



研究ノート

304 ステンレス鋼の応力腐食割れに対する設計的配慮と破壊力学の導入

向井喜彦*

近年、各種の化学工業や原子力発電などの飛躍的な発展に伴ない、耐食・耐熱材料に要求される条件も益々苛酷なものとなりつつある。そのため使用中に各種の事故を起こすことが少なくなく、この種の構造物の設計・施工ならびに使用中の安全保守に当って重要な課題の一つとなっている。表1は化学装置で起こる損傷のタイプ別の事故分類の一例であるが、ステンレス鋼の応力腐食割れ(SCC)事故が最も多いことが窺がえる。

ステンレス鋼のSCC事故の中でも現在社会的に最も重要なのは発電用原子炉の一次冷却器系の事故である。この事故は最初米国のドレスデン2号炉で起こり、その後の検査でその他の多くの原子炉でも割れが発見されている。我国

においても例外ではなく福島1号炉の事故は有名である。これらの事故は特に沸騰水型軽水炉(BWA)のバイパス管や、ノズルとパイプの接合部など普段高温高圧水が流動していない場所でAISI 304 ステンレス鋼の溶接熱影響部に発生することが多い。その場所の一例を図1に示す。なお、この応力腐食割れは熱影響部での溶接熱によるクロム炭化物の粒界析出に起因する粒界近傍の耐食性の劣化、高温高圧水中の溶存酸素と溶接残留応力の3つの因子の相互作用によって起こるものである。

一般にSCCには上述の例のように材料、応力、環境の3要因が関与するが設計段階での対策配慮としては耐SCC性に優れた材料の選択に重点が置かれることが多い。材料の耐SCC性のパラメーターの一つとして限界応力(threshold stress (σ_{th} : それ以下の応力では応力腐食割れが起こらないと考えられる応力)を取ることが多い。普通のステンレス鋼の σ_{th} と材料の降伏点(σ_y)との間には図2にみられるようにはほぼ同程度の値を示すグループと、明確な関連性はなく、しかも降伏点よりはるかに低い値になるグループとがある。後者の場合は材料変更や溶接条件の改変によって σ_{th} をきわめて高くし得ることも少なくない。高温高圧水によるステンレス鋼のSCCもこのグループに入ると思われる。又前者の場合についても、降伏点よりかなり高い σ_{th} を有する材料がいくつか開発されている。

原子力発電プラントのSCC事故に対しても材料の変更を将来考えていくべきであるが、現在稼働中のプラントについてはその安全性の確保が当面の目標となる。そのためにはより高精度の定期検査と同時に、もしき裂が発見された場合にこれが伝播して器壁を貫通し漏洩又は破

表1 化学装置における損傷事例(沢田, 鈴木)

事例の分類	材質 ステンレス鋼	普通鋼	銅合金	その他	計	比率(%)
応力腐食割れ	65	9	3		76	45.6
孔食	23	11	1		35	21.0
全面腐食	4	10			14	8.5
粒界腐食	5	1	2		8	4.9
すきま腐食	1				1	0.6
疲労による割れ	7	5	1	1	14	8.5
高温酸化腐食	2	6			8	4.9
熱応力割れ	1				1	0.6
バクテリア腐食		1			1	0.6
潰食・脱亜鉛腐食			2		2	1.2
水素脆性		5			5	3.0
低融点腐食		1			1	0.6
合計	107	49	9	1	166	100
比率(%)	64.5	29.5	5.4	0.6		

* 向井喜彦 (Yoshihiko MUKAI), 大阪大学, 工学部, 溶接工学科, 向井研究室, 教授, 工学博士, 溶接工学

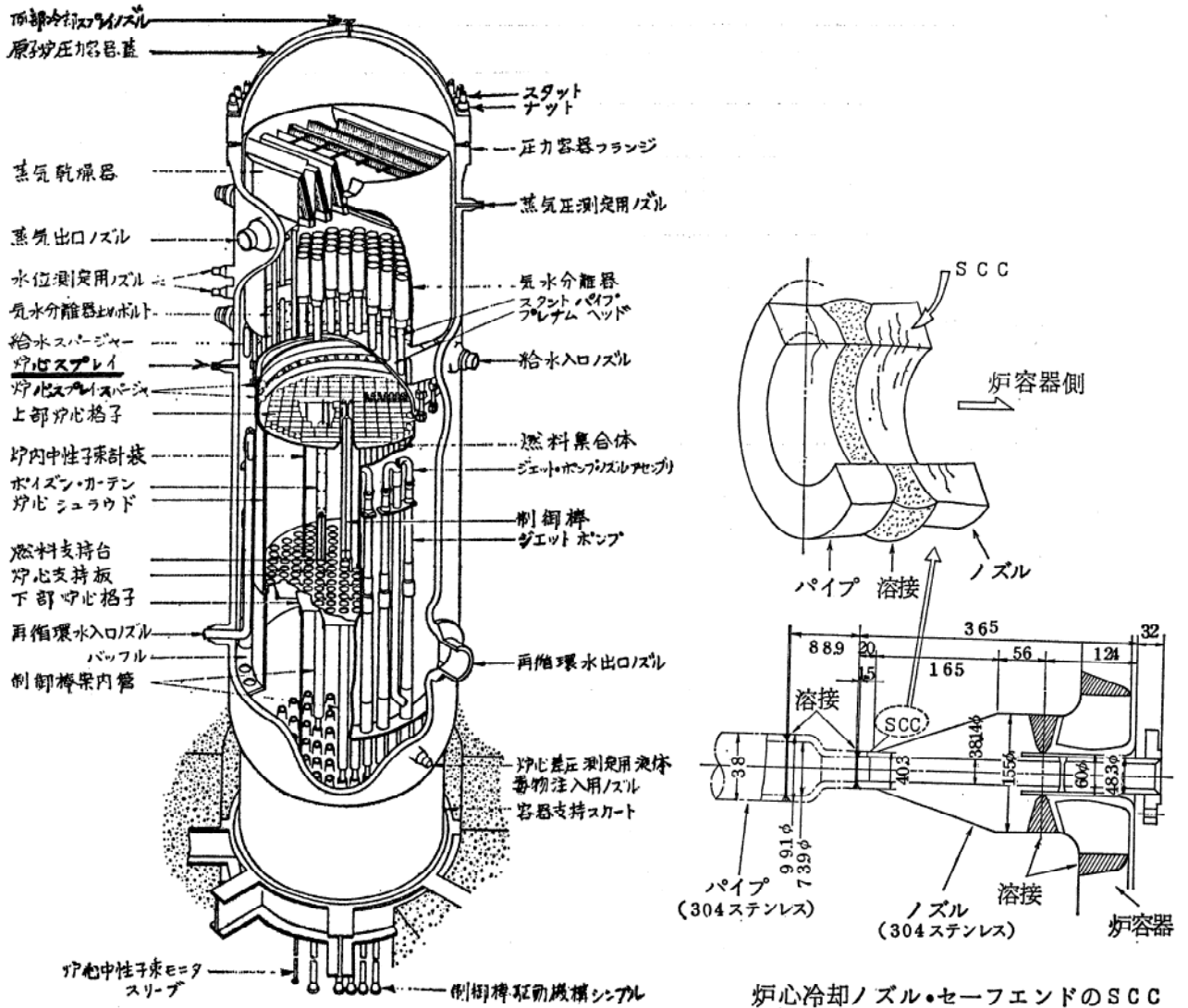


図1 原子炉における応力腐食割れ (SCC) の例

裂を起こすまでの残留寿命を予測することがきわめて重要な課題となる。寿命予測のための基礎資料としてはき裂の伝播速度の評価である。

高強度材料のき裂伝播速度の評価に対してはぜい性破壊の領域で発達した応力拡大係数(K)によって整理する試みがなされかなりの成果をあげてきている。しかしステンレス鋼のような降伏点の低い材料の場合にこの概念を適用するに当っては、種々の制約を受け難解であるので現在までほとんど検討されていない。

そこでこの問題を AISI 304 ステンレス鋼の 42% MgCl₂ 沸騰水溶液中における SCC を例にとって、詳細な研究を行った所、破壊力学的取扱いが可能であること、およびかなりの精度でき裂長さの経時変化を計算により推定できるこ

との見通しを立てるに至った。図3は基本特性としての伝播速度とKとの関係であり、Kが上昇していく場合と下降していく場合とで同じ速度を示さない所が生ずるが、これは分岐したき裂の実効K値と単一き裂の実効K値とが異なることによるものである。この基本特性をもとにして、各種の力学的条件を配慮し、溶接板の溶接残留応力による SCC き裂伝播寿命を計算で求め実験結果と対比したのが図4であり、きわめて高精度に寿命推定のできる事がわかる。

今後は上述の 42% MgCl₂ 水溶液中で確立した寿命推定のための概念を社会的にも最も重要と思われる高温高压水中での問題に適用していき、その推定理論を確立すべく、図5に示すオートクレープ付きの SCC 試験機を設置して

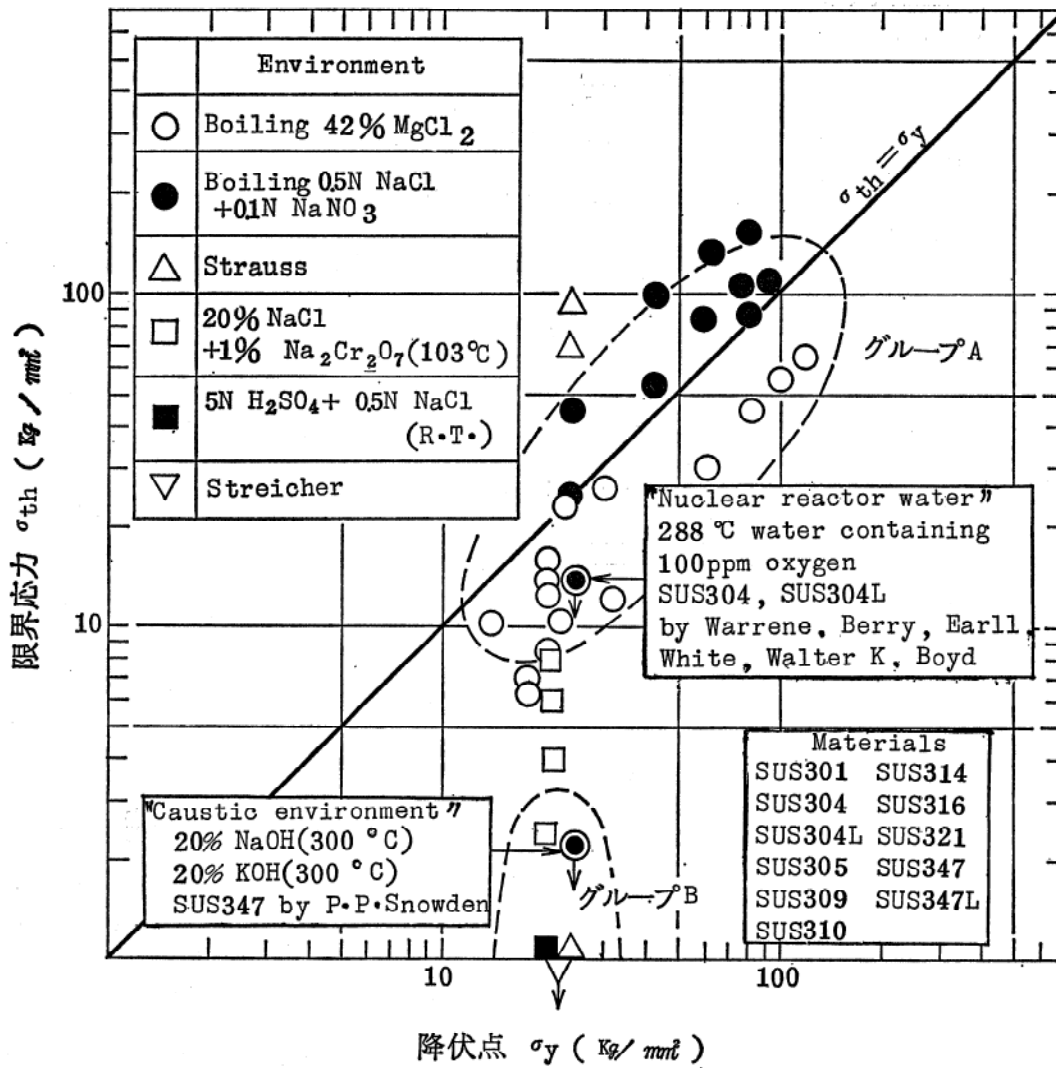


図2 ステンレス鋼の降伏点と応力腐食割れ限界応力との関連性

目下実験研究中である。

将来は更に進んで各種の現象を網羅し、環境

破壊現象全般にわたっての寿命推定理念の整理と一般化をすべきであろう。

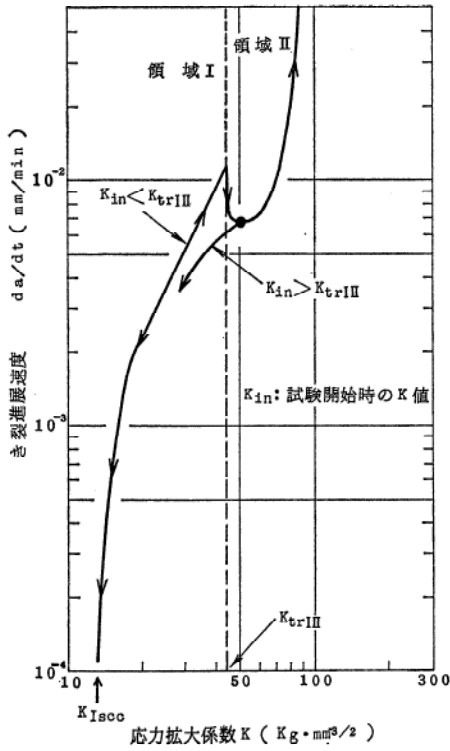


図3 304 ステンレス鋼の42% MgCl₂ 沸騰水中における SCC き裂伝播速度と応力拡大係数との関係

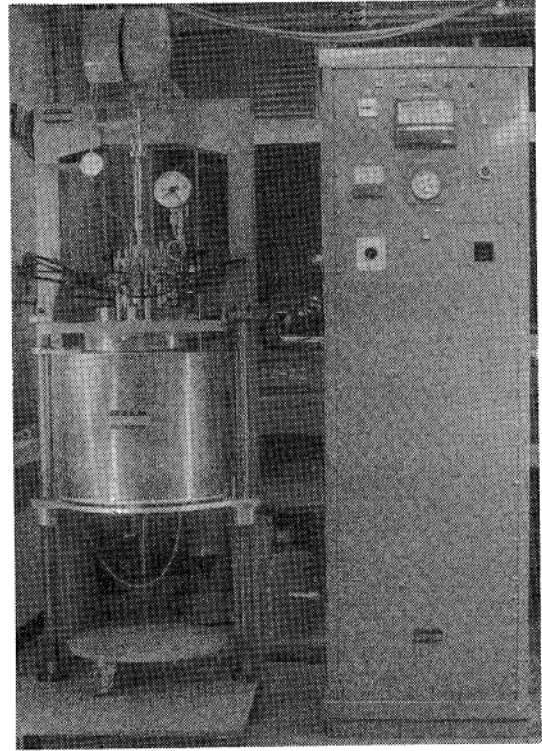


図5 高温高圧水中での定荷重 SCC 試験機

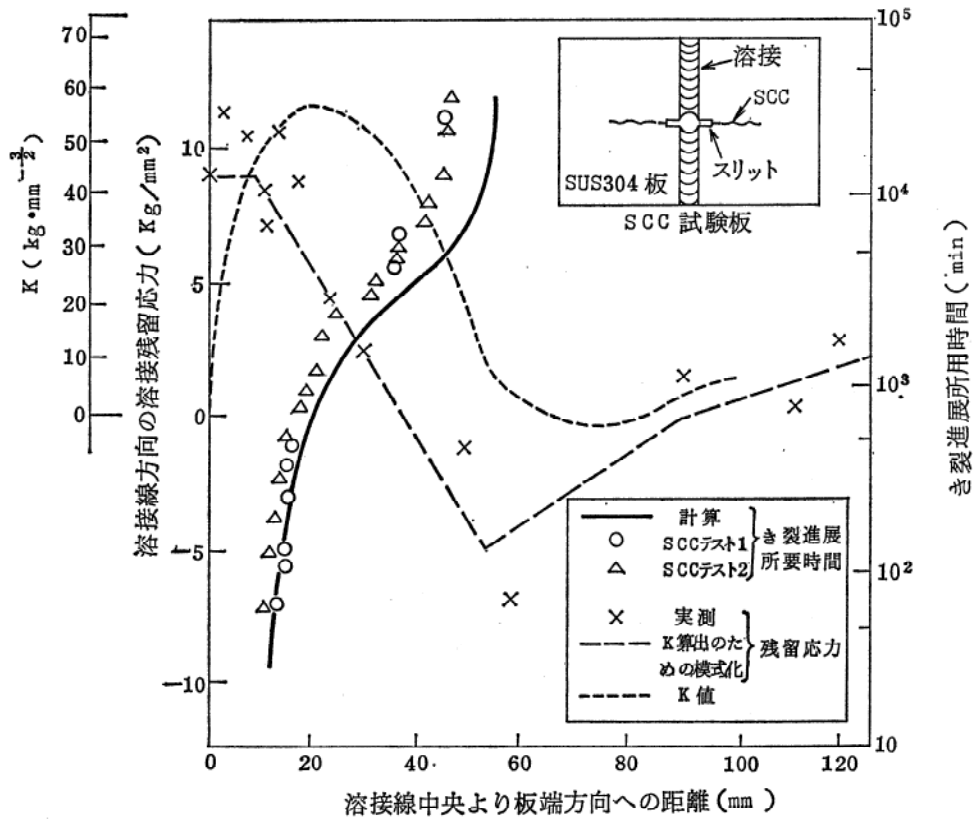


図4 溶接残留応力による応力腐食割れの進展長さの経時変化の推定 (42% MgCl₂ 沸騰水溶液中)