

非常用ディーゼル発電機燃料弁冷却水系統管理の高度化に関する研究

株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部 石川 裕史
株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部 山本 松平
株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部 大鹿 浩功

キーワード： ディーゼル発電機
燃料弁冷却水
燃料噴射弁
異種金属接触腐食
腐食抑制剤
亜硝酸塩

Key Words : diesel generator
fuel valve cooling water
fuel injection valve
galvanic corrosion
corrosion inhibitor
nitrite

Research on improving water control of fuel valve cooling water system in emergency diesel generator

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical Technology and Biotechnology Department
Hirofumi Ishikawa, Shohei Yamamoto, Hironori Oshika

Abstract

Pure water treatment is used for fuel valve cooling water system in emergency diesel generators in Ikata Nuclear Power Station. Although no troubles caused by corrosion have occurred so far, it has been necessary to replace parts due to partial corrosion in the fuel injection valve. Therefore, it has been desired to study a method for suppressing corrosion.

We examined the corrosion control of fuel valve cooling water system in emergency diesel generators. As a result, it was suggested that the nitrite corrosion inhibitor can suppress the corrosion on the contact surface of the fuel injection valve.

1. はじめに

ディーゼル発電機（以下、D/G という）は、一般的に燃料系統、潤滑油系統、冷却水系統等から構成され、冷却水系統に用いられる系統水には、不純物等による腐食を防止するため、純水処理の他、金属材料の種類や温度等の環境条件に応じて、溶存酸素の除去や腐食抑制剤が適用されている。

今回、検討の対象とした伊方発電所非常用 D/G の燃料弁冷却水系統には純水処理が採用され、これまで腐食に起因するトラブル等は発生していないものの、一部の機器では部分的な腐食により定期的な部品取替が必要となっていたことから、腐食抑制方法の検討が望まれていた。

本研究では、D/G 燃料弁冷却水系統の腐食抑制・防止について水質管理の面から、設備の信頼性確保および点検頻度や部品取替のさらなる合理化を目的に検討した結果について報告する。

2. 腐食状況調査

2.1 燃料弁冷却水系統の概要

図-1 に、D/G 燃料弁冷却水系統の概略図を示す。当該系統は、タンク、ポンプ、冷却器等から構成され、冷却水は、D/G 機関内で燃料噴射弁を冷却する。また、燃料弁冷却水タンクが大気開放となっているが、冷却器（二次冷却器）を有する等、密閉系統に近い構造となっている。なお、D/G の冷却水温度は停止時で約 25℃であるが、1 回/月の運転時は約 40℃である。

表-1 に当該系統に使用される主要構成材料、図-2 に燃料噴射弁の概要図を示す。主配管には、亜鉛メッキ鋼、冷却器の胴側には炭素鋼が使用され、

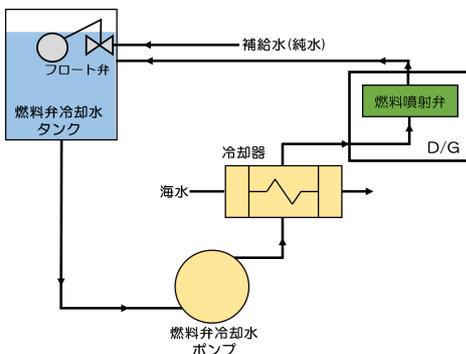


図-1 D/G 燃料弁冷却水系統の概略図

燃料噴射弁は弁本体（炭素鋼）、ノズル弁座（低合金鋼）、ジャケットノズル（ステンレス鋼）が金属接触しており、特にノズル弁座では、ジャケットノズルとの接触面における腐食痕の発生により部品取替が必要となるケースが多く見られた。

表-1 系統機器に用いられる主要構成材料

装置・機器		材料	
主要構成材料	配管	主配管	亜鉛メッキ鋼
		枝管	銅
	冷却器	胴	炭素鋼
		伝熱管	チタン
その他 (ポンプ、タンク等)		銅合金、炭素鋼等	
燃料噴射弁	弁本体	炭素鋼 (S45C)	
	ノズル弁座	低合金鋼 (SNCM815)	
	ジャケットノズル	ステンレス鋼 (SUS420J2)	

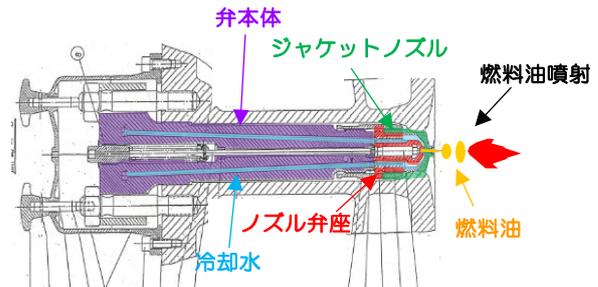


図-2 燃料噴射弁の概要図

2.2 腐食原因の推定

燃料噴射弁の腐食状況を図-3 に示す。燃料噴射弁の押棒穴と冷却水流路の距離は、弁本体側で約 3mm、噴射口側で約 2.5mm である。各部材のうち、使用に伴って流路近傍で生じる腐食痕と押棒穴までの距離が 1mm 以下となったものは、部品交換の対象となる。

推定された燃料噴射弁の腐食原因の概要を図-4 に示す。金属接触面の冷却水流路近傍では、わずかに減肉している箇所が一部確認されたが、同箇所からは Cl や SO₄ 等の腐食因子は検出されなかった。また、冷却水（純水）中は、溶存酸素を含むことから、各材料間で有意な電位差が生じる場合の異種金属接触腐食や微小なすきま部で生じる酸素濃淡電池腐食（すきま腐食）の可能性が示唆された。

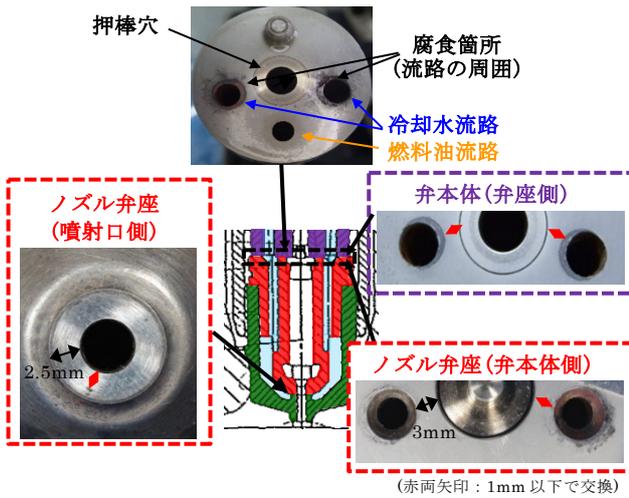


図-3 燃料噴射弁の腐食状況

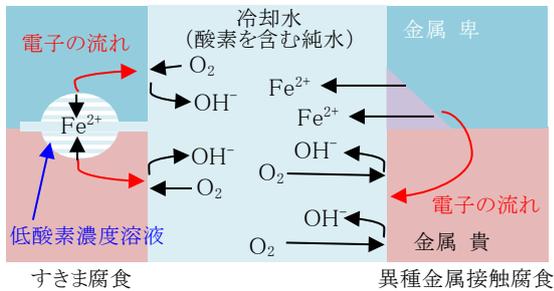


図-4 推定された燃料噴射弁の腐食原因の概要

3 腐食抑制方法の検討

3.1 腐食抑制方法の選定

推定された燃料噴射弁の腐食対策として、選定した腐食抑制方法を表-2 に示す。溶存酸素の除去や材料間の電位差低減等が期待される種々のインヒビター等を用いた処理方法について試験片を用いたラボ試験を行った。また、燃料噴射弁以外の材料の腐食へ及ぼす影響についても確認した。

表-2 選定した腐食抑制方法

処理方法	処理内容	備考
①純水処理	純水使用	現状処理方法
②アルカリ処理	NaOH を添加	定期的に pH8.5~9.5 に調整
③Mo 処理	メーカー推奨薬品濃度 (3000ppm) で添加	Mo 酸塩系不働態被膜型インヒビター
④NO ₂ 処理	メーカー推奨薬品濃度 (5000ppm) で添加	NO ₂ 塩系不働態被膜型インヒビター
⑤N ₂ H ₄ 処理	N ₂ H ₄ を添加	定期的に pH8.5~9.5 に調整
⑥低 DO 処理	脱気処理後に連続 N ₂ 曝気	DO0.5ppm 以下を目標に調整

3.2 腐食抑制方法の比較試験

(1) 試験材料

表-3 に、試験片の主な化学組成を示す。試験材料には、当該系統の主要構成材料である亜鉛メッキ鋼 (SS400 に溶融亜鉛メッキ処理)、炭素鋼 (STPT370)、リン青銅铸件 (CAC502C) および燃料噴射弁に用いられている炭素鋼 (S45C)、低合金鋼 (SNCM815)、ステンレス鋼 (SUS420J2) の試験片を選定した。

なお、燃料噴射弁に用いられている 3 種の試験片は、燃料噴射弁を模擬しそれぞれ S45C と SNCM815、SNCM815 と SUS420J2 を面接触 (上下の孔をインシュロックで固定) したものを使用した。

表-3 試験片の主な化学組成 (Weight %)

材料	STPT 370	CAC 502C	S45C	SNCM 815	SUS 420J2
寸法	50mm×100mm (φ4mm 孔×1)	50mm×100mm (φ4mm 孔×2 上下, φ5mm 孔×1 中央)			
C	0.22	-	0.44	0.14	0.31
Si	0.21	0.00	0.24	0.27	0.42
Mn	0.68	-	0.66	0.44	0.42
P	0.02	0.21	0.01	0.01	0.02
S	0.01	-	0.02	0.02	0.01
Cu	-	Bal.	0.15	0.03	-
Cr	-	-	0.12	0.84	13.1
Ni	-	0.14	0.07	4.18	0.22
Mo	-	-	-	0.17	-
Fe	Bal.	0.01	Bal.	Bal.	Bal.
Sn	-	9.39	-	-	-
Pb	-	0.00	-	-	-
Zn	-	0.15	-	-	-
Al	-	0.00	-	-	-
Sb	-	0.00	-	-	-
規格	JISG 3456	JISH 5121	JISG 4051	JISG 4053	JISG 4303

(2) 試験方法

試験の状況を図-5 に示す。40℃の各試験液を満たしたアクリル樹脂製の試験容器に各試験片を浸漬し、浸漬開始から約 1 ヶ月後における脱酸化被膜処理後の腐食量 (亜鉛メッキ鋼については水側への溶出量) および試験後の試験片外観を比較した。

また、実機において腐食が懸念されている燃料噴射弁については、試験後における試験片の接触

面を回転式自動研磨機で 30 秒研磨 (#4000) し、腐食痕の測定を行った。測定は、研磨後の接触面を撮影した画像を、画像処理ソフト (ImageJ) を用いて色調差を白黒の 2 極分化し、試験片中央孔 ($\phi 5\text{mm}$) 周囲の黒色部を腐食痕面積とした。

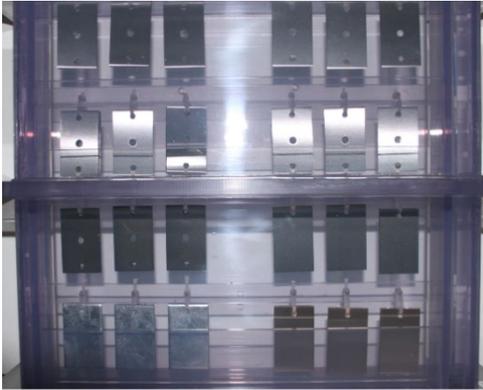


図-5 試験状況 (一例)

(3) 試験結果

(a) 腐食量測定

各試験片の腐食量の測定結果を図-6 に示す。

現状の処理である①純水処理に対して、②アルカリ処理では、亜鉛メッキ鋼を除いて腐食量が増加し、③Mo 処理についても S45C における SNCM815 との接触面や亜鉛メッキ鋼で腐食量が増加した。

一方、⑤ N_2H_4 処理、⑥低 DO 処理は SUS420J2 を除いて腐食量が低下しており、④ NO_2 処理についても、特に腐食が懸念されていた燃料噴射弁の材料については、腐食量が低下した。

(b) 試験片外観観察

試験後に回収した燃料噴射弁の試験片外観観察結果を図-7 に示す。

試験片の外観を観察した結果、①純水処理に対して、腐食量の低下が見られた⑤ N_2H_4 処理および⑥低 DO 処理は、S45C と SNCM815 の接触面において全体に腐食痕が見られた。また、SNCM815 と SUS420J2 の接触面では腐食痕は小さかったが、⑥低 DO 処理の方が腐食痕は軽微であり、燃料噴射弁以外の材料についても腐食の進行が抑制できていた。

一方、④ NO_2 処理では、亜鉛メッキ鋼においてメッキ腐食による腐食痕が見られたが、その他の材料では外観的な腐食は確認されず、接触浸漬した。

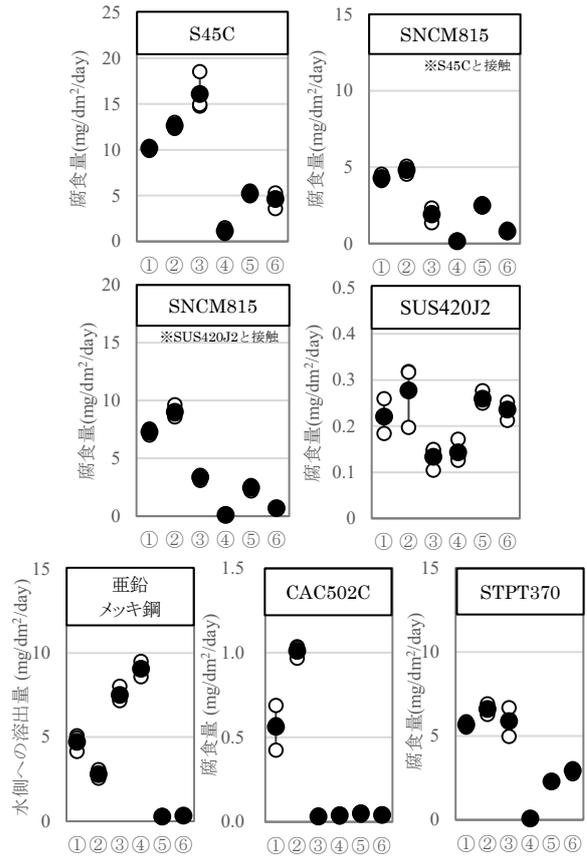


図-6 各処理における腐食量の比較

(○ : 各測定値、● : 平均値)

処理方法	接触面		接触面	
	S45C	SNCM815	SNCM815	SUS420J2
① 純水処理				
④ NO_2 処理				
⑤ N_2H_4 処理				
⑥ 低 DO 処理				

図-7 各処理における試験片外観の比較 (一例)

燃料噴射弁の材料についても全ての組み合わせで腐食痕はほとんど生じなかった。

(c) 腐食痕面積測定

面接触させた各燃料噴射弁試験片における腐食痕面積の測定結果を図-8、接触面における腐食痕の状況を図-9に示す。

接触浸漬時のテストピース中央孔(φ5mm)周囲の腐食痕面積を比較した結果、④NO₂処理により各材料間の接触面で生じる腐食を顕著に抑制できることを確認した。また、⑥低DO処理も接触面の腐食を低減できる傾向が見られたが、SNCM815におけるS45Cとの組み合わせでは純水処理と同程度の腐食痕面積であった。

これらの試験結果から、燃料噴射弁の接触面で生じている腐食抑制方法については、④NO₂処理が最も腐食抑制効果の大きい方法であると考えられた。

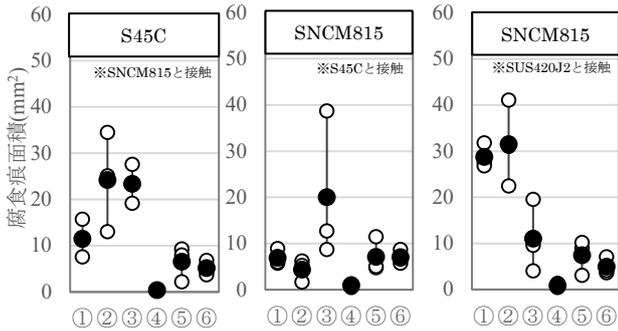


図-8 腐食痕面積の測定結果

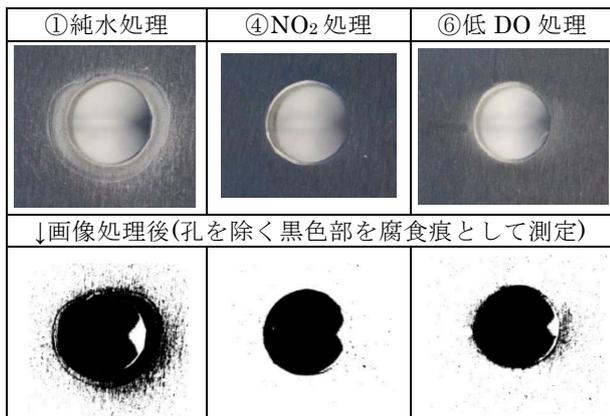


図-9 SNCM815 (SUS420J2 と接触) の腐食痕の状況 (一例)

3.3 腐食抑制剤の選定

3.2 (3)の試験結果から、燃料噴射弁への腐食抑制効果が大きいと考えられた NO₂ 塩系不動態被膜

型インヒビターを対象に、銘柄の異なる薬剤を用いて腐食量の比較試験を行った。また、NO₂処理にて懸念された亜鉛メッキ鋼の腐食抑制を考慮し、適切な NO₂濃度等についても合わせて検討した。

(1) 試験材料

燃料噴射弁の材料については、炭素鋼 (S45C)、低合金鋼 (SNCM815) およびステンレス鋼 (SUS420J2) の3種を面接触 (上下の孔をインシュロックで固定) したものを使用した。また、腐食抑制条件の検討のために亜鉛メッキ鋼 (SS400 に溶融亜鉛メッキ処理) を使用した。

(2) 試験方法

試験に用いた NO₂ 系薬剤を表-4に示す。各 NO₂ 系薬剤を添加し、NO₂ 濃度を調整した各試験液に、燃料噴射弁の面接触した試験片を浸漬させ、約1ヶ月後における脱酸化被膜処理後の腐食量および試験片外観を比較した。なお、試験温度は、加速的な試験条件として70℃にて行った。

また、燃料噴射弁の材料にて腐食抑制効果が認められた薬剤銘柄については、亜鉛メッキ鋼への腐食抑制効果の検討のため、NO₂濃度および水温を調整して、腐食量 (水側への溶出量) の測定を行った。

表-4 試験に用いた NO₂ 系薬剤

NO ₂ 系薬剤銘柄	製品 A	製品 B	製品 C
推奨 NO ₂ 濃度 (ppm)	1200~1500	150~300	250~450
備考	3.2の試験で使用	-	pH調整にNaOHが必要

(3) 試験結果

(a) 腐食量測定

燃料噴射弁の材料における純水処理に対する腐食量を図-10に示す。

面接触させた燃料噴射弁構成材料では、純水処理と比較して薬剤銘柄に関わらず NO₂濃度 150ppm以上で腐食を抑制できることを確認した。また、製品 A では、SNCM815 および SUS420J2 において NO₂濃度 300ppm と比較して NO₂濃度 500~700ppmの方が腐食量を低減できる傾向が見られた。

一方、製品 B および製品 C では、メーカー推奨濃度である NO₂ 濃度 300ppm において、純水処理と比較して各材料ともに腐食量は少なかった。

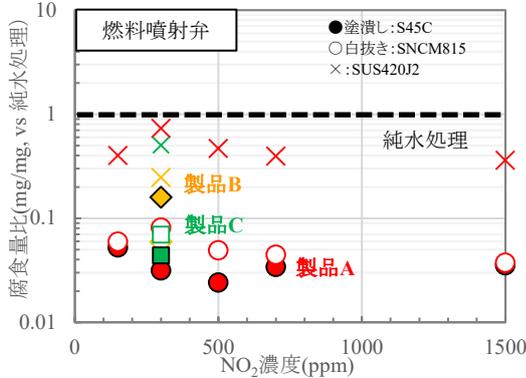


図-10 NO₂系薬剤を用いた各材料の腐食量比 (対純水処理)

(b) 試験片外観観察

脱酸化被膜処理後の試験片の外観観察結果を図-11 に示す。

製品 A について、NO₂ 濃度 150ppm では S45C と SNCM815 間および SNCM815 と SUS420J2 間において腐食痕が確認されたが、NO₂ 濃度 300~700ppm では、燃料噴射弁に用いられる各材料について、接触面で生じる腐食を顕著に抑制できることを確認した。

一方、製品 B および製品 C では製品 A と比較して、特に S45C と SNCM815 の接触面が顕著に腐食していた。これは、製品 B および製品 C ともに腐食量は製品 A と大きな差が見られないことから、材料間の電位差にともない局所的な異種金属接触腐食が生じている可能性が示唆された。

以上の結果から、燃料噴射弁の接触面における腐食抑制方法は、製品 A を使用して、NO₂ 濃度 500ppm 程度で管理する方法が特に優れている結果となった。

(c) 亜鉛メッキ鋼に及ぼす NO₂ 濃度と水温の影響

燃料噴射弁の接触面において腐食抑制効果が確認された製品 A を用いて、亜鉛メッキ鋼の腐食に及ぼす NO₂ 濃度と水温の影響について試験した結果を図-12 に示す。

試験した結果、NO₂ 濃度の上昇とともに、亜鉛メッキ鋼における腐食量の上昇が見られた。また、水

温については、より低い水温の方が腐食量を抑制できると考えられ、実機における水温を考慮した場合、運転時 (40℃) はおよそ 1 回/月であり、停止時 (25℃) の方が長期間となることから、NO₂ 濃度 500ppm 程度とすることで腐食量を現状の純水処理と同等以下に抑制できると考えられる。

処理方法 (NO ₂ 濃度)	接触面		接触面	
	S45C	SNCM815	SNCM815	SUS420J2
純水処理 (0ppm)				
NO ₂ 処理 製品 A (150ppm)				
NO ₂ 処理 製品 A (300ppm)				
NO ₂ 処理 製品 A (500ppm)				
NO ₂ 処理 製品 A (700ppm)				
NO ₂ 処理 製品 B (300ppm)				
NO ₂ 処理 製品 C (300ppm)				

図-11 各処理における試験片外観の比較 (一例)

以上の結果から、燃料噴射弁の接触面および亜鉛メッキ鋼に対する腐食抑制方法として、製品 A を用いて NO₂ 濃度 500ppm 程度で管理する方法が最も適していると考えられる。

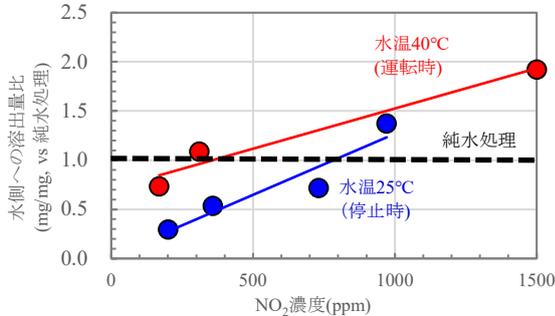


図-12 亜鉛メッキに及ぼす NO₂ 濃度と水温の影響 (対純水処理)

4. まとめ

燃料噴射弁の接触面で発生していた腐食原因は、異種金属接触腐食である可能性が示唆された。これらの腐食抑制方法を検討した結果、NO₂ 塩系不働態被膜型インヒビターである製品 A を用いて、燃料噴射弁の接触面の腐食抑制できることが示唆された。また、NO₂ 塩系不働態被膜型インヒビターを使用することで腐食が懸念された亜鉛メッキ鋼については、NO₂ 濃度を 500ppm 程度で管理することで、腐食量を現状の純水処理と同等以下に抑制できることを確認した。今後、実機適用に向けた試運用および評価をおこなう予定である。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)原子力本部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 荒牧國次：「腐食抑制剤の作用」, 材料と環境, 56 (2007)
- 2) 堀正：「ベンゾトリアゾールの性状と用途および使用方法」, 防食技術
- 3) 原信義：「金属腐食の基礎概念」, Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol.44, No.10 (2001)
- 4) 迫田章人ら：「亜鉛めっきの耐食性と腐食生成物との関係」, 表面技術, Vol.40 (1989)

- 5) 松川安樹ら：「水道水中における亜鉛の腐食挙動に及ぼすアニオンの影響」, 材料と環境 Vol.57 (2008)
- 6) 山手利博：「建築設備配管系における異種金属接触腐食と対策」, 竹中技術研究報告 No.64 (2008)