溶接の優位性と他溶接法との比較、装置の保守・点検の実態、溶接部品品質保証手段、表面性状・鋼種と溶接条件選定の考え方、開先ならいの方法等について活発な討議が行われた。さらに、プラズマ発生への対処指針に関して、プラズマ制御レーザー溶接技術の提言も行われた。

以上、討論会の発表および討論の要点を概括したが、溶接技術についての討論会を終わつての感想として、鉄鋼製造工程の連続化、1 次・2 次加工品の製造に最新の溶接技術開発が深く係わっており、その良否が生産性、歩留り向上、苛酷な仕様の商品への対応可否等を決定するといつても過言ではないとの認識を得た。今後、数年間の推移をみて再び討論会が計画されることを期待したい。

IV. ステンレス鋼・耐熱鋼における窒素の役割

座長 東京工業大学総合理工学研究科

田中良平

ステンレス鋼や耐熱鋼として多用されている Cr-Ni オーステナイト鋼では、窒素の母相への固溶度が炭素に

比べて 1桁程度も大きく、合金元素として窒素を添加すればオーステナイト生成元素として高価な Ni の代替に役立つばかりでなく、固溶強化、耐孔食性の改善その他のいろいろの利点が認められる。本討論会は、このような窒素を加えたステンレス鋼・耐熱鋼の開発、その諸特性と組織との関係などについての研究発表を中心として討論を展開するべく企画された。

討論論文の演題と発表者は以下の 6 件である。

討22 オーステナイト・ステンレス鋼における窒素の役割—その組織学的側面—

東京工業大学工学部 菊池 實 他

討23 γ システンレス鋼の低温強度に及ぼす N の影響
日新製鋼(株)周南製鋼所 武本敏彦 他

討24 窒素添加オーステナイト系ステンレス鋼の繰り返し軟化

東京大学工学部 柴田浩司 他

討25 SUS 304 オーステナイトステンレス鋼溶着金属の低温における機械的性質におよぼす窒素の影響

大阪大学溶接工学研究所 菊地靖志 他

討26 17%Cr-7%Ni ハード材の耐食性および機械的性質におよぼす各種成分の影響

新日本製鉄(株)光製鉄所 平松博之 他

討27 窒素含有ステンレス鋼の耐 SCC 性および高温強度

住友金属工業(株)中央技術研究所 榎木義淳 他

予稿による発表内容を考慮して、以上の 6 件を 3 部に分類して発表と討論を進めることにした。すなわち、討 22 は基調講演の性格を持っていたので、まずこの 1 件について発表と討論を行い、次いで第 2 部として、討 23 ~ 25 の 3 件を続けて発表願ひ討論に供した。最後に休憩をはさみ、第 3 部として残りの討 26 と 27 の 2 件も続けて発表の後、討論を行った。

以下にそれらの内容を要約して報告する。

討 22 で菊池(東工大)は、①窒素の γ への固溶度、また固溶による効果として② γ 安定化 (γ 形成能)、③積層欠陥エネルギー (SFE)、④ γ の格子定数におよぼす効果並びに⑤拡散係数について C と比較し、最後に⑥生成窒化物の種類と析出速度についての実験結果を紹介した。とくに①については、窒素ガスの固溶度と窒化物 Cr_2N のそれとを明確に区別する必要があること、すべての温度範囲で窒素は C より固溶度は大きい、その温度依存性は逆に C より小さいこと、および Cr と窒素の相互作用が大きいこと Cr_2N の固溶度は Cr 濃度とともに特異な変化を示すことなどを明らかにした。また③については、C が γ の SFE を高めるのに対し、窒素の添加では SFE は減少するがその変化は必ずしも単純ではないことを示した。⑥については、析出相 Cr_2N の分散が P の存在により著しく微細均一になることを紹介した。

この発表に対し、P 添加が Cr_2N 析出を微細化する原因についてまず質問があり、菊池はその正確な原因は明らかではないが、P 添加により γ 相中に焼入れ二次欠陥が生じやすくなることを見いだされており、そこに P がトラップされて析出相の核発生を促進する可能性が考えられると説明した。そのほか、 γ 相の自由エネルギー計算の考え方、安定窒化物相 π の固溶度、凝固時に

α 相が晶出する場合の窒素の溶解度などに関する質問もあつた。

第 2 部ではまず討 23 で武本(日新製鋼)が 18.5Cr-15Ni ステンレス鋼の引張特性、低サイクル疲労特性におよぼす窒素の効果を室温から -162°C の範囲で調べ、電顕組織の観察結果と結びつけて窒素の影響を考察した。すなわち、窒素は C と同様に耐力の温度依存性を高めるが、室温域と低温域で侵入型原子による強化機構が異なると考えられること、耐力に対する強化度は、いずれの温度域でも C より窒素の方が大きいこと、窒素は繰り返し変形過程で加工軟化をもたすが、これは繰り返し初期に導入された planar な転位配列が崩れ、cellular な転位配列へ移行するためと説明した。また、窒素添加鋼の低サイクル疲労寿命が長いのは、窒素による繰り返し軟化が疲労被害の蓄積を軽減するためであると推論した。

討 24 で柴田(東大)は、316 および 310 型ステンレス鋼を用いて室温からヘリウム温度 (-269°C) までの低温における疲労特性を調べ、C や窒素の添加および試験温度並びに熱処理の影響などを調べ、高 Mn 鋼の結果との比較検討も行った。その結果、窒素添加により著しくなる加工軟化は、転位の planar な配列と対応し、後者に起因するバウシinger 効果が本実験鋼の繰り返し軟化の原因の一つであると説明した。

次いで討 25 で菊池(阪大)は、高窒素ステンレス鋼板の溶接に窒素-Ar 混合ガスをシールドガスとする MIG 溶接を適用して溶接金属の低温(一部は 600°C までの高温)での機械的性質と窒素含有量との関係を研究した。シールドガス中の混合窒素量を増すと溶着金属中の窒素含有量は最高約 0.2% 程度まで増加し、引張強さはあまり変化しないが低温での衝撃吸収エネルギーはかなり増加すること、それは窒素量の増加とともに γ の安定度も大きくなり、応力誘起マルテンサイトの生成が抑制されるためであると結論した。ただし、低温衝撃値に対する窒素の効果は溶接方法や窒素の導入方法によつて大差があり、それは溶着金属中での窒素の存在形態の相違に起因するものと推測した。

以上の討 23~25 の 3 件に関する討論では、まず武本(日新製鋼)が討 24 に対し、10% 予ひずみ材の疲労挙動では引張応力の方が圧縮応力より大となり、固溶化処理材と逆になっている点をどのように解釈すればよいかと質問したが、武本自身も同様の結果を得ていることから、試験機の問題ではなく、予ひずみ材と固溶化材とは異なつたバウシinger 効果を示すのであろうという見解に落ち着いた。

次いで武本はさらに、繰り返し軟化が転位の planar 配列に対応するという理由だけでは、バウシinger 効果が繰り返し軟化の原因になるという柴田の見解には同意し難いと述べ、しばらく議論は続いたが、低窒素鋼は定常域ですでに転位組織は cellular 化するのに対し、含窒素鋼では軟化後に planar から cellular に変化していることが認められること、しかし軟化した鋼を観察したら cellular な転位配列になつていたということ、cellular に変わつても軟化するとは限らないという点でおよそ意見の一致を見た。

次に討 25 に対し星野(日新製鋼)は、鍛錬材では 0.1% の窒素の添加により室温の耐力が 5~10 kgf/mm²

増加することが知られているのに対し、溶着金属でそのような効果がみられない点を質問したが、菊地（阪大）は凝固組織における δ フェライト量と結晶粒度の影響がともに含まれたためであろうと答えた。星野はさらに、窒素の鋼中における存在状態の違いについて質問したが、菊地（阪大）は手溶接の場合、フラックス中の窒化物が溶鋼プールに入つても短時間で凝固するため必ずしも十分に分解固溶しないことが考えられるとし、中尾（阪大）は酸素含有量も溶接方法によつて異なると述べ、さらに坂本（新日鉄）は窒化物や介在物の存在、あるいは δ フェライトの晶出によつても衝撃値は低下することがあり得るとの見解を示した。

休憩後の第 3 部、討 26 と討 27 は、ともに機械的性質と耐食性を扱つたものである。まず討 26 で平松（新日鉄）は、鉄道車両用の 17Cr-7Ni 鋼について耐粒界腐食性と引張特性を調べ、0.13% 程度の窒素を添加しても耐粒界腐食性は影響されず、 γ 相の強度に対する窒素の効果は C の 2 倍であるが、 α 相に対しては、逆に $1/2$ であり粒界腐食の観点から低 C 化して窒素を有効に利用し Ni 量を調整すれば加工性の優れた高強度ステンレス鋼が得られると報告した。

最後の討 27 で榎木（住金）は、沸騰水型原子炉の再循環系配管材として、粒界応力腐食割れ性と引張強さのバランスを考慮して開発された低 C-含窒素 304, 316, 347 ステンレス鋼の諸特性を紹介し、さらに窒素添加鋼がクリープ領域の高温でも利用できることを明らかにした。また高温強度の大きい理由として、窒素による固溶強化のほか、347(LC) では微細 NbCrN による析出強化も寄与していること、Nb と窒素を組み合わせた SUS 310 相当の高耐食オーステナイト鋼も開発されたことを述べた。

以上の 2 件についての討論では、主として討 27 に対して、引張強さの回帰式設定の考え方、窒素と Nb の冶金学的な役割、とくに窒素による強化機構などについて質問が出された。また 316(LC) で、長時間側のクリープ破断強度の低下について、炭化物の凝集粗大化以外にも金属間化合物の Laves 相や λ 相の析出が関係しているとの榎木の見解が述べられた。

討 27 の講演が終了したときは定刻 5 時に数分前というしだい、十分な討論を行う余裕がなく、あわただしく散会したが、討論会出席者は約 160 名に上り、たいへん盛会であつた。窒素はオーステナイト系ステンレス鋼の合金元素として、きわめて安価かつ無尽蔵に存在する資源であり、今後いつその研究の発展と実用化の拡大を期待したい。

V. 鉄鋼の水素脆化機構

座長 新日本製鉄(株)君津技術研究部
南雲道彦
副座長 住友金属工業(株)中央技術研究所
寺崎富久長

鉄鋼の水素脆性についての研究は多いが、複雑な金属組織を持つ鋼で破壊のマイクロ過程を実証的に議論するこ

とは必ずしも十分な準備ができていない。現時点では、むしろ水素脆性にたいするいろいろなアプローチをとりまとめておくことが有意義であろうと判断した。その結果は限られた時間にたいしてテーマが多くなり、折角の討論会の趣旨が十分に生かせなかつたことは申し訳なく思う。しかし参加者は会場をあふれるばかりで、この問題への関心の強さがうかがえた。統一的な見解を期待した方には不本意であつたかもしれないが、それぞれの手法での研究の現状はかなりよく整理できたのではないかと思う。講演は以下の諸氏によつて行われた。

- 討 28 トリチウムによる鋼中の水素挙動の研究
東京電機大 浅岡照夫, 東大生研 斉藤秀雄
東大 野川憲夫, 森川尚威, 生研 石田洋一
- 討 29 析出物の水素トラップ効果と水素脆化の関係
川崎製鉄技研 戸塚信夫, 中井揚一
- 討 30 高強度鋼の水素脆化割れと限界水素含有量
大阪府大 山川宏二, 京大 米沢俊一, 吉沢四郎
- 討 31 変動応力下における遅れ破壊
広島大 中佐啓治郎, 武井英雄
- 討 32 水素脆性における限界水素量の意義
新日鉄 君津技研 南雲道彦
- 討 33 水素吸収に伴う炭素鋼の塑性変形
九大 羽木秀樹, 林 安徳
- 討 34 低強度鋼の水素応力割れと金属組織
日本鋼管 技研 関信博, 小寺俊英, 谷村昌幸
- 討 35 構造用鋼の室温水素ガス脆化
日本製鋼所 大西敬三, 加賀 寿
- 討 36 水素脆化における粒界割れの支配因子
新日鉄基研 森川博文, 山本広一, 村田朋美
- 討 37 焼もどしマルテンサイト鋼の水素による粒界破壊機構
鉄道技研 松山晋作
- 討 38 純鉄単結晶における水素脆性き裂の成長
住友金属中研 日野谷重晴, 大森晴也, 寺崎富久長
- [討 28]: トリチウムを用いたマイクロオトラジオグラフは鋼中の水素の比較的強いトラップサイトを直接的に観察し得るとともに、拡散性水素の放出過程を感度よく測定できる新しい武器である。析出物の種類・形態と水素のトラップ挙動の関係、および粒界の不純物偏析に伴う水素トラップの変化が注目された。水素脆性で水素の挙動を実験的に調べる数少ない手法の一つである。試料をよく選択して脆化特性との相関がつけられることが望まれる。

[討 29]: 析出強化型の Mo 鋼および 18Ni マルエージ鋼で炭化物の析出状態と水素脆化感受性との関係を論じた。焼もどしあるいは時効温度に伴う脆化度のピークは、強度のピークよりも整合析出物が生ずる温度に一致するようである。脆化機構として整合析出物が水素をそのまわりにたくさん集め得るからだと考えている。水素脆性では転位で運ばれた水素が主役であるという考えはほぼ定着しているが、ミクロ的な破壊機構としては集まった水素の役割をさらに追求する必要がある。

[討 30] SCM 3 鋼の WOL-CT 試験によつてき裂伝播速度および K_{ISCC} を求め、これと電気化学測定法で求めた水素含有量との関係を調べた。引張強さ 150 kg/mm² 以上の高強度鋼ではき裂伝播速度、 K_{ISCC} とともに強度によらず、水素含有量のみによつてきまることが示