

HP系耐熱鋳鋼の初層溶接のつなぎ部に 発生する横割れとその防止策

Transverse Crack of bonding section of first pass of
HP-type Heat-Resisting Cast Alloys, and Prevention Technique

中野 正大（技術本部 企画開発部），山口 ちひろ（技術本部 企画開発部）
安西 敏雄（技術本部）

Masahiro NAKANO, Chihiro YAMAGUCHI

(Technology Planning & Development Department, Technology & Engineering Division)

Toshio ANZAI (Technology & Engineering Division)

HP系耐熱鋳鋼の突合せ溶接において、溶接材料にNi-Cr-Co-Mo合金である617を用いた場合に初層の裏波ビードのつなぎ部に横割れが発生する事例がみられた。そこで、横割れの再現試験を行い、横割れの発生傾向および形態から横割れが発生する原因を調査し、その防止策を検討した。その結果、横割れは凝固割れと推定され、横割れの防止策には、溶接材料を617ではなく耐熱鋳鋼の共金にすること、およびそれに加えて部分バタリング法を適用することが有効であった。

In the butt welding of HP type heat-resistant cast alloys, when the 617 type of Ni-Cr-Co-Mo alloys was used as the welding material, there is a case that transverse cracking was occurred in the final joint part of penetration bead. Therefore we conducted reproducibility tests of transverse cracking, investigated its occurrence tendency. And then, we studied prevention technique of transverse cracking. As a result, the transverse cracking was estimated to be solidification cracking. For prevention technique of transverse cracking, it was effective to use a similar composition to HP type heat-resistant cast alloys not 617 type as welding material, and in addition to that, to apply the partial buttering method.

1. はじめに

エチレン製造装置における分解炉の輻射部にはHP系耐熱鋳鋼が使用されている。これらは高温で長時間加熱され、内部流体である炭化水素の固形炭素の固着にともなう浸炭などの経年変化によって、10年程度の周期で更新されている。この輻射部の更新の際に、輻射部の突合せ溶接で溶接材料にNi-Cr-Co-Mo合金である617を用いた場合に初層の裏波ビードのつなぎ部に横割れが発生する事例がみられた。

耐熱鋳鋼の溶接材料には、母材に適合した共金が使用されるが、輻射部から急冷熱交換器までの連絡管では、耐熱鋳鋼のHP45とHP35またはHP35とHP32といった母材の組合せに対して617を使用する場合がある。また、一部では輻射部の溶接材料のすべてを617とする場合がある。

このように617は耐熱鋳鋼の溶接材料として広く使用されているが、実機に適用されている非破壊試験では横割れ

を検出できないため、横割れの事例が明らかになることはなかった。また、横割れが進展して漏えいに至った事例もない。しかしながら、発生した横割れの多くは裏波ビード高さよりも深く、中には母材の厚さの半分に達するものがみられることから、設備の安全性を高めるためには、横割れの原因を調査し、その防止策を講じる必要がある。

そこで、初層の裏波ビード部に発生した横割れの再現試験と分析を行い、横割れの発生傾向および形態から原因を調査した。防止策として、横割れが発生した617とはチャージ番号および組成の異なる溶接材料を用いた場合の横割れ感受性を確認し、部分バタリング法の効果を検証した。

2. 供試材

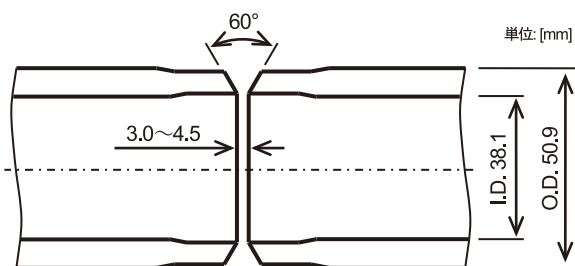
供試材には実機で横割れが発生した際に使用していたHP系耐熱鋳鋼のHP45およびHP35を用いた。そのサイズは

外径が50.9mm, 肉厚が6.0mmとした。また, 溶接材料には, 横割れが発生した際に使用していたチャージ番号と同じ617-1 (JIS Z 3334 SNI6617), それとは異なるチャージ番号の617-2, 617-3および617-4, ならびにHP45と同じ組成のW45およびHP35と同じ組成のW35を用いた。これらの棒径は2.4mmまたは2.0mmとした。表1に供試材および溶接材料の化学成分を示す。なお, 供試材については使用したものの中の一例を参考値として示す。

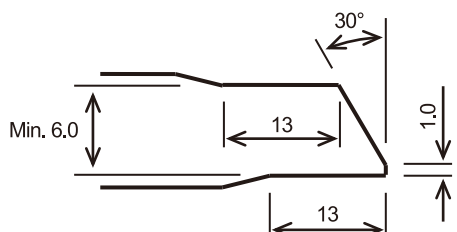
3. 実験方法

3.1 再現試験

実機で横割れが発生した際に使用していた供試材および溶接材料を用いて再現試験を行い, 横割れの発生傾向を確認した。母材の組合せはHP45同士, HP45とHP35およびHP35同士とし, 溶接材料には617-1を用いた。図1に溶接試験材の形状を, 図2に溶接順序を, 表2に溶接条件を示す。



(a) 溶接試験材の寸法



(b) 開先形状

図1 溶接試験材の形状

溶接姿勢は, 実機の溶接を想定し, PH (水平固定管の上進) およびPC (横向) とした。溶接性の評価方法としては, 初層溶接後に溶接金属を中心に50mm程度の長さに切断し, 内外面の浸透探傷試験を行い, 初層のつなぎ部の状態を確認した。一部の試験では最終層まで溶接した後に同様の確認を行った。

横割れが発生した溶接試験材に対して, 横割れの中央付近で軸方向と垂直に切断して, 断面にみられる割れの深さを測定した。また, 横割れが発生したものの中から, 横割れが大きいものを対象に放射線透過試験および超音波探傷試験を行い, 横割れが検出できるか否かを検証した。

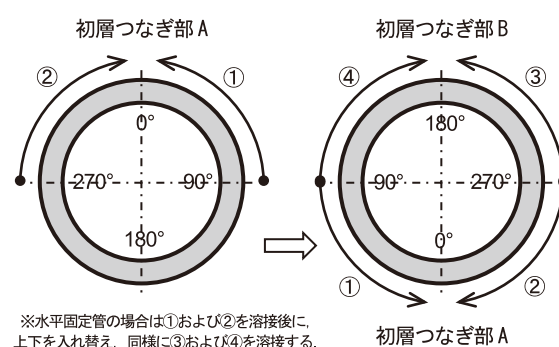


図2 溶接順序

表2 溶接条件

溶接方法	ティグ溶接
継手形状	突合せ溶接
開先形状	V形 (60度)
電流特性	直流棒マイナス
溶接電流	80～120A
アーク電圧	10～15V
シールドガス	アルゴン
予熱	なし
仮付け方法	開先内ブリッジ溶接
仮付け溶接箇所	4か所 (十字)

表1 供試材および溶接材料の化学成分

[mass%]

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Cu	Al	Ti	Co
供試材	HP45	0.50	1.7	1.1	0.015	0.011	42.7	31.8	Bal.	-	0.79	-	-	0.14	-
	HP35	0.15	1.2	0.9	0.017	0.002	34.9	25.4	Bal.	0.12	1.27	-	-	-	-
溶接材料	617-1	0.08	0.1	0.0	0.002	0.001	54.8	21.2	0.6	9.3	-	0.04	1.09	0.32	12.4
	617-2	0.08	0.1	0.0	0.004	0.001	54.8	21.4	0.6	9.2	-	0.03	1.18	0.30	12.1
	617-3	0.06	0.3	0.3	0.002	0.002	55.1	22.6	0.6	9.4	-	0.01	1.22	0.38	11.8
	617-4	0.08	0.1	0.0	0.003	0.001	54.6	21.3	0.5	9.0	-	0.02	1.13	0.35	12.9
	W45	0.47	1.2	1.0	0.002	0.001	43.3	31.3	21.4	-	1.27	-	-	-	-
	W35	0.18	0.6	0.9	0.006	0.002	35.7	25.6	35.9	-	1.16	-	-	-	-

3.2 横割れの分析

再現試験で発生した横割れの分析を行い、その形態を把握することで横割れの原因を調査した。横割れの進展経路を確認するために横割れ部の断面マイクロ組織観察を行った。観察面の電解エッチングでは腐食液に10%しゅう酸を用い、電流1Aを10~20秒間通電した。また、割れの進展経路に偏析する元素を確認するために横割れ先端部の波長分散型X線分析（以下はEPMAと示す）による元素マッピングを行った。さらに、横割れの破面形態を確認するために、横割れ部を強制的に開口させ、超音波洗浄後に破面の走査型電子顕微鏡（以下はSEMと示す）観察を行った。

3.3 溶接材料の溶接性評価試験

実機で横割れが発生した617-1とはチャージ番号および組成の異なる溶接材料を用いた場合に、同様に横割れが発生するか否かを検証するための溶接性評価試験を行った。母材の組合せをHP45同士とし、溶接材料には617-2, 617-3, 617-4, W45およびW35を用いた。試験の方法は再現試験の方法と同様とした。

3.4 部分バタリング法の評価試験

横割れの防止策として、事前に行った試験から、横割れが母材の希釈に影響していることが予測されたため、開先の一部を溶接金属に置き換える部分バタリング法の効果を検証した。部分バタリング法は、初層のつなぎ部付近の開先を部分的に研削し、バタリング溶接を行うことで、初層溶接時の母材の希釈を低減する方法である。図3に部分バタリング法の要領を示す。母材の組合せをHP45同士とし、溶接材料には617-1およびW45を用いた。試験の方法は再現試験の方法と同様とした。

また、部分バタリング法によって母材の希釈が低減できていることを確認するために、母材、溶接材料および溶接金属の化学成分分析を行った。対象とする元素はP, SおよびNbとした。PおよびNbはJIS G 1258-3に、SはJIS G 1215-4に従い、それぞれの含有量を測定した。

4. 実験結果とその考察

4.1 横割れの発生傾向

図4に再現試験でみられた横割れを示す。初層溶接後に内外面の浸透探傷試験を行ったところ、初層のつなぎ部において、外面に横割れもしくはクレータ割れが発生するもの、内面に横割れもしくはクレータ割れが発生するもの、または内外面にそれらが発生するものがみられた。一方、初層溶接後の外面に横割れが発生したものに対して、そのまま二層目の溶接を行い、外面の浸透探傷試験を行ったと

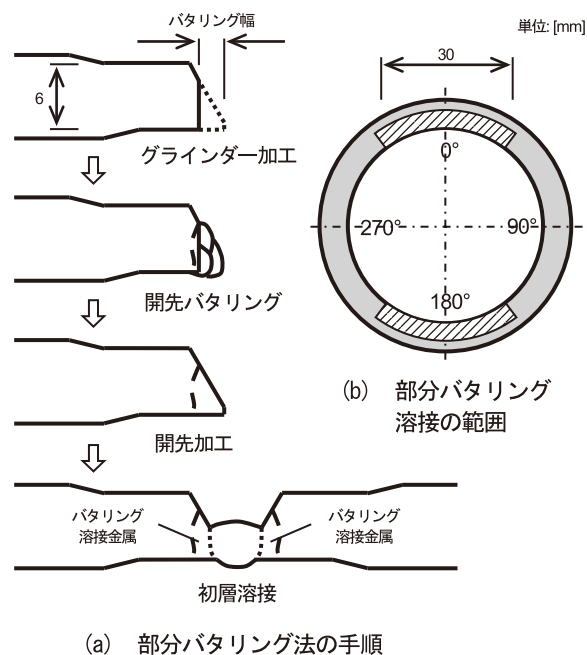


図3 部分バタリング法の要領



(a) 外面の横割れ



(b) 内面の横割れ

図4 突合せ溶接つなぎ部の浸透探傷試験状況

ころ、横割れは検出されなかった。さらに最終層まで溶接を行った場合も同様に横割れは検出されなかった。すなわち、横割れは初層のつなぎ部のみに発生し、その多くは内面側であった。

表3に再現試験の結果を示す。初層のつなぎ部の多くに図4に示すような横割れが検出され、横割れが発生しない場合にはクレータ割れが発生するものもみられた。

図5に初層のつなぎ部の内面に発生した横割れおよびクレータ割れの位置を示す。割れは、積層順序①の終端部が積層順序②の溶接によって再溶融されて形成される最終凝固部において、②側で発生するタイプAの横割れ、①側で発生するタイプBの横割れおよび最終凝固部の中央付近で

表3 再現試験の結果

No.	溶接材料	母材の組合せ	試験数	横割れ	内面判定
1	617-1	HP45 - HP45	23	19	××
2	617-1	HP45 - HP35	8	6	××
3	617-1	HP35 - HP35	2	0	○

※内面判定 ○：良好，△：クレータ割れ，×：横割れ（軽微），××：横割れ

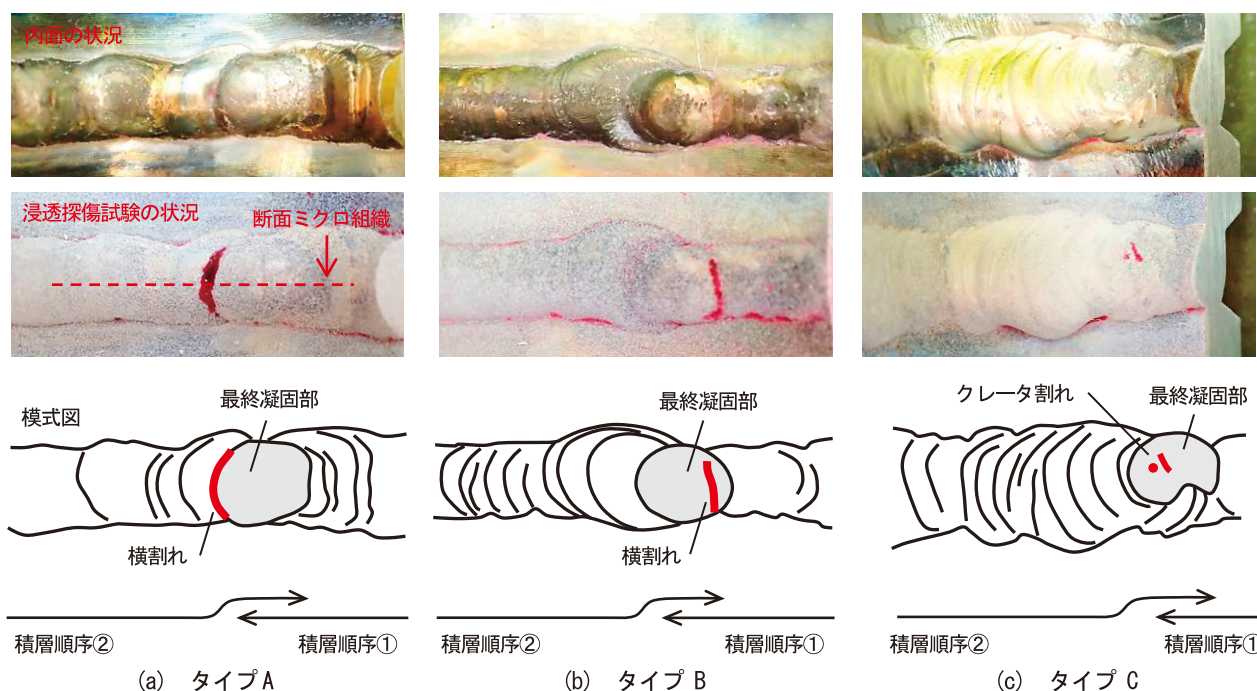


図5 初層溶接のつなぎ部の内面に発生した割れの分類

発生するタイプCのクレータ割れに分類でき、タイプAが多くみられた。

断面にみられる横割れの深さは、裏波ビード高さを除く母材の厚さ6mmに対して平均値が2.0mmで、最大値が4.3mmであった。

図6に最終層まで溶接した溶接部内面の横割れと放射線透過試験フィルムを示す。比較的大きい横割れであっても放射線透過試験で判定するのは難しく、それよりも小さいものは判定できないことが明らかとなった。そして、この横割れは超音波探傷試験においても判定できなかったことから、実機に適用できる非破壊試験では内面に発生する横割れを検出することはできないと推定された。

4.2 横割れの形態

図7に図5(a)の横割れ部の断面マイクロ組織を示す。割れは内面側から進展しており、大きな割れの他に微細な割れもみられた。また、割れは溶接金属のデンドライト境界に沿って進展しており、枝分かれのようなものがみられた。割れ先端部のEPMAによる元素マッピングにおいて、デンドライト境界に偏析していた元素は、C, Si, Mn, P, S, Cr,

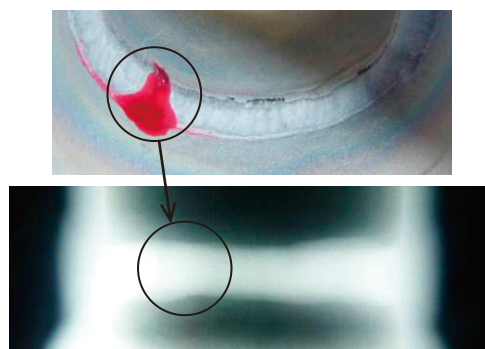


図6 横割れ部の放射線透過試験フィルム

Mo, Nb, Ti, Bであった。図8に凝固割れに影響をおよぼす元素とされるP, SおよびNbのEPMAによる元素マッピングを示す。そして、図9に横割れ破面SEM像を示す。破面は表状のデンドライト境界の様相を呈しており、破面全域に同様の形態がみられた。

4.3 横割れが発生する原因

横割れは、初層のつなぎ部の内面側に多くみられ、低融点元素などが偏析したデンドライト境界に沿って進展していることから、溶接金属が凝固する際に発生する熱収縮応

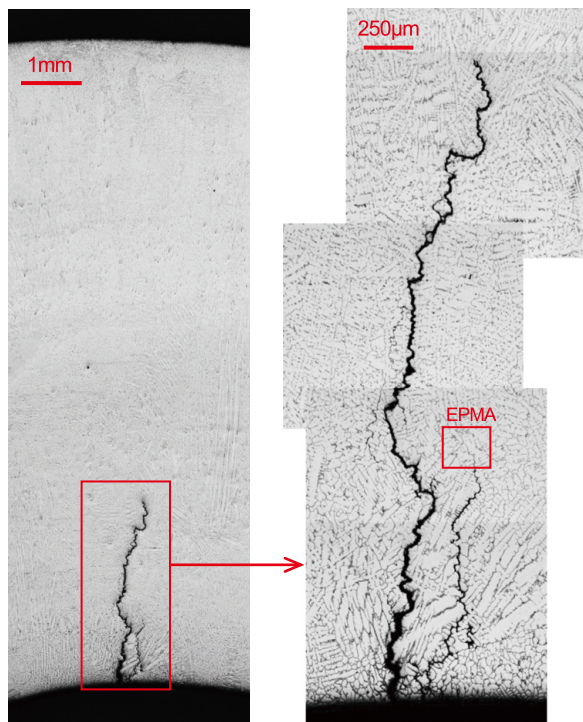


図7 横割れ部の断面ミクロ組織

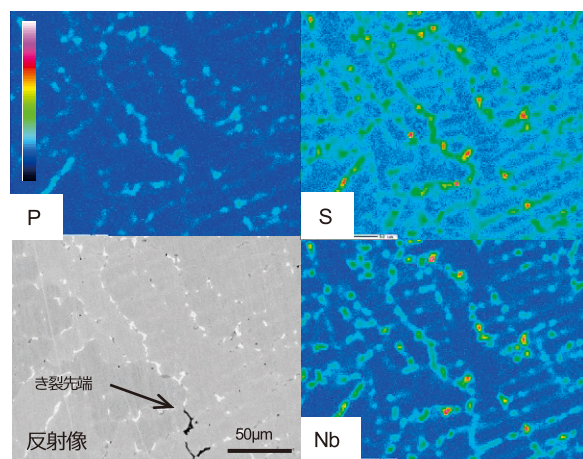


図8 横割れ先端部のEPMA元素マッピング

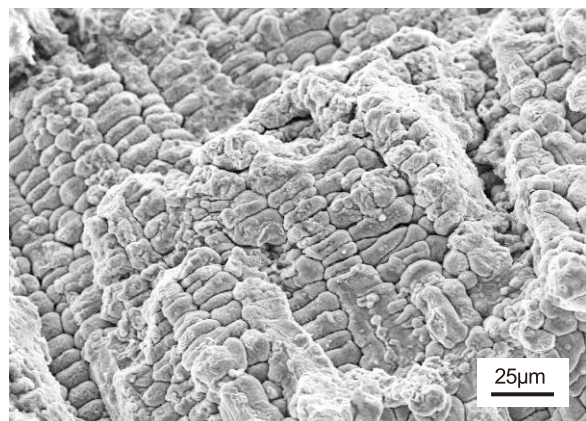


図9 横割れ破面SEM像

力が完全に凝固していないデンドライト境界に負荷されて発生する凝固割れと推定された。

ここで、表1に示すように溶接材料に含まれる低融点元素は比較的少ないにも関わらず凝固割れが発生するのは、4.5節に示すように母材に多く含まれる低融点元素が溶接時に溶接金属中へ流入することが影響していると推測される。そして、初層の最終つなぎ部のみに横割れが発生するのは、最終つなぎ部は周囲の拘束によって熱収縮応力が大きくなることが影響していると推測される。

4.4 横割れ感受性におよぼす溶接材料の影響

表4に溶接材料の溶接性評価試験の結果を示す。溶接材料617-3および617-4では、再現試験と同様の横割れがみられ、母材HP45の溶接に溶接材料617を用いると初層のつなぎ部に横割れが発生する可能性が高い傾向がみられた。一方、母材HP45の溶接にW45およびW35といった共金の溶接材料を使用すると横割れが発生する可能性が低くなり、横割れが発生したとしてもその程度は比較的軽微であった。

4.5 部分バタリング法による横割れの防止効果

表5に部分バタリング法の評価試験の結果を示す。溶接材料に凝固割れ感受性の高い617-1を用いても、部分バタリング法を適用することで横割れを防止できた。なお、一部にはクレータ割れがみられたが、それらは比較的軽微であった。そして、溶接材料に共金のW45を用いた場合は、内外面の横割れおよびクレータ割れを防止できた。

図10に部分バタリング法による母材の希釈の低減効果を示す。P、SおよびNbの含有量は、母材、溶接金属、溶接材料の順に小さい値を示し、溶接金属では、バタリングなし、バタリング幅2mm-両側、バタリング幅3mm-片側、バタリング幅3mm-両側の順に小さい値を示した。溶接金属のP、SおよびNbの含有量が溶接材料に比べて大きいのは、初層溶接時の母材の希釈が影響していると推定される。そして、母材の希釈が最も小さくなったのは部分バタリング法を適用したバタリング幅3mm-両側であった。

5. 横割れの防止策

横割れの防止策として、溶接材料に母材の共金を使用すると横割れが発生する可能性が低くなり、横割れが発生したとしてもその程度が比較的軽微になることから、耐熱鋳鋼の溶接材料には617よりも共金を使用することが望ましい。そして、横割れが発生する可能性をさらに低減するには、溶接材料に共金を使用することに加えて、部分バタリング法を適用することが望ましい。

表4 溶接材料の溶接性評価試験の結果

No.	溶接材料	母材の組合せ	試験数	横割れ	内面判定
4	617-2	HP45 - HP45	10	5	×
5	617-3		8	3	×
6	617-4		8	5	×
7	W45	HP45 - HP45	16	3	×
8	W35	HP45 - HP45	4	0	○

※内面判定 ○：良好，△：クレータ割れ，×：横割れ（軽微），××：横割れ

表5 部分バタリング法の評価試験の結果

No.	バタリング幅 - 位置	溶接材料	母材の組合せ	試験数	横割れ	内面判定
9	5mm - 両側	617-1	HP45 - HP45	8	0	△
10	3mm - 両側			15	0	△
11	3mm - 片側			4	0	○
12	2mm - 両側			4	0	△
13	3mm - 両側	W45	HP45 - HP45	4	0	○

※内面判定 ○：良好，△：クレータ割れ，×：横割れ（軽微），××：横割れ

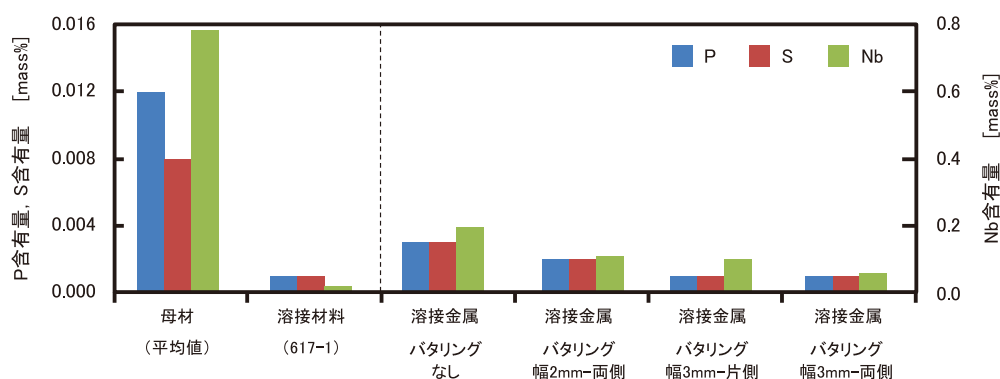


図10 部分バタリング法による母材の希釈の低減効果

6. おわりに

HP系耐熱鋳鋼の突合せ溶接において、初層の裏波ビードのつなぎ部に発生する横割れの原因調査を行うとともにその防止策を検討した。以下に結果をまとめた。

- ① 横割れは初層溶接のつなぎ部が凝固する際に発生した凝固割れと推定された。
- ② 実機に適用できる非破壊試験(放射線透過試験および超音波探傷試験)では内面に発生する横割れを検出できなかった。
- ③ 母材HP45の溶接材料に617を使用すると横割れが発生する可能性が高く、横割れの深さは裏波ビード高さを除く母材の厚さ6mmに対して平均値が2.0mmで、最大値が4.3mmであった。

- ④ 母材HP45の溶接材料に共金を使用すると横割れが発生する可能性が低く、横割れが発生したとしてもその程度は比較的軽微であった。
- ⑤ 突合せ溶接の開先部に部分的にバタリング溶接を行う部分バタリング法は横割れを防止するのに有効であった。
- ⑥ 溶接材料に共金を使用し、部分バタリング法を適用すると、内外面の横割れおよびクレータ割れを防止できた。



中野 正大 Masahiro NAKANO
技術本部 企画開発部
技術開発・ICTグループ
技術士（金属部門）