

# 高強度鋼の遅れ破壊特性評価

遅れ破壊(delayed fracture)とは、静荷重下にて材料を利用する場合に、時間的な遅れをとめない、(すなわち使用はじめてから相応の時間経過の後)材料が破壊する現象である。この際、遅れ破壊とは、特定の素材を対象とした現象ではなく金属、無機、有機等にかかわらず、同様の破壊現象は生じうる。

ただし、一般的には鋼、特に高強度鋼の水素起因のぜい性破壊現象(hydrogen embrittlement)について“遅れ破壊”と称する場合が多い。当社においても、輸送機用あるいは化学プラント用等の広範囲の用途、鋼種を対象に、従来より、評価を実施している。

## 遅れ破壊の特徴

鋼の遅れ破壊現象は、航空機用めっきボルトの破損事故などを契機に、1950年代から良く知られるようになった旧知の現象である<sup>1)</sup>。一方、その破壊機構の詳細については、諸説あるが、現在でも明快な定説はなく、研究が続けられているのが実状である。

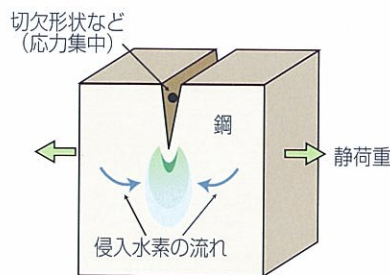
しかしながら、見かけ上の特徴として、下記の各内容を列挙することができる。

- ①実使用環境中での腐食反応による発生水素、もしくは、製品の製造工程(酸洗、電気めっきなど)での発生・鋼中侵入水素がぜい化要因となる。
- ②侵入した水素は、使用部材中の応力集中部に拡散移動・濃化するため、極微量であってもぜい化原因となりうる。

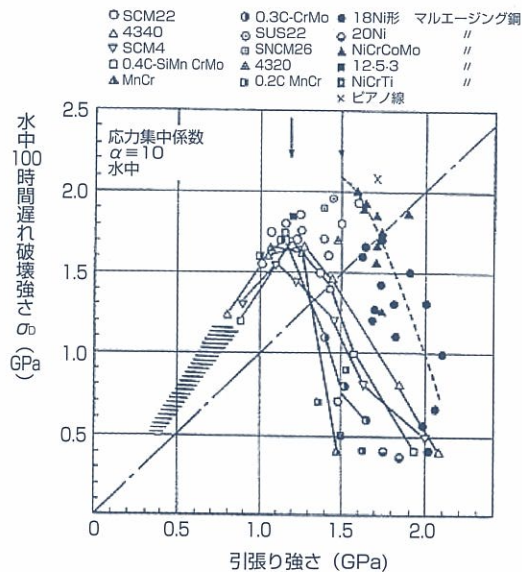
[注] 原因となる水素は、一般的に“拡散性水素”とも呼称される。

- ③鋼であれば鋼種(成分組成)によらず割れ感受性を有する。また、割れ感受性は強度の高い鋼ほど著しい<sup>2)</sup>。

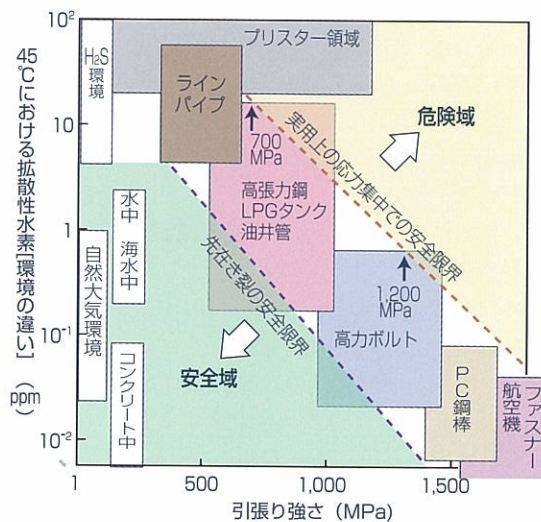
すなわち、①～③の各内容を総合すると、鋼の引張強さと使用環境・荷重により、鋼を利用できる見かけ上の条件は決定してしまうことになる。鋼の強度と使用環境による、遅れ破壊危険性の関係について図示された例を第3図に示す<sup>3)</sup>。



第1図 鋼中水素の応力集中部への拡散・濃化



第2図 耐遅れ破壊強さに及ぼす引張強さレベルの影響<sup>2)</sup>



第3図 遅れ破壊の危険性に対する鋼の強度と環境の厳しさの関係<sup>3)</sup>

1) 松山晋作：遅れ破壊，  
日刊工業新聞(1989)，  
p.1.

2) 山本俊二ほか：R & D  
神戸製鋼技報 Vol.18，  
(1968),No.3,p.93

3) 松山晋作：遅れ破壊，  
日刊工業新聞(1989)，  
p.70.

## 近年の遅れ破壊対策の考え方

前節に記載した内容を踏襲すれば、鋼の遅れ破壊対策としては、例えば第3図に示した指標などを参考にし、鋼の利用を制限することが必要となる。すなわち、新規な用法を開拓する余地はないように思われる。

しかしながら、輸送機軽量化などの目的のため、鋼部材の高強度化要求は強く、材料開発・部材設

計の技術者としては、さし迫る要求に対処することが望まれる。

そこで、第3図の縦軸(拡散性水素量)を改めて見直すと、遅れ破壊の要因である水素の量は、例えば自然環境下(腐食が水素の発生原因)での数値は、約0.1ppm以下~1ppmと非常に広い。すなわち、特定の部材について、使用する環境を

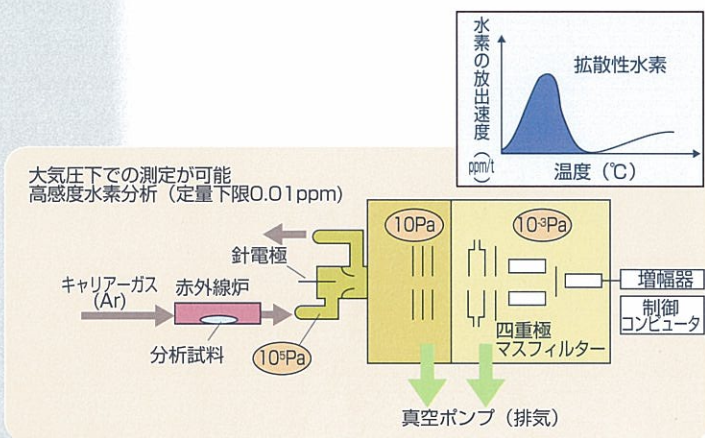
絞ることが可能であれば、特定の鋼種、使用荷重について水素量にて規定した割れ限界値（割れ限界水素量）と対比することにより、より限定された条件下での使用可否の判断が可能となる。

言い換えれば、鋼種A、荷重a kgfについての割れ限界水素量が $C_{th}$ (=限界)のとき、環境からの水素侵入量 $C_{環境}$ が $C_{環境} \ll C_{th}$ であれば、鋼種Aは荷重a kgf以下にて利用しても遅れ破壊の危険性はない（正確には非常に少ない）と判断することができる。

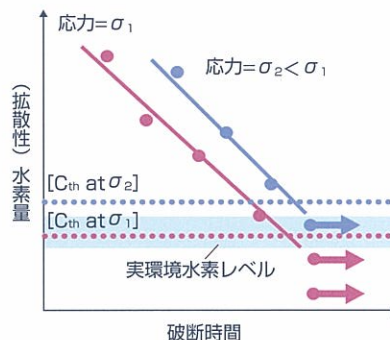
このような割れ限界水素量の考え方は、近年、（拡散性）水素分析技術が高精度化した結果、実

現可能な技術として普及しつつある。当社としても、大気圧イオン化質量分析計(Atmospheric Pressure Ionization Mass Spectrometer)<sup>4)</sup>を活用することにより、各種鋼の割れ限界水素量を判定し、実環境中での水素吸収量との対比から、耐遅れ破壊性の判定を実施している。

第4図、第5図に大気圧イオン化質量分析計の概念図および、割れ限界水素量の概念を活用した、耐遅れ破壊性評価のイメージ図を示す。



第4図 大気圧イオン化質量分析計の概念図<sup>4)</sup>



第5図 割れ限界水素量による耐遅れ破壊性の評価（定荷重あるいは定ひずみ試験の結果イメージ）

応力 $\sigma_1$ では割れ限界水素量 $C_{th} >$ 実環境水素レベルであり、鋼は遅れ破壊を生じる可能性が高い。 $\sigma_2$ では使用可能と判断できる。

## C-3 評価手法

実験室的に、高強度鋼の割れ限界水素量を判定する手法を以下に概括する。

### 水素チャージ方法

強度評価が可能な形状（板状もしくは丸棒）に機械加工した試験片は、所定の水素量を実験室環境から導入する必要がある。

具体的な手法としては、①酸浸漬、塩水噴霧など、素材を促進腐食環境に曝す、②電気化学的方法により試料表面を水素ガス環境に曝す（＝試料表面を陰極として水の電気分解を行う）、③試料を水素ガス雰囲気中に曝す、の各方法がある。

当社としては、いずれの方法でも実施可能であるが、水素のみ任意量を試料中に導入（チャージ）する方法としては、②の電気化学的方法が、“設

備的に簡易である”、“電流密度制御により水素量を制御できる”、“強度評価との並行実施が可能である”などの理由により有利である。ただし、実環境を想定する必要がある場合には、他の方法を取らざるをえない。

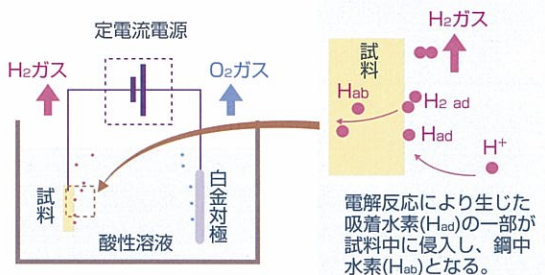
例として、電解法による水素チャージ方法を第6図に示す。

### 割れ感受性の評価方法

水素チャージした、あるいはチャージ処理中の試料に対し、荷重を負荷することにより割れ感受性の評価を実施できる。

①定荷重式、②定ひずみ式、あるいは③低ひずみ速度引張試験(Slow Strain Rate Test)などが代表的な方法となる。このさい、①、②評価では所定の条件下での破断時間を評価することとなる。一方、③評価は、水素の拡散・濃化速度に応じ、非常にゆっくりとした速度にて試験片を強制破断する評価方法であり、破断強度および伸びの評価となる。

定荷重式・定ひずみ式の具体的な手法としては、てこ式試験装置、ループ型装置、4点曲げ試験などがある。実環境下での割れ時間を模擬する目的には、この種の評価が有効であるが、評価期間が長期となる可能性が高い。従って、鋼種をスクリーニングする等の目的に対しては、SSRT試験に



第6図 電解法による水素チャージ方法

よる評価がより有効と考えられる。

いずれにせよ、目的に応じて、適宜、方法は選択する必要がある。

また、鋼の遅れ破壊要因としては、水素要因以

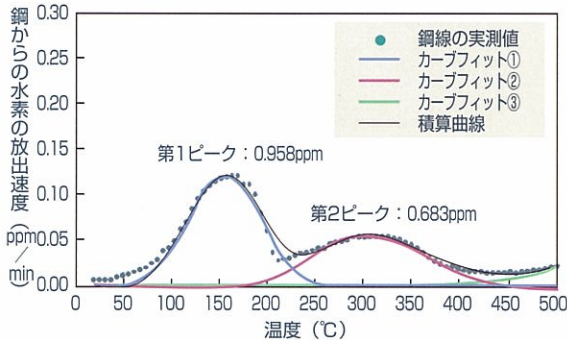
外にも、材料的なさまざまな要因も加わる。破面の解析、成分・硬さの精密測定、組織観察などの評価も併せて実施し、現実の割れ事例と対比することが重要である。

## 拡散性水素の考え方

### 水素の存在状態の評価

遅れ破壊に影響する水素は、常温状態であっても鋼中を比較的速く濃度拡散すると考えられている。一方、鋼中水素としては、常温状態にて鋼中を拡散移動するものばかりではなく、ほとんど動かない水素も含まれる。

高強度鋼線に対して、水素チャージ（電解法）後、水素分析した例を第7図に示す。



第7図 高強度鋼線材の水素チャージ後分析結果

第7図では、約150°Cに水素放出を有する第1ピークと約300°C強に放出ピークを有する第2ピークとが認められる。

第7図のような例は鋼種により生じうるが、一般的には、第2ピークの水素は遅れ破壊には直接的には関与しない安定な（トラップされた）水素であると解釈されている<sup>5)</sup>。

すなわち、割れ限界水素量を判定する場合には、鋼中における水素の存在状態にも注視し水素量を定量する必要がある。従って、複数の水素放出ピークが混在する場合には、正規分布関数などを利用したカーブフィッティング処理により“拡散性水素量（＝第1ピーク）”のみを定量する必要がある。第7図には、カーブフィッティング処理による定量の例も併せて図示した。

### 遅れ時間の意味

高強度鋼が実環境にて遅れ破壊を発生する原因と考えられる水素は、通常、鋼の腐食反応により生じる。この場合、破壊時間の遅れ要因としては、①腐食発生までの時間、②発生した水素が鋼中に侵入する（反応）時間、③水素が拡散により割れ起点部へ濃化する時間、の3種を考慮することができる。

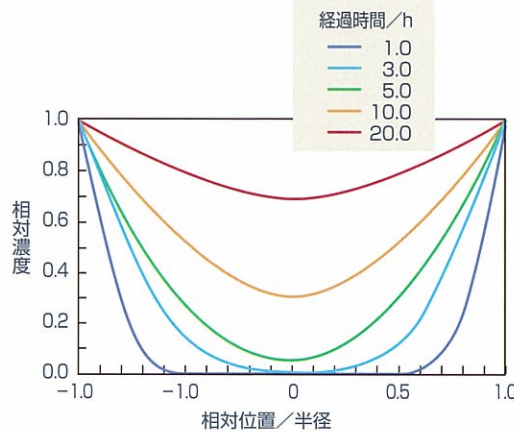
実験室評価に限定して考えれば、①の要因は、

実験初期から腐食模擬環境に試験体を曝すため無視できる。また、②の過程は、非常に短いものとして考えられている<sup>6)</sup>。

従って、破壊の遅れ時間は拡散性水素が鋼中を拡散する時間によって解釈することが可能であり、試験体全体が平衡状態となってしまうと、新たな破壊が発生する危険性を考える必要はなくなる。すなわち、[最大破断時間]=[水素の平衡到達時間]と判断できる。

ただし、鋼中水素の拡散の速さ（拡散係数）は鋼種により大きく異なることが知られており、実験により求める必要がある。この場合、評価法としては種々あるが、そのための別途、専用の評価を実施しなくとも、前記した水素分析結果から解析することにより拡散係数を求めることも可能である<sup>7)</sup>。

拡散方程式の解を利用することにより、円柱材への水素の浸透状態（濃度分布の時間変化）を推定した例を第8図に示す。



第8図 直径10mmの円柱への水素の浸透状態（濃度分布の時間変化）：拡散係数  $D=1 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$  とした

こうした、解析は、各種の実験条件の設定のほか、実環境中にて破断した時点での材料中における水素濃度の推定（破損原因調査）に活用することが期待できる。

遅れ破壊現象の一種としては、電気めっき処理によるぜい化現象がある。また、熱処理による焼割れ現象に水素が関与しているという考えもある。

本記事では紙面の限りのため、こうした関連現象について記載はできなかったが、当社では、種々の材料のぜい化割れ現象に対応した知見を多く有しており、読者の皆様からの課題のご提示をお待ちしたい。

[材料評価事業部 腐食防食技術部 岩田多加志]

5) 櫛田隆弘：(社)日本鉄鋼協会 高強度鋼の遅れ破壊研究会資料 “遅れ破壊の新展開”、(1997),p.35. (社)日本鉄鋼協会

6) J.McBreen et al.: Proc. of Conf., Fundamental Aspect of SCC, Ohio State Univ. 1969, p.51. NACE.

7) 岩田多加志ほか：(社)日本鉄鋼協会 高強度鋼の遅れ破壊研究会資料 “遅れ破壊の新展開”、(1997),p.47. (社)日本鉄鋼協会