

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目ざされた。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

された。またき裂先端の応力分布の計算から水素の濃度分布を推定し、 K_{ISCC} と水素濃度との関係式を用いて三軸応力最大部がき裂の開始点になることを結論した。この実験は破壊力学的な観点で重要である。水素の状態、割れ形態などをふくめたミクロ的な機構提案に一つの課題を与えたといえよう。

[討31] この報告は予き裂を入れた試験片に変動応力を加えた場合のき裂伝播速度および潜伏時間を応力周期の関数として求めたものである。水素脆性は温度および歪み速度依存性を示すのが特徴であるが、この実験は変動応力によって試料内部の応力状態をいろいろな速さで変えて同様な効果を見たものといえよう。著者らは水素原子が三軸応力最大の位置の変動に追随する挙動から現象を説明している。水素脆性の kinetics の研究として興味深い。

[討32] この報告は時間がなかつたために講演は割愛した。内容は水素脆性をおこす限界水素量としてしばしば分析される全水素量、あるいは拡散性水素量を測定対象とすることへの批判である。き裂の発生・伝播に寄与する水素量としては、き裂内圧と平衡するマトリクスへの固溶水素量が本質的で、その値は試料表面の水素の逃散能できまることになる。この信頼できる測定が要望される。

[討33]：鉄鋼に多量の水素を吸収せしめると歪みが生ずることはよく知られているが本報ではカソード電流密度を変え、TEM、X線回折幅拡がり、クリープ変形などかなり定量的に調査した。TEM では初期段階で粒界近傍に転位の発生がみられ、次いで転位密度の高いクラスターの生成、き裂の発生を観察している。もちろん同一視野の変化を観察している訳ではないので、われの発生と転位、水素の関係は不明であるが、クラスター部分に偏析した水素の析出による内部応力によるものと推測している。材料による差異はこの内部応力の塑性変形の緩和の難易との解釈をしている。より明確な機構の組み立てには、報告者も述べているように不明な点も多く、また困難な課題であると思われるが、今後期待したい。

[討34]：湿潤 H_2S 環境下での鋼のわれの問題は実用的に重要な課題であり、近年多くの報告が行われている。この環境下では鋼中に多量の水素が吸蔵されるので、われ防止の観点から各種の材料因子が論じられて来た。本報では、フェライト・パーライト組織と焼もどしベイナイト・マルテンサイト組織のわれ形態について詳しく調査している。そしてこれらのわれ形態は外部応力と水素の析出による内圧下で生ずる塑性変形とそれにより生じた高転位密度域への水素の集積からわれ発生と解釈し、材料の差は塑性緩和の差と考察している。TEM 観察などの裏付けはないが考え方としては 討33 と同じであり、この種の考察が定着しつつあるようである。

[討35]：高圧水素ガス中での脆化挙動については報告の数も少なく、系統的に研究されていない。本報では高圧水素ガス環境での高張力鋼の脆化について充実した報告がなされ、他の環境で得られている水素脆化と比較されている。破壊の形態や脆化現象は極めて類似しており、水素脆化機構として同じと考えられるが、通常の遅れ破壊現象に比較して潜伏期のないことや伝播の不連続性が顕著でないことなどから律速過程が異なる可能性を

指摘している。水素侵入量としても平衡状態に比し多量の水素が認められ、これには塑性変形が重要な役割を果たすことを示した。この検討は水素脆性機構を考える上で重要である。すなわち 討 33 でも述べられているような水素の析出による内圧発生の状況を論じる際の実証にも通じるので、今後期待するところも大である。

[討36]：焼入れ焼もどし鋼の水素脆性は、一般に強度レベルが高くなれば旧オーステナイト粒界に沿ったわれが生じ顕著な脆化を生ずる。本報ではこの粒界われの材料因子として P, Mo, などの成分元素や炭化物, BN など粒界の性質に影響を及ぼす諸因子について論じ、粒界脆化は粒界での P の偏析や微細析出を低減することにより高上することを述べている。報告者らは腐食環境との反応による水素の侵入と材料因子については従来より系統的な調査をしており、これらの知見を基に合金設計においては腐食反応も考慮した設計が必要であることを指摘している。鋼の高強度化が妨げられている重要な因子の一つに本報で論じられた粒界われがあるが、水素脆性と構造や塑性変形など基本的な研究の進歩が待たれる分野であり、討 37 もこれに関係した一つの試みである。

[討37]：高強度材料における粒界遅れ破壊機構について、破壊に要する塑性仕事 (γ_p : 見かけの表面エネルギー) の計算から遅れ破壊感受性に及ぼす強度の役割を論じた報告である。モデルとして粒界炭化物への転位の集積によるき裂の発生と伝播を採用し水素の影響として転位集中部のき裂内の内圧の増大、凝集力の低下をパラメータとしてとり入れている。 γ_p の計算を通じてき裂の拡大条件が強度の関数として得られている。このような議論を通じて高強度材での粒界われ、低強度材でのマイクロボイド結合われの機構が導出され、従来の実験事実の説明ができることが示されており興味深いアプローチである。またこのような議論を通じて結晶粒度の論議や水素量の影響も論じられようが、より正確な議論をするためには偏析や粒界構造、水素量などの凝集力への影響を直接的に明らかにすることが必要であろう。

[討38]：この報告も時間がせまり、発表を割愛せざるを得なかつた。内容は以下のとおり。低強度材料の水素脆性き裂の発生はかなりの塑性変形を生じて後発生するものであり、発生までの塑性変形の状態に支配される。本報はできるだけこの影響を少なくし、き裂の伝播と転位の関係を調べるため予き裂付鉄単結晶を用いて結晶方位による差を調べたものである。

全体をとおしての感想として

1) “機構”を論ずるにはミクロ的な evidence がもつと必要と思われる。構造物設計上のクライテリアと機構とは区別していく必要がある。

2) 多くの実験事実が違った観点から報告されており重複も多い。そろそろ整理されるべきだと思う。またこれからは一つの研究は必ず他の観点および事実と対比されるべきであろう。

3) 鉄鋼特有の破壊形態の変化にふれた発表が少なかつたのが残念だつた。

今回の討論会は講演者の蓄積がありすぎたためか、大部分の発表の時間延長がいちじるしく、二つの講演を割愛し、また討論時間も不足であつた。司会の不手際をお詫びする次第である。