

原子炉圧力容器の給水ノズルコーナーに対する 渦電流探傷技術の開発

Eddy current testing technique for feed water nozzle inside corner of nuclear reactor pressure vessel

東京電力ホールディングス株式会社	神長 貴幸	Takayuki KAMINAGA	
東北電力株式会社	吉川 祐明	Hiroaki KIKKAWA	Member
中部電力株式会社	山田 浩二	Koji YAMADA	
北陸電力株式会社	平崎 孝幸	Takayuki HIRASAKI	
中国電力株式会社	西岡 朋美	Tomomi NISHIOKA	
日本原子力発電株式会社	首藤 浩丈	Hirotake SYUTOU	
電源開発株式会社	齋藤 康二	Koji SAITO	
一般財団法人電力中央研究所	東海林 一	Hajime SHOHJI	Member
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	江原 和也	Kazuya EHARA	Member
株式会社東芝	土橋 健太郎	Kentaro TSUCHIHASHI	

It is necessary to confirm whether the feed water nozzle inside corner has crack by eddy current testing, to enable long-term operation of a plant. Therefore, we performed eddy current testing using various types of specimen to collect basic data (probability and length measurement accuracy) of the eddy current testing methods, complying with JEAG4217. As a result, eddy current testing was effective for the inspection of feed water nozzle inside corner.

Keywords: Eddy current testing, Reactor pressure vessel, Feed water nozzle inside corner, Fatigue crack

1. 緒言

2013年6月、原子力規制委員会より「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」^[1]が制定された。このガイドにおいて、沸騰水型原子炉（以下「BWR」と称す）では給水ノズルコーナー部（最も疲労損傷係数が高い部位）に対し、磁気探傷試験（MT）もしくは浸透探傷試験（PT）または渦電流探傷試験（以下「ECT」と称す）による欠陥の有無の確認が要求されている。

給水ノズル（Fig.1）の材質は低合金鋼（強磁性体）であるが、ECTによる点検の場合、日本電気協会の規格である「原子力発電用機器における渦電流探傷試験指針」（JEAG 4217）^[2]はオーステナイト系ステンレス鋼およびニッケル基合金（非磁性体）の母材部および溶接部を対象としているため、本規格をそのまま適用することはできない。また、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」では、ノズルコーナー部での評価不要欠陥寸法の基準を設定していない。

これらの課題を解決するため、BWR電力各社とプラントメーカーは共同研究「原子炉圧力容器の給水ノズルコーナーに対する検査および評価技術開発」を2014年度下半

期から2015年度に亘り行った。ここでは、研究成果のうちECTの結果（検出性および長さ寸法測定）について報告する。

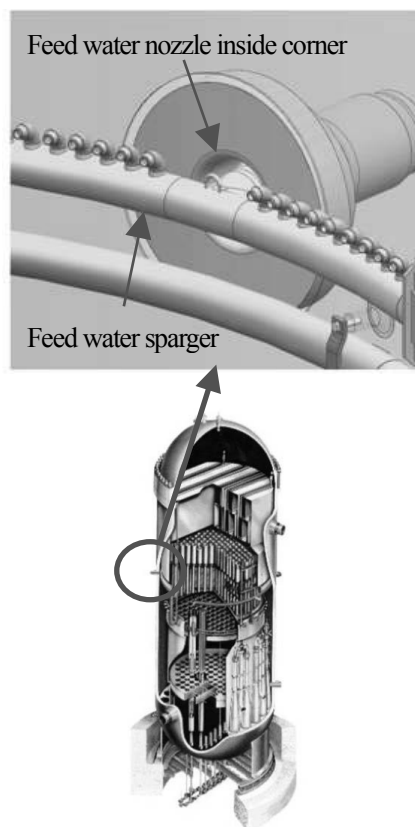


Fig.1 Overview of the feed water nozzle

連絡先：江原 和也
〒319-1221 茨城県日立市大みか町 5-2-2
日立 GE ニュークリア・エナジー(株) 原子力品質保証部
E-mail : kazuya.ehara.hk@hitachi.com

2. 試験体

本研究で用いた試験体を Table1 に示す。試験体の材料は実機と同じ低合金鋼(SFVQ1A)とした。まず、強磁性体に対する基本特性を確認するため、信号源として複数のノッチを付与した試験体を準備した。次に、実機で生じる損傷として疲労亀裂（機械疲労亀裂および熱疲労亀裂）を想定し、これを付与した試験体により検出性および長さ寸法測定精度を確認した。なお、ノズルコーナ形状が検出性に及ぼす影響も確認するため、平板試験体に加え走査面に曲率を設けた試験体を準備した。試験体および熱疲労亀裂の例を Fig.2～Fig.5 に示す。

Table1 List of the specimen

Surface shape	Crack type*1	Height (mm)	Length (mm)
Flat	N	0.5～5.0	8.4～26.6
Flat	F,TF	0.5～(5.0)*2	2.3～30.4
2D	N	0.5～5.0	8.4～26.6
2D	F	1.4～5.0	13.8～26.9
3D	N	1.0	11.8

*1 N:Notch , F:Fatigue crack , TF:Thermal fatigue crack

*2 It is planned value.

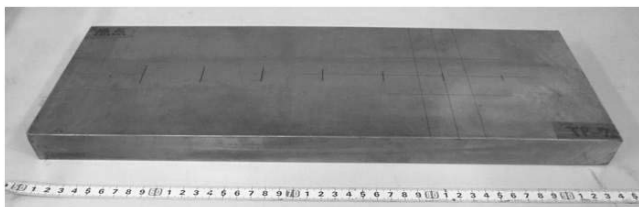


Fig.2 Example of the specimen (Flat shape)



Fig.3 Example of the specimen (2D shape)

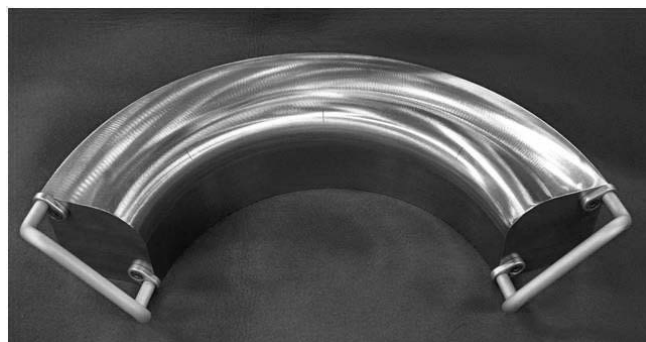


Fig.4 Example of the specimen (3D shape)



Fig.5 Example of the thermal fatigue crack

3. 試験装置

試験には、Table2 に示すプローブを用いた。これらは非磁性体に対する試験で実績があるプローブであり、また、探傷器も含め JEAG4217 に適合したものである。プローブは、ノッチおよび疲労亀裂の長さ方向に対して平行、直交および斜め 45° 方向に走査した。プローブの走査例を Fig.6 に示す。

なお、試験開始においては、JEAG4217 に準拠した試験要領を作成し、これに従い試験を行った。

Table2 Examination information(Probe)

Probe arrangement	Frequency (kHz)	Coil layout
TR Pancake	25,100	multi
Cross coil and pancake coil	250,500	Single
Uniform	50,150,250	Single
Mutual-induction and differential method	50,150,250	Single

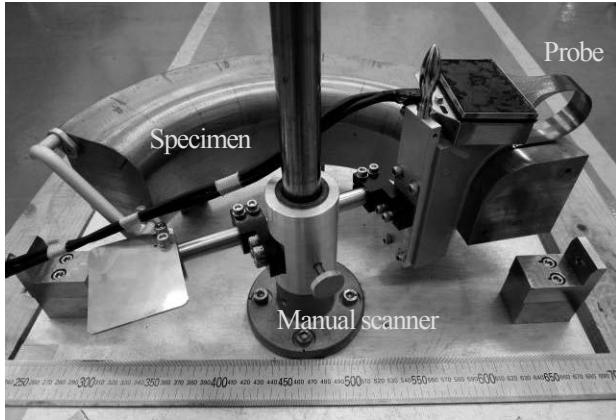


Fig.6 Example of the probe scanning

4. 試験結果

4.1 検出性

ノッチおよび疲労亀裂に対する各プローブの検出結果の一部を Table3 に示す。

Table3 より、平板および 2 次元形状試験体共に深さ 0.5mm、長さ 8.4mm のノッチを明瞭に検出できること、プローブ走査面の状態に係らず深さ 1mm 以上のノッチを明瞭に検出できることが分かる。

一方、製作した試験体の中で最も小さい熱疲労亀裂(深さ 0.5mm、長さ 2.3mm)においては、JEAG4217 において定義されている、欠陥の疑いのある指示部の抽出基準(基準感度の 20%以上の指示部)^[2]および平面展開図(C スコープ)上で識別が不明瞭となり始める SN 比 4 未満(目安値)を満たさない結果が多く、検出ができないプローブもあった。

一方で、疲労亀裂として 2 番目に小さい深さ 1.4mm、長さ 13.8mm の検出結果を見ると、全ての手法で検出できていることから(C スコープの例を Table 4 に、疲労亀裂の破面開放結果を Fig.7 に示す)、明瞭に検出できる限界寸法は深さ 0.5~1.4mm の間にあると考えられる。

これらの結果およびノッチの検出結果も踏まえると、亀裂の長さの程度、プローブの走査方向および亀裂長さ方向との関係にもよるが、本研究における試験要領およびプローブを適用すれば、深さ 1mm 以上の亀裂を明瞭に検出できると考えられる。

なお、ECT における影響因子について、次のような基礎確認を行っている。

(1) 材質の違い

本研究で準備した試験体の材料は SFVQ1A であるが、一部の実機プラントでは SFVQ2A 相当の材料が使われているため、材料の違いによる検出性の差異についてノッチを付与した平板試験体で確認した。その結果、差異は見られず、材料の違いは検出性に影響しないことを確認した。

(2) プローブ走査面の粗さ

検査対象部位の表面粗さの違いによる検出性の差異を、ノッチを付与した表面粗さの異なる平板試験体で確認した。その結果、算術平均粗さ(Ra)が最大 0.9mm 程度の範囲では差異は見られず、実機機械仕上げ程度であれば、表面粗さは検出性に影響しないことを確認した。

(3) 酸化被膜

実機では、酸化被膜が検査対象部位表面に存在する。また、亀裂内部にも存在することを想定した場合、これが検出性に影響を及ぼす可能性がある。このため酸化被膜なし、表面に酸化被膜あり(ノッチ内あり、なし)の 3 種類の試験体を準備し、検出性の差異を確認した。その結果、差異は見られず、酸化被膜の有無は検出性に影響しないことを確認した。

(4) プローブ走査面の形状

実機では、検査対象部位は曲率を有する形状であり、これが検出性に影響を及ぼす可能性があることから、深さ 1mm、長さ 11.8mm のノッチを平板、2 次元および 3 次元形状の試験体に付与し、検出性の差異を確認した。その結果、差異は見られず、プローブ走査面の形状は検出性に影響しないことを確認した。

(5) プローブ走査方向と亀裂長さ方向との関係

実機では、検査対象部位の形状および周辺の干渉物の影響により、プローブ走査方向が限定される場合がある。亀裂を効率よく検出するためには、使用するプローブに応じて、亀裂長さ方向に対し直交または平行にプローブを走査することが理想であるが、上記制約により必ずしも理想の走査ができるとは限らない。そこで、一部の平板試験体では斜め 45° 方向にプローブを走査し、また、3D 形状の試験体にはノズル軸方向に対して 45° 傾けたノッチを付与して検出性を確認した。その結果、斜め 45° でも明瞭に検出できることを確認した。

(6) ステンレス鋼クラッドの有無

ステンレス鋼クラッドがある場合、一部のプローブを除き、クラッドが無い場合と同等の検出性であることを確認した。

Table 3 Result of detection

Probe Specimen	Target	TR	CP	UP	MP
Flat (Ra=0.3 μm)	Notch (H=1mm,L=11.8mm)	◎	◎	◎	○*
Flat (Ra=0.9 μm)	Notch (H=1mm,L=11.8mm)	◎	◎	◎	○*
Flat (With oxidation film)	Notch (H=1mm,L=11.8mm)	◎	◎	◎	○*
Flat (With clad)	Notch (H=1mm,L=11.8mm)	○*	◎	×*	○*
Flat	Notch (H=0.5mm,L=8.4mm)	◎	◎	◎	◎
Flat	Thermal fatigue crack (H=0.5mm,L=2.3mm)	△*	◎	×*	○*
2D	Notch (H=0.5mm,L=8.4mm)	◎	◎	◎	◎
2D	Fatigue crack (H=1.4mm,L=13.8mm)	◎	◎	△*	◎
3D (Actual shape)	Notch (H=1mm,L=11.8mm)	◎	◎	◎	◎
2D (Nozzle inside)	Notch (H=1mm,L=11.8mm)	◎	◎	◎	◎

TR:TR Pancake CP: Cross coil and pancake coil

UP:Uniform MP: Mutual-induction and differential method

◎ : Signal amplitude is 20% or more of specified sensitivity and signal to noise ratio is more than 4.

○ : Signal amplitude is 20% or more of specified sensitivity or signal to noise ratio is more than 4.

△ : Signal amplitude is less than 20% of specified sensitivity or signal to noise ratio is less than 4.

× : Not detect

* : It shows the worst case.

Table 4 Example of C-scope
(crack height:1.4mm,crack length:13.8mm,
probe scan direction : vertical)

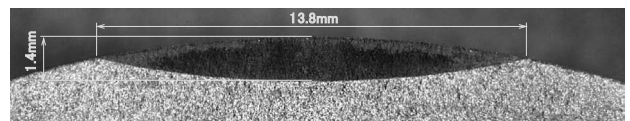
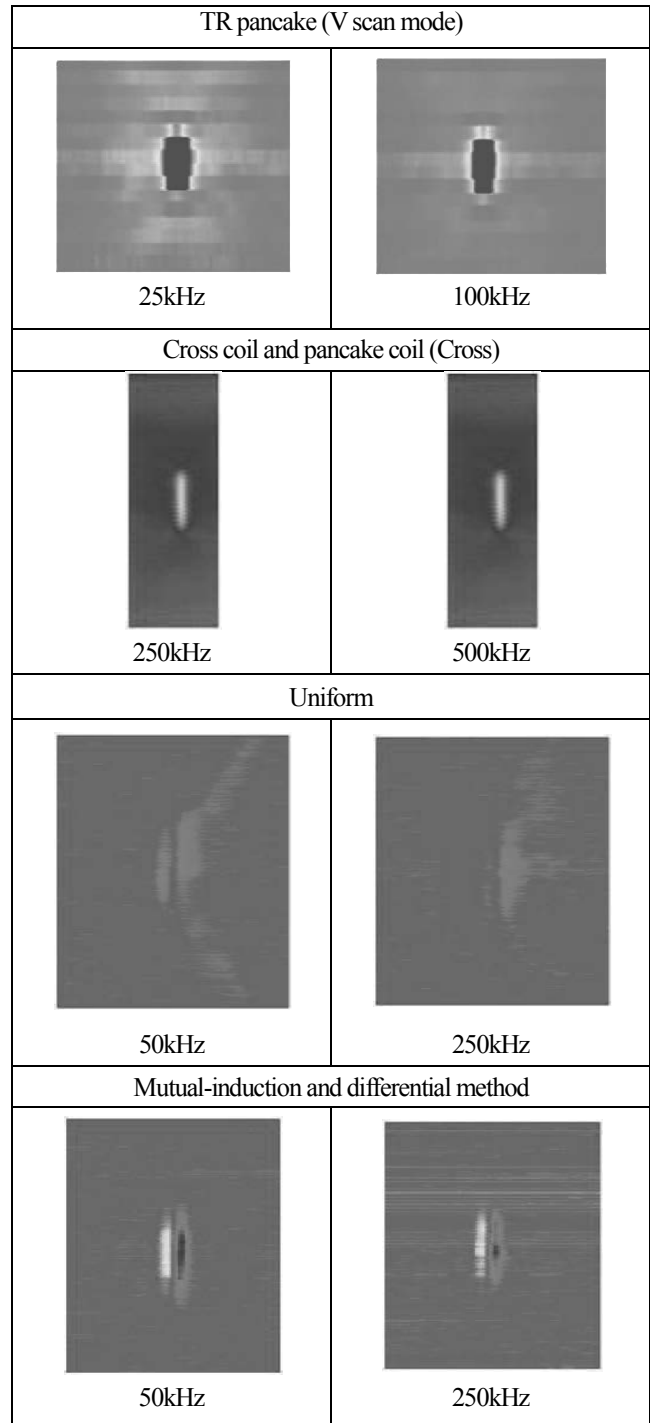


Fig.7 Example of the fatigue crack shape

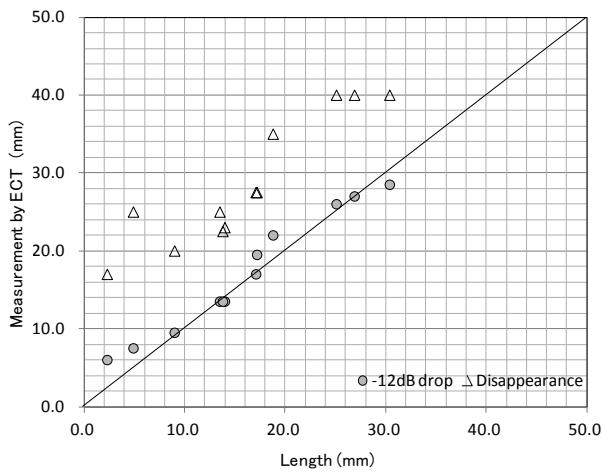
4.3 長さ寸法測定精度

検出できたノッチおよび疲労亀裂に対して長さ寸法測定を行い、測定精度を確認した。寸法は、12dB ドロップ指示長さおよび信号消失指示長さにて求めた。疲労亀裂における長さ寸法測定結果を Fig.8 に示す。

本結果は、各プローブにおいて、周波数、プローブ走査方向および励磁モードごとに得られた複数測定結果のうち、最大長さの値を用いて纏めたものである。いずれのプローブにおいても 12dB ドロップ指示長さの精度が良い結果であった。

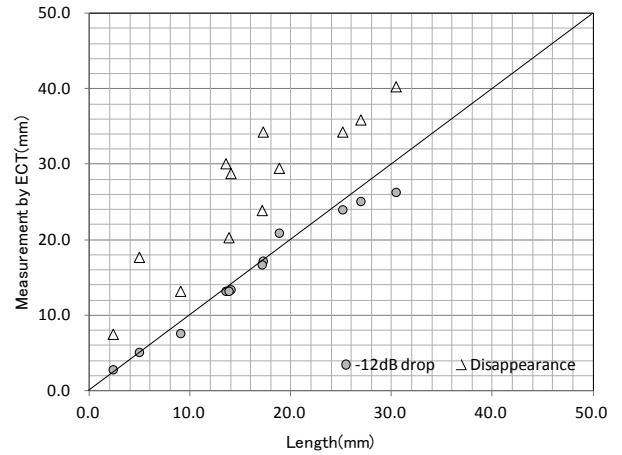
TR パンケーキプローブおよびクロスコイル&パンケーキコイルプローブでは、信号消失指示長さが過大評価傾向にあるが、信号消失指示長さの測定方法を見直すことで、実寸法に近い値で測定できる可能性がある。一様化プローブおよび相互誘導自己比較プローブでは、12dB ドロップ指示長さと同信号消失指示長さの測定精度は同等であった。

また、これまで実績のある、非磁性体である低炭素ステンレス鋼における SCC の長さ寸法測定精度（国プロ NSA 成果）^[3]と比較した結果を Table5 に示す。本研究結果は非磁性体に対する結果と同様であった。

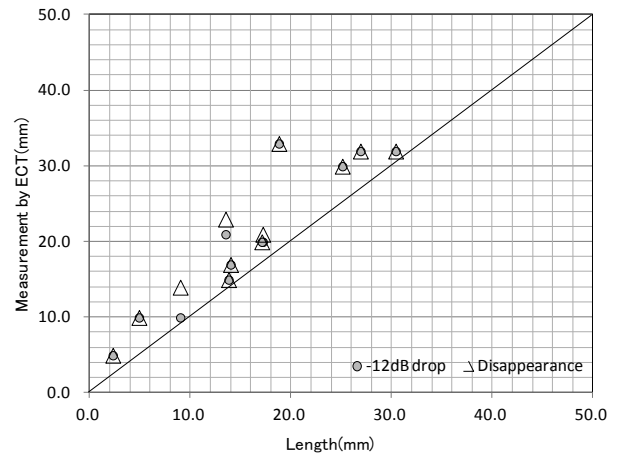


TR pancake

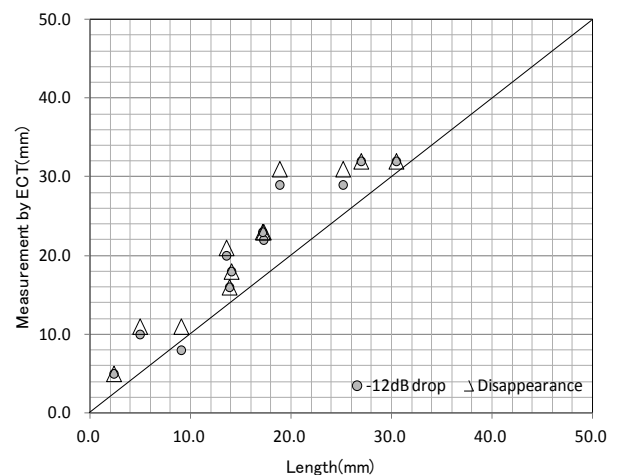
Fig.8(1/2) Result of length sizing (fatigue crack)



(a) Cross coil and pancake coil



(b) Uniform



(c) Mutual-induction and differential method

Fig.8(2/2) Result of length sizing (fatigue crack)

Table 5 Length sizing accuracy (fatigue crack)

Probe arrangement	Threshold level	Error average	Standard deviation	RMSE
TR Pancake	12dB drop	+0.9	1.7	1.8
	disappearance	+12.5	3.4	12.9
Cross coil and pancake coil	12dB drop	-0.6	1.5	1.6
	disappearance	+10.2	4.3	11.0
Uniform	12dB drop	+4.3	3.6	5.6
	disappearance	+4.9	3.6	6.0
Mutual-induction and differential method	12dB drop	+4.3	2.8	5.0
	disappearance	+5.1	3.0	5.8
NSA(SCC) (Parallel for a welding line)	12dB drop	-8.03	7.80	11.16
	disappearance	+0.38	6.05	6.03
NSA(SCC) (Vertical for a welding line)	12dB drop	-7.40	4.81	8.79
	disappearance	-2.46	6.41	6.78

- [3] (独) 原子力安全基盤機構、”低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術実証に関する事業報告書”、2009、pp.64

5. 結言

本研究では、今回使用したプローブを用いて JEAG4217 に準拠した試験を行うことにより、強磁性体(低合金鋼)である給水ノズルコーナー内面の点検が ECT で可能であることを確認した。また、深さが 1mm 以上の亀裂であれば安定して検出できる見通しを得たとともに、12dB ドロップ法により指示長さを精度よく測定できることを確認した。

今後、本研究成果は JEAG4217 へ反映していく予定である。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会、”実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド”、平成 25 年 6 月 19 日
- [2] (一社) 日本電気協会原子力規格委員会、”原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針 (JEAG4217-2010)”、2010、3100 項