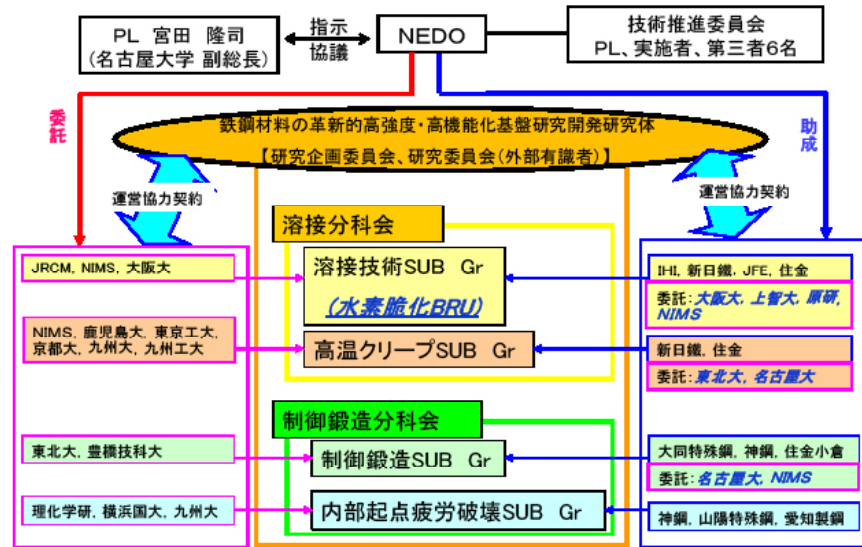


TODAY

「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」プロジェクトの概要



名古屋大学
理事・副総長
宮田 隆司



我が国の製造業は世界に先駆けて製造プロセスにPDCA、QCといった概念を取り入れ、高い生産性と品質により世界を席卷してきた。特に鉄鋼産業は広範な産業分野に毎年1億トンに上る鉄鋼材料を供給し、戦後の我が国の高度経済成長を支えてきた基盤産業である。現在もエネルギー開発や自動車等の輸送機器向け高級鋼分野で高い国際競争力を有しており、鉄鋼技術は日々進化を遂げてきた。しかしながら、人口減少に伴う国内市場の縮小や新興国の急速な経済成長により、社会のあらゆる分野で国際化、グローバル化が加速度的に進行する中、将来にわたる国際競争に生き抜くために更なる技術革新と革新的材料開発に取り組まなければならない状況にある。鉄鋼業には船舶、車両、自動車、電力・エネルギー、橋梁、建築などの産業分野にイノベーションを引き起こす引き金となることへの大きな期待がある。鋼構造物やプラントの高機能化、自動車等の革新的省エネルギー化、安全・安心への貢献が強く求められている。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が策定した「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」プロジェクトは日本製造業の更なる国際競争力の向上とより高度な省エネルギー社会の構築の基礎となる高強度鋼と高機能鋼の実用化を拡大する基盤技術の創成を目的として、実用化を担う企業の助成研究

と連携協力して平成19年度から23年度の5年間にわたり実施され、平成24年2月29日をもって完了した。このプロジェクトでは現象解明、革新的材料開発と併せて、製品に造り込む過程で高機能化を図っている点に特徴があり、(1)高級鋼厚板溶接部の信頼性、寿命を大幅に向上させる溶接施工、溶接材料、及び金属組織制御技術の開発と、(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適傾斜機能を付与する機械部品鍛造技術の開発を進めた。

プロジェクトの基本計画策定にあたっては、経済産業省の製鉄企画室と連携し、鉄鋼需要家85社対象のアンケート調査や鉄鋼技術戦略マップをその基盤とした。社会ニーズ、技術課題、技術シーズの抽出、整理を行うことで、「溶接技術」、「高温クリープ」、「水素脆化」、「制御鍛造」、「内部起点疲労破壊」の5本柱が抽出され、その実行部隊としてサブグループ(SG)を配置する図に示す実施体制を組んだ。このSGには、大学・独法等研究機関が共通基盤技術開発を行う委託事業と、企業での実用化技術開発を行う助成事業との連携機能を持たせている。5年間のプロジェクトはこの実施体制を維持し推進された。成果概要は以下にまとめて頂いているが、これらの成果が関連産業のイノベーションにつながることを切望して止まない。

「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」プロジェクトの研究成果概要
溶接技術サブグループ (SG)

鉄鋼材料研究部 主席研究員 川端 文丸

1. はじめに

NEDO「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」プロジェクトでは、水素脆化BRUを含む溶接技術SG、高温クリープSG、制御鍛造SG、内部起点疲労破壊SGの4SGと1BRUからなる研究体を組織した。

各SGが担った実用化分野と研究項目は図1のように示され、我が国の鉄鋼関連主要産業に幅広く対応している。SG毎の成果の概要を以下にまとめた（本号は溶接技術SGを記載）。



図1 プロジェクト開発技術の実用化分野とSGの担当

2. 研究目標および成果概要

【溶接技術 S G】

【目標】

鋼構造体での目標強度 (980MPa) 及び靱性 (-40℃で 47J 以上) の達成を目的に、①純 Ar 雰囲気下での MIG 溶接技術(クリーン MIG)の確立、②板厚 25 mm の鋼板のレーザ溶接技術の確立、③極低酸素のクリーンマルテンサイト高強度高靱性溶接金属組織設計を行い、それらの総合

化により、④ 980MPa 以上の厚鋼板の予熱・後熱処理なしで割れない溶接技術および溶接金属の開発を達成する。

【成果】

(1) 同軸複層ワイヤ、パルス定電流制御技術、ユニークな溶接トーチ開発からなる総合開発により、クリーン MIG 溶接と呼ぶ新しい極低酸素 (50ppm 以下) 溶接技術を創出・確立した。(図 2)

研究の
狙い

純 Ar シールドガスを使用した高電極式溶接 (MIG 溶接) により、母材と同等な清浄度を持つ溶接金属を再現する。溶接施工と継ぎ手性能が向上した 1000MPa 級高強度鋼の溶接継ぎ手を作成する。

クリーン MIG とは

従来の消耗電極式溶接プロセスでは不可能とされた純 Ar-MIG 溶接を実現する。従来のソリッドワイヤの構造を変えた同軸複層ワイヤと定電流特性型溶接電源により開先内で長尺の溶接施工を可能とする溶接プロセスを実現し、実機適用を目指した模擬構造体作成に適用した。

クリーン MIG 溶接継ぎ手

クリーン MIG を実現するための技術

クリーン MIG の基盤確立

安定な Ar-MIG 溶接

HT980 用同軸
複層ワイヤ

安定な
溶滴移行

同軸複層
ワイヤ

定電流型 Ar-MIG
溶接電源

定電流型電源特性

定電流型のパルス電源特性による安定化

クリーン MIG の高度化

狭隘開先化による能率向上

図 2 クリーン MIG 溶接技術*

(2) 残留 γ の生成を適正制御し耐水素脆化性(予熱不要)と高靱性 (-40℃で 47J 以上) を兼備する極低酸素マル

テンサイト組織制御基盤技術を確立し、それを実現する溶接材料を開発した。(図 3)

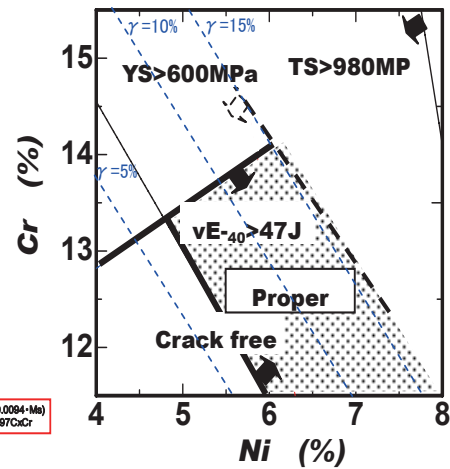
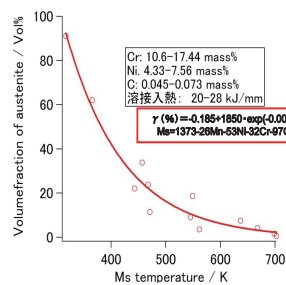
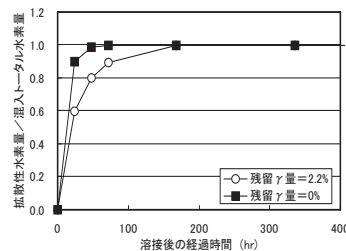
1. 溶接材料の成分設計

目標

- ① 予熱・後熱なしで低温割れなし
- ② 高強度・高靱性 (TS \geq 980MPa、 $vE_{-40^\circ C} \geq$ 47J)

目標達成のためのアプローチ法

- 1) 低温割れ防止: 残留オーステナイト相を活用
- 2) 高強度: マトリックスにマルテンサイト相を活用
- 3) 高靱性: 残留オーステナイト + クリーンMIGプロセスを活用



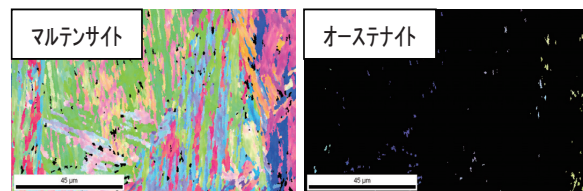
母材希釈を考慮した適正溶接金属組成

2. 溶接材料の開発

開発ワイヤの化学組成(mass%)と溶接金属の機械的特性

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.050	0.79	0.81	<0.01	0.0079	15.50	7.11

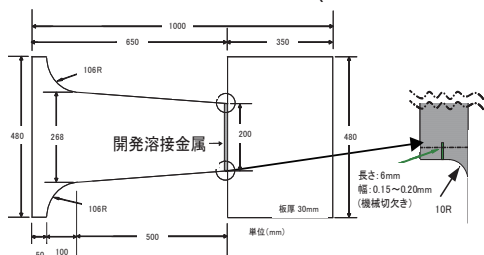
0.2%YS (MPa)	TS (MPa)	$vE_{-40^\circ C}$ (J)
622	1259	61



開発溶接金属の組織分布

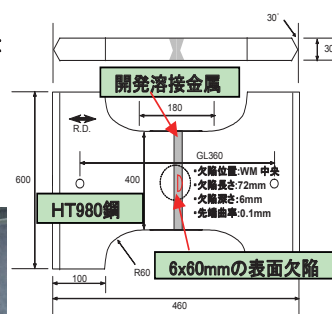
3. 溶接継手の確性

a) 切欠き付テーパ広幅引張試験(建築分野想定)

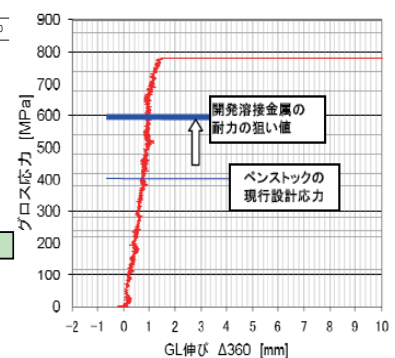


試験温度 (°C)	最大応力 σ_{max} (MPa)	開口変位量(mm)	
		上部側	下部側
0	735	0.26	0.39

b) 広幅引張試験(水圧鉄管分野想定)



継手の応力-伸び線図



マクロ破面



◎ 継手として十分な特性を有し、実構造物への適用が可能であることを確認。

図3 革新的 HT980 鋼用溶接材料*

(3) 最大 26kW までの大出力ファイバーレーザーの利用しレーザー・アークハイブリッド溶接方法の高度化により、980MPa 級 25mm 厚までの実用溶接条件（溶接速度 0.8 ~ 1 m/min）を確立した。（図 4）

(4) 先進疲労き裂モニタリングや先端破壊力学に基づき、開発溶接金属による構造継手の安全性を確認するとともに将来の規格化に向けた評価基盤を整備した。

1. 研究目的

本研究では高強度鋼材に用いるレーザー・アークハイブリッド溶接技術の開発と、その継手性能の確証を実施した。徹底した品質保証により、例えば設計安全率の合理化 (Table 1) など、高強度鋼をより有効に利用することを目指している。

2. 溶接金属の成分設計指針と継手性能

Fig.1は開発目標（強度：980MPa、靱性： $vE_{-40^{\circ}C} \geq 47J$ ）を満足するためのレーザー溶接金属の成分設計指針を示したもので、その指針に基づき作製したレーザー・アークハイブリッド溶接継手の性能評価をTable2に示す。

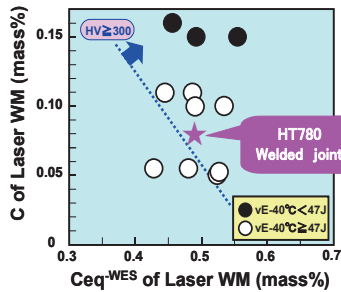


Fig.1 Guideline for alloy element design of laser WM

Table 1 Proposed design criteria for high strength steel


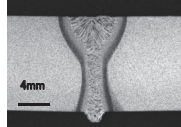
		Conventional		Proposal	
		780	980	780	980
Strength	TS	780	980	780	980
Yield ratio factor	γ	1.1	1.1	1.0	1.0
Welding difficulty factor ^{※1}	β	1.2	1.2	1.0	1.0
Safety factor	ν_b	2.2	2.2	1.7	1.7
Basic allowable stress ^{※2}	σ_a ^{※3}	355	445	460	580

※1 施工難易度係数

※2 基本許容引張応力度

※3 $\sigma_a = TS / (\gamma \cdot \beta \cdot \nu_b)$

Table 2 Properties of welded joint

Base metal	HT780 (12mmt)				
Wire	MQS-80 (1.2mmΦ)				
Welding conditions	Laser (trailing)	Power: 10kW	Groove		
	MAG (leading)	Current: 300A			
	Shielding gas	20%CO ₂ -80%Ar			
	Welding speed	1.3m/min			
Properties of welded joint				Charpy impact energy	$vE_{-40^{\circ}C} = 49J$ Specimen: side-grooved Notch: WM center
				Tensile strength	TS=850MPa Rupture positio: BM Specimen: round bar (8mmΦ × 32mm)

3. 脆性破壊の防止技術

脆性破壊防止のための継手じん性管理方法を整備した。その妥当性の検証として実施した大型試験 (Fig.2) では、脆性破壊は発生せず、強度は母材相当を満足した。

4. 疲労破壊の防止技術

構造物において、特に重要視される荷重非伝達型隅肉溶接継手疲労強度に優れた継手を開発した。実用的な応力範囲 ($\Delta \sigma = 200MPa$) では、研究目標としたJSSC疲労強度D等級を達成した (Fig.3)。

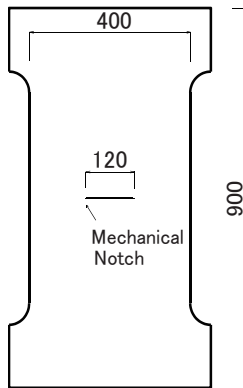


Fig.2 Deep Notch Test

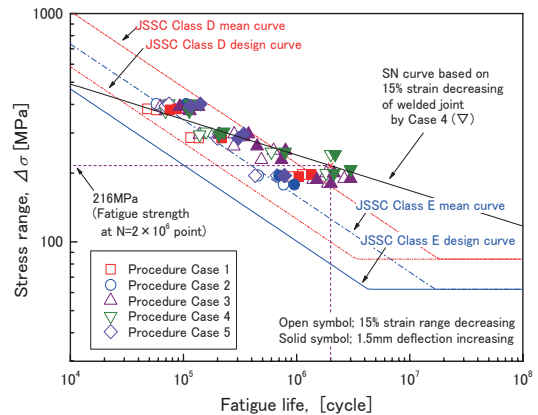


Fig.3 Fatigue strength of HT780 fillet welding joint

5. 溶接割れの防止技術

レーザー・アークハイブリッド溶接の割れ試験要領を開発した (Fig.4)。施工条件や材料によっては、低温割れが発生する (Fig.5、Fig.6)。そのリスクは従来の拘束度ではなく、溶接ひずみを用いることでより明確に評価できることも確認した。

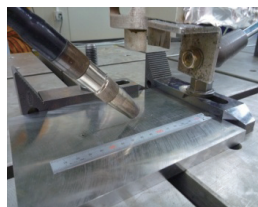


Fig.4 Crack test



Fig.5 Macrograph of welded specimen

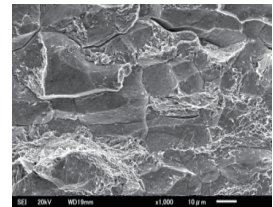


Fig.6 SEM observation

図 4 高強度鋼レーザーアークハイブリッド溶接技術*

【水素脆化 BRU】

[目標]

- ①計算を中心とする研究開発：セメントタイト中の水素存在状態の定量評価と粒界水素量の動的挙動を予測する手法の構築及び欠陥量の同定された引張試験片での粒界水素量の定量評価
- ②実験を中心とする研究開発：局所的な水素存在状態の評価手法の提案。鋼材中の水素浸入量ならびに水素存在状態におよぼす各種組織因子、水素の導入方法、応力の影響の明確化と局所水素量基準による 980MPa 高强度鋼材なら

びにその溶接金属の粒界破断限界の予測手法の構築

[成果]

- (1) 開発した低温昇温脱離水素分析法とマルチスケール(原子~マクロ)計算研究による結晶粒界の水素偏析定量評価から、局所的な nm レベルでの低温割れ(水素割れ)機構を解明した。
- (2) 単純化金属組織における格子欠陥(空孔、転位、粒界等)と水素の相互作用エネルギーの定量化とメソスケール(結晶粒数個~数十個レベル)応力状態における水素の挙動解析技術を確立した。(図5)

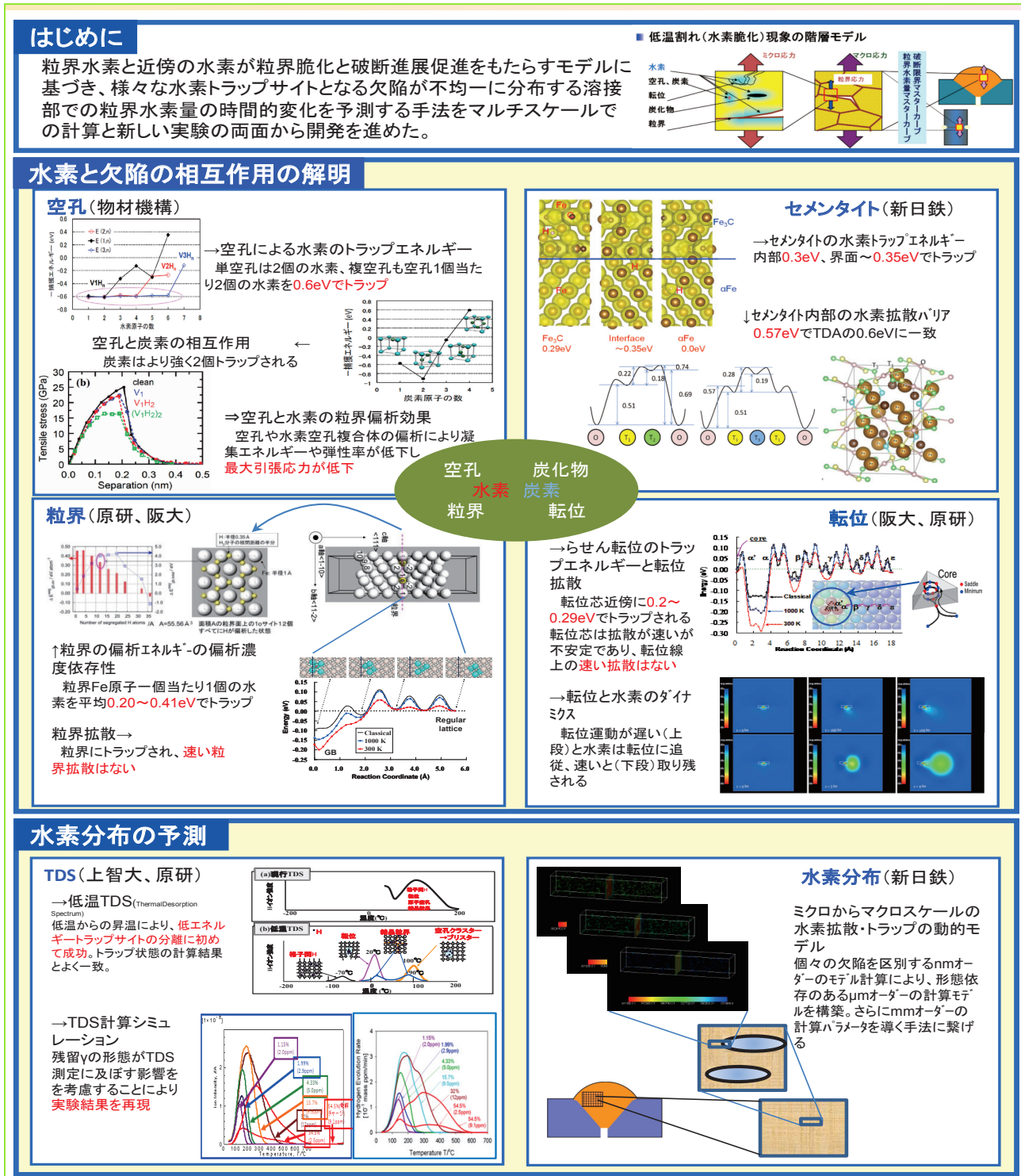


図5 粒界水素量予測技術*

(3) 粒界水素量予測モデルを構築し、ルート部最大主応力と局所集積水素量を推定してY割れ試験結果がSSRT試験による破壊限界に対応することを確認した。(図6)

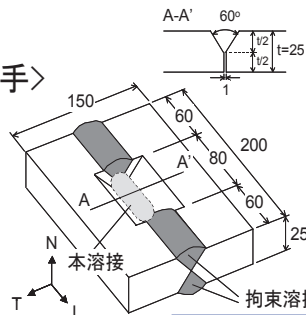
はじめに

溶接継手の低温割れは溶接時の水素侵入による脆化と凝固収縮による引張残留応力が原因とされている。本研究では、溶接継手及び溶接金属を模擬したモデル鋼により、980MPa級溶接金属の低温割れ限界条件を水素量と応力の関係から解析した。

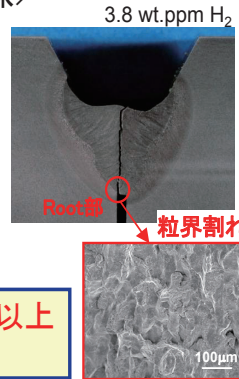
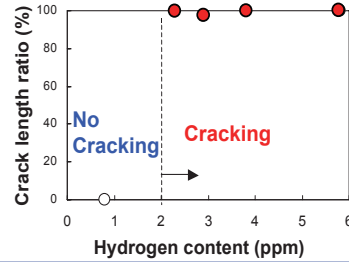
Y型低温割れ試験

<980MPa級MIG溶接継手>

供試鋼板: HITEN980
板厚: 25mm
溶接方法: MIG
溶接ワイヤ: MGS-100J
シールドガス:
Ar+5%CO₂+0~0.25%H₂
入熱: 17kJ/cm



<割れ長さ和水素量の関係>

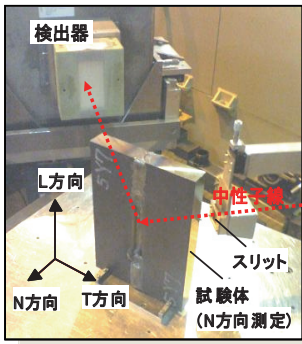


水素を導入した拘束溶接継手

溶接金属中の平均水素量が約2ppm以上でRoot部から割れ発生(粒界割れ)

中性子回折による残留応力解析

<中性子回折状況>

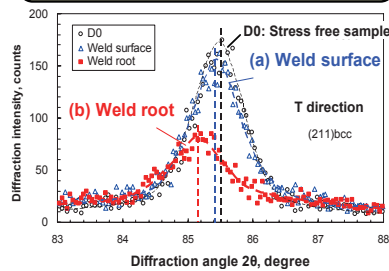


Braggの回折条件

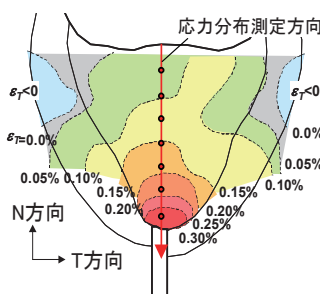
$$2d \sin \theta = \lambda \quad \lambda: \text{波長}, \theta: \text{回折角度}$$

$$d: \text{格子面間隔}$$

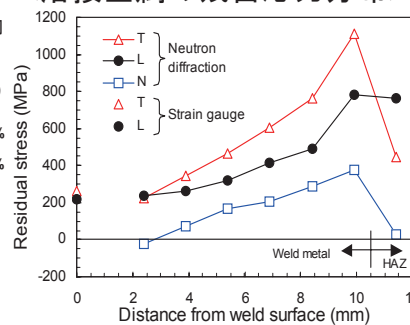
$$\text{格子歪: } \varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} = -\cot \theta \cdot (\theta - \theta_0)$$



<格子歪分布(T方向)>



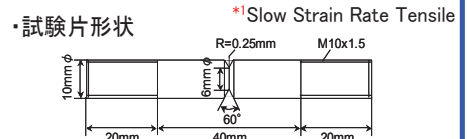
<溶接金属の残留応力分布>



溶接金属のRoot部でT方向に1000MPaを超える大きな引張残留応力が発生(多軸応力状態)

低温割れ限界評価

<SSRT*1試験による破壊限界評価>



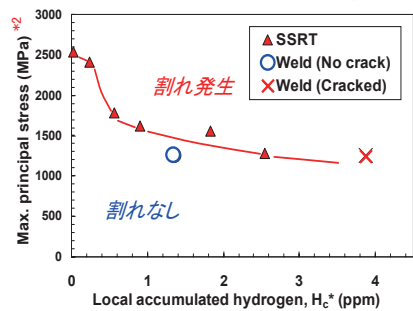
試験手順:
①陰極水素チャージ→②Znめっき後24hr保持
→③SSRT試験(5µm/min)、水素昇温分析

応力場による集積水素量

$$H_c^* = H \times \exp \left[\frac{V_H (\sigma_p - \sigma_{p,\min})}{RT} \right]$$

H: 平均水素量
σ_p: 静水圧応力
V_H: 水素原子体積

<低温割れ限界条件>*2最大主応力: FEM解析で導出



溶接による低温割れの有無が水素チャージSSRT試験による破壊限界条件で予測可能

本研究における中性子回折実験は文部科学省による中性子利用技術移転推進プログラム(トライアルユース)を利用して実施した

図6 水素脆化破壊限界予測技術*

*図1~6には第2回シンポジウム展示ポスターを掲載した。NEDOの提供に謝意を表す。

活動報告

■非鉄材料研究部

・第11回国際ナノテクノロジー総合展へ出展

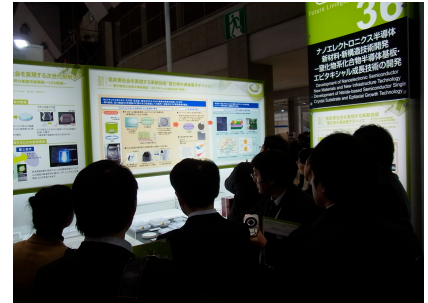
2月15日(水)～17日(金)、東京ビックサイトにおいて第11回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議が開催されました。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のブースでは、37のプロジェクトが紹介され、JRCMが参画している「窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」プロジェクトも出展致しました。

今年はパネル展示のほか、最終目標の一つであるNaフラックス法の4インチ自立基板の展示や、試作したGaN電界効果トランジスタをデジタルオーディオアンプ回路に組み込んでスピーカーから音楽を流すデモを実施しました。連日たいへん盛況であり、プロジェクトの成果のアピールとともに、窒化物系半導体材料およびデバイスへの関心の高さと、期待を実感することができました

(櫻田主席研究員)



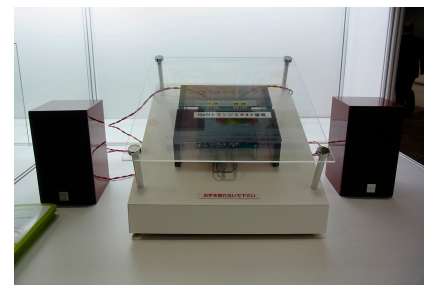
会場(NEDOブース)の様子



出展ブースでの説明風景



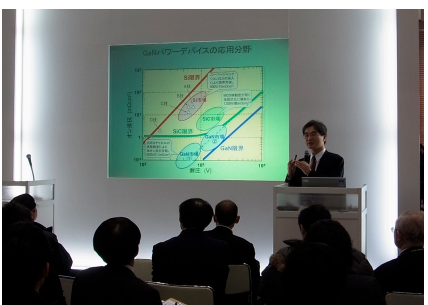
展示した各種GaN基板およびバルク結晶



GaNデジタルオーディオアンプのデモ



中央タワーに展示された4インチGaN基板



葛原PLによるプレゼンテーションの様子

#000 PROJECT 低炭素社会を実現する革新技術“窒化物半導体電子デバイス”

～ 窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発 ～

Naフラックス法による高品質・大口径基板の育成

- 大口径・GaN種基板開発 → Naフラックス法で厚膜成長 → 種基板除去 → 自立GaN基板

■ さらなる結晶の高品質化と無極性面GaN基板への取り組み

- 成長基礎技術の開発
- エピ成長技術の確立

GaN/パワーデバイスの試作と実機による動作確認

- GaN-FETをスイッチングデバイスとして回路を試作・実機で動作確認

展示されたパネル

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第305号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複製・複製・転載することを禁じます。

発行 2012年3月1日
 発行人 小紫正樹
 発行所 一般財団法人 金属材料研究開発センター
 〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11 東洋海事ビル6階
 TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
 ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
 E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp