

実施課題番号 : 2007B1941  
実施課題名 : 放射光 CT によるステンレス鋼中 SCC き裂の検出とサイジング  
実施責任者  
所属機関及び氏名 : 財団法人発電設備技術検査協会  
溶接・非破壊検査技術センター 中東重雄  
共同実験者 : 兵庫県立大学 山本厚之、大西陽子  
角谷英剛、藤尾和樹  
寺澤倫孝  
財団法人高輝度光科学研究センター 梶原堅太郎  
使用ビームライン : BL19B2

## 実験結果

### 目的

原子力発電プラントをはじめ多くの産業分野における非破壊検査技術、特に超音波探傷試験 (UT) は、設備の健全性評価の基礎となる主要な技術の一つである。UT では検査対象部位に超音波を送信し、内部にき裂等の欠陥が存在するとそこで超音波が反射し、エコーとして検知できることを利用し、き裂の有無や寸法を評価している。UT の欠陥寸法精度は、欠陥部位を切断して評価するが、応力腐食割れ (SCC) のような割れ (き裂) は、3 次元的に複雑に分布しており、切断試験のように 2 次元面測定では誤差が大きくなる懸念がある。一方、実用鋼として広く用いられているニッケル基合金やステンレス鋼溶接部の UT では、溶接組織の影響を受けエコーの発生源の特定が困難なことや、得られた探傷信号の解析も困難であることから、エコー発生源の推定や探傷信号の解析を支援するため、また UT の研修や技術訓練の教材として用いることを目的とした「UT 解析シミュレーション法」の開発が進められている。この「シミュレーション」では、当該材料の物性値をはじめとして鋼中き裂の形状や分布状態、き裂の幅等に関する入力情報が重要、かつ不可欠であるが、これら鋼中き裂に関する知見がほとんどないのが現状である。

そこで、本研究では UT によるサイジング精度の評価および「シミュレーション」のより高精度化および高度化を目的に、鋼中き裂に関する知見を得るため、前回実施したニッケル基合金溶接金属中の SCC き裂分布測定 [1] に引き続き、今回はステンレス鋼に生じる代表的な SCC である粒界型応力腐食割れ (IGSCC) および粒内型応力腐食割れ (TGSCC) について、CT イメージング法により測定を行なった。

### 方法

ブロック状のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L に MgCl および高温高圧 NaOH 溶液中にて TGSCC および IGSCC をそれぞれ付与した。測定用試験片は、Fig.1 に示すように SCC き裂を中心に幅約 2mm、長さ約 20mm の角状の小片を切り出し、その後、エメリー研磨により約 0.9mm ~ 1.5mm の丸棒状測定試験片に仕上げた。測定は SPring 8 産業用ビームライン BL19B2 ハッチ 1 を使用した。用いた放射光 (SR 光) エネルギーは、前回同様 37 keV である。Table 1 に測定条件を前回の場合と比較

して示す。カメラ長は 100mm、200mm および 300mm で測定した。またビーム照射範囲は 27mm×27mm、CCD カメラの画素数は 2600×4000 ピクセルで、実効ピクセルサイズは約 2.5 μm である。また測定は、前回のハッチ 3 からハッチ 1 に移行したことにより SR ビーム強度が強くなり、試料は 0.2°ピッチで 0 - 180°まで回転させて撮影した。1 フレームの露出時間は 1.2 秒で撮影した。得られた X 線透過像は、前回と同様 Filtered Back Projection 法により再構成し、試料内部のき裂の 3 次元イメージ像を得た。

## 結 果

ステンレス鋼に付与した TGSCC および IGSCC の光学顕微鏡による観察結果を Fig.2 に示す。SCC は薬品により付与したが、得られた SCC は粒内を貫通した割れ、いわゆる TGSCC と、粒界に沿った割れ、IGSCC であることをそれぞれミクロ組織観察により確認した。Fig.3 には、作製した測定用丸棒試験片の外観を示す。TGSCC および IGSCC とともに Fig.2 に示すように割れの広がり大きいことから試験片作製中、割れの部位から剥離や脱落が生じ、最終的に作製した試験片は、直径約 0.9mm から 1.5mm となった。なおニッケル基合金溶接金属の場合は、平均約 0.7mm から 1.0 mm であった。作製した丸棒試験片は CT イメージング測定装置のゴニオメータ上の試料ホルダーに垂直に設置し、測定に供した。

カメラ長については IGSCC 試料を用いて 100、200 および 300mm でそれぞれ撮影し検討した。その結果、300mm の場合がもっとも鮮明な構成像が得られた。従って以後すべての試料についてカメラ長は 300mm に設定した。結果の一例を Fig.4 に示す。TGSCC の場合は、表面から 3654 μm、4634 μm および 5600 μm の深さ位置、IGSCC の場合は表面から 1692 μm、2632 μm および 3196 μm の深さ位置のそれぞれの横断面構成像である。いずれもき裂が枝分かれしながら複雑に鋼中を進展してゆく様子が鮮明に捉えられている。観察された TGSCC き裂の中で最も幅の広いき裂は、約 150 μm、もっとも細かいき裂幅は約 6 ~ 10 μm であった。一方 IGSCC の場合は、最も幅の広いき裂は約 230 μm、最も狭い幅のき裂は、約 6 ~ 10 μm であった。また TGSCC は比較的直線的で単調なき裂であるのに対し、IGSCC き裂は複雑に分岐しながら進展していた。IGSCC のき裂進展は、隣接する結晶粒の方位や粒界の性状等が深く関与することが知られているが、TGSCC の場合、どのようなメカニズムによってき裂の進展経路が決定されるのか興味のあるところである。また Fig.5 には Volume Viewer 法により鋼中き裂の 3 次元再構築像例を示した。この手法では、試料の任意の位置における任意の X、Y、Z 面でカットした面の 3 次元像を得ることができ、より分かりやすいき裂分布像の情報が得られる。このような表示法は、「シミュレーション」へのき裂形状の直接入力に有効である。

今回の実験により、代表的な実用鋼であるステンレス鋼に生じた IGSCC および TGSCC についての鋼中き裂の鮮明な 3 次元分布像が得られた。前回実施した Ni 基合金溶接金属中の SCC き裂分布情報と合わせ、実用鋼に発生する SCC についての基礎的なき裂に関する知見を得ることができた。

一方、課題もいくつか見出された。SCC き裂は、同一溶解炉材料、同一環境条件であっても生じたき裂の形態が顕著に異なることがあり、少数の個体データで SCC き

裂の分布や形状を分類、特徴化することは問題があることがわかった。したがって今後さらに数多くのき裂試料について測定を行い、データ集積を図る必要がある。また、き裂の進展挙動について興味ある事象が得られた。今後 3 次元的なき裂分布と隣接結晶方位との相関等と合わせて調べることにより SCC き裂進展挙動の解明に大きく寄与できると考える。

## 引用文献

[1] 平成 18 年度先端研究施設戦略活用プログラム成果報告書 SPring-8 戦略活用プログラム (2006B) pp. 204 - 206

Table 1 CT イメージング測定条件と前回条件との比較

	NI合金SCC	SUS-SCC
ビームライン	BL19B2	
使用ハッチ	ハッチ 3	ハッチ 1
SR光エネルギー	37 keV	
ビーム照射範囲	12×10 mm	2.7×2.7 mm
カメラ長	410, 800 mm	100 - 300 mm
ピクセル数	1024×1024	4000×2600
実効ピクセルサイズ	約 12 μm	約 2.6 μm
撮影条件	0 - 180° 回転	
撮影ピッチ	0.5°	0.2°
露出時間	3 秒	1.2 秒
復元手法	Filtered Back Projection 法	

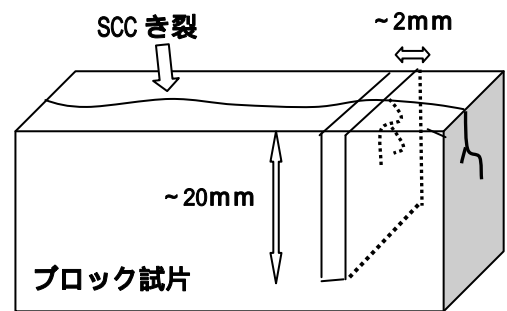


Fig.1 測定用試験片の採取方法

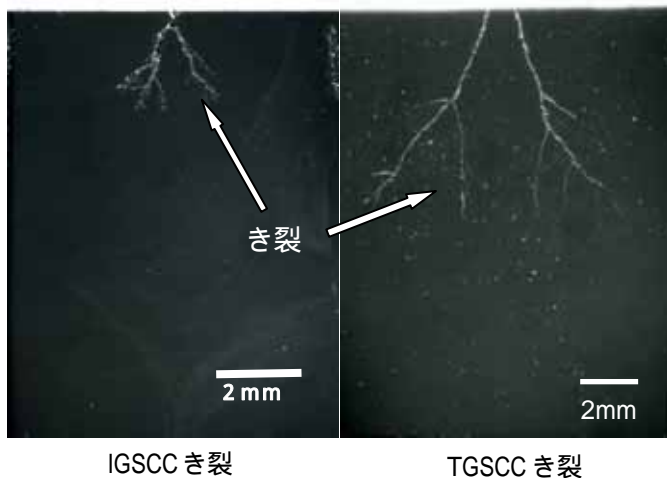


Fig.2 オーステナイト系ステンレス鋼の SCC き裂 (光学顕微鏡写真)



Fig. 3 測定用試料外観

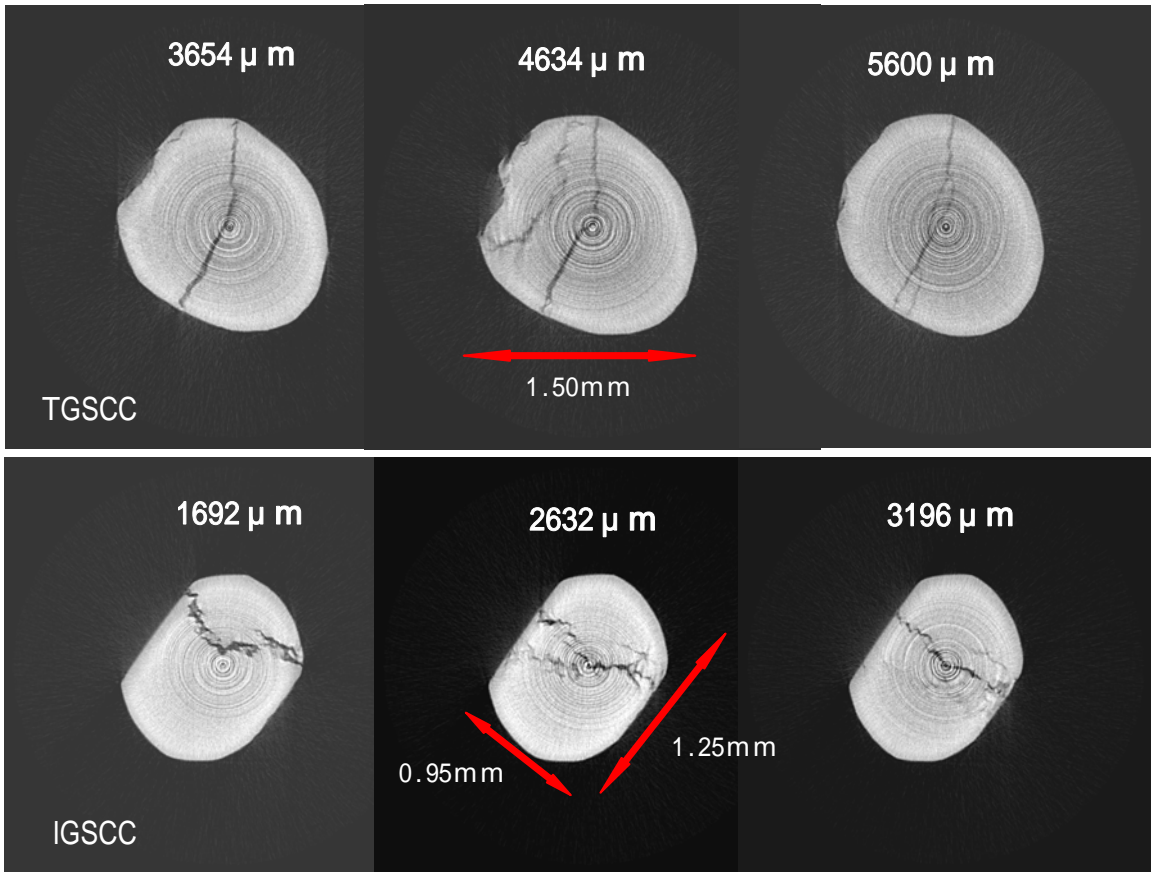


Fig.4 ステンレス鋼中各深さ位置での TGSCC と IGSCC の横断面構成像  
 SPring 8 BL19B2 Hatch 1(37keV,Camera Length:300mm)

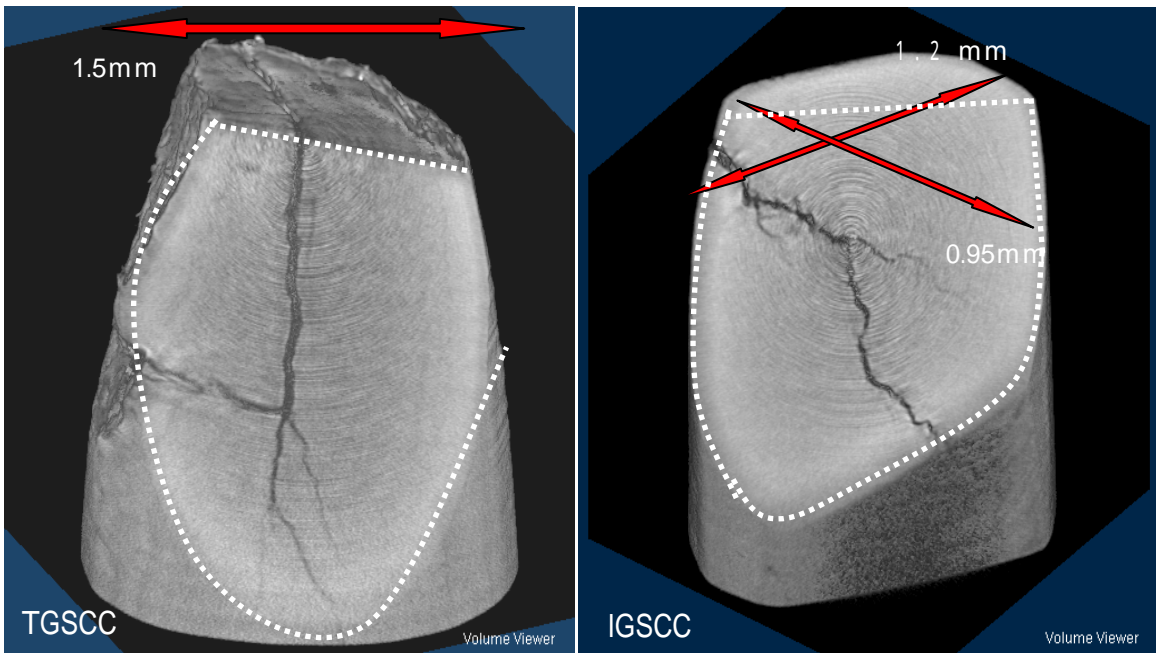


Fig. 5 オーステナイト系ステンレス鋼中 SCC き裂の Volume Viewer 像