

新枯渚発電所水圧鉄管の微生物腐食事象と対策

和泉 満^{*1} 宮腰 幸治^{*2} 長谷 清二^{*2}

1. はじめに

新枯渚発電所は、二級河川大聖寺川の上流域に位置し、平成18年3月に運転を開始したダム式の発電所である（第1図）。

大聖寺川は、都市部を貫流していることと、下流部ではたびたび洪水被害に見舞われていたことから、治水安全度をさらに高めるために、石川県営の九谷ダム（多目的ダム）が建設された。当発電所は、この九谷ダムを取水口とし、有効落差54.7m、最大使用水量8.00 m³/s、最大出力3,600kWの発電を行うもので、石川県が建設を行い平成22年4月に北陸電力㈱が譲り受けた。

水圧鉄管の腐食は、運転開始から約2年半後の平成20年11月の抜水点検時に石川県により発見されたもので、現地での観察状況から、「微生物による腐食」と推測された。

なお、水圧鉄管の材質はステンレスクラッド鋼（SM400A t=6mm, SUS304 t=2.5mm）である。

今回、現地での浸漬試験結果等から微生物の活動による腐食（以下、「微生物腐食」という）であることを明らかにし、「なぜ現地溶接部が優先して腐食したのか」について検討を行った。その後、腐食防止策を立案し施工が完了したので、以下に概要を報告する。

2. 微生物腐食とは^{1) 2) 3)}

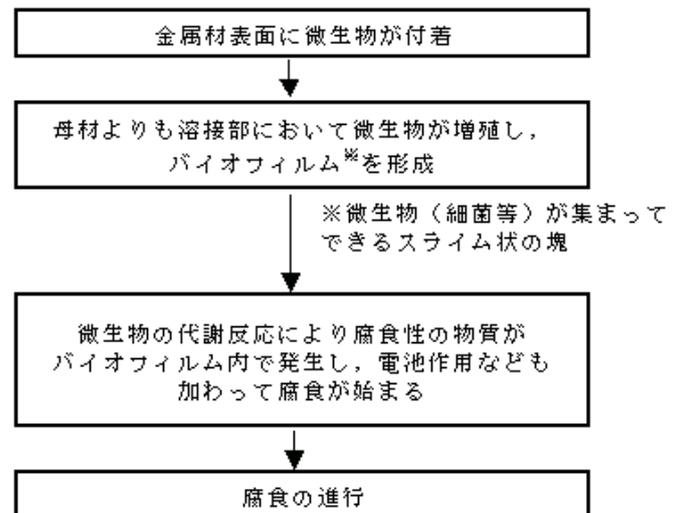
ステンレス鋼の腐食の形態としては、孔食、すき間腐食、粒界腐食、異種金属接触腐食、応力腐食割れに伴う腐食、微生物腐食の6種類がある。

これらのうち、微生物腐食とは、自然環境中の生態系を構成する微生物の活動により、直接的あるいは間接的に誘起される材料の腐食劣化現象である。

微生物腐食のメカニズムの概要を第2図に示す。微生物腐食は、炭素鋼、ステンレス鋼、鋳鉄、銅合金、アルミニウム合金等において発生した例が報告されている。特に海水中で多く報告されて



第1図 ダム位置図



第2図 微生物腐食のメカニズムの概要

いるが、淡水中での微生物腐食の事例として公表されているものは、当発電所の例も含め非常に少ない。

微生物腐食の特徴としては、以下のものが挙げられる。

- ① 母材よりも溶接部や熱影響部の方が激しく腐食する。
- ② 腐食形状は、インク壺型で入口が小さく、内部に進むにつれて広がる。
- ③ 低流速または間欠的な流速の条件で腐食

*1 土木部 水力学水土木チーム

*2 石川支店 技術部 土木建築チーム

が発生するが多い。

- ④ ステンレス鋼で腐食の進行が早く、溶接部では 18~30 mm/年に及ぶとの報告もある。

なお、鋼を腐食させる微生物の例としては、硫酸塩還元菌、鉄細菌、硫黄酸化細菌、鉄酸化細菌などがある。



第4図 内面腐食状況



第5図 浸透深傷試験状況

3. 微生物腐食状況

平成 22 年 10 月(1 日間)及び平成 23 年 11 月(2 日間)に水圧鉄管内を抜水し、腐食状況の調査を行った。抜水期間は発電所下流域の流量確保の問題があり、短い期間となった。鉄管内は全面にヘドロが付着していたが、作業時間の関係から、目視で錆が確認された箇所について高圧水による洗浄を行い腐食状況を確認した。目視で錆(以下、「腐食生成物」という)が確認された箇所は、現場円周溶接継手(13 継手, ③~⑮)と放流設備の母材(4 箇所)であった(第3図, 第4図)。

なお、現場円周溶接継手①, ②は、足場の設置が必要であったため確認することができなかった。

腐食生成物を除去しても、肉眼で直接孔食を確認できないものについては、浸透探傷試験を行い孔があることを確認した(第5図)。大きな孔食が確認された箇所でピン(φ0.5 mm)を挿入して深さを確認したところ 4.5 mm であった(第6図)。腐食生成物は、現場溶接継手の下流側でビード上及び熱影響部に多く発生していた。



第6図 孔食深さ確認状況

4. 腐食原因の推定

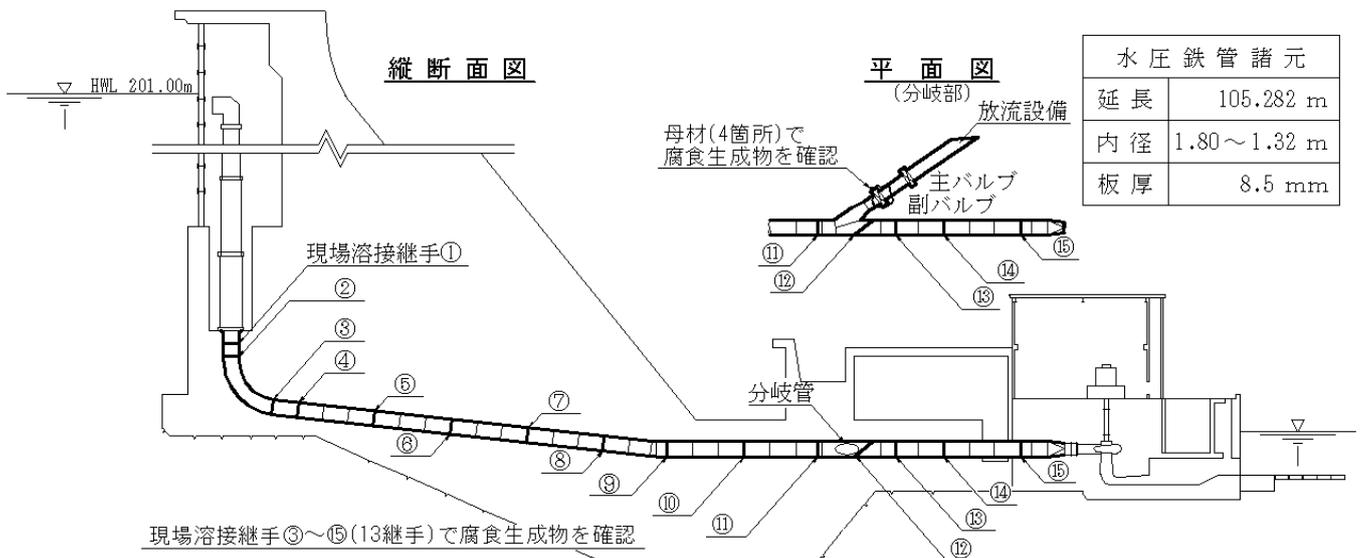
現場溶接継手(以下、「現場溶接部」という)が優先して腐食していることに着目し、腐食の原因として、建設時の施工不良に関するもの、微生物に関するものの両面から以下のように調査した。

(1) 現場溶接部の耐食性調査

当水圧鉄管の使用材料がステンレスクラッド鋼であることから、施工時の溶接部の品質を確認する目的で、硫酸銅試験及び不動態皮膜判別試験を平成 22 年 10 月に実施した。

a. 硫酸銅試験

硫酸銅試験は、溶接部における炭素鋼の露出度



第3図 水圧鉄管の微生物腐食状況図

や炭素鋼母材の高希釈によるクロム濃度の低下部の有無を確認するもので、現場溶接部 1 円周、工場溶接部 3m について実施した。

腐食生成物を、スクレーパ及びステンレス鋼ワイヤブラシで除去し試験した結果、腐食生成物の付着部は鉄分反応が確認されたが、他の箇所での鉄分反応はなく良好であった。

b. 不動態皮膜判別試験

ステンレス鋼に含まれるクロムが酸素と結びついて表面の耐食性を保つための薄い膜を不動態皮膜といい、健全な不動態皮膜が形成されているかを確認するため、現場溶接部 2 円周について不動態判別器を用いて試験した。溶接ビート上は凹凸があり試験できなかったが、母材の溶接熱影響部では、健全な不動態皮膜が形成されていることを確認した。

c. 評価

硫酸銅試験及び不動態皮膜判別試験の結果から、今回の腐食は建設時の施工不良に起因するものではないと判断した。

(2) 微生物の調査

腐食に関与すると考えられる微生物が存在する可能性の有無と、腐食生成物内に微生物に由来する元素の有無を確認する目的で、微生物分析及び EDX 分析（エネルギー分散型 X 線分光法）を実施した。なお、分析用の試料は、平成 22 年 10 月に採取した。

a. 微生物分析

水圧鉄管内部で採取したヘドロ、腐食生成物及び発電所の放水路から採取した環境水の 3 つの試料について、腐食に関与しない一般細菌を含めた全細菌数と腐食に関与すると考えられる微生物の存在の可能性を調査した（第 1 表）。

調査した結果では、腐食生成物に好気性細菌である鉄細菌が存在し、腐食の進行に関与しているものと想定した。

また、ヘドロと環境水には嫌気性細菌である硫酸塩還元菌が存在し、腐食部位が嫌気性雰囲気となれば、硫酸塩還元菌によって腐食反応が更に促進するものと推察した。

b. EDX 分析

腐食生成物について、EDX を用いて構成元素の種類と存在比率を分析した（第 2 表）。

第 1 表 各試料の微生物分析結果 （単位：個/g）

項目	全細菌数 (個/g)	硫酸塩還元菌	鉄細菌	硫黄酸化細菌
ヘドロ	5.3×10^9	2.1×10^5	9.1×10^5	—
腐食生成物	4.8×10^9	—	5.7×10^4	—
環境水	8.9×10^5	4.6×10^4	1.8×10^4	4×10^3

第 2 表 腐食生成物の EDX 分析結果

構成元素	質量 (%)	構成元素	質量 (%)
C (炭素)	11.9	S (硫黄)	0.8
O (酸素)	39.7	Cl (塩素)	0.2
Al (アルミニウム)	0.4	Cr (クロム)	2.4
Si (ケイ素)	1.9	Fe (鉄)	42.7

調査した結果、S や Si は SUS304 の母材ではそれぞれ 0.03% 以下、1.0% 以下が含まれているが、腐食生成物には S が 0.8%、Si が 1.9% と多く含まれており、これらは微生物の活動に由来するものであると推察した。

c. 評価

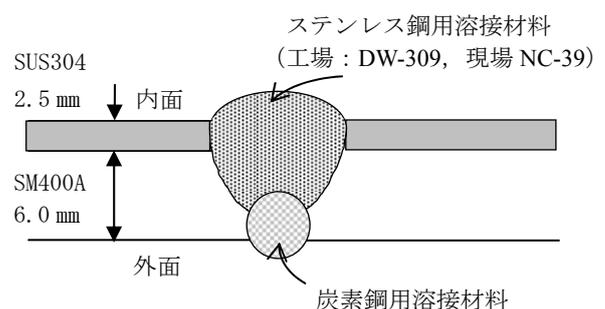
微生物分析結果及び EDX 分析結果を踏まえ、現地の腐食の状況や過去の同様の事象を総合的に勘案し、微生物による腐食の可能性が高いと判断した。

5. 現場溶接部が優先して腐食した原因の究明

ステンレスクラッド鋼が腐食した原因として、微生物による可能性が高いと判断したが、腐食防止案を立案するうえで、現場溶接部が優先して腐食した原因を解明しておく必要があった。このため、建設当時の溶接方法、不動態化処理の状況を施工メーカーから聞き取りするとともに、現地での浸漬試験を行い、原因を究明した。

(1) 建設当時の溶接方法

建設当時は、工場溶接及び現場溶接とも、内面からステンレス用溶接棒で溶接をしたのち外面からガウジングを行い炭素鋼用溶接棒で溶接していた（第 7 図）。



第 7 図 溶接部断面図

また、溶接方法としては、工場は半自動溶接で現場は手溶接であり、ステンレス鋼用溶接材料が異なることから、現場の溶接材料の方が炭素(C)量が多く、母材と比較しても約6倍程度多く含まれていることが判明した(第3表)。

第3表 溶接棒と母材の化学成分の比較

項目	化学成分(%)					
	C	Si	P	S	Ni	Cr
工場(DW-309)	0.035	0.58	0.021	0.009	12.48	20.43
現場(NC-39)	0.08	0.53	0.02	0.03	12.72	23.97
母材(SUS304)	0.013	0.45	0.018	0.001	9.1	18.19

()内は材料を示す。

一般にステンレス鋼では、CとCrが結合しCr炭化物を形成し、耐食性を低下させるとされており、C量の違いが今回の腐食原因の一つと想定した。また、現場溶接部は工場溶接部よりもビードの余盛高さが高く、かつ凹凸が激しいことから微生物が付着しやすかったことも考えられた。

(2) 建設当時の現場での不動態化処理の状況

現場溶接部の不動態化処理の方法は、簡易的な酸洗いで処理を行っており、ビード凹凸部は不動態化処理の程度が工場溶接部と比較すると劣っていた可能性があることが判明した。

(3) 現場での浸漬試験

建設当時の溶接方法や不動態化処理の状況の調査結果から、溶接材料の違い、表面の凹凸の違い、不動態化処理の程度の差によるものが原因であると推定されたため、微生物腐食の再現と補修工法を検討する目的で、8種類の試験片を製作(第4表)し、ダムと放水路の2箇所での浸漬試験を行った。

試験片No.1~4は建設時の溶接材料を使用し、

第4表 試験片に使用する溶接材料、表面仕上げの内容

No.	溶接材料	説明	グラインダー仕上げ	不動態化処理
1	NC-39	建設時の現地溶接材料で手溶接(横向)したもの	無	有
2			有	有
3			無	無
4	DW-309	建設時の工場溶接材料で自動溶接(下向)したもの	無	有
5	NC-39L	今回使用を予定している溶接材料(ローカーボン)で手溶接(横向)したもの	無	有
6			有	有
7	NC-39+NC-39L	建設時の溶接材料で溶接後、その溶接部について、グラインダーで開口部を設け、アーク溶接(下向)したもの	有	有
8	NC-39+TG-S309L相当	建設時の溶接材料で溶接後、その溶接部について、グラインダーで開口部を設け、TIG溶接(下向)したもの	有	有

不動態化処理の有無と表面凹凸除去(グラインダー仕上げ)の有無を組み合わせ、施工条件による比較を行うものとした。試験片No.5~8は、ローカーボン仕様の溶接棒を使用し、補修工法を想定した状態で比較を行うこととした。

浸漬期間は、平成23年4月28日~平成24年5月11日までの約1年間とした。試験片浸漬前の状況を第8図に示す。



第8図 試験片浸漬前の状況(試験片16枚)



第9図 試験片引き上げ時の状況
(平成24年5月:取水口)

平成24年5月11日に試験片を引き上げ、ヘドロ等を除去し目視で確認したところ、錆と想定される部位が発見された。(第9図)

このため、走査型電子顕微鏡(SEM)及び反射電子像(BSE)観察を行った結果、微生物の痕跡と推定されるコロニーと腐食痕を発見した。

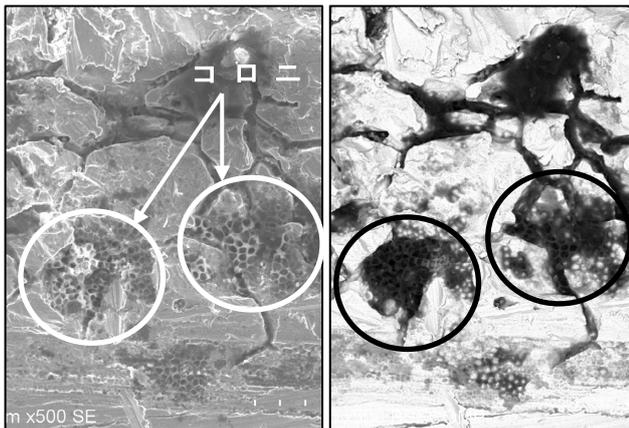
第10図は、SEMで倍率が500倍のものであり、写真中央の格子状の部分がコロニーである。このような格子状の部分は、一般的な鋼材の腐食状態からも観察されることから、更にBSE観察により生物であるかどうかを判別した。BSEは、原素の重さで白と黒のコントラストを表示するもので、重いものは白く、軽いもの(生物等)は黒く見える。第11図では、第10図の中央にある

格子状の部分が黒くなっており、生物等の存在があると推察されたため、最終的にコロニーであると判断した。

16個の試験片全てを観察した結果、コロニーと想定されるものが2箇所確認された。また、全ての試験片において、グラインダー溝や溶接金属部のリップル線に沿って腐食痕を確認した（第12図）。

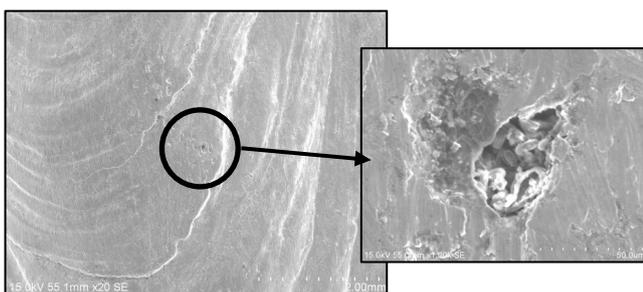
第12図の腐食痕の中に見えるのは、珪藻であり今回の腐食に影響を及ぼすような微生物ではない。

今回の試験結果では、微生物腐食であることを明らかにすることができたが、溶接棒の種類、不動態化処理の程度、表面凹凸除去の有無の条件での腐食の差については、明確にならなかった。



第10図 SEM観察結果
(放水路: No.8)

第11図 BSE観察結果
(放水路: No.8)



第12図 SEM観察結果 (放水路: No.3)

(4) 腐食原因の推察

上記(1)~(3)を踏まえ、現場溶接部が優先して腐食した原因として、以下の4項目が複合して生じたものと推察した。

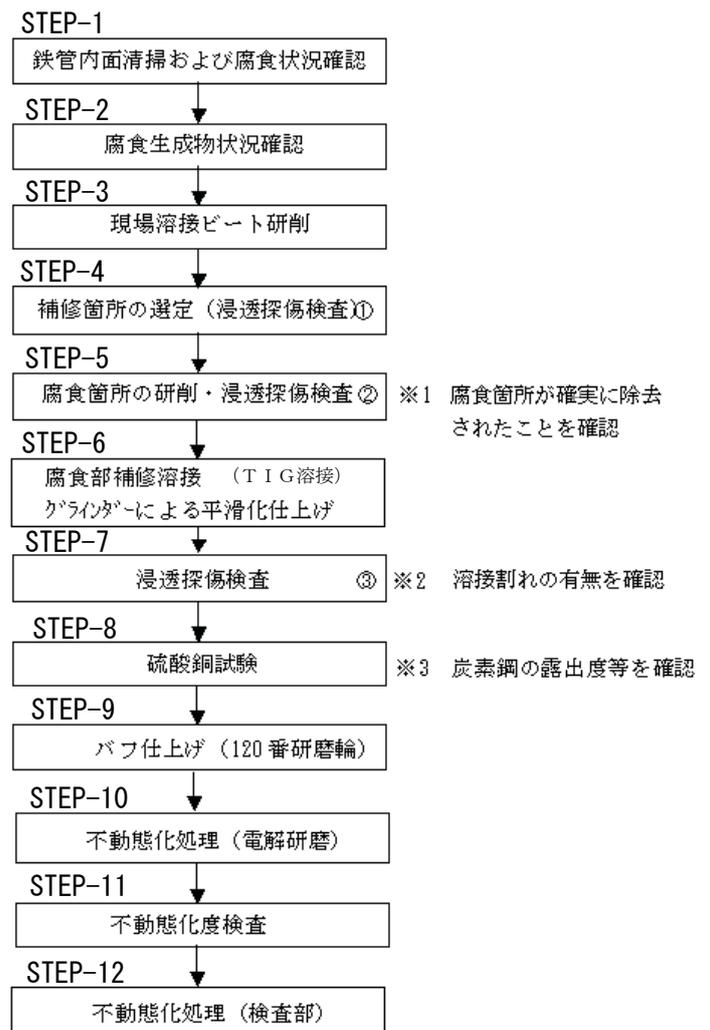
なお、母材(4箇所)で発見された箇所については、もらい錆や施工中の工具落下の衝撃等による個別の要因によって、その箇所だけの耐食性が劣

っていたものと判断した。

- ①環境水のなかに硫酸塩還元菌が存在していた。
- ②溶接ビードの形状効果により微生物が付着しやすかった。
- ③現場の溶接棒のC量が多く、耐食性を低下させていた。
- ④現場溶接部の不動態化処理は工場よりも簡易な方法で施工したため、耐食性が工場溶接部よりも劣っていた。

6. 腐食防止対策の立案

微生物腐食対策として決定的な防止技術はまだ確立されていないが、腐食原因の推察を踏まえ、文献^{1) 2) 3) 4)}の調査結果等から当地点に有効となる対策を抽出し、具体的な施工手順を策定した（第5表、第13図）。



第13図 施工手順

第5表 腐食防止対策の検討内容

項目	内 容	当地点への適用の可否	
微生物の作用を軽減	金属溶解のアノードとカソードによる腐食電池を形成している場合、外部からアノードへ電流を印加し、電池作用を消滅	×	研究段階であり適用不可
微生物の活性を抑制	インヒビター（防食剤）、バイオサイト（殺菌剤）を添加し、微生物付着を防止	×	環境水全体を処理する必要があるため適用困難
微生物の材料への接触を軽減	塗装、メッキ溶射などにより微生物腐食を防止	×	塗装施工確認試験結果※及びすきま腐食が懸念されたため適用不可
	表面酸化皮膜中のCrの濃化（電解研磨）により耐食性を向上	○	不動態化処理を確実に実施
	裏面の平滑化により微生物付着を防止	○	ビードの余盛り高さを削りとり、パフ仕上げ（120番研磨輪）を実施（施工確認試験で仕上げ粗さを決定した。）

※クリヤラッカーを塗布し浸漬試験を行ったが表面に凹みができ、微生物がより付着しやすい状況となった。

腐食防止策の立案に際しては、現場溶接部の全てを対象としたが、母材全体や工場溶接部についても電解研磨やビード表面の平滑化を行うことも考えられた。しかし、現時点で腐食が生じてない箇所は、既に十分な耐食性を有していると判断し、母材全体や工場溶接部については、現時点で腐食を生じている部分のみを対象とした。

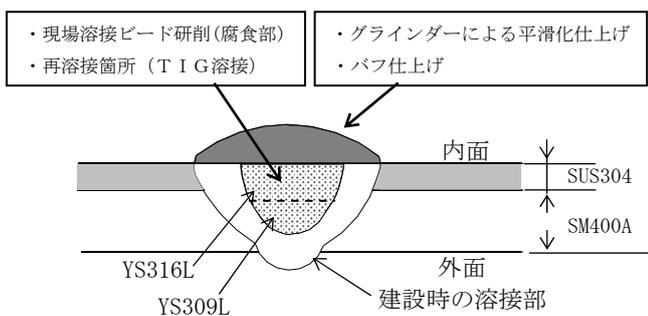
補修方法としては、腐食部をグラインダーで完全に削りとり、SM400Aの溶接部分はYS309Lを用い、SUS304の溶接部分はYS316Lのローカーボンのステンレス鋼用溶接棒で再溶接することを基本としている（第14図）。

したが、作業員を増員することでこれらも含めて本断水期間内で施工した。

STEP-5では、グラインダーで腐食箇所を除去したが、管内面から管外面へ向かって腐食が広がっていく、微生物腐食特有のインク壺型の腐食状況も確認された(第15図)。

また、腐食が既に管外面まで貫通している箇所が6箇所あり、管外面の浸透水が管内面ににじみ出るものがあった。これらについては、管内面からコーキングによる止水を行い溶接した。

STEP-10の不動態化処理時の状況を第16図に示す。



第14図 補修要領図



第15図 腐食状況
(腐食部除去中)



第16図 不動態化処理
(電解研磨)の状況

7. 対策工事の実施

断水期間は、平成24年11月1日から12月7日までの37日間とし、第13図の施工手順に基づき施工した。

STEP-1の全管高圧水洗浄後の腐食状況の確認では、現場継手①、②は当初の想定どおり腐食を確認した。また、工場溶接部で10箇所（円周継手6箇所、縦継手4箇所）に新たな腐食を発見

8. おわりに

対策工事において、新たに工場溶接部に腐食が確認されたことから、今後もこれらの箇所で耐食性の劣化箇所があれば、腐食を生じる可能性があり得ると想定される。

このため、今後も定期的に内部点検を行い、腐食状況に応じて対策を検討することとした。

「微生物腐食である」と判定する手法は確立されていないが、腐食生成物のEDX分析、環境水の微生物分析、現地腐食状況の3つにより、微生物

物腐食かどうかを推定できると考える。微生物腐食対策としては、ローカーボンの溶接材料の使用、溶接部のパフ仕上げ、電解研磨の確実な実施が有効である。また、ステンレス鋼を使用する場合は、建設段階で環境水の微生物分析を行うことも必要であると考ええる。水力発電所の水圧鉄管としては希な事象ではあるが、ステンレス鋼を使用している構造物の同様な事象の参考になれば幸いである。

謝 辞

今回の微生物腐食の対応にあたり、ご指導、ご助言をいただいた大阪大学 菊地靖志名誉教授、大阪市立大学 佐藤嘉洋教授、川上洋司准教授ならびに富山県工業技術センター 富田正吾氏、氷見清和氏、また現地での試験や施工に際しご協力をいただいた石川県土木部、加賀市上下水道部、北電技術コンサルタント(株)、佐藤鉄工(株)、萩浦工業(株)、豊国工業(株)、(株)コベルコ科研の関係各位に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤嘉洋・菊地靖志：微生物による溶接部の腐食とその対策，溶接技術，2009年11月号，pp. 112-118
- 2) 宮野泰征・菊地靖志：微生物による溶接部と金属材料の腐食劣化，溶接学会誌 第77巻(2008)第7号，pp. 22-28
- 3) 菊地靖志：金属材料溶接・接合部の微生物誘起腐食・劣化現象，溶接技術，1999年7月号，pp. 119-126
- 4) 西尾純一・東茂樹・幸英昭：現地施工におけるステンレス配管の微生物腐食対策，第164回腐食防食シンポジウム資料，平成20年12月，pp. 30-37