

「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」

プロジェクトの詳細説明 (公開)

【溶接技術SG(委託)】

①高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発

- ①-1) クリーンMIG溶接プロセス技術の開発
- ①-2) ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基盤技術の開発
- ①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発
および溶接継手信頼性評価技術の研究

((財)金属系材料研究開発センター, (独)物質・材料研究機構, 大阪大学, 愛媛大学)

平成21年7月3日(金)

p.1/20

内容

公開

1. 背景
2. 研究開発の実施体制
3. 開発目標と達成状況
4. 検討内容
5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

p.2/20

1. 背景

公開

溶接技術の現状と基本計画目標達成のための研究項目

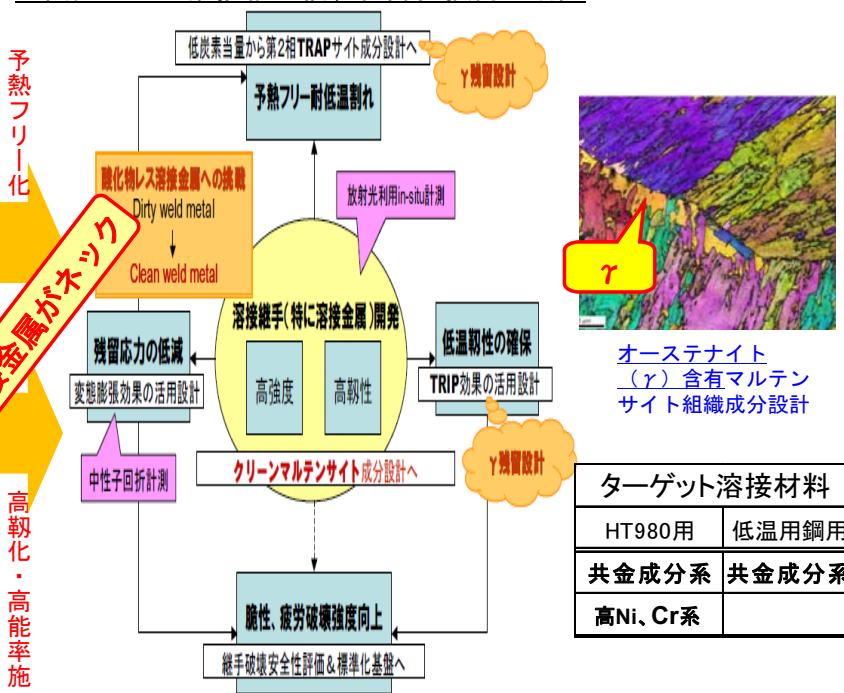
高級鋼の実用継手の現状
低温割れには100℃以上の予熱不可避

低炭素当量成分設計

高強度で靱性確保には低能率多パス溶接施工

微細フェライト組織設計 (オキサイドメタラジー)

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究



1. 背景

公開

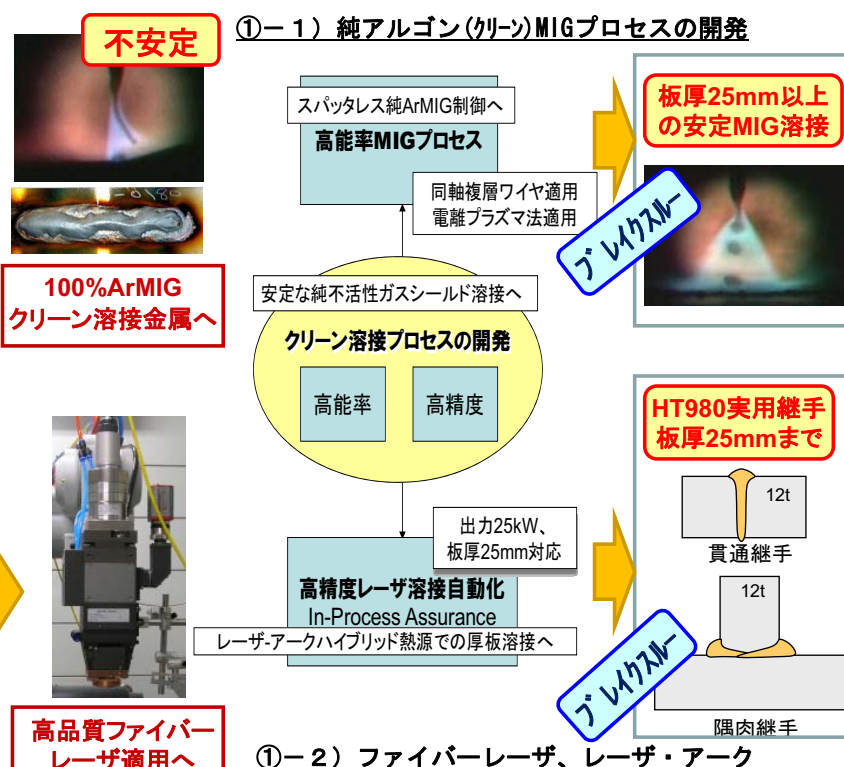
溶接技術の現状と基本計画目標達成のための研究項目

実用アーク溶接の現状
高能率安定MIG/MAG アーク溶接
ダーティ溶接金属
含有酸素>200ppm (98%Ar-5%O₂ MIG)

低能率高品質TIG溶接
クリーン溶接金属
含有酸素<50ppm

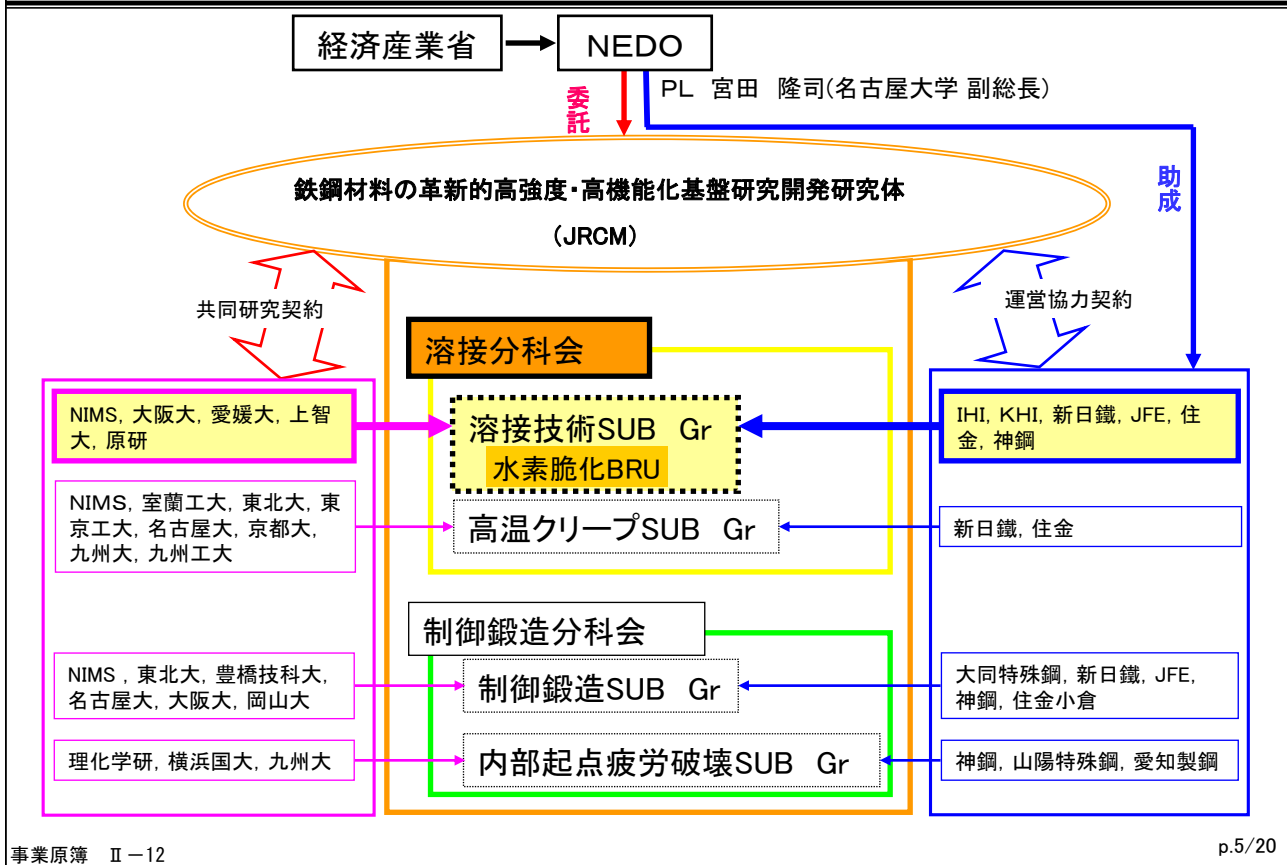
中厚板レーザー溶接の現状
高出力CO₂レーザー溶接
高レーザー品質
ファイバー伝送不可 (出力: ~45kW)

YAGレーザー溶接
低レーザー品質
ファイバー伝送可 (出力: ~10kW、薄板主流)



2. 研究開発の実施体制

公開



3. 開発目標と達成状況

公開

①-1) クリーンMIG溶接プロセス技術の開発

論文: 1件

研究開発項目	中間目標	最終目標	成果	達成状況	最終目標に向けた今後の取り組み
①-1) クリーンMIG溶接プロセス技術の開発	基本クリーン溶接制御法を開発し、溶接金属の含有酸素量50ppm以下を達成。	実用的な溶接構造継手を対象に、開先狭隘化により、25mm厚鋼板での溶接パス数を1/2、スパッタ発生率を1/2に減化した高能率・クリーン溶接プロセス基盤技術を達成	同軸複層ワイヤ法: 同軸複層ワイヤの試作とパルス波形制御法の開発により 純Arによる基本クリーンMIG溶接を実現(世界初) した。安定溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、 開先内多層盛で40ppm(平均値)の低酸素化を達成。	◎	実用溶接構造継手(開先内)溶接施工性を可能とする実用クリーンMIG制御技術の確立。
			電離プラズマ法: 新構造プラズマMIGトーチ(電極径最適化)と プラズマ/MIG協調電流制御による基本溶接制御法(世界初) を開発し、安定した高速溶接施工(50cm/min)を実現した。最適条件下で表面と内部欠陥防止と 酸素量24ppmを達成 した。	◎	アークプラズマの安定性と溶接ビードのぬれ性を制御するプラズマMIG熱源分布制御技術の最適化。 スパッタ低減溶滴移行制御と高能率狭幅多層溶接制御の確立。

青字: 成果キーワード、赤字: 超過成果

◎: 超過達成見込み

3. 開発目標と達成状況

公開

①-2)ファイバーレーザ、レーザ・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

論文:3件

研究開発項目	中間目標	最終目標	成果	達成状況	最終目標に向けた今後の取り組み
①-2)ファイバーレーザ、レーザ・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発	a. 板厚12mmの高強度鋼溶接継手の溶接欠陥発生機構を解明し、溶接品質がJIS1類相当の貫通完全溶け込み溶接、及び2パス隅肉溶接継手製作のための基盤技術の確立。	a. 板厚25mmの高強度鋼において、多層突き合わせ継手及び隅肉継手をJIS1類相当の品質で形成する為の欠陥防止技術の開発	a. 適正収差制御による長[焦点深度]光学系 (AF0) を開発。これによるレーザ光軸上パワー密度分布制御でキーホールの安定化を実現して貫通完全溶込み溶接でJIS1類相当品質のポロシティの低減を達成。25kWによる25mm厚溶接(世界初)を実現見込み。また良好な貫通裏波ビード及び隅肉平滑ビードを形成するアーク・レーザの最適位置関係を導出した。	◎	板厚25mm厚溶接への展開が鍵。実用溶接を想定した25kW大出力溶接条件の最適化による溶接構造継手の製作とその安全性評価を進める。
	b. 効率的なワイヤ添加制御法及び均質合金化プロセス並びにビード表面形状制御の基盤技術の確立するための指針の提示。	b. 効率的なワイヤ添加制御法及び均質合金化プロセス、さらにビード表面形状制御の基盤技術の確立。	b. レーザ先行ワイヤ添加と酸素含有(≥2%)シールドガス法による均質合金化指針を提示した。レーザ先行ハイブリッドによる隅肉溶接ビードの平滑化とアークのタンデム化による実用的ギャップ突合せ貫通溶接の余盛形状制御指針を提示し、それを実現するハイブリッドトーチを開発した。	○	25kW実用溶接を想定した非貫通溶接における均質合金化と欠陥防止技術の確立。 25kW実用溶接を想定した、滑らかな余盛形状形成の最適条件確立。

青字：成果キーワード、赤字：超過成果

◎：超過達成見込み、○：達成見込み

3. 開発目標と達成状況

公開

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究

論文:8件

研究開発項目	中間目標	最終目標	成果	達成状況	最終目標に向けた今後の取り組み
①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究	a. 溶接金属組織の形成過程と化学組成の関係に関する基礎データベースの構築	<ul style="list-style-type: none"> ・大型の溶接継手で予熱無しでも溶接割れが生じないための要件、及び強度980MPaと良好な靱性(-40°Cで47J以上)を得るための要件を明確化。 ・予熱フリーでTIG溶接の2倍の効率で溶接施工できる9%Ni鋼用溶接プロセス条件の下で、耐力が590MPa以上、強度が690~830MPa、-196°Cでの靱性値が50J以上を達成できる要件の明確化。 ・継手部の残留応力適正制御技術の提示と、大型継手での破壊性能・信頼性評価技術の確立 	a. 溶接凝固過程の高時間分解その場観察システムを構築し、溶接金属組織の非平衡析出挙動の観察に成功(世界初)。観察基礎データベースに基づき凝固割れ抑止に有効な凝固モードを明示し、対応する成分系も明示できる見込みを得た。	◎	<ul style="list-style-type: none"> a. b. 実験室規模の中間成果を大型溶接継手による最終成果達成に向けて進めるためにHT980鋼と9%Ni鋼ともに実構造体溶接技術を確立して溶接割れ防止要件や強度靱性確保要件の明確化を進める。 c. d. 強度靱性の性能バランスを考えながら、残留γの利用法を具体化最適するとともに、残留応力適正制御技術の提示と大型継手での破壊性能・信頼性評価を行う。
	b. 予熱なしで溶接割れが生じない溶接金属組織の必要条件とクリーン溶接金属で高靱性が得られる溶接金属組織の必要条件の明確化		b. フルマルテンサイト組織の水素放出スペクトル解析から残留γによるトラップ効果(放出ピーク温度の高温遷移: 約200°C → 300°C)を実証した。マイクロ組織の必要条件の導出のため、成分系や溶接熱履歴から残留γを予測する基本ツールを完成した。	○	
	c. 継手部残留応力と疲労強度の関係の定量化		c. 中性子回折法による定量的残留応力計測技術を確立し疲労強度との関係の定量化を達成見込み。	○	
	d. 溶接金属中の残留γ相による疲労強度、脆性破壊強度向上の条件の明示		d. クリーン溶接金属において、マルテンサイトに7%以上の残留γが存在するとき、トリップ効果により疲労き裂の進展が2.5~4倍遅延することをFMSにより明示した(世界初)。 d. 溶接金属のクリーン化(酸素含有20ppm)と15%の残留γ相導入で-196°Cでは約10倍の顕著な向上効果を確認した。	◎	

青字：成果キーワード、赤字：超過成果

◎：超過達成見込み、○：達成見込み

4. 検討内容

公開

同軸複層ワイヤ法

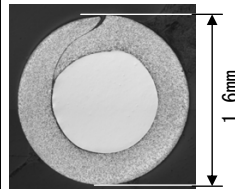
①-1)クリーンMIG溶接プロセス技術の開発

同軸複層ワイヤの試作とパルス波形制御法の開発により純Arによる**基本クリーンMIG溶接を実現(世界初)**した。安定溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、**40ppm(平均値)**の低酸素化を達成した。

同軸複層構造ワイヤの試作

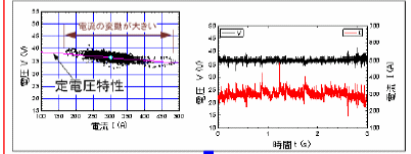
開発した複層ワイヤ	設計のポイント
低温用9%Ni鋼用共合金系(11%Ni系)	内外層材の融点差制御設計 芯材(内材)：11Ni材(1440°C) フープ(外材)：軟鋼(1530°C)
HT980MPa鋼用高Ni, Cr高合金系	内外層材の融点差制御設計 芯材(内材)：試作材(1400°C) フープ(外材)：SUS430(1500°C)
HT980MPa鋼用共合金低合金系	内外層界面にカリウム塗布。

定電流電源特性でのパルス波形制御法の開発

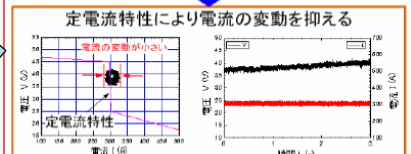


試作同軸複層ワイヤの断面写真(例)

従来の定電圧特性電源では、電流の安定化は困難



電源制御を可能とする安定な系を構成する



陰極点により電圧は変動するが、試作中の制御装置により電圧制御が可能である。

達成溶接金属酸素量

溶接方法	溶接金属酸素量
従来MIG法	230ppm
従来TIG法	30ppm
同軸複層クリーンMIG法	40ppm

基本クリーンMIG溶接を実現(世界初)と40ppmの達成

良好なV開先内多層溶接を達成



ワイヤ：9Ni用複層ワイヤ(1.6mm)
414A、31V、35cm/min
60度V開先

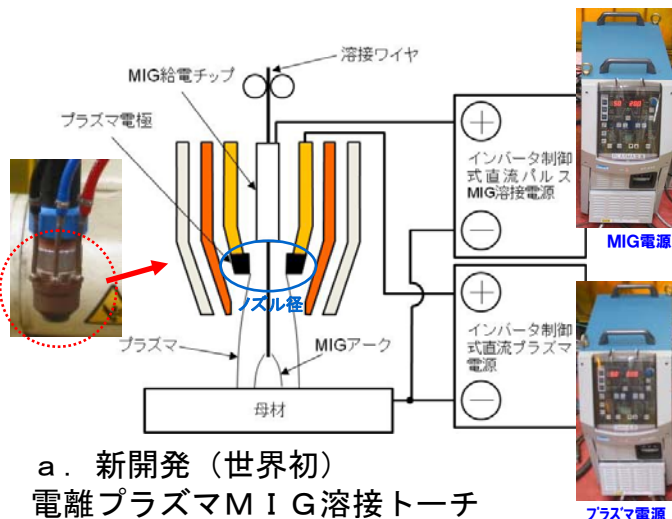
4. 検討内容

公開

電離プラズマ法

①-1)クリーンMIG溶接プロセス技術の開発

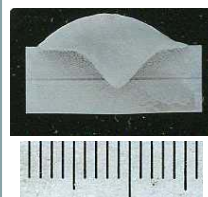
新構造電離プラズマMIGトーチ(電極径最適化)とプラズマ/MIG協調電流制御による**基本溶接制御法(世界初)**を開発し、安定した高速溶接施工(50cm/min)を実現した。最適条件下で表面と内部欠陥防止と酸素量**24ppm**を達成した。



a. 新開発(世界初)電離プラズマMIG溶接トーチ

b. 協調電流制御(世界初)

ノズル径：3 mm,
溶接速度：50 cm/min



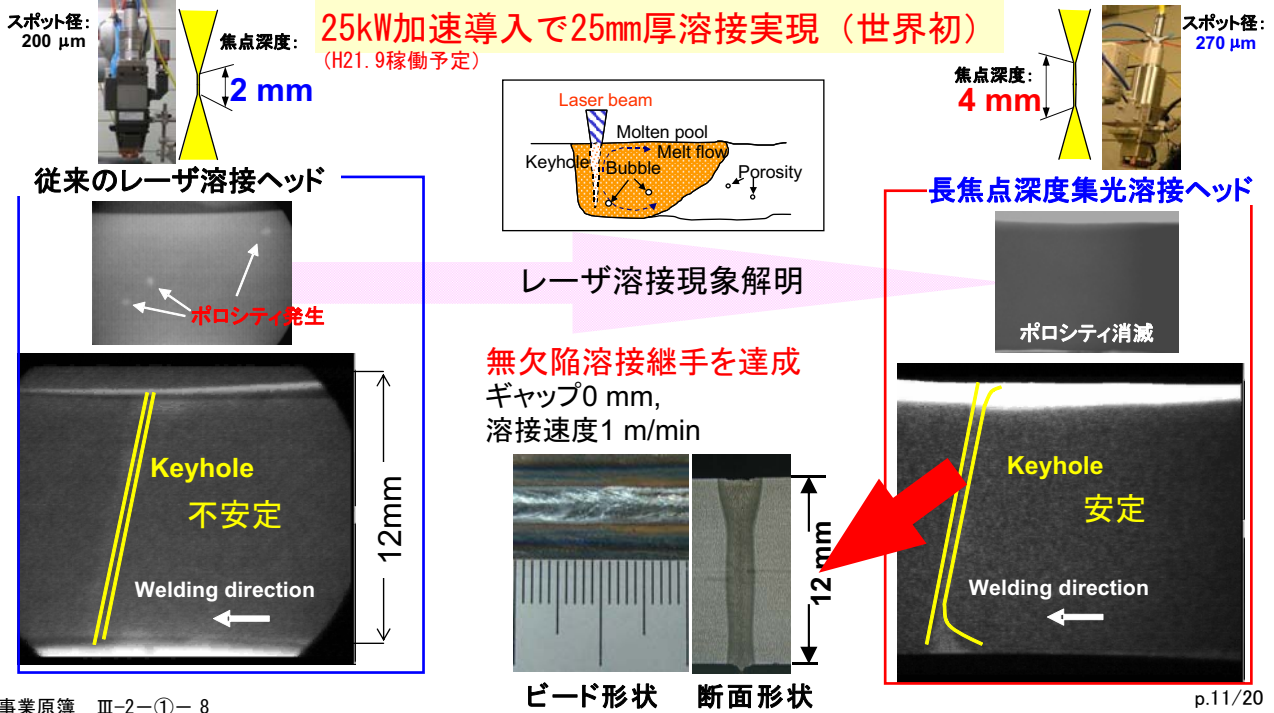
安定した溶接と溶接金属中の酸素量24ppmを達成

4. 検討内容

公開

①-2)ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

(AFO:Advanced Focus Optics)
レーザー光軸上パワー密度分布を制御する**長焦点深度光学系**により、キーホールの安定化を実現し、貫通完全溶込み溶接でJIS1類相当品質のポロシティの低減を達成。

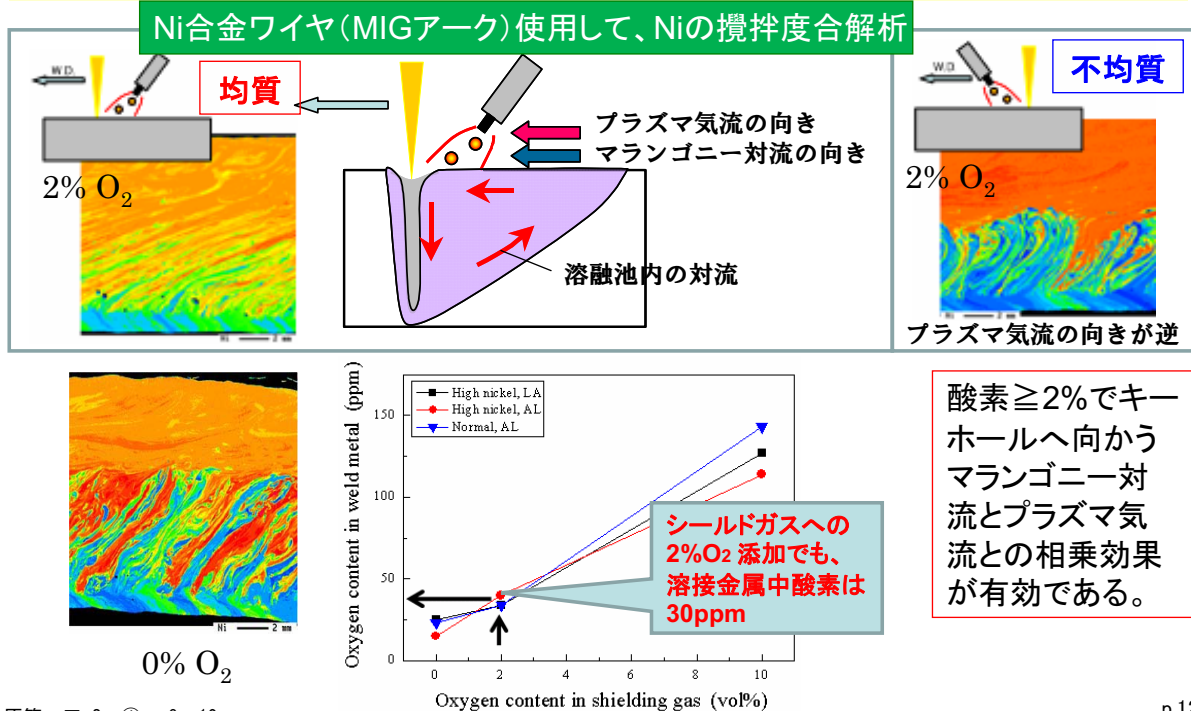


4. 検討内容

公開

①-2)ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

レーザー先行ワイヤ添加と酸素含有 (≥2%) シールドガス法による均質合金化指針を提示した。

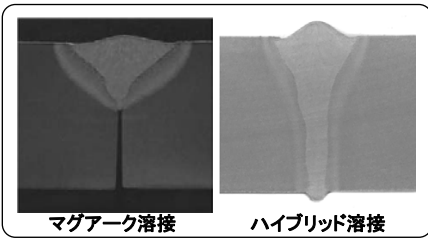


4. 検討内容

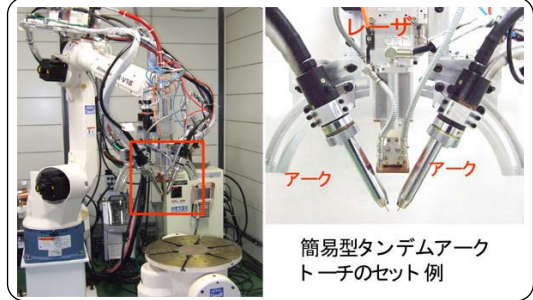
公開

①-2)ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

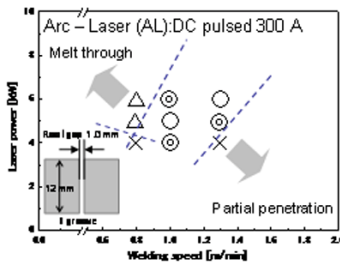
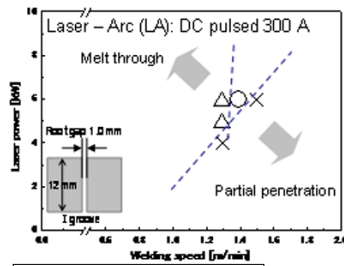
良好な貫通裏波ビード及び隅肉平滑ビードを形成するアーク・レーザーの最適位置関係を導出。レーザー先行ハイブリッドによる隅肉溶接ビードの平滑化とアークのタンデム化による実用的ギャップ突合せ貫通溶接の余盛形状制御指針を提示し、それを実現するハイブリッドトーチを開発した。



ハイブリッド溶接でのアークのタンデム化によりビード表面形状制御を可能とした

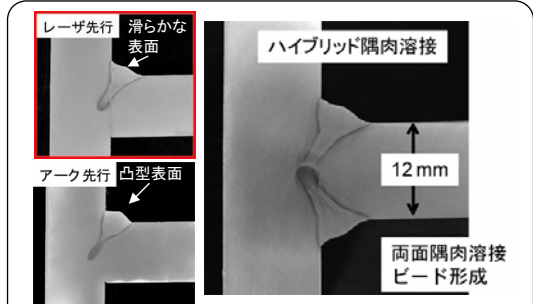


簡易型タンデムアークトーチのセット例



◎: Full penetration sound bead;
○: Full penetration sound bead with small undercut;
△: Full penetration with melt through;
×: Partial penetration

アーク・レーザーの最適位置関係および適正条件範囲を導出



極小入熱で滑らかな余盛形状を有する両面隅肉溶接ビード形成法を提案

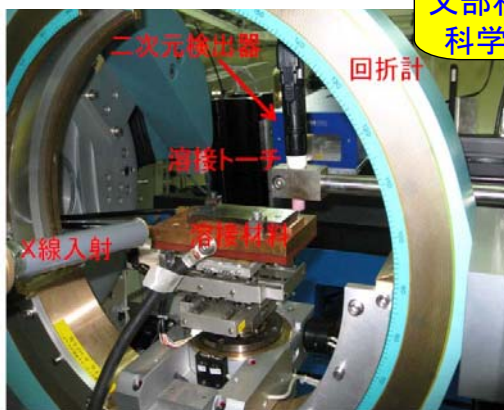
4. 検討内容

公開

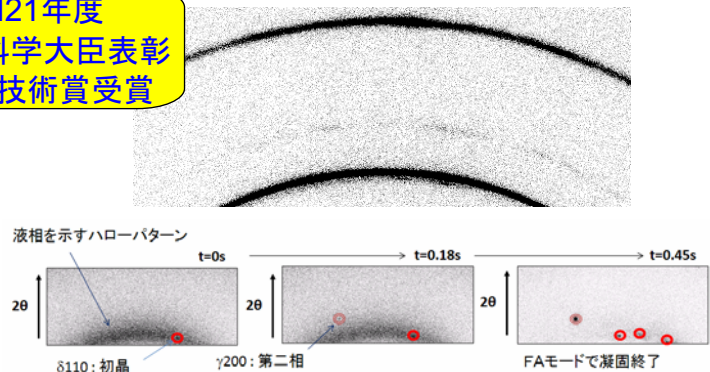
①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究

強力X線放射光による溶接凝固過程の高時間分解その場観察システムを構築し、溶接金属組織の非平衡析出挙動の観察に成功(世界初)した。この観察基礎データベースに基づき凝固割れ抑止に有効な凝固モードを明示し、対応する成分系も明示できる見込みを得た。

H21年度
文部科学大臣表彰
科学技術賞受賞



高温加熱炉系その場観察システム
(46XUビームライン@SPring-8)



凝固割れ発生過程を観察し、凝固過程と割れ発生を関連付け、FA凝固モードとAF凝固モードの両モードの成分で凝固割れ抑止可能を提示した。

4. 検討内容

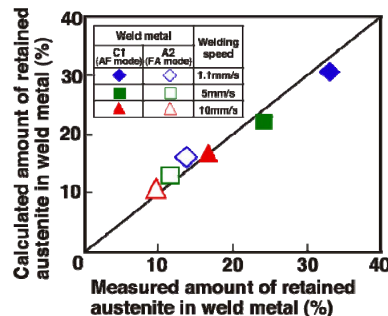
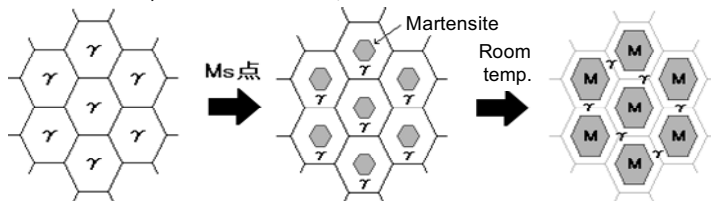
公開

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性
溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究

成分と溶接条件から残留γ量を予測するツールの開発

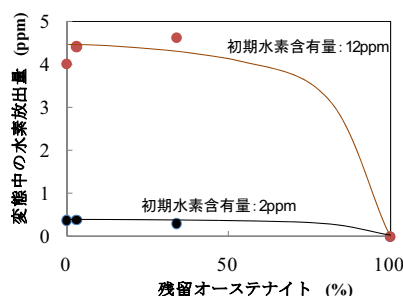
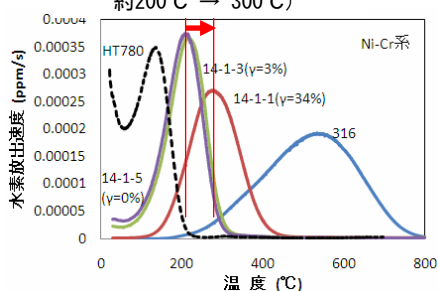
$$[\gamma \text{ 量}] = 130 + 296C + 64Mn + 7Ni - 17Cr \text{ (mass\%)}$$

凝固モード遷移を考慮して、残留γの生成速度論的解析から残留γ生成量の計算に成功



放出ピーク温度の高温遷移
約200°C → 300°C

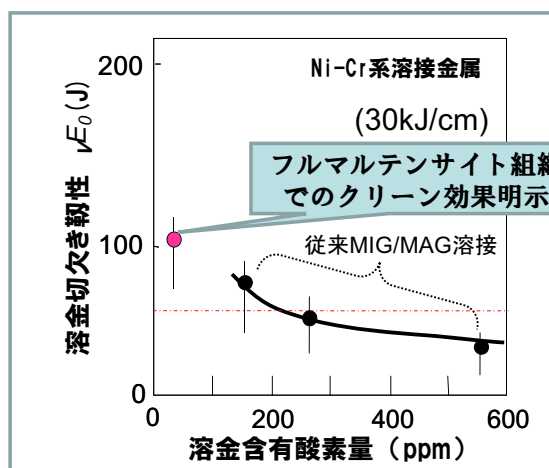
フルマルテンサイト組織の水素放出スペクトル解析から残留γによるトラップ効果を実証した。



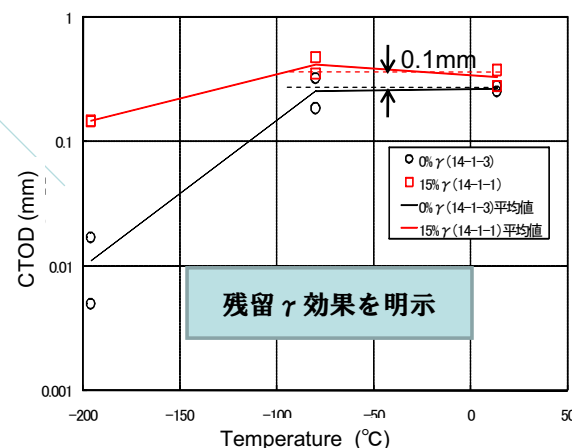
4. 検討内容

公開

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性
溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究



Charpy試験において、溶接金属酸素含有量20ppmで、吸収エネルギー105J (平均)



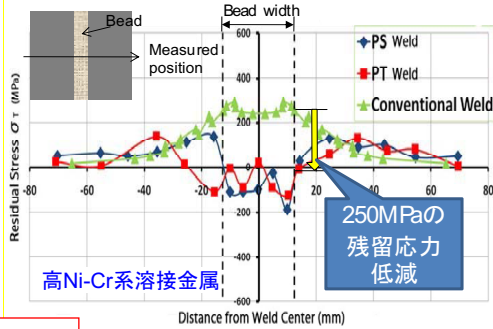
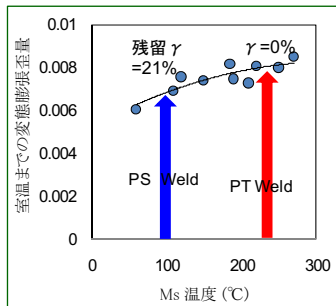
室温～-80°CのCTOD試験で、クリーンフルマルテンサイト組織成分で0.26mm (平均)、15%残留γで0.35mm (平均)のCTOD値を確認。残留γが靱性向上に有効であることを明示

-196°Cの試験温度では、残留γ効果が顕著になり、フルマルテンサイト組織の約10倍の靱性向上となることを明示

4. 検討内容

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性 溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究

中性子回折から共金溶接金属との残留応力の相違を定量的に明示

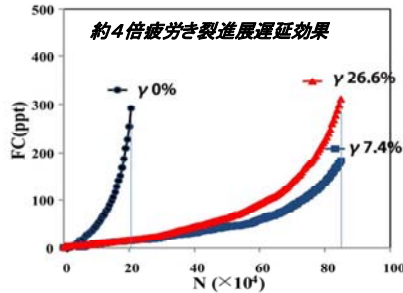


共金系ワイヤの溶接継手に比して、**250MPaの残留応力低減を明示し、疲労強度向上が示唆**できた。100°C<Ms点<250°Cの成分系での残留応力低減効果は、ほぼ同等であることを明示。

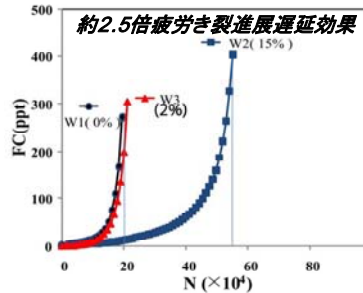
現在、疲労試験を実施中で、疲労強度との関係定量化を達成できる見込み

疲労き裂進展遅延に残留γは有効

メルトランTIG溶接



クリーンMIG溶接



溶接金属の疲労き裂進展時間を、開発電場指紋照合装置(FMS*)で測定し、**7%以上のγ含有で疲労キレツ進展時間が2.5~4に遅延**することを発見し、疲労寿命向上効果を明示した。

*FMS: Finger Print Monitoring System

5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

①-1)クリーンMIG溶接プロセス技術の開発

基本クリーン溶接制御法を開発し、溶接金属の含有酸素量50ppm以下を達成する目標に対して、同軸複層ワイヤ法では同軸複層ワイヤの試作とパルス波形制御法の開発により、また電離プラズマ法では新構造プラズマMIGトーチ（電極径最適化）とプラズマ/MIG協調電流制御によりそれぞれ**純Arによる基本クリーンMIG溶接を世界に先駆け実現**した。また、それぞれ安定溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、十分に**50ppm以下の低酸素化を達成**した。

今後は、最終目標達成に向けたスパッタ低減溶滴移行制御や高能率狭幅多層溶接制御などの実用溶接構造継手（開先内）溶接施工性を可能とする実用クリーンMIG制御技術へ開発を展開する。

5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

①-2) ファイバーレーザ、レーザ・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

a. HT780板厚12mmの高強度鋼溶接継手の溶接欠陥発生機構を解明し、溶接品質がJIS1類相当の貫通完全溶け込み溶接、及び2パス隅肉溶接継手製作の為の基盤技術の確立を達成する目標に対して、板厚方向のレーザパワー密度低下を主因とする溶接欠陥発生機構の解明に基づき、高パワー密度の安定維持を実現する長焦点深度光学系を開発してJIS1類相当品質の貫通完全溶け込み溶接を達成した。25mm厚溶接に着手見込み（世界初）。また良好な貫通裏波ビード及び隅肉平滑ビードを形成するアーク・レーザの最適位置関係を導出した。

今後は、HT980板厚25mm厚の実用溶接に向けた25kW大出力溶接条件の最適化に進み、安全性評価のための溶接構造継手の製作を実施する。

b. 効率的なワイヤ添加制御法及び均質合金化プロセス並びにビード表面形状制御の基盤技術を確立するための指針の提示目標では、レーザ先行ワイヤ添加と酸素含有（ $\geq 2\%$ ）シールドガス法による均質合金化指針を提示した。レーザ先行ハイブリッドによる隅肉溶接ビードの平滑化とアークのタンデム化による実用的ギャップ突合せ貫通溶接の余盛形状制御指針を提示し、それを実現するハイブリッドトーチを開発した。

今後は25kW-25mm厚の実用溶接を想定した非貫通溶接における均質合金化と欠陥防止技術の確立するとともに、25mm厚実用溶接を想定したレーザ・アークハイブリッド溶接法の最適条件を確立する予定。

5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発 および溶接継手信頼性評価技術の研究

a. 溶接凝固過程の高時間分解その場観察システムを構築し、溶接金属組織の非平衡析出挙動の観察に成功（世界初）。観察基礎データベースに基づき凝固割れ抑止に有効な凝固モードを明示し、対応する成分系も明示できる見込みを得た。

b. フルマルテンサイト組織の水素放出スペクトル解析から残留 γ によるトラップ効果（放出ピーク温度の高温遷移：約200°C → 300°C）を実証した。マイクロ組織の必要条件の導出のため、成分系や溶接熱履歴から残留 γ を予測する基本ツールを完成した。

今後は、実験室規模の中間成果を大型溶接継手による最終成果達成に向けて進めるためにHT980鋼と9%Ni鋼ともに実構造体溶接技術を確立して溶接割れ防止要件や強度靱性確保要件の明確化を進める。

c. 中性子回折法による定量的残留応力計測技術を確立し疲労強度との関係の定量化を達成見込み。

d. クリーン溶接金属において、マルテンサイトに7%以上の残留 γ が存在するとき、トリップ効果により疲労き裂の進展が2.5～4倍遅延することをFMSにより明示した（世界初）。

d. 溶接金属のクリーン化（酸素含有20ppm）と15%の残留 γ 相導入で-196°Cでは約10倍の顕著な向上効果を確認した。

今後は、強度靱性の性能バランスを考えながら残留 γ の利用法を具体化最適化するとともに、残留応力適正制御技術の提示と大型継手での破壊性能・信頼性評価を行う。