

事例解析：高温純水中の炭素鋼鋼管壁に生じた異常減肉（1）

松村昌信（広島大学 名誉教授）

1. 緒言

生産現場において腐食が原因で発生した事故・事例は、腐食の研究者に貴重な情報を与えてくれる。これらの情報は、現場の条件を模擬した実験室の加速試験装置ではどうしても得られない、実機条件下の実時間によるデータである。しかし、事故・事例の詳しいデータが、事故の当事者から第三者に相当する腐食研究者に渡されることは稀である。事故は企業にとって負の方向の事象であり、その目的にも反する。企業秘密が絡むこともある。特に公共事業にとっては決して起きてはならないはずのことであり、その詳細が積極的に公表されることはほとんどない。

一方、企業はもちろん、公共事業者には監督官庁へ事故の顛末を報告する義務がある。報告を受けた官庁およびその周辺は、それを同類の事故の再発防止に役立てる。本誌の36巻（1999）に掲載された、柳田省三・小林英男の両氏による技術論文“圧力設備（配管）のエロージョン/コロージョンの損傷事例と腐食速度の解析”¹⁾はこの目的で書かれたものであろう。

本稿の著者は、この技術論文が公表された前後に、故柳田省三氏から記事の内容についてコメントを求められたが、当時は経験および情報不足のために十分な意見を述べる事ができなかった。ところが最近の数年間に、同じ原因によると見られる重大な事故が引き続いて発生し、公的機関に

よる詳細な事故調査結果がインターネット上に公表され、この種の腐食現象について多くの新たな情報が得られた。それに基づいてこの事故の発生経過を検討したところ、上記の論文に引用された事例のうちの数件との間に多くの共通点が認められ、これらの事例を相互に比較しながら検討すると、事故の原因究明や再発防止対策について有益な成果が得られると強く感じられた。

そこで先の技術論文に取り上げられた事例のうちの、一つの当事者企業に協力を求め、その事例に関してできる限りのデータの提供と、企業名を秘す条件で解析結果を公表する許可を得た。さらに、筆者らが以前行った実験室の加速試験機による実験結果も加えて、この種の異常減肉に対する今後の対策について検討を行った。

2. 本事例の概要

図1は、上に述べた事例が発生した個所の断面図である。高温の純水を輸送する炭素鋼配管に設置されたフローノズルの下流の管壁に異常減肉が発生し、噴破に至った。一口に異常減肉と言っても、詳細に見ると2種類の減肉が認められる。一つは管底に見られるように、広い範囲にわたって比較的均一に生じた減肉である。他の一つは管の天井部の均一な減肉の中に生じた、局部的に深い減肉で、噴破の直接的原因になった種類である。本稿では前者を「均一減肉」、後者を「局部減肉」と呼び、均一減肉については別報に譲り²⁾、以下

事例解析：高温純水中の炭素鋼鋼管壁に生じた異常減肉（1）

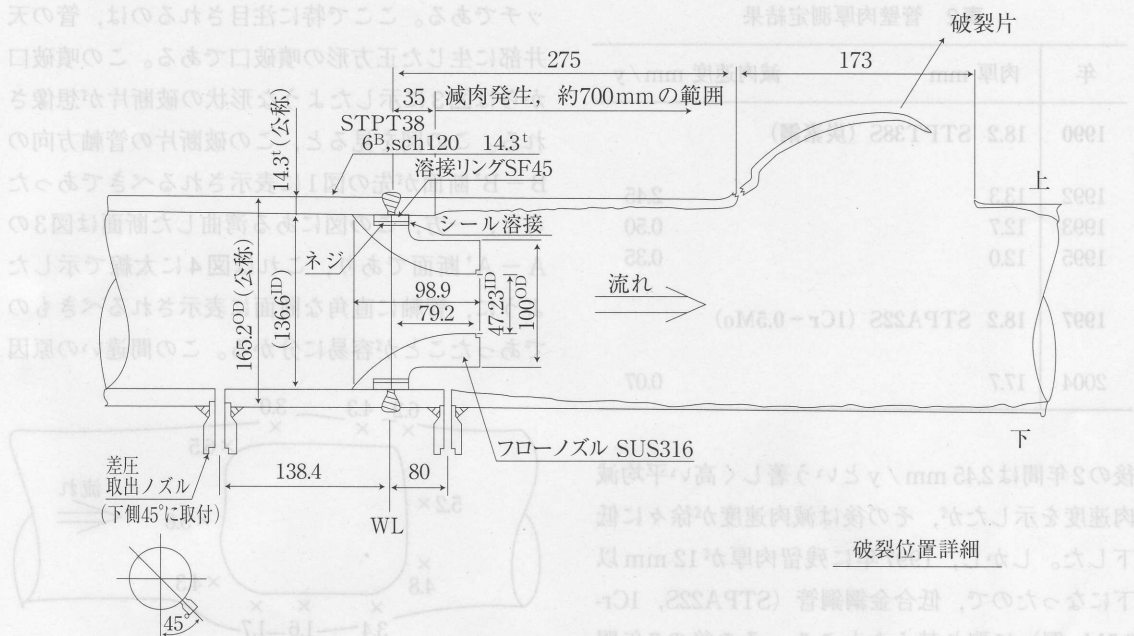


図1 本事例における噴破個所のスケッチ1

に局部減肉の発生機構や再発防止対策について述べる。

この図の局部減肉は管壁の破断片の両側に生じているので、噴破・破断が起きた時点では減肉がどの程度の深さまで達していたか正確には分からない。また、この図に描かれている管壁の破断片の形状は不自然に見える。なぜなら、管内の高水圧によって噴破したのであれば管壁は外側へ曲がるはずであるが、図1では内側へ曲がっている。

表1はこの配管が置かれた諸条件である。環境温度の145℃は、今までに炭素鋼鋼管に異常減肉が頻発した温度域にあることが注目される。溶存酸素濃度が記載されていないが、環境液はAVT（全揮発性物質処理）のボイラー給水であった。減肉深さは公称肉厚に等しいとして、減肉速度が0.78 mm/yと算出された。この減肉速度は、両氏の技術論文ではエロージョン/コロージョン（0.5～1.0 mm/y）に分類される。なお、一般の工業用金属材料の耐食性判定基準については、1 mm/y以上は使用不可、0.1 mm/y以下は使用可

表1 本事例の配管が置かれた諸条件

材料	炭素鋼 (STPT38S)
外径	165.2 mm
内径	136.6 mm
初期肉厚	公称 14.3 mm
最高使用温度	—
最高使用圧力	—
実使用温度	145℃
実使用圧力	11.2 MPa
流量	76 t/h
流速	1.6 m/s
pH	9.2
溶存酸素濃度	—
運転時間	18年
減肉発生範囲	約 700 mm
最大減肉速度	0.78 mm/y

という現場の基準がある。

表2は、本事例発生（1990）後の処置および対策の経過である。1990年の噴破後に同じ材質の新品の鋼管（STPT38S, 炭素鋼）に取り替えられ、同じ個所で肉厚の測定が続けられた。取り替え直

表2 管壁肉厚測定結果

年	肉厚 mm	減肉速度 mm/y
1990	18.2 STPT38S (炭素鋼)	
1992	13.3	2.45
1993	12.7	0.50
1995	12.0	0.35
1997	18.2 STPA22S (1Cr-0.5Mo)	
2004	17.7	0.07

後の2年間は2.45 mm/yという著しく高い平均減肉速度を示したが、その後は減肉速度が徐々に低下した。しかし、1997年に残留肉厚が12 mm以下になったので、低合金鋼鋼管 (STPA22S, 1Cr-0.5Mo鋼) に取り替えたところ、その後の7年間の減肉は5 mm、平均減肉速度は0.07 mm/yという著しく低い値を示し、問題は一挙に解決した。

この減肉速度の劇的な低下は、この低合金鋼に含まれる合金成分のクロムの効果によるものであると考えるのは当然のことである。クロムの効果があまりに大きいので、炭素鋼における局部減肉の発生にもクロムが関与しているのではないかという考えが生じるほどである。すなわち、本事例の配管に用いられていたSTPT38S (表1) の材質は、その成分表にクロムの含有量が規定されていない炭素鋼であったが、不純物として微量のクロムを含んでいて、それが防食効果を発揮していた可能性がある。この配管の局部減肉が生じた場所において、その量が特に低かったため異常に高い速度の減肉が生じたという見解である。以下にこの見解について検討を行う。

3. 検 討

3.1 局部減肉の発生原因

図2は、図1の噴破個所を上から観察したスケ

ッチである。ここで特に注目されるのは、管の天井部に生じた正方形の噴破口である。この噴破口からは図3に示したような形状の破断片が想像される。この図を見ると、この破断片の管軸方向のB-B'断面が先の図1に表示されるべきであったこと、一方、この図にある湾曲した断面は図3のA-A'断面であり、これは図4に太線で示したように、管軸に直角な断面に表示されるべきものであったことが容易に分かる。この間違いの原因

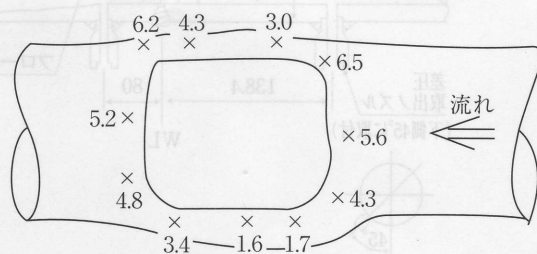


図2 本事例における噴破個所のスケッチ2

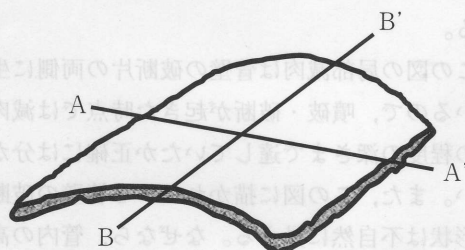


図3 管壁に生じた噴破口から想像される破断片の形状

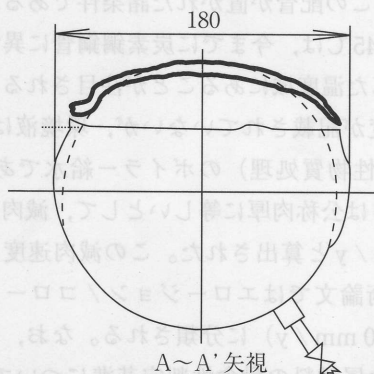


図4 本事例における噴破個所のスケッチ3

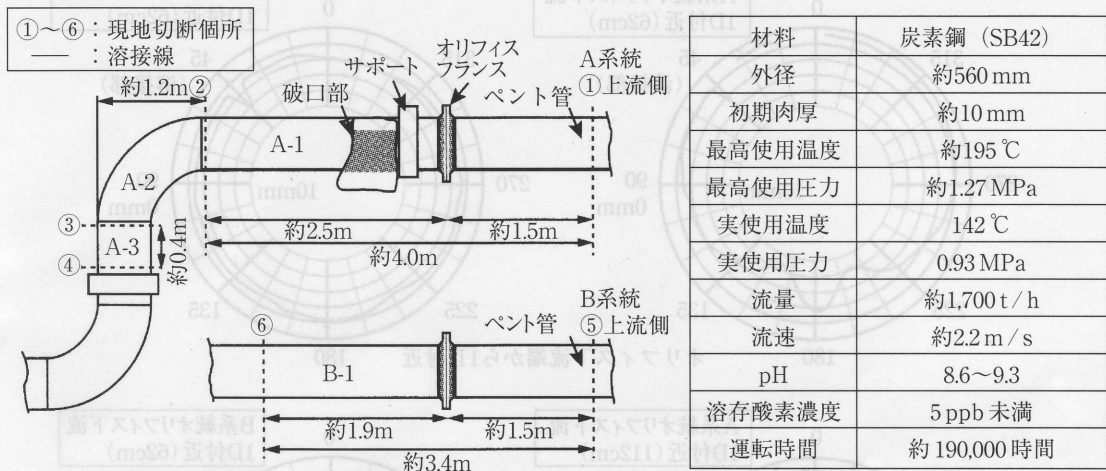


図5 美浜事例におけるA, B配管系の運転および環境条件（原子力安全・保安院審議会調査委員会資料）³⁾

は、図1を作成するとき破断片を90°回転させて置いたことに気付かなかったことである。これは破断片が正確な正方形であったことを意味している。

ここで重要なポイントとして、正確な正方形の破断片が作られた原因は、この正方形の四辺に沿って溝状に生じた異常減肉であるに違いないが、管材中にそのような形にクロムの欠乏層が生じることはまず考えられない。従って、この局部減肉はクロムの欠乏の所為ではないと断言できよう。

では、正方形の腐食溝の生成原因は何であろうか。それには、この場所の管壁温度の低下が関係していると考えられる。この場所では配管の外面を覆う保温材を正方形に切り取って管外面を露出させ、そこで管壁の肉厚を定期的に測定していたのであろう。測定を行わない通常時には正方形の保温材の蓋を置いていたが、蓋の周辺と配管の保温材の開口部との間に隙間があり、そこから放熱が起きて正方形の周辺に沿って温度の低い場所が生じ、それが遠因となって正方形の溝状局部減肉が発生したものと考えられる。

上記の推測を支持するのは、2004年の8月に発生した関西電力美浜原発3号機二次系配管破裂事

故である。以下に、経済産業省 原子力安全・保安院 審議会 事故調査委員会 の報告書³⁾ から引用した図表を示す。この事例の特徴は、全く同一の条件で運転されていた二つの配管系A, Bのうち、A系配管のみに局部減肉が発生し噴破に至ったことである。これらの図表によると、美浜事例には本事例との間に次に示すような多くの共通点があることが分かる。

- (1) 配管はクロムの含有量が規定されていない炭素鋼鋼管SB42であった（図5の表）。
- (2) 環境液は全揮発性物質処理（AVT）された純水であり、液温は142℃であった（図5の表）。
- (3) 減肉は絞り機構流量計であるオリフィスの下流に生じた（図5）。
- (4) 「均一減肉」（A, B系列）と「局部減肉」（A系列のみ）が生じた（図6）。

以上のように、美浜事例における材料・環境・運転・条件のほとんどが本事例のそれらと一致している。さらに、その管壁には「均一減肉」と「局部減肉」が発生していて、A系列のみに生じた「局部減肉」は、A系列配管のみに設置されていた配管サポートロッドからの放熱によって生じ

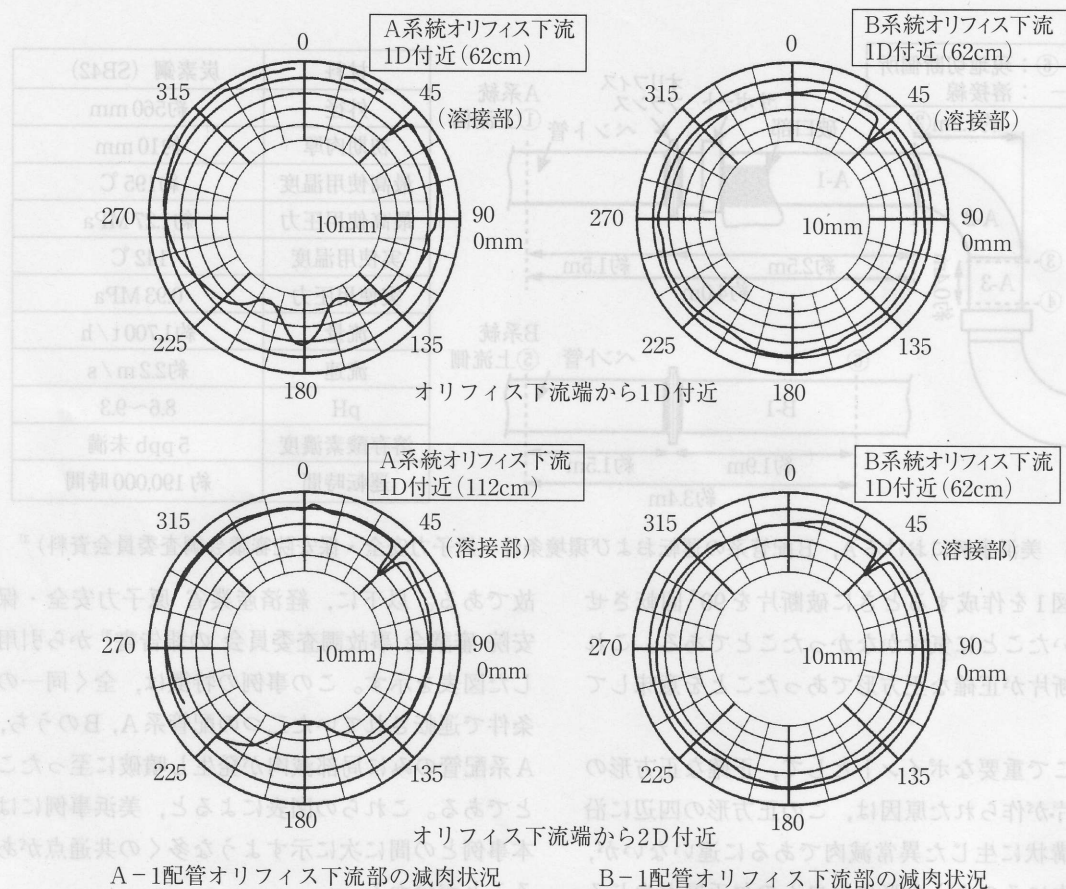


図6 美浜事例におけるA、B配管の残留肉厚分布（原子力安全・保安院審議会調査委員会資料）³⁾

た管壁温度の低下に起因すると推測された⁴⁾（図7）。そうすると、本事例の管壁に生じた局部減肉は、美浜事例のそれと同じ原因、すなわち管壁温度の局部的低下、あるいは周辺部位との間に生じた温度差によって引き起こされたもので、クロムの欠乏とは無関係と推測するのが合理的である。

ところで、事後の再発防止策について両事例を比較すると、本事例では前述のように当該配管の材質が炭素鋼から高級材の低合金鋼に取り替えられた。一方、美浜事例では、全配管がクロム含有量がさらに高いステンレス鋼鋼管に取り替えられた。

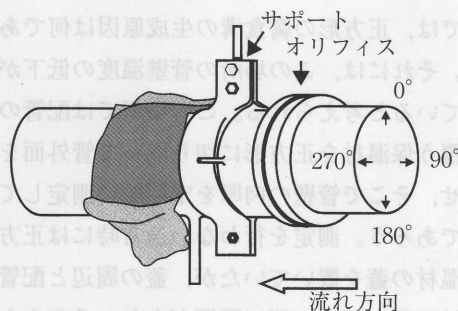


図7 美浜事例A配管系の噴破個所のスケッチ（原子力安全・保安院審議会調査委員会資料）³⁾

3.2 検討されるべき問題点

上記のように、両事例における均一減肉および局部減肉の発生原因は、明らかに構造・流動条件

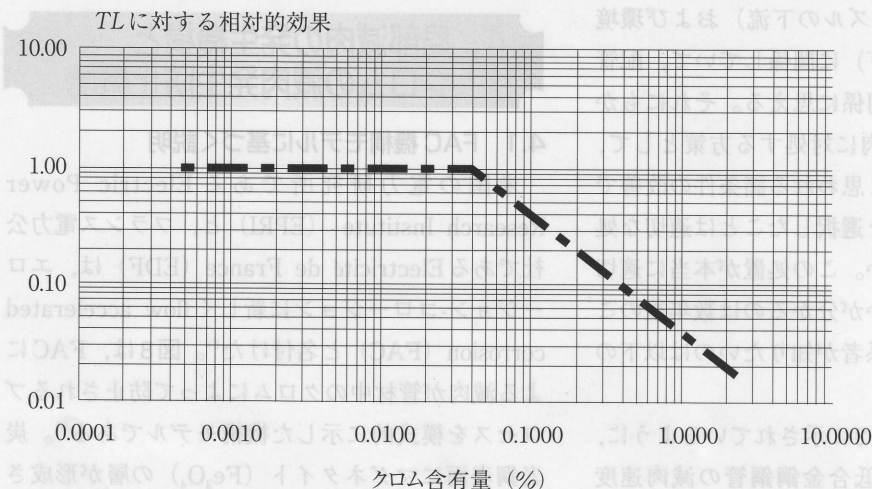


図9 減肉速度 (TL) に及ぼすクロム含有量の影響⁶⁾

面から溶出する鉄イオンとともに沖合へ移動する。

この減肉の進展モデルによると、全腐食速度 (TL) は図8の (3) 式で与えられる。ここで、 C_{eq} はマグネタイトの溶解度、 C_0 、 C_s 、 C_∞ は図に示されている場所でのマグネタイトの濃度、 K^* 、 k は (1) および (2) 式で定義されている反応速度定数と物質移動係数である。(3) 式の分母は、溶出反応抵抗と物質移動抵抗とからなる全抵抗、分子は沖合の鉄イオン濃度 (C_∞) が0のときの駆動力である。問題のクロムの効果を表す係数 θ は、全表面に占める空隙の底の金属鉄表面の割合であり、図9のようにクロム含有量の関数である。この図によると炭素鋼 (クロム含有量 0.04% 以下) では θ は 1.00、クロム 1% で θ は 0.04 である。すなわち、炭素鋼に 2 mm/y もの異常減肉が生じるような運転条件や環境条件でも 1% のクロムを含む低合金鋼の減肉速度は 0.08 mm/y 程度と算出される。このクロムの減肉防止効果の数値は、表2に示された、炭素鋼に発生する局部減肉が低合金鋼の導入によってほぼ完全に押さえ込まれた

本事例のそれとほぼ一致する。

しかし、この機構説明には致命的な欠陥がある。それは、図8の機構モデルにおいて、クロムの含有量が高くなってマグネタイト層の緻密度が上昇して空隙が一切なくなると、下地金属が溶出する表面がなくなって鉄イオンが溶出しなくなる。すると、マグネタイト層を成長させるイオンの析出もなくなるので層の成長が停止する。しかし、その外表面からの溶出は下地金属からのイオンの溶出の有無に関係なく、環境液の流れによって進行するので、この機構の根幹をなすマグネタイト層がやがて消滅してしまう。保護性のマグネタイト層がなくなれば減肉速度が著しく高くなるはずであるが、そのような事態が実際に生じるとも思えない。

引用文献

- 1) 柳田省三, 小林英男: 高圧ガス, Vol.36, pp.720-728 (1999).
- 2) 松村昌信: 材料と環境, 投稿中.
- 3) <http://www.nisa.meti.go.jp/>
- 4) 松村昌信, 矢吹彰広: 火力原子力発電, Vol.56, No.3, pp.192-203 (2005).
- 5) B. Chexal et al., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants", EPRI report, TR-106611 1996.
- 6) S. Trevin, EDF knowledge of flow-assisted corrosion in PWR type NPP, EDF Report, ENTECH050089/A (2004).