

BWR 環境下での渦電流モニタリングによる In-situ き裂進展評価の検討

In-situ Crack Evaluation using Eddy Current Monitoring in a Boiling Water Reactor Environment

東北大学	糟谷 高志	Takashi KASUYA	Non-Member
東北大学	奥山 武志	Takeshi OKUYAMA	Non-Member
東北大学	遠藤 久	Hisashi ENDO	Member
東北大学	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
東北大学	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大学	庄子 哲雄	Tetsuo SHOJI	Non-Member

Abstract This paper discusses the possibility of in-situ evaluation of crack propagation using Eddy Current Monitoring (ECM) system in a Boiling Water Reactor (BWR) environment. For the purpose, an ECM experiment was conducted at the System Safety Benchmark Facility (SSBF). The target for the monitoring was a large-scale pipe specimen made of austenitic stainless steels 304L, 316L, and carbon steel STS410, connected by weld joints of nickel based alloy 182. Slits were prepared at the Heat Affected Zones (HAZs) and weld lines from the inner surface of the pipe specimen. Eddy Current Testing (ECT) probes were arranged on the outer surface of the pipe specimen, and observed crack propagation of slits. In order to discuss the crack propagation quantitatively, numerical simulation of eddy current signals was also carried out. The numerical signals are consistent with the experimental ones, suggesting that the in-situ eddy current monitoring system has the capability to monitor the crack growth quantitatively.

Keywords : Eddy Current Monitoring (ECM), Boiling Water Reactor (BWR), Crack Propagation, Corrosion Fatigue
E-mail: kasuya@wert.ifs.tohoku.ac.jp

1. 緒言

原子力プラントが日本で初めて運転を開始して 30 年が経過した今、プラントの保全をめぐる動きは大きく変化しようとしている。それは原子力が発電コスト競争に打ち勝たなければならない状況になっており、電源確保と財産保護の観点及び経済性の観点から設備の点検、保守、補修、改良、更新をプラントライフサイクルを通して最適化することが求められているからである。

現在、日本機械学会の規格である発電用原子力設備規格維持規格 JSME S NA1-2002 においては、供用期間中検査によって発見された欠陥に対して欠陥評価（き裂進展評価、構造強度評価等）を行うことにより、安全が確保される範囲内において欠陥の存在を許容するという考え方が導入されている[1]。そのため、欠陥に対して高い検出能力と高精度なサイジング能力を有す検査手法が求められるようになったと同時に、発見されたき裂に対して定量的な進展

評価を行うことで、保全の合理化が促進されると期待されている。

一方、渦電流探傷試験法（Eddy Current Testing, 以下 ECT）は現在、加圧水型原子炉の蒸気発生器伝熱管等の薄肉部材における欠陥に対して、高精度なサイジング能力を有すことが確認されている[2-4]。そこで近年、数値解析に基づいたプローブ設計を行うことで、その適用分野の拡大が技術的観点から検討されている[5-7]。

ECT プローブを用いたモニタリング試験（Eddy Current Monitoring, 以下 ECM）は現在、疲労損傷の発生時期の同定を目的とした研究が幾つかなされている[8, 9]。しかし、検査において検出されたき裂の進展の監視を、原子炉等の高温環境下において ECT プローブを用いて試みた例はない。

以上を背景に、本研究では沸騰水型原子炉（Boiling Water Reactor, 以下 BWR）環境において ECM 試験を行い、き裂進展検知能力を議論することによって、その定量的評価手法として

の可能性を検討する。具体的には、BWR 模擬環境において検出されたモニタリング信号と、渦電流数値解析により求めたき裂進展による渦電流信号変移を比較することにより、ECM システムによるき裂進展の定量的評価を行う。

2. 渦電流モニタリング試験

2.1 実験概要

今回、東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター内のシステム安全裕度テストベンチ装置[10]を用いて、BWR 環境下における ECM 試験を実施した。Fig.1 に ECM システムの概略図を示す。用いた試験片は SUS316L、SUS304L、STS410 からなる管を Alloy182 を用いて溶接した構造をしている。管の大きさは長さ 1160mm、内径 50mm、外径 58mm であり、内部を温度 288°C、圧力 9MPa の水化学的に制御された模擬冷却水が流れている。初期き裂として、最大深さ 2mm、幅 0.23mm の周方向半楕円形き裂を各溶接線及び各熱影響部 (Heat Affected Zone, 以下 HAZ) に放電加工によって管の内側から導入した。

また、Fig.2 に今回用いたプローブの概観図を示す。各プローブは 2 つのセンサを有しており、各センサには 2 個の励磁コイルとその間に 1 組の差動検出コイルが配置されている。励磁コイルには内径 2mm、外径 12mm、高さ 6mm、巻き数 430turn のコイルを用い、また検出コイルには内径 2mm、外径 8mm、高さ 6mm、巻き数 258turn のコイルを用いた。各センサ内の 2 個の励磁コイルを互いに逆回りに電流が流れる構造をしており、この構造は厚肉部材裏面のき裂に対して高い検出能力を持つことが確認されている[5]。今回は高温環境下で用いることを考慮して、コイルの治具、ポビン及び銅線の被覆にはテフロンを使用した。各プローブは溶接線上及び HAZ 部上に、周方向の内面き裂に対して管の外側から測定するように 3 個設置し、またリファレンス用として SUS304L の母材に 1 個設置した。SUS304L の HAZ 部に設置されたプローブ内のセンサ A、B は、それぞれ Fig.1 に示される位置に配置され、き裂の進展をモニタリングしている。センサの励磁周波数は 5kHz,

20kHz, 50kHz, 100kHz とした。また、各センサのキャリブレーションは、各プローブを試験片上に設置し、冷却水を昇温した後に行った。

今回、試験片の上部と下部から引張り負荷を加えることによりき裂の進展を促進した。Fig.3 に負荷サイクルを示す。初期段階として、試験片に予き裂を導入するため応力比 $R = 0.2$ の三角波形の負荷 (864cycle) (図中①) を与えた。その後、応力腐食割れを促進するために台形波形の負荷 (図中②) を約 85 日間与え、最後の約 11 日間はき裂の進展を加速するために $R = 0.1$ の三角波形の負荷 (約 7000cycle) (図中③) を与えた。

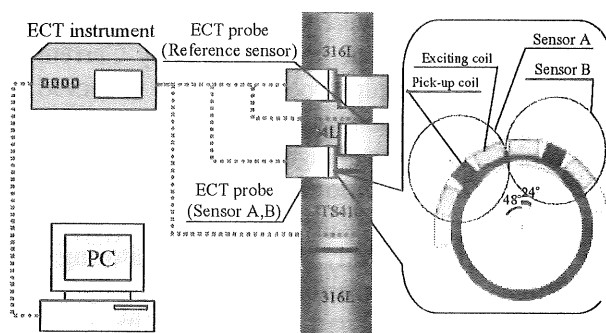


Fig.1 A schematic drawing of ECM system.



Fig.2 ECT probe used for ECM experiment.

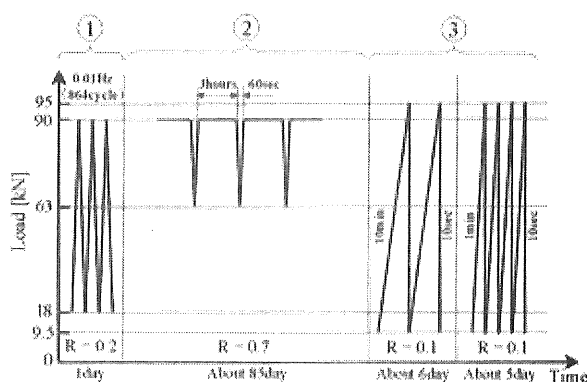


Fig.3 Loading cycle applied to pipe specimen.

2.2 き裂進展結果

Fig. 3 に示される負荷を課した結果、試験開始から約 97 日後に SUS316L の HAZ 部においてリークが確認された。Fig. 4 は試験終了後の SUS304L の HAZ 部における切断面である。図より、き裂の進展が確認できる。破面解析の結果、今回のき裂進展モードは腐食疲労割れであることが判明した。Fig. 3 の負荷サイクルと合わせて考えると、き裂は負荷を三角波形にした最後の約 11 日間 (図中③) で進展したと判断される。

2.3 渦電流モニタリング信号

負荷を三角波形にした後から試験片にリークが確認されるまでに、SUS304L の HAZ 部に配置されたプローブ (センサ A、センサ B (Fig. 1)) 及び SUS304L の母材に配置されたリファレンス用センサにおいて検出された渦電流信号 (絶対値) の時間ごとの変化を Fig. 5 に示す。センサ A、B は Fig. 4 に示されるき裂進展をモニタリングしている。このときの励磁周波数は 20kHz である。リファレンス用センサにおける信号変移と比較して、最後の約 40 時間においてセンサ B の信号は大きく変化しているのに対し、センサ A においては信号に変化が見られなかったことがわかる。

3. 渦電流信号の数値解析を用いた考察

3.1 数値解析手法とモデル

前節で得られた信号変移とき裂進展との関係を考察するため、変形磁気ベクトルポテンシャル法による渦電流信号の数値解析を行った [11]。Fig. 6 に解析に用いた試験片及びセンサのモデルを示す。各モデルの寸法、形状、材質は前節の試験環境に基づいている。また、Fig. 7 は解析において仮定したき裂先端の進展の様子を示す。き裂が対称的に進展したと仮定して、Fig. 4 の初期き裂及び試験終了時の破面形状より、進展途中のき裂形状を設定した。つまり、Fig. 7 における crack-1 及び crack-2 の先端は、き裂進展部分を 3 等分するラインを描いている。

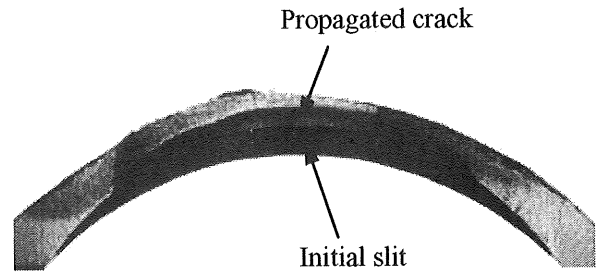


Fig.4 Cross section at the HAZ of 304L.

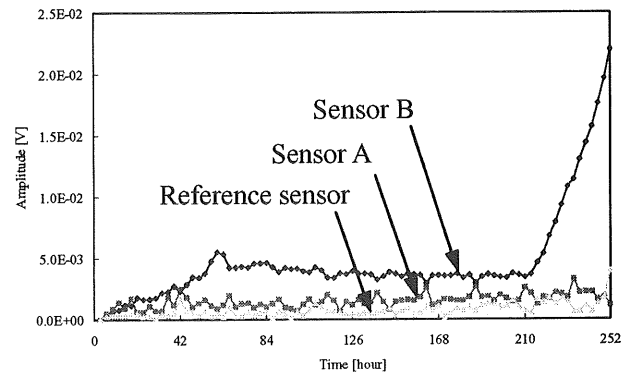


Fig.5 Time evolution of sensor voltage.

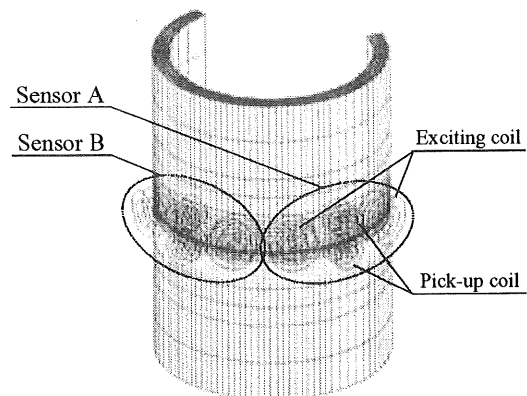


Fig.6 Numerical model of the specimen and ECT sensors.

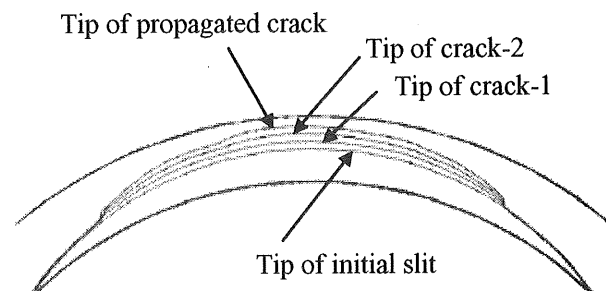
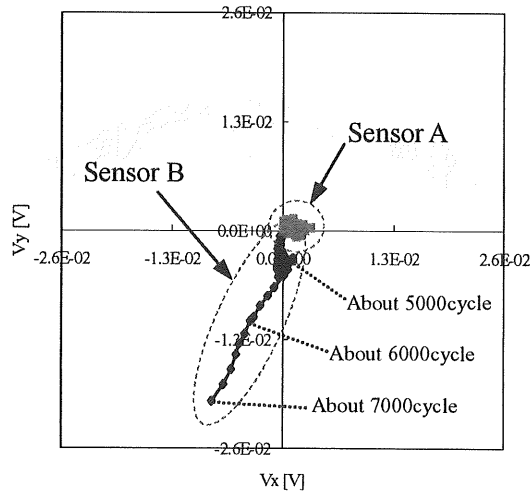
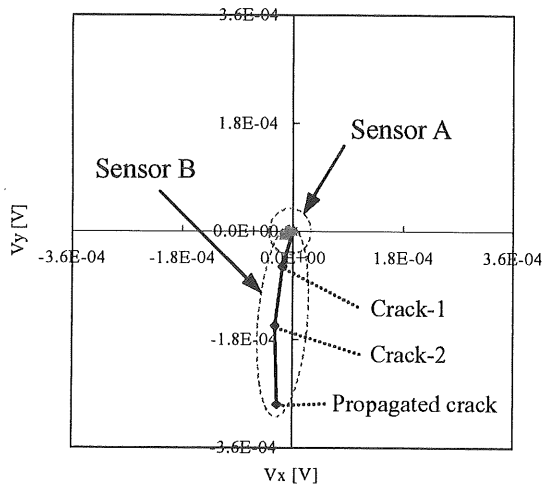


Fig.7 Model of crack propagation.



(a) Experimental eddy current signals.



(b) Numerical eddy current signals.

Fig.8 Experimental and numerical eddy current signals observed by sensors A and B at the test frequency of 20kHz.

3.2 き裂進展の定量的評価

Fig. 8 に実測と数値解析によって得られた渦電流信号の変移を示す。Fig. 8(a)はFig. 5 に示した ECM 信号を複素平面上にプロットしたものであり、各 V_x 、 V_y はそれぞれセンサ電圧の X 成分、Y 成分に対応している。各センサのキャリブレーションは冷却水を昇温した後に行われているため、複素平面の原点が初期き裂に対する渦電流信号に相当する。図より、最後の約 40 時間において、センサ B の渦電流信号が複素平面の原点から大きく外れていることがわか

る。またセンサ B に関しては、渦電流信号に加え、各時点に対応する荷重サイクル数（三角波形、Fig. 3 の図中③）を合わせて示している。

一方、Fig. 8(b)は数値解析によるセンサ A、B の渦電流信号の変移である。き裂が Fig. 7 に示されるように偏りを生じずに進展したと仮定して、初期き裂、crack-1、crack-2、試験終了時のき裂に対する渦電流信号を計算した。図より、センサ B においては大きな変移が確認できるが、センサ A ではほとんど信号が変化していないことがわかる。Fig. 4 の切断面より、き裂が中心付近で大きく進展し、端の部分ではほとんど進展しなかったためであると考えられる。これは Fig. 8(a)の実験結果と同様の傾向であり、これよりセンサ B で検出された信号変移はき裂の進展に起因していることが確認された。またセンサ B に関して、Fig. 8(a)と比較することにより crack-1 及び crack-2 の時点に対応している荷重サイクル数はそれぞれ約 5000cycle、6000cycle であると推測される。

4. 結言

本研究では、BWR 環境下における ECM システムのき裂進展検知能力を議論し、その定量的評価手法としての可能性を検討した。まず、BWR 模擬環境下の溶接管に対して、ECM システムを用いたき裂進展のモニタリング試験を行った。試験終了後の破面解析結果より、き裂モードは腐食疲労割れであることを確認し、センサ B によってき裂進展に対応していると推測される渦電流信号変移を検出した。次に、試験環境を模擬したモデルを用いた渦電流信号の数値解析を行い、き裂が ECM 試験と同様の進展をした場合に検出される渦電流信号変移を計算した。計算された信号変移と ECM 試験結果を比較することにより、センサ B で検出された信号変移はき裂の進展に起因していることが裏付けられたと同時に、各進展き裂に対する荷重サイクル数を推測することができた。

以上より、BWR 環境下において ECM システムを用いたき裂進展の定量的評価が可能であることが確認された。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費「中核的拠点形成プログラム」(COE) (11CE2003) の成果の一部である。東北大学流体科学研究所 佐藤武志 技官には実験装置の準備に際し度々御助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 発電用原子力設備規格維持規格 JSME S NA1 - 2002, 日本機械学会, 2002.
- [2] 高木敏行, 福富広幸, “電磁解析技術による渦流探傷試験”, 非破壊検査, Vol.47, No.2, 1998, pp.85-91.
- [3] T.Takagi and K.Miya, “ECT Round-robin Test for Steam Generator Tubes”, J. Japan Soc. Applied Electromagnetics Mech., Vol.8, No.5, 2000, pp.121-128.
- [4] H. Huang and T. Takagi, “Inverse Analyses for Natural and Multi-Cracks using Signals from a Differential Transmit-Receive ECT Probe”, IEEE Trans. Magn., Vol.38, No.2, 2002, pp.1009-1012.
- [5] 佐藤一彦, 黄皓宇, 内一哲哉, 高木敏行, “厚肉材用渦電流探傷プローブの開発とき裂の定量的評価”, 日本機械学会論文集(A編), Vol.69, 2003, pp.455-462.
- [6] 遠藤久, 黄皓宇, 内一哲哉, 高木敏行, 西水亮, 小池正浩, 松井哲也, “渦電流探傷に基づく厚肉材における深いき裂の定量的評価”, 日本非破壊検査協会秋季大会講演概要集, 2003, pp.75-77.
- [7] 糟谷高志, 内一哲哉, 高木敏行, 黄皓宇, “ECTに基づくシュラウドの検査シミュレーション”, 保全学, Vol.3, No.1, 2004, pp.51-56.
- [8] V.Zilberstein, D.Schlicker, K.Walrath, V.Weiss, N.Goldfine, “MWM Eddy Current Sensors for Monitoring of Crack Initiation and Growth during Fatigue Tests and in Service”, Int. J. Fatigue, Vol.23, Supplement 1, 2001, pp.477-485.
- [9] V.Zilberstein, K.Walrath, D.Grundy, D.Schlicker, N.Goldfine, E.Abramovici, T.Yentzer, “MWM Eddy-Current Arrays for Crack Initiation and Growth Monitoring”, Int. J. Fatigue, Vol.25, 2003, pp.1147-1155.
- [10] Y.Lu, K.Sakaguchi, Y.Tsujimoto, N.Sakurai, T.Uchimoto, M.Takahashi, T.Takagi, M.Kitamura and T.Shoji, “A System Safety Benchmark Facility for SCC Pipe Tests with High and Low Flow Rate Condition and Some Preliminary Test Results in BWR Environment”, 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems-Water Reactors, ANS, Aug.10-14, Washington, 2003, pp.805-815.
- [11] T.Takagi, H.Huang, H.Fukutomi and J.Tani, “Numerical Evaluation of Correlation between Crack Size and Eddy Current Testing Signal by a Very Fast Simulator”, IEEE Trans. Magn., Vol.34, No.5, 1998, pp.2581-2584.

