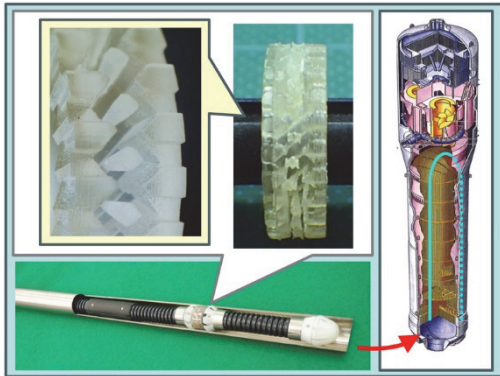


積層造形法(AM)を用いた内挿型渦電流探傷試験用 クロスコイルアレイプローブ製作への取り組み

Approach to Fabrication of Insertion Type Cross Coil Array ECT Probe
Using Additive Manufacturing Technology



西田 純一朗^{*1}
Junichiro Nishida

神納 健太郎^{*2}
Kentaro Jinno

山口 岳彦^{*3}
Takehiko Yamaguchi

小倉 圭二^{*1}
Keiji Ogura

米村 英敏^{*4}
Hidetoshi Yonemura

電源の脱炭素化と電力の安定供給両立を目的として、既存 PWR の再稼働/運転期間延長が進むとともに、革新軽水炉の実現への取り組みや高速炉や高温ガス炉の開発が進んでいる。今後これらの原子力プラントを長期的に保全する上で、様々な仕様の蒸気発生器伝熱管に対する渦電流探傷試験検査技術確立する必要がある。そこで、従来加工技術で実現できない構造/形状の部品を製作できる積層造形法を活用し、高いカスタマイズ性を持つ内挿型渦電流探傷試験用クロスコイルアレイプローブを試作/検証した。この結果、従来プローブと同等の性能/品質を持ちながら様々な仕様の伝熱管に対応したプローブを確保できる見通しを得た。

1. はじめに

原子力発電は運転時に CO₂を排出しないことに加え、天候の影響を受けにくい。このため資源エネルギー庁は、電源の脱炭素化と電力の安定供給を両立すべく、安全最優先で原子力の活用を進めている⁽¹⁾。このような背景から、既存 PWR(加圧水型軽水炉:Pressurized Water Reactor)の再稼働/運転期間延長が進むとともに、さらなる安全対策を盛り込んだ革新軽水炉の実現に取り組んでいる。また、将来の原子力有効利用に向けて高速炉や高温ガス炉の開発にも着手している。これら原子力プラントの長期的な安全運転を実現するため、三菱重工業株式会社(以下、当社)は、保全技術高度化を推進している。

既存 PWR には、主要機器として 1 プラントにつき 2 基から 4 基の蒸気発生器(Steam Generator, 以下 SG)が設置されており、その中に全長が約 20m、外径が約 20mm、板厚が約 1.3mm のニッケル基合金製の伝熱管が約 3400 本収納されている。SG の定期検査では主な検査手法として伝熱管に対し渦電流探傷試験(Eddy Current Testing, 以下 ECT)が適用される。また、革新軽水炉/高速炉/高温ガス炉における SG 等の熱交換器伝熱管についても ECT が適用される計画であるが、それぞれの炉型で採用される伝熱管は外径/肉厚/材質の仕様が異なる見込みである。今後、保全に取り組むにあたっては、様々な仕様の伝熱管に合わせた ECT 検査技術確立する必要があることから、仕様変更が容易なプローブが望まれる。そこで当社では、既存 PWR の SG 伝熱管検査にて実績のある、欠陥検出性/欠陥方向識別性に優れ、かつ高速探傷が可能なインテリジェント ECT プローブ(以下、従来プローブ)で確立した技術をベースとし、様々な仕様の伝熱管に対応できる新たな内挿型渦電流探傷試験用クロスコイルアレイプローブ(以下、新型プローブ)の開発に着手した。

*1 原子力セグメント 品質保証部

*3 総合研究所 電子・物理研究部 主席チーム統括

*2 総合研究所 電子・物理研究部

*4 原子力セグメント 品質保証部 課長

従来プローブは開発から 20 年以上が経過しており、その間に、積層造形法 (Additive Manufacturing, 以下 AM) の技術は進歩し、従来の機械加工や射出成型等では実現できなかった構造/形状の部品を製作できるようになった⁽²⁾。そこで、プローブの製作性向上と、異なる仕様の伝熱管に対する高いカスタマイズ性確保を目的として、プローブの構成部品製作に AM 技術を活用したコイル構造を考案した。具体的には、AM 技術で製作したコイルホルダ上の溝に、直交する大小 2 つのコイルを差し込むことで構成したクロスコイルを、プローブ周方向にアレイ配置する構造とした。

また、従来プローブはコイルホルダとは異なる複数部位に樹脂部品が使用されており、これらの部品を射出成型により製作している。射出成型部品を異なる仕様の伝熱管に対応させるためには都度新たな金型製作が必要となることから、カスタマイズが容易ではない。そこで、仕様変更に伴う金型製作/更新を不要とすることを目的として、コイルホルダ以外の樹脂部品も AM 技術で製作することを検討し、適用可能な AM 手法を選定した。

本報ではこれらの成果を紹介するとともに、伝熱管の内/外表面に人工欠陥として付与した周/軸方向の放電加工 (Electrical Discharge Machining, 以下 EDM) スリットを対象に実施した、新型プローブの検出性確認試験結果を報告する。

2. クロスコイルを利用したアレイプローブの概要

現在、SG 伝熱管検査に適用されている従来プローブは、欠陥を高い SN 比^{*}で検出でき、かつ欠陥の方向も識別可能な相互誘導方式のアレイプローブである⁽³⁾。図 1 に検査対象である SG 伝熱管の概要と従来プローブの検出コイルとして使用している薄膜コイルを示す。

※欠陥の信号を S (Signal) とし、雑音信号を N (Noise) としたときの、S と N の比を表す。SN 比が高ければ、欠陥信号の識別性が向上する。

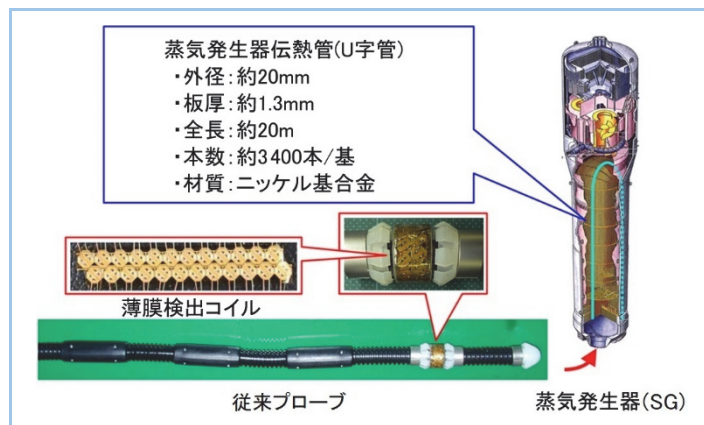


図1 従来プローブと薄膜検出コイル

薄膜検出コイルの製造プロセスである金属積層フィルムのエッチングには高い技術が要求され、設計変更時には都度製作可否の検証が必要であることから、伝熱管仕様変更に伴うカスタマイズには大きな労力を要する。加えて、設計仕様を満足する渦電流を発生させるためには、プローブ組立時に薄膜検出コイルと励磁コイルとの位置関係を高い精度で管理する必要があり、プローブの組立作業には熟練技量が必要とされる点も課題である。

これらの課題に対応するため、自動巻きで製作可能な大小 2 種類の単純形状コイルを直交させて組み合わせたクロスコイルを考案した。図 2 にクロスコイルの概念図を示す。外側に励磁コイルを配置し、その内側に一回り寸法の小さい検出コイルを挿入した構造となっており、従来プローブと同様に相互誘導方式で動作させる⁽⁴⁾。このクロスコイルは、狭い間隔で隣接させることができ、高い周方向分解能を有するアレイプローブとして適用できる。アレイ配置に際し、隣接するコイル同士の物理的な干渉を防止しつつ、コイルの巻き数を多くして欠陥検出性を向上させるため、

図3に示すように励磁コイルを矩形、検出コイルを台形とした。この構造によって、高いSN比を維持しつつ、伝熱管仕様に合わせて柔軟にプローブ仕様を変更することができる。

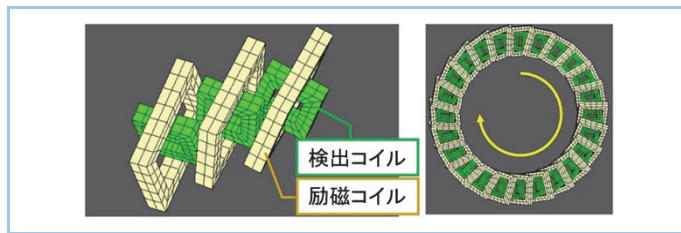


図2 クロスコイル及び周方向アレイ配置の概念図

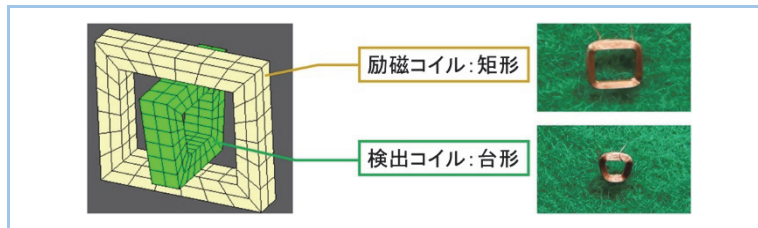


図3 矩形励磁コイルと台形検出コイルを組み合わせたクロスコイル

3. AM 技術による新型プローブ製作の試み

3.1 コイルホルダへの AM 技術適用

クロスコイルを利用したアレイプローブの組立てに当たり、図4に示すように励磁/検出コイルを保持するためのコイルホルダを設計した。アレイプローブを組み立てる上では、サイズの小さな励磁/検出コイルを精度よく組み合わせてプローブ周方向に配置させる方法を確立する必要がある。そこで、コイルホルダは励磁/検出コイルそれぞれの寸法と位置関係に合わせた溝を有する構造とし、クロスコイルを差し込むことで容易に組立作業を行うことができるようにした。

一方で、設計した構造を従来の加工技術である機械加工や射出成型で実現するには形状が複雑であることに加えて、コイルを狙いどおりの姿勢で固定するための高い寸法精度の確保が困難であることから、AM 手法の一つである光造形法を用いて製作した。図5に完成したコイルホルダを示す。

図6にクロスコイルをコイルホルダの溝に挿入して組み立てた新型プローブのヘッド部を示す。従来プローブは12コイル×2段の合計24コイルを周方向に配置しているが、新型プローブは従来プローブと同等の周方向分解能を24コイル×1段で実現できた。これにより、ヘッド部の軸方向長さに余裕が得られ、コイルの周囲に信号線用の溝を設けることができるなど、プローブ組立てが容易となり、安定した製造品質を確保するための設計裕度を得られた。

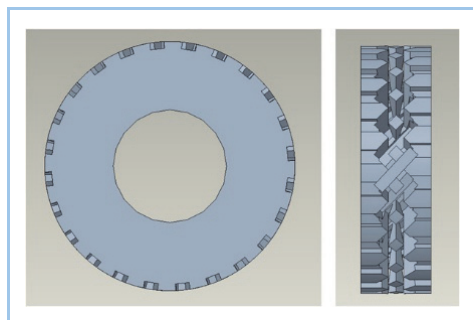


図4 コイルホルダの3次元図面



図5 AM 技術で製作したコイルホルダ

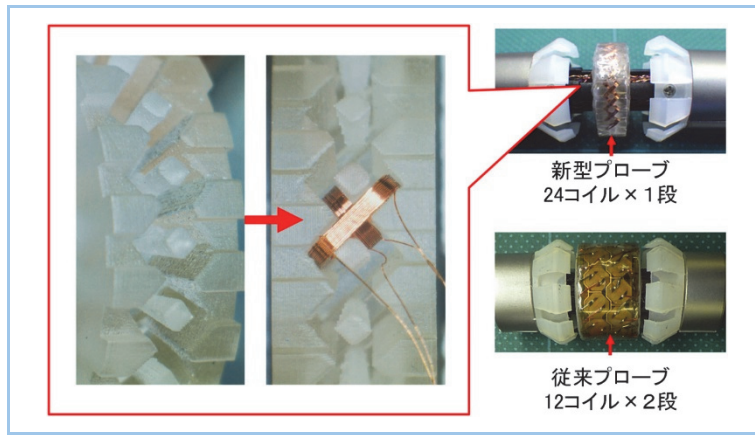


図6 クロスコイルをコイルホルダ上の溝に挿入して組み立てた
新型プローブのヘッド部と従来プローブのヘッド部

3.2 コイルホルダ以外への AM 技術適用

コイルホルダ以外の樹脂部品に対して AM 技術を適用するにあたり、図 7 に示す 2 部品を対象として試作した。図 7(a)は一部で肉厚が薄い部分があることから製作難易度が高く、また伝熱管内面と直接接触することから、プラント設備健全性に影響を及ぼさないために材料成分について制約がある部品である。また、図 7(b)は、形状が複雑であり製作難易度が高い部品である。

適用する AM 手法としては、光造形法/粉末焼結積層造形法/マテリアルジェーティング/熱溶解積層法の 4 手法を選定し、造形精度/強度/材料成分の 3 つの観点で評価した。試作評価の結果、熱溶解積層法で製作した部品が各評価項目を満足できることを確認できた。図 8 に熱溶解積層法で造形した部品を示す。図 7 で示した射出成型部品と外観上においても大きな差異は認められず、実機適用可能な品質であることが確認できた。

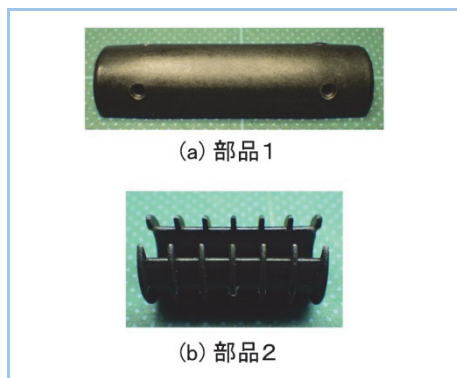


図7 射出成型で製作した樹脂部品

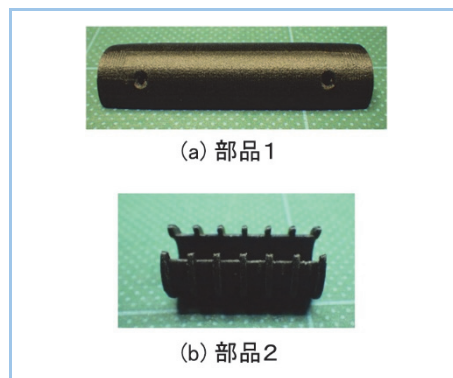


図8 熱溶解積層法で造形した樹脂部品

4. 新型プローブの試作評価

図 9 に、試作した新型プローブの外観を示す。このプローブを用いて、伝熱管の内/外表面に人工欠陥として付与した深さ $20\%t$ (t :伝熱管の板厚約 1.3mm) の周/軸方向 EDM スリットを対象に検出性確認試験を実施した結果、全てを検出できた。

図 10 に(a)新型プローブと(b)従来プローブによる検出性確認試験の結果を、人工欠陥の信号及び信号の振幅を色相変換して表示させた色調図で示す。信号からは、新型プローブの信号位相角が欠陥方向の違いにより従来プローブと同様に変化することが確認できた。また、色調図からは、新型プローブは従来プローブと同等の SN 比による検出性能を実現できていることが確認できた。以上のことから、新型プローブが従来プローブ同等の欠陥検出性と欠陥方向識別性を有する見通しを得た。

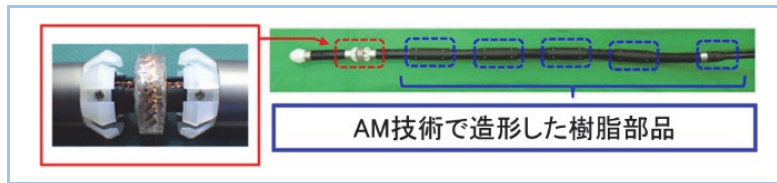


図9 試作した新型プローブ

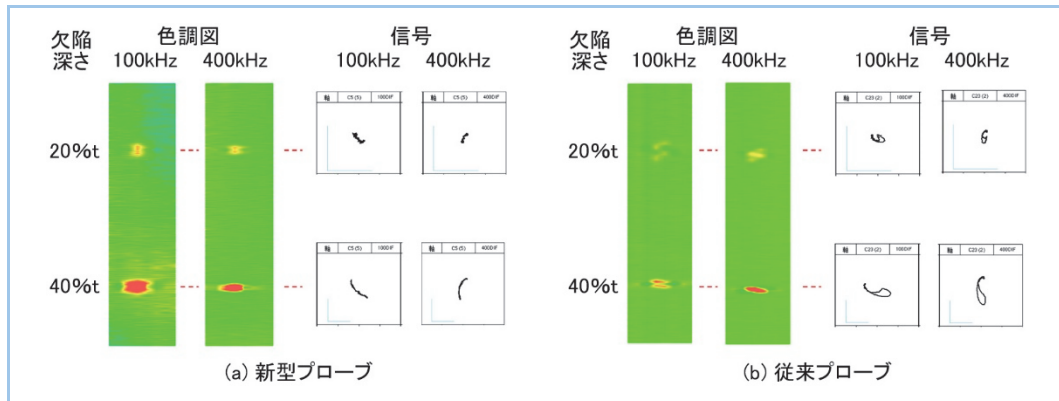


図10 新型プローブと従来プローブによる検出性確認試験結果

5. まとめ

AM 技術を用いた新型プローブ製作に取り組んだ結果、下記のような成果が得られ、従来と同等の性能/品質を持ちながら様々な仕様を持つ伝熱管に対応可能なアレイプローブを確保できる見通しを得た。

①AM 技術を用いて、単純形状コイルを2つ組み合わせたクロスコイル構造を考案した。

②新型プローブの樹脂部品を複数の AM 手法で試作し、造形精度/強度/材料成分の観点から評価した結果、熱溶解積層法で製作した部品が各評価項目を満足し、樹脂部品を AM 技術で製作できる見通しを得た。

③試作した新型プローブの検出性確認試験を実施した結果、伝熱管の内/外表面に人工欠陥として付与した深さ 20%t の周/軸方向 EDM スリットを高い SN 比で検出でき、新型プローブが従来プローブ同等の欠陥検出性と欠陥方向識別性を有する見通しを得た。

引き続き新型プローブの実機適用に向けて開発を推進し、原子力プラントの保全活動に貢献してゆく。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁, GX における次世代革新炉の動向,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/007_01_00.pdf
- (2) 渡辺崇史, 3D プリンターの基礎知識, 日本義肢渡装具学会誌, Vol.32, No.3, (2016), p.148~153
- (3) 川田かよ子ほか, インテリジェント ECT システム, 日本工業出版“検査技術”, Vol.10, No.3, (2005), p.66~72
- (4) 西田純一郎ほか, コイルモジュール, 渦電流探傷用プローブ, 及び渦電流探傷装置, 特開 2024-33116, 2024.3.13