

高速炉の蒸気発生器伝熱管用 マルチコイル型 RF-ECT センサの開発

Development of Multi-coil RF-ECT Sensor for JSFR SG tubes

日本原子力研究開発機構	山口 智彦	Toshihiko Yamaguchi	
日本原子力研究開発機構	ミハケ オビデウ	Ovidiu Mihalache	Member
日本原子力研究開発機構	上田 雅司	Masashi Ueda	
日本原子力研究開発機構	山下 卓哉	Takuya Yamashita	Member

A new design was adopted for SG of JSFR (Japan Sodium-cooled Fast Reactor) using double-wall tubes. The present paper estimates and assess the defects detection in double-wall SG tubes for JSFR using Multiple RF-ECT sensor. We confirmed that proposed Multiple RF-ECT sensor has a high sensitivity to detect small defects.

Keywords: JSFR, Steam Generator, Double Wall Tube, Remote Field-ECT, High Sensitivity, Fatigue Crack

1. 緒言

ナトリウム冷却型高速増殖炉の蒸気発生器で採用を計画している直管型2重伝熱管は、高Cr鋼（強磁性体）製の内外管を冷間引き抜き加工で密着させて製作される。伝熱管は、外径19mm、肉厚3.1mm（外管1.7mm、内管1.4mm）で、内外管にギャップ3 μ m（公称値）が存在する構造である（Fig.1 参照）。内外管にギャップが存在するため、内挿コイルによる検査では外管外面の欠陥検出性能に影響が懸念される。本研究では、き裂やピンホールのような微小欠陥に対する検出性に優れ、サイジングに必要な空間分解能を有するマルチコイル型 RF-ECT センサを開発し、2重伝熱管における欠陥検出性試験を行った。

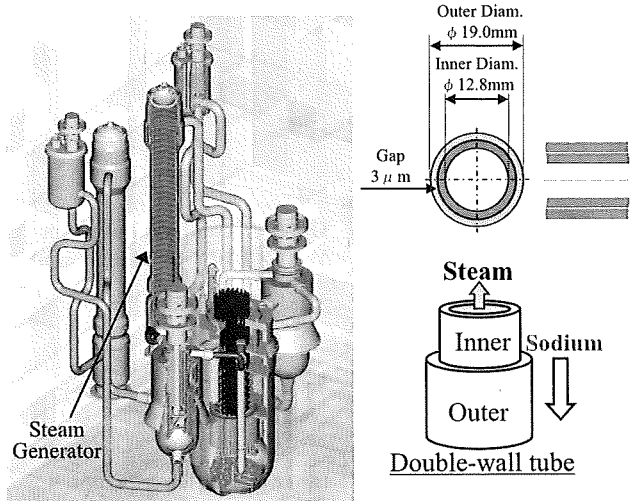


Fig.1 JSFR SG and schematic of double wall tube

2. マルチコイル型 RF-ECT センサ

2重伝熱管の肉厚の20%相当深さの欠陥（全周減肉、スリット等）の検出を目標にマルチコイル型 RF-ECT センサの欠陥検出性能の向上のため、最適なコイルサイズや配置、チャンネル数を解析と試作モデルで検証し、微小欠陥の検出に適したセンサを製作した^[1,2]（Fig.2 参照）。微小欠陥の検出性を高めるために、励磁コイルを検出コイルの前後に配置するとともに、励磁コイル長を長尺化して巻数を増やし、励磁力を向上させた^[3]。次に分解能を高めるために、検出コイルを周方向に12個（差動24個）配置させた。センサの伝熱管内（内径 ϕ 12mm程度）への挿入性を考慮し、センサの外径は ϕ 10.8mmとした。また、センサが伝熱管の中心を通過してリフトオフの影響を抑えるために、調芯機構を設けた。

微小欠陥の検出に適した探傷条件を求め、励磁周波数は欠陥信号の振幅(S)が最大となる250Hzと欠陥振幅(S)と無欠陥部のノイズ(N)との比(S/N)が最大となる500Hzを選定し、探傷速度は200mm/sで試験を行った^[4,5]。

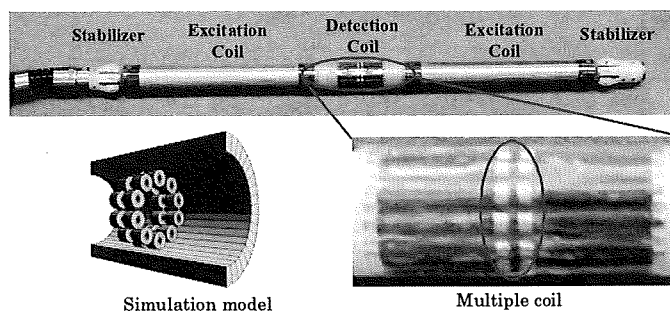


Fig.2 Overview of multiple RF-ECT sensor and simulation model.

連絡先: 山口 智彦、〒919-1279 福井県敦賀市白木1、
日本原子力研究開発機構 FBR プラント工学研究センター、
yamaguchi.toshihiko@jaea.go.jp

3. 試験結果

3.1 放電加工による欠陥の検出性能

マルチコイル型 RF-ECT センサを製作し、直管型 2 重伝熱管に付与した放電加工による欠陥を用いて欠陥検出性試験を行った。Fig.3 に欠陥が検出されたチャンネルの波形を示す。結果より検出目標である 2 重伝熱管の外管外面に付与した管肉厚の 20%t (0.7mm) 深さ相当の欠陥 (周・軸方向ノッチ W0.3mm×L10mm、ピンホール φ 1mm) を検出できた (探傷速度; 200mm/s)。

つぎに単管の伝熱管とギャップが存在する 2 重伝熱管における管内外面の検出性能の比較を Fig.4 に示す。

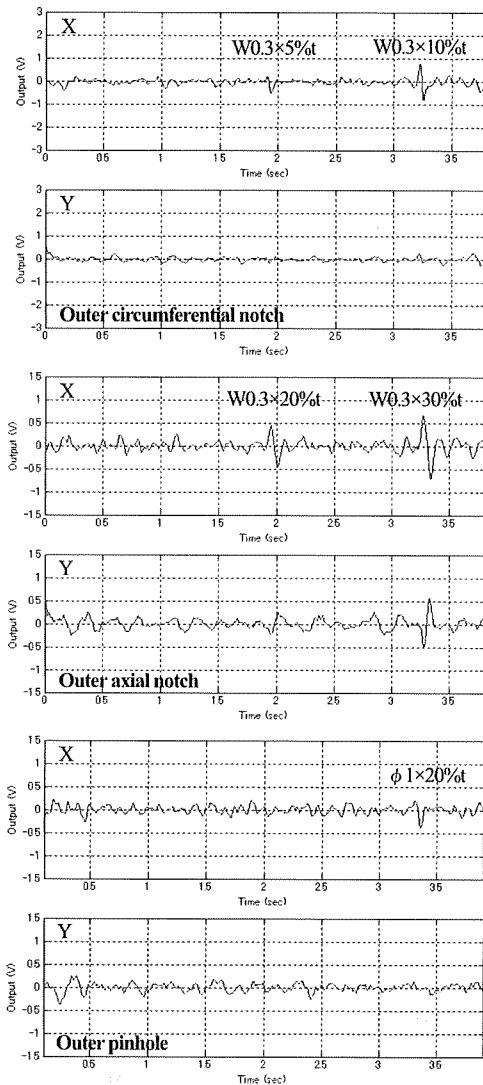


Fig.3 Experimental test results of multiple RF-ECT coil inspection for: outer circumferential notch, axial notch and pinhole.

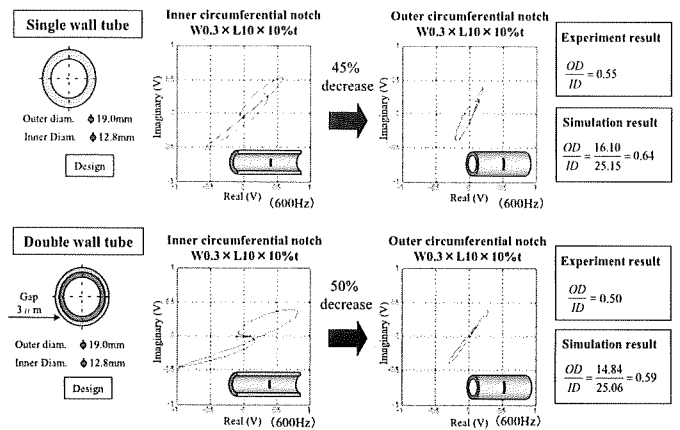


Fig.4 Comparison between experimental test results and FEM simulations of double-wall gap effect. There is a 5% decrease in eddy current signal when tube configuration changed from single to double-wall.

単管の伝熱管の場合、外面の欠陥振幅は、内面に比べ 45%程度低下し、材料と形状による渦電流の浸透しにくさが影響していると考えられる。

つぎに、ギャップが存在する 2 重伝熱管では、さらに渦電流の浸透しにくさの影響が懸念されたが、外管外面の検出性は、内管内面に比べ 50%程度の低下で、ギャップそのものの影響は 5%程度であった。

Fig.5 に 2 重伝熱管における外管外面と内管内面の欠陥検出性の比較を C スキャン波形で示す。外管外面の場合、欠陥形状における分解能は低下するものの十分に欠陥を検出でき、欠陥の識別性も高いことがわかった。

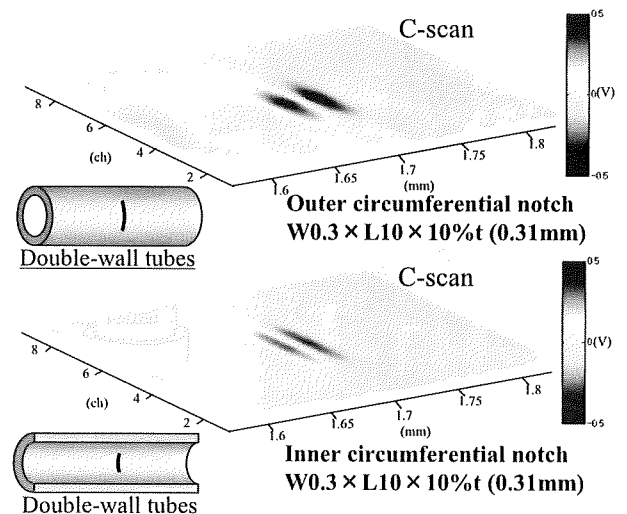


Fig.5 Experimental test results of multiple RF-ECT coil inspection for the outer and inner tube defect.

3.2 疲労き裂の検出性能

放電加工による欠陥より開口部の狭いき裂状の欠陥の検出性を把握する目的で疲労試験機により付与したき裂の検出性試験を実施し、マルチコイル型 RF-ECT センサの 2 重伝熱管への適用性を評価した。試験に使用する疲労試験片は、引張荷重負荷方式で低荷重かつ低サイクル引張荷重で疲労を与えて製作した。試験機には、電気油圧疲労試験機(荷重要領 ±200kN)を使用し、最大 73.5kN、最小 7.3kN 内で、サイン波 (5~10Hz) の条件とした。

引張疲労試験の風景と疲労き裂の破面写真を Fig.6 に示す。製作したセンサを用い、欠陥検出性試験の結果例を Fig.7 に示す。試験結果より 2 重伝熱管外管外面に付与した 50%t 深さの周方向疲労き裂、さらに、30%t 深さの周方向疲労き裂を疲労き裂の信号振幅対ノイズ比 (S/N) が 2 以上で検出できた (探傷速度; 200mm/s)。

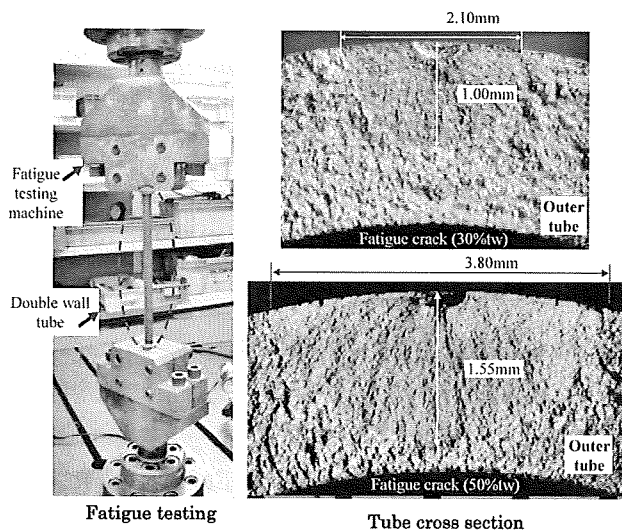


Fig.6 Fatigue testing and cross sectional view of cracks.

4. 結論

マルチコイル型 RF-ECT センサを製作し、直管型 2 重伝熱管に付与した欠陥を用いて欠陥検出性試験を行った。2 重管構造の伝熱管において、外管外面の検出性の低下が懸念されたが、外管外面の検出性は、内管内面に比べ 50% 程度低下するものの、検査目標である外面の 20%t 深さの欠陥 (全周減肉、周・軸方向ノッチ等) を S/N 比 2 以上で検出できることが確認できた。さらに、開口部の狭いき裂状欠陥の検出性を把握するために製作した 30%t 深さの疲労き裂を検出可能であることがわかった。なお、本報告は、経済産業省からの受託事業である「発電用新型炉等技術開発」の一環として実施した成果である。

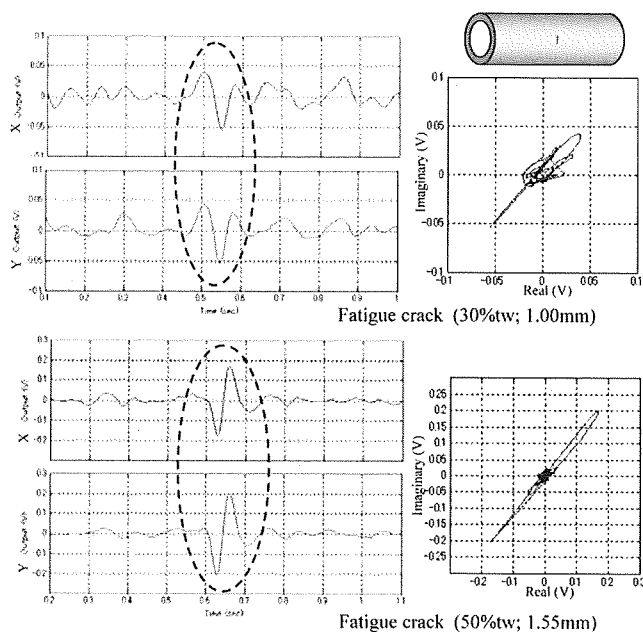


Fig.7 Experimental test results of multiple RF-ECT coil inspection for fatigue crack.

参考文献

- [1] Nondestructive Testing Handbook, Third Edition Volume 5, Electromagnetic Testing, 2004.
- [2] O. Mihalache, T. Yamaguchi, "3D RFEC Simulations for the In-Service Inspection of Steam Generator Tubes in Fast Breeder Reactors", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol33, pp.1165-1171, 2010.
- [3] 山口智彦、ミハラケオビデウ、“高速増殖実証炉に向けた概念検討と関連技術開発 (9)構造物欠陥検査技術開発”、2010 年春の年会、D34.
- [4] Mihalache Ovidiu, Toshihiko Yamaguchi, Masashi Ueda, Mamoru Konomura, “FEM simulations for ISI of double wall of SG tubes in JSFR using eddy currents” Annual Meeting of the Atomic Energy Society Japan, 2010, J38.
- [5] 山口智彦、ミハラケオビデウ、“高速増殖実証炉に向けた保守技術開発構造物欠陥検査技術開発 (マルチコイル型 RF-ECT センサ)”、2011 年秋の年会、M22.