

# 原子炉炉内構造物に対する水中遠隔検査技術の開発

## Development of Underwater Remote Inspection Technique for Nuclear Reactor Core Internals

(株)日立製作所	青池 聡	Satoru AOIKE	Nonmember
日立GEニュークリア・エナジー(株)	黒澤 孝一	Koichi KUROSAWA	Nonmember
日立GEニュークリア・エナジー(株)	大森 信哉	Shinya OHMORI	Nonmember
日立GEニュークリア・エナジー(株)	田中 賢彰	Masaaki TANAKA	Nonmember

When a crack is detected in nuclear reactor core internals, it is important to survey details of a crack. In this study, to survey nuclear reactor core internals simply, new electrolytic etching method that applies “Gel Electrode” and underwater microscope were developed. To apply “Gel Electrode”, we can see fusion boundary and grain boundary after electrolytic etching. To use underwater microscope, we can see surface figures of nuclear reactor core internals directly without taking boat samples or replicas that transcribe surface shape. By applying these methods, the investigation labor can be reduced greatly.

**Keywords:** Gel Electrode, Electrolytic Etching, Core Internals, Fusion Boundary, Grain Boundary

### 1. 諸言

原子炉炉内構造物にひびが発見された場合、ひびの発生位置や進展経路を確認することは、ひびの発生原因の究明にとって重要である。ひびが発見された場合の詳細調査については、ひび位置周辺のポートサンプル採取やレプリカ採取が従来の詳細調査として行われてきた<sup>[1]</sup>。ポートサンプルやレプリカによる詳細調査は、試料の採取やホットラボでの拡大観察に長時間を要する。また、表面形状をレプリカに転写するには、調査対象の形状に合わせたレプリカ採取容器の製作が必要であるため、装置の設計製作時間が長時間となる。このため、ひびが発見された場合に迅速に詳細調査が可能な検査技術が求められている。そこで本研究では、水中に位置する原子炉炉内構造物の表面を簡易に詳細調査することを目的に、水中遠隔検査技術の開発を行った。

ひびの発生位置や進展経路の詳細調査については、電解エッチングにより溶接境界や結晶粒界を視認可能とする技術として、電解エッチング液をゲル状に固めた「ゲル電極」を用いることでエッチング液の供給回収系統が不要な検査装置を開発した。

ひびの拡大観察については、最大 800 倍の拡大観察が可能な水中高倍率カメラを開発し、調査対象表面の直接観察により結晶粒界に対するひびの進展経路を確認できる検査装置を開発した。

本報では、ゲル電極を用いた電解エッチングにより溶接境界や結晶粒界を視認可能とした試験結果および水中高倍率カメラによるひび位置周辺の拡大観察結果について報告する。

連絡先: 青池 聡, 〒317-5811 茨城県日立市幸町 3 丁目 1 番 1 号, (株)日立製作所, 電話: (0294) 55-8190, E-mail:satoru.aoike.rg@hitachi.com

### 2. 水中遠隔検査技術の開発

#### 2. 1 ゲル電極を用いた電解エッチング技術 2. 1. 1 技術の概要

ゲル電極の概略図を Fig.1 に示す。ゲル電極は電解エッチング液を形状追従性に優れた多孔質材に含浸させた後でゲル状に固めたもので、多孔質材の内部に陰極が配置されている。多孔質材の周囲には、調査対象面に電氣的に接触する陽極が配置されている。ゲル電極を接触させることでエッチング液と調査対象面が接触し、ゲル電極内部の陰極と調査対象面が通電可能な状態となる。これにより、直流電流を通電して調査対象面を電解エッチングすることが可能となる。

液状のエッチング液を使用する従来の電解エッチング方法に比べて、エッチング液を調査対象面に保持する容器やエッチング液の供給および回収系統が不要となるため、検査装置の設計製作時間が短縮できる。さらに、ゲルと多孔質材は形状追従性に優れていることから、制御棒駆動機構ハウジング溶接部に代表される炉底部の曲面形状構造物に対しても、個々の電極形状を変更せずに適用することができる。

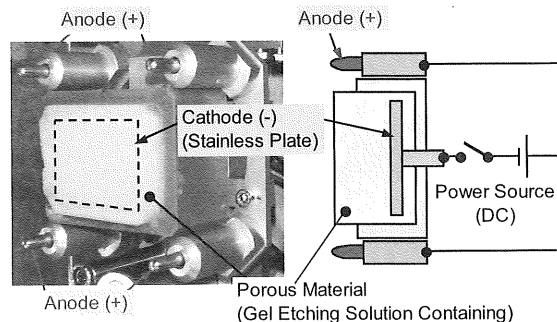


Fig.1 Schematic of Gel Electrode

## 2. 1. 2 溶接境界および結晶粒界の視認化

ゲル電極を用いた電解エッチングにより溶接境界や結晶粒界が視認できるかを試験により確認する。試験体の概略図を Fig.2 に示す。試験体は縦 150mm 幅 200mm の 600 合金 (JISG4902) 鋼板中央に 182 合金 (JISZ3224) と 82 合金 (JISZ3334) を肉盛溶接したもので、中央付近は鏡面に磨いている。ゲル電極を用いた電解エッチングは、試験体を水中に配置した後、縦 50mm 幅 70mm の範囲にゲル電極を接触させ、ゲル電極 (陰極) と試験体 (陽極) 間に直流電流を通電して試験体表面の電解エッチングを実施した。

ゲル電極を用いた電解エッチング後の試験体の外観を Fig.3 に示す。電解エッチングされた試験体表面は色調の差異により、600 合金と 182 合金、182 合金と 82 合金、82 合金と 600 合金の境界が明瞭に視認できる。182 合金と 82 合金の境界を拡大観察した結果を Fig.4 に示す。結晶粒界が選択的にエッチングされており、182 合金と 82 合金の結晶粒界や溶接境界が明瞭に視認できる。

以上の結果より、ニッケル基合金の母材 (600 合金) や溶接金属 (182 合金や 82 合金) の電解エッチングにゲル電極を適用した場合でも、溶接境界や結晶粒界を視認することが可能であると考えられる。

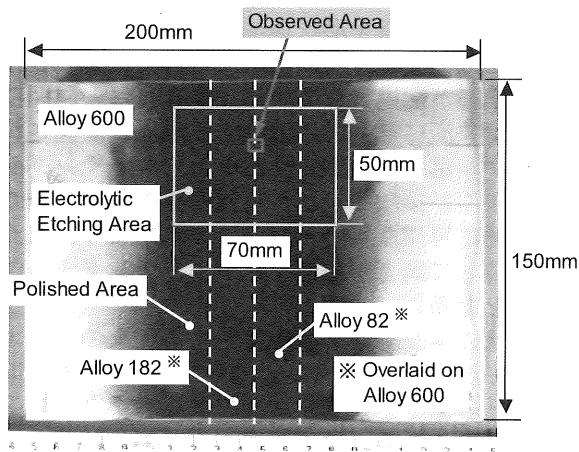


Fig.2 Schematic of Specimen

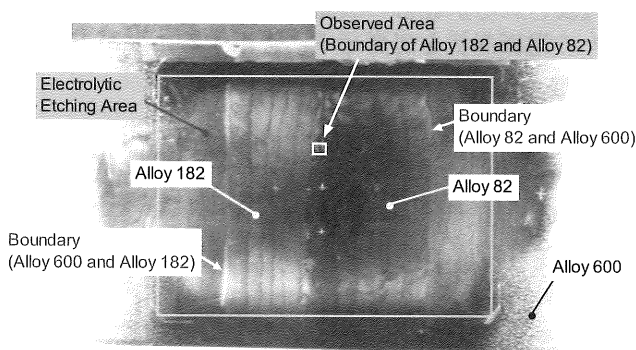


Fig.3 Specimen after Electrolytic Etching (Gel Electrode was applied)

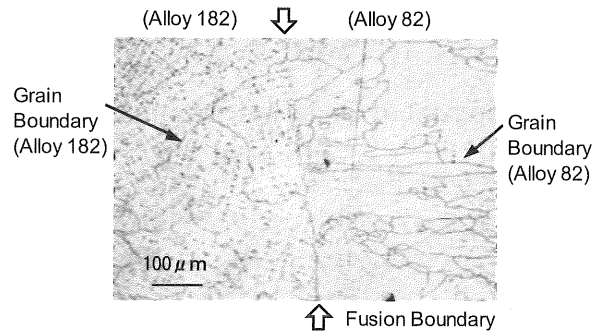


Fig.4 Grain Boundary after Electrolytic Etching (Gel Electrode was applied)

## 2. 2 水中高倍率カメラによる拡大観察技術

### 2. 2. 1 技術の概要

水中高倍率カメラの概略図を Fig.5 に示す。水中高倍率カメラは窓付きの防水容器内に 2 組のレンズと CCD カメラを配置したものであり、水中に位置する構造物の表面拡大像を直接撮影することができる。電解エッチング後の表面状態を直接拡大観察することで、表面のひびや結晶粒界を観察することが可能であるため、レプリカの採取工程省略による調査時間の短縮が可能となる。なお、カメラ寸法は観察部位周辺における干渉物の状況に応じて調整することが可能である。

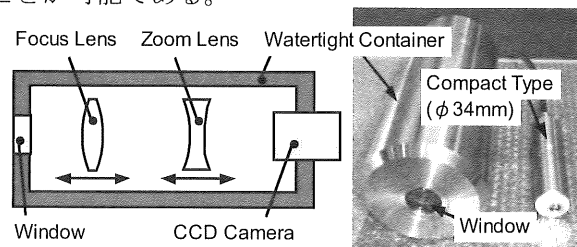


Fig.5 Schematic of Underwater Microscope

### 2. 2. 2 ひびの拡大観察結果

水中高倍率カメラで電解エッチング後の表面状態を拡大観察した結果を Fig.6 に示す。被写体はニッケル基合金の母材で、粒界型のき裂を導入した後で表面を鏡面に磨き、電解エッチングにより結晶粒界を視認化している。水中高倍率カメラによる水中での拡大観察により、ニッケル基合金の結晶粒界と粒界型のき裂を直接確認することができる。

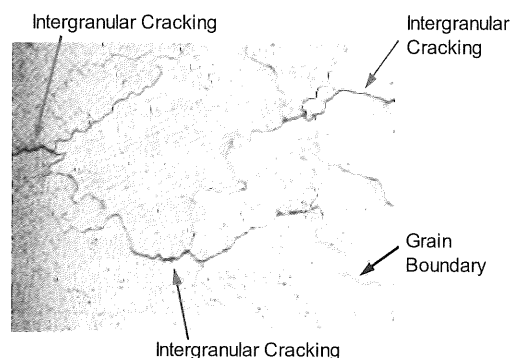


Fig.6 Grain Boundary and Intergranular Cracking (Underwater Microscope was applied)

### 3. 原子力発電プラントへの適用

#### 3. 1 概要

日本原子力発電株式会社殿東海第二発電所の第24回定期検査において実施された目視点検では、シュラウドサポートシリンダ内面にひび状の指示模様（以下、ひびと呼ぶ）が確認された<sup>[2]</sup>。シュラウドサポートシリンダの概略図を Fig.7 に、180° の V8 縦溶接線近傍で確認されたひびの例を Fig.8 に示す。Fig.8 に示したひびの近傍には V8 縦溶接線の境界が存在するが、シュラウドサポートシリンダの表面は供用運転中の高温水環境下で酸化しており、一面茶褐色の状態であるため目視による識別は困難であった。このため、溶接線近傍に電解エッチングを施し、溶接境界を視認可能な状態として、確認されたひびの位置が V8 縦溶接線内部であることを確認した。

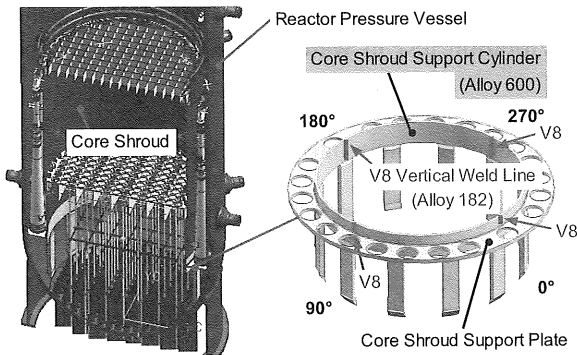


Fig.7 Schematic of Core Shroud Support Cylinder

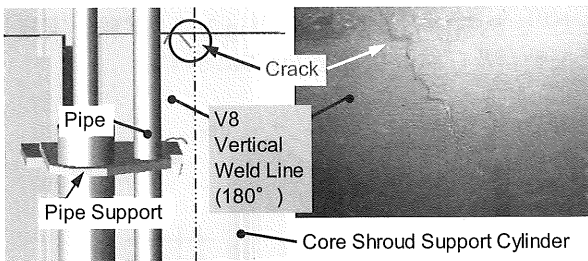


Fig.8 Example of Crack (Near V8 Vertical Weld Line)

#### 3. 2 電解エッチング手順および結果

ゲル電極を用いたシュラウドサポートシリンダ内面 V8 縦溶接線の電解エッチング手順について、概略図を Fig.9 に示す。V8 縦溶接線に対する電解エッチングでは、まず、施工領域の表面に付着している酸化皮膜を表面研磨により除去した。その後、縦50mm 幅 70mm の範囲にゲル電極を接触させて、ゲル電極（陰極）とシュラウドサポートシリンダ（陽極）間に直流電流を通电して V8 縦溶接線近傍の電解エッチングを実施した。

ゲル電極を用いた電解エッチングを適用した後の V8 縦溶接線の溶接境界を Fig.10 に示す。電解エッチング後のシュラウドサポートシリンダ内面は、やや白色を呈しており、電解エッチングした範囲が容

易に視認できる。電解エッチングした範囲を詳細に確認した結果、V8 縦溶接線の境界が明瞭に確認できた (Fig.10)。確認した V8 縦溶接線の境界に基づき、ひびの位置を再確認した結果、ひびの位置は V8 縦溶接線内部であることを確認した。

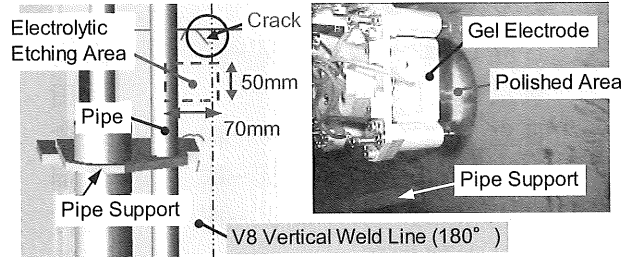


Fig.9 Schematic of Electrolytic Etching (Near V8 Vertical Weld Line)

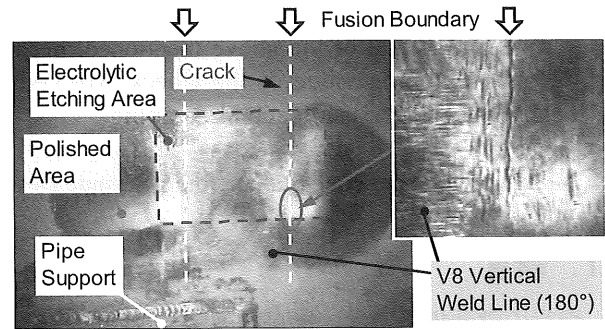


Fig.10 Fusion Boundary after Electrolytic Etching (V8 Vertical Weld Line)

### 4. 結言

原子炉炉内構造物に対する水中遠隔検査技術としてゲル電極を用いた電解エッチング技術と水中高倍率カメラによる拡大観察技術を開発し、以下に挙げる成果を試験により確認した。

- ・ ゲル電極を用いて電解エッチングすることで溶接境界や結晶粒界を視認することができる。
- ・ 水中高倍率カメラでニッケル基合金の結晶粒界と粒界型のき裂を直接確認することができる。

本研究で開発した技術は、装置の設計製作や実機調査に要する時間を軽減できることから、実機調査に適用することで迅速な詳細調査が可能になると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会, “レプリカ観察によるひび割れ部調査結果,” 原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会 (第7回) 配付資料, 参考 7-5, pp.90-94, (2003).
- [2] 日本原子力発電株式会社, “東海第二発電所 第24回定期検査の状況について シュラウドサポート溶接線付近のひび状の指示模様(その3),” (2009).