

原子炉内監視用の多目的長距離プローブの開発

Development of multi-purpose long-range probe for monitoring inside of nuclear reactor

(株)四国総合研究所

白石 浩造

Kozo SHIRAISHI

A thimble tube (hereinafter “thimble”) is a tube through which a cable equipped with a small movable detector (MD cable) is inserted into a nuclear reactor in operation to measure the neutron flux distribution therein. The thimble is a long, small-diameter stainless steel tube with an outer diameter of about 8 mm, an inner diameter of about 5 mm and a length of as long as 36 m. The MD cable that is routed through the thimble is an insertion cable with a spiral wire wound around it, and various types of sensor can be attached to the end thereof to conduct neutron flux measurements or eddy current testing (ECT). In our latest project, a new insertion cable was developed independently and examined for its applicability to practical utilization by an endurance test. In addition, a signal extraction technique, which uses a micro-camera or temperature sensor attached to the end of the cable to grasp the conditions in a nuclear reactor remotely, was developed.

Keywords: long-range probe, monitoring, nuclear reactor, in-core instrumentation, thimble tube, sensor

1. 緒言

シンブルチューブ（以下シンブルという）は運転中における原子炉内の中性子束分布を測定するため、小型可動式検出器付きのケーブル（MD ケーブル）を原子炉内に挿入するための管である。シンブルは外径が約 8mm、内径が約 5mm の小口径ステンレス管であり、長いもので約 36m に達する(Fig.1)。

シンブル内を通過させる MD ケーブルはヘリカルワイヤ式の挿入用ケーブルであり、ケーブルの先端に各種センサを取付けることにより、中性子束の測定や渦電流探傷 (ECT) を実施することができる。

今回、上記挿入用ケーブルを独自に開発し、耐久試験により実機適用性を確認した。さらに、ケーブル先端に超小型カメラや温度センサを取付けることにより、遠隔から原子炉内部の状況を把握する信号採取技術を開発した。

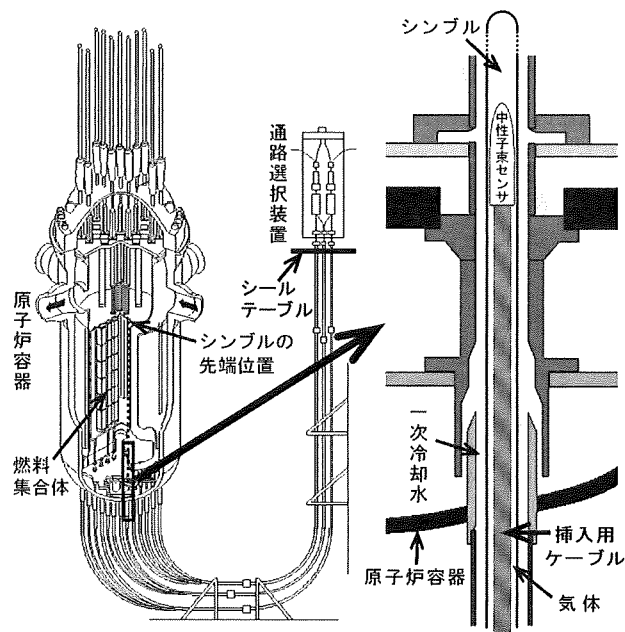


Fig.1 In-core instrumentation system

2. 各種センサ挿入用ケーブルの開発

2.1 開発ケーブルの構造

開発したケーブルは、信号線とその周りに巻いた三層のワイヤ等から構成されている。各層は平型の金属線をコイル状に巻いた第一層、約 20 本のワイヤを第一層の外周に撚り線状に巻き付けた第二層、および第二層の外周に一定間隔でらせん状に巻き付けたワイヤ（ヘリカルワイヤ）の第三層から構成されている(Fig.2)。

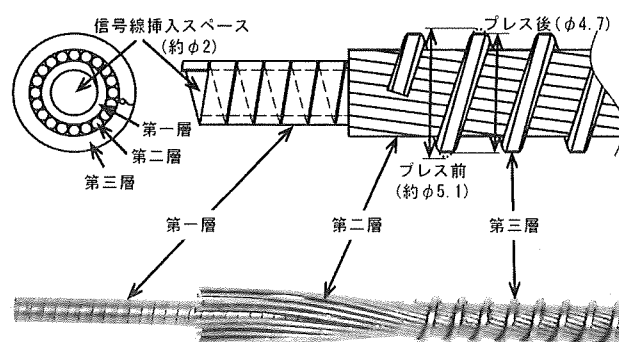


Fig.2 Structural drawing (above) and photograph (below) of developed cable

連絡先: 白石 浩造、〒761-0192 香川県高松市屋島西町 2109-8、(株)四国総合研究所産業応用技術部、E-mail: kshiraishi@ssken.co.jp

2.2 開発ケーブルの特徴

- (1) 第一層と第三層は左巻き、第二層は右巻きとすることで、ケーブルの駆動中に発生する各層の緩みを低減している。
- (2) 第一層は ECT 等の信号線を保護するとともに、信号線を挿入するスペースを確保するため、内径 2mm 程度の中空部を設けている。
- (3) 第二層はケーブルの圧縮強度を高め、ケーブルの挿入性を向上させるとともに、引張強度 4.5kN（既存の挿入用ケーブルの規定強度の 2 倍）以上という高い強度を備えている。
- (4) 第三層はシンプル内面との接触面積を低減することによりケーブルの挿入性を向上させるとともに、斜歯歯車（ヘリカルギア）方式としてケーブルを駆動する際の歯車の噛込み部としての役割も持っている。また、ケーブル製造の最終段階において、プレス機で外周を圧縮することにより、駆動時における第三層のズレに対する強度を高めているとともに、外径を小さく（約 $\phi 5.1\text{mm} \rightarrow \phi 4.7\text{mm}$ ）することによるケーブルの挿入性向上を図っている。

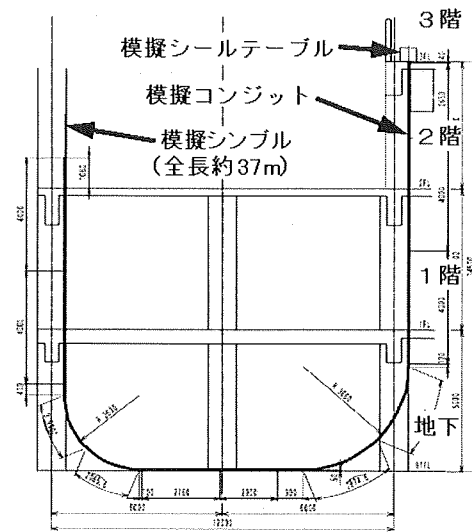


Fig.3 Thimble simulator

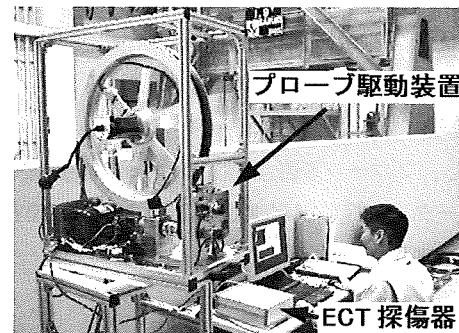


Fig.4 Probe drive unit

2.3 開発ケーブルの耐久試験結果

四国電力(株)原子力保安研修所の地下～3 階に実機を模擬した実験装置 (Fig.3,4) を設置し、実機における最も厳しいシンプルの曲率等の条件を設定した上で、全長約 37m の模擬シンプルを用いて、推定使用回数を上回る 1,000 往復の耐久試験を実施した。その結果、耐久試験の前後でケーブルの挿入性や強度に低下が生じないことを確認した(Fig.5,6)。その後の 10,000 往復の耐久試験でもケーブルの挿入性に変化が見られないことから、今後、さらに耐久試験でケーブルの使用限界を確認する予定である。

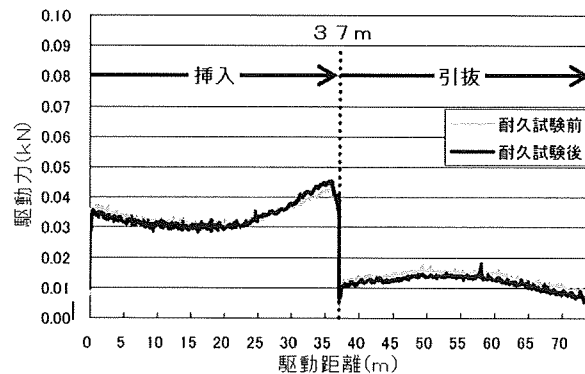


Fig.5 Results of measurement of drive force before and after endurance test

2.4 効果

開発ケーブル (40m) は既存の挿入用ケーブルと遜色なく、かつ経済的に各種仕様のものを製作可能である。また、シンプルの ECT のみならず、各種センサや治具の取付けにより、シンプルの内部センシングや内部清掃、および挿入長測定用としても使用可能である。

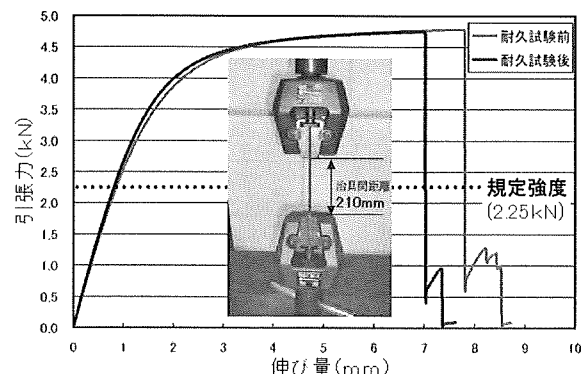


Fig.6 Tensile strength before and after endurance test

3. 各種センシングプローブの開発

3.1 シンプル ECT プローブの開発

Fig.7 に独自開発したシンプル ECT プローブを示す。プローブケースは、挿入用ケーブルとの接合面において、3.0kN 以上の高強度で接合されているとともに、万一接合強度が著しく低下した場合でもシンプル内にケースが残留しない構造としている。接合には連続 180°C まで耐えられる特殊な接着材、および第三層との噛込み部を用いており、溶接に比べ、接合部付近の錆の発生を抑えるとともに、接合時に高熱が発生しないため、ケース内に ECT センサを組込んだ状態で接合できるなどの利点がある。

本プローブを用いて模擬欠陥によるきずの検知感度や形状評価精度を確認した結果、既存プローブと同等であることが確認されたため、ECT データ収集機能についても 10,000 往復の耐久試験を実施した。その結果、試験中に断線や感度低下等は発生せず、安定して ECT データが収集できることを確認した(Fig.8)。

ただし、プローブ駆動装置にプローブを装着した際に ECT データ上に定常ノイズが発生したため、駆動系全体を絶縁材で電氣的に隔離し、制御ボックスにノイズフィルタを設置することでノイズ低減を図った。その結果、S/N 比が良好な ECT データの収集が可能となった。

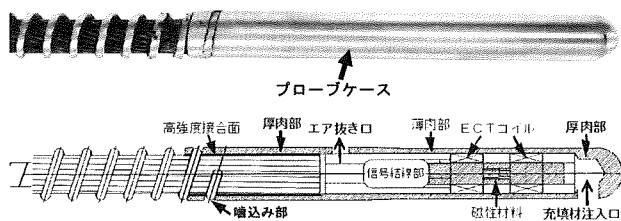


Fig.7 Thimble ECT probe

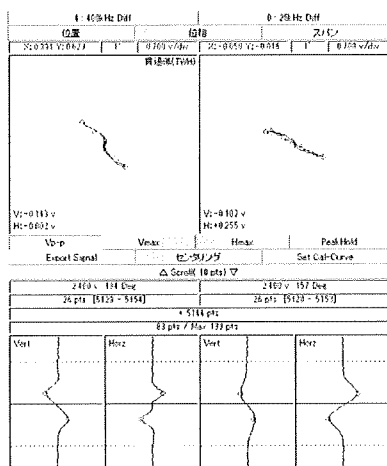


Fig.8 Thimble ECT signal (Drilled hole)

3.2 シンプル内観察用長距離プローブの開発

シンプル ECT プローブに用いた挿入用ケーブルや高強度接合技術等を活用し、シンプル内観察用の長距離プローブを開発した(Fig.9)。カメラ本体には比較的放射線に耐性のある CMOS タイプを採用しており、先端にシンプル内照射用の高輝度 LED4 個を配置している。

プローブ製作前に、本カメラに長距離ケーブルを接続したところ、LED 照明の光量に減衰が見られた。このため、ケーブルによる電圧降下等を考慮して照明用電圧を調整するとともに、撮影対象に応じてコントラスト等を調整することで、カメラの画質調整機能を向上させた。また、カメラとレンズの距離を調整することでカメラの焦点距離を最適化し、付着物や管壁表面等の視認性を向上させた。

Fig.10 にシンプル内の映像例を示す。この映像はシンプル内をプローブが余裕を持って通過できる程度の小さな模擬付着物を付けた例であり、撮影画像から付着物の形状や色を明確に識別できることや、管壁の表面を詳細に観察できることがわかった。

本技術を活用して高線量の箇所を撮影する場合、シンプルのように細長く、かつ必要に応じて先端部等を開口した長尺案内管をあらかじめ設置しておき、撮影時のみ低線量エリアから高線量エリアへカメラを搬送することで、カメラの放射線劣化を抑制できるとともに、作業者の被ばく防止にも役立つことができる。

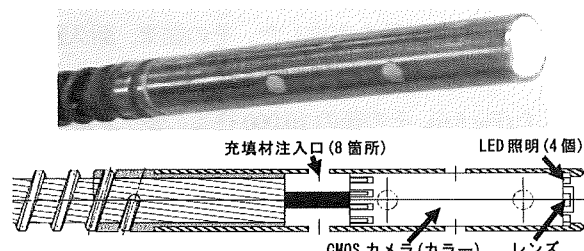


Fig.9 Long-range probe for observation of inside of thimble

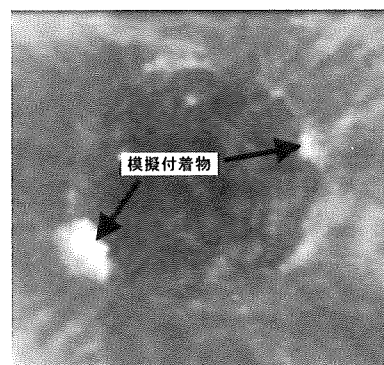


Fig.10 Example of image of thimble interior surface

3.3 多地点温度測定用長距離プローブの開発

前記カメラプローブと同様に、シンプル ECT プローブに用いた挿入用ケーブルや高強度接合技術等を活用し、温度測定用の長距離プローブを開発した(Fig.11)。感温部には 300°Cまで測定可能な T 型 (銅-コンスタンタン) 熱電対を採用するとともに、シンプル内の熱をすばやく取込むため、通風口を 12 箇所設けている。また、信号ケーブルには耐熱性や防水性に優れた MI (Mineral Insulation : 無機絶縁) ケーブルを採用している。

ただし、現状では接着材の耐熱が連続 180°Cであるため、接合強度がやや低下するが 900°Cまで耐熱性のある別の接合方式を用いた K 型 (クロメル-アルメル) 熱電対プローブについて、実用上必要な接合部強度以上にする方法を検討中である。

また、本プローブは ECT プローブやカメラプローブと同様にプローブ駆動装置に装着可能であり、挿入長を調整することで、任意の挿入位置で連続的に温度測定が可能 (ただし、高精度な測定には 1 箇所あたり 3 分以上必要) である。なお、T 型熱電対プローブを駆動装置に装着した場合でも 0~100°Cの範囲で JIS クラス 1 の許容誤差 ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) を満たしていることを確認した。

900°Cまで測定可能なプローブが実用化すれば、多地点の温度分布を測定することが可能となり、様々な過酷環境等における温度測定分野への適用が期待できる。

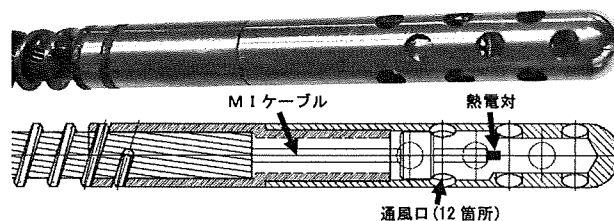


Fig.11 Long-range probe for multi-point temperature measurements

4. 結言

シンプル内を通過でき、中性子束測定や ECT を実施できる挿入用ケーブルを独自開発するとともに、10,000 往復の耐久試験により実機適用性を確認した。さらに、ケーブル先端に取付ける超小型カメラプローブや温度測定プローブにより、シンプル内表面の観察や多地点温度測定を遠隔で行う技術を開発した。

今後、各プローブの耐放射線試験等を実施して実機適用性を高めるとともに、本技術を応用した様々なセンシング技術等についてさらに検討を進める予定である。

参考文献

- [1] 山地幸司、“四国電力における技術革新のあゆみ”、電気評論 (2012.1)、PP.186-187.

(平成 24 年 6 月 15 日)

