

特集：カーボンニュートラル社会への取り組み

大容量アンモニアタンクの溶接技術開発

株式会社 I H I

田辺 祥大、兵間 賢吾、山田 寿一郎、猪瀬 幸太郎

1. はじめに

第7次エネルギー基本計画が2025年2月18日に閣議決定された<sup>1)</sup>。これまでの安全性確保を前提にした、安定供給経済効率性の向上、環境への適合を原則とするエネルギー政策(S+3E)は踏襲されているが、第6次エネルギー基本計画策定以降、経済安全保障、電力需要など、エネルギー政策をとりまく環境の激変も指摘された。そうした変化の表れとして、カーボンニュートラルでは、高い目標を維持しつつも、多様かつ現実的な対応がなされるようになってきている。例えば、脱炭素化が難しい分野における天然ガスなどへの燃料転換、水素、アンモニア、合成燃料、合成メタンなどの活用である。

図1にアンモニアバリューチェーンを例示する<sup>2)</sup>。本図中央に燃料ハンドリングがあり、大型貯槽がバリューチェーンの重要な構成要素とされている。また本図ではアンモニアの利活用として直接燃焼を挙げているが、アンモニアは水素キャリアとしても注目されている。

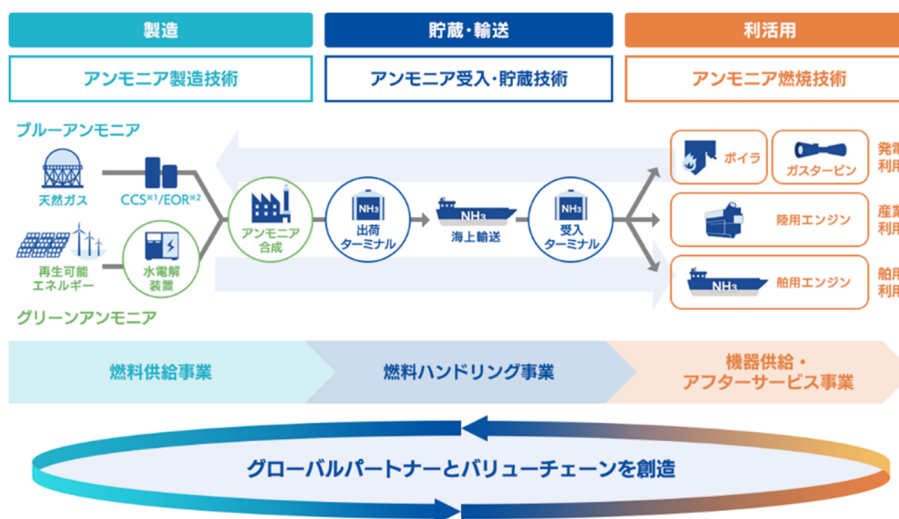


図1 燃料アンモニアバリューチェーン事業の目指す姿<sup>2)</sup>

このように重要視されている液化アンモニア大型貯槽の規模(容量)であるが、15万ton程度、あるいはそれ以上が必要とされている。構造形式は4万ton~10万tonクラスの貯槽はPC外槽貯槽形式(PC:Prestressed Concrete アンモニア貯槽)、それ以上はPCメンブレン貯槽形式が検討されている<sup>3)4)</sup>。前者の構造パース図を図2に、後者のそれを図3に示す。本稿では、PC外槽貯槽形式への適用も検討している低温貯槽用の溶接技術について述べる。

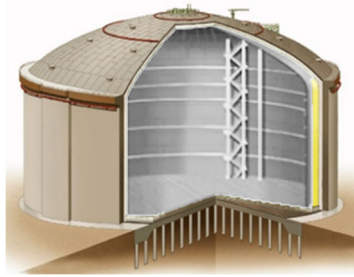


図2 PC外槽貯槽形式

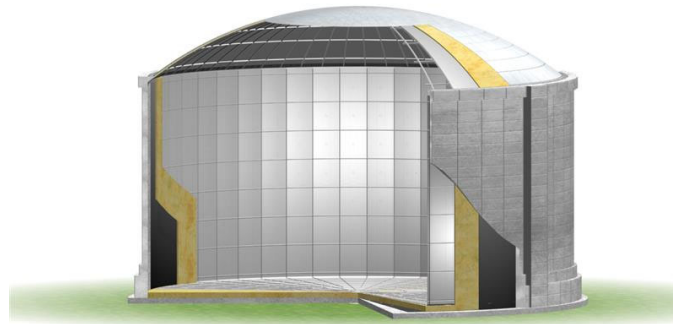


図3 PCメンブレン貯槽形式

PC アンモニア貯槽のうち容量4万 ton 程度までは内槽にアルミキルド鋼 SLA325 を用いる。貯槽の現地溶接では溶接後熱処理 (PWHT) はきわめて困難であり、それが免除される板厚が38mm 以下であるため、規模として4万 ton 程度が限界となる。そこで、より大型の10万 ton 程度には二相ステンレス鋼 SUS821L1 (21Cr-2Ni-3Mn-Cu-0.17N 系のリーニ二相ステンレス鋼) を用いる事が検討されている。こうした貯槽開発において、これまでの大型低温貯槽開発で蓄積した溶接技術が重要な役割を担っている。

## 2. 低温貯槽用の溶接技術とその手法

低温貯槽等の大型構造物では、施工の高能率化を図るため、高い溶着速度が求められる。また同時に溶接継手において所要の性能を満たすことが必須とされ、特に低い温度で供用する構造物の溶接金属はぜい性破壊を防止するために高いじん性が求められる。高い溶着速度のみを求める場合、サブマージアーク溶接、フラックス入りワイヤを用いたマグ溶接、Ar に数%の活性ガスを添加したマグ溶接などが有利である。しかし、じん性に関してはシールドガスやフラックス等から溶接金属に混入した酸素が主要因となり衝撃試験において十分な吸収エネルギーが得られない場合がある。また、これらの溶接プロセスはフラックス由来のスラグや活性ガス由来の酸化スケールを生成する。グラインダー等を使用した除去作業を要する場合には、高い溶着速度の優位性が減じられる。一方、工事によってはじん性確保を優先し、ティグ溶接を全面的に採用することもある。ただしティグ溶接は溶着速度が低く、溶接施工に時間を要し、製作コストの増加要因となる。こうしたことから、高い吸収エネルギーと高い溶着速度を両立する純 Ar シールド下でのミグ溶接が有効な解決策の1つと期待されている。

通常、純 Ar シールド下でのミグ溶接はアークが不安定になりやすく困難<sup>5)6)</sup>とされている。これは、陰極点が不規則に発生・移動することによってアークの発生方向が一定化せず、溶滴移行が不適正になる、あるいは溶接部への入熱が不足するなどの理由による。この対策として、同軸複層ワイヤ<sup>7)8)9)</sup>やフラックス入りワイヤ<sup>10)</sup>、希土類元素添加ワイヤ<sup>11)</sup>、パルスピーク電流による周期的な短絡移行制

御<sup>12)</sup>、交流パルスミグ溶接<sup>13) 14)</sup>、アークとプラズマを同軸で組み合わせたプラズマミグ溶接<sup>15)</sup>、ティグ溶接-ミグ溶接の複合化<sup>16) 17) 18) 19)</sup> など純 Ar シールド下であっても安定した溶接を行う様々な手法が開発・報告されている。これまで著者らは同軸複層ワイヤを用いた純 Ar-ミグ溶接の安定化に取り組んできた<sup>8) 9)</sup>。また、純 Ar シールド溶接を高能率化した高能率自動ティグ溶接法 SEDAR-TIG<sup>20) 21)</sup> も活用してきた。本報では、さらなるじん性と経済性の両立を目指して開発した純 Ar-ミグ溶接手法<sup>22)</sup><sup>23)</sup> を紹介する。本手法は、通常のスリッドワイヤを用い、かつ特殊な機材を要しない。陰極点の発生状況をコントロールし、純 Ar シールド下でのアークを安定させ良好なビードを得る。

本手法では、純 Ar シールドにおけるアークおよび溶滴移行の安定性を高めるため、出力特性を調整したデジタルインバータ制御のパルス溶接電源を使用する。加えて、振り子式のトーチウィービング装置を介してトーチを保持し、溶接方向に対して前後に所定の周波数でウィービング（以下、前後ウィービングと表記）を行うことでさらなるアークの安定化を実現する。溶接の進行と前後ウィービングの関係の模式的図を図 4 に示す。ここで、溶接電源の出力特性は、GMA 溶接で通常用いられる定電圧特性（一般的な定電圧特性アーク電圧変化をチップ-母材間距離の変化と捉えてアーク電圧を一定化しようとする）と比較すると、定電圧特性をベースとするが電圧変化に対する出力制御の応答は鈍く設定している。この結果として激しい電圧変化に対しては出力を変えない制御が行われる。これは、純 Ar シールド下の陰極点の発生・移動によって、アーク電圧が激しく変化した場合に、それに連動して溶接電流波形が著しく乱される事を防止するための措置である。これは純 Ar シールドのパルスミグ溶接を安定化させる「デジタルフィルタ」として報告されている<sup>24)</sup>。定電圧特性を使用した場合の、陰極点発生状況の変化によっておきる溶接電流波形の大きな変動は、ワイヤ溶融速度の変動、見かけのアーク長変動、溶接部へ投入されるエネルギーの不安定化を招き、外観・ビード形状の不良、溶込みの不足など、開先の積層溶接における深刻なリスクとなる。

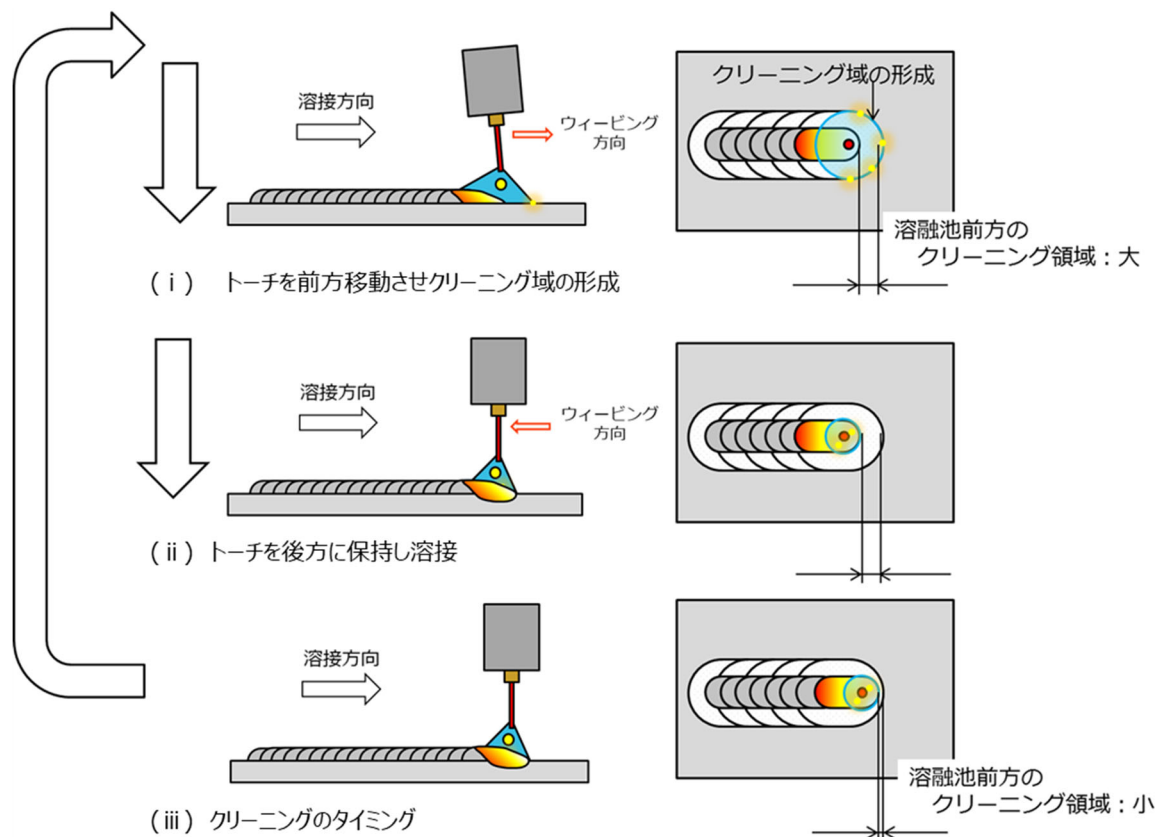


図 4 溶接の進行と前後ウィービングの関係

### 3. 溶接施工性の改善効果

前後ウィービングによるアーク状態への影響を解説する（図 5）。トーチが前方に向いている期間（以下、クリーニング期間とする）ではアークの裾野が広がっており、動画中ではクリーニング領域に広く陰極点の発生が観察できる。クリーニング作用が働いていると判断できる。一方、トーチが後方に向いている期間（以下、アーク集中期間とする）ではアークが溶融池に集中しており、アーク全体の形状はつりがね型になる。前後ウィービングを行うことでこの2種類の期間が規則的に、所定の周期で現れる。

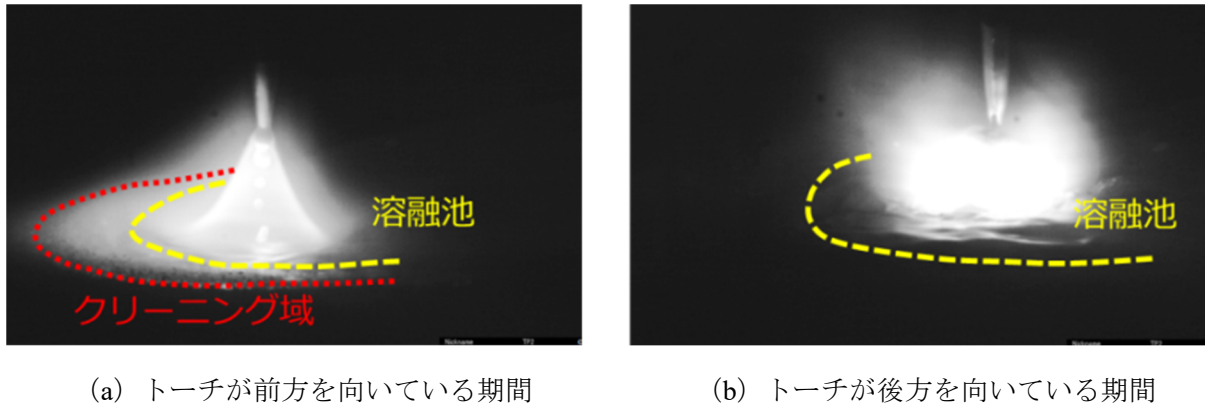


図 5 アーク状態の高速度撮影画像

本手法の溶接施工性に対する改善効果を確認するために、図 6 に示す溝開先に対して純 Ar シールドのミグ溶接を実施した。表 1 (a) に示す Ar+2%O<sub>2</sub> シールド用モードの溶接条件を使用し、シールドガスとして純 Ar を用いた場合と、表 1 (b) に示す本手法の溶接条件を使用した場合の、ミグ溶接ビード外観および断面形状の違いを図 7 に示す。両者の溶接条件はワイヤ送給速度（すなわち設定電流）と溶接速度を合わせ、比較的安定したアークが得られるように設定電圧を調整した。通常の溶接モードを使用して純 Ar-ミグ溶接を行った図 7 (a) の場合は、ビード止端部の濡れ広がりが悪く、凸ビードになってしまうため、開先内での積層溶接を健全に続けるのが困難となる。一方で、本手法を用いて純 Ar-ミグ溶接を行った図 7 (b) の場合は、ビード止端部の濡れ広がりが良好で、後続の積層溶接を行うのに適したビード形状が得られる。

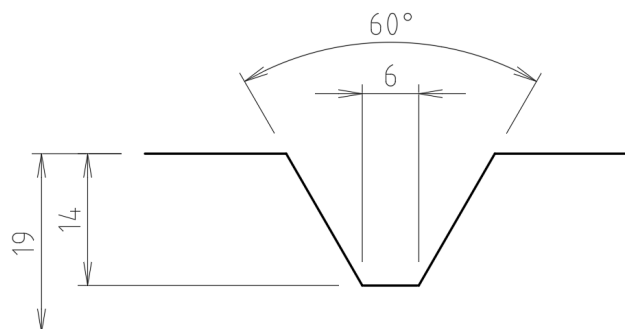


図 6 溝開先形状（単位：mm）

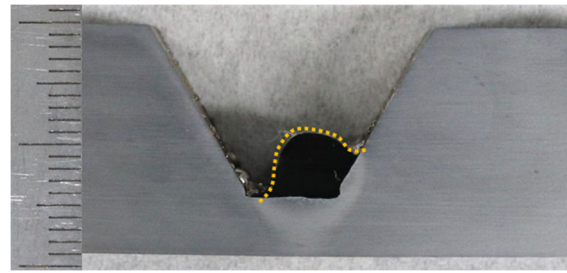
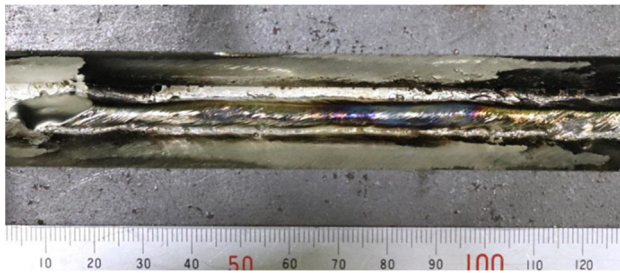
表 1 溝開先の溶接条件

(a) Ar+2%O<sub>2</sub> シールド用溶接モード使用時

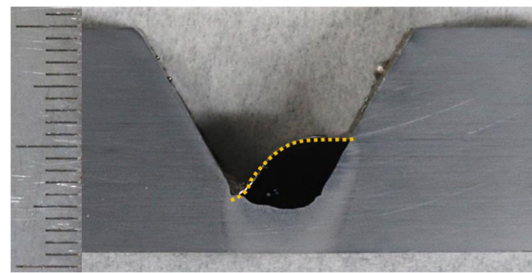
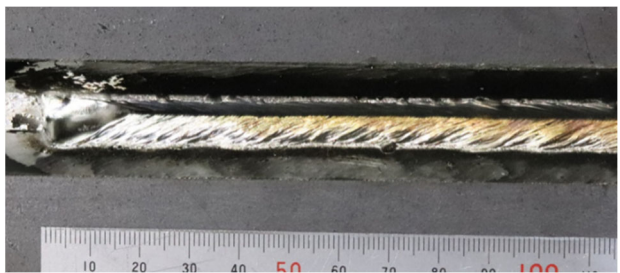
母材	SM490A
溶材	TG-S709S
シールドガス (インナー)	Ar (流量25L/min)
シールドガス (アウター)	Ar (流量45L/min)
溶接姿勢・継手	下向き
形状	V開先・溝
開先 角度	60 [deg]
ルートギャップ	6 [mm]
ワイヤ送給速度	9.7 [m/min]
溶接速度	28.2 [cm/min]
溶接電流(実効値)	280 [A]
アーク電圧(実効値)	22 [V]

(b) 本手法使用時

母材	SM490A
溶材	TG-S709S
シールドガス (インナー)	Ar (流量25L/min)
シールドガス (アウター)	Ar (流量45L/min)
溶接姿勢・継手	下向き
形状	V開先・溝
開先 角度	60 [deg]
ルートギャップ	6 [mm]
ワイヤ送給速度	9.7 [m/min]
溶接速度	28.2 [cm/min]
溶接電流(実効値)	240 [A]
アーク電圧(実効値)	25 [V]



(a) Ar+2%O<sub>2</sub> シールド用溶接モードを用いて純 Ar-ミグ溶接を行った場合



(b) 本手法を用いて純 Ar-ミグ溶接を行った場合

図 7 ビード外観および断面形状の違い

#### 4. 溶接部の機械的性能評価

溶接性および溶接部の機械的性能を評価するため溶接試験体を作製した。ここでは、より供用条件の厳しい LNG 貯槽の溶接継手を例示する。溶接条件を表 2 および表 3 に、溶接した試験体外観および断面マクロを図 8 に示す。ビード形状は良好であったため、開先内における後続パスへの影響は小さく各パスにおいて健全な後続パスを溶接するために必要なグラインダー作業時間は 1m あたり平

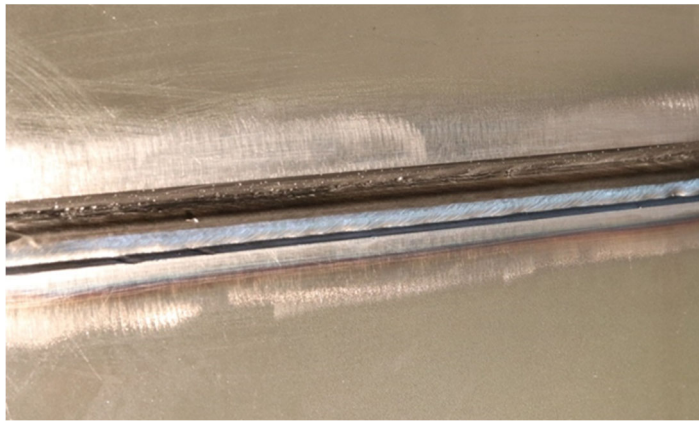
均 5 分程度であった。加えて十分な溶込みが得られておりマクロ試験によれば融合不良の発生はなかった。また、継手引張試験（図 9）、ビード縦曲げ試験（図 10）では良好な結果が得られ、シャルピー衝撃試験（図 11）では同じ溶接材料（TG-S709S）を使用したティグ溶接部同等の良好な衝撃性能を有していることを確認した。

**表 2 突合せ溶接条件**

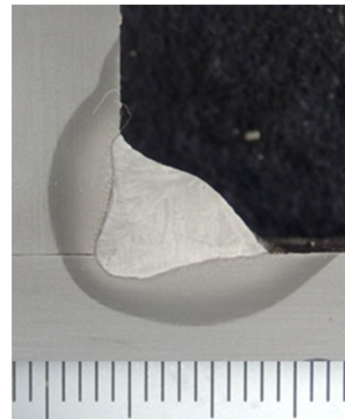
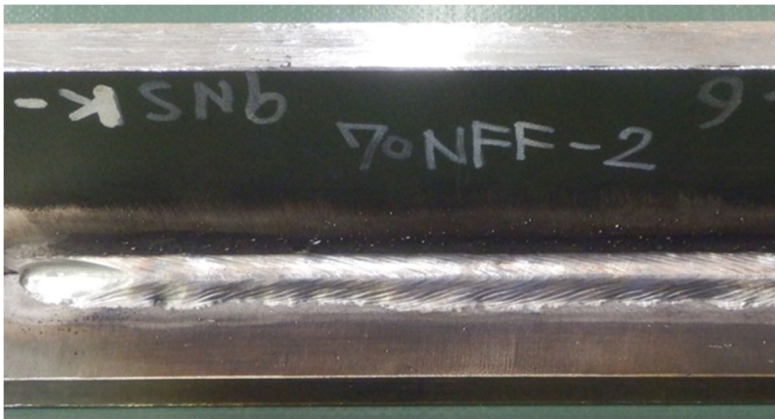
母材	9%Ni鋼
溶材	TG-S709S
シールドガス（インナー）	Ar（流量25L/min）
シールドガス（アウター）	Ar（流量45L/min）
溶接姿勢・継手	横向き・突合せ
開先	
板厚	25 [mm]
形状	V開先
角度	45[deg]
ルート ギャップ	3~4 [mm]
ワイヤ送給速度	4.7~9.7 [m/min]
溶接速度	16~30 [cm/min]
溶接電流(実効値)	120~230 [A]
アーク電圧(実効値)	27~36 [V]

**表 3 すみ肉溶接条件**

母材	9%Ni鋼
溶材	TG-S709S
シールドガス（インナー）	Ar（流量25L/min）
シールドガス（アウター）	Ar（流量45L/min）
溶接姿勢・継手	水平・すみ肉
開先	
形状	—
角度	—
ルート ギャップ	—
ワイヤ送給速度	10.3 [m/min]
溶接速度	40.0 [cm/min]
溶接電流(実効値)	245 [A]
アーク電圧(実効値)	24.5 [V]



(a) 横向き突合せ継手



(b) 水平すみ肉継手

図 8 溶接中の試験体ビード外観および溶接完了後の断面マクロ



(a) 側面

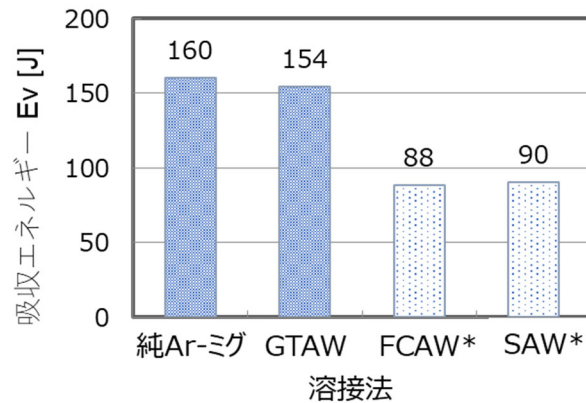


(b) 上面

図 9 継手引張試験結果 (母材破断, 引張強さ : 713MPa)



図 10 ビード縦曲げ試験結果（左：表曲げ，右：裏曲げ，いずれも欠陥無し）



\*FCAW<sup>22)</sup>, SAW<sup>23)</sup>の値は引用

図 11 シャルピー吸収エネルギー（試験温度：-196°C，試験位置：溶接金属中央）

## 5. おわりに

本稿では低温貯槽製作のための純 Ar シールド下でのミグ溶接について述べた。純 Ar シールド下で安定したアークを得るため、溶接電流のパルス制御など様々な手法が検討されている。著者らが開発した陰極点発生状況の制御もその一つであるが、これは特殊な機材を要しない点において実用的と言える。また他の手法のなかには、本手法と併用できるものもある。併用する事でアークがより安定化すれば、溶接条件範囲を広く設定できる。例えば、溶接条件範囲が広がれば様々な溶接姿勢に対応することで工場製作・現地施工を問わずより多くの部材に幅広く適用できるほか、溶接金属を薄く積層し、後続パスの再熱効果によって高い継手じん性を得るような施工も可能となる。こうした施工性向上に資する溶接技術はカーボンニュートラル時代の新たな低温貯槽製作に貢献するものと考えている。

## 参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：エネルギー基本計画について，資源エネルギー庁 HP，  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/)，(2025)
- 2) 燃料アンモニアバリューチェーン事業の目指す姿，IHI ホームページ，  
[https://www.ihico.jp/sustainable/environmental/climatechange/ammonia\\_energy/](https://www.ihico.jp/sustainable/environmental/climatechange/ammonia_energy/)
- 3) 山田寿一郎，田附英幸，中村英晃：低温液化アンモニア用プレストレストコンクリート側壁メンブレン貯槽の開発，圧力技術，第 61 巻 5 号，pp227-233 (2023)

- 4) 103-4) 山田 寿一郎 : アンモニアタンクの製造と溶接技術, 溶接接合工学振興会第 32 回セミナーテキスト, (2023), pp69-95
- 5) F. Matsuda, M. Ushio, S. Saikawa, Y. Maruyama and T. Araya: Study on GMA Welding for 9% Ni Steel with Similarly Composed Nickel Alloy Wire, Journal of the Japan Welding Society, Vol.52, No.3 (1983) , 306-313
- 6) M. Ushio and F. Matsuda: Effect of Oxygen on Stabilization of Arc in 9%Ni-Steel GMA Welding, Transactions of JWRI, Vol.7, No.1 (1978) , 93-100
- 7) T. Nakamura and K. Hiraoka: GMA welding of 9% Ni Steel in the pure Argon shielding gas using coaxial multi-layer solid wire, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 30-3 (2012) , p245-261 T. Nakamura and K. Hiraoka: GMA welding of 9% Ni Steel in the pure Argon shielding gas using coaxial multi-layer solid wire, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 30-3 (2012) , p245-261
- 8) K. Hyoma: Application of Ar-GMA using coaxial multilayer solid wire to position welding, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol. 102 (2014) , 118-119
- 9) K. Hyoma: Study on the application of 100%Ar-GMAW using coaxial hybrid wire to position welding for 9% Ni similar composition metal, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.99 (2016) , 110-111
- 10) M. Miyata and R. Suzuki: Expansion of "MX-MIG process" as Argon Only Gas Shield Welding Method - for Alloy Steel-, Kobe Steel Works Engineering Reports, Vol.63 (2013) , 67-72
- 11) K. Agusa, M. Kosho, N. Nishiyama, A. Kamada, and Y. Nakano: Matching Ferritic Filler MIG Welding of 9% Ni Steel, Kawasaki Steel Giho, Vol.14, No.3 (1982) ,59-70
- 12) K. Konishi: Influence of shielding gas property on arc stability and shieldability of high current pulse MIG welding –Development of slag-less arc welding technology for hot rolled ultra-high strength steel–, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.115 (2024) , 170-171
- 13) K. Hyoma: Study on the application of AC pulsed MIG welding processed for Ni-based alloy overlay welding, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.107 (2020) , 22-23
- 14) K. Hyoma: Study on the application of AC pulsed MIG welding processed for Titanium alloy welding, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.111 (2022) , 288-289
- 15) K. Ono, Z. Liu, T. Uezono, T. Era, T. Ueyama, and M. Tanaka: Development of plasma GMA welding system, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.83 (2008) , 326-327
- 16) S. Kanemaru, T. Sasaki, and T. Sato: Study of High-Quality and High-Efficiency Welding process by TIG-MIG hybridization, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.87 (2010) , 150-151
- 17) S. Kanemaru, T. Sasaki, T. Sato, and M. Tanaka: Study of High-Quality and High-Efficiency Welding process by TIG-MIG hybridization (Report 2) , Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.89 (2011) , 352-353
- 18) S. Kanemaru: TIG-MIG Hybrid Welding Process, Journal of the Japan Welding Society, Vol.82 (2013) , 5-7
- 19) S. Kanemaru, T. Sasaki, T. Sato, and M. Tanaka: Basic Study on TIG-MIG Hybrid Welding Process, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.30, No.1 (2012) , 29-34
- 20) K. Kobayashi, M. Yuki, A. Tejima, and Y. Nishimura: Ishikawajima-Harima engineering review, 42-3 (2002) , 127-132
- 21) K. Kobayashi, Y. Nishimura, T. Iijima, M. Ushio, M. Tanaka, J. Shimamura, Y. Ueno, and M. Yamashita:

Practical Application of High Efficiency Twin-Arc TIG Welding Method (SEDAR-TIG) for PCLNG Storage Tank, Welding in the World, Vol.48 (2004) , 35-39

- 22) Y. Tanabe: MIG Welding Process in 100%Ar shielding Gas for Nickel Alloy Solid Wire, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.102 (2018) , 180-181
- 23) Y. Tanabe: GMA Welding of High Strength Stainless Steel with Pure Ar Shielding Gas for Improvement of Toughness, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.122 (2023) , 10-11
- 24) T. Uezono, H. Tong, and T. Ueyama: Application of the stainless steel of pulsed MIG welding using pure Ar gas, Preprints of the National Meeting of JWS, Vol.75 (2004) , 119-120

<略歴>

### 田 辺 祥 大 (たなべ よしひろ)

---

2015年 大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 生産科学コース  
博士前期課程修了

2015年 株式会社 IHI 入社 技術開発本部 溶接技術部 配属

2019年 資源・エネルギー・環境事業領域 原子力 SBU 横浜工場

2021年 技術開発本部 技術基盤センター 接合グループ

2024年 技術開発本部 技術基盤センター 材料・構造技術部  
現在に至る

<略歴>

### 兵 間 賢 吾 (ひょうま けんご)

---

2012年 広島大学 大学院 工学研究科 機械物理工学専攻 博士前期課程修了

2012年 株式会社 IHI 入社 技術開発本部 溶接技術部 配属

2024年 技術開発本部 技術企画部 計画管理グループ  
現在に至る

<略歴>

### 山 田 寿 一 郎 (やまだ じゅいちろう)

---

1995年 石川島播磨重工業(株) (現(株)IHI) 入社 プラント事業部配属

2024年 (株)IHI プラント 理事 構造技術部 部長  
現在に至る

<略歴>

**猪瀬 幸太郎（いのせこうたろう）**

---

1993年 金沢大学大学院 機械システム工学 修士課程（機械工学専攻）修了  
1993年 石川島播磨重工業(株)（現(株)IHI）入社 橋梁事業部配属  
2001年 技術士（建設部門）取得  
2001年 IHI 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部 研究員  
2008年 大阪大学大学院 工学研究科にて博士（工学）取得  
2020年 IHI 技術開発本部技術基盤センター溶接 Gr. 部長  
2024年 IHI 技術開発本部技術基盤センター材料・構造部 主幹  
現在に至る