

S-22 高温水割れ

1. 概要

原子力発電プラントのように、高温高压水を取り扱うオーステナイト系ステンレス鋼配管は、鋭敏化により溶存酸素を環境因子として粒界型の応力腐食割れを生じる。また高温水中でニッケル基合金も応力腐食割れを生じることがあり、これらを高温水割れと呼んでいる。

2. 損傷を受ける材料

オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304, SUS316)

Ni 基合金 (600 合金、X-750 合金)

3. 損傷機構、損傷事例、対策

オーステナイト系ステンレス鋼は常温において固溶限界以上の炭素 (C) を含んでいる。このため 1000°C 以上で十分に溶解している炭素は急冷されると過飽和状態の固溶体になる。このようなステンレス鋼が、溶接加工を受けると、溶接熱影響部では過飽和の炭素がクロム炭化物 (Cr_{23}C_6 等) を形成し結晶粒界に析出する。その結果、結晶粒界近傍はクロム濃度が低くなり、粒界近傍の耐食性が低下する。この現象を鋭敏化と呼んでいる。大気中のように酸素が存在しかつ塩化物イオンが存在していると、鋭敏化されているステンレス鋼は、常温に近い温度でも粒界型の応力腐食割れを生じることがある。また、温度が数十度以上になると固溶化されているステンレス鋼でも応力腐食割れを生じるようになり、この場合粒内型応力腐食割れとなる。

図 1 は 200~300°C の高温水中での応力腐食割れ (SCC) に及ぼす溶存酸素と塩化物イオンの関係であり、3つの領域に分けられる。

200-300°C $\sigma > \sigma_{0.2}$ >1000h or $\dot{\epsilon} < 10^{-5}\text{s}^{-1}$	304	SCC	no SCC
固溶化	■	■	□
鋭敏化	●	●	○

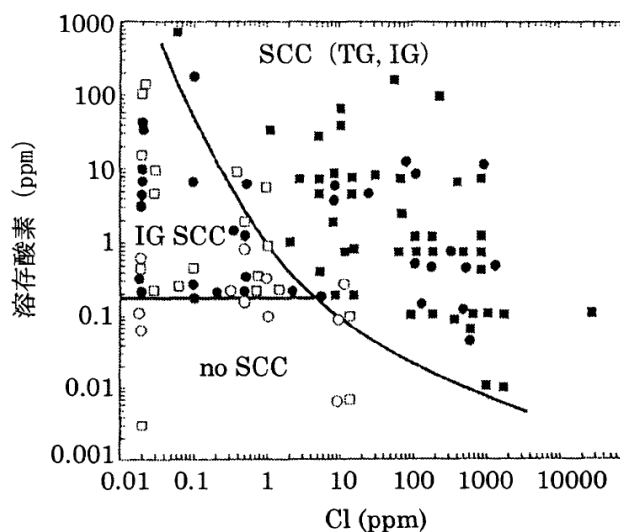


図 1. SUS304 ステンレス鋼の高温水による応力腐食割れに及ぼす溶存酸素と塩化物イオンの関係¹⁾

溶存酸素と塩化物イオンの濃度が一定の値を超えると粒界割れ（IG）とともに粒内割れ（TG）を生じる。一方、鋭敏化材の場合は、一定の溶存酸素濃度（約0.2ppm）以上では、塩化物イオンが存在してない高純度水中で粒界応力腐食割れ（IGSCC）を生じる。溶存酸素濃度が一定の濃度以下で、塩化物イオンが低い場合は、粒界、粒内割れのいずれも生じない。塩化物イオンが存在してない高純度水中での応力腐食割れを高温水割れと呼んでいる。

1970年代半ばから後半にかけて国内外の沸騰水型（BWR）原子力発電プラントのステンレス鋼溶接熱影響部に粒界型応力腐食割れを生じ大きな社会問題となった。当時は、高純度水中でステンレス鋼が応力腐食割れを生じるとは考えてなかった。その後国内外で、原因究明が行われ、今日では対策が確立している。

オーステナイト系ステンレス鋼のSCCを生じる材料因子は鋭敏化現象であるので、対策として、鋭敏化しにくい低炭素ステンレス鋼（例えば、SUS304L,SUS316L,SUS316NG）やTi,Nbの添加によりCを安定化した安定化ステンレス鋼（例えばSUS321,SUS347）の適用が最も効果的な対策となる。環境因子としては、溶存酸素が応力腐食割れの原因であるので、溶存酸素を下げるのが有効であり、水中への水素注入が行われている。引張り応力が割れの応力因子であるので、溶接部の残留応力を低減する方法も有効である。残留応力を低減する手法としては、管内面を冷却しながら溶接を行う水冷溶接法、溶接後配管内部を冷却しながら管外面高周波過熱し、温度差の熱応力により管内面に圧縮応力を発生させる高周波誘導加熱処理法等が実用化されている。

ニッケル基合金の応力腐食割れ事例としては、沸騰水型（BWR）原子力発電プラントでは、インコネル600の割れ粒界型応力腐食割れ事例が報告されているが、ステンレス鋼と比べて割れ感受性は低い²⁾。また、析出強化型合金であるX-750の粒界型応力腐食割れ事例も報告されている。加圧水型（PWR）原子力発電プラントでは、600合金、X-750合金、718合金等の粒界型応力腐食割れ事例が報告されている。防止対策として熱処理あるいはショットピーニングによる残留応力除去、残留応力の少ない製作加工等が採用されている。材料の熱処理条件の検討により、耐応力腐食割れ性を向上させることも可能である。690合金に特殊な熱処理を加えたTT690合金は、耐応力腐食割れ性において優れており、割れの報告事例は無い。X-750合金も適切な熱処理により、耐食性を向上することが分かっている。

表1にニッケル基合金の組成例を示す。

表1. ニッケル基合金の組成例¹⁾

(単位：%)

主成分 合金	C	Si	Mn	Fe	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Nb ⁺ Ta
600合金	0.08	0.25	0.50	8.0	76.0	15.5	-	-	-	-
690合金	0.03	0.20	0.90	9.5	60.0	30.0	-	-	-	-
X-750合金	0.04	0.25	0.50	7.0	73.0	15.5	-	-	-	1.0
718合金	0.04	0.20	0.20	18.5	52.5	19.0	3.0	0.50	0.90	5.1
A286合金	0.05	0.50	1.40	Bal	26.0	15.0	1.3	0.20	2.0	-

5. 参考文献

- 1) 高松洋：材料と環境、Vol.48、No.12、p763～(1999)
- 2) 鈴木俊一：材料と環境、Vol.48、No.12、p753～(1999)