

令和元年5月23日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04237

研究課題名（和文）リモートフィールドを利用した配管内二相流の状態監視法の確立と事故時適用への挑戦

研究課題名（英文）Remote-field based tomographic evaluation of two-phase flows aiming at a countermeasure against a loss of coolant accidents

研究代表者

遊佐 訓孝（Yusa, Noritaka）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60466779

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

研究成果の概要（和文）：冷却水喪失を伴うプラント事故対応技術としての適用を想定し、リモートフィールド現象を利用した管外面から内部の気液二相流の流動状態を評価する技術の実現に向けた各種開発を行った。3次元有限要素法解析及び二相流流動試験装置を用いた試験の結果、一般的な鋼管の場合気液二相流界面の検出に必要な高周波と管壁を透過させる磁気シールドの実現は困難であること、また複合材料のような低導電性配管の場合でも、高速かつ高空間分解能での二相流の流動状態を評価することは困難であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時間変動電磁場を用いた対象内部の電磁気的分布の断層撮影技術に関し、高導電性材料内部に低導電性材料が存在する場合について詳細な検討を行った結果、リモートフィールド現象を利用したとしても低導電性材料の詳細な評価を行うことは困難であることを確認した。これにより、冷却水喪失を伴い得るプラント事故においては電磁現象を利用して非侵襲的に配管内部の冷却水流動状態を確認することは現実的ではなく、他の手段による必要があることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：This study attempted the application of remote field eddy current technique to the evaluation of two-phase flows from outside the pipe, especially for the purpose of confirming presence of coolants in the case of a loss of coolant accident. Detailed three-dimensional finite element simulations and experiments revealed, however, high frequency excitation necessary to distinguish water and air makes it difficult to realize remote field phenomena in case of pipes carrying the fluids are made from metals. Furthermore, even the pipes are made from composite materials whose electrical conductivity is much smaller than that of the metals, it was difficult to obtain tomographic images of the two-phase flows with a high spatial and time resolutions as originally expected.

研究分野：原子力工学

キーワード：システム設計・安全工学 事故対応・保全技術 リモートセンシング トモグラフィー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

事故時の原子力プラントの安全確保において、福島第一原子力発電所事故のような想定を大きく上回る事故を持ち出すまでもなく、原子炉主要系統内の冷却水の状態の把握は最重要事項の一つである。しかしながらその一方、問題となるのが、既設の流量計/水位計が適切に機能しない、もしくはそもそもそのような計器が設置されていない箇所の流量もしくは水位に関する情報が必要となることが十分に想定される上、事故時には冷却材の喪失等により本来液相のみが存在する部位であっても気液二相流となっている可能性が高いということである。

一般的に管外から非侵襲で適用可能な気液二相流流動状態把握技術としては、管壁温度測定、放射線撮影、超音波、NMR 等が存在する。しかしながら、管壁温度測定では空間分解能が極めて低い、放射線撮影では隔離した環境が必要となる、超音波では接触媒質が必要となる上に対象の温度が高い場合適用が困難、そして NMR では装置があまりに大がかりであるなど、いずれ既存技術も事故時対策技術という観点からは難があるといわざるを得ない。よって、管外から簡便かつ高精度に、諸配管内の気液二相流の流動状態、特にボイドも含めて気相と液相の動的な境界面を定量的に把握し、もって事故時の系統各部位における冷却水の流動状態及び水位を評価可能な技術は、更なる原子力プラントの安全性向上のために強く望まれるところである。また、そのような技術は実機環境における動的な気液二相流の流動状態を定量的に把握することを可能とならしめるものであるため、その効用は事故対応技術にとどまらず気液二相流の非常減少に起因する劣化事象のメカニズム解明等を通じた通常時の原子力プラントの保全高度化、さらには原子力に限らず、広く他産業においても活用され得るものでもありと期待される。

2. 研究の目的

以上の状況を鑑み、本研究では、時間変動電磁場を利用した新しい気液二相流の管内断面可視化技術、より具体的には、従来特に磁性配管の探傷試験において用いられてきたリモートフィールド渦電流探傷技術を応用することにより管外より時間変動電磁場を管内に伝播させ、液相と気相の電気インピーダンスの差異に起因する電磁場分布の変化を管外 360 度方向から測定することで、管内の液相と気層の分布を評価する技術開発に挑戦する。

3. 研究の方法

本研究においては、上述の目標の達成のため、

(1) 適切な検討対象の選定と各種影響因子の評価

管外で発振した電磁場が管内において分布する様子に対し、配管の口径、材質、管壁厚み等、及び励磁周波数、発振器形状等が及ぼす影響を、数値解析により評価する。併せて、以後の実験的検証のための、任意のボイド率が実現可能である気液二相流試験装置を設計・製作する。

(2) センシング技術の開発、データ分析

(3)にて設計・製作する磁気シールド、及び(4)にて構築する信号収集システムにより、管内部の液体充填率・ボイド率の変化を管外の電磁場変化として検出可能なセンシング技術を確立し、(1)にて製作した試験装置を用いた実証実験を行う。

(3) 電磁場解析に基づくシールド設計、短管試験による検証

リモートフィールド現象を利用して管内に電磁場を効率的に伝達させるための磁気シールドの検討を行う。(1)の結果を踏まえ、管内の二相流の分布により管外にて測定される電磁場に可能な限り大きな変化が生じるような、管内に効率的に電磁場を伝播させるためのシールド形状、材質、設置部位等を数値解析により検討した後、短管試験による検証試験を実施する。

(4) 信号収集技術の開発

複数のセンサにより収取された信号を測定するための多チャンネル信号収集システムを構築する。

(5) 逆解析アルゴリズムの開発、検証試験の実施

管外において測定された電磁場より管内の気相と液相の分布を 3 次元的に評価するための数値逆解析アルゴリズムを開発する。

の 5 項目を実施する。

4. 研究成果

具体的な実施内容及び得られた成果を上記 5 項目ごとに述べる。

(1) 適切な検討対象の選定と各種影響因子の評価

本研究において対象とする適切な配管形状等の検討のため、有限要素法解析による数値電磁場解析環境を整備し、上述のパラメータが管内電磁場分布に及ぼす影響を、軸対称 2 次元及び 3 次元解析により評価した。

得られた有限要素法解析結果に基づき、図 1 に示す気液二相流試験装置を設計・製作した。当該装置は内部に水を保持した端部開放配管に対して一定流量で空気を送り込むことにより、任意のボイド率の気液二相流を実現できるものである。また、試験対象部を交換可能とすることで、複数の内径及び、一般的な鋼管に加えて内部の直接確認が可能なアクリル管を用いた

試験も行うことができるようになってきている。尚、用いる磁場は比較的小であること、数多くの解析を行う必要があることを鑑み、ここでの解析は全て線形かつ周波数領域において行った。

(2) センシング技術の開発、データ分析

(3)において得られた知見に基づき、(1)にて製作した試験装置及び(4)にて構築した信号収集システムを用いた、低導電性配管中の水/空気気液二相流の流動状態及びボイド率変化を变化させての信号収集試験を実施した。試験は複数の条件で行ったが、いずれの場合においても測定時の雑音に比して流動状態及びボイド率変化による明瞭な信号変化を確認することができなかった。

(3) 電磁場解析に基づくシールド設計、短管試験による検証

(1)において整備した数値電磁場解析環境を用い、管内の二相流の分布を管外での電磁場分布に反映させるために、リモートフィールド現象に基づいて管外で発振した電磁場を管内に効率的に誘導するための磁気シールドについて検討を行った。詳細なパラメータサーベイの結果、管内部に存在する二相流の分布が電磁場に反映されるためには想定されていたものよりかなり高い周波数帯が必要であること、また当該周波数帯では完全に電磁場を遮断することのできる理想的な磁気シールドを用いたとしても、一般的な肉厚の鋼管であれば管壁による電磁場の減衰は極めて顕著であり、よって炭素鋼のような高導電性材料と水/空気のような低導電性流体の組み合わせの場合は、管壁を透過して内部を流れる気液二相流水の流動状態を把握することは困難であることが明らかとなった。

この結果を受け、将来のプラント等での適用が想定される、複合材料製の低導電性配管中の水/空気二相流及び鋼管中の液体金属などの高導電性流体/空気二相流という組み合わせを対象とし、新たに数値解析による評価を行った。その結果、これらの対象に対しては磁気シールドを用いずとも、内部を流れる二相流の分布が外部の電磁場に反映されうることを確認することができた。また電磁場の分布の様相からはその物理的背景は一般的なリモートフィールド現象とは異なるが、図2に示すように、励磁源から管軸方向の距離と共に電磁場強度そのものは低下するものの管内部に存在する流体による電磁場の差異の度合いは顕著に大となる、即ち励磁源からある程度離れた箇所に検出センサを配置することが本研究の目的からは有利であることを確認した。

(4) 信号収集技術の開発

複数のセンサにおいて測定された交流信号に対して、並列で取り込みと同期検波を行い、同期検波後の信号振幅と参照信号からの位相差を直流信号として出力し、さらに当該出力信号を高速にサンプリングすることができる信号収集システムを構築した。

(5) 逆解析アルゴリズムの開発、検証試験の実施

測定された交流電磁場より、対象内部の電磁気的特性を3次元的に再構成するための逆解析アルゴリズムを開発した。線形性の仮定のもとで、順問題解析により得られた対象の電磁場より測定信号の変化と対象内部に設定した微小領域内の電磁気的变化を関連付ける行列の計算、及び当該行列の正則化による逆問題解析により測定信号から対象内部の内部導電率3次元分布を評価するためのプログラムを整備し、数値解析信号を用いた妥当性の検証を行った。その後(3)で測定された信号からの二相流分布再構成を試みたが、信号対ノイズ比が小さかったこともあり、期待された明瞭な画像を得るには至らなかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1件)

Naoki Tajima, Noritaka Yusa, Hidetoshi Hashizume, Application of low-frequency eddy current testing to the inspection of a double-walled tank in a reprocessing plant, Nondestructive Testing and Evaluation, 査読有, Vol. 33, 2018, 189-197. DOI: 10.1080/10589759.2017.1376057

6. 研究組織

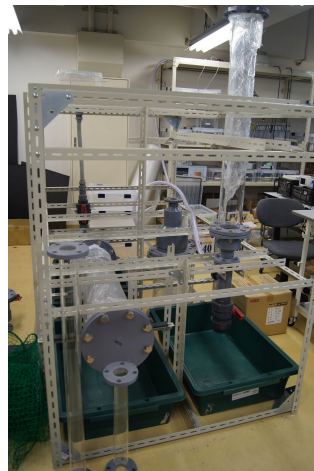


図1 製作試験装置

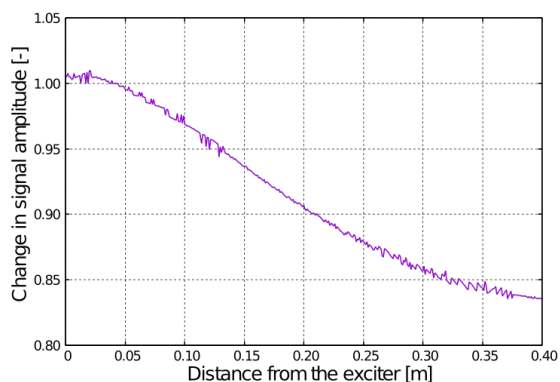


図2 測定位置 信号変化

(1)研究分担者

研究分担者氏名：江原 真司

ローマ字氏名：(EBARA shinji)

所属研究機関名：東北大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁): 30325485