

論 文

バクテリア腐食による炭素鋼配管の腐食と閉塞

© 1985 ISIJ

尾崎 敏範*・浅野 浩*²

Corrosion and Plugging Behavior of Carbon Steel Pipes with Special Reference to Microbial Corrosion

Toshinori OZAKI and Hiroshi ASANO

Synopsis:

Various feed water pipes which were used for supplying cooling water to turbines in hydroelectric power stations for three to twenty years showed severe plugging problems because of tuberculation. Beneath tubercles, locally corroded large pits were observed.

Results of water and corrosion product analysis suggest that bacteria might be associated with the tuberculation. Qualitative analysis of the tuberculation suggests the preventive ways of plugging or corrosion penetration.

1. 結 言

産業機器の冷却水配管には炭素鋼管が広く用いられている。これらの配管は長期間使用後配管内に錆こぶが発生し流路面積を減少し、流路を閉塞すると共に局部的な減肉により貫通穴を発生することがある。

ここで淡水中における炭素鋼配管の腐食損傷は従来から多くの研究例があり、錆こぶ下腐食の局部溶解機構^{1)~4)}や腐食損傷例とその解析^{5)~8)}、環境因子の役割やその解明^{9)~12)}などが知られている。また錆こぶ下腐食に対するバクテリアの関与およびその作用^{13)~17)}やその具体的挙動も徐々に明らかになりつつある^{19)~22)}。しかしこれらの損傷実態を長期にわたり正確に把握すると共に系統的に整理した例はほとんど公表されていない。

著者らは水力発電設備の腐食損傷実体を長年にわたり観察・検討してきた。その結果、錆こぶ下腐食の発生が a) 特定地域に限り頻発する、b) 水質化学成分との明確な相関性が見られない、c) 錆こぶ内部にバクテリアの存在する場合が多い、d) 実験室試験では錆こぶが再現できず実機損傷に比べ緩やかな腐食挙動を示す、等々の知見を得てきた。

本報では只見川および阿賀野川水系における水力発電所水車冷却水配管の錆こぶ下腐食実態を系統的に整理した結果得られた知見について述べる。

2. 水力発電所水車冷却水配管の腐食損傷調査

調査は新潟県と福島県境に位置する只見川および阿賀

野川水系の水力発電所 3 箇所を対象とし、昭和 54 年 9 月から 10 月にかけて行つた。調査内容は①冷却水の水質分析、②錆こぶの発生状況調査、③錆こぶの形態調査および組成分析、④局部腐食の進行状況調査、⑤配管の閉塞状況調査とした。Table 1 に配管の採取位置、材料、使用状況などをまとめて示す。なお上記項目の具体的調査手法は結果と共に示す。

3. 調査結果と検討

3.1 水質分析結果

配管上流のダム表層水より数回採水し、化学成分分析および水中のバクテリア観察を行つた。水質分析法は JIS 工業用水分析法 (JIS K 0101) に準じて行つた。Table 2 にその結果を示す。表より各発電所の冷却水は極めて清浄と言え、Cl⁻ イオンなどの可溶性塩類濃度は国内水道水に比べ 1/5 ~ 1/2 を示している。また NH₄⁺ イオンや S⁻² イオンなどの汚染成分もほとんど検出されなかつた。一方、NO₃⁻、全鉄、全炭酸濃度は若干高めで、溶存酸素濃度は検水温度 (18°C) での飽和濃度の約 1/2 程度であつた。

次に検水 10 ml を遠心分離し、沈積した残渣をプレパラート上に取り出した後 AGV 液 (Acid Gentiana Violet 液) によつて染色し光学顕微鏡によつてその形態および数を計測した。その結果水中には φ0.5 μm 程度の球状物質が多数観察された。

この物質は染色前は透明に近い淡黄色であるが染色後鮮明なコバルト色に染色されることから有機物と判断さ

昭和 59 年 9 月 26 日受付 (Received Sep. 26, 1984)

* (株)日立製作所機械研究所 (Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 502 Kandatsumachi Tsuchiura 300)

*² 東北電力(株) (Tohoku Electric Power Company Incorp.)

Table 1. Sampling sites and operating condition of feed water pipes.

Specimen No.	Power station	Materials	Pipe diameter (mm)	Years in service	Velocity (m/s)
M-1	Miyashita (Tadami River)	Carbon steel (SGP)	80.9	10	4.3
-2			80.9	10	4.3
-3			43.8	3	4.8
-4			43.8	3	4.8
-5			28.0	20	Unknown
-6			22.0	3	4.8
S-1	Shingo (Agano River)	SUS 304	53.0	4	2.7
-2		SGP	52.3	9	3.9
-3		Plastics	44.0	9	3.9
-4		Copper (OFCuT)	10.0	29	0
I-1	Inagawa (Agano River)	SGP	53.0	20	4

Table 2. Nominal composition of feed water.

Power station	Miyashita	Shingo	Inagawa
River	Tadami	Agano	Agano
pH	6.9-7.0	6.7-7.5	6.8-7.2
Electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50-55	75-80	55-70
Total hardness (ppm)	32-33	32-40	32-45
Ca hardness (ppm)	9-10	14-17	11-15
M alkalinity (ppm)	15-19	13-19	16-17
Dissolved oxygen (ppm)	4.8	4.5	4.7
Cl ⁻ (ppm)	7	10-11	8-10
NH ₄ ⁺ (ppm)	Tr	0-0.4	Tr
COD (ppm)	3.2-4.1	5.2-6.4	5.6-7.0
S ⁻² (ppm)	Nil	Nil	Nil
SO ₄ ⁻² (ppm)	7-13	15-16	9-10
NO ₃ ⁻ (ppm)	0.6-0.8	1.6-2.1	1.7-1.9
Total Fe (ppm)	0.2-0.6	0.5-0.6	0.4-0.6
S.S. (ppm)	12-14	8-10	8-9
TDS (ppm)	48-57	67-82	64-69
Total carbonates (ppm)	1.79-18.4	12.0-14.0	9.7-11.1
HCO ₃ ⁻ (ppm)	1.43-14.5	9.3-11.2	8.0-8.4
Total Mn (ppm)	0.06	0.08	0.06

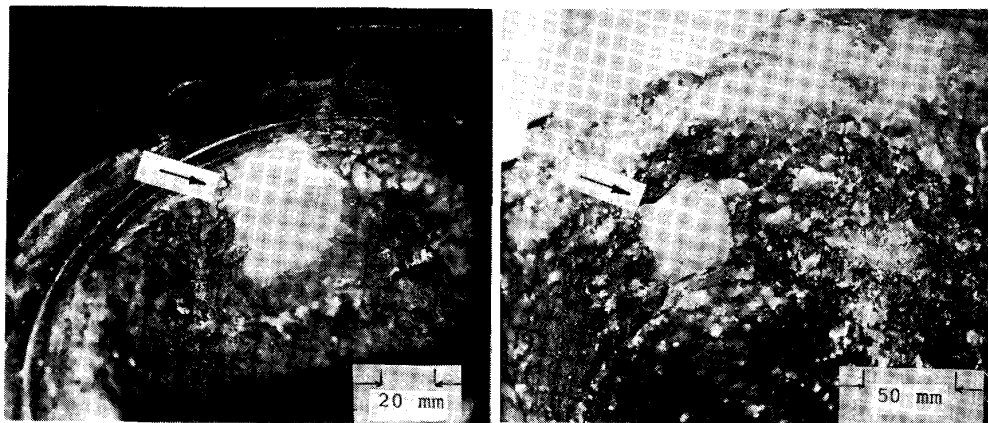
れ、さらにその形状、サイズよりバクテリアの一種と考えられる。次にその数はいずれの水系においても 10³ 個/ml 前後である。

以上より、上記発電所における冷却水は山間地特有の湧水に近い清浄水と判断され、その化学組成から炭素鋼配管に対する腐食性は十分小さいものと考えられる。ただし、バクテリアと思われる球状物質を多数含む点で特異な水と判断される。

3.2 水力発電所冷却水配管における錆こぶの付着状況

錆こぶの付着状況観察は $\phi 20$ mm の小配管から $\phi 3$ m の水車ケーシング内部まで、また使用期間が2年間から20年間にわたるもの、さらに炭素鋼管以外の配管についても行った。その結果、錆こぶは炭素鋼管においてのみ見られ管内堆積物や一部残留している鉛丹ペイントを

突き破る形で発生し、その発生位置は配管の幾何形状、流速、重力方向などに無関係であった。そして使用期間が3年以下の配管、中でも大口径管では錆こぶ発生密度が特別低く、50~500 mm 間隔で分布している。一方使用期間が5年以上の配管、中でも $\phi 50$ mm 以下の小口径管では錆こぶ発生密度が特別高く、錆こぶ同士が近接して発生することで管内表面全域が錆層で覆われた形となっている。Photo. 1 はその例であり、 $\phi 5\sim 15$ mm の錆こぶが管内全面を覆っている様子を示している。以上の挙動は別に調査した他の水系における水力発電所冷却水配管に比べ、錆こぶ付着密度および錆層厚さ共に数段大きいように観察された。



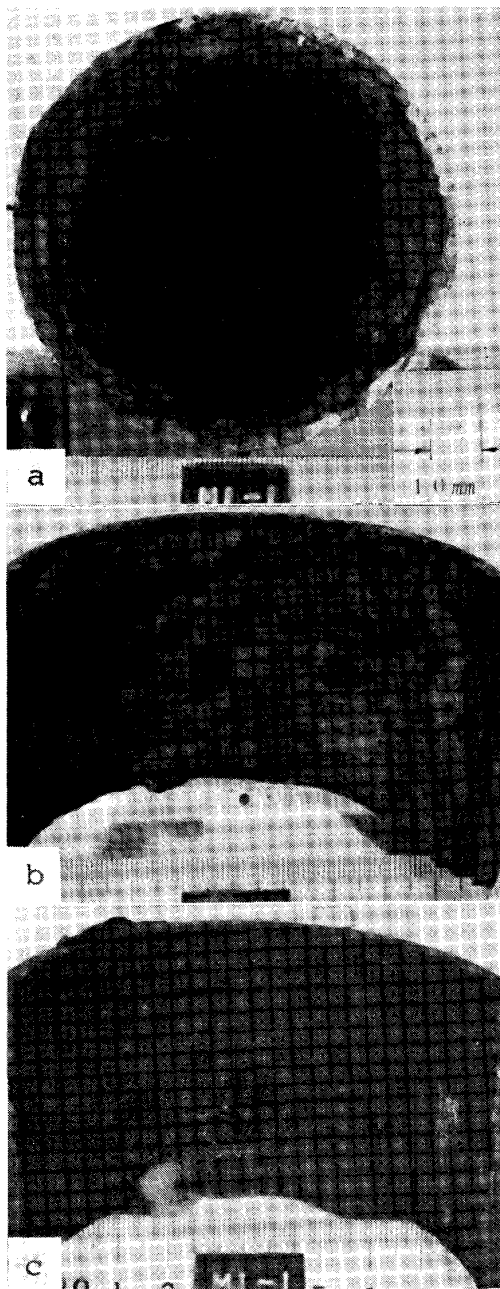
a. $\phi 200$ mm diameter pipe b. $\phi 300$ mm diameter pipe
 Photo. 1. Appearance of tuberculated feed water pipe.
 (SGP operated for 10 years.)

次に錆こぶの形態について述べる。錆こぶの外径は $\phi 5 \sim 15 \text{ mm}$ であるが、その大小にかかわらず最外層は $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 厚の Fe_3O_4 と思われる黒褐色の硬い皮で覆われている。またその内部には FeOOH と思われる真黒色の粉末と黄金色の軟らかな物質が層状に充満している。この錆こぶの付着強度は極めて高く、小型ハンマによる打撃によつてようやく破壊しえる程度である。Photo. 1 中の矢印はハンマ打撃後ワイヤブラシで錆層

を除いた部分である。写真より、錆こぶ下は例外なく金属光沢を有し、この部分が活性溶解していることを示している。次に錆こぶの最大盛り上がり高さ h とその下方における最大侵食深さ d の間には $h/d=5 \sim 7$ の関係が見られ、錆こぶが散在する場合は $h/d=7$ 、錆こぶが近接している場合は $h/d=5$ のほぼ全面腐食状の侵食が見られる。したがつて、錆こぶ下をアノード、その周辺をカソードとしたマクロセルによりこれらの腐食が進行しているものと推定される。

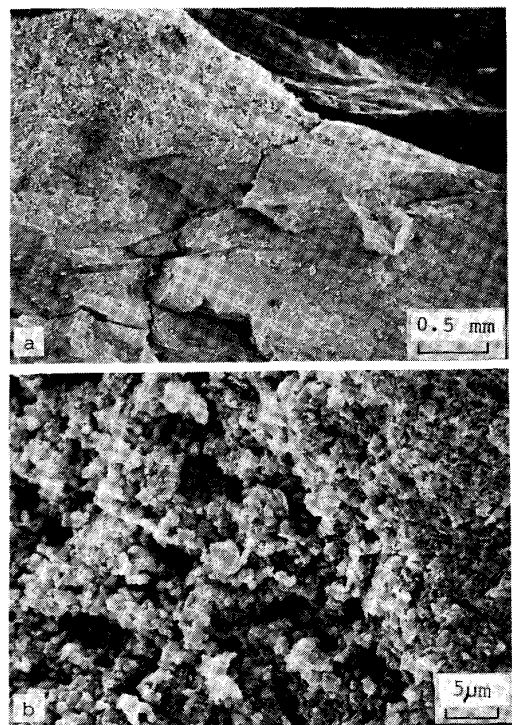
3.3 錆こぶの形態およびその組成

Photo. 2 に小配管における錆こぶの付着状況を示す。写真は試料 No. M-1, 10 年間使用炭素鋼管である。写真より錆層は管内面全域に厚く堆積し (Photo. 2・a および b), 錆こぶの盛上部分下に局部侵食が生じている (Photo. 2・c)。この外観状況を見る限り上記錆こぶは日常出合う錆こぶと概略同様に感じられる。しかし、本水系における錆こぶの特徴はその内部構造にある。Photo. 3 は錆こぶを機械的に半割りとし、その断面を走査型電子顕微鏡で観察した例である。Photo. 3・a は錆こぶ盛り上がりほぼ中心部分の拡大であり、平滑部分 (写真中央) と多孔質部分 (写真上部と右方部分) が見られる。Photo. 3・b はこの平滑部分の拡大写真であり、この部分が $0.5 \mu\text{m}$ 大の球状物質の集合によつて構成され



a. Cross sectional view
b. Internal appearance
c. After removal of tubercles

Photo. 2. Appearance of a tuberculated feed water pipe. (SGP operated for 10 years.)



a. Cross sectional view of tubercles
b. Bacteria colony inside the tubercles

Photo. 3. SEM photographs of tubercles.

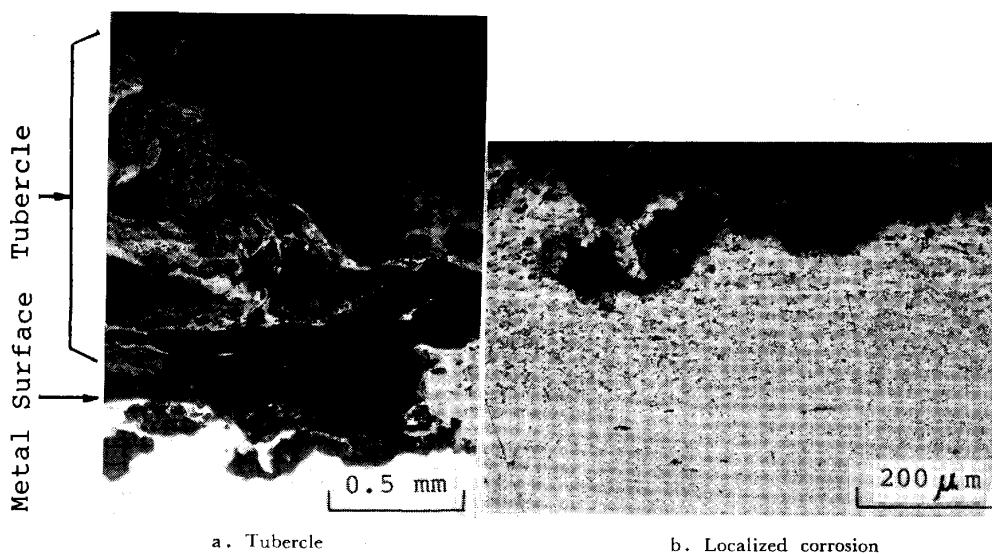


Photo. 4. Cross section of tubercles and localized corrosion.

Table 3. Chemical composition of tubercles.

T.P No.	(%)		
	M-1	S-2	I-1
Fe	52	—	—
Mn	0.6	14.6	0.1
Cu	0.4	0.03	0.02
Zn	0.07	0.8	0.1
Al	0.3	2.5	0.3
K	0.06	0.3	0.06
Ca	0.03	0.2	0.03
SiO ₂	2.5	12.2	3.4
Total S	0.7	0.2	1.0
X-ray Diff.	α, δ-FeOOH, α, γ-Fe ₂ O ₃ , Na ₂ SiO ₃ · 5 H ₂ O		

ていることがわかる。この球状物質は上述の水から検出された球状有機物と形状、サイズ共にほぼ一致している。またこの平滑部分を光学顕微鏡により観察すると球状物質は鮮やかな黄銅色であること、数十日大気放置後再度観察すると球状物質が茶褐色に変色すると共にその形状の崩れていることが確認された。したがってこの錆こぶ内の球状物質はバクテリアの一種と判断され、その存在位置が錆こぶ盛り上がりの中心部分および金属との界面近傍であることから嫌気性バクテリアの一種と推察される。

次に錆こぶの化学組成分析およびX線回折結果を Table 3 に示す。ここで錆こぶ構成物質はほとんど非晶質と思われ明確な回折線は得られなかつた。そしてわずかな回折線をたどって解析した結果を表中に示した。表より、錆こぶ構成物質はその大部分が鉄の酸化物および水酸化物であるが、Mn と Total S (SO₄²⁻+S) が極めて高濃度を示している点が特異である。すなわち、Table 2 の水質分析結果より水中の Mn, SO₄²⁻ イオンおよび S²⁻ イオンは無視しえる程度に低濃度であるのに比

Table 4. Penetration depth and deposit thickness.

Specimen No.	Penetration depth (mm)		Deposit thickness (mm)	
	Average	Maximum	Average	Maximum
M-1	0.74	2.5	6.0	8.5
-2	1.04	2.7	8.0	10.0
-3	0.48	1.7	6.0	10.3
-4	0.30	1.1	5.0	6.7
-5	0.43	1.2	6.0	9.5
-6	0.37	1.4	11.0	11.0
S-2	0.54	1.7	9.0	10.5
I-1	1.01	2.3	14.0	18.5

べ錆こぶ中ではその数万倍も濃化している。

次に錆こぶ下腐食における金属顕微鏡写真の 1 例を Photo. 4 に示す。写真より、錆こぶ下腐食の形態は金属組織に無関係で凹凸の激しい断面形態を示している。これは通常の錆こぶ下腐食には見られぬ著しい凹凸であり、この点においても本水系における錆こぶ下腐食の特異性がうかがえる。

3.4 局部腐食の進行状況

局部腐食の進行状況はすでに報告²¹⁾済みなので、ここでは概要のみを述べる。まず Table 4 に各試料配管における侵食深さと錆層の堆積厚さについて示す。ここで侵食深さの平均値は当初の配管形状と錆落とし後の配管重量より算出し、その最大値は各部分ごとの残余肉厚より決定した。Table 4 より侵食深さの最大値はその平均値に対し 2.3~3.7 倍を示し、錆こぶ下腐食が局部的に進行していることを示している。Fig. 1 は試料 No. M-2, 10 年間使用炭素鋼管における最大侵食深さのヒストグラムである。図より単位面積ごとの深さ分布はポアソン分布をほぼ満足した指数型に分布していることが

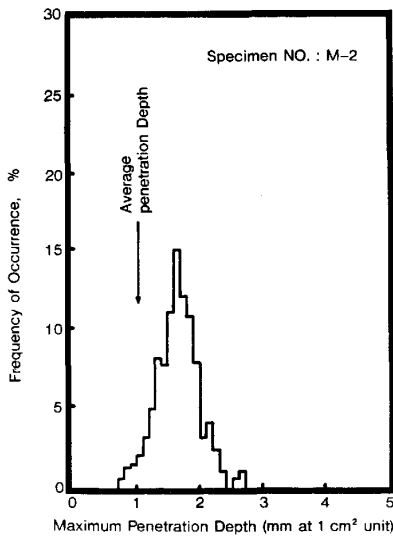


Fig. 1. Distribution of observed Maximum penetration due to Tuberculation.

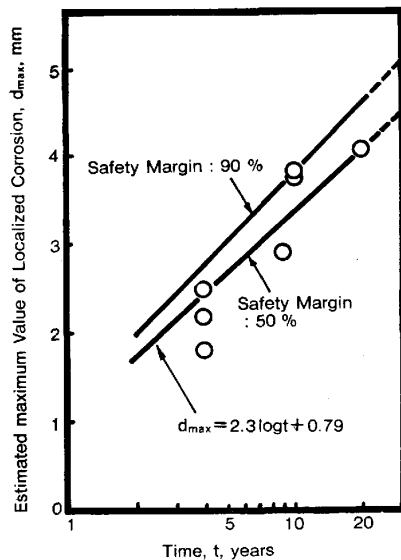


Fig. 2. Time dependence of estimated maximum penetration depth by extreme value statistical analysis.

わかる。そこで各試料配管の一部を 5 cm² 単位に区切り、その最大侵食深さを極値確率紙上にプロットすると良好な回帰直線が得られる。この直線を再帰期間 T = 10 m まで外挿し配管長さ 10 m 相当の最大孔食深さを読取使用期間に対し整理すると Fig. 2 が得られた。図より配管 10 m 相当における推定最大侵食深さ d_{max} (mm) と使用期間 t (年) との間には概略次式が成立する。

$$d_{max} = 2.3 \log t + 0.79 \text{ (安全率 : 50\%)} \dots\dots (1)$$

$$d_{max} = 2.8 \log t + 1.1 \text{ (安全率 : 90\%)} \dots\dots (2)$$

ただし、安全率は Fig. 2 上における分布のばらつきより算出した安全裕度である。なお試料配管ごとにおける

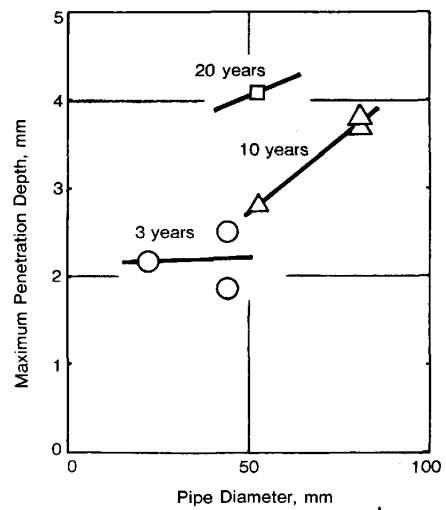


Fig. 3. Influence of pipe diameter on maximum penetration depth.

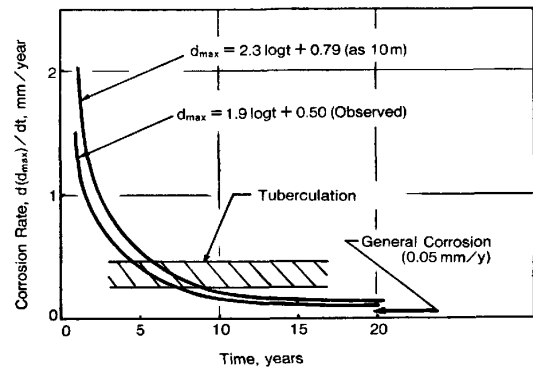


Fig. 4. Relationship between Localized corrosion rate and service periods.

る最大侵食深さの観察値からは次式が得られた。

$$d_{max} = 1.9 \log t + 0.50 \dots\dots\dots (3)$$

次に上記の推定最大侵食深さ d_{max} と配管内径の間には Fig. 3 の関係が得られ、配管内径が大きいほど侵食深さが大きくなる傾向が見られる。

以上より錆こぶ下腐食の特徴は錆こぶ発生密度が小さい当初において高い侵食速度を有すものの、錆こぶが重なり合い厚い錆層を形成するようになると (Photo. 1 および Photo. 2 参照) その速度は徐々に減少するようである。またその速度に配管内径が依存するのは小径配管ほど錆こぶの発達に伴いその間の配置が近接しやすく、一定量の腐食侵食により厚い錆層を形成しやすいためと考えられる。

以上の点を整理すると Fig. 4 が得られる。図中の曲線は (1) および (3) 式を微分して得た腐食速度であり、斜線の値は松島ら³⁾⁴⁾⁷⁾の報告に基づく錆こぶ下腐食の値である。また全面腐食の値は正村⁹⁾らの報告に基づく本使用水 (電気伝導度を考慮) の腐食速度および筆者らが

行つた別の水力発電所における腐食速度である。図より本調査における錆こぶ下腐食の侵食速度は5年以前の段階で高い値を示すものの、10年あるいは20年の段階では通常の全面腐食と同程度まで減速している。

3.5 配管の閉塞状況

錆こぶ下腐食の特徴は錆こぶの強固さにある。本調査配管の管内流速は最大 4.8 m/s であるが、この配管の曲がり部分、段違い部分を含め錆層の脱落はいつさい見られなかつた。したがつて腐食反応によつて生じた錆はその大部分が管内壁に付着し、流路面積の減少や突起の生成による圧力損失を生ずるものと思われる。さらに管内流速の低下は土砂等異物の沈積を促進し、配管の閉塞へと発展する危険性を有している。

まず Table 4 右方に各試料配管における錆層の堆積状況を示す。また Fig. 5 は Table 4 の平均堆積厚さに対する使用期間の関係である。図より配管径がφ45~53 mm の場合、堆積物厚さは使用期間の増大に伴い当初急激に増加するものの長時間側ではその傾きが緩やかになつている。この傾向は Fig. 4 に示した錆こぶ下腐食挙動より容易に理解される。しかし、配管口径により堆積厚さが変化する点については単純に理解できない。そこで理解を容易にする目的で Fig. 6 を示す。Fig. 6 の縦軸 R_d は $R_d < 1$ のとき錆こぶの一部が流出、 $R_d = 1$ のとき錆こぶの 100% 残留が、そして $R_d > 1$ のとき錆こぶの残留と共に錆以外の土砂類が管内に堆積したことを意味する指数であり次式で与えられる。

$$R_d = T_M / T_R \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 T_M : 堆積物厚さ (錆層 + 土砂類) の測定値

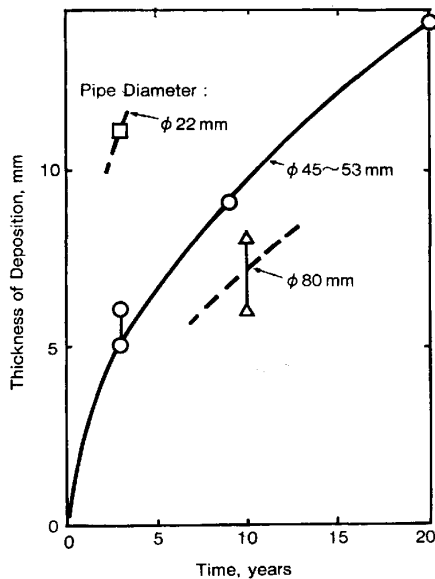


Fig. 5. Influence of pipe diameter on deposit thickness.

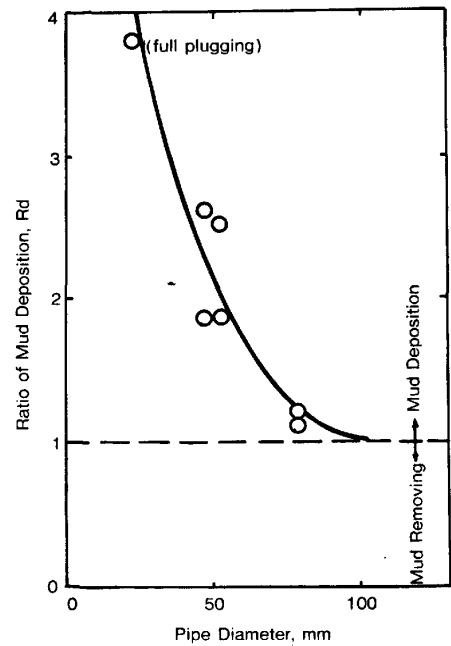


Fig. 6. Relationship between pipe diameter and ratio of mud deposition.

T_R : 錆こぶの生成によつてのみ生ずる錆層の平均生成厚さ

また T_R は管断面における平均腐食体積 V_C とそれが錆に変化したときの体積 V_R および当初の配管半径 R との関係によつて以下で与えられる。

$$V_C = \pi \{ (R + T_C)^2 - R^2 \} \cdot l \dots\dots\dots (5)$$

$$V_R = V_C \times (M_R / 2 \cdot M_{Fe}) \times (\rho_{Fe} / \rho_R) \times (1 / C_R) \dots\dots\dots (6)$$

$$V_R = \pi \{ (R + T_C)^2 - (R - T_R)^2 \} \cdot l \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 T_C : 平均腐食減肉厚さ

l : 配管の単位長さ

M_R : 錆層の平均分子量、ここでは Fe_2O_3 とし 160

M_{Fe} : 鉄の原子量、55.8

ρ_{Fe} : 鉄の密度、7.9 g/cm³

ρ_R : 錆層のみかけ密度、2.17 g/cm³—実測値

C_R : 錆層中の鉄錆含有率、0.74—実測値

Fig. 6 より配管口径がφ80 mm 以上において $R_d = 1$ であり土砂類の堆積が十分少ないことを示している。一方、配管口径がφ80 mm 以下では口径の減少に伴い R_d が急上昇し、土砂類の堆積が著しいことを示している。したがつて、Fig. 5 における堆積物厚さの配管口径依存性は錆以外の土砂が管内に残留した結果と見ることができる。そこで、土砂の残留挙動を流体力学的に検討し Fig. 7 に示す。図は圧力ヘッドおよび位置ヘッドが一

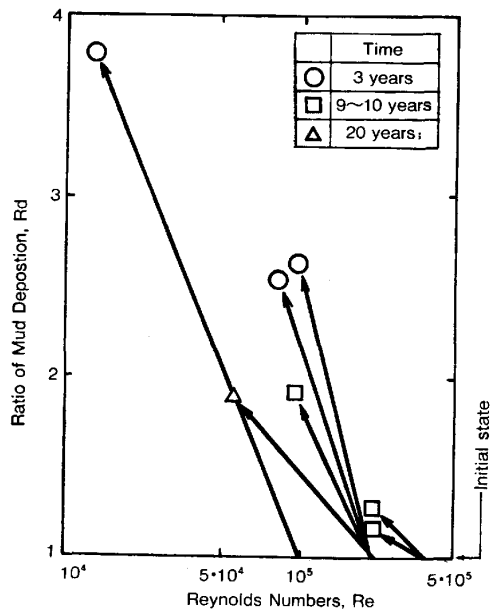


Fig. 7. Relationship between Reynolds number and ratio of mud deposition.

定である実機における管内のレイノルズ数 R_e と R_d の関係であり、使用前後の値を矢印で示した。図より当初のレイノルズ数 R_e が 10^5 の場合 (試料 No. M-6), 3 年間使用後 R_d は 3.8 に R_e 数は 10^4 (Table 4 より堆積厚さ 11.0 mm, ほぼ完全閉塞) となつている。一方, R_e 数が 2×10^5 以上では R_d の上昇および R_e 数の低下は共に許容される範囲にとどまつている。

以上より, 冷却水配管の閉塞挙動は配管口径が十分大きい場合錆こぶの生成によつてのみ決定され, 配管口径が小さい (レイノルズ数も小さい) 場合は上記のほかには使用水中の土砂含有量も考慮する必要がある。

4. 考 察

4.1 錆こぶ下腐食に対するバクテリアの関与

今までに述べた調査結果を要約すると以下となる。

- 使用水質は山間地の湧水に近似し, DO が少ない目である反面, NO_3^- , 全鉄, 全炭酸が多く存在する。
- 使用水中および錆こぶ中に多数のバクテリアと思われる物質が存在する。
- 錆こぶは主に三価の酸化鉄または水酸化鉄で構成され, Mn および S が高濃度に濃縮している。
- 錆こぶ下部分は活性溶解しており, その断面形状に著しい凹凸が見られる。
- 炭素鋼以外の配管材料には錆こぶの発生および腐食損傷が見られない。

ここで錆こぶの生成プロセスが十分理解されていない¹³⁾ことから, 上記 a)~e) の意味は十分明らかでない。

しかし, 従来から知られているバクテリアの繁殖と関連して考えると以下のように評価される。すなわち a) より, 全鉄, 全炭酸が多く DO の少ない塩素殺菌されていない水質は鉄バクテリアの繁殖条件に近似している^{13)~15)}。b) より, 従来は錆こぶ内部に *Gallionella* (茎状鉄バクテリア) あるいは *Sphaerotilus* (繊維鉄バクテリア) の存在する場合が知られている¹³⁾¹⁷⁾ のに対し, 今回は球状の鉄バクテリアが存在したと見なされる。c) より, 三価の水酸化鉄の存在は鉄バクテリアの代謝作用¹⁵⁾ ($\text{FeCO}_3 + 1/4\text{O}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeOOH} + \text{CO}_2$) で, また高濃度の S の存在は十分明らかでないが硫酸塩還元菌の存在によつて生ずる硫化鉄と思われる²²⁾。d) より, 錆こぶ下が活性溶解しているのはバクテリア (たとえば *Crenothrix*, *Leptothrix*¹³⁾) が直接鉄に作用するのではなく¹³⁾, 錆こぶ内外における通気差セル²⁾ として説明される。そして e) より炭素鋼配管にのみ錆こぶ下腐食が見られるのはその腐食作用が単純な通気差セルによつてのみ形成されていることを示している¹⁵⁾。

このように考えると本調査における錆こぶの生成にはバクテリア (おそらく鉄バクテリアの一種) が深く関与していると考えて間違いのないであろう。すなわち, 錆こぶが発生する条件の一つとしてバクテリアの繁殖を挙げべきであり, バクテリアの代謝物が錆こぶ発生核になりやすいと見るべきである。このように見るることによつて錆こぶ下腐食の地域依存性, 水質化学成分との相関性あるいは実験室でのビーカテストで錆こぶが再現しにくい等を説明することができる。

4.2 錆こぶ下腐食損傷および配管閉塞の防止方法

本調査結果で注目される点は錆こぶ下腐食および錆こぶの堆積に伴う経時変化である。すなわち Fig. 4 および Fig. 5 よりそれらの変化は短時間側で共に大きく, 10 年以上の長時間側で共に緩やかとなつている。これは腐食進行 (錆こぶの堆積) の駆動力が錆こぶ内外に形成されるマクロセルによつて決定され, 錆こぶ内部に蓄積された物質には依存しないためと考えられる。その結果, 錆こぶ発生当初のアノード/カソード面積比が小さい時点で高い腐食速度 (錆こぶの堆積速度) を示し, 錆こぶが互いに成長し合い一枚の錆層を形成するようになるとそれらの速度は低下するのであろう。

いずれにしても, 錆こぶ下腐食損傷を防止するには式 (1)~(3) を参考に配管の肉厚を決定することが望まれる。また配管の閉塞防止には式 (4)~(7) を参考に配管内径を決定することが望まれる。また Fig. 3 および Fig. 6 の意味するように配管内径の幾何形状や流体力学的依存性に対しても配慮が必要である。なお, 配管の

閉塞が問題でなければ(1)および(2)式の意味するところより錆こぶはむやみに除去しない方が貫通穴の発生防止上得策かも知れない。

また配管材料の選択に自由度があればステンレス鋼管、銅および銅合金管あるいはプラスチック管の使用が有効であることは言うまでもない。

5. 結 言

只見川および阿賀野川水系に位置する水力発電設備における冷却水配管の錆こぶ発生状況を調査した。その結果以下のことが明らかとなった。

- 1) 本水系における炭素鋼配管は他の水系に比べ錆こぶ下腐食が著しい。
- 2) 水質分析、錆こぶ構成物質の分析などを詳細に行った結果、錆こぶの発生は鉄バクテリアに起因するものと推定された。
- 3) 錆こぶ下腐食による局部腐食損傷および錆こぶの堆積に伴う配管の閉塞現象に対し 20 年にわたる定量的挙動が明らかとなった。
- 4) 冷却水配管の腐食損傷防止および閉塞防止の指針を示した。

文 献

- 1) T. E. LARSON and R. V. SKOLD: Corrosion, 14 (1958), p. 285
- 2) 高橋正雄, 増子 昇: 第 13 回腐食防食セミナーキスト (腐食防食協会編) (1975), p. 11
- 3) 正村克身, 松島 巖: 第 23 回腐食防食討論会講演要旨集 (腐食防食協会編) (1976), p. 47

- 4) 松島 巖, 酒井潤一, 正村克身: 1981 春期学術講演大会講演要旨集 (腐食防食協会編) (1981), p. 271
- 5) 栗栖孝雄, 久野忠一, 原田俊一: 1978 春期学術講演大会講演要旨集 (腐食防食協会編) (1978), p. 16
- 6) 松島 巖, 正村克身: 第 25 回腐食防食討論会講演要旨集 (腐食防食協会編) (1978), p. 104
- 7) 松島 巖: 1979 春期学術講演大会講演要旨集 (腐食防食協会編) (1979), p. 143
- 8) 藤井哲雄, 小玉俊明, 馬場晴雄: 防食技術, 31 (1982), p. 637
- 9) W. STRUMM: J. AWWA, 48 (1956), p. 300
- 10) 小玉俊明, 藤井哲雄: 防食技術, 26 (1977), p. 641
- 11) R. V. SKOLD and T. E. LARSON: Corrosion, 13 (1957), p. 139
- 12) 藤井哲雄: 防錆管理, 27 (1983) 3, p. 85
- 13) H. H. UHLIG: Corrosion Handbook (1948), p. 480 [John Wiley and Sons]
- 14) 下平三郎: 日本金属学会会報, 9 (1970) 3, p. 135
- 15) 下平三郎: 防食技術, 25 (1976), p. 627
- 16) 佐々木英次: 防食技術, 27 (1978), p. 37
- 17) J. D. A. MILLER: Microbial Aspects of Metallurgy (1971), p. 99 [Medical and Technical Publishing]
- 18) 井上真由美: 軽金属, 22 (1972), p. 529
- 19) 佐々木英次, 中原東郎: 防食技術, 26 (1977), p. 77
- 20) R. A. KING and J. D. A. MILLER: Br. Corros. J., 8 (1973), p. 137
- 21) 石川雄一, 尾崎敏範, 保坂信義, 西田 脩: 防食技術, 29 (1980), p. 502
- 22) R. N. PARKINS: Corrosion Process (1982), p. 130 [Applied Science Publishers]