

Cu-Mn系ダクタイル鉄管の開発

Development of Ductile Cast Iron Pipe with Cu and Mn

堤 親平* 柳谷仁志* 西原佳和* 中本光二*

Shimpei Tsutsumi Hitoshi Yanagitani Yoshikazu Nishihara Koji Nakamoto

近年、我が国における全発電量に占める石炭火力発電の割合は増加している。石炭火力発電に使用される石炭灰輸送管では、優れた耐摩耗性が要求される。また、耐熱性も併せて要求されるケースもある。従来の石炭灰輸送用の高強度ダクタイル鉄管は、コスト面や高強度化による靱性低下などの課題があった。本研究では、ダクタイル鉄管に Cu、Mn を複合添加することにより、伸びの低下を抑えた上で、高強度化、高硬度化を達成した。Cu-Mn 系ダクタイル鉄管は、優れた耐摩耗性能を有し、高温環境（500℃）でも極端な硬度低下を示さないなどの特長を持つことがわかった。

In recent years, coal-fired power generation's share of total power generation has increased. Superior wear resistance is required for the ash transport pipes used for coal-fired power generation. There are cases where heat resistance is also required. Conventional high-strength ductile iron pipes for coal ash transport had problems: their cost and lower toughness due to their high strength. In this study, Cu-Mn ductile iron pipe, that is, ductile iron pipe with both copper and manganese added, achieved high strength, high hardness, and reasonable elongation. Cu-Mn ductile iron pipe provides superior wear resistance performance. Additionally, its advantage is that its hardness decreases little at high temperatures (500 °C).

1 はじめに

水道管路として使用されるダクタイル鉄管は、その使用環境から高延性な材質である FCD420-10 相当（引張強さ：420 MPa、伸び：10 %）が求められる。また、合金元素を添加した高強度ダクタイル鉄管は、ゴミ輸送管や石炭灰輸送管の分野でも使用実績がある。

東日本大震災以降、全発電量の内、石炭火力発電の占める割合は増加傾向にある（図1）。そのため、石炭火力発電所で使用される石炭灰輸送管においても、需要が見込まれる。また、近年では石炭火力発電分野においてもエネルギー効率向上のため、ボイラ燃焼温度の高温化が進められている。それに伴い、石炭灰輸送管においても、高温環境への対応が要求されるケースがある。

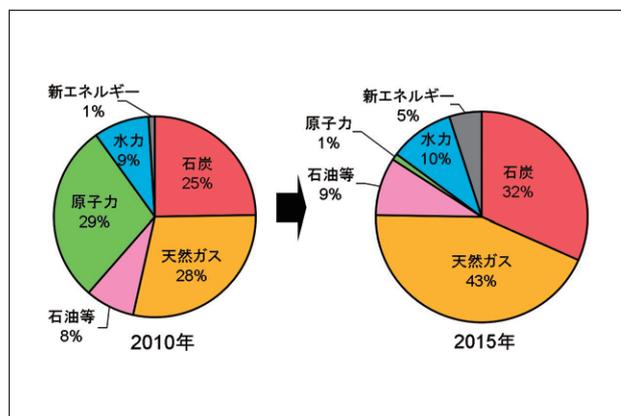


図1 電源別発電電力量の実績¹⁾

当社のラインアップの一つである石炭灰輸送用の高強度ダクタイル鉄管は、Ni などの高価な合金元素を添加した DH400 や、Cr などの合金元素を添加した DH300 がある（表1）。これらの高強度ダクタイル鉄管は、コスト面や高強度化による靱性低下などの課題があった。

今回、合金元素として Cu と Mn を複合添加することにより、伸びの低下を抑制し、Ni、Cr を用いず、かつ高温特性にも優れた Cu-Mn 系ダクタイル鉄管の開発を行った。

表1 従来の高強度ダクタイル鉄管の機械的性質

商品名	引張強さ [MPa]	伸び [%]	ブリネル硬さ [HB]
DH300	≥ 400	≥ 0.5	≥ 280
DH400	≥ 700	規定なし	≥ 350

2 化学組成と機械的性質

開発品の機械的性質の目標は、従来の高強度ダクタイル鉄管である DH300 と同等の硬さを有し、靱性を向上させるため、ブリネル硬さ 280HB 以上、伸び 3% 以上とした。

一般に、ダクタイル鉄管の高強度化には基地組織のパーライト化が有効である^{2,3)}。パーライトの析出を促進させる元素としては、Cu、Mn、Sn などが挙げられる。

Cuは黒鉛化元素としても知られるが、セメンタイト安定化元素であるMnと共存することにより、Mnを共析セメンタイト中に著しく濃化させ、パーライトをより安定化させる役割がある⁴⁾。そのため、ここではCu、Mnを複合添加し、基地組織のパーライト化を試みることで、ダクタイル鋳鉄の高強度化を図った。

パーライト組織を得るために必要なMnは1.5 mass%前後である⁵⁾。そこで、Mn含有量を1.5 ± 0.2 mass%に調整し、基地組織がパーライト化する条件下で、更にCu含有量を0.1 ~ 1.2 mass%まで変化させた試料を作製し、Cu、Mn含有量と機械的性質の関係を確認した。

表2に化学組成の例を示す。また、図2に基地組織の一例を示す。基地組織は全ての試料でパーライト組織となっていた。

表2 Cu-Mn系ダクタイル鉄管の化学組成例

(mass%)							
C	Si	P	S	Mg	Cu	Mn	Fe
3.62	1.79	0.04	0.01	0.03	0.11	1.54	Bal.
					0.50	1.43	
					1.11	1.66	

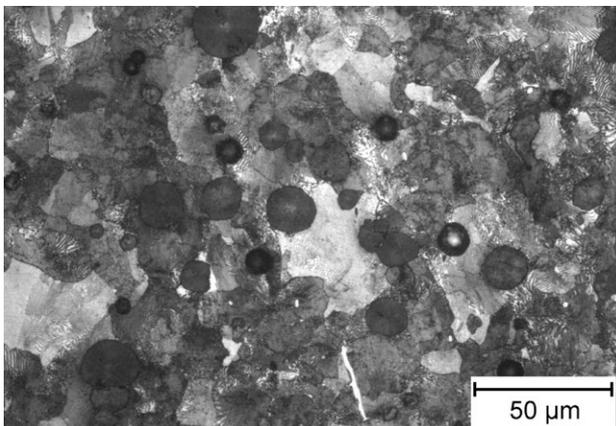


図2 Cu-Mn系ダクタイル鉄管の金属組織写真 (1.1 mass%Cu-1.7 mass%Mn)

次にCu含有量と機械的性質の関係について最小二乗法により求めた結果を図3~5に示す。Cu含有量が増加するにつれて、引張強さ、ブリネル硬さは増加する傾向が見られ、Cu含有量0.9 mass%以上でブリネル硬さ280 HB以上を満足することを確認した。また、伸びについてはCu含有量の増加に伴い減少する傾向となるが、今回の化学組成の範囲ではCu含有量が最も多い場合でも6.0%以上の伸びが得られた。

以上、機械的性質の目標であるブリネル硬さ280 HB以上、伸び3%以上を満足するにはMn含有量1.5 ± 0.2 mass%、Cu含有量0.9 mass%以上必要であることを確認した。

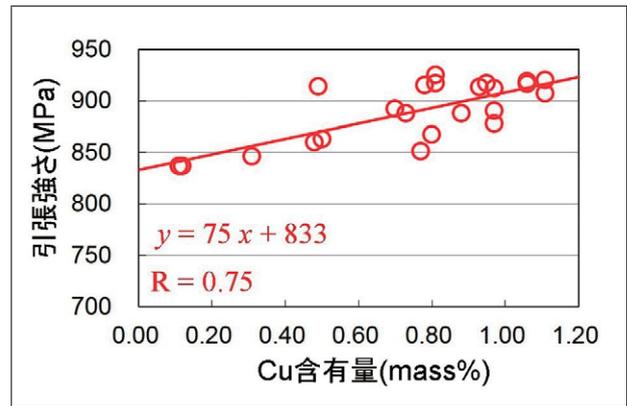


図3 Cu含有量と引張強さの関係

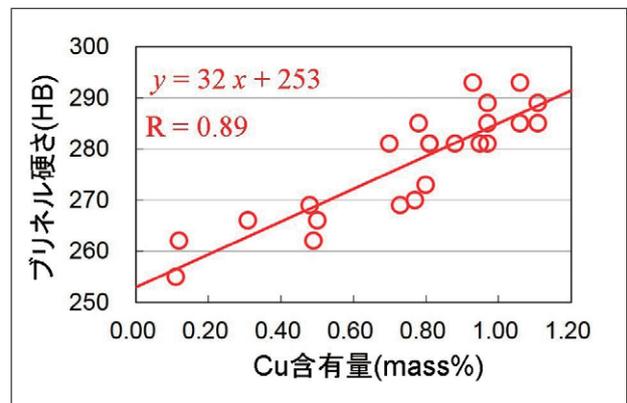


図4 Cu含有量とブリネル硬さの関係

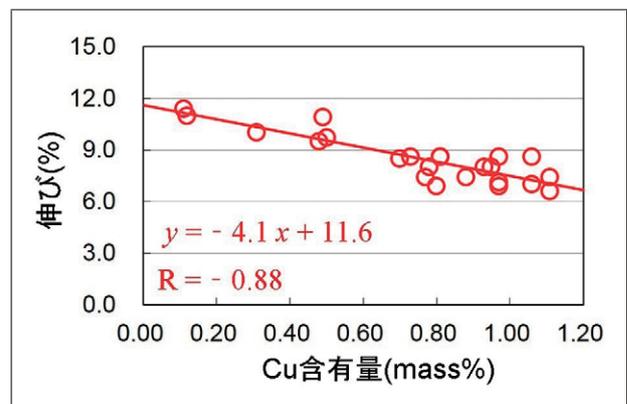


図5 Cu含有量と伸びの関係

3 耐摩耗性試験

Cu-Mn系ダクタイル鉄管の耐摩耗性評価のため乾式、湿式における摩耗試験を実施した。耐摩耗性試験用の試料はCu-Mn系ダクタイル鉄管より切り出して作製した(以下、試料はCu-Mn系ダクタイル鋳鉄と記す)。乾式摩耗試験は、アプレシブ摩耗試験として広く普及している往復運動摩耗試験法を採用した。湿式摩耗試験においては、過去の実施例⁶⁾を参考に、当社で作製した試験機を用いたスラリー摩耗試験を実施した。

ここでは代表として、1.1mass%Cu-1.7mass%MnのCu-Mn系ダクタイル鋳鉄を用いた。また、比較のため

普通鋼 (SS400)、一般に石炭灰輸送分野で広く用いられている耐摩耗鋼 (低合金鋼) についても同時に試験を実施した。

各供試材のブリネル硬さ試験結果を図6に示す。Cu-Mn 系ダクタイトル鉄は普通鋼、耐摩耗鋼と比べ、高い値を示していることがわかる。

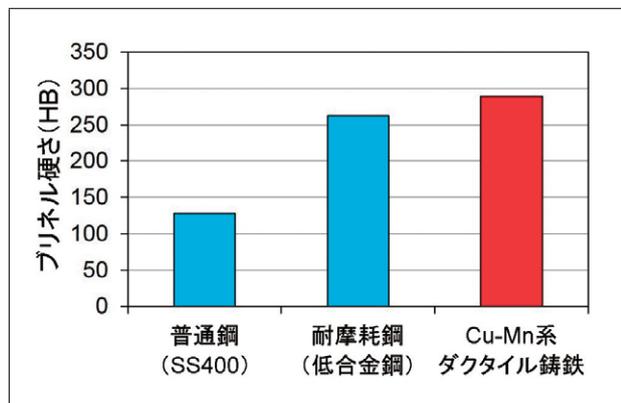


図6 ブリネル硬さ

3.1 乾式摩耗試験 (スガ式摩耗試験)

乾式摩耗試験として往復運動摩耗試験 (JIS H 8503) を実施した。試験状況の写真を図7に示す。また、試験条件を表3に示す。ここでは、試験前後の試料重量を測定し、重量減少量から体積換算した値を摩耗量として比較を行った。

試験結果を図8に示す。Cu-Mn 系ダクタイトル鉄は耐摩耗鋼と比較して同等の耐摩耗性を有することがわかる。



図7 往復運動摩耗試験

表3 乾式摩耗試験条件

試験機	スガ式摩耗試験機
試料往復回数	400 回
試験時間	10 min
試験片形状	L 50 mm × W 40 mm × t 4 mm
研磨材	アルミナサンドペーパー # 100
ホイール押しつけ力	2.0 kgf

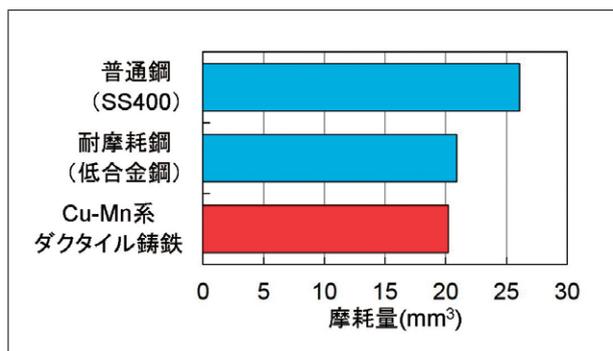


図8 スガ式摩耗試験結果

3.2 湿式摩耗試験 (スラリー摩耗試験)

湿式摩耗試験は、図9に示すようなスラリー摩耗試験機を社内で作製し、試験を実施した。試験状況を図10に示す。評価方法は、乾式摩耗試験と同様に試験前後の重量減少量を体積換算し、摩耗量として比較を行った。試験条件を表4に示す。石炭灰のスラリー輸送では、主に工業用水が使用されるが、海水が使用される場合もある。そのため、スラリー摩耗試験は工業用水と人工海水の二種類を用いて実施した。

試験結果を図11に示す。工業用水を用いたスラリー摩耗試験では、Cu-Mn 系ダクタイトル鉄は耐摩耗鋼と比較して同等の耐摩耗性を有する結果であった。一方、人工海水の場合は耐摩耗鋼の摩耗量が大きく増加する結果となった。人工海水を用いて行った摩耗試験後の試料表面の写真を図12に示す。耐摩耗鋼は Cu-Mn 系ダクタイトル鉄と比較し、試料表面の凹凸が著しいことがわかる。このことより、耐摩耗鋼は Cu-Mn 系ダクタイトル鉄と比べ、腐食による体積減少が大きいため、摩耗量が大きくなった可能性が考えられる。

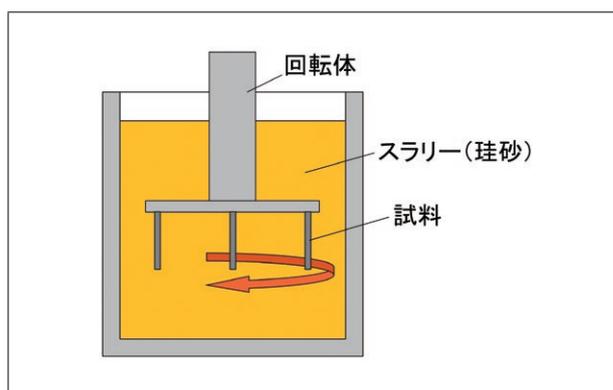


図9 スラリー摩耗試験 (概略図)

表4 湿式摩耗試験条件

試験機	スラリー摩耗試験機
試験時間	168 h
回転周速度	4 m / min
試験片形状	φ 8 mm × L 70 mm
研磨材	工業用水、人工海水 +3 珪砂 (重量比 15 wt%)



図10 スラリー摩耗試験状況

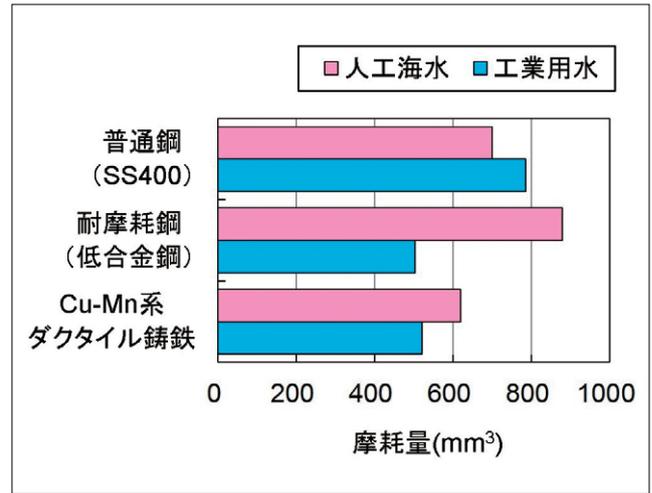


図11 スラリー摩耗試験結果

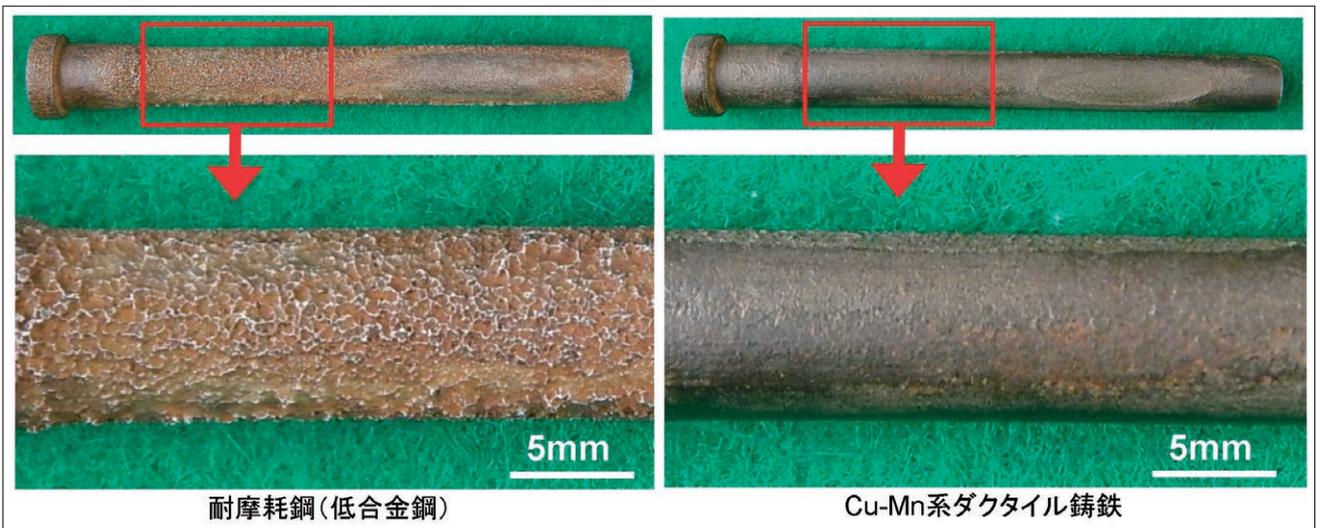


図12 人工海水を用いたスラリー摩耗試験後の試料写真

4 高温機械的性質

高温環境での機械的性質調査を目的として、高温ビッカース硬さ試験を実施した。なお、先ほどの摩耗試験と同様、1.1mass%Cu-1.7mass%MnのCu-Mn系ダクタイル鑄鉄を用い、比較のため普通鋼 (SS400)、耐摩耗鋼 (低合金鋼) についても評価を行った。試験条件を表5に、結果を図13に示す。

表5 高温ビッカース硬さ試験条件

試験機	明石ビッカース硬度計(AVK-AII) 明石ビッカース硬度計高温装置(AVK-HF)
試験温度	30℃、200℃、300℃、400℃、500℃
昇温速度	10℃/min
圧子押しつけ強さ	20 kgf
押しつけ時間	30 sec
試料形状	φ 10 mm × t 5 mm

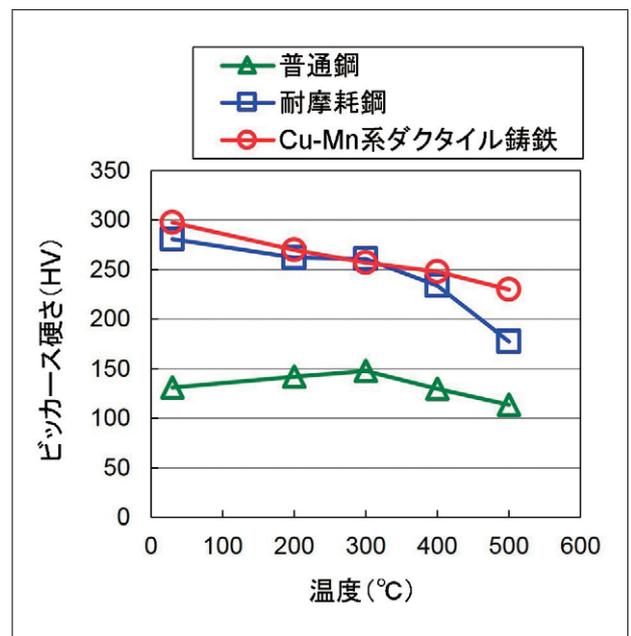


図13 高温ビッカース硬さ試験結果

Cu-Mn 系ダクタイル鋳鉄、耐摩耗鋼はいずれも温度上昇に伴い、硬さの低下が見られる。また、耐摩耗鋼においては、特に 400～500℃の間で大幅な硬さの低下が見られた。これは、耐摩耗鋼中のマルテンサイトが加熱により、焼き戻しマルテンサイトに変化したためと考えられる。一方、Cu-Mn 系ダクタイル鋳鉄はパーライト組織であり、500℃以下の温度では相変態は起こらないため、大幅な硬さの低下は見られない。一般に耐摩耗性と硬さは相関関係にあると言われ、硬いほど、耐摩耗性に優れる傾向にあるとされる。そのため、今回の高温ビッカース硬さ試験結果より、特に 400℃を超える高温環境下においては、耐摩耗鋼の硬さ低下が著しく、常温に比べると耐摩耗性の低下も著しいと考えられる。一方で、Cu-Mn 系ダクタイル鋳鉄に関しては大幅な硬さの低下は見られない。そのため、500℃付近の高温環境下では耐摩耗鋼と比べ、より優れた耐摩耗性が得られると考えられる。

5 製品仕様

今回開発した Cu-Mn 系ダクタイル鉄管は、従来品と異なり、高価な Ni や Cr を用いず、かつ、耐摩耗性と延性が両立した配管材料であることが示された。そこで、本開発品を新たな耐摩耗管としてラインアップした。Cu-Mn 系ダクタイル鉄管の適用呼び径、管厚などの仕様を表 6 に、接合形式を図 14 に示す。また、製品の一例を図 15 に示す。

表6 各種仕様

呼び径	50～800
有効長	4 m、5 m、6 m (呼び径により異なる。乱尺管にも対応可能。)
管厚	6～12 mm
外面塗装	エポキシ樹脂塗装、ウレタン塗装



図15 製品の一例（呼び径250 mm、フランジタイプ）

6 まとめ

- Cu-Mn 系ダクタイル鉄管の開発およびその耐摩耗性、高温機械的性質調査により、以下の内容が確認できた。
- 今回調査を行った範囲において、Cu、Mn 添加量と機械的性質の関係は、Mn 含有量 1.5 mass% の場合、Cu0.9 mass% 以上でブリネル硬さ 280 HB 以上、伸び 6.0 % 以上を満足した。
 - 常温においては、耐摩耗鋼（低合金鋼）と同等の耐摩耗性を有する。
 - 500℃までの高温環境において、耐摩耗鋼は大幅な硬度低下が見られたのに対し、Cu-Mn 系ダクタイル鋳鉄は大きな低下は見られなかった。

7 おわりに

本論文では、石炭火力発電所の石炭灰輸送管として開発した Cu-Mn 系ダクタイル鉄管の耐摩耗性評価結果を示したが、耐摩耗管は石炭灰のみならず、さまざまな輸送管としてのニーズがあり、ほかの用途へ展開できる可能性がある。

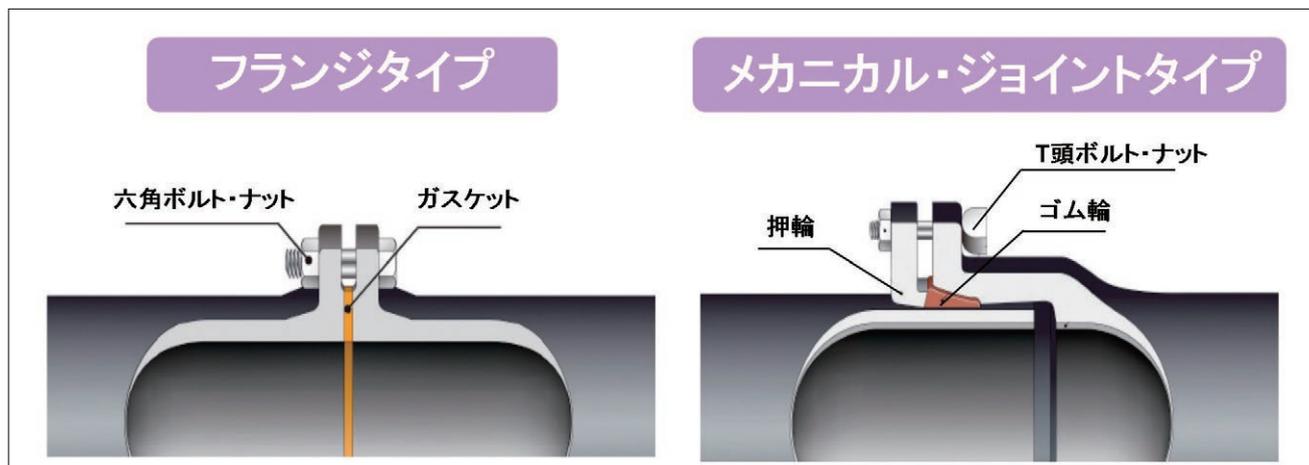


図14 接合形式

今後、種々の環境・条件での耐摩耗性の評価を行い、開発品の特徴を把握し、お客様に採用を検討いただくためのデータの拡充に努める。

参考文献：

- 1) 電気事業連合会 (URL、閲覧日)
http://www.fepec.or.jp/enterprise/jigyoku/japan/sw_index_02/ (2017年6月26日)
- 2) 中本、小仲、岸本、中光：P II形高強度ダクタイル鉄管の開発、クリモト技報、No. 60 (2011)、pp. 2-8
- 3) 張、明智、埴：球状黒鉛鑄鉄、アグネ (1983)、pp. 4-8
- 4) 井ノ山、川瀬、山本、川野：鑄鉄における添加元素のパーライト安定化特性について、鑄物、第62巻 (1990) pp. 510-516
- 5) 筒井、相原：パーライト球状黒鉛鑄鉄の研究、鉄と鋼、Vol.43 (1957)、pp. 253-256
- 6) 遠山、高岡、古川、堀、福井、南：スラリー輸送用耐摩耗鋼管 (NK-SL80)、NKK 技報、No. 174 (2001)、pp. 39-45

執筆者：

堤 親平

2006年入社

ダクタイル鉄管の研究・開発に従事



柳谷仁志

2012年入社

ダクタイル鉄管の研究・開発に従事



西原佳和

2009年入社

ダクタイル鉄管の研究・開発に従事



中本光二

1999年入社

ダクタイル鉄管の研究・開発に従事

