

# 福井地域を基盤とした近畿圏連携による 高経年化対策強化基盤整備事業の実施報告(平成20年度)

## The Research Project on Technical Information Basis for Aging Management in Fukui and Kinki Area (2<sup>nd</sup>Report)

藤村 公也 (Kimiya Fujimura)\*<sup>1</sup> 渡海 親衛 (Chikae Watarumi)\*<sup>2</sup> 藤堂 二彦 (Tsugihiko Toudou)\*<sup>1</sup>

**要約** 高経年化対策強化基盤整備事業は、経済産業省原子力安全・保安院により、我が国の原子力発電所における高経年化対策に資するため、国内実用原子力発電プラントの高経年化に関する技術情報基盤整備を行うことを目的として、平成18年度に開始され現在に至っている。

具体的研究課題は、高経年化対応の安全研究ロードマップの一部を担うことを念頭に、加圧水型軽水炉を中心として15基の原子力発電設備が立地し、地域内及び近隣の近畿圏に多くの原子力関係の研究機関や大学を有する福井地域の特徴、及び各組織の研究・事業実績を基にその専門性を十分生かせるものとして、下記の4つの分野から選定されている。

- 1) 原子力発電プラントの配管減肉管理の高度化に関する研究
- 2) 劣化発生・進展状況把握のための検査技術評価に関する研究
- 3) 溶接補修技術に関する研究
- 4) 主要構築物の劣化に関する研究

研究の推進に当たって、原子力安全システム研究所(以下「INSS」という)技術システム研究所は、福井地域を基盤とした近畿圏連携(以下「福井クラスタ」)による研究の実施母体として、域内の大学、研究機関、電気事業及びメーカーと協力して福井地域高経年化事業コンソーシアムを立ち上げ、その中心として研究の受注、円滑な実施、および報告書の取り纏め業務といった総合的立場での役割を担ってきた。

平成20年度の福井クラスタの事業で実施した研究は、上記の4分野別に示せば、配管減肉関連で4件、検査技術関連で3件、補修溶接および主要構築物について各1件、計9件である。いずれの研究も円滑に実施され、所期の成果を達成することができた。

**キーワード** 原子力発電プラント、高経年化、配管減肉、検査技術、溶接金属、コンクリート

**Abstract** The Research Project on Technical Information Basis for Aging Management was initiated in 2006 by the Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) of the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), to promote aging management of domestic nuclear power plants. Its main objective was to improve the technical basis on which aging plants are regulated.

Upon taking part in the R&D Roadmaps for Aging Management and Safe Long Term Operation, the experience and results of the participating organizations were considered and the following four topics were extracted. The regional characteristics of the Fukui and Kinki area where 15 nuclear power plants, mainly PWRs, and many nuclear related research institutes and universities are located, were also considered.

- 1) The improvement of pipe thinning management in nuclear power plants
- 2) The development of inspection techniques to monitor the initiation and propagation of defects
- 3) The development of a guideline for evaluating weld repair methods
- 4) The development of a guideline for evaluating the degradation of main structures

To promote this research project, INSS has established a regional consortium (called the "Fukui Regional Cluster" in coordination with universities, research institutes, electric utilities and vendors in the Fukui and Kinki area. INSS is acting as of coordinator to make a contracts, facilitate execution, and compile annual reports.

In FY2008, 11 research subjects were proposed for this project and all were accepted. Of these, 4 subjects were related to the first topic (pipe thinning), 3 subjects were related to the second topic

\* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\* 2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 客員研究員

(inspection technique) and 1 subject was related to each of the other two topics (weld repair & main structures) . All the subjects have been completed, fulfilling the requirements and expectations.

Keywords nuclear power plant, plant aging, pipe thinning, inspection technique, weld metal, concrete

### 1. 序言

高経年化対策強化基盤整備事業は、経済産業省原子力安全・保安院（以下「NISA」という）が、我が国の原子力発電所における高経年化対策に資するため、国内実用原子力発電プラントの高経年化に関する技術情報基盤整備を行うことを目的として、平成18年度より開始された。事業の企画・推進に当たっては、より広くかつ深い知識経験に基づくことが重要との考え方から、原子力関連の産・学・官の研究組織の地域連携が基本となっていること、その受け皿として、INSSが福井地域高経年化事業コンソーシアム（略称：福井クラスタ）を立ち上げ、研究の受注、円滑な実施、および報告書の取り纏め業務といった総合的立場での役割を担ってきていることは、本誌昨年度報で紹介したとおりである<sup>(1)</sup>。本報告では、これに引き続き、平成20年度事業の成果とともに研究の企画・推進に当たってのINSSの活動の概要を紹介する。

### 2. 事業の全体概要

原子力安全・保安院より示された平成20年度テー

マ4件を、その目的とともに示す。

- ①技術情報の基盤整備等：高経年化対策強化基盤整備事業全体を総合的・俯瞰的にとらえつつ、本事業の中で産学官が有する知見、施設等を効果的に活用して実施する研究成果に基づき、新検査制度における高経年化対策のための技術情報の整備を図る。
- ②健全性評価の妥当性確認手法の確立等：高経年化に対応した照射脆化予測評価の科学的・合理的な技術基盤を与えることを目的として、原子炉圧力容器鋼の中性子脆化に関して、現行の監視試験方法における溶接熱影響部に関わる妥当性を検討するとともに、イオン照射により照射条件や材料条件等を系統的に設定したデータを取得し、照射脆化予測の技術基盤を整備する。
- ③経年劣化事象の解明等：高経年化が進行しつつあるプラントの寿命予測精度を向上させ、その科学的合理性を担保するため、劣化メカニズムに着目し、実験的手法および解析的手法により劣化現象の解明等を行う。
- ④経年劣化事象の進展予測・評価手法の確立等：原子力発電設備の経年劣化対策を科学的・合理的に行うため、過去の研究成果をもとに最新の

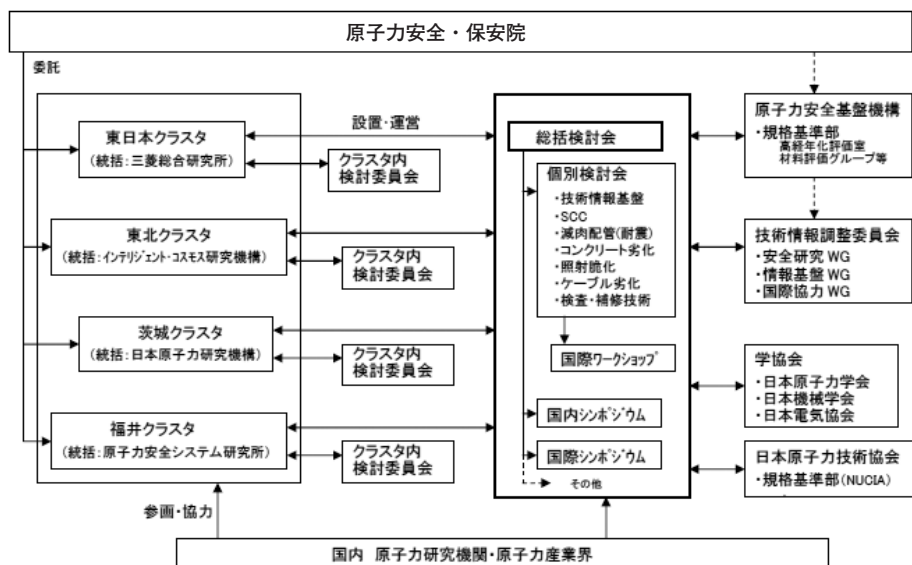


図1 高経年化対策強化基盤整備事業の実施体制

知見を加味し、経年劣化事象の進展予測並びに評価手法の高精度化や検査技術、補修技術の妥当性評価手法の確立等を図る。

これらのうち、INSSが福井クラスタ代表として受注したテーマが④である。その具体的研究内容については次節で紹介する。他のテーマはそれぞれ、①三菱総合研究所（東京クラスタ）、②(特)日本原子力研究開発機構（茨城クラスタ）、③(株)インテリジェント・コスモス研究機構（東北・北海道クラスタ）の取り纏めとなった。また、これらのクラスタ相互間の情報の共有や研究内容の調整等の概要は図1に示すとおりである。

### 3. 研究課題と実施体制

福井クラスタの平成20年度受託研究テーマは「経年劣化事象の進展予測・評価手法の確立等」である。具体的研究内容の提案に当っては、高経年化対応の安全研究ロードマップの一部を担うことを念頭に、福井クラスタ構成メンバーの研究・事業実績をもとに、その専門性を十分生かすことを考慮し、表1に示す形で、下記の4分野について、合計11件の研究を各機関への再委託の形で実施することとなった。いずれも平成19年度に引き続きものである。

1) 原子力発電プラントの配管減肉管理の高度化に

表1 平成20年度研究課題と実施担当

研究課題			担当*		
分野	課題	個別課題	機関	取纏め者	
1) 原子力発電プラントの配管減肉管理の高度化に関する研究	(1)配管減肉予測・評価法の精度向上		名古屋大大学院	久木田豊教授	
	(2)液滴衝撃エロージョンに対応した配管減肉評価法の構築		福井大大学院	服部修次教授	
	(3)減肉配管の破壊モード評価法の高度化		福井大大学院	飯井俊行教授	
	(4)配管減肉の定量評価法の有効性検証	a. ガイド波による広域モニタリング手法の検証		徳島大大学院	西野秀郎准教授
		b. ガイド波検査シミュレータの構築		神戸大大学院	小島史男教授
c. 配管減肉サイジングの高度化					
2) 劣化発生・進展状況把握のための検査技術評価に関する研究	(1)高調波によるニッケル基合金溶接部近傍の閉口SCCの評価と画像化に関する研究		超音波材料診断研究所(京都大大学院)(名古屋工大大学院)	川嶋絃一郎 所長 (琵琶史郎 准教授) (林高弘 准教授)	
			発電設備技術検査協会	古村一郎 研究グループ長	
	(3)マイクロ波検出技術を用いた高分子材料への放射線照射による経年劣化測定技術に関する研究	a. 放射線照射による経年劣化過程の解明	大阪大大学院	関 修平 准教授	
	b. 経年劣化測定技術の評価精度向上	福井工大	砂川武義 准教授		
3) 溶接補修技術に関する研究	(1)補修溶接施工条件に応じた健全性評価技術の確立、補修後溶接部の長期使用後における健全性評価技術の確立、および補修溶接方法の実機適用における施工健全性の検証		大阪大大学院	西本和俊教授	
4) 主要構築物の劣化に関する研究	(1)コンクリート構造物のひび割れによる鉄筋腐食評価法の高度化に関する研究		大阪大大学院	岸本一蔵 准教授	

\* ( ) は他機関研究協力者(同一機関内研究協力者は記載省略)

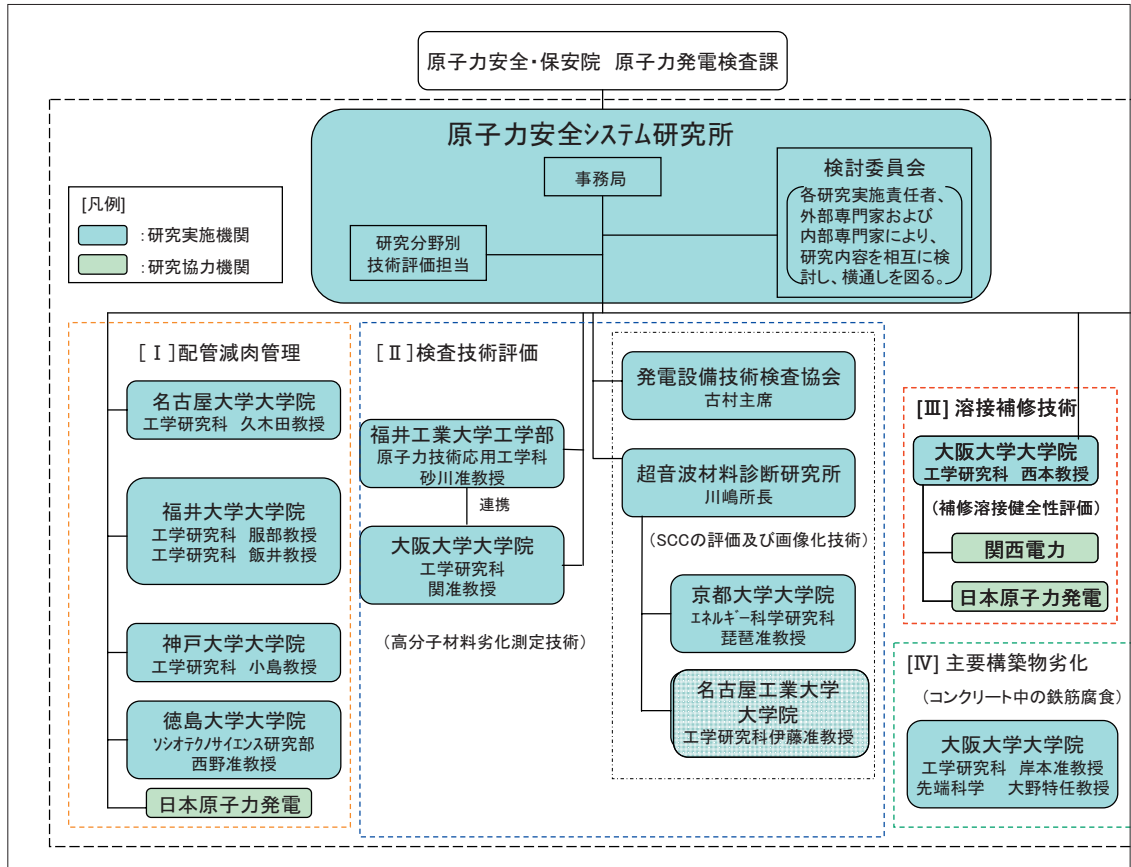


図2 福井クラスターでの高経年化対策強化基盤整備事業活動の全体像

関する研究

- 2) 劣化発生・進展状況把握のための検査技術評価に関する研究
- 3) 溶接補修技術に関する研究
- 4) 主要構築物の劣化に関する研究

研究実施者の専門性の活用と連携および事業関係者間の情報の共有化を図るためのクラスター内検討委員会の設置、運営を含む、福井クラスター内の事業活動の全体像を図2に示す。なお、図1に示す総括検討会および個別検討会や他クラスターの検討委員会へも積極的に参加協力した。

また、福井クラスター事業を締め括る事業成果報告書の作成に当たっては、その前提となる各研究担当者からの報告書について、研究内容の確認とともに当初事業計画との整合性を吟味・確認し、研究成果に対する事業統括者としての見方を反映するよう努力した。

#### 4. 研究内容および成果の概要

ここでは、各分野での各課題の研究で得られた成

果及び今後の課題を紹介する。

- 1) 原子力発電プラントの配管減肉管理の高度化に関する研究

炭素鋼配管の減肉管理<sup>(2)(3)</sup>の充実に向けての既存技術の応用や新技術の適用の進展に備え、減肉予測・評価法の精度向上、減肉配管の破壊モード評価法の高度化及び減肉配管の検査技術の高度化等について、測定等により基礎情報を収集し、得られた成果を踏まえ、減肉による配管破断リスクを考慮した保全を可能にするための技術を整備することを目的とするものである。このために以下の4つ研究が実施された。

##### ① 配管減肉予測・評価法の精度向上

流動加速腐食 (Flow Accelerated Corrosion : FAC) による配管減肉の進展速度に大きな影響を及ぼす可能性の高い物質伝達に注目し、壁面近傍でのイオン輸送を模擬した電気化学実験により局所物質伝達率 (観測量は限界電流) を測定しその特性を調べるとともに、配管減肉の進展速度が増大する部位の流れに注目した流動実験と流動解析により、流れの剥離、再付着、旋廻等が物質伝達

に与える影響を調査した。

その結果、電気化学実験では、溶液内の溶存酸素及び溶液の経時変化は、物質伝達率の絶対値に影響を与えるものの、評価の範囲では物質伝達率の定性的な傾向に与える影響は小さいことが分かった。しかし、測定データには電気ノイズなどの外的要因によるばらつきが見られ、物質伝達率評価の高精度化に向けては、その原因究明と対策の必要性が明らかになった。一方、流動実験では、実験用水ループにオリフィス下流側流れを模擬した試験部を設置し、画像粒子流速計測法を用いて、配管壁近くの速度勾配変動と流れ場の相関に関するデータを取得した(図3)。その結果、配管壁近くの速度勾配変動に関して、管路中央部のオリフィス下流の大きな流動変動の寄与、再付着点近傍での流れ方向速度や壁垂直方向成分との負の相関、速度勾配変動と乱流エネルギーの強い相関等、配管減肉の進展速度の予測の高精度化に有用な知見が得られた。また、実機条件を想定した旋回流が存在する場合の実験からは、オリフィス上流でのわずかな偏流履歴の存在やオリフィス下流に設置された突起(表面粗さの模擬)が、下流部の流

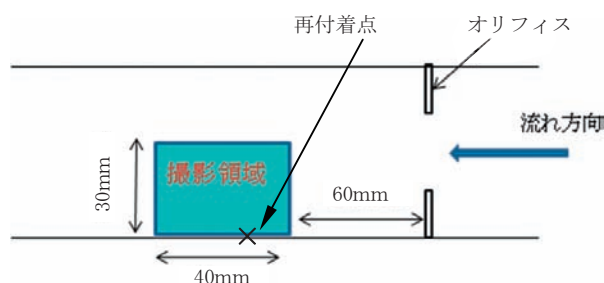


図3 実験モデル概要(狭域撮影例)

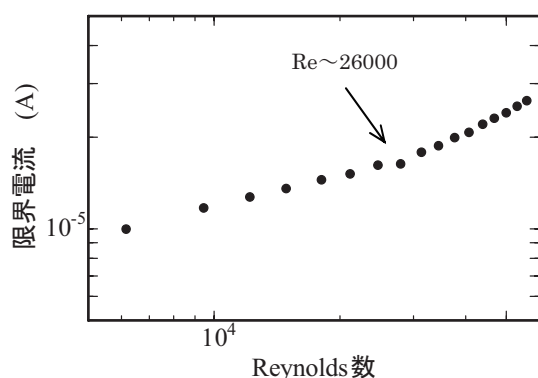


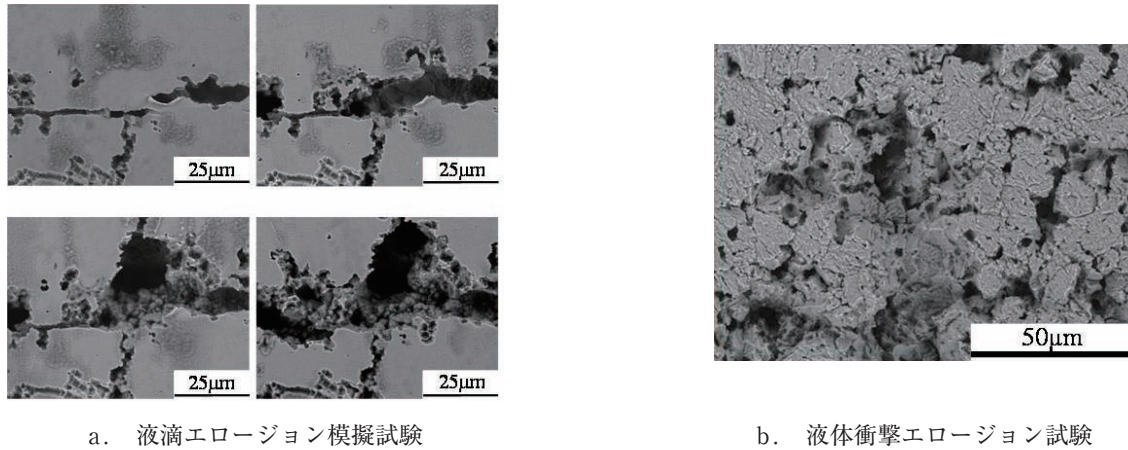
図4 限界電流に及ぼすレイノルズ数の影響

れに大きな影響を与えることなども明らかになった。解析モデルの調査・評価では、FACにおいて特に重要な現象である、高シュミット数条件における滑面壁乱流(チャンネル乱流場)での物質伝達に関する詳細解析により、高シュミット数乱流場では、壁面物質伝達予測では乱流シュミット数の局所性を反映させる必要があることや、濃度境界層厚が薄くなることにより速度場と濃度場の相似性が崩れること、さらには壁面物質伝達率に最大で30%程度の局所変動があること等が明らかになった。これらの結果から、解析モデルの改良による評価の高精度化が可能であると考えられるものの、レイノルズ数が高い場合( $Re > \sim 26000$ )乱れの増加傾向が確認され(図4)、原子炉配管を対象とする定量的評価を行うためには、より高いレイノルズ数乱流場での解析が必要であることが分かった。また、実機で観察された鱗状粗さのモデル化、及びモデル化された3次元粗面上での壁面物質伝達に関する直接数値シミュレーションにより、任意形状下での粗さを考慮した直接数値解析ができることが確認され、あわせて、高シュミット数流体の粗面上での準周期的な流れの剥離・再付着に伴う流動による物質伝達の促進、流動条件・粗さの基本スケールが同一であれば、物質伝達の促進速度は異なるが物質伝達の促進機構そのものは類似であること等、今後の3次元粗さ上の解析の改良に繋がる知見が得られた。

今後は、本年度本格化した実験及び解析を、さらに広い条件、特に旋回流や壁面粗さといった現実的な因子を加味した条件で実施し、結果を系統的に整理し、減肉予測の不確かさに関する情報整理につなげることが考えられている。

## ② 液滴衝撃エロージョンに対応した配管減肉評価法の構築

配管減肉の予測のための試験法確立のための基礎的知見を得るため、従来使用してきたキャビテーション噴流試験装置にASTM G134-9に基づく改良を加え、各種の液体衝撃エロージョン試験を行った。まず、炭素鋼配管STPG370相当材料のS15C、及びステンレス鋼配管相当材料のSUS304丸棒材、配管用合金鋼STPA24の各材料について35℃でのエロージョンの流速依存性測定試験により、限界流速がそれぞれ80m/秒、120m/秒、90m/秒であること、およびエロージョン機構は3者とも同様であり塑性変形の進展による結晶



a. 液滴エロージョン模擬試験

b. 液体衝撃エロージョン試験

図5 エロージョン過程のSEM観察写真例

粒界近傍の盛り上がりを基点として脱落が進展すること等が確認された。また、液滴衝撃(Liquid Drop Impact : LDI) エロージョンによる減肉が発生しやすい箇所が流れの方向の変化する部分であることに注目して実施した、SUS304 に対する液体の衝突角度を変化させた試験により、衝突角度の影響を考慮した流速依存のエロージョン予測式が得られた。これは、Fyall ら<sup>(4)</sup>及び Baker ら<sup>(4)</sup>の液体衝撃エロージョンに対する式と同じ傾向を示すことから、液滴衝撃と液体衝撃の両エロージョン機構の類似性を示唆するものと考えられる。さらに、平成 19 年度に実施した予備試験で、エロージョンが最大となる液温は 120℃であることが明らかになったが、本年度は、試験実施の容易さから、ASTEM G134-95 に基づき 35℃程度の液温で試験を行った。この点については、35℃および 120℃で液体衝突時の衝撃力の測定を行い、限界流速近傍の流速 80m/秒から 100m/秒では両者はほぼ同じ傾向を示すこと、および衝撃エネルギーも同等であることを確認し、その妥当性を検証した。また、この液体衝撃エロージョン試験装置が液滴衝撃を適切に模擬できていることを確認するため、ASTM G73-04 に基づく従来の液体衝撃エロージョン試験装置である回転円盤装置を用いた液滴エロージョン模擬試験・SEM 観察を行い、そのエロージョン機構が液体衝撃エロージョン試験装置の場合と同様であること明らかにした(図 5)。今後は、衝突角度の材料依存性や液滴径の影響に関するデータを蓄積し、最終的には、配管素材、液滴流速、衝突角度、粒子径データを考慮した液滴エロージョンによる減肉評価法を構築

することを目指すことにしている。

### ③ 減肉配管の破壊モード評価法の高度化

この研究では、これまで、減肉(非平面状欠陥)による肉厚管理を念頭に置いた強度余裕や内圧破裂時の破壊モードに関するデータ収集が行われてきた。しかし、海外で溝状の局部減肉(平面状欠陥)によるギロチン破断事象の発生が明らかになったため、改めて曲げ荷重下における平面状欠陥と非平面状欠陥との間の破壊挙動上の境界を明らかにし、合わせて両者を統一的に扱える強度評価法を構築することとなった。このため、これまでの非平面状欠陥内圧破裂試験に加えて、新たに平面状欠陥内圧破裂試験を実施し、欠陥の形状パラメータ(深さ、長さ、幅[周方向見込み角]等)と配管破壊モードの関係を調べ、得られたデータと非平面状欠陥を有する配管の 3 次元弾塑性有限要素解析と合わせて、平面状欠陥と非平面状欠陥の分類<sup>(5)</sup>の評価指標を明らかにするための検討を行った。その結果、溝状減肉(平面状欠陥)を施した直管に対する内圧破裂試験から、減肉幅が全周にわたる場合は、減肉形状によっては、一般に考えられている軸方向割れではなく周方向割れが生じ、場合によってはギロチン破断に至る可能性があること(図 6 の a)、また減肉幅が ASME 規格の平面状欠陥の範囲以下になると、変形が局部的なものとなり減肉部の長手方向にき裂が入り、局部割れと破裂を起こすことが(図 6 の b)確認された。また、減肉配管の破裂内圧評価式については、既往(例: Stephens 式)のように減肉部厚みと軸方向長さのみを考慮するものに代えて、新たに、非平面状欠陥から平面状欠陥まで一括して

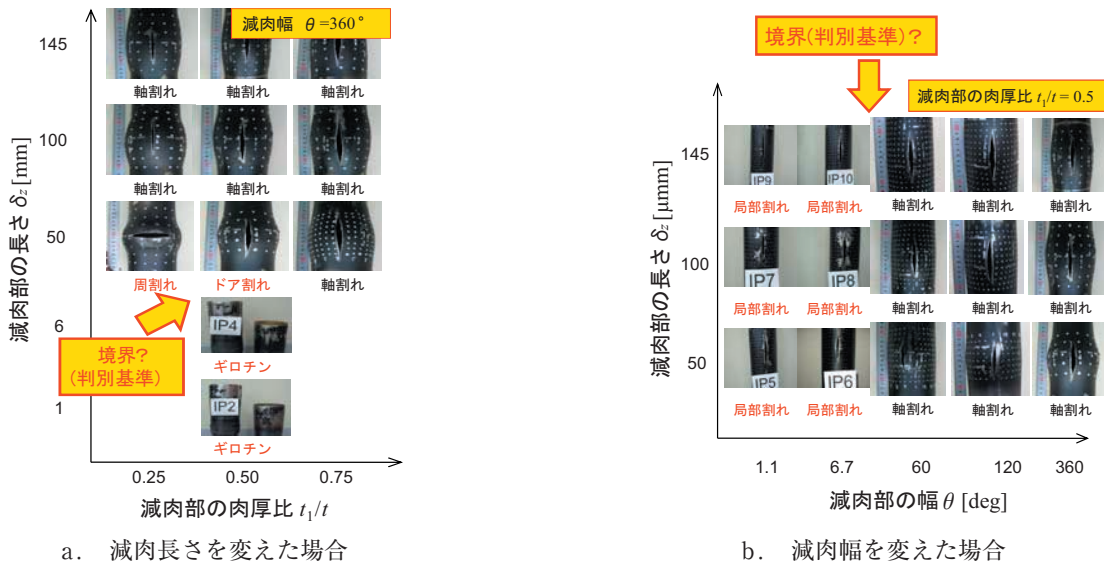


図6 内圧下破壊モードマップ

扱うことができる破裂内圧評価式が提案された。さらに、地震等外乱に対する強度評価を念頭に置いた、非平面状欠陥から平面状欠陥まで一括して扱うことができる限界曲げ荷重評価式を導出するため、模擬減肉を施した直管に対する内圧+曲げ荷重試験が行なわれ、所期のデータが得られた。これらのことから、本研究の最終目標とする、直管部での平面状欠陥と非平面状欠陥の許容判定基準導出及びその結果を踏まえた評価指針作成の見通しが得られ、同時に、その基礎データを得るための、より重要な検査部位であるエルボへの適用に関する調査の道筋も明らかになった。

④ 配管減肉の定量評価法の有効性検証

この研究のサブテーマは、超音波ガイド波による広域モニタリング手法の検証、ガイド波検査シミュレータの構築、および電磁超音波探触子 (Electro Magnetic Acoustic Transducer : EMAT) による減肉配管サイジングの高度化の3つである。

まず、超音波ガイド波による広域モニタリング手法の検証に関しては、エルボ管での欠陥検出性能の確認、減肉形状に対する検出特性知見の蓄積、及び平成19年度研究成果として基本構想を提案した多重反射エネルギー閉じこめ法での検査能力の最適化検討を行った。その結果、エルボ管での検出感度は直管の場合の1/3から1/4であること、また溶接線やエルボ部の影響等、施工関連の個体差による不要信号が発生するが、これは初期デー

タとの比較によりその除去が可能であることから、検出信号の傾向監視による減肉検出が可能であることが明らかになった。また、減肉形状に対する検出性能評価実験では、平成19年度に明らかになった反射体使用の有効性を再確認するとともに、矩形状欠陥での管軸方向幅の増加および減肉深さの増加に伴う検出感度の上昇、円弧状欠陥の検出感度が矩形状欠陥の場合に比べ8割程度まで低下すること等が明らかになった (図7)。なお、矩形状欠陥の管軸方向幅を3mmから120mmまで増加させた実験では、検出信号の振幅の周期的変動が観察され、これが欠陥の両端で発生する反射波の干渉によることが判明している。これにより、減肉欠陥の増大過程での検出信号の変化を観察することにより減肉サイズ同定の可能性が明らかになった。さらに、多重反射エネルギー閉じ込め法の検出能力最適化については、直管を用いた実験的な検証とシミュレーションでの検討により、0.25%の断面欠損率の減肉欠陥を検出可能であることが確認され、あわせて通常の反射体1個を用いた方法に対して最大で6.4倍、従来法に比べて16倍程度の感度上昇が見込めることも明らかになった (図8)。これらの成果を踏まえ、今後は実機適用の可能性の確認に向けて、エルボ管、チーズ管および溶接線近傍での、多様な減肉欠陥形状に対する欠陥検出性能の評価および実試験片での検出性能評価等を進めることとしている。

ガイド波検査シミュレータは、ガイド波検査で

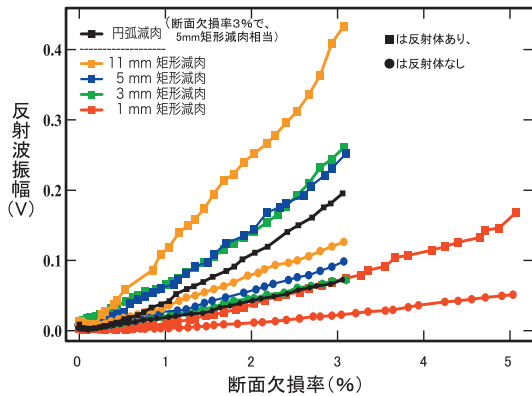


図7 反射波振幅 vs 断面欠損率

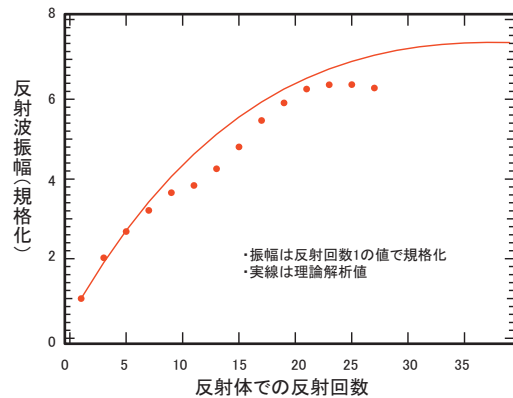


図8 反射波振幅 vs 反射体での反射回数  
一欠陥深さ 1.50mm (断面欠損率 5.17%) の例—

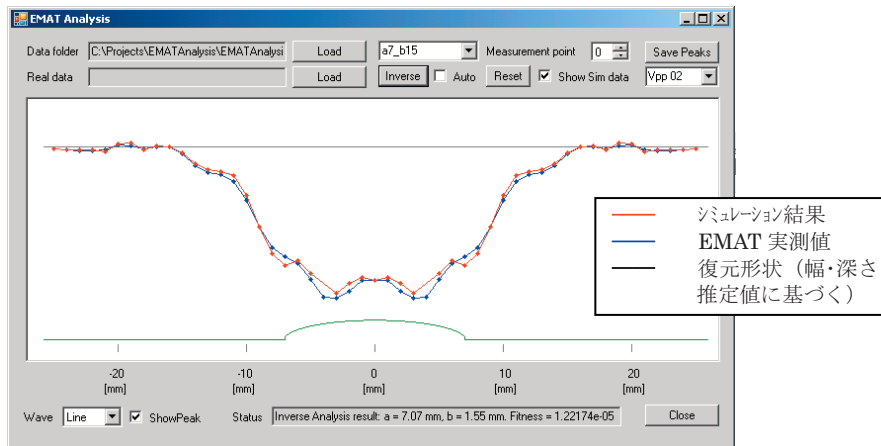


図9 楕円減肉形状の EMAT 実測値とシミュレーション結果との比較

の観測可能領域を科学的かつ合理的な形で設定するための支援ツールである。本研究では、米国で先行研究情況調査結果も踏まえて、薄肉近似を用いて構築したガイド波検査機構の時間進化型モデルと、フーリエ・ガラーキン法を用いて導出した有限要素数値解析モデルとをもとにシミュレータを作製した。これを用いて、検出効率向上のための加振周期、加振点数、及び反射体位置等の測定条件の適正化検討を行い、新たに提案された反射波伝播時間測定による減肉箇所および減肉幅の同定方法の有効性を検証した。

EMAT による配管減肉サイジングの高度化では、先ずこれまでの研究成果をもとに、データ収集用の試験機材を製作・整備し、LDI や FAC を想定した減肉欠陥を施した平板試験体に対し減肉サイジング計測法の検討及びシミュレータの改良を行った。これを踏まえて、シミュレーションと実験データを用いて、新たに策定した減肉サイジ

ング計測法の性能を評価した (図 9)。さらに、FAC を想定した管試験体に対し、EMAT による減肉サイジングの有効性検証試験を行い、減肉幅が十分になだらかな曲面であれば飛行時間 (Time of Flight : TOF) による減肉サイジングの可能性を確認した。また、経年評価対象である炭素鋼を用いたエルボ模擬配管に関する予備実験により、これまでのステンレス鋼減肉配管の場合と同等の減肉サイジング性能を維持できることを確認した。

以上のことから、ガイド波による軸方向減肉幅の評価と EMAT による定点監視とを組み合わせることにより、日本機械学会配管減肉管理規格<sup>(3)</sup>に定められている寸法計測に対応した新たな減肉容量計測を整備することの妥当性が確認された。今後はその実現に向けて、複雑形状配管での減肉によるガイド波伝播機構の解明のための解析検討、検証試験、検査法改良等を行うこととしている。



## 2) 劣化発生・進展状況把握のための検査技術評価に関する研究

本研究は、原子力発電所の容器・配管に用いられているニッケル基合金・ステンレス鋼溶接部に発生し得る応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking：SCC）を極めて高感度、高精度で検出、サイジングできるように意図した非破壊検査技術の妥当性評価に関する研究2件と、原子炉格納容器内で用いられている安全系ケーブル絶縁材がプラントの高経年化により進展する絶縁機能の劣化を高感度、高精度で測定するよう意図した診断技術の妥当性検証に関する研究1件の、計3つの研究から成っている。

### ① 高調波によるニッケル基合金溶接部 SCC の評価と画像化に関する研究

超音波を用いた高精度の非破壊的き裂寸法評価技術の研究の一環であり、高調波及び分調波を用いた SCC の画像化法の構築を主眼に、さらなる高度化のため基盤整備としてのポンピング波励起サイドバンドを用いた微細き裂の検出、および二周波数バースト波送信による非線形超音波特性の解明とき裂の評価を行った。

まず、高調波及び分調波を用いた SCC の画像化法の構築では、画像化によるサイジングの技術の実機適用性検証のため、SUS316 板上に肉盛溶接したインコネル 600 部分に導入した3つの粒界 SCC を有する試験体に大振幅バースト波を入射し、SCC 部の繰返打撃やすべりにより励起される高調波あるいは分調波の振幅を、水浸法及び接触背面散乱波法により画像化し（図 10）、その寸法を評価した。粒界 SCC からの散乱波高調波信号は

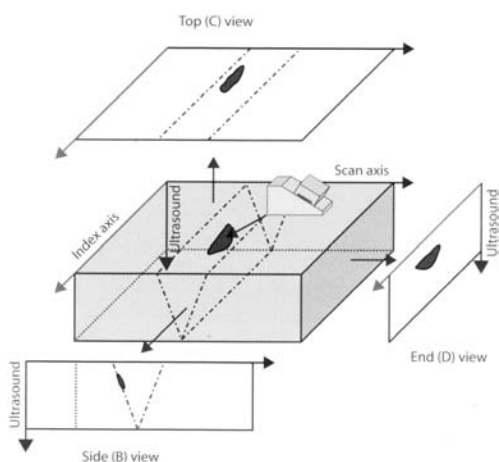


図 10 超音波画像と欠陥の対応関係

従来の超音波法よりも S/N 比が大きいので、画像のコントラストも強く（図 11）、切断実測深さ約 7mm にある 3 個の粒界 SCC に対する超音波による深さ測定の誤差は、2 個については 1mm 以内、1 個については 3mm 以内であった。このような誤差が生じる理由として、粒界 SCC 面が疲労き裂のような平面でなく結晶粒単位で異なる方位を持つ 3 次元的な凹凸を伴うことが考えられるため、さらなる信頼性の向上策として、複数の探触子を用いる方法やフェイズドアレイ装置のように、ある範囲の散乱波を収録し開口合成法を適用する方法等の採用を検討した。具体的には、接触式焦点型斜角入射探触子により超音波を入射し、レーザー Doppler 振動計を用いて走査が容易な非接触で散乱された縦波及び横波を受信できることの確認、および空気超音波探触子を用いて 300kHz 程度の板波を送信し、60kHz の低周波加振を重畳したときの信号を空気超音波探触子及びレーザー Doppler 振動計により受信し、サイドバンドを用いてき裂の有無を非接触で検出できることの確認等である。

ポンピング波励起サイドバンドを用いる微細き裂の検出は、超磁歪アクチュエータによって励振される数 kHz の低周波振動と超音波探触子により入力される 100kHz 程度の高周波振動を用いたときに生じる、き裂の開閉口によるサイドバンドピークを測定することにより閉じたき裂を検出するものである。最大のポンピング波が得られる条件で、人工欠陥を付与した SUS304 配管試験体（長さ 2m）を用いたサイドバンド検出実験では、

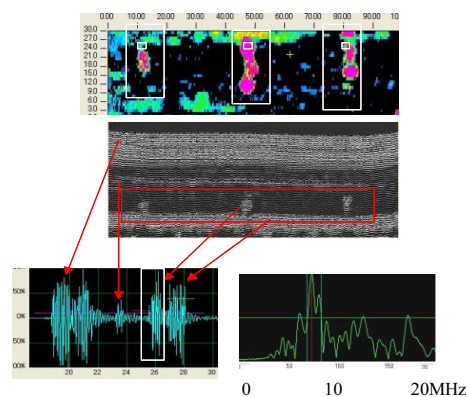


図 11 試験片の高調波 SCC 画像例

上：平面図，中：縦断面図，  
下：受信波形と振幅スペクトル

鍛接模擬損傷（閉口き裂模擬）の場合の方が、ノッチ（開口き裂模擬）の場合より大きなサイドバンドピークが検出された。これにより、この測定法の配管への適用性は確認できたが、実機配管への適用には、計測信号に対する配管長さ、接続機器や支持構造等の影響の解明が不可欠である。

二周波数バースト波送信による非線形超音波特性の解明とき裂の評価に関しては、密着き裂の評価において高調波測定を補完すると考えられる二周波数バースト波を入射した場合の非線形超音波特性（和差調波発生特性）について、非線形界面モデルに基づく理論解析および SUS304 ステンレス鋼溶接部の疲労き裂を対象とした実験的検討を行っている。具体的には、理論解析により、密着き裂面で二周波数の和および差の周波数成分が発生し、その振幅は入射した二周波数の振幅の積に比例することを明らかにし、その検証および特性解明のため、4.5MHz と 5.5MHz の周波数を含むバースト波を用いた実験を行い、溶接部にスリット状欠陥を導入した試験片あるいは欠陥を導入しない試験片に比べて、透過波に含まれる差の周波数（1MHz）成分が有意に大きいことを確認している。これにより、この特性に着目した密着き裂の有無や閉口状態評価の可能性は確認されたが、実用化に向けては実際的な条件でのこの特性の優位性確認も含めた更なる研究調査が必要である。

以上の結果を踏まえ、今後は早期の実機適用の可能性が高い「高調波及び分調波を用いた Ni 基

合金溶接部 SCC 画像化」に絞って研究を進めることが望ましいと考えている。

② 3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部 SCC の高精度サイジング

本研究では、3次元超音波探傷法のニッケル基合金溶接部 SCC の高精度サイジングに対する適用性確認のための探傷特性データ拡充を目的とした探傷試験等を行っている。その内容および主な成果は次の通りである。

まず、比較的小肉厚・小口径の水位計装ノズルセーフエンド異材継手の EDM ノッチ試験体の探傷試験を行い、本方法が溶接並行欠陥に対してはやや過大評価があったが、現行 UT 法のような過小評価は無く、また溶接直行欠陥に対しては良好な深さサイジング精度を持つことを確認した。一方、同じ水位計装ノズルセーフエンド異材継手に付与された SCC に関しては、き裂の先端近傍の開口が著しく小さいことによる過小評価が見られたものの、現行 UT 法よりは良好なことが判明した。これらの結果を含め、これまでの各種試験体に対する全ての探傷結果を総合評価した結果、SCC の深さ測定率および深さ測定精度の点で、3次元 UT 法は現行 UT 法に比較して優れていることが明らかになった（図 12）。さらに、この 3次元 UT 法を、SCC が検出された際の高温継続モニタリングに適用することを念頭に、高温モニタリング要素の仕様検討および要素試験を行った。具体的には、3次元 UT 法のマトリックスアレイ探

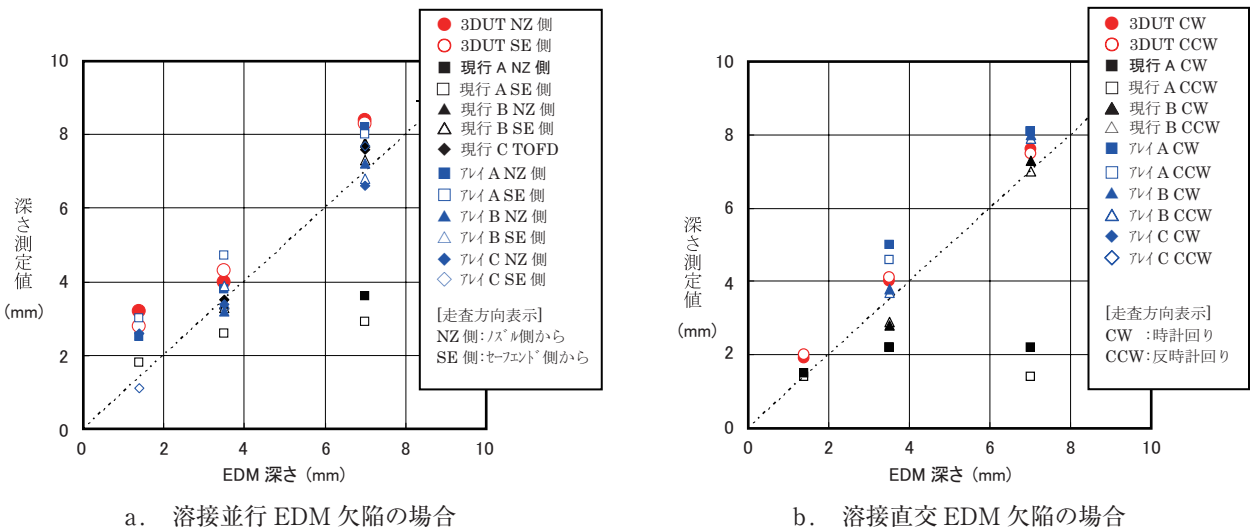


図 12 EDM 欠陥深さサイジング精度の比較 (赤丸が 3DUT 法、他は現行 UT 法およびフェーズドアレイ法)

触子を耐熱シューに取り付けて使用する方式（耐熱シュー方式）と高温で直接使用可能なマトリックスアレイ探触子方式（高温マトリックスアレイ探触子方式）に関するものである。前者については、シューの材料検討および冷却機能に関する熱伝導解析及び検証実験によりその成立性が確認され、後者については、高温マトリックスアレイ探触子の設計・試作とシミュレーション解析による開口合成信号処理に適した音場の観点からの評価をもとに、形成される超音波の音場の超音波可視化法による観察、常温および高温での超音波送受信試験により、室温と同レベルの検出性能を持つことが確認された。

③ マイクロ波検出技術を用いた高分子材料への放射線照射による経年劣化測定技術に関する研究

本研究は、ポリエチレン（PE）、シリコンゴム等高分子ケーブル絶縁材の放射線や熱による劣化の過程解明およびマイクロ波検出技術<sup>(6)</sup>を用いた劣化検出法の確立と測定精度の向上を目的としている。この測定法の基本原理は、高分子化合物の放射線や熱劣化によって生じた電荷や化学構造の変化による電気双極子モーメントの増加をマイクロ波の共振周波数の変化として検出するというものである。測定に用いるマイクロ波空洞共振器は、これまでの研究でX-band（約9GHz）対応で開発済みの試料挿入型（試料を共振器内に挿入固定）およびピンホール型（試料を共振器壁面に開けたピンホールに接触固定）である。ピンホール型については、構造上の利点を生かし、ケーブル

を試料加工せず直に検査可能な非破壊手法を新たに開発した。また、実機適用の自由度向上のため小型化を目指して、より検出感度の高いK-band（約25GHz）のマイクロ波対応の空洞共振器を製作し、これらを用いて、ポリエチレン（PE）、シリコンゴム及びエチレンプロピレン（EP）ゴムの劣化供試材に対する劣化測定精度検証実験を行った。その結果、いずれの測定法についても、その妥当性が確認された。特に、Kバンド非接触式ピンホール型検出器により導体を含むケーブルを対象とした測定法が確立されたこと（図13）は、実機適用に向けての重要な成果である。また、劣化過程解明を目的として、高分子化合物の熱、光及び放射線による劣化反応で最も注目される高分子架橋反応に注目し、ケーブル母材（PEおよびEPゴム）に架橋反応誘起材として使用される脱水素機能を持つベンゾフェノン（以下BPと略記する）を添加した試料について、マイクロ波の共振周波数シフトを与える化学反応活性種・化学種との時間相関関係分析を行ったが、時間相関測定・化学反応速度論的評価のいずれから、有効な相関関係は見出されなかった。これに対し、PE高分子内添加物の分析の結果をもとに、共振周波数シフトの要因候補となる物質として可塑剤（酸化防止剤）ブチルヒドロキシトルエン（BHT）に注目し、BPとBHTを添加した試料について上記時間相関分析を行ったところ、良い相関関係が得られた（図14）。これらのことから、観測された共振周波数シフトの要因は、母材であるポリエチレン

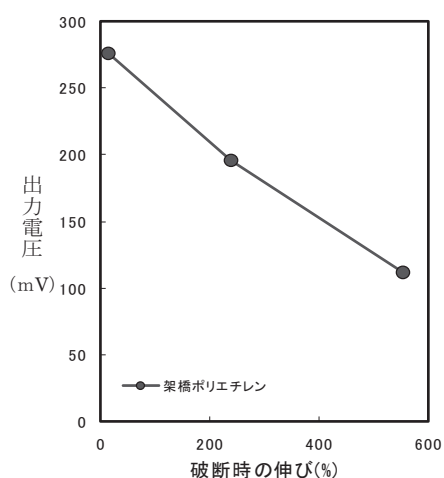


図13 導体を含む熱・放射線劣化架橋ポリエチレンの共振器出力電圧と破断時の伸びとの相関例

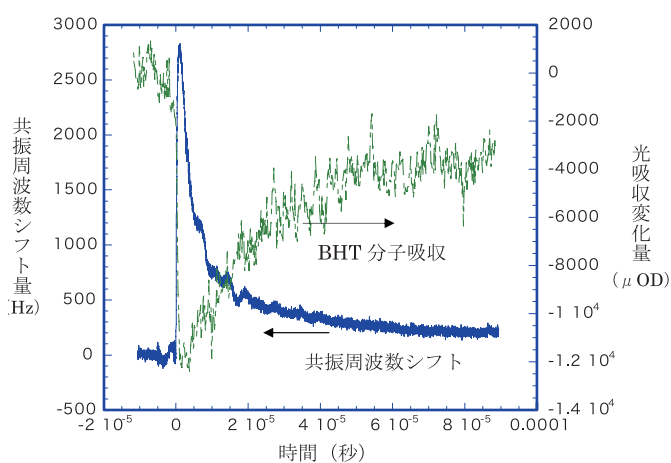


図14 ベンゾフェノン（BP）とブチルヒドロキシトルエン（BHT）添加系での時間相関測定結果

及びエチレンプロピレン共重合体そのもの“以外”の、例えばBHTに代表される酸化防止剤に起因する可能性がきわめて高いと考えられる。また、マイクロ波共振周波数シフトを利用した本技術が、酸化防止剤漏出による高分子母材の酸化劣化の早期診断（予防診断）技術となり得ることが確認されたとも言える。なお、その実用化に向けての今後の課題としては、実機適用に向けたマイクロ波誘電吸収測定装置の改良、及び劣化による高分子材料の化学構造変化とマイクロ波吸収の相関の定量的確認による診断メカニズムの確立がある。

3) 溶接補修技術に関する研究

本研究は、大きく分けて、a. 補修溶接部の施工健全性評価技術の確立、b. 補修後溶接部における信頼性評価技術の確立、及びc. 実機適用条件による評価技術の検証、の3つから成っている。各研究の概要は以下のとおりである。

① 補修溶接部の施工健全性評価技術の確立

本研究での実施項目は、多層盛溶接機構に基づく補修溶接部の健全性評価手法の研究と多層盛溶接部の健全性評価の力学的評価技術の研究である。

多層盛溶接機構に基づく補修溶接部の健全性評価手法の研究では、原子力プラント用耐食ニッケル合金（インコネル 690）およびステンレス鋼（SUS316）の既存材料に対する不純物元素の違いによる影響も含めた補修溶接の健全性評価技術を確立することを目的として、690系合金とステンレス鋼（SUS316L）の異材溶接部における溶接割れ感受性の評価、不純物元素及びCeの添加が異材溶接割れ性に与える影響の評価、溶接金属の組織解析および添加元素が溶接割れ性に与える影響

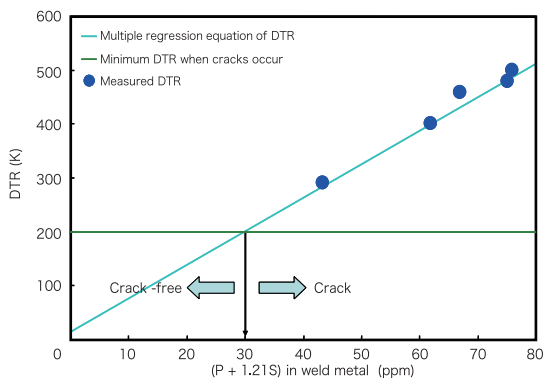


図 15 690 合金溶接金属中の P および S 含有量と延性低下温度域 (DTR) との関係

の評価を実施し、施工健全性を確保のための規制基準の基礎となる知見を得た。主なものとして、690系合金溶接部におけるマイクロ割れを防止するには、溶接金属部の P および S 含有量が  $P + 1.2S < 30 \text{ ppm}$  を満たすことが必要と考えられること（図 15）、SUS316L 鋼の多層盛溶接金属中の高温割れ感受性の調査で、 $0.22 < Ce / (P + S) < 2.11$  において延性低下割れ、凝固割れおよび液化割れのいずれも発生しないこと（図 16）、またビードごとに P + S 含有量を考慮して適切な Ce を添加することにより、異材多層盛溶接部においてもマイクロ割れが抑制できることが挙げられている。今後の課題としては、バレストレイン試験（溶接割れ試験）によって得られた割れ感受性の差異の材料学的観点からの検証のための、割れ発生に至る局所ひずみ及び温度条件などの影響の定量的確認、さらには異材溶接部における溶接割れ感受性に及ぼす材料学的要因を明らかにするための、材料組成や希釈（施工条件）による多層盛溶接金属の組成変化や不純物の混入を考慮した溶接割れ感受性の系統的評価がある。

多層盛溶接部の健全性評価の力学的評価技術の確立に関しては、上記研究の実験結果を活用した、スポットバレストレイン試験（延性低下割れ試験）を再現できる解析モデルを構築し、これを用いた解析による、延性低下割れ発生に及ぼす材料の割れ感受性及び外部負荷の影響の調査が行った。なお、採用した解析モデルは、界面要素を結晶粒界に配置し結晶組織全体の挙動を扱うマイクロ組織オーダーでの割れ発生解析モデルであり、材料固有の割れ感受性を粒界固着力として考慮している。その結果、延性低下割れが発生するためには界面

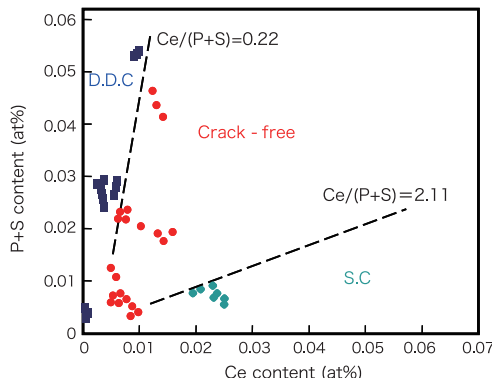


図 16 SUS316L 鋼多層盛溶接金属中のマイクロ割れ防止条件 (Ce 含有率と P + S 含有率)

結合強度が材料の延性低下温度領域での降伏応力以下でなければならないこと、粒界滑りが延性低下割れに大きな影響を及ぼすこと、延性低下割れ発生予測手法としては、連続体モデル（マクロ応力、ひずみ予測）と結晶組織を考慮した割れモデル（延性低下および割れ発生予測）の組合せによる手法が、簡潔かつ一貫性の点で優れていることが明らかになった。今後の課題としては、本年度開発した溶接割れ解析手法を、結晶組織と粒界を有するモデルに拡張し、より高度な知見を得るとともに、将来の補修溶接への適用が期待されるレーザ溶接を対象にした施工健全性評価のための基礎的検討としての3次元熱弾塑性有限要素法を用いた解析によるマクロ応力・ひずみの把握等がある。

## ② 補修後溶接部における信頼性評価技術の確立

本研究では、ミクロ及びマクロ応力場による補修溶接部の力学的評価と、応力腐食割れに及ぼす不均一応力場の効果の調査が実施された。

ミクロ及びマクロ応力場による補修溶接部の力学的評価は、微視的不均質を考慮した補修後溶接部のミクロ残留応力ならびに補修溶接始末端部及び熱サイクル重畳部を含めたマクロ残留応力の数値解析技術の確立を目的としている。本年度は、これまでの成果を踏まえての、多層盛補修溶接の熱サイクル重畳部の代表例としてテンパービード工法による残留応力分布の解析的評価、及び結晶組織の不連続性を微視的不均質としたモデルの下での、応力腐食割れ試験に対応する600系合金及び690系合金のミクロ残留応力場の評価を行った。その結果、高応力域と割れ発生位置が良い対応を示すことが明らかになった。これにより、本手法が応力腐食割れ評価に有効であることが確認された。今後の課題としては、X線回折残留応力測定システムによる計測結果を用いた補修溶接部全体のマクロ残留応力評価技術検証や、内部組織の微視的不均質を考慮したミクロ残留応力数値解析モデルの構築・解析・検証がある。

また、応力腐食割れに及ぼす不均一応力場の効果の調査では、補修溶接後Ni合金の再供用時の信頼性担保ならびに信頼性評価の基礎として、600系合金の1次冷却材SCC（Primary Water SCC：PWSCC）環境におけるIGSCC発生とミクロ応力場、金属組織との対応の検討を行った。また、690系合金溶接割れ対策材のPWSCC環境での長期応

力腐食割れ試験も実施した。その結果、以下のような知見が得られた。すなわち、高温高圧水中での長期間後供用後の全面腐食による表面形状変化模擬のため考案したシリカコロイダル研磨を用いた特殊な表面処理法が、平板試料で600系合金にIGSCCを発生させる加速試験法として有効なこと、PWSCC環境中での冷間加工を受けた600系合金のIGSCC感受性は20%加工材よりも10%加工材の方がSCC破面率、き裂進展速度ともに大きな値を示すこと、およびPWSCC環境中での600系合金のIGSCCは主にランダム粒界で発生し、対応粒界を避けて進展する傾向があったこと等である。

今後の課題としては、これまでに確立した粒界応力腐食割れ発生・進展の解析手法を用いた、高ニッケル合金の補修溶接後のPWSCC発生・進展挙動の特性の解明がある。

## ③ 実機適用条件による評価技術の検証

本研究は、実際の高経年化プラントを補修する際に生じる可能性のある問題点を抽出し、本研究で実証された補修プロセスを実施工に適用した際の施工健全性と耐食安全性が担保されることを検証するとともに、高経年化プラントの予防保全・補修技術の技術情報基盤を整備することを目的としている。本年度は、その基盤情報として、国内PWRにおける主な損傷事例と溶接補修実績、規格基準の現状の調査を行った。その結果の要点は以下の2つである。すなわち、国内で平成15年以降に確認された多数の600系合金部位での損傷例のいずれについても、適用された690系合金による補修事例で施工直後及び供用後において損傷が発生したとの報告は無く、現状の補修技術は適切であると考えられること、及び溶接補修に関する規格・基準に関しては、日本機械学会の維持規格（2004）の補修章<sup>7)</sup>に具体的手法が示されているものの、未だ規制上正式に認可されておらず、円滑に実機適用できる状況にはないが、新たな保全技術等を円滑に導入する環境整備を目的とした検討が、平成20年度よりNISAの原子炉安全小委員会・検査技術評価WGで進められていることである。なお、今後は、690系合金による溶接施工の確実性を向上させる必要性が高い箇所を中心に、本プロジェクトやその他の研究の成果をもとに、モックアップ試験による実補修溶接部の施工健全性検証の実施に向けた検討を進める必要があると

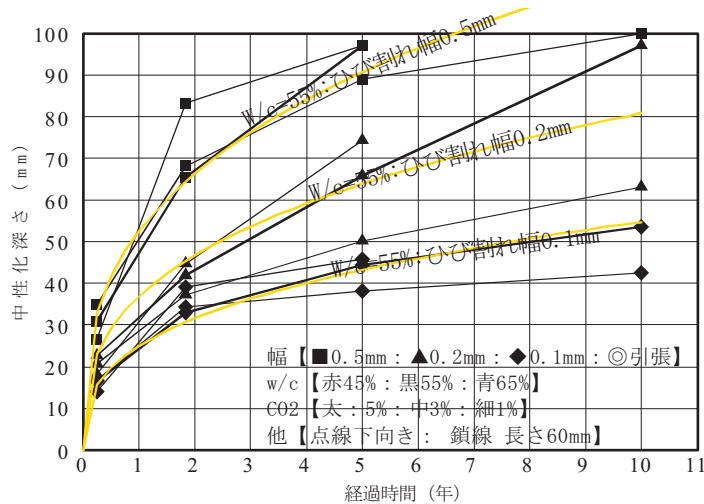


図 17 ひび割れ幅の中性化深さ進展への影響  
(実験データおよび予測式による評価値 (黄線))

している。

#### 4) 主要構築物の劣化に関する研究

本研究の目的は、原子力発電所の鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価手法の構築に向けて、これまでの成果を踏まえ、ひび割れのあるコンクリートでの中性化進展や塩分浸透を念頭に、鉄筋腐食に影響を及ぼす要因及びその特性を実験的に把握し、これを基にひび割れを通してのコンクリート構造物の耐久性評価に関する基礎情報を整備するものである。具体的な実施内容及び成果は下記のとおりである。

まず、ひび割れ内部の中性化進展に関しては、ひび割れ幅 (0.1, 0.2, 0.5mm) と水セメント比 (45%, 55%, 65%) を主要パラメータとして二酸化炭素濃度の異なる条件 (CO<sub>2</sub>濃度 1%, 3%, 5%) において中性化促進試験を行い、その結果を用いて中性化進展 (ひび割れ内部への中性化深さ) 予測式を導出した。なお、この過程で得られた「ひび割れ内部の中性化進行速度は、水セメント比が大きいほど、すなわち低強度のコンクリートほど小さくなる。」という知見は、従来の考えられていた事象とは全く異なり重要な項目と考えられる (図 17)。また、この実験式に理論的裏付けを与えるため、「中性化の進展はひび割れ外からひび割れ内に供給される二酸化炭素量と、ひび割れ内のひび割れ面から二酸化炭素が吸収される量に依存する」という仮説に基づく解析を行い、その結果が実験結果を良い精度で再現できることを確認した。次に、鉄筋引張により発生したひび割れ内の鉄筋腐食に関して、平成 19 年度に実施

した「曲げひび割れ」法では曲げ作用による鉄筋とコンクリートの肌離れの影響が懸念されるため、純粋に「引張を受けて発生するひび割れ」を対象に腐食促進試験を行い、肌離れがない場合の発錆および塩分浸透状況を検討した。その結果、ひび割れ形式の違い (曲げ、引張) による差異はなく、腐食、塩分浸透において両者を同様に扱うことが可能であることが確認された。あわせて鉄筋腐食に係る塩分浸透の基礎データを収集・検討を通して、塩分浸透予測式導出の見通しが得られている。また、鉄筋腐食の観点から許容されるひび割れ幅の判定のための、ひび割れ幅、周辺環境条件、コンクリートの品質及びかぶり厚さに基づいた、原子力プラントの鉄筋コンクリート構造物の高経年化の下での耐久性評価の基本体系の検討も行った。今後の主な課題は、塩分浸透データ蓄積と塩分浸透予測式導出及び解析的裏付けによる精度向上、及び実機環境下での自然曝露試験によるデータの蓄積と、これらをもとにして耐久性評価のための具体的な劣化予測法を構築することである。

## 5. 結言

このように、平成 20 年度の福井クラスタの事業は、これまでも増しての研究実施機関・研究者各位の精力的な努力、検討委員会委員各位のご指導・ご協力により円滑に遂行でき、所期の研究成果を達成することができた。なお、平成 20 年度は当事業の当初目論見の 5 年計画の中間点であり、研究の遂行

および成果の取り纏めに当っては「規制情報としての活用に資する」という本事業の最終目標をより強く意識してきたが、成果の具体化という面では更なる調査研究を行う必要があるものが大部分である。個々の研究案件の今後の取り扱いについては、委託元である NISA の本事業計画の検討を待つことになるが、INSS としては、福井・近畿圏内の各研究実施機関の持つ、人材育成、研究意欲の増進、技術シーズ開発等の社会的役割を適切に勘案して、2年後の上記の本事業最終目標の達成に向けた研究の企画・推進に努力することとしている。

## 謝辞

平成 20 年度の福井クラスタの事業の遂行に当って、研究実施機関・研究者各位のご努力・ご協力に感謝いたします。また、福井工業大学教授柴田俊夫氏からは検討委員会主査としての確なご指導・ご助言を頂戴しました。この場を借りて感謝の意を表します。

## 文献

- (1) 藤村公也, 渡海親衛, 藤堂二彦, “福井地域を基盤とした近畿圏連携による高経年化対策強化基盤整備事業の実施報告”, INSS JOURNAL, Vol.15, p.345, (2008).
- (2) 2 “発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格”, JSME S CAI-2005, 日本機械学会発行, 丸善, 2005 年 3 月
- (3) “発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格”, JSME S NG1-2006, 日本機械学会発行, 丸善, 2006 年 11 月
- (4) J.H.Brunton, M.C.Rochester, “Erosion of Solid Surfaces by the Impact of Liquid Drops”, Treaties on Materials Science and Technology, vol.16, pp.185-248, (1979)
- (5) ASME, “Requirements for analytical evaluation of pipe wall thinning Section XI”, Case N-597-2, (2003)
- (6) A.Saeki, S.Seki, S.Sunagawa et.al., Philosophical Magazine 86, pp.1261-1276, (2006)
- (7) “発電用設備規格 維持規格”, JSME S NA1-2004, 日本機械学会発行, 丸善, 2004 年 12 月