

特集：溶接用シールドガス

## 二相ステンレス鋼のティグ溶接における シールドガス中への窒素添加の効果

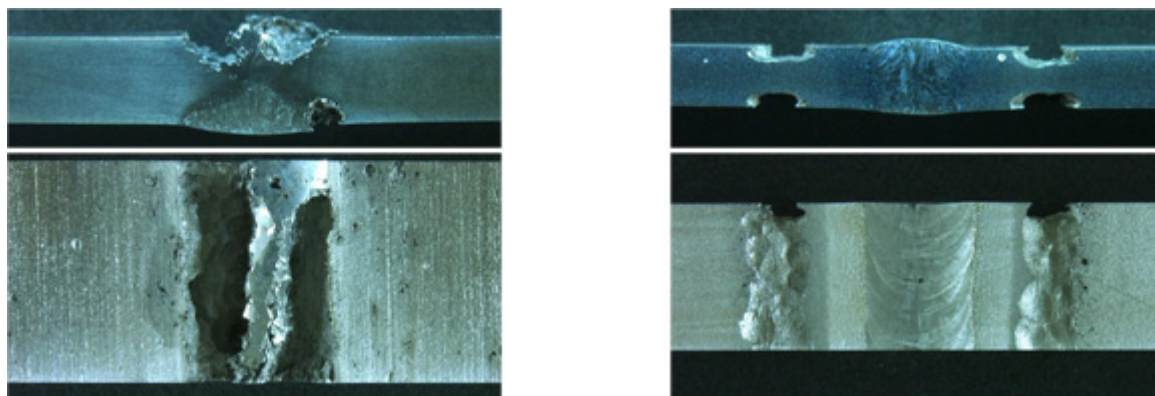
木村化工機株式会社  
新谷 大介

### 1. はじめに

化学プラント機器向けの耐食材料として、最近では二相ステンレス鋼がよく使用されている。二相ステンレス鋼は高Cr低Niの組成とすることで、オーステナイト相とフェライト相が等量程度となるように組織を調整した材料である。この組成と組織によって、高い耐食性と低コスト化を両立していることが大きな特徴であり、特に同等のNi量のオーステナイト系ステンレス鋼と比べて耐応力腐食割れ性に優れていることから、SUS304やSUS316などでは少し耐食性が足りない条件下で利用価値が非常に高い。また強度が大きいことも優れた点である。このような二相ステンレス鋼の性質は、オーステナイト相とフェライト相のそれぞれの長所を兼ね備えたものと言われている。

一方で、二相ステンレス鋼は熱に弱いという側面があり、熱処理や溶接などによって性能が低下しやすい。特に溶接部の耐食性低下は著しく、**図 1(a)** に示すような溶接線が選択的に腐食する形態を示すことが多いため、熱影響部（母材）が腐食しやすいオーステナイト系ステンレス鋼 (**図 1(b)**) と比べると、その外観上の印象が悪く、施工不良として扱われやすい。今から30~40年前にも同様の問題により二相ステンレス鋼が敬遠された時代があり、今でも二相ステンレス鋼の施工は難しいとのイメージを払拭できていない。

溶接部の耐食性の低下は、二相ステンレス鋼の合金成分のひとつである固溶窒素（以下N）の含有量が影響することがわかっており、溶接部のN量を低下させないことが重要となる。本稿では、二相ステンレス鋼溶接部の品質を向上させるための方法として、ティグ溶接におけるシールドガスへの窒素ガス（以下N<sub>2</sub>）添加の効果について概説する。



(a) SUS329J4L (二相系)

(b) SUS304 (オーステナイト系)

図1 ステンレス鋼の溶接継手の腐食位置  
(6%塩化鉄水溶液への浸漬後)

## 2. 二相ステンレス鋼の溶接金属組織とその冶金的なメカニズム

二相ステンレス鋼のオーステナイト相とフェライト相は、母材においてはその体積率（相比）がほぼ同じであるが、溶接金属においてはそのバランスが崩れやすい。図 2 に、アルゴンガス（以下 Ar）を用いたティグ溶接でビード・オン・プレート試験を行った SUS329J4L の断面マクロ像を示す。溶接金属はフェライト相が多いことを示す黒色像（暗視野撮影時）を呈している。オーステナイト相はフェライト結晶粒界にわずかに生成しているだけで、この溶接金属のフェライト相量は約 90%にも及び、もはや二相ステンレス鋼とは言い難い。この試験はフェライト量が多くなりやすい条件で溶接しており、通常の溶接施工ではこれほど多くのフェライト相量にはなりにくい、いずれにせよフェライト相過多の組織は耐食性が低下しているため、腐食環境に晒された場合は前項の図 1 に示すような溶接金属の選択腐食が起こりやすくなる。二相ステンレス鋼の品質は、その相比が適正（溶接金属部においてはフェライト相量 30~70%）であることを前提としているため、溶接部における相比は品質評価のひとつの指標となる。

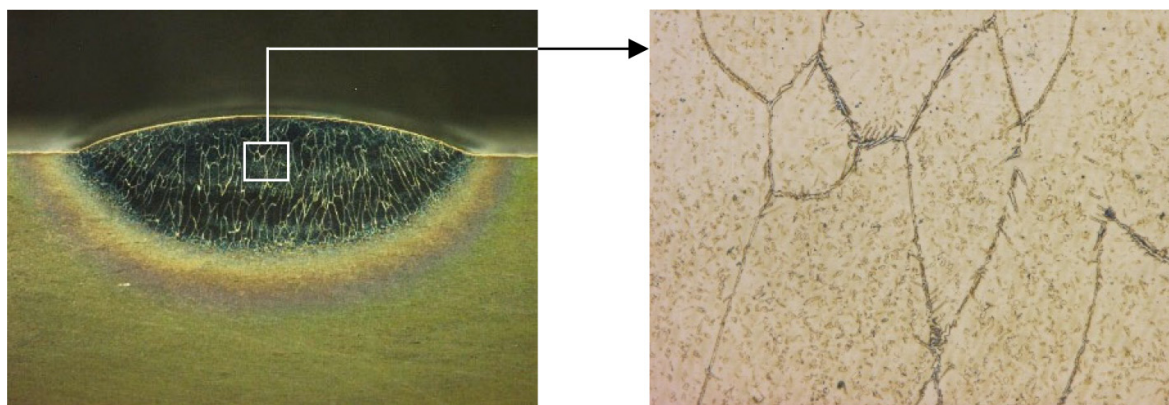


図 2 SUS329J4L のティグ溶接によるビード・オン・プレート試験片の断面  
(Ar シールドガス, YS329J4L)

二相ステンレス鋼の溶接金属がフェライト相過多となることは二相ステンレス鋼特有の現象で、次に示す 2 つの要因がある。

- ① 溶接後の過大な冷却速度（凝固直後から 800°C ぐらいまで）
- ② 溶接金属からの N の離脱

まず①のメカニズムを示す平衡状態図を図 3 に示す。例えば SUS329J4L の場合、溶接された二相ステンレス鋼は赤矢印で示す冷却過程で相変態をしながら  $\alpha$  相（フェライト相）+  $\gamma$  相（オーステナイト相）の二相組織となる。このとき、溶接直後はフェライト相 100%の組織であり（L →  $\alpha$ （緑の領域））、その後 1200~800°C（水色の領域）においてオーステナイト相を生成する。しかし、冷却速度が過大であるとオーステナイト相が生成するための十分な時間が確保できず、フェライト相が過大なまま相比は固定されてしまう。

一方、図 3 中の黄色の領域は N によってオーステナイト相の生成領域が拡大することを示している。言い換えると、固溶 N 量が少なければオーステナイト相の生成領域は狭くなってしまふ。ほとんどの二相ステンレス鋼は合金成分として N を含むが、Ar を用いたティグ溶接では、溶接時に N が  $N_2$  として離脱するため、よりオーステナイト相の生成能力が低下する結果となる。これが②に伴う現象である。二相ステンレス鋼の溶接材料はオーステナイト相の生成を促すために母材よりも Ni が

2~4%多く含まれているが、それでも現実的にはフェライト相過多になりがちである。

①については、部材の板厚や継手形状などの影響も受けるため人為的なコントロールはできない。冷却を遅くするために入熱を大きくして溶接するという発想も思い浮かぶが、大入熱溶接では熱影響部の劣化や $\sigma$ 相ぜい化のリスクも懸念されるため避けるべきである。実用上、溶接金属の相比を適正化するには②をコントロールしてNの効果とうまく利用することが必要となる。

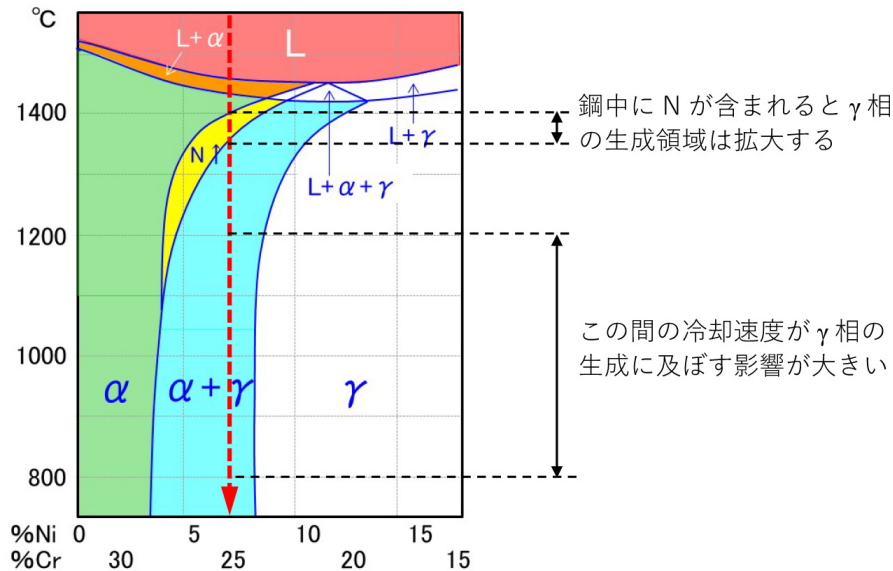


図3 Fe-Cr-Ni系の平衡状態図

### 3. 二相ステンレス鋼のティグ溶接におけるシールドガス中のN<sub>2</sub>の効果

二相ステンレス鋼母材やその溶接材料には合金元素としてNが含まれるが、溶接時に材料から離脱してその歩留まりが低下する。図4にArシールドガスを用いたティグ溶接(YS329J4L)で施工したSUS329J4L溶接部のN含有量を示す。溶接材料はNの歩留まりを確保するために母材よりも高くなっているが、このような溶接材料を用いても、溶接時のNの離脱により溶接金属内のN含有量は母材よりも低くなってしまふ。図4のNの変化は小さいように見えるが、0.1%のNは3%のNiに相当することから(Ni当量= $\%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn + 30 \times \%N$ による)、Nの離脱が相比に与える影響は大きい。

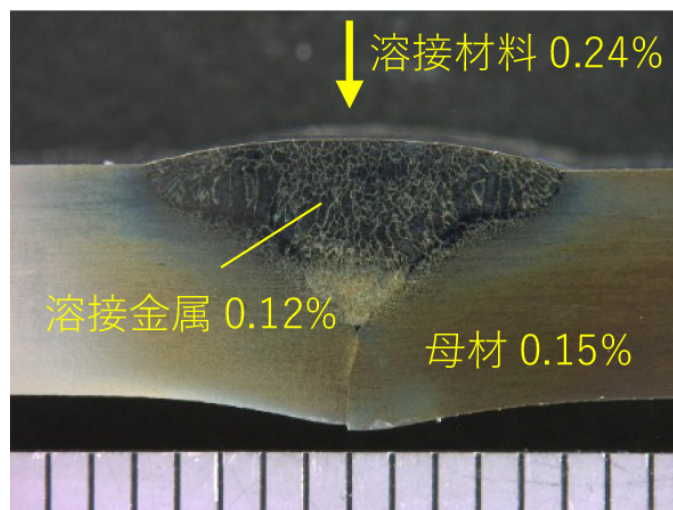
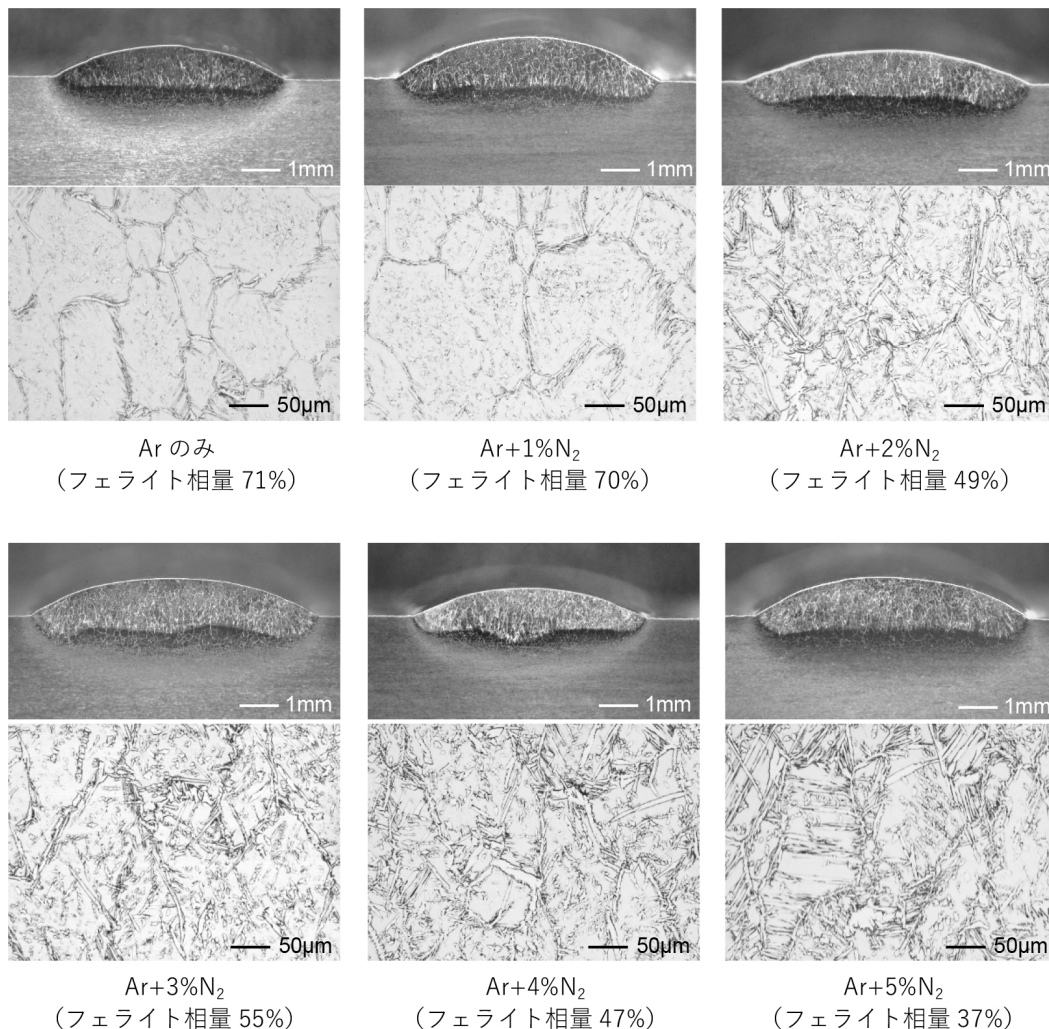


図4 Arシールドガスを用いたティグ溶接で施工したSUS329J4L溶接部のN含有量

N の離脱を抑えるためには、ティグ溶接で用いる Ar シールドガス中に 2~5%の N<sub>2</sub>を混合させることが有効である。Ar 中の N<sub>2</sub>の分圧を高めることで、熔融金属からの N の離脱を抑えるだけでなく、溶接金属中の N 含有量を増加させて、相比の適正化や耐食性の向上などを図ることができる。このとき、Ar+N<sub>2</sub>ガスはあらかじめ高压ポンペに封入されたプレミックスガスを使用しなければならない。現場で Ar と N<sub>2</sub>を混ぜる方法（ポストミックス）では均一なガス組成にならず、ブローホールの発生や溶接部の異常な焼けなどが生じることがあり、安定した品質を得ることは難しい。

図 5 に Ar+2~5%N<sub>2</sub>ガスを用いたティグ溶接ビード・オン・プレート試験片 (SUS329J4L+YS329J4L) の断面組織を示す。N<sub>2</sub>濃度が 2%以上でフェライト相量が 50%前後となる安定した組織を得やすくなる。フェライト相過多となりやすい厚板の溶接では N<sub>2</sub>の混合量が高いほど相比の適正化には有効であるが、実用上は 3%の混合量でほとんどの継手において安定した品質を得ることができる。このように、ティグ溶接の溶接金属は溶接材料の成分に加えシールドガス組成の影響を受ける。従って、溶接材料とシールドガスの組み合わせとして得られる全溶着金属の成分、相比を確認しておくことが望ましい。



**図 5 Ar および N<sub>2</sub>濃度を変えた Ar+N<sub>2</sub>シールドガスでティグ溶接を行った SUS329J4L の断面組織**

ところで、金属に N を溶解させる施工は、「窒化」をイメージさせやすい。ステンレス鋼の窒化処理は表面の硬化を目的にしているが、同時に耐食性も低下させてしまうことから、Ar に N<sub>2</sub>を混ぜて溶接するというに良いイメージを持ってもらえないことがある。窒化処理とは固相の金属表面

から長時間かけて大量の N を侵入・拡散させて窒化物を生成させる処理であるため、Ar+N<sub>2</sub> ガスによる溶接とは全く異なる。Ar+N<sub>2</sub> ガスによるティグ溶接では、溶融しない熱影響部（固相部）の N 含有量には変化をもたらさない。

Ar+N<sub>2</sub> ガスを用いる施工に際しては、特殊な設備の導入などは必要なく、基本的にシールドガスボンベを Ar から Ar+N<sub>2</sub> に付け替えるだけでよい。Ar+N<sub>2</sub> を用いることで、溶接時の電圧は少し増加するものの溶接性に影響を与えるような顕著な変化はないため、Ar+N<sub>2</sub> ガスを導入するためのハードルはほとんどない。

#### 4. Ar+N<sub>2</sub> 混合ガスを用いる場合の注意点

Ar+N<sub>2</sub> ガスの使用はティグ溶接単独ではまったく問題ないが、被覆アーク溶接（SMAW）やフラックスコアードワイヤを用いたマグ溶接（FCAW）などのフラックスを伴う溶接法と組み合わせて施工する場合に弊害を生じる。このようなケースでは Ar+N<sub>2</sub> ガスの使用は厳禁である。

その例として、図 6 に FCAW で施工した SUS329J4L 突合せ継手の溶接金属上に、ティグ溶接で肉盛施工したときの状態を示す。FCAW は、その溶接金属内に内包する多数の酸化物によって固溶 N の離脱を抑えてしまうため、Ar+3%N<sub>2</sub> シールドガスを用いてティグ溶接を行うと N は溶融金属中で過飽和状態となり、多数のブローホールの発生とともに、オーステナイト相過多の組織が生成してしまう（図 6(a)）。この場合、Ar シールドガスを用いた施工であっても、N 量は維持されて相比の崩れは起こらないことから、酸化物を多く含む溶接金属（FCAW や SMAW など）の上からティグ溶接を行う施工では、例外的に Ar を使用しなければならない。図 6(b) に示すとおり、Ar シールドガスで施工することでブローホールの発生は抑えられ、相比も維持されていることがわかる。Ar+N<sub>2</sub> シールドガスを使用したティグ溶接は、原則としてティグ溶接単独での接合に限定される。

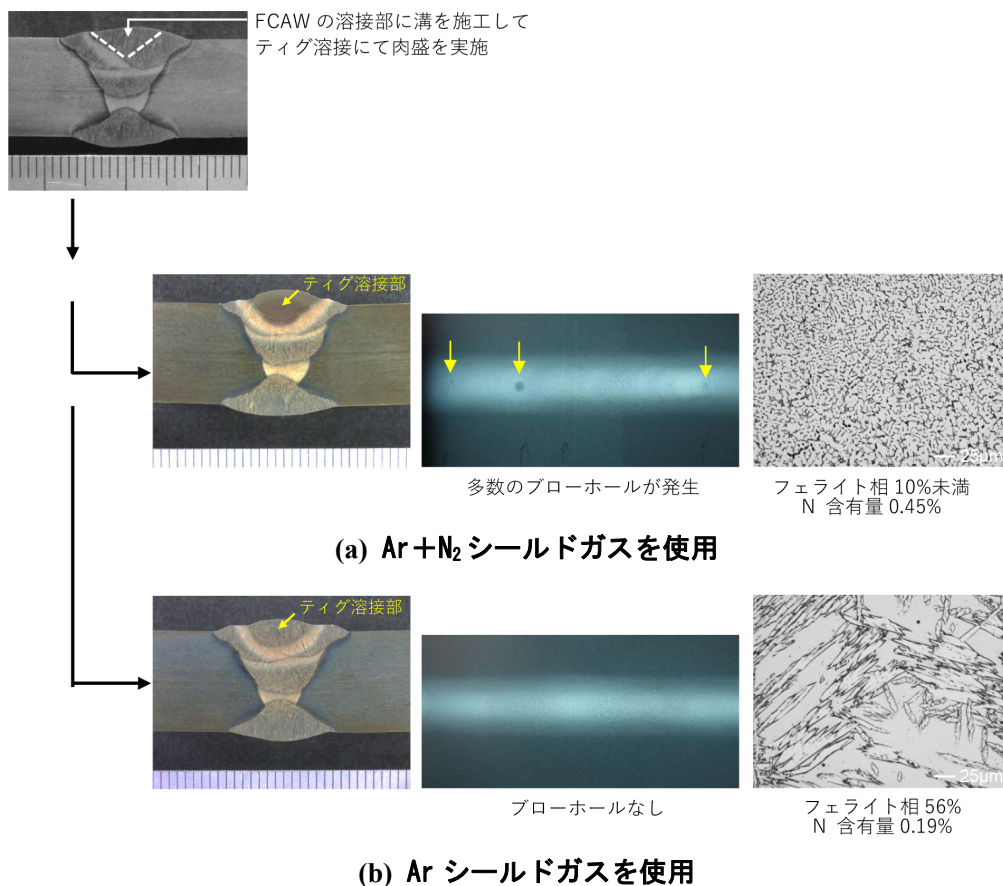


図 6 FCAW 溶接金属上にティグ溶接で肉盛施工を行ったときの溶接部の状況

## 5. Ar+N<sub>2</sub> シールドガスの適用の考え方

本稿では Ar+N<sub>2</sub> ガスのメリットを強調し、あたかも Ar が悪いとのイメージを与えてしまったかもしれないが、すべての継手に Ar+N<sub>2</sub> ガスを無条件に適用すればいいというわけではない。Ar シールドガスによる溶接であっても、JIS B 8285（圧力容器の溶接施工方法の確認試験）に規定される機械試験は問題なくクリアできるうえ、弱い腐食環境（温度が高くない環境）であれば腐食も生じない。Ar+N<sub>2</sub> ガスによる溶接は母材と比べて低下しがちな溶接金属の耐食性を、母材同等レベルにまで引き上げるための手段であり、Ar を用いた施工が不適切ということではない。例えば、SUS316 で数年以上運転できるような腐食環境であれば、経験上 Ar シールドガスで施工した SUS329J4L が腐食トラブルを起こした事例は長期間の運転においてもほとんどない。

腐食防食の観点から、N はハロゲンによる腐食を防止する効果が高いことが知られており、二相ステンレス鋼に限らず耐ハロゲンの成分として、近年の高耐食オーステナイト系ステンレス鋼の合金成分のひとつとなっている。しかし、N は酸などのハロゲンが関与しない腐食に対しては、その防食効果が乏しいとされている。実際に、図 7 に示す実験結果では、酸に対して固溶 N の差はほとんどなく、Ar+N<sub>2</sub> シールドガスの有効性は確認できなかった。

酸環境での腐食には水素発生を伴うため、この水素による水素割れを防止する点では、Ar+N<sub>2</sub> ガスを使用してフェライト相過多を防止することに防食上の意義はある。しかし、腐食減肉の低減を期待して Ar+N<sub>2</sub> ガスを用いた場合は期待通りの耐食性を示さない恐れがある。

以上のように、二相ステンレス鋼におけるティグ溶接は、使用環境に応じてガスを使い分けることも必要である。現時点では、Ar+N<sub>2</sub> のプレミックスガスはまだ特注品であるため（納期がかかる）、より高耐食の溶接材料と Ar の組み合わせを採用するなど、使用目的や状況に応じて柔軟に対応することが望ましい。

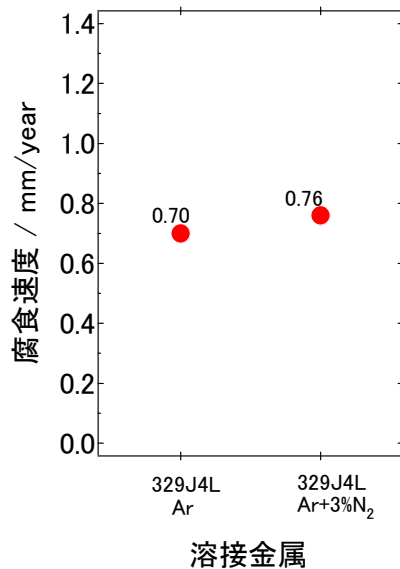


図 7 10%、90°Cの硫酸における 329J4L 溶接金属の腐食速度

## 6. おわりに

Ar+N<sub>2</sub> 混合ガスを用いた二相ステンレス鋼の溶接は海外ではよく知られているものの、国内ではまだ認知度が低い。本稿での解説のとおり、Ar+N<sub>2</sub> 混合ガスは相比の安定化と耐食性の改善効果が高く、施工上のハードルも小さいことから、化学プラント機器への二相ステンレス鋼適用の拡大とともに本施工方法が広く使用されることが期待される。

ただし、二相ステンレス鋼は名前こそ「ステンレス鋼」であるが、その実態は特殊材料と言えるほ

ど扱いにくい側面があり、溶接施工においても予想しないような挙動を示すことがある。ステンレス鋼だからと安易に考えず、実績のない新しい施工を行うときは、必ず事前の試験を実施して継手として問題がないことの評価をすることが、施工品質確保のためには必須である。

<略歴>

**新 谷 大 介 (しんたに だいすけ)**

---

2002年 姫路工業大学大学院 工学研究科 修了  
2002年 木村化工機株式会社 入社 開発部 配属  
2008年 博士(工学)取得  
2018年 エンジニアリング事業部 技術部 主事  
現在に至る