

## 遅れ破壊に強い高強度鋼の創製に大きな期待

- チタン炭化物を制御することにより、有害な水素をトラップする性能を大幅に向上 -

平成15年3月24日

独立行政法人物質・材料研究機構

### [ 概要 ]

独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：岸 輝雄）超鉄鋼研究センター金相グループの原 徹主任研究員らのグループは、チタンを含む高強度鋼の水素トラップの特性と微細組織変化を詳細に調査した結果、水素との結合エネルギーを熱処理によって簡単に換えられる水素トラップ物質となるチタン炭化物を見出すことに成功した。さらに、このチタン炭化物の水素との結合エネルギーは粒径によって異なることを明らかにした。

高強度鋼に異なる特性を持つ2種類の水素トラップサイト<sup>1)</sup>を作製し、その分布を制御することにより、使用される環境に応じた遅れ破壊<sup>2)</sup>に対する耐性の高い高強度鋼を創製できると考えられる。微小なチタン炭化物は非常に高い材料強化能を持つことから、現在目標としている遅れ破壊に強い2000MPa（約200kg/mm<sup>2</sup>）以上の引張強度を持つ高強度鋼の創製に重要な役割を果たすものと期待される。

本研究成果は、3月28日に開催される日本鉄鋼協会春季講演大会で発表予定である。

### 1. 研究の背景

引張強度が1200MPaを超えるような高強度鋼の開発にとって最大の課題は遅れ破壊の克服である。遅れ破壊は、使用環境から水素が鉄鋼材料に侵入し、応力集中部に集積し材料を脆化させる現象であり、強度が高くなればなるほど遅れ破壊感受性は増大する。耐遅れ破壊性を向上させるために、これまでも種々のアプローチがなされており一定の成果を挙げてきたが、従来の手法では高強度化に限界があった。そのため最近では、適当な水素トラップサイトを鉄鋼材料中に分散させ、材料自身を脆化させることなく水素を捕捉して応力集中部への水素集積を避けることが考えられている。

今回の研究で用いたチタン添加鋼に析出するチタン炭化物は、従来は水素との結合が非常に強いトラップサイトになると考えられており、一旦水素をトラップすると500以上の高温に上げないと水素が脱離されないとされていた。今まで、水素との結合が比較的弱く、トラップした水素を100~200程度の比較的低い温度で放出するトラップサイトの存在はチタン炭化物では報告されていない。我々は、使用目的に応じて最適な水素トラップを設計することが耐遅れ破壊性を飛躍的に向上させることにつながるものと考え、高強度鋼における水素トラップの特性と微細組織に関する研究を進めてきた。

## 2. 今回の研究成果

これまで、水素トラップとして析出物を利用し、水素と水素トラップサイトとの結合力を自由に変化させるために、母相と析出物との界面の原子の整合性に注目してきた。今回は、チタン添加鋼の熱処理方法を変化させることによって、粗大なチタン炭化物（平均直径約 2  $\mu\text{m}$ ）とナノサイズのチタン炭化物（直径約 2 nm の板状）を 0.42%C-0.30%Ti 鋼に分散させた（図 1）。粗大なチタン炭化物はフェライトマトリックスと非整合関係を、ナノサイズチタン炭化物は整合関係を持つように析出した。非整合チタン炭化物<sup>3)</sup>は焼戻し熱処理を施す以前より存在しているが、焼戻し熱処理によって吸蔵水素量は変化を受け、焼戻し熱処理温度が 500 のときに最大値を示した。また、整合チタン炭化物<sup>3)</sup>は焼戻し熱処理温度が 500 付近から析出し始め、550 のときに最大の吸蔵水素量を示した。図 2 に 550 で焼戻した試料の昇温脱離水素分析<sup>4)</sup>の結果を示す。横軸は昇温分析の温度、縦軸は水素放出速度を表している。低温側に現れているピークがナノサイズの整合チタン炭化物にトラップされていた水素の放出であり、高温側に現れているピークが非整合チタン炭化物にトラップされていた水素の放出に相当する。大きさが 2 nm という非常に微細な炭化物をフェライトマトリックスと整合して析出するようにしたことで、チタン炭化物が、これまで報告がなかった比較的弱い水素トラップとして働くことが明確に現れている。

水素トラップサイトと水素との結合力を示す水素放出ピーク温度は、焼戻しの条件を変えることによって整合チタン炭化物では 120~190 の範囲で変化し、非整合チタン炭化物では 600~740 の範囲で変化する。このように、焼戻し条件を変えることによりチタン炭化物の形状と大きさを変化させることができ、その結果、水素トラップ能を大きく変化させ得ることを確認した。このことは、どのような析出物をどの程度析出させるかを選択することによって、目的に応じた水素トラップサイトを作り込むことができる可能性を示している。

## 3. 研究の意義と今後の展開

微細な整合チタン炭化物は非常に大きな強化能を持つことが知られてきた。今回の成果で、微細な整合チタン炭化物は大きな強化能を持つと同時に高い水素トラップ特性を持ち、なおかつ水素との結合力を変化させ得ることを見出した。これは高強度鋼開発において、チタン炭化物を利用して強度を上げるだけでなく、水素脆性に起因する遅れ破壊を抑制できることを示している。もう一つの意義として、チタン炭化物と水素との相互作用エネルギーを非常に幅広い範囲で変化させ得ることを明確にしたことで、使用環境に応じた最適な水素トラップサイトを設計する指針が得られた。これらの指針は、温度や湿度の変化のある環境に用いる高強度ボルト等において、最も有効な遷移金属<sup>5)</sup>炭化物の水素トラップ探索においても有用である。

## 用語説明

### 1) 水素トラップサイト

金属の中に存在する、水素を引き付ける力を持つ結晶欠陥。例えば、結晶粒界、転位、析出物および母相-析出物界面などが水素トラップサイトとなる。水素トラップとも呼ぶ。トラップサイトの種類によって水素との結合力が異なる。

### 2) 遅れ破壊

引張強さ以下の負荷応力のもとで、ある時間経過後に突然破壊する現象。使用環境から鋼材に侵入する水素によって引き起こされる。遅れ破壊は強度が高くなるほど起こりやすくなり、特に引張強さ 1200MPa 以上の高強度鋼で顕著になる。

### 3) 整合析出物（整合チタン炭化物）と非整合析出物（非整合チタン炭化物）

整合析出物とは、母相との間に原子が一對一に繋がっている界面を持つ析出物である。母相との結晶格子の寸法が違って無理をして接合するため、析出物の周りに大きな応力場が作られる。一方、非整合析出物とは、母相との界面に原子の対応が乱れた析出物である。

### 4) 昇温脱離水素分析

一定の昇温速度で水素を吸蔵した試料を加熱し、温度に対して水素の放出速度スペクトルを四重極質量分析やガスクロマトグラフィーで測定する方法である。この分析方法により水素の吸蔵量、トラップサイトとの結合力などを測定することができる。昇温中にいくつかの水素放出のピークが現れるが、比較的低温（200 程度まで）に現れるピークが拡散性水素のもので、高温（500 程度以上）で現れるものが非拡散性水素のものである。

### 5) 遷移金属

Ti（チタン）、V（バナジウム）、Cr（クロム）、Nb（ニオブ）、W（タングステン）などの金属元素を指す。

### （問い合わせ先）

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1 - 2 - 1

独立行政法人物質・材料研究機構

広報・支援室 TEL：029-859-2026

### （研究内容に関すること）

独立行政法人物質・材料研究機構

超鉄鋼研究センター 金相グループ 主任研究員 原 徹 TEL：029-859-2124

同上 副センター長 津崎兼彰 TEL：029-859-2170

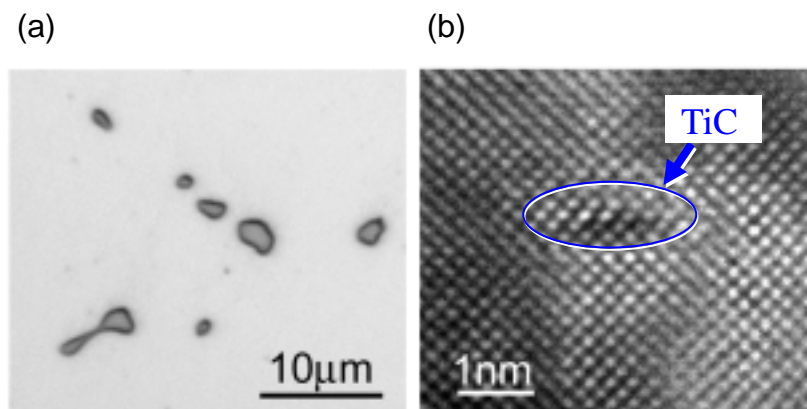


図1 粗大な非整合チタン炭化物の光学顕微鏡像(a)と微細な整合チタン炭化物の高分解能格子像(b)。

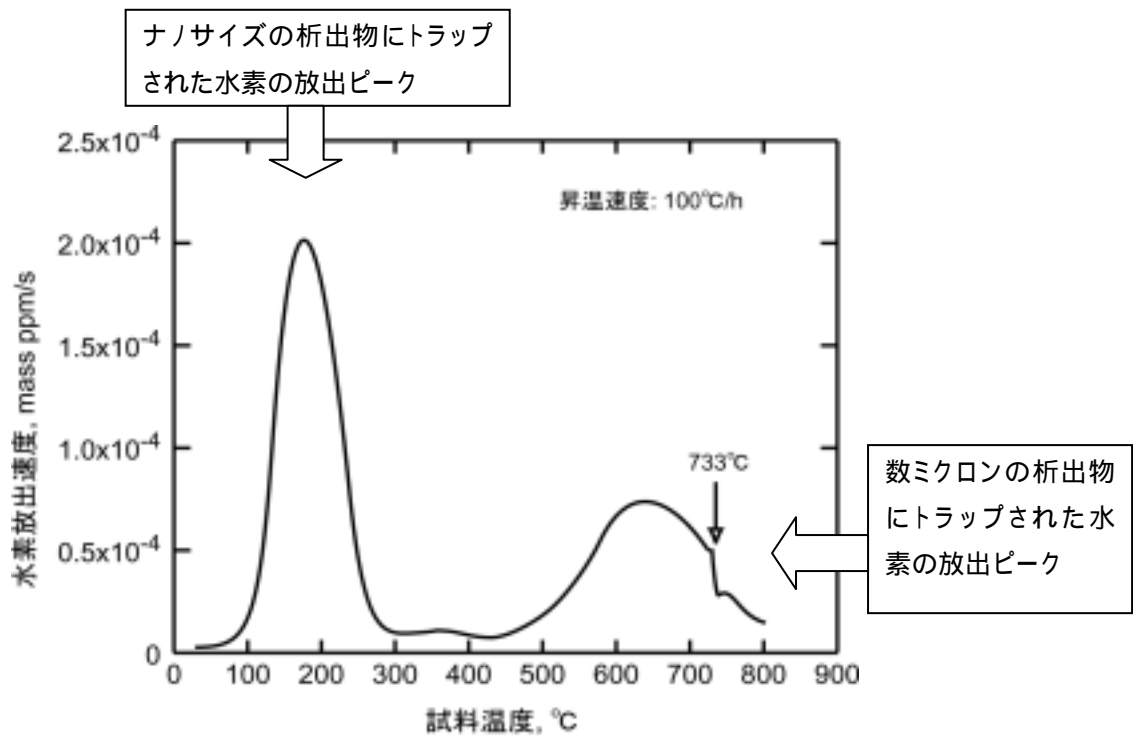


図2 550 焼戻し処理を施した0.42%C-0.30%Ti鋼の昇温水素分析。