

# 流れ加速型腐食速度に及ぼすクロム含有量，硬さ， 金属組織の影響 —実機取り替え配管からの検討—

Effect of Cr content, hardness and micro structure on flow-accelerated corrosion  
in carbon steel pipes  
-Examination of replaced carbon steel pipes-

山田 卓陽 (Takuyo Yamada)\* 戸塚 信夫 (Nobuo Totsuka)\*

**要約** 加圧水型原子力発電所の2次系配管において，68体の炭素鋼取り替え配管について，減肉状況の確認を実施した。流れ加速型腐食現象は，微量なCr等が減肉速度を抑制することが知られているので，本調査ではまず実機で使用される配管の微量元素の含有状況を調査した。加えて，金属組織，硬さについても調べ，流れ加速型腐食との関係について検討した。

その結果，(1)対象配管中のCr含有量は1体を除いて全て0.1%以下であった。そのような微量なCr含有量の増加でも減肉速度を抑制する傾向が得られた。しかし，その抑制効果は流速条件を越えるものではないものと推察された。(2)全ての配管の硬さは，強度の規格上想定される硬さを示していた。硬さと減肉率の顕著な相関は認められなかった。(3)金属組織と減肉率との相関は認められなかった。

**キーワード** 加圧水型原子力発電所，2次系配管，炭素鋼，エロージョン/コロージョン，流れ加速腐食，減肉

**Abstract** 68 replaced carbon steel piping in secondary system of pressurized water reactor (PWR) has been investigated by visual examination for checking thinning conditions. It is well known that the flow-accelerated corrosion (FAC) was inhibited by traces of Cr in steel. Therefore, the chemical compositions of those steels have been measured. In addition, the micro structure and hardness of those steels have been investigated. And the relationship between those material variables and FAC rate was considered.

As the results, (1) The Cr contents in those steels were below 0.1 wt% except one sample. Minute quantities of chromium increase the resistance against FAC. But the water velocity was thought to be the dominant factor rather than chemical composition in steel, at least such as below 0.1%Cr. (2) Hardness of all piping has been satisfied the specifications of each materials. The hardness of steels was not correlated with wall thinning rate. (3) The micro structure was also not correlated with FAC rate.

**Keywords** PWR, secondary piping, carbon steel, erosion/corrosion, flow accelerated corrosion (FAC), thinning

## 1. はじめに

Portによれば<sup>(1)</sup>，流れ加速型腐食 (flow accelerated corrosion, FAC) については，環境因子としては150℃あたりにFAC速度のピークがあること，酸素や高pHがFAC抑制に働くこと，流速が速い場所あるいは偏流の起こる場所でFACが起りやすいことが指摘されている。また材料因子としては，微量なCr, Cu, Moでも減肉速度を抑制することが

知られている<sup>(1)~(5)</sup>。原子力安全システム研究所では，このような背景のもと，FACに及ぼす2次系水質の影響<sup>(6)</sup>，流況の影響等を調べる試みや，国内の点検方法の健全性を海外の手法と比較するなどの試み<sup>(7)(8)</sup>を実施している。

本報告では，FACの材料因子を検討することを目的として，加圧水型原子力発電所 (PWR) の2次系配管において取り替えられた炭素鋼配管68体について，減肉状況の確認を実施するとともに，それら

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

配管の材料因子と FAC 速度の相関について検討した。本調査対象配管中には、多様な規格の炭素鋼が使用されていたので、配管の化学組成、金属組織、硬さ等の確認を実施し、特に Cr 含有量と FAC 速度との相関について検討した。また、材料の金属組織、硬さについても FAC 速度との相関を検討した。

## 2. 調査方法

### 2.1 調査対象

本調査の対象配管は、PWR2 次系配管において取り替えられた炭素鋼配管 68 体である。対象配管の減肉率と使用環境の関係を図 1 に示す。減肉率は、実測の肉厚測定値から算出される減肉量を運転時間で除した値で、関西電力（株）が実施した肉厚測定部点結果整理票の数値を引用した。横軸は使用温度を 25℃（常温）から 275℃までを 25℃刻みでプロットした。湿り度とは湿り蒸気中に含まれる水分の量を示す値で、湿り度 100 の場合は单相流を示す。湿り度 100 は、図中●で、湿り度 15~100 未満と 5 未満はそれぞれ◆と■で示した。流速は 0（常圧）から臨界流速まで 10 段階で色分けして示した。また、各マークは各温度、湿り度、流速ごとに識別番号を付

番し、それぞれ対応するように示した。

### 2.2 調査方法

#### (1) 減肉状況調査

炭素鋼配管 68 体について内面の外観観察を実施し、減肉状況を確認した。減肉状況の確認はデジタルカメラによる目視で実施した。対象部位は、その形状ごとに、直管部、チーズ、エルボ（45°）、エルボ（90°）、レヂューサを含む。各形状ごとの調査数は、図 2 に示したとおりであり、直管部の多くはオリフィスの下流等偏流の想定される部位である。直管部の取り替え数が多いのは、知見拡充のための取り替え配管を含むためである。

#### (2) 材料分析

配管の材料分析対象元素は、JIS 規格で規定される C, Si, Mn, P, S の他、減肉の抑制効果が報告されている Cr<sup>(1)~(5)</sup>, Cu, Mo<sup>(2)~(5)</sup>とした。材料成分分析は発光分光分析法により実施した。測定は各配管から、溶接熱影響や切断影響のない部分から一部を切り出し、外面皮膜をグラインダで研削後、2~3 箇所測定を繰り返しその平均値を材料成分とした。発光分光分析で材料成分分析を実施するにあたり、代表的な 10 個の配管については、別途化学分

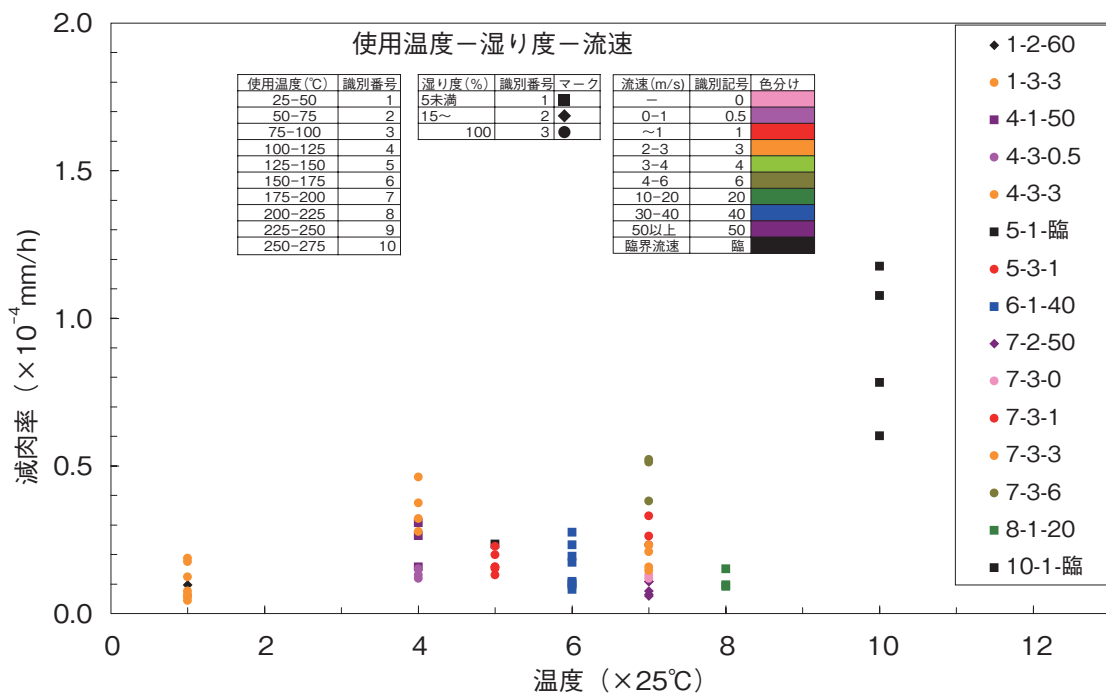


図 1 対象配管の減肉率と使用環境の関係

析（湿式分析）を実施し、その信頼性を確認した。Cr 濃度の測定結果の代表例を図3に示す。発光分光分析による測定値が、化学分析に比較してやや大きくなる傾向（0.01~0.02%程度）が見られるものの、化学分析の結果とほぼ一致する。

(3) 金属組織, 硬さ

金属組織用試料は、対象配管から溶接や切断の影響のない部分を切断し、配管の軸方向断面が現出するように樹脂埋めし、鏡面仕上げ（コロイダルシリカ）とした。研磨後5%ナイトール溶液でエッチングを施し、光学顕微鏡で組織観察を行った。組織観察は、基本的に板厚中央部で実施したが、一部特徴的な鱗片状模様が見られた場合は内面側も撮影した。

硬さ試験は、組織観察用に樹脂埋めした試験片を組織観察後、再度ダイヤモンドペースト3μm仕上げとし、板厚中央部をビッカース硬度計、荷重2kgで5点計測し平均値とした。

3. 調査結果

3.1 配管内面状況観察結果

配管減肉状況観察結果の代表例を図4と図5に示す。図4は单相流で特有の鱗片状模様が観察されたものの代表例で、90°エルボ部、温度条件は175~200℃、流速条件は2~3m/s、湿り度100であった。このような单相流特有の鱗片状模様は、調査配管68体中48体で確認した。

図5は2相流特有の流れ上流側に鋭い突起を持つ減肉模様の代表例で、温度条件は100~125℃、流速条件は50m/s以上、湿り度は5未満であった。このような2相流特有の減肉模様は調査配管68体中10体で確認した。

調査対象配管中、常温で使用される配管5体については、温度条件25~50℃、流速条件2~3m/s、湿り度100の条件で、減肉模様は確認されなかった。

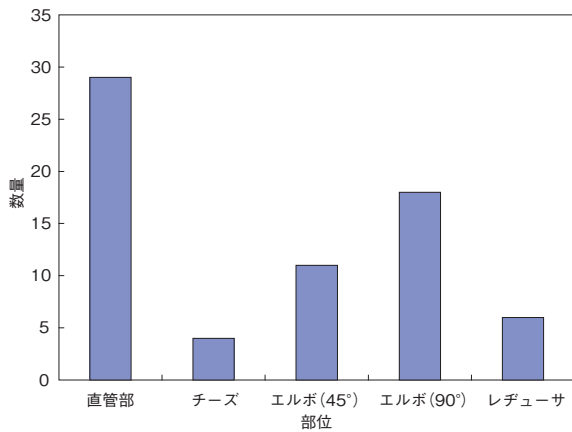


図2 取り替え配管の部位数

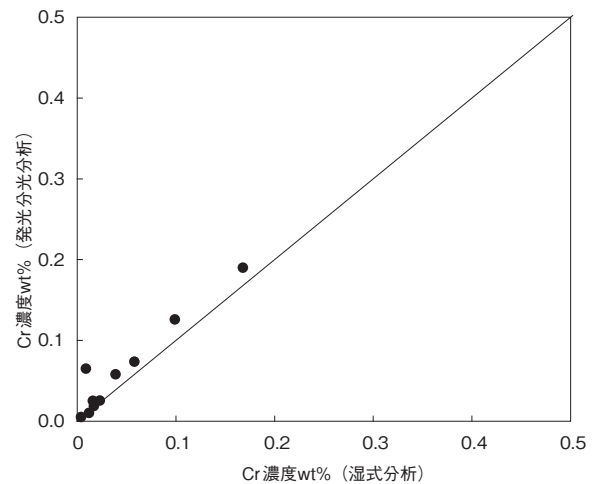


図3 Cr濃度の発光分光分析と湿式分析の比較

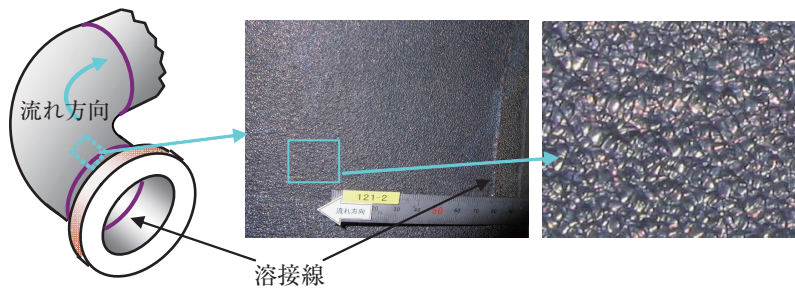


図4 配管減肉状況の観察結果の代表例1（单相流）

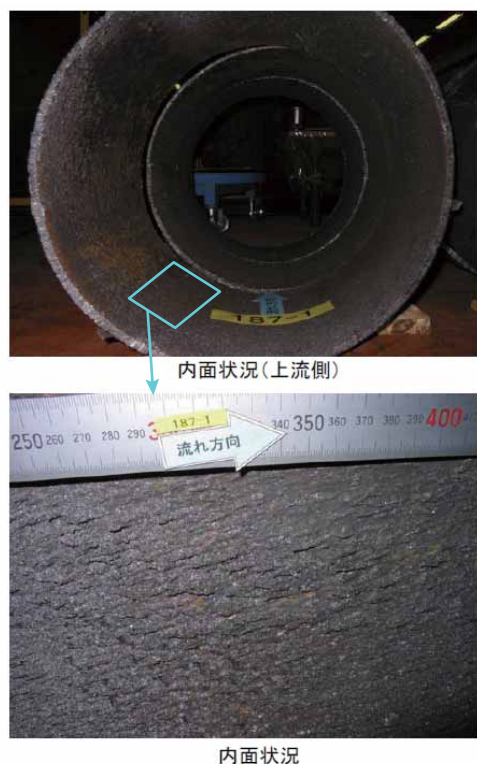


図5 配管減肉状況の確認結果の代表例2 (2相流)

また、温度条件 80℃の2体、185℃～240℃の3体についても、減肉模様が観察されなかった。これは、湿度が5未満で、空気抜き管など水分をほとんど含まない系統や、間欠的に使用される系統であるためと推定された。

### 3.2 材料分析結果

炭素鋼配管 68 体について発光分光分析による材料分析を実施した。本調査の対象配管中には、STPT38、STPT49、SF490A、SB42、SB46、SS41、SGP の7種類の規格の鋼材が使用されていた。表1に各規格の化学成分をまとめて示す。各材料規格の

材料成分は、強度成分である C、Si、Mn 量に差異があるが、耐食性の観点からは本質的な違いは無く、ほぼ同等の成分となっている。強度の規定では、例えば STPT370 の場合、370 は強度の規格を示し、引張強さ 370MPa 以上、STPT480 では 480MPa 以上となる。化学成分の一般的傾向としては、強度の高い規格の場合に C 量および Mn 量が高い設定となっており、この両元素が強度をあげる場合に積極的に添加される元素である。全ての規格において、化学成分の規格上 Cr、Cu、Mo は規定されておらず、またこれらは P、S のような有害元素ではないので、どの程度材料中に含まれているかは材料規格からは判断できない。

発光分光分析の結果、対象配管中の C、Si、Mn、P、S の含有量は全て JIS 規格で規定される含有量に収まっていた。Cr については、0.1% を越えたのは一体のみで、その他の配管は全て Cr 量 0.1% 未満であった。また、対象配管中の Cu 含有量の最大値は 0.028%、Mo 含有量は 0.017% であった。Huijbregts によれば<sup>(5)</sup>、各元素の減肉抑制効果は、 $R = 0.61 + 2.43Cr + 1.64Cu + 0.3Mo$  で表される。この式から、係数の小さい Cu と Mo は、Cr に比べて減肉抑制効果が小さいものと考えられ、かつ Cu と Mo 含有量は Cr 含有量に比べて少ないので、この含有量では減肉速度に影響しないものと推定される。

なお、SGP は一般配管用炭素鋼鋼管の規格で、圧力のかかる部位や高温配管では使用されない。本調査対象の SGP 配管は、前述のとおり全て常温常圧の配管で使用されていたものであり、また内面観察結果から FAC の兆候は見られなかった。

### 3.3 金属組織

炭素鋼配管の金属組織の代表例を図6に示す。調査対象 68 体は、全て典型的な炭素鋼のフェライト／

表1 炭素鋼配管の化学成分 JIS 規格 (抜粋)

JIS	新名	旧名	C	Si	Mn	P	S
G3101	SS400	SS41	—	—	—	0.05 以下	0.05 以下
G3452	SGP	—	—	—	—	0.04 以下	0.04 以下
G3456	STPT370	STPT38	0.25 以下	0.1～0.35	0.3～0.9	0.035 以下	0.035 以下
同上	STPT480	STPT49	0.33 以下	0.1～0.35	0.3～1.0	0.035 以下	0.035 以下
G3201	SF490A	SF50A	0.6 以下	0.15～0.50	0.3～1.2	0.03 以下	0.035 以下
G3103	SB410	SB42	0.24～0.3	0.15～0.30	0.9 以下	0.035 以下	0.04 以下
同上	SB450	SB46	0.28～0.33	0.15～0.30	0.9 以下	0.035 以下	0.04 以下



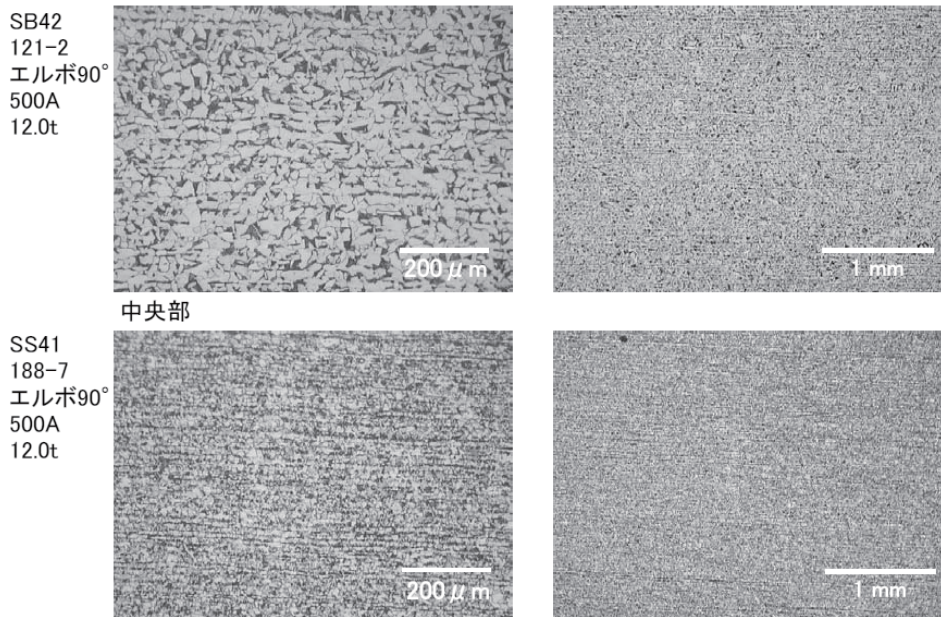


図6 炭素鋼配管の金属組織の代表例

パーライト組織であった。炭素量が多い配管についてはパーライト組織量が多いもの、圧延材を巻いて配管にしたものについては、圧延方向の層状組織が見られるもの等の違いがあるが、基本的組織に大きな違いはなかった。

### 3.4 硬度測定結果

対象炭素鋼配管 68 体について硬度を測定した。硬さは概ね HV (2kg) = 120~150 の間に収まっていた。中でも強度規格の高い SB46 が比較的高い値を示し (HV (2kg) = 138~149)、強度規格の低い SGP が低い値を示す (HV (2kg) = 108~145) 等、強度の規格上想定される範囲の硬さを示していた。硬さと減肉率との相関については、考察の項で議論する。

## 4. 考察

### 4.1 減肉率の Cr 濃度依存性

材料組成分析の結果から Cu および Mo については、その含有量が全体に少ないことから、減肉率に対する Cr の影響についてのみ検討する。図 7 に減肉率と Cr 含有量の関係 (全データ) を示す。各

マークは鋼種に対応して示した。図では使用環境が多岐にわたるため Cr 濃度依存性は判然としない。そこで、本調査対象中で比較的使用条件の近いものを抽出して議論する。図 8 は、温度条件 175℃~200℃、湿り度 100 (即ち单相流) のものを抽出して示した。また図中流速条件ごとにマークと色を変えて示した。流速条件ごとに比較すれば、Cr 濃度の増加に伴い、緩やかに減肉率が低下しているようにも見えるが、データ点数が少ないため判然としない。また、流速条件が 4~6m/s の減肉速度は、Cr 濃度が比較的多いにもかかわらず、流速条件の低いものの減肉率よりも速い傾向が見られる。このことは、たとえ Cr による減肉率の抑制があったとしても、この程度の Cr 含有量では流速条件の方が減肉率に影響することを示唆する。

次に、湿り度 100 以外のものを抽出して整理したものを図 9 に示す。図から、同一条件であれば Cr 濃度の増加に伴い減肉率が減少する傾向が見られる。しかし、図 8 同様、流速条件が厳しいほど、減肉率が速くなる傾向が見られる。これは、ほとんどの配管が 0.1% 以下の Cr 濃度であり、この範囲においては、Cr 濃度が減肉率を抑制する効果は流速条件 (あるいは温度条件) に比べて小さいためと推察される。

Chexal ら<sup>(3)</sup>によれば、炭素鋼配管の減肉率を一桁抑制するために必要な Cr 含有量は、流速条件にも

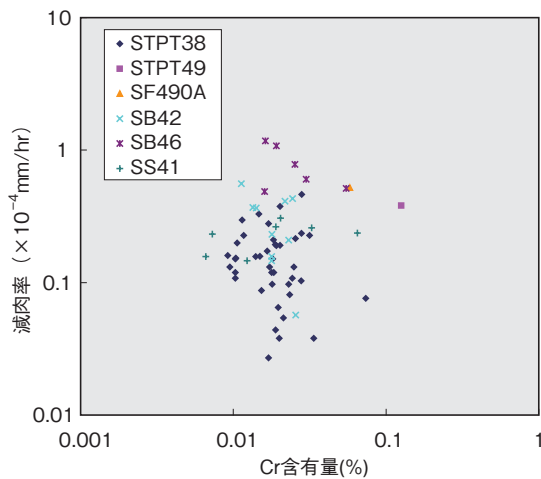


図7 減肉率とCr含有量の関係（全データ）

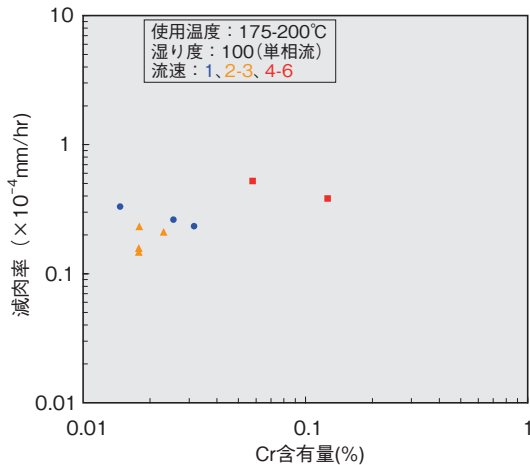


図8 減肉率とCr含有量の関係（单相流，温度範囲175～200℃）

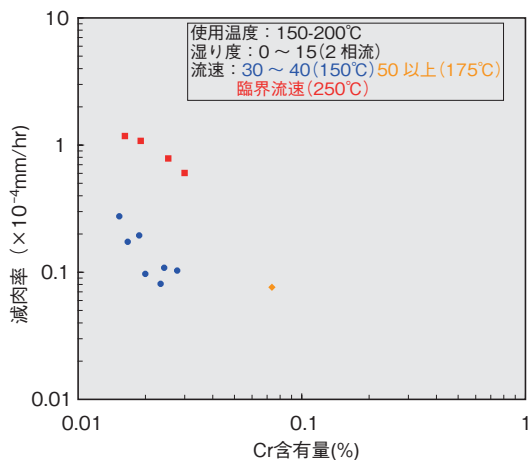


図9 減肉率とCr含有量の関係（2相流，温度範囲150～200℃）

よるが0.5%ないし1%程度であり，本配管調査で得られた最大Cr量約0.1%でもまだ少ない．本調査における対象配管68体だけでは統計的に十分とは言えないが，このことは現状の規格の炭素鋼を使用する限りCrの含有による十分な減肉率の抑制は期待できないものと考えられる．従って，積極的な対策としてCr含有量を制御する場合には，クロムモリブデン鋼等Cr量が1%程度以上であることが規格で規定されている鋼材を用いるのが妥当であろう．

## 4.2 減肉率の硬さ依存性

減肉率と硬さの関係（全データ）を図10に示す．各マークは図7と同様に鋼種に対応して示した．比較的高強度のSB46の減肉率が高いように見えるが，これは硬さあるいは強度と減肉率が相関しているわけではなく，設計上高強度材がより厳しい条件で使用されるためである．図11と図12に，それぞれ図8と図9で示したデータを硬さに対してプロットしたものを示す．同一の鋼種で比較すれば，硬さと減肉率に顕著な相関は見られない．また，STPT49やSB46など，比較的高強度材がより厳しい条件で使用されている．キャビテーション・エロージョン性については，同系統の材料であれば硬いほどエロージョン性に優れる<sup>(9)</sup>ことが知られているが，本調査対象配管においては，硬さとの相関が見られないことから，キャビテーション・エロージョンのような物理的作用は少ないものと推察される．

## 4.3 減肉率と金属組織の関係

図13にFAC特有の鱗片状模様を示した配管の断面観察結果を示す．図から鱗片状を呈す窪みの大きさは1mm程度であり，フェライト・パーライト組織よりも数10倍大きく，金属組織との相関は見られない．

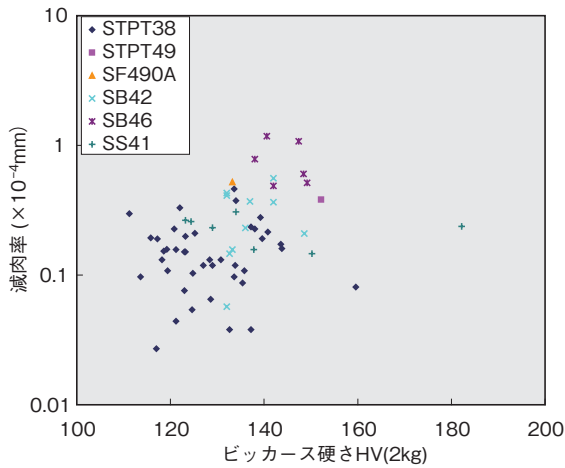


図10 減肉率と硬さの関係

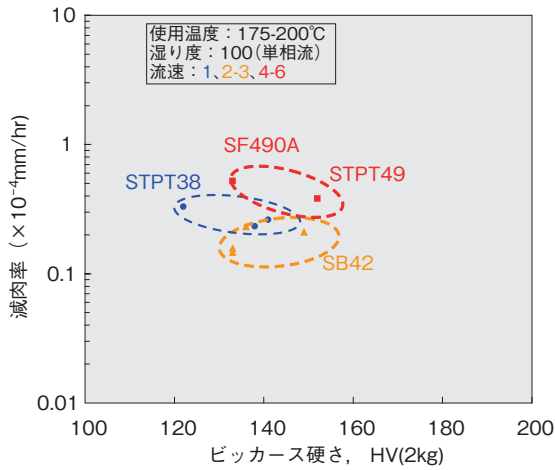


図11 減肉率と硬さの関係 (図8に対応)

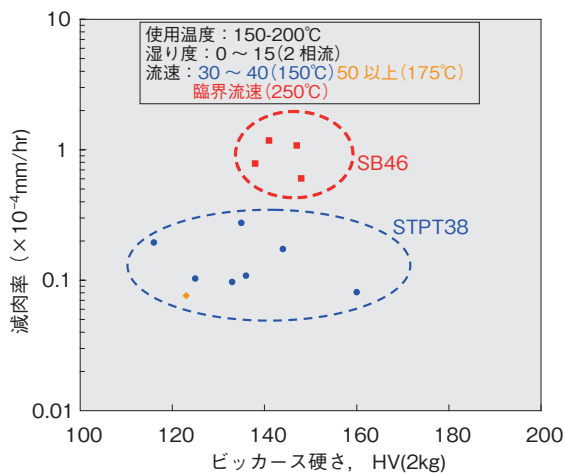


図12 減肉率と硬さの関係 (図9に対応)

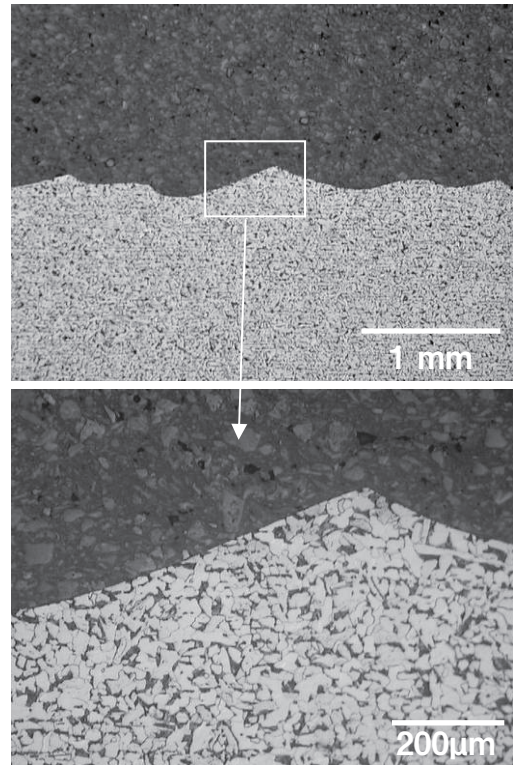


図13 鱗片状模様の断面観察結果

## 5. まとめ

PWR2 次系配管から採取した 68 体の試料について減肉状況調査を実施し、それらの減肉率と Cr 含有量、硬さ、金属組織との相関を検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 本調査対象配管において、0.1%以下という微量な Cr 含有量の増加でも、減肉率を抑制する傾向が得られた。しかし、この範囲の Cr の抑制効果は流速条件を越えるものではないものと考えられる。
- (2) 全ての配管の硬さは、強度の規格上想定される硬さを示していた。硬さと減肉率の間に相関は認められなかった。
- (3) 金属組織と減肉率との間にも相関は認められなかった。

## 謝辞

本配管調査を実施するにあたり、配管内面調査およびデータ整理には、当社藤井登氏と石田仁志氏の多大な貢献があった。また、配管内面調査、試料準備等には、関電プラント村上公治氏 (現 I N S S 派

遣社員)の多大な協力があつた。また、発光分光分析の実施にあたり、日鉄テクノロジー水津昭氏から有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 文献

- (1) R.D. Port, Corrosion 98, Paper No.721, 1998.
- (2) L.F. Goyette, G.W. Zysk, PVP-Vol. 259, Codes and Standards in a Global Environment ASME 1993.
- (3) B. Chexal, J.S. Horowitz, L.F. Goyette, M. Ruscak, PVP-Vol. 338, Pressure Vessels and Piping Codes and Standards Volume 1 ASME 1996
- (4) W. M. M. Huijbregts, Materials Performance, Vol.23, No.10, pp.39-45, 1984.
- (5) P.J. King, J.M. Jevic, R.H. Pelger, F.H. Hua, 11<sup>th</sup> Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems, Stevenson, WA, Aug.10-14, 2003.
- (6) 福村卓也, 有岡孝司, INSS JOURNAL, Vol.14, p.266, (2005)
- (7) 千葉吾郎, INSS JOURNAL, Vol. 12, p. 87, (2005)
- (8) 千葉吾郎, INSS JOURNAL, Vol. 13, p. 290, (2006)
- (9) 宮坂末甫, 杉山憲一, 野口学, 八楯浩, 材料と環境, 57, pp.111-117(2008)