

特集：洋上風力発電

洋上風力向け溶接施工法および溶接材料

株式会社神戸製鋼所
山口 幸 祐

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、国内のエネルギー政策が見直され、新たなエネルギー源として再生可能エネルギーへの期待が高まっている。その中で、とくに注目されている再生可能エネルギーの一つが洋上風力発電であり、欧州各国でも直面するエネルギー危機を切り抜けるために、相次いで洋上風力発電の大規模な導入見通しを発表している。国内でも、洋上風力促進区域においてラウンド1およびラウンド2の入札が完了し、今後、ラウンド3の入札も見込まれている¹⁾。

洋上風力発電では、設置、係留、系統連系、運転、保守にかかるコストが大きく、採算性を確保するためには風車1基当たりの発電量を高めることも重要である。ロータ直径の大型化による定格出力増強の技術開発も活発に行われており、図1に示すように、風力発電における風車の定格出力は年々増加している。近年では、定格出力5~8MWの風車が洋上風力発電に採用されている。今後は10MW以上の定格出力を備える大型風車の採用も想定され、洋上風力発電設備の大型化が進むと判断される²⁾。

洋上風力発電設備は、主に「ブレード」「ナセル」「タワー」「モノパイル（大径鋼管）やピンパイル（細径鋼管）などの基礎」の4部位で構成される。このうち、「タワー」「基礎」は、板厚50mm超の極厚板を用いた鋼製単管を溶接継ぎして製作される。鋼製単管の製作やその溶接継ぎでは、縦方向（縦シーム）や円周方向の溶接が不可欠であり、極厚板の高効率な溶接施工法が望まれている。

本稿では、極厚板における円周方向の溶接に好適な狭開先サブマージアーク溶接材料と、縦方向（縦シーム）の溶接に好適なエレクトロスラグ溶接法について紹介する。

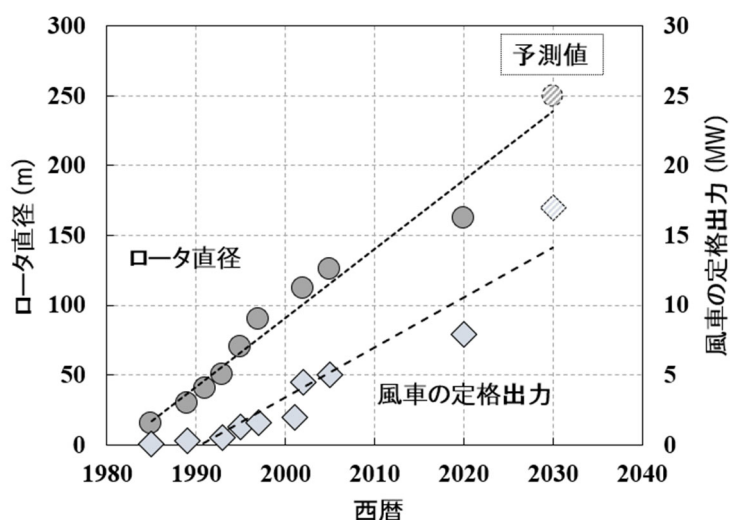


図1 ロータ直径と風力発電用風車の定格出力の推移^{3) 4) 5) 9)}

2. 狭開先サブマージーク溶接材料

極厚板の高溶着な溶接施工法として、サブマージーク溶接（以下、SAW という）があげられる。また、その高能率化には、開先の狭開先化が有効な手段の一つである。狭開先の SAW に対応した溶接ワイヤ（以下、新 SAW ワイヤという）とボンドフラックス（以下、新 SAW フラックスという）を新たに開発した。その詳細を以下に紹介する。

新 SAW ワイヤは炭素鋼用ソリッドワイヤ、新 SAW フラックスはふっ化物-塩基性酸化物系のボンドフラックスであり、塩基度を高めたフラックス設計を採用している。その特長は、フラックス設計の最適化により狭開先における良好なスラグ剥離性と良好なじん性を確保し、直流（DCEP）および交流（AC）で使用できる点にある。

2-1. 溶着金属の諸性能

新 SAW ワイヤ/新 SAW フラックスの溶着金属の諸性能を調査した。直流（DCEP）および交流（AC）における溶着金属の機械的性質を表 1 および図 2 に示す。高強度（550 MPa 超）で、-60℃までの吸収エネルギーが良好な溶着金属が得られている。

表 1 溶着金属の機械的性質⁹⁾

溶着金属の機械的性質 ^{*1,2}					
	PWHT 条件	極性	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
新SAWワイヤ, 新SAWフラックス	溶接のまま	DCEP	514	603	28
		AC	534	618	29

*1 溶接条件:550A-30V-420mm/min; ワイヤ突出し長さ=30mm; ワイヤ径=4mm

*2 引張試験片: JIS Z 3111 A1号(径=12.5mm、標点距離=50mm)

衝撃試験片: JIS Z 3111 2mm Vノッチ

試験片採取位置: 溶着金属中央、板厚1/2

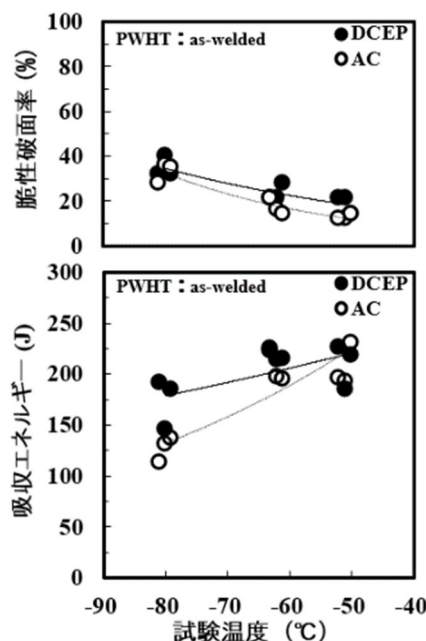


図 2 溶着金属のじん性遷移曲線⁹⁾

新 SAW ワイヤ/新 SAW フラックスの組合せで、直流（DCEP）で溶接した場合の拡散性水素量を表 2 に示す。フラックス設計の最適化により、拡散性水素量は約 3mL/100g と低い値を示している。

表 2 拡散性水素試験結果⁹⁾

拡散性水素試験結果*1					
	極性	拡散性水素量(mL/100g)			
		N=1	N=2	N=3	Avg.
新SAWワイヤ, 新SAWフラックス	DCEP*2	3.2	3.3	3.3	3.3

*1 試験要領: JIS Z 3118, ガスクロマトグラフィー法

*2 溶接条件: 550A-30V-400mm/min, ワイヤ突出し長さ=30 mm, ワイヤ径=4mm
再乾燥条件: 350°C × 1 h, 溶接雰囲気: 11°C × 79 %RH

2-2. 溶接継手の諸性能

新 SAW ワイヤ／新 SAW フラックスの組合せで狭開先 SAW 溶接試験を行い、溶接継手の諸性能を評価した。試験条件を表 3、溶接条件を表 4、開先形状と施工要領を図 3 に示す。高能率化を目的にタンデム溶接とし、後行極には 2.4 mm の双極を適用した。タンデム溶接の電極配置を図 4 に示す。溶接継手の断面マクロを図 5、溶接金属の機械的性質を表 5 に示す。溶接継手においても、強度を確保しつつ、-60°C で良好な衝撃性能を確保できている⁹⁾。

表 3 試験条件⁹⁾

溶接ワイヤ	新SAWワイヤ, 先行極ワイヤ:4.0mm φ 後行極ワイヤ:2.4mm φ × 2
フラックス	新SAWフラックス
母材鋼板	JIS G 3106 SM490A, 80 mm ^L × (150+150) mm ^W × 800 mm ^L

表 4 溶接条件⁹⁾

	溶接パス	溶接条件*1	入熱 (kJ/mm)
1st 側	1	シングル, DCEP, 600A-30V-600mm/min	1.8
	2	シングル, DCEP, 650A-30V-600mm/min	2.0
	3-8	タンデム, 先行極: DCEP, 650A-30V 後行極: AC, 600A-32V-700mm/min	3.3
2nd 側	1	シングル, DCEP, 600 A-30 V-600 mm/min	1.8
	2-21	タンデム, 先行極: DCEP, 650A-30V 後行極: AC, 600A-32V-700mm/min	3.3

*1 予熱・パス間温度: 100~147°C

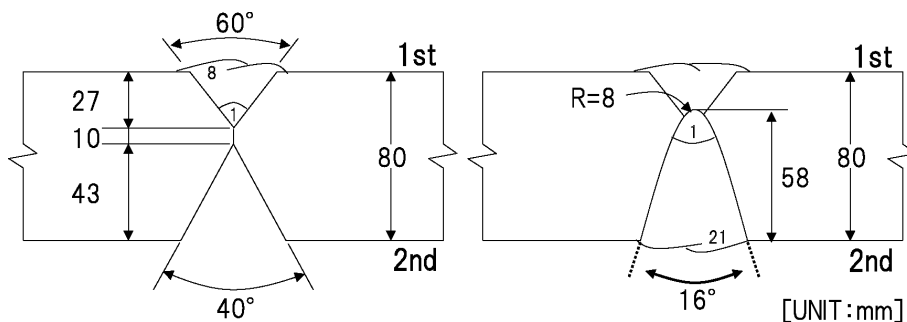


図 3 開先形状と施工要領⁹⁾

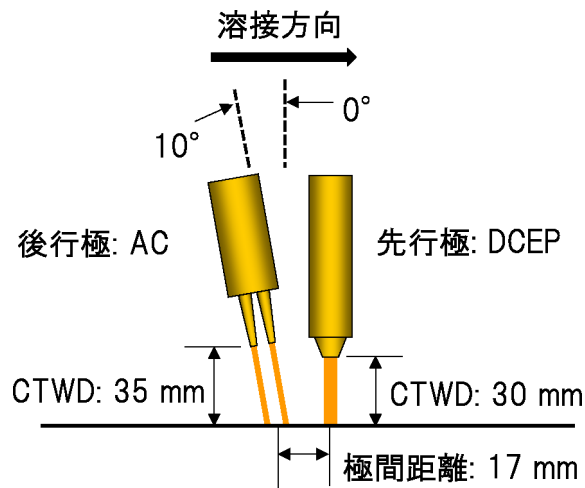


図4 タンデム溶接の電極配置⁹⁾

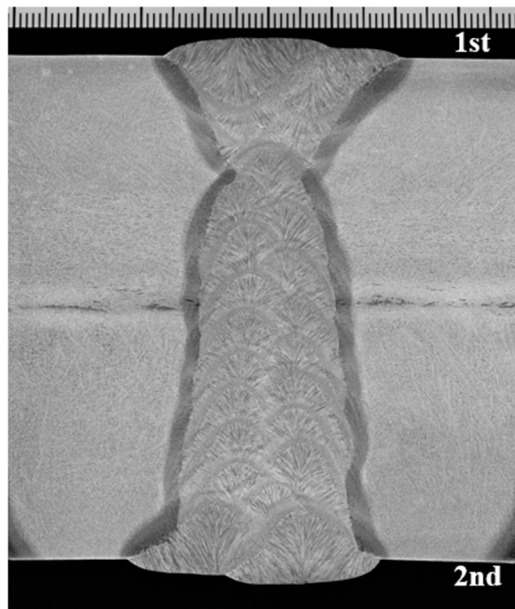


図5 溶接継手の断面マクロ⁹⁾

表5 溶接金属の機械的性質⁹⁾

溶接金属の機械的性質 ^{*1,2}							
採取位置	引張性能			衝撃性能			
	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	吸収エネルギー(J)			
				【-60℃】		【-40℃】	
表面から7mm	496	618	33	112	Avg. 121	161	Avg. 155
				123		156	
				127		147	
板厚中央	580	634	28	162	Avg. 165	194	Avg. 195
				181		196	
				152		196	
裏面から7mm	591	664	28	128	Avg. 146	184	Avg. 184
				130		185	
				179		183	

*1 PWHT条件:溶接のまま

*2 引張試験片:JIS Z 3111 A2号(径=6mm、標点距離=24mm)

衝撃試験片:JIS Z 3111 2mm Vノッチ

3. 新エレクトロスラグ溶接法⁷⁾

新エレクトロスラグ溶接法（以下、新 ESW 法という）は、従来の ESW 法の要素技術をもとに当社が開発した高能率な立向自動溶接法である。新 ESW 法の構成を図 6 に示す。新 ESW 施工では開先の表側に水冷摺動銅板、裏側にセラミックス製裏当て材を使用する。新 ESW 法における溶接の状況を図 7 に示す。新 ESW 法はアーク溶接と異なり、投入したフラックスを溶解してスラグ浴を形成し、その抵抗発熱によりワイヤを溶融しながら溶接が進行するため、スパッタやヒューム発生量が極めて少ない。この際、スラグ浴の対流作用によって溶込みが形成され、厚板の突合せ継手においても 1 パスで溶接が完了する。また、溶融池はスラグ浴に保護されるため、シールドガスは不要である。

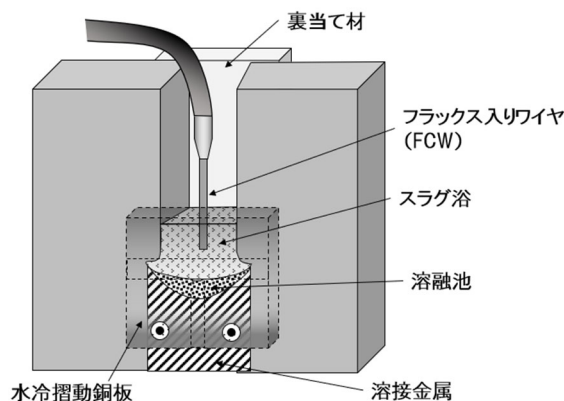


図 6 新 ESW 法の構成⁹⁾

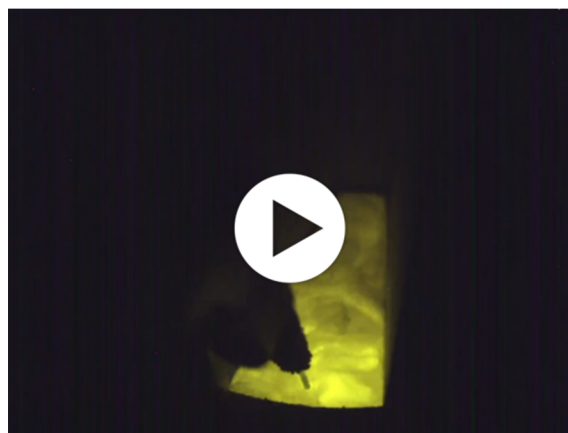


図 7 新 ESW 法における溶接の状況

3-1. 専用溶接材料

従来の ESW 法は、国内の箱形断面柱スキンプレートと内ダイアフラムの溶接に適用されてきたが、溶接装置の構造から溶接長が制限される側面があった。新 ESW 法は、新たに開発した専用溶接装置と専用溶接材料のフラックス入りワイヤ（以下、新 ESW ワイヤという）および熔融型フラックス（以下、新 ESW フラックスという）を用いて行う溶接施工法とし、従来 ESW 法の短所（溶接長の制限）を克服している。母材には JIS G 3106 SM490A を用い、入熱が新 ESW 溶接金属の機械的性質に及ぼす影響を調査した。入熱と強度（耐力・引張強さ）の関係を図 8、入熱と -20°C 吸収エネルギーとの関係を図 9 に示す。新 ESW 法における溶接金属の強度は入熱の増加とともに低下するが、そのマイクロ組織は微細なままであり、優れたじん性を維持できている。

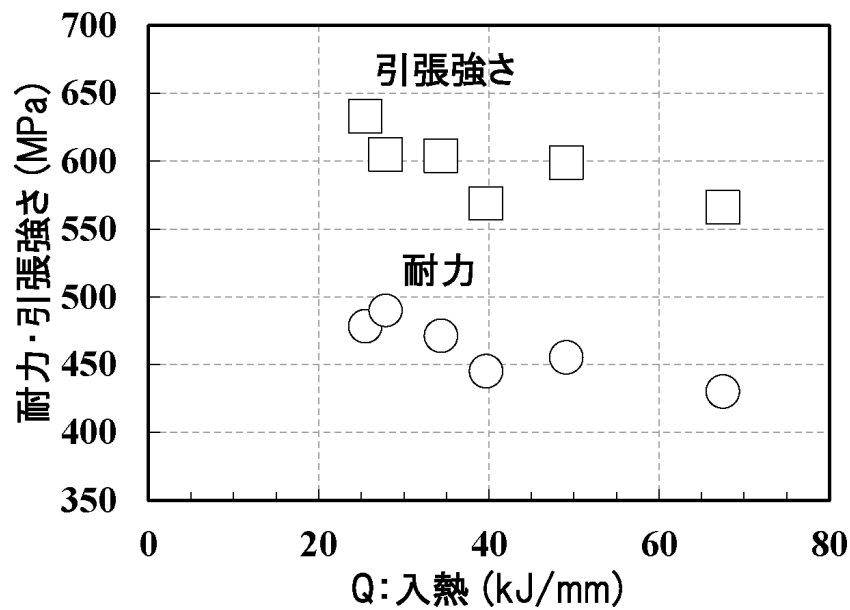


図8 新ESW法における入熱と耐力・引張強さの関係⁹⁾

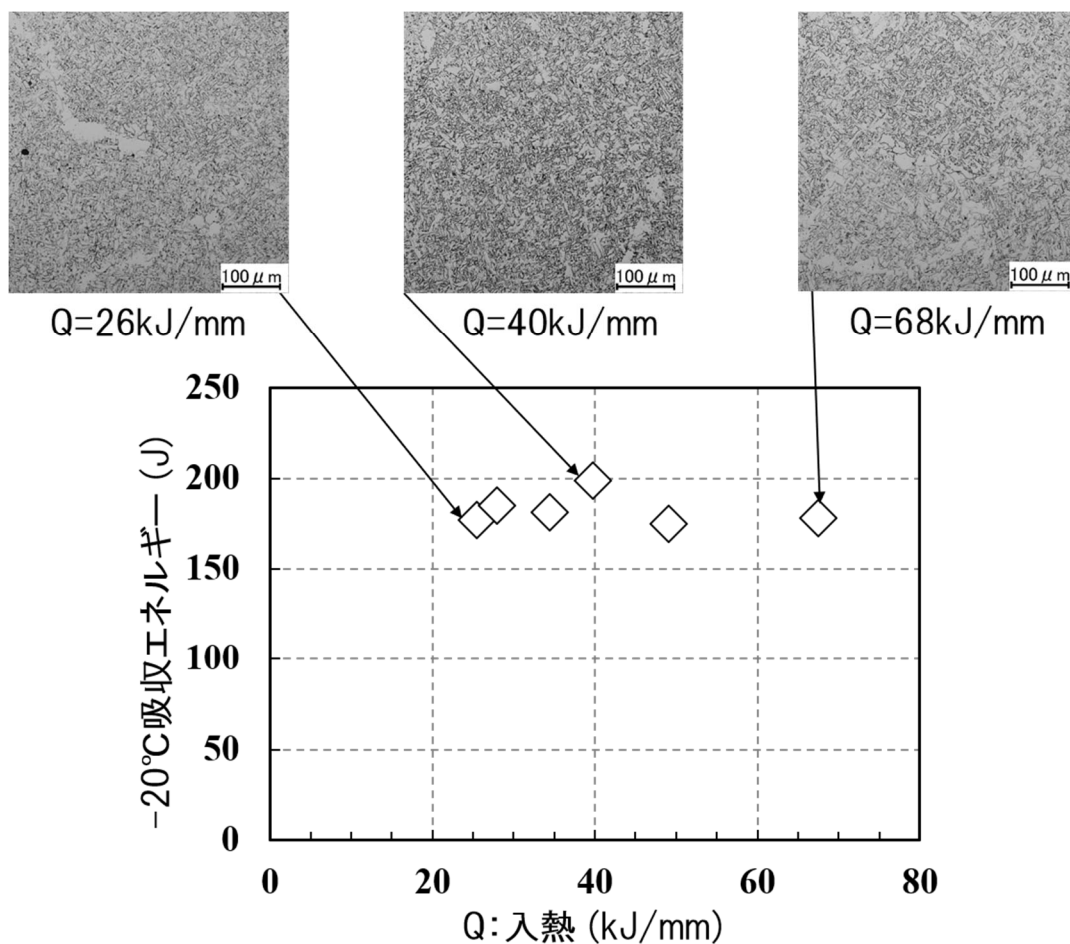
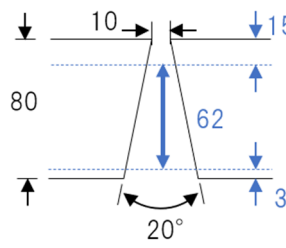


図9 新ESW法における入熱と-20°C吸収エネルギーの関係⁹⁾

3-2. 溶接継手の諸性能

新 ESW 法では、幅広い入熱範囲で良好な機械的性質が得られ、板厚 80 mm までは 1 パスで溶接可能であることが確認されている。板厚 80 mm の極厚板溶接の試験および溶接条件を表 6 に示す。母材には JIS G 3106 SM490A を使用した。溶接継手の断面マクロ組織を図 10、溶接金属の機械的性質を表 7 に示す。板厚 80 mm における溶込みは良好であった。入熱は 70 kJ/mm まで増加したが、溶接金属は十分な強度および-40℃まで良好なじん性を確保できている。なお、本稿では、溶接金属中央の機械的性質についてのみ示すが、このような大入熱溶接において HAZ 部も含めた継手全体の機械的性質を確保するためには、鋼板についても大入熱溶接に適用した鋼板が必要となる。

表 6 試験および溶接条件⁹⁾

溶接材料	新ESWワイヤ／新ESWフラックス
母材	JIS G 3106 SM490A, 80 mm ^t ×(150+150) mm ^w ×600 mm ^l
開先形状 および オシレート条件	 <p>[単位:mm]</p>
溶接条件	DCEP, 420 A-47 V-17 mm/min
入熱	70 kJ/mm
予熱	室温
PWHT条件	溶接のまま

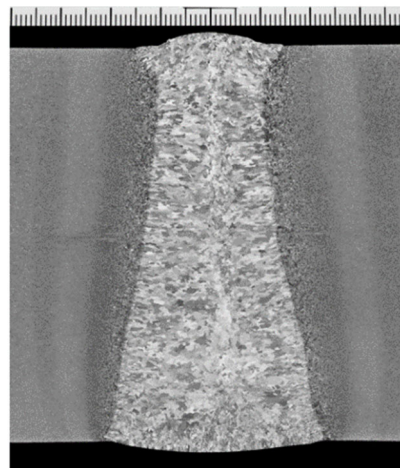


図 10 溶接継手の断面マクロ⁹⁾

表 7 溶接金属の機械的性質⁹⁾

溶接金属の機械的性質 *1.2							
採取位置	引張性能			衝撃性能			
	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	吸収エネルギー(J)			
				【-40℃】		【-20℃】	
表面から7mm	435	561	24	168	Avg. 163	186	Avg. 199
				169		196	
				153		214	
板厚中央	438	568	25	191	Avg. 174	202	Avg. 200
				176		207	
				155		200	
裏面から7mm	446	577	23	162	Avg. 161	184	Avg. 173
				159		200	
				163		136	

*1 PWHT条件:溶接のまま

*2 引張試験片:JIS Z 3111 A0号(径=10mm、標点距離=50mm)

衝撃試験片:JIS Z 3111 2mm Vノッチ

4. おわりに

近年、再生可能エネルギーとして持続的に利用可能な風力発電への期待が高まっており、とくに洋上風力発電は、ヨーロッパから世界的に導入が拡大している。2023年12月に発表された国内ラウンド2の選定結果では、定格出力15~18MWの超大型風車が採用された⁸⁾。また、運転開始までの迅速性に関しても重要視されており、建造工程の効率化においても一層の技術革新が求められる。

本稿では、洋上風力発電設備の巨大モノパイルなどの製作に用いられる極厚板の溶接に好適な狭開先SAW材料と新ESW法について紹介した。前者は、狭開先化により溶接施工の効率化に寄与する溶接技術である。狭開先SAW施工では、スラグ剥離が問題になることがあるが、フラックス設計の最適化により狭開先における良好なスラグ剥離性を確保している。後者は、大入熱化および省パス化により、溶接施工の効率化に寄与する溶接技術である。縦シーム溶接には、一般に下向のSAW溶接が用いられるが、立向で自動溶接可能な新ESW法では、鋼板を立てて複数のシームを同時に施工できる。いずれも極厚板の高効率な溶接施工に寄与するとともに、洋上で用いられる鋼製大構造物に必要な強度と低温じん性を兼ね備えた良好な機械的性質を有する溶接金属を得ることができる。これにより、今後、溶接継手の健全性・信頼性のみならず、発電設備の大型化・量産化が求められる洋上風力分野での幅広い適用が期待される。

参考文献

- 1) 自然エネルギー財団. 洋上風力発電の動向. 第3版, 2022, p.6-19.
- 2) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構[編]. NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 第2版, 第3章洋上風力, 森北出版株式会社, 2014, p.45-46.
- 3) 本庄暢之. 電気学会誌. 2009, Vol.129, No.5, p.284-287.
- 4) IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2021. 2022, p.106.
- 5) IEA. World Energy Outlook 2019. 2019, p.619-620.
- 6) Kobelco welding today. 2021, Vol.24, p.3-7.
- 7) 柿崎智紀. ぼうだより. 2020, Vol.507, p.2-6.
- 8) 経済産業省 第2ラウンド公募結果のポイント
- 9) 山口幸祐. R&D 神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.44-48

<略歴>

山 口 幸 祐 (やまぐち こうすけ)

2018年3月 大阪大学 大学院工学研究科 ビジネスエンジニアリング専攻 修士課程
修了

2018年4月 株式会社神戸製鋼所 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部 入社
現在に至る