



マイクロ波入射部最適化による マイクロ波探傷技術の高度化

Enhancement of microwave nondestructive testing method for the inspection of pipes by optimizing the microwave probe profile

東北大学	佐々木 幸太	Kota SASAKI	
東北大学	遊佐 訓孝	Noritaka YUSA	Member
日本原子力研究開発機構	若井 隆純	Takashi WAKAI	Member
東北大学	橋爪 秀利	Hidetoshi HASHIZUME	Member

Abstract: This study reports the development of a new microwave probe for the nondestructive testing of a pipe. Three-dimensional finite element simulations are carried out to optimize the profile of a microwave probe, whose results show that a probe with elliptic profile enables smaller reflection at the probes as well as much better single-mode propagation inside the pipe than conventional ones. Experimental validations are carried out using a straight brass pipe with an inner diameter of 39 mm and a total length of 2 m. The results of the experiments clearly demonstrate that the new microwave probe provides clearer signals due to simulated rectangular wall thinning.

Keywords: microwave, nondestructive testing, pipe wall thinning, finite-element simulation, pipe diameter

1. 序論

原子力発電プラントにおいて、配管系の健全性維持は最重要課題の一つである^{[1][2]}。配管系の健全性維持のためには定期的な非破壊検査の実施が不可欠であるが、現状は主として超音波探傷法が採用されている。これらの検査法は高い精度を有するものの、被検査面に沿ったプローブの走査が必要であり、また場合によっては検査の実施のためには断熱材を除去しなければならないなど、工期・費用の面で必ずしも好ましくないことが課題となっている。そのため、配管の高速検査が可能である、新たな非破壊検査技術が強く望まれている。

このような観点から、配管の広域一括探傷技術として、マイクロ波探傷法の開発が進められている^[3]。当該技術は、配管内部にマイクロ波を伝播させ、その反射および透過の様子から管内面のきずを検出するというものであり、マイクロ波は理想的には配管内部を無損失で伝播するものであることから、長大な配管系であってもごく短時間で検査が可能であると期待される技術である。従来研究においては、主として直管内部に加工した模擬減肉を対象とした各種検討が行われており、マイクロ波応答の時間及び周波数領域信号において、明瞭なきず信号の確認に成功している^{[4][5][6]}。さらに、時間領域における信号評価においては、端部がなだらかであるものや非軸対称形

状を有するものなど、実機におけるきずに近い形状のものであっても当該技術は適用可能であり、適切な信号処理を施すことにより、反射波の飛行時間からきず位置の定量的評価も可能であることが確認されている^[4]。しかしながら、現状の検討は内径 20 mm 程度の短管を対象としたものに留まっており、克服すべき課題は少なくない。特に、配管内へのマイクロ波入射部でのマイクロ波の反射が大きく、管内への透過が小さいこと、さらに入射部における透過特性および管内を伝播するマイクロ波のモードの周波数依存性が大きいことが、重要な問題と認識されている。これらの問題は対象とする配管の径が大きい場合に特に顕著となるため、マイクロ波を用いた配管広域一括探傷技術の実機適用に向けての、克服すべき大きな課題の一つである。

以上の背景により、本研究では、入射部におけるマイクロ波の反射の度合いおよび管内のマイクロ波伝播モードが入射部の幾何学的形状に依存しうることに着目し、マイクロ波入射部形状の最適化により、上記問題を解決し、もって配管広域一括探傷法としてのマイクロ波探傷法の高度化に資することを目的とする。より具体的には、3次元有限要素法解析により、配管内部を伝播するマイクロ波モードの周波数依存性を定量的に評価し、周波数によらずある特定のモードが支配的となる条件を見出す。続いて、数値解析結果に基づいて新たなマイクロ波プローブを製作し、直管内面の模擬減肉を対象とした探傷試験により、入射部形状の最適化による信号対ノイズ比の向

連絡先: 佐々木 幸太、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2、東北大学量子エネルギー工学専攻本館

E-mail: ksasa@karma.qse.tohoku.ac.jp

上を確認する。

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega}}} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (3)$$

2. 数値解析

2.1 計算体系および条件

計算体系を Fig. 1 に示す。この体系は、マイクロ波探傷法におけるマイクロ波の入射部、すなわちマイクロ波プローブと配管の結合部をモデル化したものであり、同軸ケーブル内を伝播してきたマイクロ波の当該部における反射の度合い、および管内に伝播する際の伝播モードの、入射部形状依存性を評価することを目的としている。入射部形状は、従来研究において用いられてきた円筒形の従来型(Fig. 1(a))^[4]、入射部にテーパを施したテーパ型(Fig. 1(b))、そして入射部を滑らかな半楕円とした楕円型(Fig. 1(c))の3種類とし、配管内に伸びる同軸ケーブル心線の長さ L 、およびテーパ型、楕円型に関してはそれぞれテーパの角度 θ 、楕円部配管軸方向半径 c をパラメータとして数値解析を行った。数値解析で用いた具体的な値は Table 1 に示すとおりである。いずれのモデルにおいても、同軸ケーブルの内径と長さはそれぞれ 2.2 mm と 20 mm、そして同軸ケーブルの心線の太さは 0.8 mm である。配管の内径は後述する検証試験における試験体と同一仕様である 39 mm とし、長さは 40 mm とした。ただし、配管端部に電磁場完全吸収領域を設けているため、配管端部での反射波は生じておらず、実際には十分に長い配管と同等である。参考のため、内径 39 mm の円管における各伝播モードの遮断周波数を Table 2 にまとめる。

数値解析には有限要素法ソフトウェアである COMSOL Multiphysics およびその追加モジュールである RF モジュール(v4.2a)を用いた。数値解析は周波数領域における3次元解析であり、その支配方程式は

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (1)$$

である。ここで

$$k_0 = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \omega \quad (2)$$

であり、 \mathbf{E} は電場、 ϵ_0 は真空の誘電率、 μ_0 は真空の透磁率、 ϵ_r は比誘電率、 μ_r は比透磁率、 σ は導電率、 j は虚数単位、そして ω は角周波数である。表皮深さは十分に薄いと考えられることから、管壁及び同軸ケーブル心線内部は要素分割せず、次式で与えられる Impedance boundary condition を表面における境界条件として課した。

ここで \mathbf{n} は管壁面の内向きの法線ベクトル、 \mathbf{H} は磁場である。

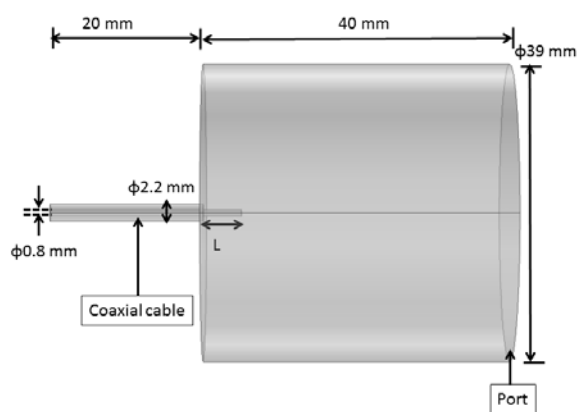
Table 1 Parameters used for the simulations

Parameter	Value
L [mm]	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
θ [deg.]	0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45
c [mm]	5, 10, 15, 20, 25, 30

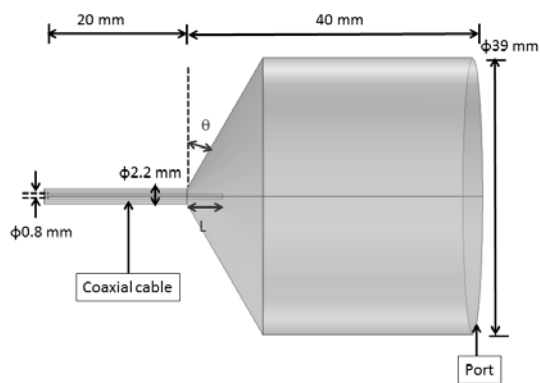
Table 2 Cutoff frequencies for a pipe with a diameter of 39 mm

Mode	Cutoff frequency [GHz]
TM ₀₁	5.889
TM ₁₁	9.383
TM ₂₁	12.576
TM ₀₂	13.516
TM ₃₁	15.622

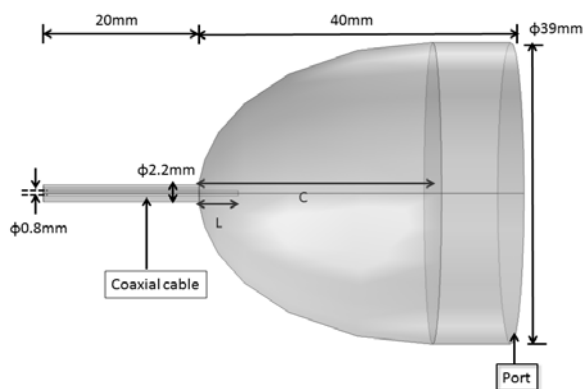
後述の検証試験のための装置の仕様を考慮し、周波数は 10~40 GHz と設定した。数値解析においては、同軸ケーブル端部において TEM モードが発振され、配管端部 (Fig. 1 中右端 Port) において電磁場を吸収する完全吸収領域を設置した。同軸ケーブルの内部誘電体の物性値は比誘電率 1.687、比透磁率 1、導電率 0 であり、壁面の物性値は比誘電率 1、比透磁率 1、導電率 60×10^6 [S/m] とした。離散化には二次の四面体辺要素を用いた。



(a) Conventional profile



(b) Tapered profile



(c) Elliptic profile

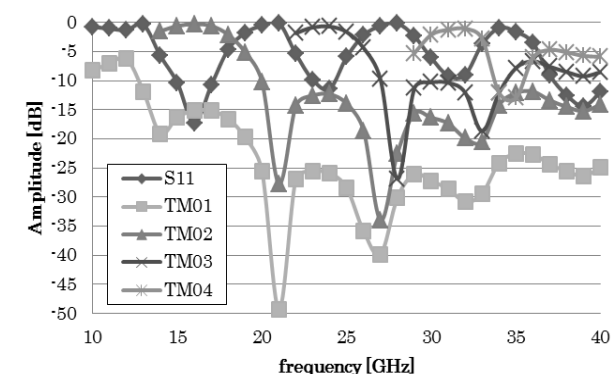
Fig. 1 Numerical configurations

2.2 解析結果および考察

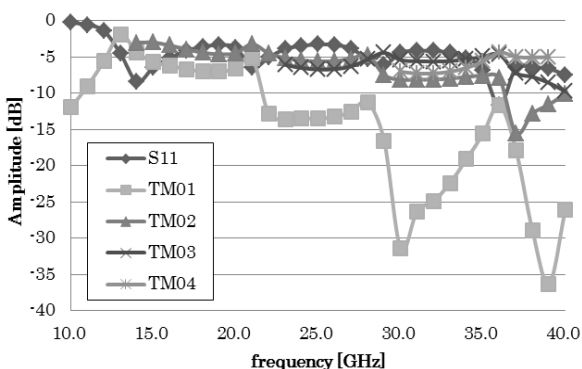
数値解析の結果、いずれの形状、いずれのパラメータにおいても心線長さについてはほぼ同様の影響があることが確認された。具体的には、心線長さが 1, 2 mm と短い場合、入射部におけるマイクロ波の反射が大きく、配管内にはマイクロ波がほとんど伝播しなかった。心線長さ

が 5 mm 程度で管内に入射されるマイクロ波のエネルギーの割合が有意に向上するが、5 mm 以上ではその割合に大きな差異はなく、また心線長さが 10 mm 以上となると、管内に伝播するマイクロ波のモードの心線長さ依存性が大きくなる傾向が確認された。

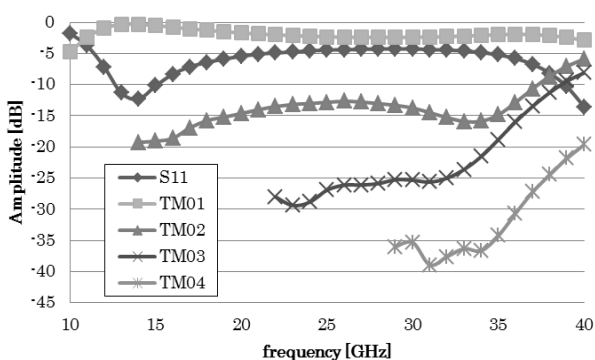
一方、入射部の形状および形状パラメータは、管内に伝播するマイクロ波の様相に対して大きく影響した。本研究における数値解析において、最もマイクロ波探傷法の観点から望ましい特徴、すなわち入射部における反射の割合が小さく、また管内部に伝播するマイクロ波モードの周波数依存性も小さいという特徴が得られたのは、テーパ型入射部の場合は $\theta = 30^\circ$ 、楕円型入射部の場合は $c = 30 \text{ mm}$ の場合であった。それらの結果を、従来型のものと一緒に Fig. 2 に示す。心線長さについては、製作性も考慮し、いずれの場合も 5 mm としている。図中 S_{11} とあるのが入射部での反射特性であり、 TM_{01} 、 TM_{02} 等はそれぞれ各モードの透過特性を示している。従来型入射部の場合は入射したマイクロ波が完全反射する周波数帯域が存在し、また、管内に伝播するマイクロ波の各モードの周波数依存性も大きい。テーパ型入射部の場合は従来型入射部と比較し、完全反射する周波数帯域は存在せず、遮断周波数間において周波数依存性が小さいことが確認できるが、その前後において支配的に伝播するモードが高次のものへと遷移していることが確認できる。一方、楕円型入射部形状においては十数 GHz 以降反射特性が -5 dB 程とほぼ一定であり、管内を伝播するマイクロ波は TM_{01} モードが支配的かつ周波数依存性が小さいことが確認できる。単一のモードのみが支配的に伝播することにより、管内を伝播するマイクロ波の速度の正確な把握が可能となり、きず検出および評価の精度向上が期待できる。



(a) Conventional profile



(b) Tapered profile ($\theta = 30^\circ$)



(c) Elliptic profile ($c = 30 \text{ mm}$)

Fig. 2 Reflection and transmission of microwave

3. 実験

3.1 実験体系および条件

数値解析結果検証のための探傷試験を実施した。被測定管を Fig. 3 に示す。内径 39 mm、全長 2,050 mm、肉厚 3 mm の真鍮製直管であり、内径の異なる配管をフランジ

でつなぎ合わせることで減肉を模擬している。減肉形状は全周方向矩形、減肉位置は入射部から 1,500 mm、深さ 1.9 mm、軸方向長さ 50 mm である。マイクロ波の発振および受信にはネットワークアナライザ (Agilent Technology 社製 E8363A) を使用し、ネットワークアナライザと被検査体である配管の結合にはフレキシブル同軸ケーブル (潤工社製 MWX051) とセミリジット同軸ケーブル (アンリツ社製 K118) を用い、ケーブルの接続には同軸ケーブルコネクタ (アンリツ社 K101F-R K) を用いた。

入射部の形状としては、従来型入射部、およびテーパ型入射部、楕円型入射部の 3 種類を製作した。数値解析の結果に基づき、テーパ型入射部においては $\theta = 30^\circ$ 、楕円型入射部の場合は $c = 30 \text{ mm}$ とした。

ネットワークアナライザにおいて発振されたマイクロ波は同軸ケーブル中を伝播し、同軸ケーブルコネクタを介して配管内部へと伝播する。ネットワークアナライザはマイクロ波の発振と併せて反射波の計測も行うが、実際には計測は周波数領域にて行われるため、得られた信号に対して逆フーリエ変換を施すことで、 $t = 0 \text{ ns}$ において入射されたパルス波に対する応答に相当する、時間領域の信号を得る。探傷に用いた周波数帯域は 12~40 GHz、周波数刻みは 17.5 MHz である。

3.2 実験結果および考察

従来型入射部、テーパ型入射部、および楕円型入射部を用いた場合の探傷試験における減肉なしの結果を Fig. 4、減肉ありの場合の結果を Fig. 5 にそれぞれ示す。0 ns における反射波はフレキシブル同軸ケーブルとセミリジット同軸ケーブルの接続部であるコネクタで発生したもの、2~5 ns 付近にみられる反射波は入射部のものであり、複数存在するのは同軸ケーブルの末端と入射部での 2、3 次の反射である。また、15 ns 以降のものは配管終端からのものである。

Fig.4(a)より、従来型入射部は結合部での反射が大きいため、配管内にほとんどマイクロ波が透過しておらず、配管内からの反射波が非常に小さいことがみてとれる。また、Fig. 5(a)より、減肉からの反射波と配管終端からの反射波が重なり、減肉の位置特定が困難である。

Fig. 4(b) より、テーパ型入射部の場合には配管終端からの反射波を確認可能である。Fig.5(b)より、12 ns 付近から減肉からの反射波が生じ始め、減肉からの反射波も確認可能である。

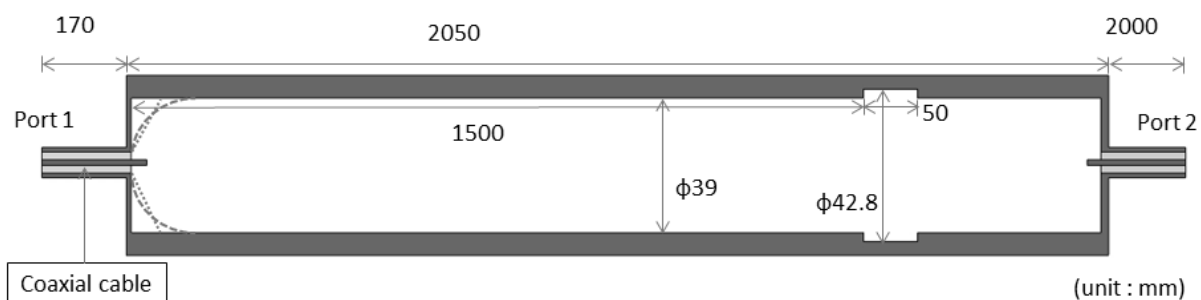
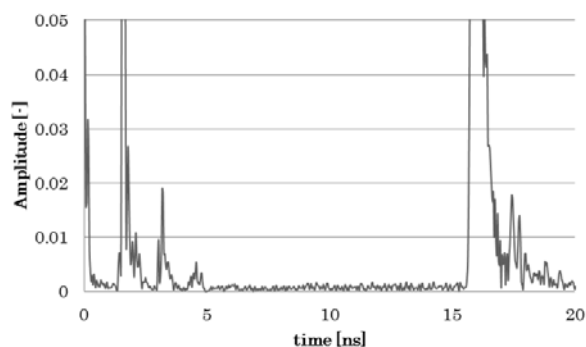


Fig. 3 Specimen for the experimental validation

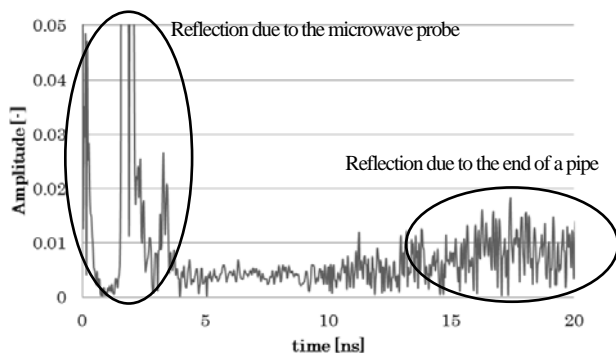
しかし、減肉からの反射波のピークが安定せず、また、配管終端からの反射波と重なり、減肉の位置特定が困難である。

一方、Fig. 4(c)およびFig.5(c)より、楕円型入射部は配管終端、減肉それぞれからの反射波を明瞭に確認できる。数値解析の結果より、これは従来型入射部、テーパ型入射部では管内を複数のモードのマイクロ波が複雑に伝播しているのに対し、楕円型入射部では TM_{01} モードが周波数によらず支配的に配管内に伝播するためであると考えられる。

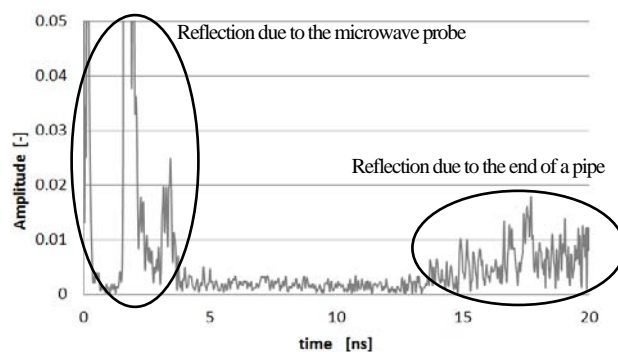


(c) Elliptic profile

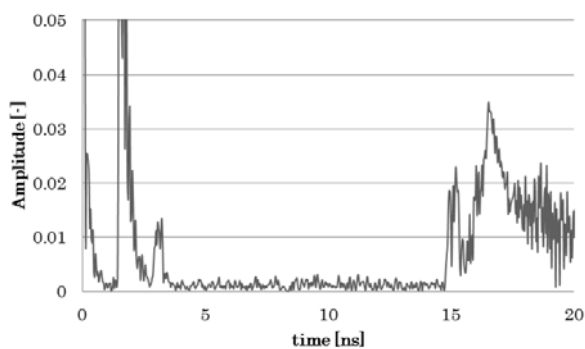
Fig. 4 Reflection of microwave without wall thinning



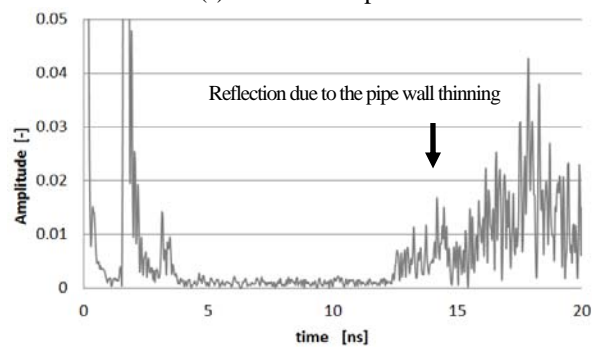
(a) Conventional profile



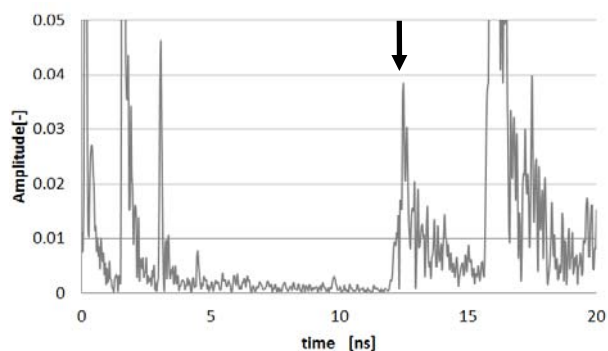
(a) Conventional profile



(b) Tapered profile



(b) Tapered profile



(c) Elliptic profile

Fig. 5 Reflection of microwave due to a wall thinning

4. 結論

本研究では、マイクロ波を用いた配管内面きず一括検査技術の高度化のため、マイクロ波入射部最適化のための検討を数値解析および検証試験により行った。数値解析の結果、入射部を楕円型とした場合に、反射が小さく、かつ、周波数によらず配管内に TM_{01} モードのみを支配的に伝播させることが可能であることが明らかとなった。続いて、数値解析結果に基づいて実際に3種類のマイクロ波入射部を製作し、内径 39 mm の直管を用いた減肉検出試験を行った。入射部を楕円型とすることで、従来型と比べ信号が有意に明瞭化することを確認した。

謝辞

本研究の実施に際しては、東北大学グローバルCOEプログラム「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」および日本原子力研究開発機構「先行基礎工学研究」の助成を一部受けました。

参考文献

- [1] I. Nishiguchi, F. Inada, M. Takahashi, B. Ogawa, T. Inagaki, T. Ohira, K. Iwahara, K. Yamakami, A review: Japanese pipe wall thinning management based on JSME rules and recent R&D studies performed to enhance the rules, *E-Journal of Advanced Maintenance 2* (2010), pp. 14-24.
- [2] T. Knook, M. Persoz, S. Trevin, S. Friol, M. Moutrille, L. Dejoux, Pipe wall thinning management at Electricite de France (EDF), *E-Journal of Advanced Maintenance 2* (2010), pp. 1-13.
- [3] K. Sugawara, H. Hashizume, S. Kitajima, Development of NDT method using electromagnetic waves. *Applied Electromagnetics III* (2001), pp. 313-316.
- [4] Y. Sakai, N. Yusa, H. Hashizume, Nondestructive evaluation of wall thinning inside a pipe using the reflection of microwaves with the aid of signal processing, *Nondestructive Testing and Evaluation 27* (2012), pp. 106-110
- [5] Y. Ju, L. Liu, M. Ishikawa. Quantitative evaluation of wall thinning of metal pipes by microwaves. *Materials Science Forum 614* (2009), pp. 111-116.
- [6] L. Liu, Y. Ju. A high-efficiency nondestructive method for remote detection and quantitative evaluation of pipe wall thinning using microwaves. *NDT&E International 44* (2011), pp. 106-110.

(平成 25 年 1 月 17 日)