

原子力システム研究開発事業 ー基礎研究開発分野ー
若手対象型 事後評価総合所見公表用フォーマット

研究開発課題名（研究機関名） 超臨界圧水冷却高速炉の炉内構造材劣化予兆診断技術の開発（独立行政法人日本原子力研究開発機構）	
研究開発担当者 機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構 総括代表者：根本義之 機関名：国立大学法人東北大学 代表者：内一哲哉 機関名：住友金属テクノロジー株式会社 代表者：樺田理	
研究期間及び予算額 平成17年度～平成19年度（3年計画） 87,911千円	
項目	要約
1. 当初の目的・目標	<p>本事業は、超臨界圧水冷却高速炉システムの炉内構造材料において生じる照射誘起応力腐食割れ（IASCC）対策のため、き裂発生以前の予兆段階を非破壊的に検知できる材料劣化予兆診断システムの開発を目標として実施した。</p> <p>原子力機構の従来の研究によって、中性子照射したオーステナイト・ステンレス鋼において、フラックスゲート（FG）センサーによって測定し得られた漏えい磁束密度と、IASCC感受性の間に良い相関関係があることが見出されている。そのため、本事業では磁気的手法によるIASCC感受性上昇の検出原理について解明を行い、それを超臨界圧水冷却高速炉に適用可能なものとするために、研究項目①として【検出原理の超臨界圧水冷却高速炉条件までの拡張】を行った。</p> <p>また、その検出原理には微視的なレベルでの磁性相生成などに基づく磁気的性質の変化が関係していると予測されるが、実機での適用においては、巨視的なレベルでの磁気測定を行う必要がある。そのため、中性子照射材のミクロな電磁気特性とマクロな電磁気特性の関係について明らかにし、マクロな磁気測定による予兆診断が可能な磁気センサーを開発するため、研究項目②の【磁気測定による材料劣化の予兆診断手法の確立】を行った。</p> <p>さらに、研究項目③【実機に適用可能な炉内構造材料劣化予兆診断システムの開発】では、上記の研究に基づいて、実機炉内環境において使用可能な設計条件で磁気センサーを実際に製作し、性能試験、耐久性試験及び中性子照射材の磁気測定試験、測定結果のIASCC感受性との相関性評価を行い、設計条件、製作条件の検討を行い、実機に適用可能な予兆診断システムの開発を行うこととした。</p>

2. 研究成果

- ・当初予定の成果
- ・特筆すべき成果
- ・副次的な成果
- ・論文、特許等

【検出原理の超臨界圧水冷却高速炉条件までの拡張】

超臨界圧水冷却高速炉の炉心シュラウド下部における条件を想定し、照射材及び模擬材の IASCC 感受性評価試験及び、【実機に適用可能な炉内構造材料劣化予兆診断システムの開発】で製作したモニタリングシステムによる磁気特性評価試験等を行い、IASCC 感受性と磁気特性の相関性について検討した。その結果、超臨界圧水冷却高速炉条件での照射損傷を与えた材料において、FG センサーによる漏えい磁束密度測定の外に、実機への適用性がより高いと考えられる交流磁化法、渦電流法によって、IASCC 感受性と相関性のある磁気パラメータを測定可能であることを明らかにした。また相関性の機構解明のため、微細組織評価、第一原理計算等を実施した。その結果、オーステナイト系ステンレス鋼の結晶粒界において、照射誘起偏析に伴う Cr 欠乏、Ni 富化を原因とする磁性相生成が起きることを世界で初めて見出し、それが IASCC 感受性と磁気特性の相関性の主な原因であることを明らかにした。この成果により、き裂発生以前の段階で IASCC 感受性の上昇を検出する手法の原理は、結晶粒界での磁性相生成を適確に評価することであることが初めて示された。今後は構造材の表面加工硬化層や溶接部位での磁氣的性質の変化についても詳細な研究を行い、本事業で明らかにした検出原理をさらに幅広い対象に適用可能とすることを検討していくべきと考えられる。

【磁気測定による材料劣化の予兆診断手法の確立】

超臨界圧水冷却高速炉におけるオーステナイト系ステンレス鋼の中性子照射による照射誘起偏析を想定した照射誘起偏析模擬材等について、磁気力顕微鏡 (MFM) によるマイクロ電磁特性評価及び、交流磁化法、渦電流法等によるマクロ電磁特性評価を行い、その歪み量や偏析量との関係を明らかにした。さらにマイクロ電磁特性とマクロ電磁特性の関係を検討し、照射誘起偏析により結晶粒界近傍において生ずる磁性相と、実機における材料劣化の予兆診断の際に測定する、マクロ電磁特性の関係を明らかにした。またその結果に基づいた検討として、材料劣化の予兆診断を行うために最も適したセンサープローブの設計条件について、3次元電磁場解析コード等による評価を行い、【実機に適用可能な炉内構造材料劣化予兆診断システムの開発】におけるセンサープローブの設計条件の最適化を行った。以上により、磁気測定による材料劣化の予兆診断手法を確立した。この手法は超臨界圧水冷却高速炉だけではなく、その他の機器の構造材料における材料劣化の予兆診断にも適用できると考えられるため、今後適用範囲の拡張を検討していくべきと考えられる。

【実機に適用可能な炉内構造材料劣化予兆診断システムの開発】

超臨界圧水冷却高速炉の実機に適用可能な炉内構造材料劣化予兆診断システムの開発のため、位置分解能向上を目指した小型化及び、炉内環境での使用を想定した耐放射線性向上、耐熱性向上、耐水性向上、遠隔性向上を目指した設計条件の最適化を行い、さらに【磁気測定による材料劣化の予兆診断手法の確立】での設計条件の検討結果に基づいてセンサープローブの製作を行った。また製作したセンサープローブについて炉内環境を模擬した条件での性能評価試験を行い、所期の性能を得ていることを確認した。また、それを用いたモニタリングシステムの構築を行い、【検出原理の超臨界圧水冷却高速炉条件までの拡張】における照射材の磁気特性評価試験に使用した。その試験結果から、本事業で開発した炉内構造材料劣化予兆診断システムは超臨界圧水冷却高速炉実機に適用できるものであることが示された。今後はさらに小型化、耐熱

性向上、遠隔性向上等を図り、現行炉内における実証試験等を実施し、実用化に向けたシステム開発を進めるべきであると考えられる。

【事業全体】を通じて

本事業により、照射誘起応力腐食割れ(IASCC)対策としての炉内構造材劣化予兆診断は、照射誘起偏析による結晶粒界での磁性相生成を磁気的手法により定量的に評価することが原理となることを初めて明らかにした。さらに、その原理に基づいた装置開発及び照射材の磁気測定等による性能評価試験、耐環境性評価試験等を行い、き裂発生以前の予兆を非破壊的に検知するための技術基盤として、高精度かつ実用的な簡便性を備え、耐炉内環境性に優れた材料劣化予兆診断システムの開発に成功した。

従来の非破壊診断手法では微細なき裂が発生してからの検知が可能であったが、本事業の成果により、き裂発生以前の予兆を検知可能となったことは、原子力機器等の安全性向上、適切なメンテナンス計画の策定による経済性の向上に大きく貢献するものであると考えられる。また、これらの成果は、オーステナイト系ステンレス鋼を用いた様々な機器の構造材における応力腐食割れ(SCC)及びIASCCの予兆診断に応用できると考えられる。今後は測定データの高精度化のための更なる基礎研究及び、実用化に向けた実証試験等を行うべきであると考えられる。

得られた成果に関する外部発表は、以下の通り

論文発表

- 1) 高屋ら、「Examination of Relation between IASCC Susceptibility and Magnetic Property」、Proceedings of The 13th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics、pp.187-188 (2007)
- 2) 高屋ら、「第一原理計算による FCC 鉄の磁気特性評価」、日本原子力機構 大型計算機システム利用報告書(平成 18 年度)、JAEA-Review、2007-055、(2008)
- 3) 根本ら、「IASCC 感受性の非破壊評価手法に関する研究」、日本保全学会第 1 回検査・評価・保全に関する連携講演会 講演論文集、pp.76-79、(2008)
- 4) 内一ら、「非線形渦電流法によるオーステナイト系ステンレス鋼の材料劣化診断」、日本 AEM 学会第 20 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム 講演論文集、pp.661-664 (2008)
- 5) 高屋ら、「漏えい磁束密度測定によるオーステナイト系ステンレス鋼の材料劣化診断」、日本 AEM 学会第 20 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム 講演論文集、pp.665-670、(2008)
- 6) 高屋ら、「第一原理計算による Fe-Cr-Ni 合金の磁気特性評価」、日本原子力機構 大型計算機システム利用報告書(平成 19 年度)、JAEA-Review、(掲載予定)
- 7) 高屋ら、「漏えい磁束密度測定による照射誘起応力腐食割れ感受性評価」、日本保全学会 第 5 回学術講演会 要旨集、pp.505-508 (2008)
- 8) 海老根ら、「Gamma Ray Irradiation Tests of Magnetic Sensors」、日本原子力機構 高崎量子応用研究所英文年報、JAEA-Review (掲載予定)
- 9) 海老根ら、「超臨界圧水冷却高速炉の炉内構造材劣化予兆診断技術の開発— 磁気センサーのガンマ線に対する耐久性評価—」日本原子力機構 第 3 回高崎量子応用研究シンポジウム要

旨集、JAEA-Review (掲載予定)

- 10) 根本ら、「IASCC 感受性の非破壊評価手法に関する研究」、日本保全学会研究委員会、平成 19 年度 材質劣化診断技術に関する調査研究報告書、(掲載予定)
- 11) 樺田ら、「交流磁化法による IASCC 予兆診断」、日本保全学会研究委員会、平成 20 年度 材質劣化診断技術に関する調査研究報告書、(掲載予定)
- 12) 根本ら、「ステンレス鋼の IASCC 感受性と磁気特性の相関性に関する研究」、日本保全学会誌「保全学」、(掲載予定)
- 13) 高屋ら、「Examination of Relation between IASCC Susceptibility and Magnetic Property」、Science and Technology of Maintenance、(投稿中)
- 14) 高屋ら、「漏えい磁束密度測定によるオーステナイト系ステンレス鋼の材料劣化診断」、日本 AEM 学会誌、(投稿中)

特許

- 1) 樺田ら、「照射誘起応力腐食割れの予兆診断システム」(出願手続き中)

口頭発表

- 1) 根本ら、「IASCC 感受性と電磁気特性の相関についての検討(1)」、日本原子力学会 2007 年春の年会 (平成 19 年 3 月 27 日～29 日)
- 2) 高屋ら、「Examination of Relation between IASCC Susceptibility and Magnetic Property」、The 13th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (平成 19 年 9 月 9 日～12 日)
- 3) 根本ら、「IASCC 感受性と電磁気特性の相関についての検討(2)」、日本原子力学会 2007 年秋の大会 (平成 19 年 9 月 27 日～29 日)
- 4) 根本ら、「IASCC 感受性の非破壊評価手法に関する研究」、平成 19 年度第 3 回「材質劣化診断技術に関する調査」分科会 (平成 19 年 12 月 21 日)
- 5) 根本ら、「IASCC 感受性の非破壊評価手法に関する研究」、日本保全学会第 1 回検査・評価・保全に関する連携講演会 (平成 20 年 1 月 15 日)
- 6) 内一ら、「非線形渦電流法によるオーステナイト系ステンレス鋼の材料劣化診断」、日本 AEM 学会第 20 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (平成 20 年 5 月 21 日～23 日)
- 7) 高屋ら、「漏えい磁束密度測定によるオーステナイト系ステンレス鋼の材料劣化診断」日本 AEM 学会第 20 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (平成 20 年 5 月 21 日～23 日)
- 8) 樺田ら、「交流磁化法による IASCC 予兆診断」、平成 20 年度第 1 回「材質劣化診断技術に関する調査」分科会 (平成 20 年 6 月 20 日)
- 9) 高屋ら、「漏えい磁束密度測定による照射誘起応力腐食割れ感受性評価」、日本保全学会 第 5 回学術講演会 (平成 20 年 7 月 10 日～12 日)
- 10) 海老根ら、「超臨界圧水冷却高速炉の炉内構造材劣化予兆診断技術の開発— 磁気センサーのガンマ線に対する耐久性評価—」、日本原子力機構 第 3 回高崎量子応用研究シンポジウム (平成 20 年 10 月 9 日～10 日)

<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・目的・目標の設定の妥当性 ・研究計画設定の妥当性 ・研究費用の妥当性 ・研究の進捗状況 ・研究交流 ・研究者の研究能力 	<p>【目的・目標の設定の妥当性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現在稼働中の高経年化軽水炉においても IASCC は重要な損傷要因の一つであるが、その機構は必ずしも十二分に解明されていない。将来的な超臨界圧水冷却高速炉に起こり得る IASCC の前駆現象を磁気的な非破壊法により診断しようとする試みには新規性はあるが、もう少し IASCC の機構解明と定量的な計測に目標を設定しても良かったと考えられる。 <p>【研究計画設定の妥当性、研究の進捗状況】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・軽水炉での事象の超臨界水炉への拡張ならびに診断原理の確認等、論理的に進めており、計画通り進捗したと考える。 <p>【研究交流、人材育成、研究者の研究能力、成果】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本事業の計画では、「材料劣化予兆診断技術の確立」や「実機に適用可能な診断システムの開発」が挙げられていたが、3ヵ年で得られた成果を見る限り、これらの技術基盤の整備は進んだものの、技術の確立やシステムの開発というには必ずしも満足いくものではないように思われる。しかしながら、非常に難度の高い技術課題に挑戦されたことは評価すべきであり、今後の発展可能性が感じられる。また、得られた成果の外部発信や知財の確保にも積極的であり、本事業の目的の一つである若手人材の育成という面では十分な成果があったものとする。
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・SCC や IASCC が磁性変化を伴う組織変化に起因する場合は、本診断法は効果的であるが、超臨界圧水中で生じるかもしれない SCC や IASCC の発生・伝播機構が磁性変化を伴わない場合は、本診断法は適用できない。しかし、超臨界圧水中での SCC および IASCC は、重要な材料課題であり、特に照射量が高い場合の挙動についての理解が遅れている。超臨界圧水高速炉の炉内構造物の環境条件中やその環境下における SCC や IASCC の機構解明が先決であり、SCC や IASCC の発生条件や成長条件の調査ならびにメカニズム解明のための研究を今後も継続して欲しい。特に、超臨界圧水の温度によって、照射硬化挙動やヘリウムバブルの形成挙動が変化する場合の SCC や IASCC の挙動に関する系統的な研究の進展が望まれる。また、構造材料の種類、水化学の問題も重要な課題であり、今後も精力的に取り組んでゆかれることを期待する。
<p>5. 総合評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・IASCC 等のき裂型損傷が顕在化する前の材料劣化の予兆を非破壊的に診断することは、原子力のみならず非原子力の技術分野においても、安全・安心な設備運用の観点から、長年強く望まれ続けてきた。しかし、未だ実用化に結び付くような方法は見当たらず、それだけニーズは高い

	<p>ものの非常に難度の高い技術課題であった。このような状況で想定通りの成果を上げることは難しく、大きな挑戦であったと思われるが、本事業において磁気的手法によりその一つの可能性を見出したことは特筆すべき成果であるといえ、将来への展開が期待できる。今後は、定量化と高精度化への努力、実用化への課題の具体的な作業に踏み込んでもらいたい。</p>
	<p>A) 想定以上の成果が得られ、今後に大いに期待できる。 B) 想定通りの成果が得られ、今後が期待できる。 C) 想定通りの成果が一部得られなかった。 D) 想定通りの成果が全く得られなかった。</p>