

## 放射光 CT によるステンレス鋼溶接金属内の応力腐食割れき裂の検出 Detection of cracks due to stress corrosion cracking in SUS316 steel weld metals by synchrotron radiation CT imaging

中東重雄<sup>a</sup>, 藤城智之<sup>b</sup>, 長谷川忠之<sup>a</sup>, 寺澤倫孝<sup>b</sup>, 山本厚之<sup>b</sup>, 梶原堅太郎<sup>c</sup>  
Shigeo Nakahigashi<sup>a</sup>, Tomoyuki Fujishiro<sup>b</sup>, Tadayuki Hasegawa<sup>a</sup>, Mititaka Terasawa<sup>b</sup>,  
Atsushi Yamamoto<sup>b</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>c</sup>

<sup>a</sup> 財団法人発電設備技術検査協会, <sup>b</sup> 兵庫県立大学, <sup>c</sup> (財)高輝度光科学研究センター  
<sup>a</sup>JAPEIC, <sup>b</sup>University of Hyogo, <sup>c</sup>JASRI

原子力発電プラントで多く用いられているステンレス鋼の高温高圧純水環境下における応力腐食割れ(SCC)について、最近新たに見出された母材から溶接金属へ進展した SCC き裂を CT イメージングにより観察した。母材部の SCC は、粒界割れで、そのき裂幅は広く、比較的単調に進展しているのに対し、溶接金属内に進展したき裂は、その幅は狭く、また広範囲に分岐しながら進展していることが明らかになった。

キーワード： ステンレス鋼、高温高圧純水中、SCC、3次元 SCC き裂像、CT イメージング

### 背景と研究目的：

原子力発電プラントにおける配管、機器や溶接構造物の経年劣化による損傷の多くは、応力腐食割れ(SCC : Stress Corrosion Cracking)に起因していると言っても過言ではないことから、それら SCC き裂の検出および欠陥サイズの測定(サイジング)精度の向上は、プラントの安全性および信頼性の確保の観点から重要な課題である。一般にこれら欠陥(割れ)は、内部での欠陥であることから非破壊的手法によって調べられることが多く、その代表的な手法として超音波を用いた探傷法(UT : Ultrasonic Testing)がある。そこで我々は、UT による欠陥検出技術とサイジング精度の向上を目的に計算機による UT シミュレーションコードの開発(UT シミュレーション)を行っている。この UT シミュレーションでは、欠陥からの超音波反射(エコー)を正確にシミュレートする必要があるが、そのためには被検体中の欠陥の3次元形状や分布状態を正確に知る必要がある。

対象としている SCC き裂は、その形状や分布が複雑であることが知られている。これまでそれら割れについての情報は、切断試験による断面2次元写真等により得ていたが、この方法では3次元的情報が得られない。そこで筆者らは、2006年よりこれまで3回(課題番号 2006B0215、2007B1941、2008A1901)にわたり放射光 CT イメージング法により Ni 基合金溶接金属中[1,2,4]およびステンレス鋼母材の SCC き裂[3,5 - 8]について、それぞれ鮮明なき裂の3次元形状と分布像を得、UT シミュレーションの3次元モデルの開発と高度化への道を開いた。しかし得られた SCC き裂データは、マイクロ組織等の影響を受け、形状や分布パターンが多様であることか明らかとなり、入力情報としてパターン化するなどの規格化が必要であることが新たな課題として見出された。

一方、オーステナイト系ステンレス鋼の高温高圧純水環境下の SCC に関し、これまでまったく報告がなかった新しいタイプの SCC が最近実機原子力発電プラントで見つかった。その SCC は、溶接近傍母材部の溶接熱影響部(HAZ)から溶接金属内へ進展する SCC と、溶接金属内から発生した SCC である。これまでの事例では SCC は、溶接金属近傍で滞留するか、溶接金属に沿って進展するかのいずれかで、溶接金属内には進展しなかった。また溶接金属内での SCC はまったく見られなかった。このような母材から溶接金属内へ、また溶接金属内の SCC き裂の UT による検出は、凝固組織の影響や母材と溶接金属の音速が異なること等により検出が非常に困難であり、特にサイジングについてはどの程度の精度が得られるか予想できないというのが現状である。このような場合、UT シミュレーションの適用は、測定条件の事前検討や超音波伝搬経路、反射エコーの解析の補助ツールとして有用であり、さらには教育・訓練等の教材としても有用であることから、その完成が急がれる。

本研究では、UT シミュレーションのより高度化を目的に、最近新たに見出されたオーステナイト系ステンレス鋼の母材 HAZ から溶接金属へ進展した SCC き裂と溶接金属内の SCC き裂に関する情報を得るため放射光 CT イメージングによる測定を行った。

#### 実験：

供試材は、JIS 規格のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304(SUS304 鋼)で、溶接金属部に応力集中が生じやすいワインカップ状の溶接継手を作製し、SCC 付与試験ブロックを作製した。SCC は高温高圧純水環境下で付与し、SCC 付与後、き裂を含む約 10mm×約 20mm×約 50mm 長さの試験片を切り出し、き裂を中心に約 3mm×1mm×20mm 長さの柱状試験片を採取した。その後、平均直径約 2mm の丸棒状測定試験片に仕上げた。図 1 に測定用丸棒試験片の外観を示す。CT イメージング測定は、SPring-8 放射光施設の産業利用ポート BL19B2 を用いた。測定に用いた SR 光のエネルギーは、37keV である。図 2 には、測定に用いた CT イメージング測定装置の外観を示す。SR 光は、Si の(111)面を利用した 2 結晶分光器を通過した後、試料を透過し、蛍光板にて可視光に変換され CCD カメラで測定、記録される。使用した実験ハッチは、光源(バンディングマグネット)から最も近いハッチ 1 を使用した。ビームの照射範囲は、2.7×2.7mm、CCD カメラの実効ピクセルサイズは、約 2.9 $\mu$ m である。またカメラ長は、300mm とした。測定は、丸棒試験片をサンプルステージにコンパウンドで固定し、付設の試料位置・回転軸調整用カメラにて位置・回転軸調整を行った。撮影は、試料を 0° から 180° まで 0.1° ピッチで回転させ、0.8 秒/フレームで透過像撮影を行った。得られた X 線透過像は、Filtered Back Projection 法(解析コード Image-J)により 3 次元像に再構築した。

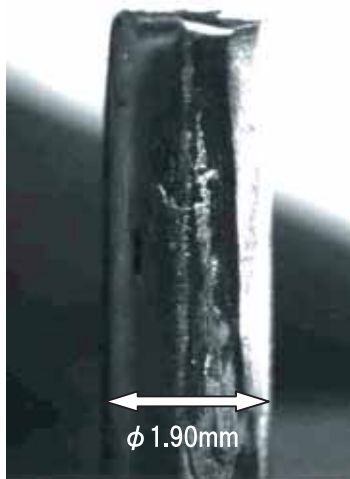


図1 測定用丸棒試験片外観

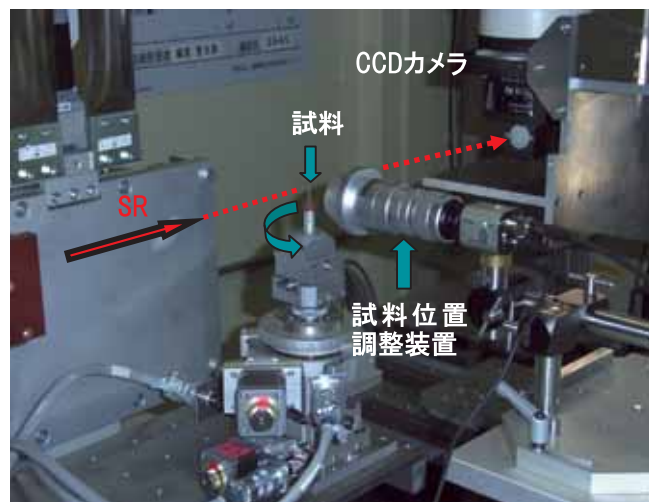


図2 CTイメージング測定装置外観

#### 結果および考察：

SUS304 鋼の光学顕微鏡によるマイクロ組織写真を図 3 に示す。き裂は溶接金属近傍の溶接熱影響部(HAZ)から溶接金属に沿って進展し、ワインカップ状の溶接金属くびれ部から溶接金属内に進展している。このようになき裂進展経路は、溶接金属形状と溶接入熱条件を選定することによりある程度制御が可能である。母材部のき裂はマイクロ組織観察の結果、粒界割れであり、溶接金属部内のき裂はデンドライト組織の粒界に沿った割れであることが確認された。また母材部と溶接金属内のき裂進展方向は、途中溶接金属形状に沿って屈曲・進展している部位を除き、ほぼ同じ方向である。図 4 には、母材と溶接金属境界部近傍の SCC き裂の CT イメージング構成像結果を示す。横断面 (a) - (d) および縦断面 (e) - (f) 構成像より、母材部のき裂は、溶接金属部内のき裂に比べき裂幅が比較的広く、単調に進展しているが、溶接金属

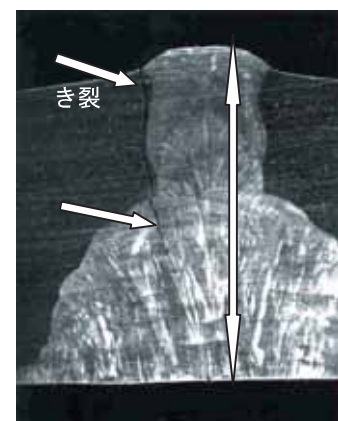


図3 試料のマイクロ組織

内に進展したき裂はその幅は細くなり、複雑に分岐していることが (g) に示す Volume viewer 像からも明確にわかる。また溶接金属内のき裂の形態は、3次元再構成像 (h) より Ni 基合金溶接金属内[1]やステンレス鋼 SUS316L の TGSCC で見られた形態と酷似しており[3]、帯状となって進展していることがわかる。

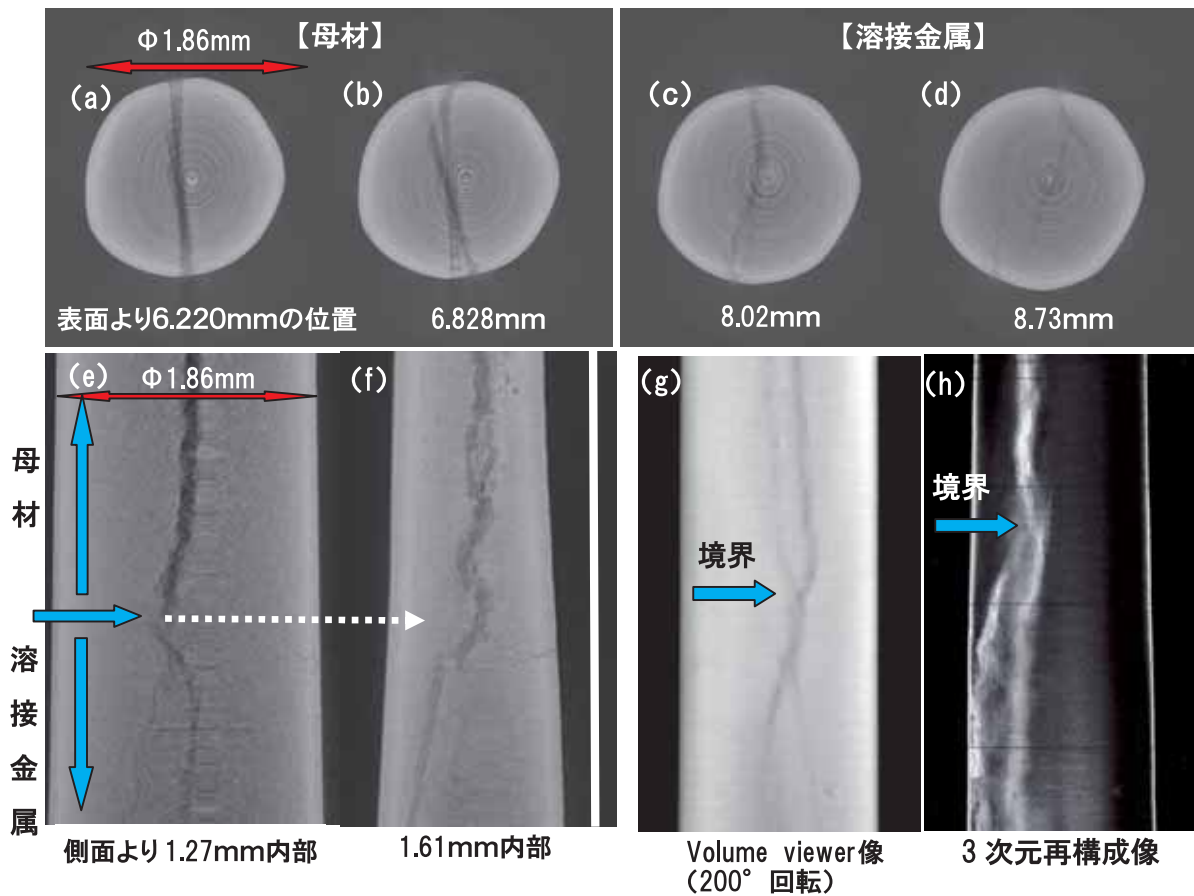


図4 母材から溶接金属へ貫通した SCC き裂(SUS304 鋼)の CT イメージング像

今回の測定により母材から溶接金属内へ進展した SCC および溶接金属内の SCC についての情報が得られ、これによりこれまでオーステナイト系ステンレス鋼で報告されたすべてのタイプの

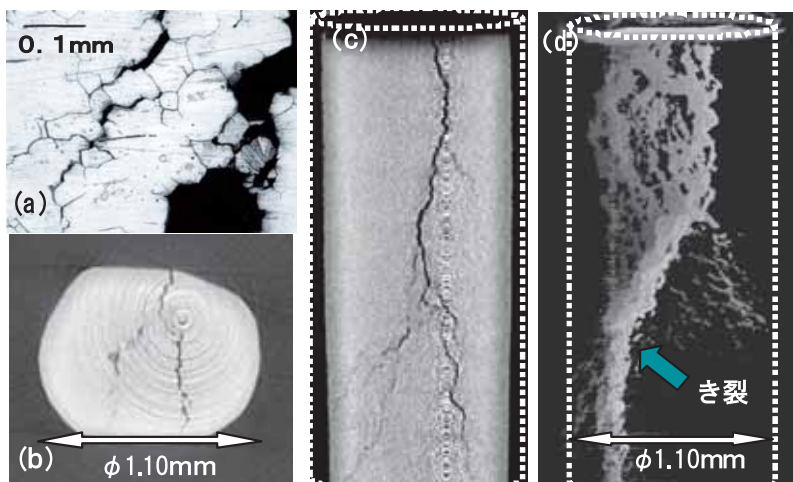


図5 ステンレス鋼 SUS316L の IGSCC  
 (a)光学顕微鏡像 (b)横断面像(表面から 831  $\mu\text{m}$ 位置)  
 (c)縦断面像(側面から 620  $\mu\text{m}$ 位置) (d)3次元再構成像

SCC き裂についての情報を得ることができた。母材における代表的な SCC である粒界型 SCC では、図5 (a) の光学顕微鏡写真に示すように、き裂は粒界に沿って進展し、CT イメージングの構成像 (b)、(c) ではき裂は、複雑に、しかも屈曲しながら進展していた。(d) は3次元再構成像であるが、き裂は捩れながら複雑に進展している様子が鮮明にわかる。またこのき裂の幅は、結晶粒径に対応していることが明らかになった[7-9]。このよう

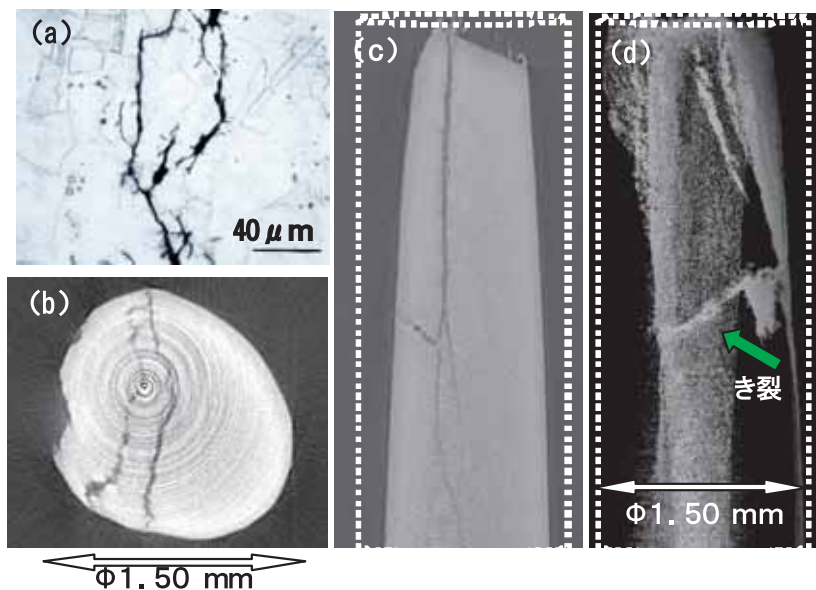


図6 ステンレス鋼 SUS316L の TGSCC  
 (a) 光学顕微鏡像 (b)横断面像(表面から 1044  $\mu\text{m}$ の位置)  
 (c)縦断面像(側面から 279  $\mu\text{m}$ の位置) (d)3次元再構成像

な複雑なき裂展経路は、き裂のある粒界に相対する結晶粒の方位や方位差等に深く関与していると考えられる。また同じ母材の SCC である粒内型 SCC は、図6に示すように粒界とは無関係にマトリックス内を直線的に進展している。CTイメージング横断面構成像 (b) と縦断面構成像 (c) によればそれらき裂はほとんど分岐せず、直線的に進展していることがわかる。き裂幅は、3次元再構成像 (d) に示すようにある幅を有しているが、比較的単調に進展している [7-9]。このような粒内型 SCC のき裂進展挙動は、すべり線や双晶など組織の構造欠陥の影響等が大きく関与していると考えられる。

#### 今後の課題：

UT シミュレーションモデルを構築する上で必須である SCC き裂に関する入力データについて、今回の測定によりこれまで原子力発電プラントや化学プラントで報告されたすべての SCC パターンについての情報を得ることができた。これにより、より高度化された UT シミュレーションコードと3次元 UT シミュレーション開発の技術的見通しが得られた。しかし、得られた SCC き裂データが凝固組織やマイクロ組織等の影響を受け、また位置により形状や分布が著しく異なることが明らかになったことから、き裂の形状や分布の標準化、パターン化が必要であるという課題が残った。さらに UT シミュレーションの使用にあたっては、検証が必須であり重要である。それには UT 測定を行なった試料について UT シミュレーション解析を行い、その結果と CT イメージング測定による結果とを直接比較できれば確実である。そのために UT 測定に必要な厚さ数 10mm 以上の非破壊的欠陥検出法の開発が課題となる。

#### 参考文献：

- [1] 中東重雄 他：平成 18 年度 SPring-8 大型先端研究施設戦略活用プログラム成果報告書(2006B)、p.204(2006B0215)
- [2] S.Nakahigashi et al：SPring-8 Research Frontiers 2007,p.158(2008), JASRI
- [3] 中東重雄 他：平成 19 年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書(2007B1941)、p.191
- [4] 中東重雄 他：SPring-8 疲労損傷評価研究会平成 19 年度報告書、p.44、平成 20 年 5 月
- [5] 中東重雄 他：平成 20 年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書(2008A1901)、p.227
- [6] 中東重雄 他：日本原子力学会 2008 年秋の大会、Q08、高知工大
- [7] 中東重雄 他：(財)発電技検 技術レビューVol.3、p.31、2007
- [8] 中東重雄 他：(財)発電技検 技術レビューVol.4、p.22、2008
- [9] 中東重雄 他：NDE シンポジウム 2008 予稿集、(財)発電設備技術検査協会、p.94、2008、12