

650 で強度 2 倍・寿命 100 倍の溶接構造体向け耐熱鋼開発に成功

- 地球温暖化防止の鍵となる夢の発電プラント実現に向け前進 -

平成 14 年 5 月 16 日

独立行政法人物質・材料研究機構

1. 概要

独立行政法人物質・材料研究機構超鉄鋼研究センターの阿部富士雄、種池正樹らは、高効率の発電に必要なタービン入口蒸気条件 650 の環境下で、従来鋼と比較して、強度約 2 倍・寿命約 100 倍となる耐熱鋼の開発に成功した。今回開発した耐熱鋼は、溶接性および強化に重要な析出物をナノサイズ化して結晶粒の粒界付近の組織強化とそれを長時間維持させるという新しい材料設計により見出されたものである。同材料については既に 1 万時間のクリープ試験（注 1）を完了し、より長時間の試験を継続中である。

開発された耐熱鋼を 650 発電プラントに使用すると、現在のプラント（538、設計発電端効率約 40%）に比べ、発電効率が約 5%向上し、発電所 1 基あたり石炭に換算して年間約 13 万トン、自動車に換算すると年間約 16 万台分（年間 1 万 km 走行時）の二酸化炭素の排出量が削減されるので、省資源化、地球環境の保護など社会的・経済的に様々な波及効果をもたらすことが期待される。

本研究成果については、5 月 22 日（水）～ 24 日（金）にかけて開催される第 1 回超鉄鋼国際会議（つくば国際会議場：つくば市竹園）にて発表予定である。

2. フェライト系耐熱鋼（注 2）に関する研究の必要性

現在我が国では、全電力需要の約 60%を化石燃料を使った火力発電により供給している。地球温暖化防止に向けての二酸化炭素の排出制限と資源節約の観点から、火力発電プラントのさらなる発電効率向上が近年ますます強く求められており、タービン入口蒸気条件 650・350 気圧の超々臨界圧発電プラント（注 3）の実現が望まれている。

650 級超々臨界圧発電プラントは、1980 年に通商産業省（現在は経済産業省）の支援のもとで（株）電源開発を中心として計画されたが、高温で長時間使用可能な高強度耐熱鋼がなかったため、現在まで建設されていない。耐熱鋼には様々な特性が要求されるが、最も重要な特性は高温クリープ強度である。特に、これまで 620 前後が使用限界温度であると言われてきたフェライト系耐熱鋼の限界を破り、高温クリープ強度を飛躍的に向上させる材料開発が日米欧で熾（し）烈に進められている。当機構では、平成 9 年度より強度 2 倍・寿命 2 倍の新世紀構造材料（超鉄鋼材料）を開発するための研究を鉄鋼メーカー・重工メーカーと一体となって実施している。その研究では、650 級超々臨界圧発電プラントのボイラ用フェライト系耐熱鋼の研究開発を行っており、既に従来鋼に比べ強度約 1.5 倍・寿命約 10 倍の耐熱鋼を開発している。しかし、溶接継手部も含めてさらなる高強度化、長寿命化が期待されてきた。特に、火力発電プラントのボイラ（図 1）は厚肉パイプを溶接して使用するので、溶接しても割れにくく、しかも高温で長時間にわたって溶接継手構造物が

健全であることが必要とされる。溶接継手構造物を高温で長時間使用すると、溶接金属と母材の間に生じる溶接熱影響部の結晶粒の細かい細粒部で脆性的に破断する場合が多いので、母材以上に結晶粒界近傍の組織安定化が必要になっている（図2）。

3．研究開発の経緯

高温・応力下で長時間使用される耐熱鋼の寿命を決める要因として最も大きいのは材料中に存在する析出物による析出強化である。析出強化は材料中の析出物の粒子間距離に反比例するため、多数の析出物を微細に析出させることが必要である。従来のフェライト系耐熱鋼では、材料内部組織の結晶粒界上に鉄 - クロム系の炭化物が析出し、この炭化物で析出強化の大部分が図られている。しかし 650 もの高温で材料を長期間使用すると、炭化物は凝集粗大化し（注4）、粒子間隔が広がるため析出強化が大幅に低下してしまう。そのため、これまでの材料開発では析出物を高温で長時間まで安定化し粗大化しにくいようにするための努力がなされてきた。例えば昨年度当機構より発表されたボロン添加鋼は、ボロンを微量添加することにより、炭化物を微細なままで長時間維持することで、クリープ破断寿命を従来鋼に比べ 10 倍程度に改善したものである。従来、材料内部組織の結晶粒界は、炭化物で強化するという考え方が常識であったが、炭化物は元々サイズが大きい上に高温使用中にさらに粗大化しやすいため、650 の高温では炭化物による析出強化には限界がある。

そこで、析出強化粒子を抜本的に見直し、ナノサイズでしかも長時間まで安定な窒化物で結晶粒界の強化を図ることを考えた。一方、溶接しても割れにくくするには炭素濃度を低くして焼き入れ硬さを低くすることが効果的であると知られている。また、溶接熱影響部の細粒部には多数の粒界が含まれるので粒界組織の安定化には窒化物を利用することを考えた。以上のことから、溶接構造物の母材部のみならず溶接継手部の高強度化、長寿命化や溶接性向上には、炭素濃度を極力減らし、微細な窒化物で結晶粒界の強化を図るのが最適と考えた。

4．今回の成果

今回の開発は、炭素濃度を極力減らした上に、ナノサイズの析出物で結晶粒界近傍組織を強化しそれを長時間まで維持させるという、従来にない新しい材料設計思想によるものである（図3）。

具体的には、9%Cr-3%W-3%Co-VNb-N 成分のフェライト系耐熱鋼を基本組成とし、炭素添加量をできるだけ低減することで従来析出強化粒子として利用されてきた炭化物を排除し、ナノサイズで結晶粒界に微細に析出する窒化物のみを析出強化粒子として利用したことが特徴である。従来、炭素は鋼を強靱化するのに必要不可欠であるとされ、実際炭化物を生成するなどして鋼の強靱化に大きく寄与している。しかし、フェライト鋼の材料内部組織の結晶粒界上に析出する炭化物は粗大化しやすいため数万時間を超える長時間域では強化効果が低下してしまう。そこで、より高温安定な析出物として MX と呼ばれる主にニオブ、バナジウムで構成される窒化物（VN, NbN）に注目した。炭化物は熱処理時に粒径数百 nm の大きさで析出するのに対し、MX 窒化物は数 ~ 20nm 程度と微細に析出させることができ、高温使用中に粗大化しにくい。従来鋼では、炭化物が結晶粒界上に先に析出

し、MX 窒化物は結晶内部に析出するため、MX 窒化物は主に結晶内部の強化に利用されてきた。そこで、添加炭素量をできるだけ低減することで、結晶粒界上に析出する炭化物を無くし、MX 窒化物を粒界上にも析出させることとした。開発された新フェライト鋼は、結晶粒界上にナノサイズの微細な MX 窒化物が多数析出している（図 4）。このナノ窒化物強化鋼のクリープ強度は従来鋼に比べ、強度 2 倍・寿命 100 倍という驚異的な強度を有している（図 5）。一方、従来鋼に比べて炭素濃度が非常に低いため、焼き入れ硬さは格段に低いことが確認され（図 6）、溶接性についても従来鋼より優れていることが予想される。

以上から極低炭素化でナノ窒化物強化を行うことにより 650 級超々臨界圧発電プラントの溶接構造物実現に向けての大きな前進が得られた。

5. 今後の展望

今後は、厚板や厚肉パイプを製造し溶接性や溶接継手のクリープ強度の試験も行い、溶接部も含めたプラント構造物全体の高強度化・長寿命化を図る材料設計指針を確立するとともに、工業化する上で必要となる大径厚肉鋼管製造加工性(注 5)、長時間クリープ強度、高温水蒸気中耐酸化性、疲労特性、靱性などの諸問題を民間企業と連携して取り組むことで、最終的には 650 級フェライト系耐熱鋼の工業化の道筋を示したいと考えている。

(問い合わせ先)

独立行政法人物質・材料研究機構

広報・支援室 TEL：0298-59-2026 FAX：0298-59-2017

(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 耐熱グループ

阿部富士雄 TEL：0298-59-2215

種池 正樹 TEL：0298-59-2263

<用語解説>

(注1) クリープ

鉄鋼材料に一定応力を加えたままにしておくと、それが引張破壊強度以下であっても時間とともに変形が進んでついには破壊する。この現象をクリープと呼ぶ。長時間の使用を前提とする耐熱鋼において最も重要な特性は高温クリープ強度であり、10万時間(約11年半)のクリープ破断強度によって耐熱鋼の性能を比較することが多い。

(注2) フェライト系耐熱鋼

タービンやボイラなど、高温で使われる鉄鋼材料を耐熱鋼と呼ぶ。耐熱鋼にはフェライト系(マルテンサイト系も含む)とオーステナイト系の2種類の材料がある。フェライト系耐熱鋼の使用限界温度はこれまで620前後であると言われてきたが、フェライト系耐熱鋼はオーステナイト系耐熱鋼に比べて安価で強度が大きく、また熱膨張率が小さく熱伝導率が高いなど、大型部材に必要な特性に優れているため、限界を超える性能の向上が要求されている。1997年に旧金属材料技術研究所が650級超々臨界圧発電プラント用フェライト系耐熱鋼の開発を開始して以来、1998年にはヨーロッパEU15ヶ国参加による国レベルのフェライト系耐熱鋼開発プロジェクト(COST 522)が開始された。さらに2001年よりアメリカでもオークリッジ国立研究所を中心としたフェライト系耐熱鋼開発プロジェクトが開始されるなど、増大する研究ニーズに対応して、各国が高強度フェライト系耐熱鋼の開発を推進している。現用鋼T91は中部電力川越発電所主蒸気管(600)等で使用されており、現在用いられている最高性能のフェライト系耐熱鋼P92は620~630級プラントで現在実証試験中である。P92は日本で開発された耐熱鋼であり、この分野で日本は世界をリードする立場にある。

(注3) 超々臨界圧発電

超々臨界圧発電とは、タービン入口蒸気条件565・240気圧以上の火力発電をいう。水は大気圧(1気圧)の下では100で気体の水蒸気になるが、374・218気圧を超える高温・高圧下では液体と気体の区別のなくなる状態になり、この条件を水の臨界点と呼んでいる。火力発電所では高温・高圧の水蒸気によってタービンを回して発電するが、発電効率を高めるために次第に水蒸気温度・圧力の高いプラントが建設されるようになった。1960年代以前は170気圧程度の臨界圧以下の圧力(亜臨界圧)で発電が行われていたが、エネルギー問題に対応するため1960年代末にタービン入口蒸気条件540・240気圧の超臨界圧発電プラントが登場し、現在ではさらに高温・高圧の600・260気圧の超々臨界圧発電プラントも建設されている。設計発電端効率は亜臨界時代の30%から超臨界時代に至って40%と大幅に向上し、最新の超々臨界圧プラントでは42%に達している。しかし近年、地球温暖化防止のための二酸化炭素の排出制限といった課題が発生し、発電プラントのさらなる効率向上を目指した研究が世界的な規模で推進されている。650・350気圧級超々臨界

圧発電プラントの計画は約 20 年前に既にあったが、高温で長時間使用可能な高強度材料の開発が問題となっていた。

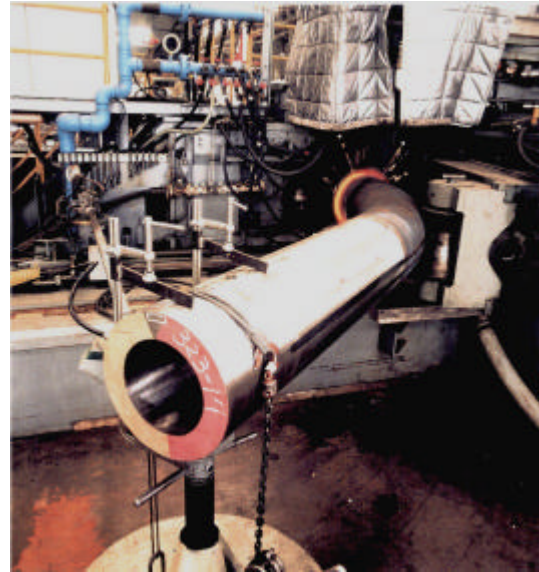
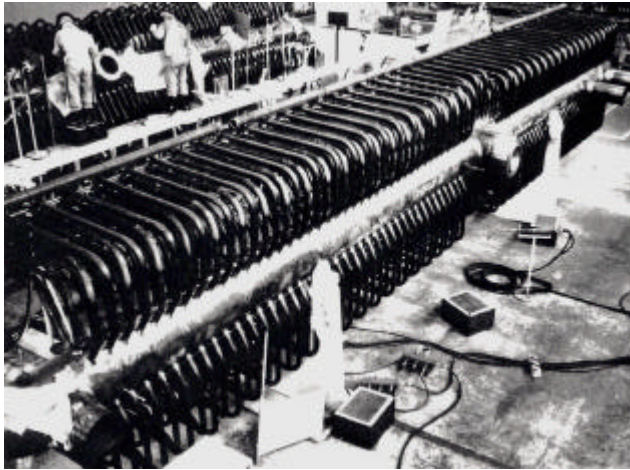
(注4) 析出物の粗大化

材料を組織変化が大きくなるような高温で保持すると、材料内部に析出した析出物は、小さい物がより小さくなって消滅し、大きい物がより大きく成長し、微細に分散して存在していた析出物が、大きくまばらに存在した状態になる。これが一般的にオストワルド成長と呼ばれる粗大化現象である。

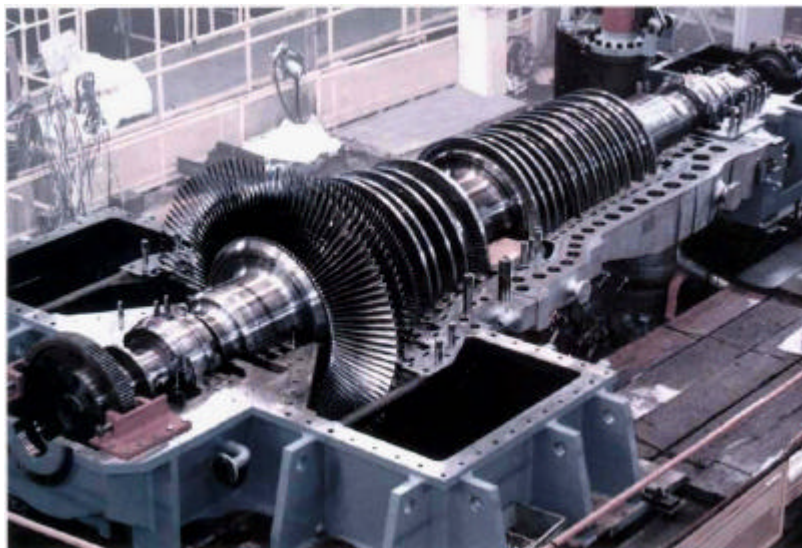
(注5) 大径厚肉鋼管製造加工性

大径厚肉鋼管とは通常外径 300mm 以上、肉厚 30mm 以上の大型鋼管パイプのことを言い、工業化においては管製造のための押し出し加工性や管の曲げ加工性が良いことが重要である。

火力発電プラント



(管寄せ) ボイラ系 (主蒸気管)



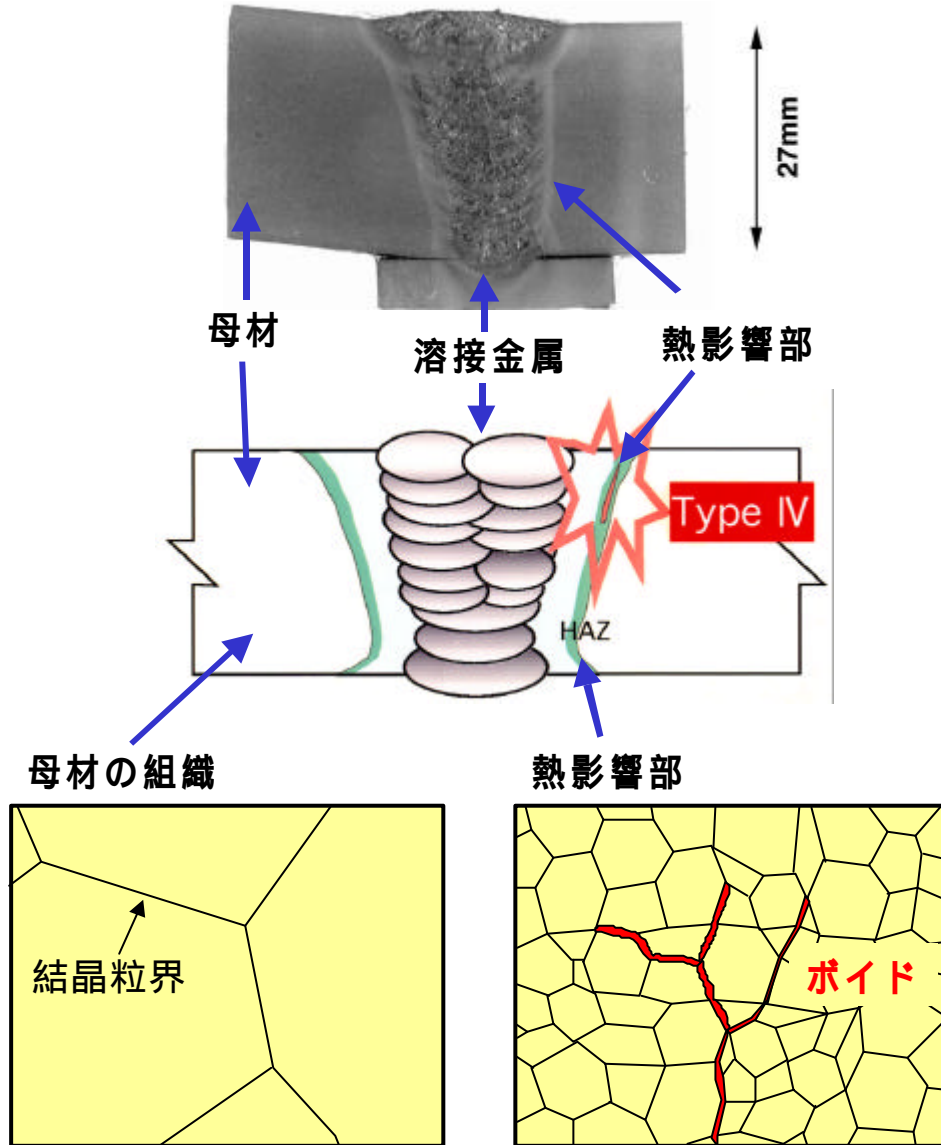
タービン・ローター

図1 現在使用されている火力発電プラント用のボイラとタービン・ローター

溶接継手のクリープ寿命

熱影響部 (HAZ) の細粒域が タイプ IV 劣化を引き起こす

溶接継手の断面



熱影響部の細粒域にポイドが多数生じ、クラックになる。

結晶粒界組織の強化、安定化が必要！

図2 従来溶接継手構造物の溶接金属と母材の間に生じる熱影響部の結晶粒

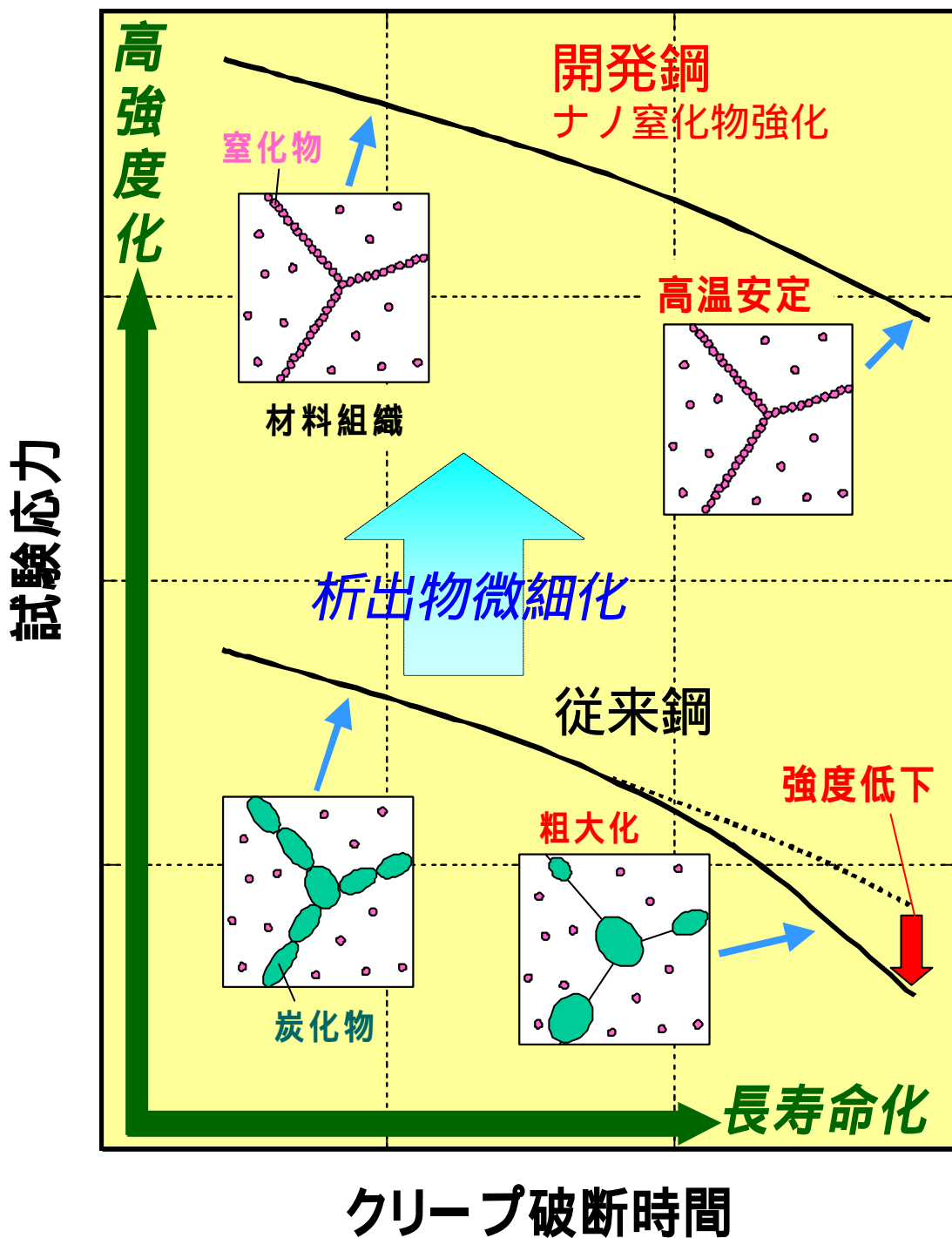


図3 結晶粒界近傍組織を強化するための新しい材料設計思想

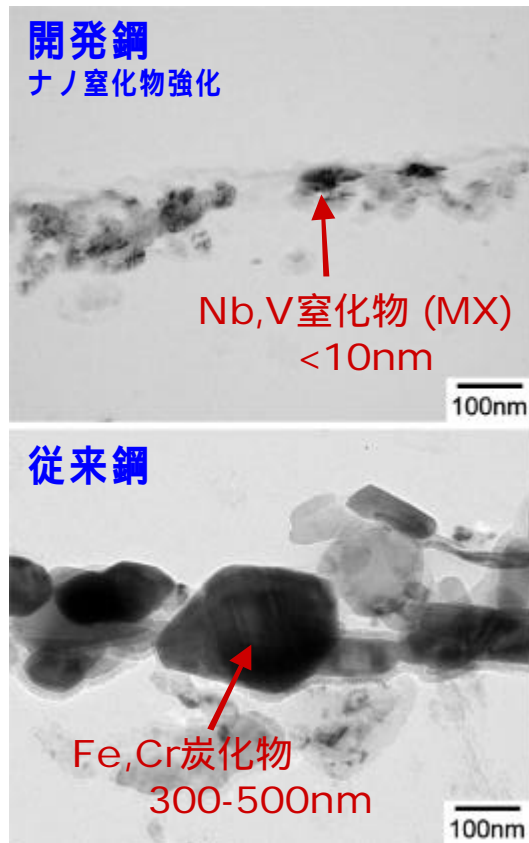


図4 透過電子顕微鏡による結晶粒界の比較写真

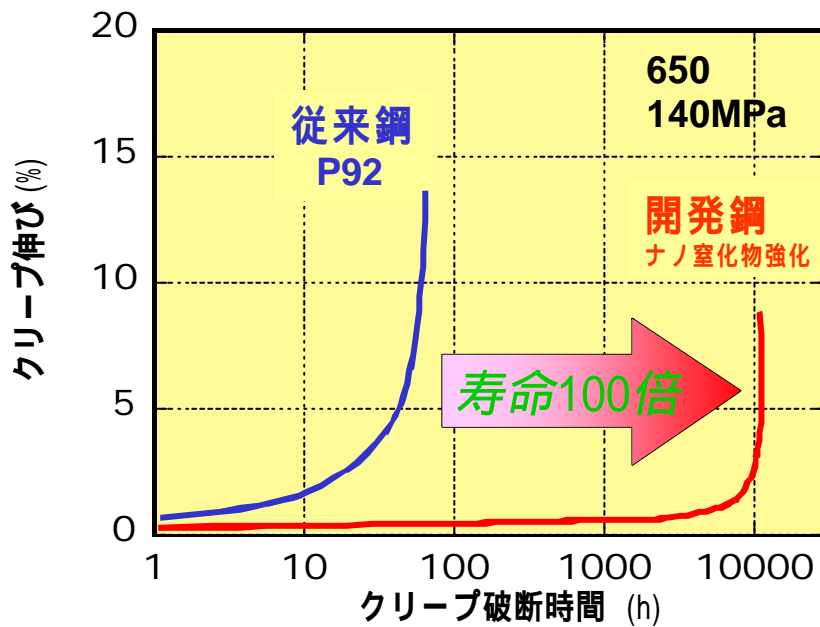


図5 開発鋼(ナノ窒化物強化鋼)と従来鋼(p92)とのクリープ強度比較

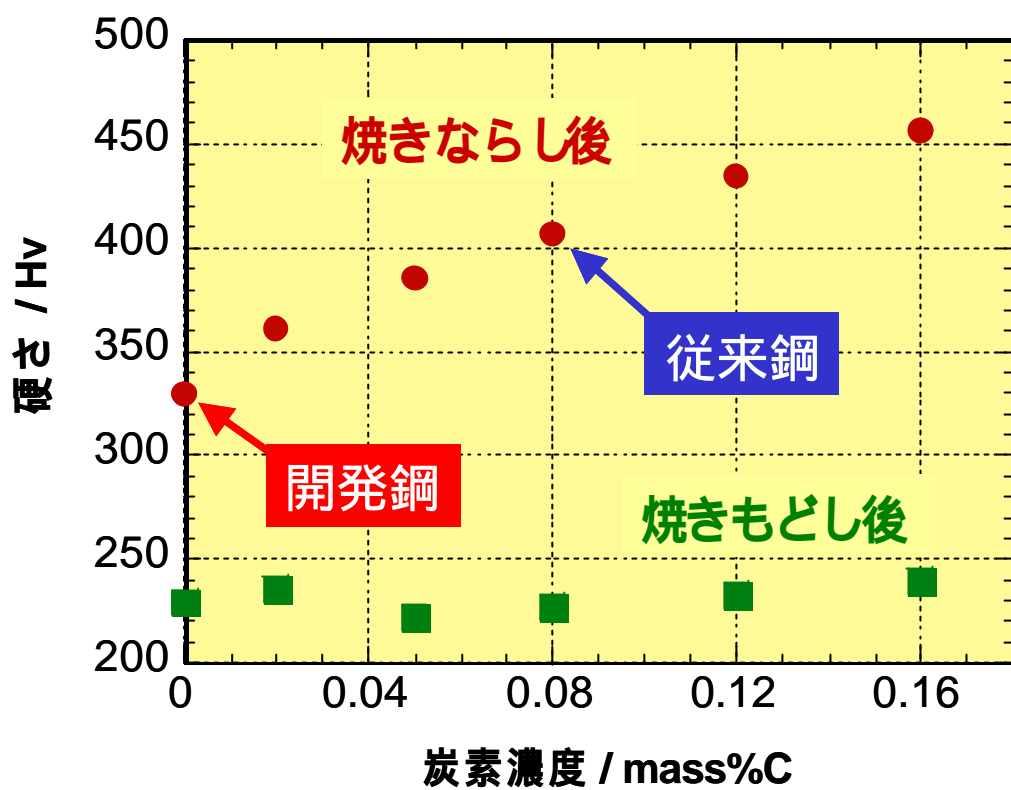


図6 開発鋼と従来鋼の炭素濃度と硬さの関係

焼きならし後の硬さが高いと溶接後に材料が割れやすい