

「電食防止対策の手びき」とエロージョン-コロージョン

松村 昌信
広島大学 名誉教授

1. はじめに

中国電食防止対策委員会は、昭和 37 年（1962 年）、国鉄山陽本線の直流電化完成を機会に地下埋設物に対する電食障害を防止するために発足した。昭和 47 年（1972 年）、委員会発足 10 周年記念事業として、電食防止の基礎知識、事務手続のほか、中国地方の代表地下埋設物として電力、通信、水道、化学に関する電食防止対策の実例を詳細に盛り込んだ「電食防止対策の手びき」（初版）¹⁾が刊行された。

平成 16 年（2004 年）8 月、関西電力美浜原子力発電所 3 号機二次系配管破損事故が発生した（図 1）。同年 10 月、日本原子力安全・保安院の審議官はこの事故に関して次のような見解を発表した。『事故のあった配管の破損メカニズムについては、いわゆるエロージョン/コロージョンによって配管の肉厚が徐々に減少し

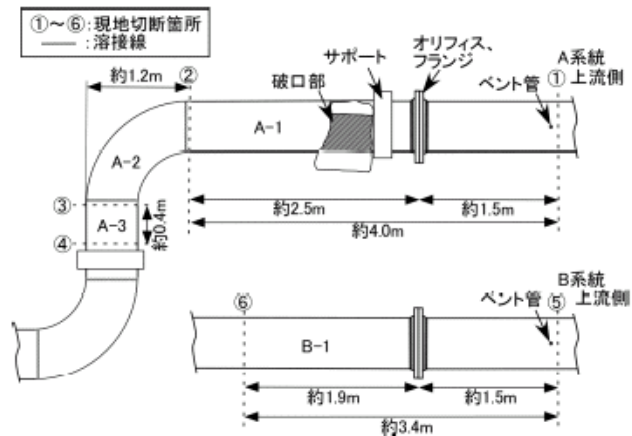


図 1 美浜事例における配管概略図

た結果、配管の強度が不足したものであり、これまでの経験の範囲内のものである。事故の直接的原因は、関連 3 社が関与する二次系配管の減肉管理ミスである』。

ところが、同院に設けられた事故調査委員会の最終報告書（平成 17 年（2005 年）3 月）には「いわゆるエロージョン/コロージョン」は無くなっていた²⁾。

2. 配管の減肉管理

2.1 サリー事故

審議官の見解にあった『これまでの経験』とはサリー事故のことであり、美浜事故は第二のサリー事故ではないかと当初から関係技術者の間では考えられていた。サリー事故とは、1986年12月に米国バージニア州のサリー原子力発電所2号

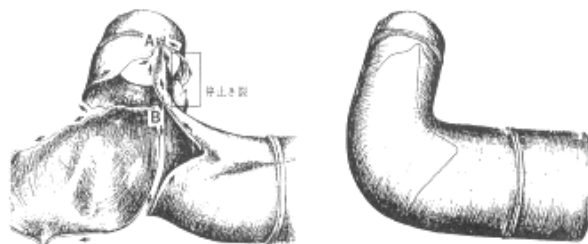


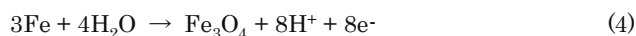
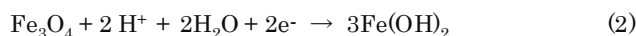
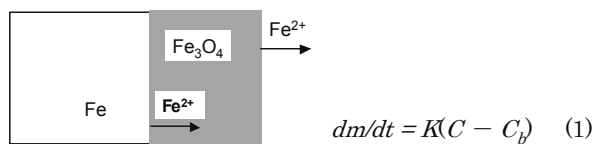
図2 サリー事故におけるエルボの破損状態

炉給水系において、193°Cの熱水を輸送する口径18 in(457 mm)のエルボに360度の全周破断が起きて、4名の犠牲者を出した事故のことである(図2)。この事故の主因は、エロージョン-コロージョンにより当該エルボに発生した著しい減肉であると断定された³⁾。美浜事故における配管材料、環境条件、流動条件、減肉の状況および偶発性(同じ条件下で並列運転されていた2系列の内、片方のみ局部的な減肉が生じて破裂した)は、サリー原発のケースに酷似しているため、二つの事故は同一の原因で生じたと考えるのは当然であろう。

一般にエロージョン-コロージョンは、金属材料表面の保護性酸化皮膜が流れのせん断力によって剥離されて起きると考えられている。しかし、この機構説明では、同じ条件下で運転されていた2系列の内片方のみ破裂に至る著しい減肉が生じた理由は説明できない。

2.2 EPRIのFACモデル

このサリー事故の原因究明と対策の立案には、米国の電力研究所EPRI(Electric Power Research Institute)が当たった。その経過は文献^{4,5)}に詳しく述べられている。EPRIはEDF(Electricité de France、フランス電力公社)の協力の下に原因究明を行ったが、減肉が発生する原因や、それが進展するプロセスは解明できなかった。そこで、『非破壊検査によって早期に減肉を検出し、補修または取替えする』という対策の基本方針を立てた。しかし、検査対象箇



$$\text{CR} = F_1(\text{T}) \cdot F_2(\text{AC}) \cdot F_3(\text{MT}) \cdot F_4(\text{O}_2) \cdot F_5(\text{pH}) \cdot F_6(\text{G}) \cdot F_7(\alpha) \quad (5)$$

図3 EPRI・EDFによるFACの機構説明

所は原子力発電設備 1 基当たり数万箇所もあって到底全部を検査することは出来ない。そこで検査対象範囲を絞ることにした。具体的には、

①減肉発生機構として、炭素鋼鋼管内壁表面のマグネタイト層の物理的溶解から出発した全面均一腐食のモデル、すなわち FAC (Flow Accelerated Corrosion, 図 3) を考える。

② このモデルに関与する多数のパラメータの関数として減肉速度の推算式を立てる (図 3 の(5)式)。

③ 推算式の中の係数を、米英仏の殆どの発電所から集めた多数のデータのフィッティングによって決定する。

④ 完成した推算式に基づいて減肉速度の高い場所を特定し、その場所については頻繁に非破壊検査を行い、検出した減肉箇所の補修・取替えを行う。減肉速度の遅い場所については検査間隔を広げ、あるいは検査対象範囲から外す。

この検査対象範囲の限定こそが“減肉管理”である。

2.3 EPRI・EDF の推算式の問題点

図 4 には EPRI・EDF の減肉速度推算式 ((5)式) の精度が示されている。縦軸が推算値、横軸が実測値である。左図は減肉速度の計算値と実験室のデータを比較したもの、右図は減肉深さについて現場のデータと比較したものである。この現場のデータで、推算式を利用するとどの程度の非破壊検査の省力化

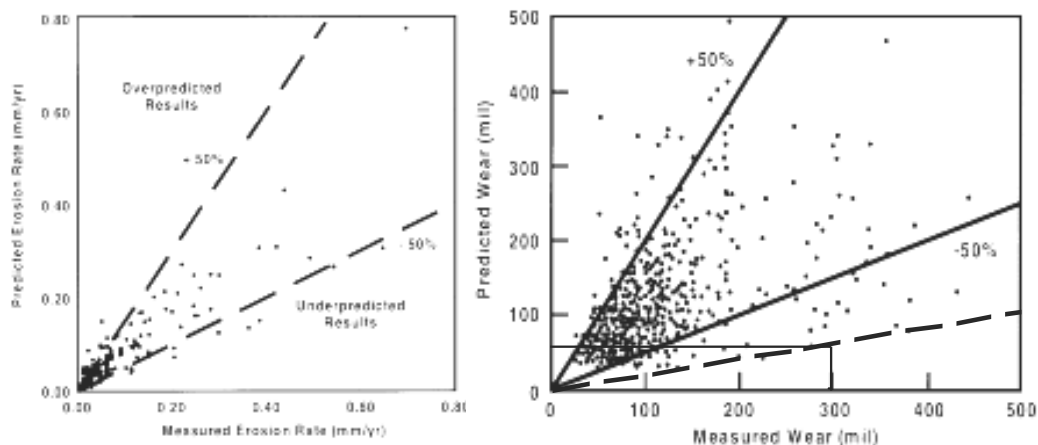


図 4 FAC プログラムの減肉深さ予測の精度

が出来たのか検討してみよう。

事故発生に繋がる危険なケースは、予測値より現場の減肉深さが深かった場合である。そこで予測を最も大きく上回ったところに線を引くと破線のようになる。さて、いま 300 mil (7.5 mm) より深い減肉があると予測された箇所を非破壊検査すると設定したとき、検査しなければならない範囲は同図によると予測値 60 mil 以上の点である (60 mil と予測しても実際は 300 mil も減肉が

進んでいる可能性があるので、確実に異常減肉を検出するためには 60 mil 以上と予測された範囲は全て検査する必要がある)。すると検査が不要とされる箇所は細線に囲まれた範囲内の点となり、結局のところ省力できるのはたった 10% 程度に過ぎない。

この低い省力化能力について EPRI・EDF は、データ数が増しさえすれば予測値と実測値の関係は同図の 45 度の線上に収斂し、正確な予測が可能になり、高い省力化が達成できると考えていたようである。なぜなら、この減肉予測プログラムを世界中の火力・原子力発電所に高額で販売するとき、その発電所で測定した配管の減肉データを EPRI・EDF へフィードバックすることを義務付けたからである。しかし、1987 年にこのプログラムが発売されて以来、現在でもこの各発電所からのフィードバックが続けられていることから推察すると、データは未だ収斂せず、推算式 ((5)式) は完成していないようである。

もし、上記の想像が当たっているなら、当時の美浜発電所でも膨大な数の肉厚検査を強いられていたに違いない。実際に数万箇所もの検査箇所があったのでは、その内の数箇所の見落としが起きたとしても、これを一方的に検査を行う側のミスであると責めることは出来ないように思える。つまり、先の事故報告書の結論を『減肉検査にミスがあった』と解釈するのは検査を行う側に対して酷であり、むしろ『拙劣な減肉管理法のミス』と解釈する方が納得し易い。

また、先の調査委員会は最終報告書で『事故再発防止のためには、品質保証システムや保守管理面から過誤防止策を考えるべきである』と述べているが、この種の管理にはどうしても過誤が起きるものと考えられるべきではないか。つまり、万一過誤が生じて、少なくとも大事故には繋がらないようにする方策を考えるべきであろう。

3. 「電食防止対策の手びき」とマクロセル腐食

3.1 ミクロセル腐食とマクロセル腐食

図 5 は「電食防止対策の手びき」の第 5 版（以降は「手びき」と略称）に載っている、埋設金属体の腐食分類である。この分類で注目すべきは、自然腐食をミクロセル腐食とマクロセル腐食に分類していることである。これは他書に比べて

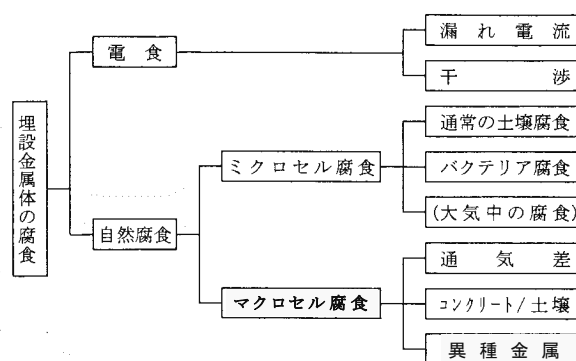


図 5 「電食防止対策の手びき」の腐食分類

珍しい。腐食の教科書の殆どは、自然腐食を全面均一腐食と局部腐食に分けている。全面均一腐食、局部腐食は外見上、あるいは見かけに基づく名称であり、これに対してマイクロセル腐食、マクロセル腐食は腐食の発生機構に基づく名称である。つまり「手びき」では、全面均一腐食＝マイクロセル腐食、局部腐食＝マクロセル腐食、と明確に定義しているのであって、この「手びき」はレベルの高い腐食専門家の手によるものであることが読み取れる。

3.2 マクロセル腐食の特徴

図6（「手びき」の図3.10, p.53）にはマクロセル腐食の特徴が端的に要約されている。特徴の第一は、マクロセルは諸条件に差異があるところに形成され

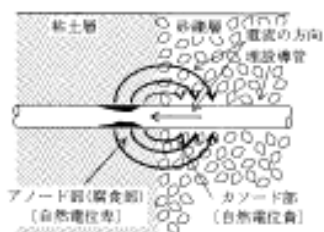


図3. 11 異種土壌による
通気差マクロセル腐食

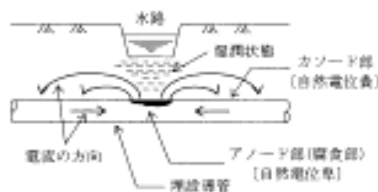


図3. 12 湿潤状態の差による
通気差マクロセル腐食

②異種金属マクロセル腐食

異なる2種の金属体が土壤中で電的に接続すると、各々の金属体の自然電位の差によりマクロセルが形成され、自然電位の卑な金属体がアノードとなり腐食する。

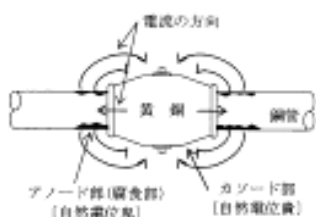


図3. 13 黄銅と鋼による異種
金属マクロセル腐食

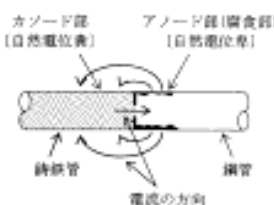


図3. 14 鋳鉄と鋼による異種
金属マクロセル腐食

図6 「電食防止対策の手びき」のマクロセル腐食の分類

ることである。その条件として、配管が置かれた環境条件（土壌とコンクリート、異種の土壌によって生じる通気の違いや湿潤状態の違い）と配管材料条件（黄銅と鋼、鋳鉄と鋼などの異種金属の接触）が例として挙げてある。

特徴の第二は、マクロセルが形成されるとき、これらの差異の境界を横断して管壁中をマクロセル電流が流れることである。

3.3 「電食防止対策の手びき」に従った事故再発防止対策

「手びき」は、①サリー事故や美浜事故の直接原因となった管壁の減肉はマクロセル腐食である、②マクロセルは「差異」のあるところに形成される、③形成に伴ってマクロセル電流が流れる、と教えている。この教えに従えばエロージョン-コロージョン事故への対策は、次に述べるように従来の対策の3倍に強化される。

強化策の第一は、マクロセルの形成防止である。これは配管系から差異を排除することによって達成される。例えば、配管の断熱・保温を厳重にして、配管サポートの付け根付近とその周囲との間に管壁温度の差異が生じることを避ける。

第二は、マクロセル電流のモニタリングである。マクロセル電流が検出されればその付近にマクロセルが形成されていることが検知できる。

第三は、減肉管理の改善である。局部腐食モデルに基づいて、管壁の温度差、管内壁表面上の流速差、管材に含まれる合金分量の差をパラメータに用いた精度の高い減肉速度予測式によって点検箇所を減少させ、検査漏れが起きないようにする。

4. おわりに

「電食防止対策の手びき」は電食の防止対策ばかりでなく、エロージョン-コロージョンの防止対策にも極めて有用である。

なお、美浜原発では平成18年末から発災部の配管をステンレス製に替えて運転を再開したが、これは「手びき」が諫めている配管系に異種材料を持ち込むことに他ならない。いずれ第三のサリー事故が起きるのではないかと強く危惧される。

参考文献

- 1) 「電食防止対策の手びき」(初版)、中国電食防止対策委員会、昭和47年
- 2) <http://www.nisa.meti.go.jp/>
- 3) 宮園昭八郎、植田脩三、柴田勝之、磯崎敏邦、鬼沢邦雄、中城憲行、栗原良一、橋口一生、加藤 潔、日本原子力学会誌、Vol.29, No.11, pp. 952-969(1987)
- 4) “Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants”, EPRI & EDF (1996).
- 5) “The ASME Handbook on Water Technology for Thermal Power systems”, P. Cohen Ed., Sponsored by The ASME R & T Committee. EPRI RESEARCH PROJECT NO.RP 1958-1.