

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：
高クロム鋼を用いた1次冷却系配管に適用する流量計測システムの開発
 （三菱FBRシステムズ株式会社）

研究開発の実施者

機関名：三菱FBRシステムズ（株） 代表者氏名：岩田 東
 機関名：日本原子力研究開発機構 代表者氏名：平林 勝
 機関名：筑波大学 代表者氏名：文字秀明

研究期間及び予算額：平成18年度～平成21年度（4年計画） 587,227千円

研究開発予算

平成 18 年度 90,588 千円
 平成 19 年度 189,893 千円
 平成 20 年度 168,941 千円
 平成 21年度 137,806千円

項 目	内 容						
1. 目的・目標	<p>【開発の必要性】</p> <p>ナトリウム冷却炉の実用化概念では、経済性を高めるため配管の短縮を追求し、高温強度に優れ熱膨張率の小さな高クロム鋼を採用する方針である。高クロム鋼は磁性体であり、これまでFBR原型炉もんじゅ等の1次冷却系流量計測システム（以下、流量計測システム）として採用されてきた電磁流量計は採用できない。ナトリウム冷却炉の流量計測システムは、安全保護系として炉心の冷却異常を検出して原子炉を緊急停止させるという重要な機能を持つことから、実用化概念に適合する流量計測システムを開発する必要がある。</p> <p>【研究開発目標】</p> <p>本事業では、ナトリウム冷却炉の実用化概念である1次冷却系の直管部が短い高クロム鋼（磁性体）の2重管構造の大口径配管に適用する安全保護系流量計測システムに適合する方式と考えられる超音波伝搬時間差多測線方式流量計測システム（超音波センサは配管に直接接触させる）について、高温用超音波センサ技術、センサ遠隔交換技術、信号処理技術の開発及び測線最適化検討を行い、実機に適用するシステムの仕様、有効性及び安全保護系適用への課題の解決策を示すことを目標とする。</p> <p>【開発要件及び条件、技術の卓越性】</p> <p>開発要件及び検討条件を以下に示す。これらに適合する流量計測システムはこれまでに例がない。</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 40%;">項目</th> <th style="width: 50%;">内</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">場 置</td> <td style="text-align: center;">設置場所</td> <td>1次冷却系低温側主配管 直管部の長さ：配管口径の約5倍</td> </tr> </tbody> </table>		項目	内	場 置	設置場所	1次冷却系低温側主配管 直管部の長さ：配管口径の約5倍
	項目	内					
場 置	設置場所	1次冷却系低温側主配管 直管部の長さ：配管口径の約5倍					

	配管構造	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2重管構造(内管：ナトリウムバウンダリ、外管：窒素ガスバウンダリ) ・ 流量(高温用超音波)センサは、内管と外管の間に、安全保護系用として相互に独立の4系統(チャンネル)の信号が得られるように設置できること ・ 原子炉運転中は2重化された配管系内の気密を保つことができ、流量センサの交換は、原子炉停止時に外管を取り外さず遠隔でできること ・ 内管に枝配管、計装ウェル、異材継手を設けないこと 	
		内管材質	高クロム鋼
		内管口径	28B(外径約710mm)～50B(外径約1,270mm)
		Na温度範囲	200～530(定格温度：395)
		ケーブル	100m程度(流量センサから制御室盤まで)
	計測機能及び性能	基本機能	安全保護系及び運転制御系(監視用)
		計測範囲	定格重量流量の約0～130%(定格平均流速：7～10m/s。停止時から過流速条件までを想定)
		直線性及び繰返し性	計測範囲の±2%以内(流量センサから流量異常を判定する回路に入力するまでの間)
		出力信変動	中央値の±5%以内(流量センサから流量異常を判定する回路に入力するまでの間)
		応答時間	0.3s以内(1次遅れ時定数とムダ時間の和。流量センサを経て流異常を判定する回路か出力までの間。出力信号変動抑制機を含む。)
		単一故障影響範囲の限定	想定される単一故障により複数セットの流量センサから流量異常を判定する回路までの機能及び性能に異常が生じないこと
		交換寿命	1サイクル運転期間：18～26ヶ月の間、無交換であること。
	<p>出典：本公募事業募集要項</p> <p>【全体計画】</p> <p>研究開発項目は、大きく分けて3項目からなる。</p> <p><u>研究開発項目1</u>：高温用超音波センサ及びセンサ遠隔交換技術の開発</p> <p>センサ検討及びセンサ試験</p> <p>ニオブ酸リチウムを用いた圧電素子方式超音波送受信子について、基本開発仕様を検討し、構造検討を行う。また、外部ケーブル接続部、センサの圧電素子周り及びカプラント(超音波の配管との間の伝音効率を向上させるためのもの)の要素試験体を製作して、試験を実施し、要素レベルで基本性能を確認する。次いで、センサ試験(センサ単体での試験)用のセンサ試験体を設計、製作し、センサ試験を実施して高温及び温度変化に対する特性を確認する。</p> <p>センサ遠隔交換機構検討</p> <p>センサ遠隔交換機構の基本開発仕様を設定する。その結果を基に、複</p>		

	<p>数のセンサ押し付け機構概念を検討し、その中から 2 案を選択して構造検討を実施する。また、選択した 2 案の要素試験体を設計、製作し、試験を実施してセンサ押し付け機構の基本性能を確認する。</p> <p>センサ・遠隔交換機構試験</p> <p>センサ・遠隔交換機構試験用のセンサ試験体及び遠隔交換機構試験体に採用する構造の選定を行う。センサ試験体、遠隔交換機構試験体及びセンサ・遠隔交換機構試験体を設計、製作し、センサ・遠隔交換機構試験を行い、センサ試験体並びに遠隔交換機構試験体のセンサ押し付け機能の高温及び温度変化に対する特性を確認する。</p> <p>実機向けセンサ・遠隔交換機構仕様検討</p> <p>センサ・遠隔交換機構試験結果に基づき実機向けセンサ及び遠隔交換機構の仕様検討を行う。</p> <p>研究開発項目 2：信号処理技術の開発</p> <p>信号処理装置試験体の設計、製作、改良</p> <p>信号処理装置試験体の基本開発仕様を検討し、大口径配管への適用による受信信号 SN 比低下や多測線化に対応し、安全保護系に適用可能な信号処理手法の検討及び信号処理装置試験体の設計、製作を行い、基礎水試験及びナトリウム試験を通じて信号処理手法及び信号処理装置試験体の改良を行う。また、水流動試験データ及び測線数検討結果に基づき信号処理装置試験体の信号処理性能を検証し、実機向け信号処理手法及び信号処理装置の検討を行う。</p> <p>基礎水試験</p> <p>基礎水試験体を設計、製作し、水循環装置を用いて試験を行う。</p> <p>ナトリウム試験</p> <p>ナトリウム試験体を設計、製作し、ナトリウム循環装置を用いて試験を行う。</p> <p>研究開発項目 3：測線最適化検討</p> <p>水流動試験計画</p> <p>信号処理装置試験体の信号処理性能の検証及び測線最適化解析評価手法の開発のための水流動試験計画の作成及び試験体設計を行う。</p> <p>水流動試験体製作、試験</p> <p>水流動試験体を製作し、試験を行う。</p> <p>測線最適化手法検討</p> <p>最適な測線数の解析評価手法を開発する。</p> <p>測線数検討</p> <p>信号処理装置試験体の信号処理特性評価のための測線数を設定する。</p> <p>解析評価手法検証</p> <p>水流動試験計画、水流動試験及び測線最適化手法検討における検討結果を比較し、解析評価手法を検証する。</p>
<p>2 . 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等 	<p>【研究開発項目（1）高温用超音波センサ及びセンサ遠隔交換技術の開発】 [得られた成果]</p> <p>実機向けと同等の仕様の高温用超音波センサ（以下、センサ）試験体について、単体で実機の場合と同様の押付力を加えた状態で、事故時に想定される最大変化幅（170 530 ）での温度サイクル 5 回、それに引き続き、通常の運転状態として想定される最大変化幅（328</p>

395)での温度サイクル約 800 回(センサ設計寿命に相当する回数(1 回/日×365 日×26 ヶ月/12 ヶ月×94.3%(暫定稼働率)750 回)より裕度を持たせた回数)試験時間にして約 3,000 h(本公募事業で実施可能な時間;軽水炉の日負荷追従計画を参考にして、出力変更時間を約 1h とし、高温と低温側の温度保持時間をそれぞれ 1 h 弱として、1 サイクルの時間が 4 h 弱の温度サイクル約 800 回の合計時間(時間短縮はセンサへの熱過渡が厳しくなるため、保守側の評価結果となる))印加する試験を実施し、高温・温度サイクル特性を確認した。センサの信号レベル変化は、事故時及び通常運転時模擬それぞれ 1 dB 程度であり、センサについて実機の温度環境で使用可能な見通しを得た。

実機向けと同等の仕様のセンサ試験体とセンサ遠隔交換機構(以下、遠隔交換機構)試験体を組み合わせて、実機の場合と同様、窒素雰囲気下で、200 において遠隔交換機構試験体の所定の取付位置への挿入を行った後に、実機の場合と同様、センサ試験体に押付力を印加した状態で、通常運転を模擬する定格出力時温度(395)で 1,000 h(遠隔交換機構試験体による押付の安定性を確認するために十分な期間)それに引き続き、事故時に想定される最大変化幅(170 530)での温度サイクルを 5 回印加する試験を実施し、高温・温度サイクル特性を確認した。その後、200 において遠隔交換機構試験体の引き抜き、再挿入、センサ試験体の再押し付けを行った。センサの信号レベル変化は通常運転時及び事故時模擬それぞれ 1 dB 程度であり、遠隔交換機構試験体によるセンサの押し付けが安定しており、また、200 においてセンサの遠隔交換が可能であったことより、センサと遠隔交換機構の組合せについて実機の温度環境で使用可能な見通しを得た。

上記の成果に基づきセンサ並びに遠隔交換機構の実機向け仕様表及び外形図を作成した。また、安全保護系に適用するための課題を明確にし、課題解決を見通すことのできる今後の開発計画を策定した。

【研究開発項目(2)信号処理技術の開発】

[得られた成果]

既存のナトリウム冷却炉中型炉のポンプ組込型中間熱交換器の 1/4 縮尺模型を使用し、実機とほぼ相似の体系にて等流速条件で実施した水流动試験により取得したレーザドップラ流速計測等の流況可視化データと超音波データの比較により信号処理機能及び性能を検証した。信号処理装置試験体に、水流动試験により取得した超音波データにナトリウム試験で取得したナトリウム中の超音波減衰データ、実機において想定されるノイズ等、水流动試験と実機とで異なる主要な要素を加えた実機模擬信号を入力した結果、4 測線で計測機能及び性能に対する主要な開発要件(直線性:計測範囲の±2%以下、出力信号変動率:中央値の±5%以下、応答時間:0.3s 以下)を満足した。また、ナトリウム試験の結果より、超音波の信号処理に必要な信号処理装置の増幅度は、上限値:100dB(一般的な信号増幅器の備える増幅度と同じ)に対し、十分小さい 60dB 以下であった。これに対し、ナトリウム試験と実機の超音波伝搬経路の相違及びセンサ感度の個体差による超音波受信レベルの低下は 20dB 程度であり、信号処理装置の増幅度には 20dB 程度の余裕があることから、信号処理装置は実機において超音波受信信号を適切に信号処理できる見

通しを得た。これらにより、実機において、センサとの組み合わせにより安全保護系 1 チャンネル毎 4 測線で計測機能及び性能に対する主要な開発要件を満足する見通しを得た。

上記の成果に基づき信号処理装置の実機向け仕様表及び信号処理構成図を作成した。また、安全保護系に適用するための課題を明確にし、課題解決を見通すことのできる今後の開発計画を策定した。

【研究開発項目（3）測線最適化検討】

[得られた成果]

ナトリウム冷却炉 1 次主冷却系流量計測における最適な測線数を解析的に求める測線最適化解析評価手法を開発し、水流動試験にて取得した流況可視化データ及び超音波データに基づき同評価手法の有効性について評価した。その結果、同評価手法の流動解析部分は定常状態を良く予測できるが、流速変動を完全には予測することはできないことが分かった。また、同評価手法の測線数決定部分は適切であることが示された。この評価結果を受けて、安全保護系 1 チャンネルの最適な測線数について流動解析及び水流動試験結果に基づき検討した結果、最小の物量で計測機能及び性能に対する開発要件（計測範囲の $\pm 2\%$ 以下、出力信号変動率：中央値の $\pm 5\%$ 以下、応答時間：0.3s 以下）を満足する 4 測線であることを確認した。

【事業全体】を通して

4 年間の研究開発を業務計画通り実施し、ナトリウム冷却炉の実用化概念である 1 次冷却系の直管部が短い高クロム鋼（磁性体）の 2 重管構造の大口径配管に適用する安全保護系流量計測システムに適合する方式と考えられる超音波伝搬時間差多測線方式流量計測システム（超音波センサは配管に直接接触させる）について、高温用超音波センサ技術、センサ遠隔交換技術及び信号処理技術の開発並びに測線最適化検討を行い、成果目標（下記）を達成した。

開発要件及び検討条件を満足するシステム仕様を明らかにする。

システムの有効性を試験及び評価により示す。

安全保護系に適用できることを確証するための課題を明確にし、解決の見通しを示す。

【論文、特許等】

雑誌発表：原子力 eye(2007.12) 「ナトリウム冷却炉に関する技術開発 高クロム鋼を用いた 1 次冷却系配管に適用する流量計測システムの開発」

特許：

- ・特願 2007-289345 超音波流量計センサヘッド、これを備えた超音波流量計センサヘッド装置及びその位置決め方法
- ・特願 2007-289346 超音波流量計センサヘッド、これを備えた超音波流量計センサヘッド装置及びその位置決め方法

口頭発表：原子力システム研究開発事業成果報告会 2008.1 「高クロム鋼を用いた 1 次冷却系配管に適用する流量計測システムの開発」

口頭発表：日本原子力学会 2009 年秋の大会 2009.9 「高クロム鋼を用いた 1 次冷却系配管に適用する流量計測システムの開発 - 超音波流

	<p>量計測技術に関する研究 - 」</p> <p>ポスタ発表：原子力システム研究開発事業成果報告会 2009.1 「高クロム鋼を用いた1次冷却系配管に適用する流量計測システムの開発」</p> <p>ポスタ発表：FR09 2009.11 「Ultrasonic Flowmeter for JSFR」</p> <p>ポスタ発表：原子力システム研究開発事業成果報告会 2010.1 「高クロム鋼を用いた1次冷却系配管に適用する流量計測システムの開発」</p>
<p>3 . 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 研究開発の成果 ・ 技術の卓越性 ・ 成果の発展性 	<p>【研究開発の成果】</p> <p>開発要件を満たすために緻密な課題分析とその解決に向けた研究計画を策定し、研究期間内に開発目標を達成している。</p> <p>【技術の卓越性】</p> <p>相当に厳しい環境条件下での実用性を確認する実験データを得ており、相応の卓越性が認められる。</p> <p>【成果の発展性】</p> <p>FBR実用炉には、新たな流量計の開発が不可欠であったが、本研究開発の成果として、十分に適用が見込める計測システムを開発することができた。磁性体・非磁性体を問わず、また高温耐久性も高いコンパクトな高精度計測システムであることから、原子力産業に留まらず、様々な産業界への応用が期待できる。</p>
<p>4 . その他</p>	