原子力安全・保安院　殿

平成２２年度高経年化対策強化基盤整備事業

- 経年劣化事象の進展予測・評価手法の確立等 -

総括報告書

平成 23 年 3 月

株式会社　原子力安全システム研究所

本報告書は、原子力安全・保安院の委託業務により、（株）原子力安全システム研究所が、（独）名古屋大学、（独）福井大学、（独）徳島大学、（独）神戸大学、（有）超音波材料診断研究所、（独）名古屋工業大学、（財）発電設備技術検査協会、（学）福井工業大学および（独）大阪大学との連携により作成し、原子力安全・保安院へ納品したものです。

したがって、本資料の複製、転載等には、原子力安全・保安院の承認が必要です。

目　次

1. はじめに 1

2. 本事業の概要 2
2.1 本事業の実施目的 2
2.2 本事業の実施項目とその変遷 2
2.3 各実施項目の概要 3

3. 研究成果 4
3.1 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 4
3.2 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 ２０
3.3 溶接補修技術に関する研究 ２８
3.4 主要構築物の劣化に関する研究 ３４
3.5 研究成果のまとめ ３７

4. まとめ ４３
4.1　5ヵ年の成果と総括 ４３
4.2 今後に向けた提言 ４５

略語表 ４８

（参考）外部発表成果一覧 ４９

図目次

図 3.1.1-1　物質伝達率空間分布のオリフィス開口率および
　　レイノルズ数依存性　５
図 3.1.1-2　物質伝達最大値のオリフィス断面平均流速依存性　６
図 3.1.2-1　S15C 炭素鋼の最大損傷深さの経時変化　８
図 3.1.2-2　液滴衝撃エロージョンと
　　キャビテーション・エロージョンの関係　９
図 3.1.2-3　流速と最大エロージョン深さ速度の関係　１０
図 3.1.2-4　液滴衝撃エロージョンでの液滴１個当たりの
　　体積減少量の液滴径依存性　１０
図 3.1.2-5　液滴衝撃エロージョンでの質量減少速度の法線流速依存性　１０
図 3.1.3-1　限界曲げ加重と減肉欠陥のアスペクト比依存性　１３
図 3.1.3-2　限界曲げ加重の予測値 M^{FEA} と実験値 F^{EXP} の比の
　　アスペクト比依存性　１３
図 3.1.4-1　世界的２方式での断面欠損率と検出信号振幅の関係　１６
図 3.1.4-2　ガイド波の肉圧信号振幅値よる推定減肉形状と
　　実測減肉形状の比較　１６
図 3.1.4-3　ガイド波多重反射エネルギー閉じ込め法の概要　１６
図 3.1.4-4　オリフィス下流の測定点での EMAT による測定　１８
図 3.1.4-5　周波数別の振幅値の実験値と理論計算値との比較例　１９
図 3.1.4-6　軸方向減肉幅検出精度　１９
図 3.2.1-1　JNES 安全弁管台セーフエンド
　　Ni 基合金溶接部 SCC 深さ測定結果　２２
図 3.2.1-2　Ni 基合金溶接部 SCC 深さ測定結果総合実績　２２
図 3.2.2-1　開口合成３次元超音波探傷の概要　２３
図 3.2.2-2　欠陥深さ測定率に関する３次元 UT 法と
　　現行 UT 法の比較　２４
図 3.2.2-3　欠陥深さ測定精度に関する３次元 UT 法と　２４
　　現行 UT 法の比較
図 3.2.2-4　構造上の接近困難性による探傷不可能範囲の概念　２５
図 3.2.2-5　斜め方向からの欠陥検出画像と長さサイジング性　２５
図 3.2.3-1　熱・放射線劣化 EP ゴムの共振周波数量と
　　破断伸びとの相関　２７
図 3.2.3-2　Q-band 測定での JNES 難燃 EP ゴム（導体有り）の
　　出力電圧 $^{-2}(V^{-2})$ と破断時伸び　２７

図 3.2.3-3　BP（光励起により強い酸化作用を示す酸化反応開始剤）・
BHT（分析検出された HDPE 中の酸化防止剤）添加系
における光学吸収とマイクロ波誘電吸収の相関　２８
図 3.3.1-1　690 合金多層盛溶接における溶接金属中の
不純物元素量パラメータ（P+1.2S）と
延性低下割れ感受性の関係　３２
図 3.3.1-2　溶接金属中の不純物元素（P+S）含有量、
Ce 含有量と高温割れ発生の関係　３２
図 3.3.1-3　モックアップ試験体溶接金属の SCC 試験結果　３３
図 3.4.1-1　ひび割れ幅と塩化物イオン濃度比　３７

表目次

表 2.2-1　本事業の実施項目とその変遷　２
表 3.3.1-1　各種 690 合金溶接部の PWSCC 試験結果　３３
表 3.5-1　実施項目別事業概要　３８
表 4.1-1　成果項目および反映先の概要　４３

1. はじめに

原子力安全・保安院では、安全規制の整備・運用に必要な技術的知見を実プラント環境下、加速試験等を通じ、広範に収集することにより、我が国の原子力発電所における高経年化対策に係る基盤を整備し、また、本事業の成果により原子力に内在するリスクを十分かつ的確に認識し、高経年化プラントの安全性の科学的な検証等のための知識基盤を拡大し、原子力発電所の高経年化対策の実効性をより一層高度化させることを目的として、平成 18 年度から平成 22 年度までの 5 年間にわたり、高経年化対策強化基盤整備事業を実施してきた。

高経年化対策強化基盤整備事業では、原子力発電所における高経年化対策の強化に資するため、発電所立地地域に存在する大学、研究機関を中心とした産学官連携の下、材料物性試験等の実施により、経年劣化事象の原因やメカニズム究明を進めるとともに、経年劣化事象の適切な把握のための進展予測技術や検知・モニタリング技術の高度化を図り、経年劣化事象に対応した保守・管理技術等の確立を目指してきた。また、現在、産学官のそれぞれにおいて散在している高経年化対策を支える技術情報基盤を整備することにより、産学官連携の下での安全研究の推進を図ってきた。

高経年化対策強化基盤整備事業は、研究拠点となる地域の研究機関や研究施設のリソースを有効活用した研究を推進することを念頭に、地域クラスター制を取り入れ、①技術情報基盤の整備等、②経年劣化事象の進展予測・評価手法の確立等、③健全性評価の妥当性確認手法の確立等、④経年劣化事象の解明等の 4 つの事業に分かれて実施されてきた（以下「4 事業」とよぶ)。

本報告書は、4 事業のうち「経年劣化事象の進展予測・評価手法の確立等」（以下、「本事業」とよぶ）より得られた研究成果および成果の具体的な反映先をまとめるものである。

2. 本事業の概要

2.1 本事業の実施目的

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における高経年化に係る技術情報基盤の整備を行うことを目的とし、高経年化劣化事象の評価や検査技術、補修技術および主要構築物の劣化に関わる研究を実施する。実施に当っては、高経年化対応技術戦略マップの一部を担い、評価指針や技術基準の素案策定に資することを念頭に、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、地域内およ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を最大限に活用し、各組織の研究・事業実績を基にその専門性を十分考慮し、より実用性の高い研究成果の達成を目指す。

2.2 本事業の実施項目とその変遷

本事業では、原子力発電所設備の高経年化対策を科学的･合理的に行うため、最新の知見を加味し、経年劣化事象の進展予測なら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り、得られた成果について、安全規制基準、関連技術規格等への反映や実機適用に向けた方策の検討を行ってきた。

本事業の実施項目とその変遷を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1　本事業の実施項目とその変遷

No.	実施項目		年度別実施項目				
	大項目	中項目	H18	H19	H20	H21	H22
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	配管減肉予測・評価手法の精度向上	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
		液滴衝撃エロージョンに対応した配管減肉評価手法の構築	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
		減肉配管破壊モード評価法の高度化	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
		配管減肉定量評価法の有効性検証	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
			ガイド波による広域モニタリング手法の検証				
			⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
			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	非線形超音波を用いた高散乱 Ni 基合金溶接部粒界 SCC の非破壊検査法に関する研究	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
		３次元超音波探傷法による Ni 基合金溶接部 SCC の高精度サイジングに関する研究		⟷	⟷	⟷	⟷
		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	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
3	溶接補修技術に関する研究	高経年化プラント補修における溶接健全性評価技術および補修後溶接部における信頼性評価技術に関する研究	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
4	主要構築物の劣化に関する研究	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	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷

2.3 各実施項目の概要

以下では、表 2.2-1 に示した実施項目（大項目）別について、その概要を示す。なお、各実施項目別の 5 ヵ年での成果は次章に取りまとめて示す。

2.3.1 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およ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の収集を行う。これら研究で得られる成果を踏まえ、減肉による配管破断リスクを考慮した保全手法の確立を図る。

2.3.2 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

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（以下SCC）を極めて高感度、高精度で検出、サイジングでき非破壊検査技術の妥当性を、実機を想定した試験により評価する。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について、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を、熱･放射線劣化供試体を用いて評価する。これらの試験により得られた成果に基づき、高経年化原子力プラントの検査・診断技術の高度化を図る。

2.3.3 溶接補修技術に関する研究

ニッケル基合金補修溶接部の健全性について、補修部の健全性を既材料の組織性状の差、溶接入熱量、施工方法の違いの観点より評価し、補修溶接施工条件に応じた健全性評価技術の確立を行う。また、補修部の再供用下における健全性に関して、耐 SCC 性の観点より評価を行い、補修後溶接部の長期使用時における健全性評価技術を確立する。さらに補修溶接方法の実機適用における施工健全性の検証を行い、これらの結果をふまえて、ニッケル基合金溶接部の的確な劣化管理のための補修溶接指針検討のための素案を策定する。

2.3.4 主要構築物の劣化に関する研究

原子力発電所の鉄筋コンクリート構造物の耐久性を支配する鉄筋腐食に着目し、鉄筋腐食に影響を及ぼす要因およびその特性を把握し、これに基づいて鉄筋腐食に着目したコンクリート耐久性評価手法の検討を行う。特に、ひび割れの発生したコンクリートに着目し、中性化および塩分浸透に係る高経年化特性を把握するとともに、鉄筋腐食発生の経時的なメカニズムを明らかにする。これらの結果を基に、ひび割れ幅、周辺環境条件、コンクリートの品質（強度）を基準にした原子力発電所における鉄筋コンクリート構造物の高経年化を考慮した耐久性評価手法を検討し、事業者が策定する点検計画の妥当性評価方法を整備する。

3. 研究成果

本章では、各研究の５ヶ年の成果を、その実施内容と成果の反映先とともに、取りまとめる。なお、成果の反映先の項における今後の活用に関する判断は、あくまで研究実施者の立場としての見通しを示すもので、その具体化は学協会関係者(JNES を含む)の合意を得ながら然るべき手続きの下に進められるものである。

3.1 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ての基礎情報の収集を目的として、流れ加速型腐食(FAC)に着目した減肉予測・評価法の精度向上、液滴衝撃エロージョン(LDI)に対応した配管減肉評価法の構築、減肉配管の破壊モード評価法の高度化および検査技術の高度化とこれを基にした配管減肉の定量評価法の有効性検証を行った。

3.1.1 配管減肉予測・評価手法の精度向上

3.1.1.1 実施内容

流動実験と物質伝達実験により、オリフィス下流部での物質伝達率と乱流統計量の空間分布との相関、物質伝達特性の調査を行なった。この調査結果を基に、既存の数値計算コードを用いた予測手法の検討を実施した。本研究の経緯概要は以下の通りである。

平成 18 年度：配管減肉に関する最新の研究動向調査、予備加速減肉実験、予備流動実験および予備流動解析による実験法の有効性検証。

平成 19 年度：FAC 関連実験として流動および物質伝達の測定を行う際の技術的課題の摘出と実験技術の確立（特に、実機条件での物質伝達を唯一高精度で模擬できる実験手法である電気化学的手法の調査）および既存の物質伝達研究および配管減肉研究の調査。

平成 20 年度:電気化学的手法を用いた物質伝達実験の予備実験および実機模擬配管を用いた流動および物質伝達実験を実施（特に、流速と凹凸面の影響の評価）。

平成21年度：オリフィス後流および凹凸面を有する配管内流れを対象とした流動および物質伝達実験の実施。LES(Large Eddy Simulation)など最新の流動解析手法を用いた流動解析を実施。これらの結果を踏まえて、オリフィス後流の最大減肉位置とその位置における物質伝達率の予測モデルの提案。

平成22年度：オリフィス後流などを対象とした流動ならびに物質伝達実験および開示された実機プラントデータに対応する物質伝達実験と流動解析を実施。これらの結果を踏まえて、オリフィス後流の減肉空間分布に関連し、オリフィスの開口比、オリフィス上流の旋回などの影響を物質伝達の観点から整理

し、モデルとして提案。あわせて、実験的に取得した物質伝達データを整理し、減肉予測の数値計算コードの検証用として整備。

3.1.1.2 最終成果

流れ加速型腐食（FAC）のメカニズムの一要因と考えられている物質伝達率を測定し、それに流れが与える影響を調査した。その結果を用いて、オリフィス後流の配管減肉に関し、物質伝達の観点から既存減肉予測式を修正すると共に、新たに最大減肉位置の予測モデルを提案するなど予測手法の高度化を図った。また、減肉予測の数値計算コードの検証と高精度化に不可欠な物質伝達データを実験的に取得した。

具体的成果は以下の２項に集約される。

a.FAC 配管減肉メカニズムに基づく予測式の提案

FAC による配管減肉に関して流動の点で支配的メカニズムとされる物質伝達率をオリフィス下流において測定し、その結果に基づいた物質伝達率に関する予測式を提案した。その要点は下記の通りである。

・Kastner の式などで用いられているオリフィス形状係数は従来から考えられていた定数値ではなく、レイノルズ数、オリフィス開口率 β に依存する（図 3.1.1-1 参照）ことを明らかにした。この知見は配管減肉速度の予測精度向上に資する。

・オリフィス下流における物質伝達率の最大値 $k_{\max}$ とその位置 $x_{\max}$ は、オリフィス断面平均流速 U_D とオリフィス高さ h を用いて、次式のように整理できる（図 3.1.1-2 参照）。この知見は配管減肉管理のための肉厚測定点の最適化に資する。

$$k_{\max} \cong A\times(U_D)^{0.47},\quad A=\{-5.17\ln(S_c)+46.0\}\times10^{-5},\quad U_D=U_o/\beta^2,\quad \beta=d/D$$

$$x_{\max}\cong 5h,\quad h=(D-d)/2$$ ただし、D は配管直径、d はオリフィス直径

・オリフィス流動場が物質伝達率へ影響する範囲は、少なくとも $3D$、再付着点距離の 2 倍にまで及ぶ。この知見は配管減肉管理のための肉厚測定点の最適化に資する。

・オリフィス下流における平均速度場は、代表速度 U_D および代表長さ h により、相似分布を示す。この知見は配管減肉速度の予測精度向上に資する。

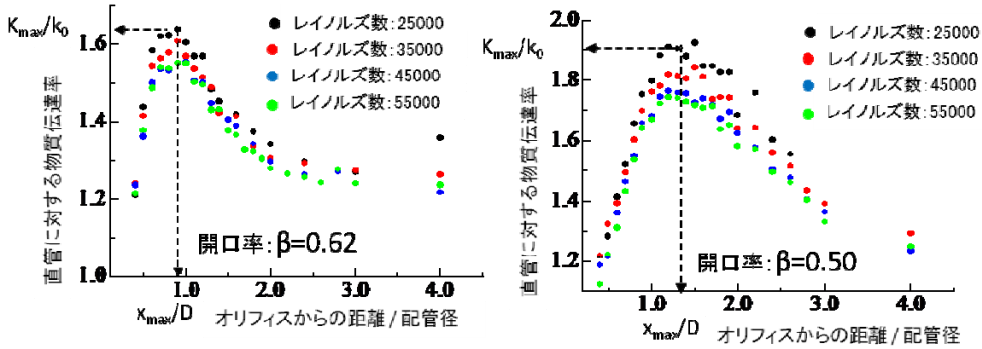


図 3.1.1-1　物質伝達率空間分布の
オリフィス開口率およびレイノルズ数依存性

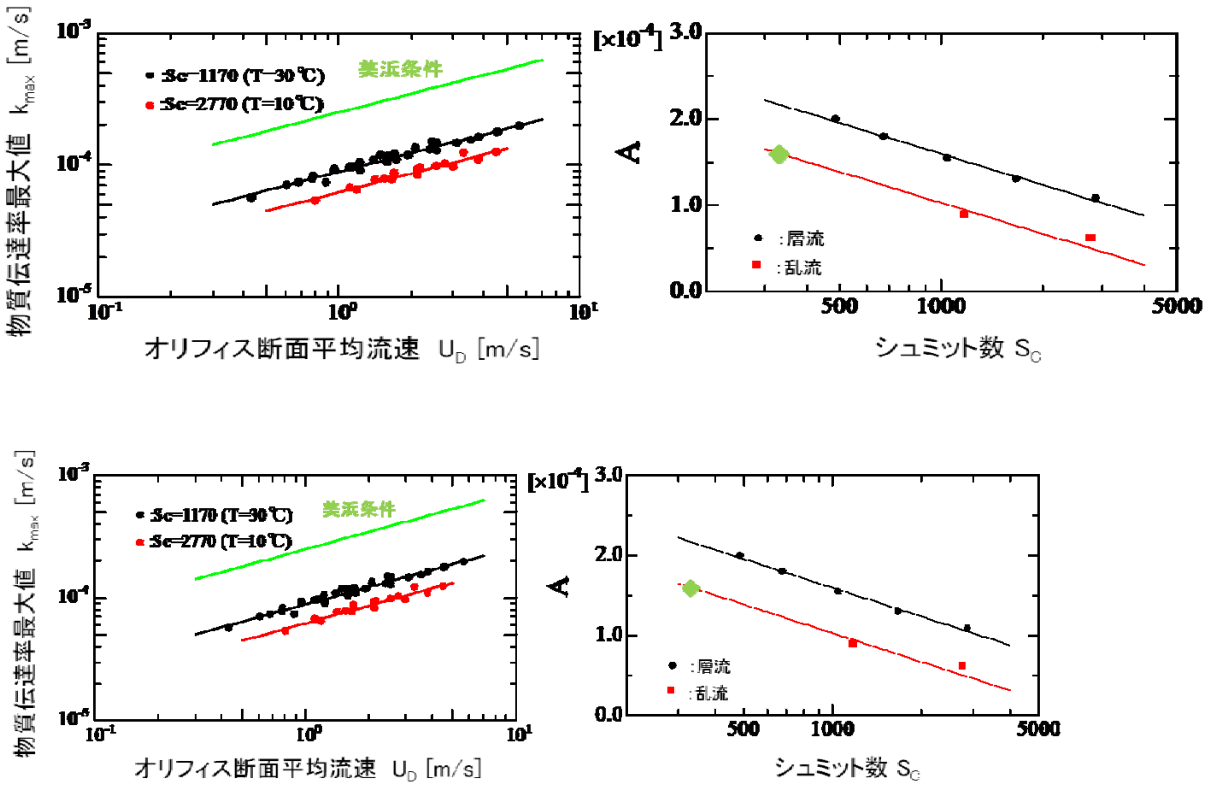


図 3.1.1-2　物質伝達最大値のオリフィス断面平均流速依存性

b.FAC 配管減肉メカニズムに関わる物質伝達率と流動データの整備

FAC による配管減肉に関して流動の点で支配的メカニズムとされる物質伝達率をオリフィス下流において測定し、配管減肉に関わる数値解析コードの改良に資するべく、流動場に関する測定データ、解析データと共に整理した。物質伝達率に関しては流れ方向および周方向の空間分布の測定値を、流動場に関してはオリフィス下流の 3 次元空間分布の測定値ならびに解析値を、レイノルズ数などをパラメータにそれぞれ得た。その結果、物質伝達率の分布と最も良い相関を示す壁面近傍の流動因子は、標準 k-ε では乱流エネルギーであるとの従来の知見を再確認するとともに、新たに LES では壁面せん断応力の絶対値の 1/3 であることを確認した。なお、データの概要は以下の通りである。

・配管形状：　オリフィス下流管、単純直管
・レイノルズ数：　2500～55000（実機条件で口径数十 mm の管に相当）
・シュミット数：　約 2000（実機条件で約 200）
・オリフィス開口比：　0.41～1.0
・入口条件：　発達流、周方向分布のない旋回流
・乱流モデル（解析）：標準 k-ε、LES（一部のみ対象）

3.1.1.3 成果の反映先

本事業成果は、「日本機械学会発電用設備規格：配管減肉管理に関する規格 JSME S CA-1」の参考資料「配管減肉に関する技術的知見の現状」への諸成果反

映に際しての基礎データ、および国が検証する際のデータとして活用できる。なお、具体的には以下の条項である。

２．流れ加速型腐食(FAC)

2.1 流れ加速型腐食のメカニズム

2.1.3 流れに加速される腐食のメカニズム

2.3 影響パラメータ

2.3.3 流体力学因子の影響

2.4 流れ加速型腐食のモデルおよび予測コード

3.1.2 液滴衝撃エロージョン(LDI)に対応した配管減肉評価手法の構築

3.1.2.1 実施内容

限界流速および減肉メカニズムの解明実験を行い、あわせて酸化被膜の剥離メカニズムおよび剥離強度の流速依存性を調査した。また、減肉に及ぼす流速、液滴径、衝突角度の影響を実験により調査し、液滴衝突角度と損傷量の関係に係るデータ拡充と相関解明を行い、より精密な観測手法を用いた液滴の流速と液滴径などの影響確認実験で得られたデータを基に、LDI に対応した配管減肉評価式の検討を行った。なお、本研究の実施経緯の概要は以下の通りである。

平成 18 年度：LDI に関する最新の研究動向調査および液滴衝撃試験装置の設計製作および予備試験を実施。

平成 19 年度：低炭素鋼 S15C とステンレス鋼 SUS304 について、液滴衝撃エロージョンに及ぼす液温および流速の影響の確認試験･評価､エロージョン機構の解明試験、ならびに補修用耐エロージョン被覆材料を検討。

平成 20 年度：合金鋼 STPA24 について液滴衝撃エロージョンに及ぼす流速の影響の評価のためのエロージョン試験、エロージョン限界流速の比較検討およびエロージョン機構の解明、ならびにエロージョンに及ぼす衝突角度の影響確認試験・検討等。

平成 21 年度：酸化皮膜の剥離強度の流速依存性の確認試験・評価（対象材料はアルミニウム A1、低炭素鋼 S15C、合金鋼 STPA24）ならびに液滴衝撃エロージョンに及ぼす液滴径の影響の確認試験・評価等。この結果を踏まえて液滴１個当たりの減肉体積評価式を提案。

平成 22 年度：酸化被膜の剥離強度の流速依存性確認試験・評価（酸化条件多様化)、液滴衝突角度と損傷量の関係の、材料依存性確認実験データ拡充と相関解明ならびにより高精度の LDI データの充実のための試験法改良・検証。

3.1.2.2 最終成果

炭素鋼、低合金鋼、ステンレス鋼の LDI の限界流速、液滴径、衝突角度などの影響について明らかになり、これにより LDI の定量的評価が可能になる。またそ

のメカニズムについても液滴の機械的作用による疲労破壊に基づく減肉現象との見通しが得られた。なお、本研究では減肉規格に基づき、LDI の潜伏、発生、進展（潜伏期・加速期・速度期）を中心に評価した。

具体的成果は以下の２項に集約される。

a.LDI 配管減肉メカニズム検証データの整備

本項の要点は以下の通りである。

(1)液滴衝撃エロージョンとキャビテーションエロージョンの損傷過程の類似性の確認

低炭素鋼 S15C，合金鋼 STPA24 およびステンレス鋼 SUS304 の液滴衝撃エロージョンとキャビテーション・エロージョンの最大損傷深さ（MaxDE）の変化を測定した。その結果、ともに損傷潜伏期を経過した後、損傷深さが直線的に増大する最大速度期に至るという類似性を示した（図 3.1.2-1 参照）。

(2)液体衝撃エロージョンとキャビテーション・エロージョンの損傷速度における相関性確認

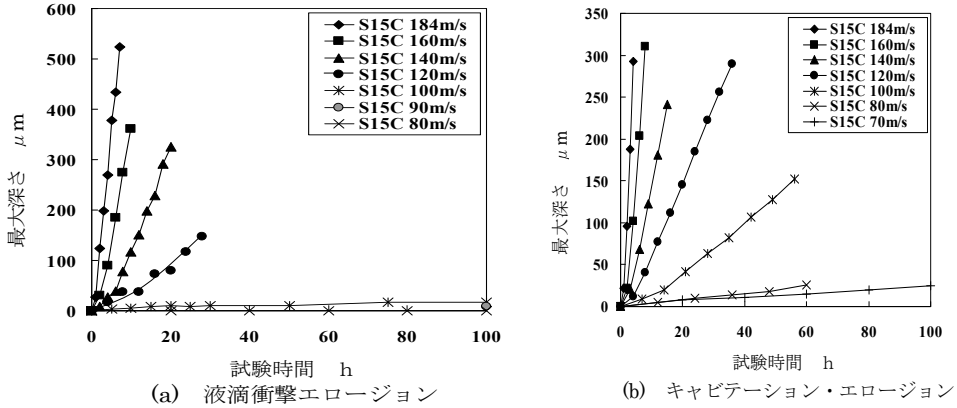
この相関性に関する知見は、これまで鋳鉄、アルミ合金，銅合金の一部に限られていたが､本研究では低炭素鋼 S15C､合金鋼 STPA24､ステンレス鋼 SUS304 について実験を行い、これらの材料についても非常によい相関性があることが明らかになった（図 3.1.2-2 参照）。

(3)液滴衝撃エロージョンの減肉メカニズムの確認

エロージョンは，液体衝撃の繰返し作用によって結晶粒内で塑性変形が発生し、粒界近傍で盛上りが生じて，き裂が発生・進行することを見出した。

(4)酸化皮膜の剥離強度の確認

S15C 炭素鋼酸化被膜材について、脱気水中および非脱気水中での、150℃ 100 時間および 250℃100 時間の酸化皮膜材の電子顕微鏡観察の結果、いずれの場合も流速 80m/s では皮膜剥離が発生しないことを見出した。



(a) 液滴衝撃エロージョン　　(b) キャビテーション・エロージョン

図 3.1.2-1　S15C 炭素鋼の最大損傷深さの経時変化

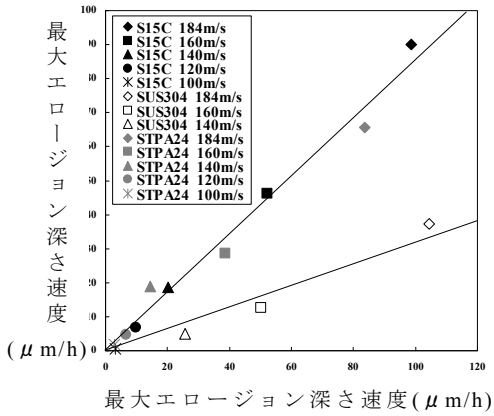


図 3.1.2-2
液滴衝撃エロージョンと
キャビテーション・エロージョン
の関係

b. LDI 配管減肉メカニズムに基づく予測・評価法の改良提案

配管壁面の液滴衝撃エロージョンに影響を及ぼす主な因子である、流速、材質、液滴径、衝突角度について実験を行い、以下の諸点を明らかにした.

(1)流速依存性の確認

液滴衝撃エロージョンに最も影響する因子であり、低炭素鋼 S15C は 6.1 乗、合金鋼 STPA24 は流速の 6.0 乗、ステンレス鋼 SUS304 は流速の 7.4 乗に比例することを見出した（図 3.1.2-3 参照)。

(2)材質依存性の確認

腐食が影響しない場合の単位時間当りのエロージョン深さの変化は、材料の硬さに依存することを見出した。また、S15C と STPA24 の下限界流速はそれぞれ 80m/s、90m/s で、SUS304 の下限界流速は 120m/s となった。

(3)液滴径依存性の確認

Heymann が 10 研究機関での共通試験結果を基に求めた、合理的エロージョン速度（単位時間当たりの体積減少量/単位時間当たりの衝突流量）の予測式を基に、液滴 1 個の衝突に対する体積減少量の予測式を構築した。その場合の液滴径依存項の指数は 3.67 となったが、今回より広い液滴径（80μm～3000μm）で改めて行った実験により求めた指数が約 4.7 となった（図 3.1.2-4 参照)。

(4)衝突角度依存性の確認

本件については研究実績がほとんど無いため実施した。その結果、噴流によるエロージョンでは、流速の法線方向成分で評価すると低角度において加速する現象が認められ、液滴でも液膜の薄い条件下では流速の法線方向成分で整理できることを明らかにした（図 3.1.2-5 参照)。

(5)配管減肉メカニズムに基づく予測・評価法の改良提案

以上の結果を踏まえた、流速、材質、液滴径および衝突角度を考慮した、液滴 1 個当りの体積減少量(A)予測式は下記の通りである。

[炭素鋼鋼管の場合]

$$\log(A)=4.84\log(V\sin\theta)-\log(NER)+4.67\log(d)-12.4$$

[ステンレス鋼の場合]

$$\log(A)=6.4\log(V\sin\theta)-\log(NER)+4.67\log(d)-15.9$$

ここに、V：衝突速度、θ：液滴の衝突方向と衝突面のなす角、

NER：材料抵抗係数（S15C 0.28、合金鋼 0.44、ステンレス鋼 1.00）、

d：液滴径

である。

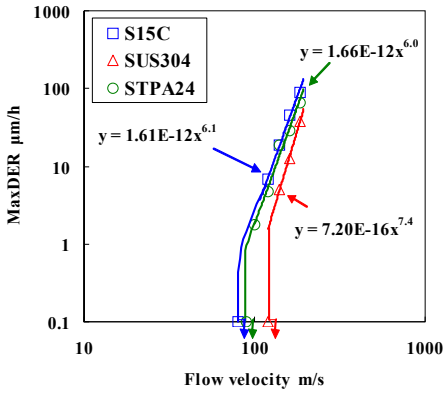


図 3.1.2-3 流速と最大エロージョン深さ速度の関係

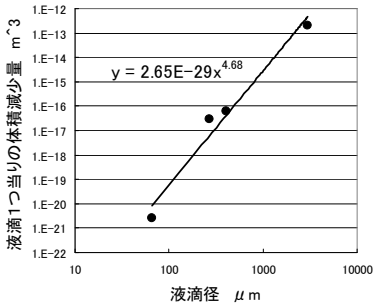


図 3.1.2-4 液滴衝撃エロージョンでの液滴1個当たりの体積減少量の液滴径依存性

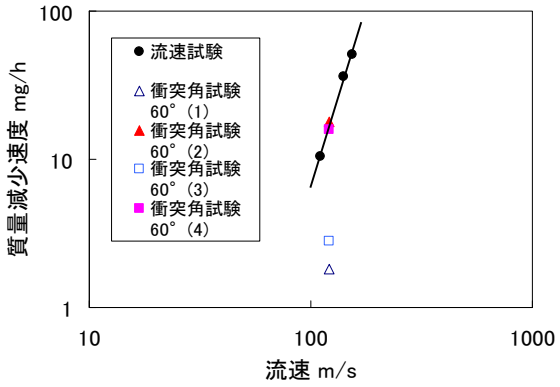


図 3.1.2-5
液滴衝撃エロージョンでの
質量減少速度の法線流速依存性

3.1.2.3 成果の反映先

本事業成果は、日本機械学会発電用設備規格：配管減肉管理に関する規格 JSME S CA-1 の参考資料「配管減肉に関する技術的知見の現状」への諸成果反映に際しての基礎データ、および国が検証する際のデータとして活用できる。なお、上記参考資料の対応箇所は下記の通りである。

3．エロージョン

3.1 液滴衝撃エロージョン

3.1.3 影響パラメータ

3.1.4 液滴衝撃エロージョンの予測法

3.1.3 減肉配管の破壊モード評価法の高度化

3.1.3.1 実施内容

海外の高経年化原子力発電プラントでの局部（溝状）減肉現象等の新たな知見等の最新データを踏まえた評価手法の精緻化、さらには、平成 19 年 7 月に発生した中越沖地震での実機性能実績を踏まえた現行弾性設計が持つ強度余裕の定量的説明要求等に鑑み、様々な減肉形状を有する配管について、減肉配管の限界強度に対する余裕を以下の視点から明らかにするため、曲げ荷重下の配管の破壊モードに与える影響の確認実験と数値解析を行った。

(1) 減肉の平面形状を考慮することによる余裕

(2) 限界荷重到達時に割れないことによる余裕

(3) FEA と対応する損傷基準の持つ余裕

(4) 加工に起因する余裕

その結果を基に、①破壊モードと強度を考慮した、すべての減肉欠陥に適用できる新しい破裂内圧評価式②全ての減肉欠陥（肉厚、軸･周方向減肉）に適用できる減肉直管の内圧+曲げ評価について限界曲げ荷重評価式の検討を行った。あわせて、エルボ管での面外曲げ荷重の影響の実験的評価を行い、評価式の減肉エルボ管への適用に向けても検討した。なお、本研究の実施経緯の概要は以下の通りである。

平成 18 年度 : 減肉配管の破壊モード評価法に係る最新の研究動向調査、および配管内圧破裂試験と解析による破断形態の減肉部長さによる変化の検討。

平成 19 年度:周方向一様減肉配管内圧破裂試験とＦＥＭ解析の比較による高度評価法検討ならびに周方向不均一減肉配管およびエルボ管の内圧破裂予備試験。

平成 20 年度:配管試験体の曲げ荷重下での実験的強度評価と平面状欠陥と非平面状欠陥との境界の明確化、および配管試験体の曲げ荷重下での強度の実測結果の解析的検証。

平成 21 年度：配管試験体の曲げ荷重下での強度の実験的評価および解析評価（溶接線上の溝状減肉、正方減肉)。これまでの結果を踏まえた、新破裂内圧評価式、限界曲げ荷重到達時の割れ発生予測法、ならびに FEA 結果を用いた損傷評価基準の提案（直管内圧、内圧＋曲げ)。

平成 22 年度:実験と解析評価を基にした減肉直管内圧下限曲げ荷重評価式の提案、およびエルボ管での面外曲げ荷重の影響の実験的評価と評価式の適用のための検討。

3.1.3.2 最終成果

前項で示した(1)～(4)の検討過程で得られた成果はそれぞれ下記の通りである。

(1) すべての減肉欠陥（軸・周き裂、軸・周方向に長い減肉）に適用できる減

肉直管限界強度評価式を提示（直管内圧、内圧+曲げ）

(2) 限界曲げ荷重到達時の割れ発生予測法を提案

(3) FEA 結果を用いた損傷評価基準を提案（直管内圧、内圧+曲げ）

(4) 加工硬化，製作寸法の影響をエルボについて評価

また、減肉寸法(減肉長さ、減肉幅)と破壊モード(軸、周方向割れ)との関係および強度を破壊評価試験に基づき明確にし、解析による平面状・非平面状欠陥両者に適用可能な局部減肉破壊評価式を提示した。これによって（独）原子力安全基盤機構(JNES)にて実施されている高経年化技術評価において、より良い精度での減肉配管の健全性評価が可能となる。なお、本研究では直管形状であるオリフィスを中心に検証を行った。具体的成果は以下の３項に集約される。

a. 直管の平面状/非平面状欠陥に適用可能な破裂内圧式の提案

き裂を含む溝状減肉（平面状欠陥）といわゆる減肉（非平面状欠陥）の破壊モードを考慮し、アスペクト比（減肉部の管軸方向長さδ_zと周方向長さ(θR_m) の比：$\delta_z/(\theta R_m)$）を指標として、

$\delta_z/(\theta R_m) \leq 0.15$ ：周方向き裂、$0.15 < \delta_z/(\theta R_m) \leq 0.75$ ：周方向減肉、

$\delta_z/(\theta R_m) > 0.75$ ：正方形状減肉、軸方向減肉、軸方向き裂

の仕分けを行い、これらすべての減肉欠陥に適用可能な直管破裂内圧式として下式を提案した。

$$p_{fFU} = \frac{2t_1}{\sqrt{3}R_m}\sigma_f \cdot f\left(\Theta = \frac{\theta}{2\pi}, \Delta = \frac{\delta_z}{\sqrt{R_m t}}\right) \text{。}$$

なお、 $f(\Theta,\Delta) = \left(\sum_{i=0}^{3} a_i \Theta^i\right) \cdot \left(\sum_{j=0}^{3} b_j \Delta^j\right)$ で、上記仕分け区分毎に定義。

b. 直管の平面状/非平面状欠陥に適用可能な限界曲げ荷重評価式の提案

き裂を含む溝状減肉（平面状欠陥）といわゆる減肉（非平面状欠陥）の破壊モードを考慮し、前項で示したアスペクト比（$\delta_z/(\theta R_m)$）を指標として、

$\delta_z/(\theta R_m) \leq 0.25$ ：周方向き裂、　$\delta_z/(\theta R_m) > 0.75$ ：周方向減肉

の仕分けを行い、これらすべての減肉欠陥に適用可能な限界曲げ荷重評価式として下式を提案した。

$$M_{cFU} = 4\sigma_f R_m^2 t_1 \cdot g\left(\Theta = \frac{\theta}{2\pi}, \Delta = \frac{\delta_z}{\sqrt{R_m t}}\right)$$

なお、$g\left(\Theta=\frac{\theta}{2\pi},\Delta=\frac{\delta_z}{\sqrt{R_m t}}\right)=\left(\sum_{i=0}^{3}a_i\Theta^i\right)\cdot\left(\sum_{j=0}^{3}b_j\Delta^j\right)$で、上記仕分け区分毎に定義。

この成果の特色は、過去 Han らの破壊モードを常に崩壊であるとした解析で示した、き裂式を減肉に適用する場合には非保守側であると読める結果が間違いであることを実験により確認し、き裂の保守性が担保されるのはき裂的挙動を示す $\delta_z/(\theta R_m) \leq 0.25$ の場合であり、アスペクト比（$\delta_z/(\theta R_m)$）が十分に大きくなるとき裂の保守性がほとんどなくなることを確認し（図 3.1.3-1 参照）、減肉形状（そして破壊モード）によらず適用可能な式を得た点にある。

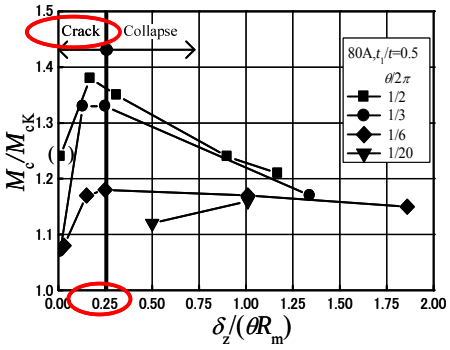


図 3.1.3-1
限界曲げ加重と減肉欠陥の
アスペクト比（$\delta_z/(\theta R_m)$）依存性

c. 有限要素解析結果に適用可能な直管の限界曲げ荷重評価基準の提案

割れと崩壊という破壊モードを予測可能とした上での、有限要素解析結果に適用可能な直管の限界曲げ荷重評価基準（DCC: Domain Collapse Criterion）の提案である。この DCC は、減肉の有無に関わらず、またき裂であっても、公称肉厚部が全領域に渡って降伏したときに限界曲げ荷重に達すると評価する基準で、応力値以外に領域を考慮するところに特色がある。具体的には、塑性域の広がり方に着目した検討を行うと、実験で限界曲げ荷重に到達する時点では、崩壊、割れの破壊モードによらず、公称肉厚部（減肉のない部分）が全領域にて降伏していることが確認できている。また、解析で予測されるこの限界曲げ荷重 M^{FEA} と実験値 M^{EXP} を比較すると、両者の差は 20%程度（解析値が過大）であり、アスペクト比によらず同程度の精度が得られている（図 3.1.2-2 参照）。

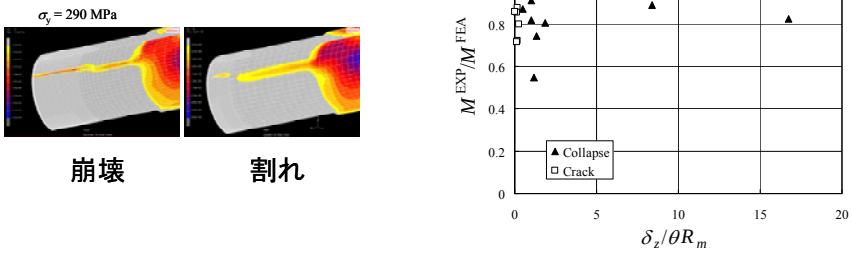


図 3.1.3-2　限界曲げ加重の予測値 M^{FEA} と実験値 F^{EXP} の比のアスペクト比依存性

3.1.3.3 成果の反映先

本事業成果は､以下の減肉関連の規格類への諸成果反映に際しての基礎データ、および国が検証する際のデータとして活用できる。

・日本機械学会発電用設備規格　配管減肉管理に関する規格　JSME S CA1 C-1430 評価の C-1431 評価方法。

・原子力安全基盤機構　高経年化技術評価審査マニュアル-耐震安全性評価 JNES‐SS‐0513‐02。

ただし、c.項は後者のみである。

3.1.4 配管減肉の定量評価法の有効性検証

3.1.4.1 実施内容

FAC と LDI を視野に漸増減肉欠陥を導入した試験体に対して、減肉の検出性能を直管とエルボ管において評価した。また、実機での欠陥形状に対するガイド波の検出特性の知見を蓄積した。さらに、多重反射エネルギー閉じ込め法による高感度での減肉検出性の評価、欠陥形状とガイド波の検出感度の関係の実験的調査とその科学的合理的なモデルによる検証を行った。あわせて、電磁超音波(EMAT)を用いた局所モニタリングの有効性検証のための実験および解析による調査を行った。また、オリフィス下流直下 FAC を模擬した試験体に対する複数の EMAT センサによる減肉寸法計測要領の有効性を検証した。これらを基に、ガイド波と EMAT の統合化による欠陥寸法計測の高度化検討を行った。さらに、計測実験で収集したデータを基に、配管減肉寸法予測法を検討し、減肉進展予測コードを改良整備し、運転中モニタリング法を検証した。なお、本研究の実施経緯の概要は以下の通りである。

平成 18 年度：EMAT プラントオンライン診断システムの開発（要素技術検討および検査シミュレータ構築)、実機適用 EMAT センサの開発（設計・試作)、ガイド波を用いた広域モニタリングセンサの開発（設計・試作)、磁わい式センサによる検出性能評価、ならびに反射体を利用した感度向上法の検証。

平成 19 年度:減肉サイジングの性能向上のための検査シミュレータおよび検査法の改良検討（実験・解析および調査)、多チャンネルガイド波センサの設計製作、ならびに漸増減肉の検出による広域モニタリング手法の検証。

平成 20 年度:ガイド波検査シミュレータを用いた最適な計測原理の解明に向けた基盤整備、サイジング精度向上のための検査シミュレータの改良、欠陥形状による検出性能の検証ならびに多重反射エネルギー閉じ込め法の提案と検証。

平成 21 年度：ガイド波検査シミュレータによる配管減肉の検出精度高度化、ガイド波/EMAT 組合せ減肉監視検査技術最適化課題検討（含実機現場計測)、エ

ルボ先の減肉に対する検出性能評価の検証ならびに実配管による評価検証。

平成 22 年度：配管内外減肉による検出性能評価の検証、エルボ配管における検出性能評価の検証、ノイズ低減手法の適用性評価実験、および EMAT/ガイド波組合減肉監視検査システム検証用データの整備。

3.1.4.2 最終成果

ガイド波に関しては、減肉発生のある領域を広範囲に一度に抜けなく測定し、減肉状況を把握できる技術を確立した。これにより超音波厚さ測定の実施範囲の絞り込みができ、効果的な管理が可能となる。また科学的合理的な検出性能の見積もりを行うことで、減肉形状の概略を推定できることを確認した。

EMAT により既存の超音波探傷試験（UT）並みの精度が得られることを検証した。さらに、ガイド波による超音波厚さ測定結果とシミュレーションによる減肉進展予測評価に基づき、EMAT の最適配置を決定し、運転中高温状態でのオンラインモニタリングによる減肉管理を実施可能とする技術基盤を整備できた。

なお、これまでの研究では、ガイド波については口径 50A の直管とエルボ管での有効性確認を、EMAT の検証は主としてオリフィス下流部での軸･周方向減肉の測定の可能性を対象としている。

具体的成果は以下の 6 項に集約される。

a. 世界的 2 方式によるガイド波手法の有効性検証

配管を広い範囲で漏れなく計測モニタリングできるガイド波手法で、配管の周方向に巻いて設置するリング型センサとして、世界的に用いられている圧電型リングセンサと磁わい型リングセンサについて、人工減肉の漸増試験を実施し検出振幅値を得ることで、2 方式に本質的差異が無く配管減肉を効率良く定量的に検出できることを明らかにした（図 3.1.4-1 参照）。これを基に、これらの 2 方式の基本的な利用方法は、民間規格として 2010 年 5 月に日本非破壊検査協会規格 NDIS2427 に反映された。さらに２つのガイド波手法に反射体を利用することで、簡便に送受信感度合計で 3 倍以上に向上でき、現場適用性を向上できることも明らかにした（図 3.1.4-1 参照）。また、実用性向上のため、エルボ管やティー管でのガイド波の伝搬挙動の解明や減肉検出性能の検証も実施し、直管の場合と同程度以上の検出感度を有していることを明らかにした。一方、減肉形状に対するガイド波の検出感度を明らかに出来、欠陥形状の概要把握のためのガイド波の適用性を数学モデルを用いて合理的に見積もることを概ね可能とし、広い周波数範囲でガイド波の検出信号を検知することで、減肉の軸方向の広がりと残存肉厚の見積もりが出来る手法を確立した（図 3.1.4-2 参照）。

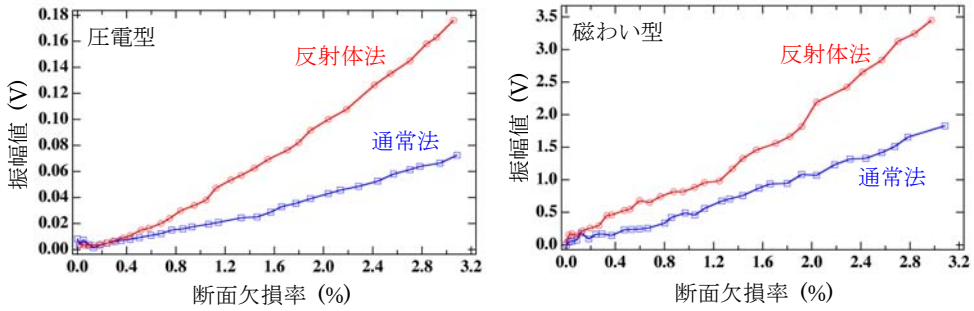


図 3.1.4-1 世界的２方式での断面欠損率と検出信号振幅の関係

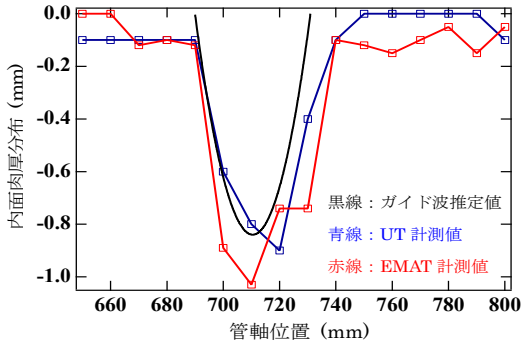
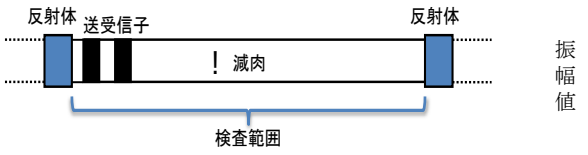


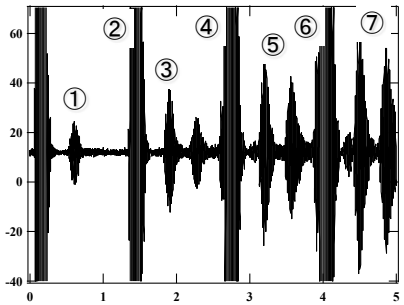
図 3.1.4-2
ガイド波の肉圧信号振幅値よる
推定減肉形状と実測減肉形状の比較
（ガイドの周波数帯域は 30kHz～50kHz）

b. ガイド波多重反射エネルギー閉じ込め法の検証

配管減肉管理に関する技術規格 JSME S NH1-2006 および JSME S NG1-2006 で通常検査部位に指定された範囲を高感度に漏れなく計測することを念頭に置いた技術として、配管を広い範囲で漏れなく計測モニタリングできるガイド波手法で、計測感度を大幅に向上できるガイド波多重反射エネルギー閉じ込め法を提案検証した。この方式は、２つの反射体を配管に設置し、これらに挟まれた部分にガイド波を伝搬・多重反射させるものである（図 3.1.4-3 参照）。これにより計測範囲内で多重反射が観測され、計測可能範囲は数メートル程度に限定されるが、多重反射回数の上昇に従って欠陥信号の振幅値が上昇し、直管で検出感度が約 5.5 倍、エルボ管では約 1.5 倍に向上することを確認し、この方法により効率的な計測が可能であることを明らかにした。なお、通常のガイド波計測で断面欠損率 1.18% 以上から検出可能な場合でも、多重反射エネルギー閉じ込め法を用いると、0.44% 程度から検出可能であることも明らかにした。



a.概念図



b.反射体反射信号（偶数）と
減肉部反射信号（奇数）

図 3.1.4-3 ガイド波多重反射エネルギー閉込め法の概要

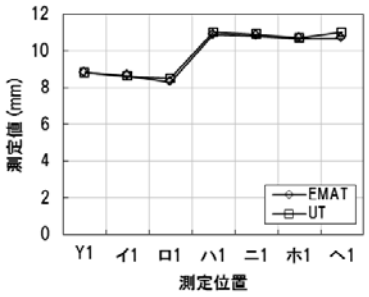
c. ガイド波によるエルボ管における減肉欠陥の検出性能評価

実機適用範囲の向上を目指し、エルボ管におけるガイド波の検出性能の検証を行った。エルボ配管では、2 本の溶接線とエルボを原因とする不要信号が発生し，直管に比べ検出が困難になるが、過去のデータとの差分計測の実施により、溶接線近傍の減肉でも、直管に比べ感度は 1/4-1/5 に減少するものの、検出が十分に可能であることを明らかにした。本研究成果から、エルボ管に限らず、種々の配管複雑部位でのガイド波の現場適用においては、差分計測が欠かせない方法であることが明らかになった。

さらに配管減肉管理に関する技術規格 JSME S NH1-2006 および JSME S NG1-2006 におけるエルボの通常検査部位に導入した減肉欠陥の詳細検出実験により、検出感度はガイド波の周波数と減肉位置により変化することを詳細に明らかにした。例えば、50A 配管では、30 kHz ではエルボ腹側の減肉を高感度に検出する一方、50 kHz ではエルボ背側が高感度となる。このことから、ガイド波法では、周波数を変更することにより、エルボの部位別に高感度に減肉が検出可能であることが明らかになった。

d. EMAT による配管減肉定点監視法性能評価

プラントの高経年化を踏まえ、配管減肉の状態監視を断熱材下に常時配置した EMAT で行うことの有効性を、圧電素子型の超音波厚さ測定器との比較や、配管減肉特有の減肉面から検証した。具体的には、超音波厚さ測定器と同等の厚さ測定分解能 0.1mm 以下を適切な測定時間で実現するための測定方法、信号処理方法を提案し、これが実現できるとを確認した。また、EMAT 固有の周波数帯域を積極的に利用することで、測定時間を数十分の 1 にすることを可能とし、同期検波技術を活用することで、UT と同程度の厚さ測定分解能を実現することを可能とした。さらに、流れ加速型腐食については減肉形状や減肉面の鱗片模様について注意を払う必要が考えられるため、様々な減肉形状を模擬した試験体に対する、シミュレーション解析と実験から、測定可能な減肉形状と EMAT の形状に相関があることを確認した。また、実機火力プラントにおける EMAT による配管減肉の測定から、超音波厚さ測定器と同等の評価が可能であることを確認した(図 3.1.4-4 参照)。以上の知見から、EMAT によるオリフィス下流の定点監視法は、現在使用されている超音波技術と同等の測定精度を有することが確認できた。



a.測定箇所　　b.測定結果

図 3.1.4-4　オリフィス下流の測定点での EMAT による測定

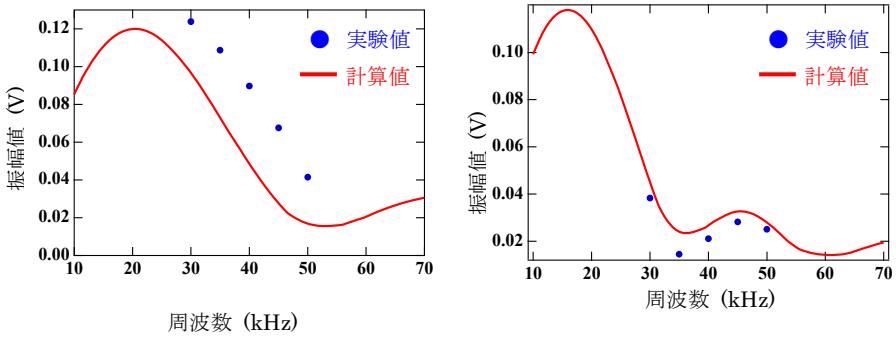
e. 減肉進展予測評価を導入した配管減肉運転中モニタリング法提案

減肉進展予測コードを整備し、ガイド波および EMAT 運転中モニタリングの組み合わせによる検査の迅速化・最適化のための技術情報のデータベースを構築した。現在供用されている配管減肉予測コードとして公開されている Kasthner の予測式は系統条件に起因した配管内の偏流効果や減肉面粗さによる減肉の局所的な進展に対応できていない。そこで EMAT による連続定点監視にもとづく配管厚さ測定データにより Kasthner の予測式に含まれる形状ファクターの分布をカルマンフィルタにより推定する手法を提案し、その有効性を検証した。EMAT による運転中モニタリングでは代表点測定となることから、現状実施される定検時の全数検査を補完することを目的として、統計的手法による減肉寸法予測法を検討した。これらの計算法は EMAT 運転中モニタリングの測定代表点選定法やガイド波の広中域モニタリングの検査対象箇所の選定に有効に利用できると考えられる。

f. EMAT/ガイド波統合減肉監視システムの検証

広い範囲を高速で必要に応じて詳細に計測するため、ガイド波を用いて配管の広い範囲で漏れなくスクリーニングし検査範囲を絞り込んだ後に、EMAT による詳細な板厚計測を行うという、EMAT/ガイド波統合監視システムを構築し、その有効性の検証を行った。

まず、ガイド波による減肉計測の合理性確認を行った。具体的には、模擬 FAC を導入した配管で、ガイド波と EMAT による計測を行い、30 kHz から 50 kHz の範囲の周波数を用いてガイド波計測を行い、検出可能性を確認した。また、得られた振幅値が理論推定に近いことを確認し（図 3.1.4-5 参照)、このシステムでのガイド波計測の合理性を明らかにした。



a.開口幅 30mm 深さ 1mm　　b. 開口幅 60mm 深さ 1mm

図 3.1.4-5 周波数別の振幅値の実験値と理論計算値との比較例（全周減肉の場合）

次に、減肉寸法計測法の有効性検証として、本研究で構築したガイド波シミュレータによる減肉領域解析と実験により、監視対象の絞り込みの有効性を検証した。あわせて、シミュレータを用いたシミュレーション実験により、配管表面の励起信号からの反射波形を解析することで、軸方向減肉位置および減肉幅の検出性能を確認した（図 3.1.4-6 参照）。また、パラメータの異なる 9 体の試験体を用いた複数 EMAT による定点寸法計測により、EMAT の定点は位置のための配置点数および配置方法に関するデータベースを構築した。

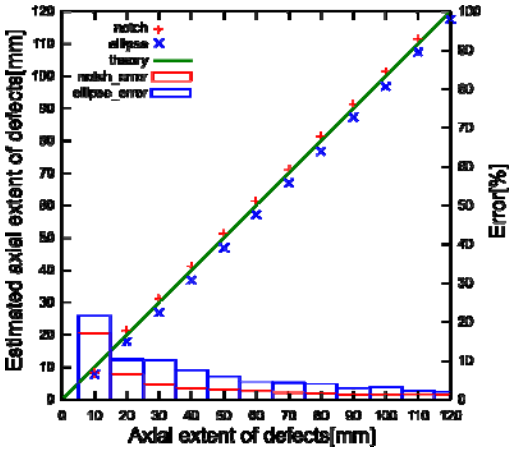


図 3.1.4-6 軸方向減肉幅検出精度

（横軸：実際の値、縦軸：左・評価値、右・誤差）

3.1.4.3 成果の反映先

本事業の成果のうち、ガイド波の基本計測手法に関する事項は、既に日本非破壊検査協会において、NDIS2427 規格「ガイド波を用いたパルス反射法による探傷試験方法通則」(H22 年度版)に反映された。また、減肉の定量やエルボ等複雑形状部への適用や新たなガイド波法の適用が有効とされる手法に関する成果は、以下の規格を含む、関連諸規格への反映に際しての基礎データ、および国が検証する際のデータとして活用できる。

・日本機械学会 発電用原子力設備規格 配管減肉管理に関する技術規格

(PWR) JSME S NG1 の CA-2000 試験の CA-2100 試験方法の(１) 超音波厚さ測定方法による場合。

・日本機械学会 発電用原子力設備規格 配管減肉管理に関する技術規格 (BWR) JSME S NH1 の CA-2000 試験の CA-2100 試験方法の(１) 超音波厚さ測定方法による場合。

3.2 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

高経年化原子力プラントの検査･診断技術の高度化を図ることを目的に二つの研究を行っている。一つは原子力発電所の容器･配管の異種材料継手部に用いられているニッケル基合金溶接部に発生し得る応力腐食割れ（以下SCC）を高感度、高精度で検出、サイジングできる非破壊検査技術の妥当性の、実機を想定した試験による評価であり､今ひとつは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について､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の、熱･放射線劣化供試体を用いた評価である。

3.2.1 高調波を用いた高散乱ニッケル基合金溶接部粒界型応力腐食割れ(IGSCC)の非破壊評価法に関する研究

3.2.1.1 実施内容

SCC からの高調波を接触法および水浸法、ならびに単独および複数探触子を用いて受信･画像化することでよい精度で深さを測定できること､さらにフェーズドアレイ探触子を用いる高調波測定が可能であることを検証した。なお、本研究の実施経緯の概要は以下の通りである。

平成 18 年度:単独探触子を用いた水浸法による溶接部近傍の SCC の画像化試験（検出性確認：水浸法、SUS316 平板)、き裂面剛性のヒステリシスを考慮した高次高調波の理論解析と実験(ステップ 1：影響予測)、および FEM 数値波動解析による溶接部粗大結晶粒界 SCC での高調波発生解析(ステップ 1:発生メカニズム解明を考慮した測定解析のモデル化)。

平成 19 年度：単独探触子による溶接部近傍の SCC の画像化（検出特性確認：水浸法＋接触式、Ni 基合金溶接部 JNES 試験体)、き裂面剛性のヒステリシスを考慮した高次高調波の理論解析と実験(ステップ 2:特性分析)､FEM 数値波動解析による溶接部粗大結晶粒界 SCC での高調波発生解析（ステップ 2:最適入射形態の検討)、ならびにサイドバンドによる密着き裂検出(ステップ 1:板部材での検出性実証)。

平成 20 年度：単独探触子による溶接部近傍の SCC の画像化（検出特性確認：水

浸法＋接触式、Ni 基合金肉盛平板)、および単独探触子の限界確認。き裂面剛性のヒステリシスを考慮した高次高調波の理論解析と実験(ステップ 3:き裂閉口状態評価可能性確認)ならびにサイドバンドによる密着き裂検出(ステップ 2:円管での検出可能性確認)。

平成 21 年度：複数探触子によるセーフエンド模擬異種材料溶接部近傍の SCC の画像化（水浸法、接触法 Ni 基合金肉盛平板)、および高精度でのサイジングが可能であることの確認。

平成 22 年度:接触法他によるセーフエンド模擬異種材料溶接部近傍の SCC の画像化（接触法、水浸法、Ni 基合金肉盛平板)、および高精度でのサイジングが可能であることの確認。

3.2.1.2 最終成果

異種材料継手模擬平板ニッケル基合金溶接部について、SCC を従来法より良い精度で深さ測定できることを明らかにした。

具体的成果は以下の通りである。

a. ニッケル基合金溶接部粒界型応力腐食割れ(IGSCC)のサイジング精度向上

圧力容器低合金鋼と SUS316L 配管を接合するため広く使用されるインコネル 600 合金溶接部に発生する粒界型応力腐食割れ（IGSCC）の超音波探傷サイジング精度向上を目的として、管台セーフエンドおよびそれを模擬したバタリング部を持つ平板試験体に人工 IGSCC を導入し、大振幅正弦波バースト波を入射し、IGSCC からの散乱波に含まれる入射周波数の整数倍周波数を持つ高調波の振幅信号を用いて IGSCC を画像化し、その深さを切断測定値に対し 3mm 以内の誤差で測定できることを明らかにした。具体的には、JNES で製作された安全弁管台セーフエンド試験体（ブラインドテスト）では、溶接線に平行な SCC の深さを誤差３mm 以内で評価できることを確認した（図 3.2.1-1 参照)。また、上記安全弁管台および本事業で制作した異種材料継手溶接部に導入した SCC に対しては、±3mm 程度の誤差で SCC 深さを画像化し測定できることを確認した(図 3.2.1-2 参照)。ちなみに、高調波法は、従来超音波法と異なり音響インピーダンス差を利用しないので、粗大結晶粒界で発生する粒界散乱波の影響を受けないため、SCC と溶接ビード部を誤認する危険性が少ないという長所がある。また、斜角入射高調波を用いると SCC 全体像を明瞭に画像化できることや SCC 面側からの水浸高調波法でも SCC の評価が可能であることも確認した。このため、BWR 炉内構造物検査や PWR 原子炉容器ノズル溶接部の内面検査にも適用可能である。

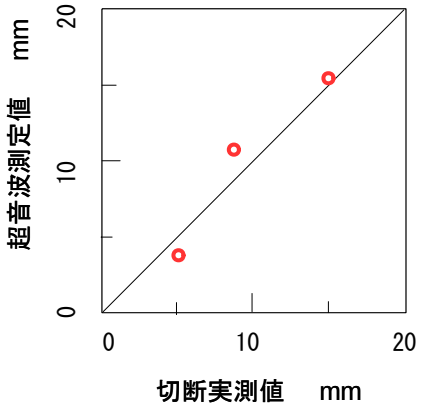


図 3.2.1-1
JNES 安全弁管台セーフエンド
Ni 基合金溶接部 SCC 深さ測定結果

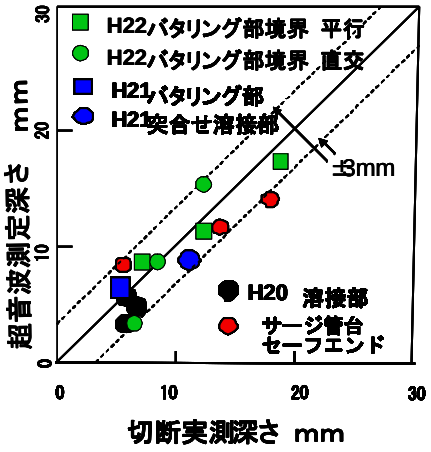


図 3.2.1-2
Ni 基合金溶接部 SCC 深さ測定結果
総合実績

3.2.1.3 成果の反映先

本事業の成果は、事業者が今後非線形超音波探傷法を開発し、供用期間中検査における超音波探傷試験規程(JEAC 4207)の付属書 A に新しい超音波探傷法として、非線形超音波探傷(高調波)法を追加記載するときに、その技術的妥当性を国が評価するためのデータとして活用できる。

3.2.2 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に関する研究

3.2.2.1 実施内容

SCC 付与試験体を用いた、検査不可能箇所を想定した探傷試験による、3 次元超音波探傷法の検出性、深さサイジング性の検証と、SCC 試験体に高温用マトリックスアレイ探触子を適用した探傷試験による、運転中モニタリング可能性の検証を実施した。なお、本研究の実施経緯の概要は以下の通りである。

平成 19 年度:2 種類のセーフエンド異材継手試験体での SCC 探傷特性を評価。

平成 20 年度:SCC 探傷特性データの拡充、現行探傷技術および先進的探傷技術手法を含めた総合評価、高温モニタリング法の検討および高温探触にかかる要素試験（探触子・シューの特性評価)。

平成 21 年度：Ni 基合金溶接部における探触不可能範囲の改善に係る人工欠陥付与試験体を用いた基礎試験（欠陥と入射波方向に着目した検出性評価）および高温継続モニタリング特性の検証（探触子・シューの性能検証)。

平成 22 年度: 3 次元超音波探触法の確証および高温継続モニタリング特性の検証（冷却を含めたシステムレベルでの検証)。

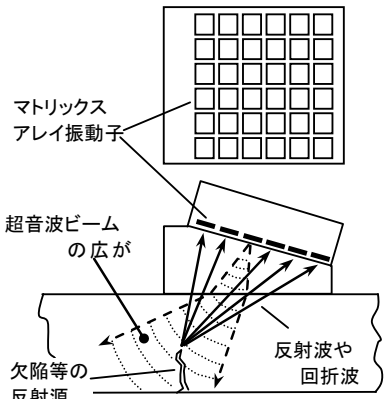
3.2.2.2 最終成果

従来法では深さサイジング不可能な箇所（溶接線直交欠陥）も深さイジング可能であることが明らかになった。また、周方向欠陥および溶接線直交欠陥は、共に従来法より良い精度で深さ測定可能であることも明らかになった。さらに、高温用マトリックスアレイ探触子を適用することにより、運転中のき裂進展モニタリングに適用可能である見通しを得た。

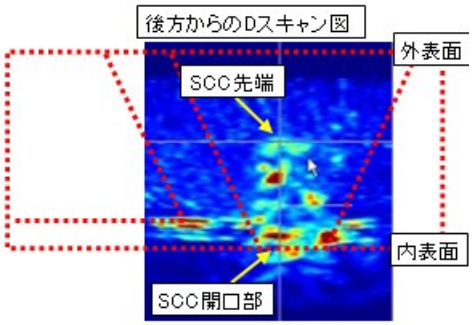
具体的成果は以下の 3 項に集約される。

a. 3 次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部 SCC サイジング技術の確立

原子力発電プラントにおける、セーフエンド異材継手・炉内構造物溶接部・圧力容器貫通部などでの容器・配管のニッケル基合金溶接部の SCC による損傷事例の増加や、この様な部位に発生する SCC の非破壊検査法として、機器・構造物の外面側からの検査が可能な超音波探傷法に対する期待は大きい。一方、ニッケル基合金溶接部の超音波探傷は、検出性および寸法評価精度に関しては、現状では未だ問題が有る事は国内外の状況から明らかである。この様な現状を打開する目的で、組織異方性に起因するノイズに効果があり、欠陥検出・寸法評価の高分解能の達成に有効と考えられる開口合成信号処理を用いた 3 次元超音波探傷技術である開口合成 3 次元超音波探傷法（図 3.2.2-1 参照）の、SCC の深さサイジングの可能性・深さサイジング精度に関し試験・評価を行い、従来探傷法や現行の斜角フェーズドアレイ探傷法の結果と比較した。その結果、現行 UT 法では SCC 深さが小さい場合は深さを測定できなかった比率が増加するのに対し、当方法では全ての場合において深さが測定できる（図 3.2.2-2 参照）ことや、周方向 SCC の場合および軸方向 SCC の場合ともに、当方法が深さ測定精度の点でも優れているという、3 次元超音波探傷技術の優位性を確認した。



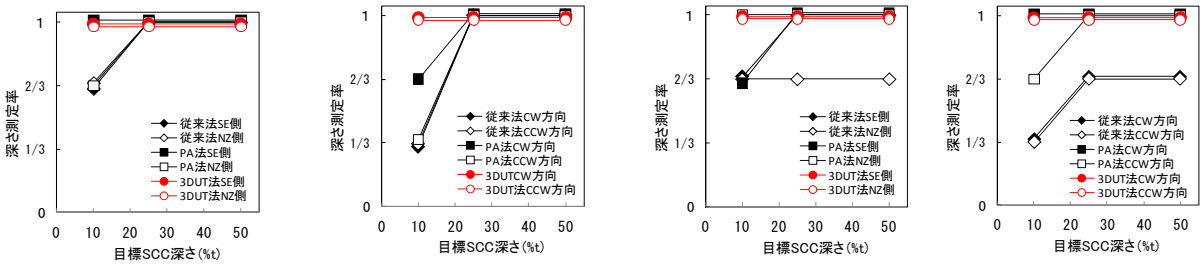
a. 原理説明図



b. 探触子走査を行わずに得られる安全弁管台試験対の軸方向 SCC 形状

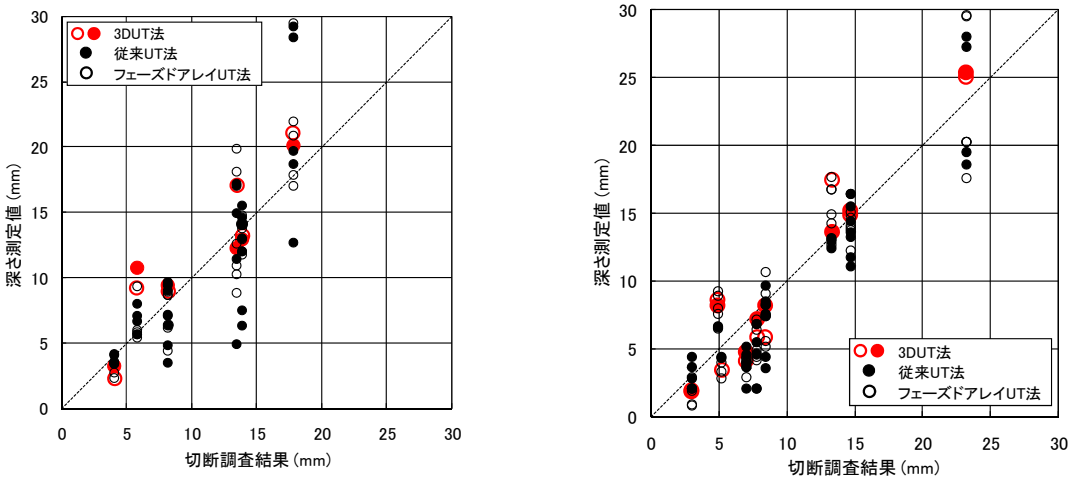
図 3.2.2-1

開口合成 3 次元超音波探傷の概要



a. 安全弁管台 周方向 SCC　b. 安全弁管台 軸方向 SCC　c. サージ管台 周方向 SCC　d. サージ管台 軸方向 SCC

図 3.2.2-2　欠陥深さ測定率に関する３次元 UT 法と現行 UT 法の比較



a.安全弁管台・サージ管台の周方向 SCC　b. 安全弁管台・サージ管台・水位計装ノズルの軸方向 SCC

図 3.2.2-3　欠陥深さ測定精度に関する３次元 UT 法と現行 UT 法の比較

b. ３次元超音波探傷法による探傷不可範囲の低減技術の検証

本研究では、「種々の方向から見たデータを用いて開口合成法による画像化を行う」と言う３次元超音波探傷法の特徴を生かして、真正面からずれた方向からでも探傷することで、Ni 基合金異材溶接部の探傷不可能範囲（図 3.2.2-4 参照）を減少させる探傷手法の検討と検証試験を行った。その結果、例えば開口部長さ 25mm・最大深さ 15mm の EDM 欠陥に対して、45° 等距離走査の場合は、長さサイジングは真正面から±約 30° まで（図 3.2.2-5 参照）、深さサイジングは真正面から±約 60° の範囲で正確に行われることが判った。また、SCC 付与試験片に対して同様の試験を行った結果、長さサイジングに関しては-40° ～40° 程度の範囲、また深さサイジングに関しては、90° 程度の範囲でほぼ正しい値が得られることも明らかになった。

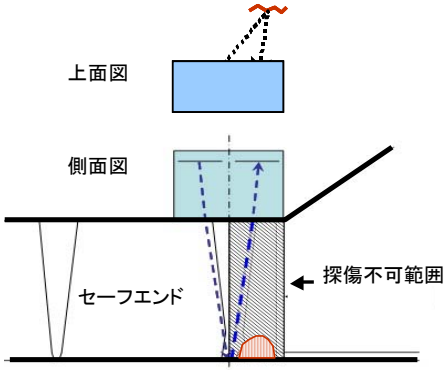


図 3.2.2-4
構造上の接近困難性による
探傷不可能範囲の概念

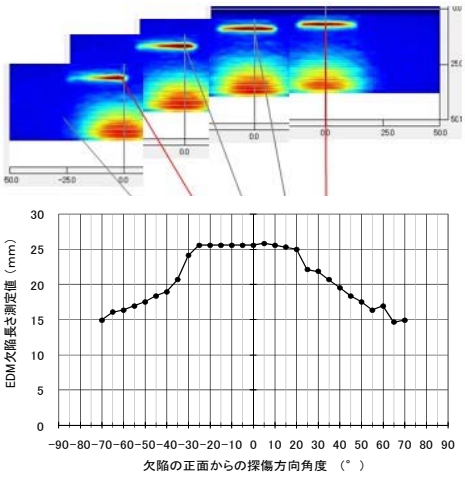


図 3.2.2-5
斜め方向からの欠陥検出画像と
長さサイジング性

c. 運転中における定点・継続高温モニタリングへの適用性評価

3 次元超音波探傷法は、ある程度の肉厚構造物であれば、SCC 発生が多く報告されている溶接線直交欠陥の全体を、探触子を走査せずに欠陥の形状等を画像化できる特徴を有している。 この特徴を生かして、SCC が検出され、次回定検や補修実施までの比較的短時間の高温・定点継続監視が必要となる場合を想定し、高温用マトリックスアレイ探触子の開発・試作を行った。その結果、例えば 200℃に加熱された SCC 付与試験体において、妨害エコーのマスク処理後であるが SCC 開口部と先端部の B スキャン像における画像化と D スキャン像における SCC 形状の映像化を行うことができ、分解能向上の課題も明らかになった。また、300℃の電気炉の中でも EDM 欠陥試験体に強固に取り付けた上記の高温用 45° 斜角探触子による探傷試験を行い、常温の場合と変化のない画像化結果を得ることができる事が明らかになった。

3.2.2.3 成果の反映先

本事業の成果は、事業者が今後、3 次元超音波探傷法を開発し、（社）日本電気協会電気技術規定「軽水炉原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程(JEAC 4207)」の付属書 A に新しい超音波探傷法として、これを追加記載するときに、その技術的妥当性を国が評価するためのデータとして活用できる。また、事業者が 3 次元超音波探傷法を運転中モニタリングとして使用するときや探傷不可範囲に対処するために使用するときに、その技術的妥当性を国が評価するためのデータとして活用できる。

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

3.2.3.1 実施内容

マイクロ波誘電吸収測定法により、ケーブルの電気的特性（誘電率変化）を精度良く測定し、ケーブルの劣化を非破壊的に検査できることを確認すると共に、精度検証データ充実のため、ポリエチレン、エチレン・ポリプロピレン（以下 EP と表記）ゴムの劣化ケーブル模擬供試体によりマイクロ波誘電吸収測定を行った。さらに、実機適用にために装置の小型軽量化を図り、精度検証を行うとともに、実機環境下での作動確認、実機材計測を行った。なお、本研究の実施経緯の概要は以下の通りである。

平成 18 年度:高分子材料への放射線照射による高分子の分子構造変化検出装置の開発（X バンド:9GHz)、ならびに測定検証用供試体の製作および測定。

平成 19 年度:マイクロ波検出技術の精度確証データの拡充のための放射線照射試料作製・測定、および非破壊検査を目的としたピンホール型マイクロ波空洞検出器製作し性能確認実験。

平成 20 年度：精度向上に向けた試験装置および検出器の改良（K バンド:24GHz）し精度確証データ蓄積、および時間分解マイクロ波誘電吸収法と光過渡吸収分光法による高分子劣化寄与化学種同定。

平成 21 年度：精度向上を目的とした改良型マイクロ波空洞検出器の（Q バンド:43GHz）製作と性能確認実験、および実機適用課題調査とケーブル材料劣化過程の解明（寄与添加剤成分の同定)。

平成 22 年度：マイクロ波誘電吸収測定による劣化測定精度検証データの充実、改良型マイクロ波空洞検出器（Q バンド:43GHz）の実機適用性検証、および高分子絶縁材料・被覆材の健全性余裕度評価法検討。

3.2.3.2 最終成果

ケーブルの絶縁材料のうちポリエチレン・EP ゴムについて、マイクロ波誘電吸収測定による非破壊検査手法の技術基盤を確立した。あわせて、ケーブル劣化の電気的特性と機械的特性の相関関係を明らかにし、実機適用性確認と劣化メカニズムとの誘電損失の関連の解明により、当検査法の技術的妥当性を検証した。

具体的成果は以下の３項に集約される。

a. マイクロ波検出技術を用いた高分子材料経年劣化の電気的特性測定技術の確立

熱や放射線による高分子材料の劣化が、酸化や架橋、分解などによる分子構造の変化に伴うもので、これによる材料の誘電率の変化を高精度で測定する手法に関し、その技術的妥当性の確認のため X-band (9GHz)マイクロ波誘電吸収測定装置（空洞共振器）の開発や測定法の改良を実施し、種々の劣化試料を用いて、共振周波数と熱劣化の進行との相関や、共振周波数の変化量と破断時の伸びとの相

関を調査した。その結果、いずれも良好な相関性を持つことが確認できた（図3.2.3-1参照）。

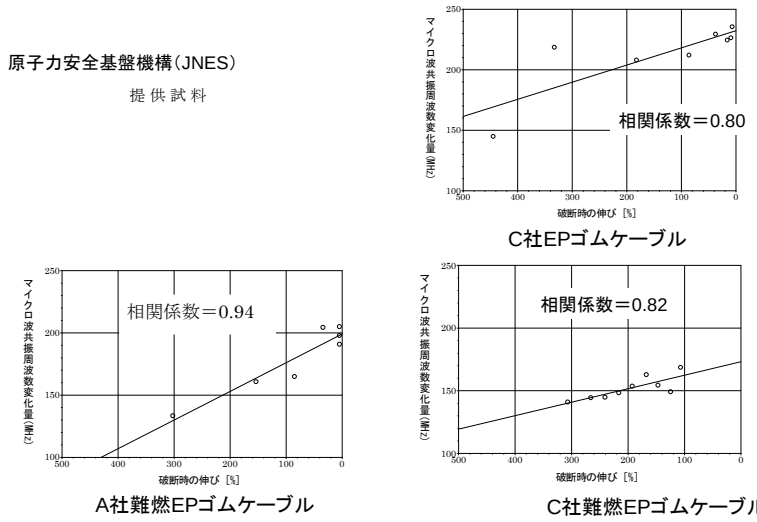


図 3.2.3-1
熱・放射線劣化 EP ゴムの共振周波数量と破断伸びとの相関

b．マイクロ波検出技術を用いたケーブルの非破壊的経年劣化測定技術の確立

X-band、K-band マイクロ波測定装置を用いて、導体を含まない熱劣化 EP ゴムケーブルを対象に測定を行い、出力電圧$^{-2}$と破断時伸びの相関係数がほぼ 1 である事を確認した。その成果を踏まえ、Q-band（43GHz）マイクロ波測定装置および接触診断形式の測定を可能とするピンホール型空洞共振器作製し、導体を含むケーブル試料に対する高精度手法としての実機適用性を検証した(図 3.2.3-2 参照)。また、実機適用に向け、ピンホール型空洞共振器の小型軽量化を行い JAEA 原子炉廃止措置研究センターおよび関西電力火力センター内において動作性の確認を行うとともに、さらなる装置の改良に向けてのデータを収集した。

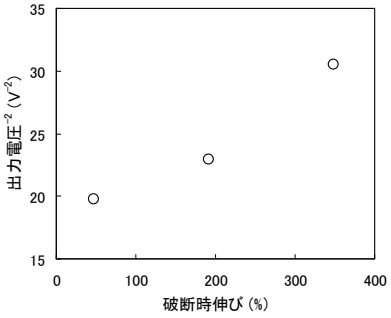


図 3.2.3-2
Q-band 測定での
JNES 難燃 EP ゴム（導体有り）の
出力電圧$^{-2}$(V^{-2})と破断時伸び

c．マイクロ波検出技術に基づく高分子材料経年劣化に係る健全性余裕度評価法の提案

計装用ケーブル被覆に用いられる高分子材料の強度・絶縁劣化とともに進行する誘電率変化と相関を持つ因子の確認を目的として、もっとも代表的な高密度ポリエチレン(HDPE)について、1GHz～35GHz に周波数範囲におけるマイクロ波誘電吸収特性を調査した結果、酸化劣化の進行に対し 9GHz 帯のマイクロ波相互作用における空洞共振周波数シフト（HDPE 材料の誘電率変化）がきわめて鋭敏な

応答を示すことが明らかとなった。このため、HDPE 中の酸化劣化構造ならびに添加物分析を詳細に行った結果、約 20 種の候補物質を選別した。これらに対し、光誘起酸化反応による分光分析・マイクロ波誘電吸収周波数シフトの同時計測を行い、HDPE 中に添加された酸化防止剤が、上記の鋭敏な応答を与えることを明らかとした（図 3.2.3-3 参照）。このことは、絶縁材中に含まれる酸化防止剤の消費に伴う誘電率変化を高感度で計測することで、HDPE 母材の酸化劣化進行に伴う劣化進行度合いの確認・予測が可能性であること、さらにはこれにより健全上の余裕評価が可能となることを示唆している。

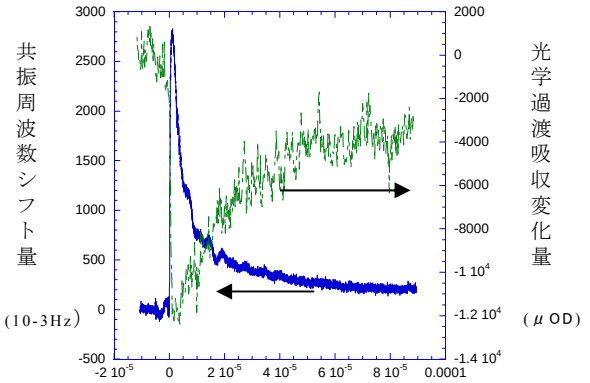


図 3.2.3-3
BP（光励起により強い酸化作用を示す酸化反応開始剤）・BHT（分析検出された HDPE 中の酸化防止剤）添加系における光学吸収とマイクロ波誘電吸収の相関

3.2.3.3 成果の反映先

本事業の成果は、事業者が今後、ケーブル劣化の非破壊検査技術を開発し、民間規格(JEAG4623、「ケーブル評価試験ガイドライン、原子力発電所の安全電気・計装品の耐環境性能の検証に関する指針」)の改訂に際し、その技術的妥当性を国が評価するためのデータとして活用できる。

3.3 溶接補修技術に関する研究

ニッケル基合金補修溶接部の健全性について、補修溶接施工条件に応じた補修部健全性評価技術を確立するとともに、補修部の再供用下における健全性に関して、耐 SCC 性の観点より評価を通して、補修後溶接部の長期使用時における健全性評価技術を確立する。さらに、補修溶接方法を実機適用した際の施工健全性を検証する。これらの結果をふまえて、ニッケル基合金溶接部の的確な劣化管理のための補修溶接指針検討のための素案を策定する。

3.3.1 溶接補修技術に関する研究

3.3.1.1 実施内容

本研究の課題は大きく分けて、補修溶接施工条件に応じた健全性評価、補修溶接部の再供用における信頼性評価および補修溶接の実機適用における施工健全性

および再供用信頼性の検証の３つである。

補修溶接施工条件に応じた健全性評価に関しては、690 合金溶接部および 690 合金／SUS316L 異材溶接部における溶接施工健全性を確保するため、微量・不純物元素の含有量に着目した溶接割れ試験を実施し、溶接施工健全性が担保できる材料的要件を明確にした。あわせて、690 合金多層盛溶接部における熱履歴および応力・ひずみ状態を明らかにし、施工健全性に及ぼす溶接施工条件の影響および施工安全裕度を定量的に評価した。補修溶接部の再供用における信頼性評価に関しては、補修後の 690 合金溶接部の耐 PWSCC 性を評価するとともに、結晶方位解析に基づき、SCC 発生と金属組織の相関について評価した。あわせて、微視的材質不均一に起因した結晶組織レベルの応力・ひずみ場を評価・確認する手法を確立するとともに、SCC 発生特性・裕度をミクロ応力に注目して評価した。また、補修溶接の実機適用における施工健全性および再供用信頼性の検証は、本研究で妥当性を実証した個々の補修プロセスを実施工に適用した際の、施工安全性と耐食安全性が担保されることの検証を目的として、補修溶接実機適用モックアップ試験を実施した。なお、本研究の課題毎の実施経緯の概要は以下の通りである。

[補修溶接施工条件に応じた健全性評価]

平成 18 年度：溶接高温割れ挙動評価および微量元素の施工条件への影響評価の実施（ステップ１：ニッケル基合金を対象)。多層盛溶接部の熱応力およびひずみ挙動解析（ステップ１：解析モデル改良)、ならびに熱ひずみ挙動評価およびミクロオーダーでの割れ解析（ステップ１：力学モデル手法調査)。

平成 19 年度：溶接高温割れ挙動評価および微量元素の施工条件への影響評価（ステップ２：ニッケル基合金/ステンレス異材溶接部を対象)、多層盛溶接部の熱応力およびひずみ挙動解析（ステップ２：高速化)、ならびに熱ひずみ挙動評価およびミクロオーダーでの割れ解析(ステップ２:解析モデル提案)。

平成 20 年度：微量元素の施工条件への影響評価（ステップ３：規制基準の明確化）およびミクロオーダーでの割れ解析（ステップ３：塑性ひずみの提案)、ならびに新たに異材溶接部の健全性評価（ステップ１：ひずみ解析）と割れ生成予測とその実験的検証（ステップ１：対応関係の検証)。

平成 21 年度：異材溶接部の健全性評価（ステップ２：規制基準の明確化)、割れ生成予測とその実験的検証（ステップ２：危険度マップ提示）を継続するとともに、新たに補修溶接に対するレーザ溶接モデル化（ステップ１：ひずみ解析)。

平成 22 年度：異材溶接部の健全性評価（ステップ３：超高純度溶加材の適用有効性)、レーザ溶接モデル化（ステップ２：危険度マップ提示)、割れ生成予測とその実験的検証(ステップ３:施工健全性の検証)を実施するとともに、

これまでの結果を踏まえて、微量元素の粒界偏析挙動を解明し、ミクロ割れ防止のための、微量元素規制基準案を策定。

[補修溶接部の再供用における信頼性評価]

平成 18 年度：マクロ残留応力解析（ステップ１：数値解析)、ミクロ応力場解析手法を確立し、SCC 発生挙動と金属組織の相関解明（ステップ１：発生評価手法調査)。

平成 19 年度：SCC 発生挙動と金属組織の相関解明研究を継続（ステップ２：加速試験法の確立）するとともに、ミクロ応力場解析（ステップ１：残留応力場評価技術の確立)。

平成 20 年度：SCC 発生挙動と金属組織の相関解明（ステップ３：結晶方位の影響明確化)、ミクロ応力場解析（ステップ２：ひずみ場解析）を実施するとともに､新たに 600/690 合金溶接部の SCC 発生とミクロ応力場の関係解明(ステップ１：応力場相関調査）および 690 合金補修部の耐 PWSCC 性評価（ステップ１：リバース U ベント試験)。

平成 21 年度：ミクロ応力場解析（ステップ３：ひずみ場解析)、600/690 合金溶接部の SCC 発生とミクロ応力場の関係解明（ステップ２：応力場解析）および 690 合金補修部の耐 PWSCC 性評価（ステップ２：耐 PWSCC 性評価)。

平成 22 年度：600/690 合金溶接部の SCC 発生とミクロ応力場の関係解明（ステップ３：最危険部位評価）および 690 合金補修部の耐 PWSCC 性評価（ステップ３：耐 PWSCC 性検証）を実施するとともに、これまでの結果を総合して、690 合金補修溶接部の耐 PWSCC 性評価と再使用時の長期信頼性評価・確認手法を確立。

[補修溶接の実機適用における施工健全性および再供用信頼性の検証]

平成 18 年度:補修実績を調査し当技術の確立の必要性の現状を確認するとともに、補修溶接対象部位および具体的技術課題を抽出。

平成 19 年度:実機プラント既適用部位および適用が予想される部位、ならびに検証の考え方を調査。

平成 20 年度:現行技術の妥当性および規制の現状を確認し、具体的適用対象箇所を選定。

平成 21 年度:再使用時の耐食安全性検証の観点から、モックアップ試験計画を策定。

平成 22 年度:再使用時の耐食安全性検証のためのモックアップ試験計画を実施し、結果を評価。あわせて、これまでの成果も含めて、補修溶接施工法の実機健全性評価方法検証への技術知見として取りまとめ。

3.3.1.2 事業の最終成果

690 合金溶接部の高温割れ発生に及ぼす不純物元素(P、S など)の影響を明確にし、不純物元素量の上限を提示した。ステンレス鋼との異材溶接において、不純物元素の固定を図るため、希土類元素(Ce)を微量添加し、高温割れを防止できる組成範囲を整理した。これらの結果に基づき、690 合金溶接部における施工健全性を担保するための微量・不純物元素の規制すべき基準を提示した。また、690 合金溶接部における延性低下温度域(DTR)塑性ひずみ指標に基づき、アークおよびレーザ溶接施工条件による施工安全性および安全裕度を評価できる方法を確立した。さらに、690 合金補修部の再供用下における耐 PWSCC 性を評価し、SCC 感受性が十分に低いことを確認した。あわせて、SCC 発生特性と金属組織およびミクロ応力の相関に着目して、補修後溶接部の再使用時の長期信頼性評価技術を確立した。また、モックアップ試験での補修溶接部の施工健全性と耐 PWSCC 性の評価を行い、実機施工健全性評価方法の妥当性を検証した。

具体的成果は以下の 3 項に集約される。

a. 補修溶接健全性技術指針の材料学的・力学的要件および施工安全裕度の評価技術の確立

高経年化 PWR プラントの溶接補修用材料として広く使用されるニッケル基 690 合金の溶接部健全性をさらに向上させるため、耐溶接割れ性の材料学的指標を明らかにした。溶接金属中の不純物元素（P,S）含有量、ならびに、割れ感受性の改善効果を有する微量添加元素（Ce）含有量と不純物元素量の関係について、溶接割れ発生挙動および機構も含めて定量的に評価した結果、溶接金属の成分範囲を以下のように制御することにより、溶接割れ感受性をさらに低減させ、溶接部の施工健全性を一層向上させることが出来る。

(1)不純物元素の低減:延性低下割れを誘発する原因となる P,S 含有量を P+1.2S ＜30ppm の範囲に制限することにより 690 合金の溶接割れの主である延性低下割れを効果的に抑制できる（図 3.3.1-1 参照)。

(2)微量添加元素の活用：溶接金属への Ce 添加量を P,S 含有量との関係で 0.22 ＜Ce/(P+S)＜1.1 の範囲に制御することにより、延性低下割れを効果的に抑制し、かつ、凝固割れや液化割れも防止できる（図 3.3.1-2 参照)。

また、溶接施工パラメータが溶接部健全性に及ぼす影響を力学的に評価し施工安全裕度について検討した結果、690 合金溶接部における溶接割れ発生の危険度に対して、力学的負荷指標として、690 合金多層盛溶接部における DTR 塑性ひずみ指標を定義し、これに基づき、溶接施工条件による施工安全性および安全裕度を評価できる方法（溶接割れ発生の危険度評価）を確立した。さらには、レーザ多層肉盛溶接部の施工健全性を力学的に評価し、レーザ溶接ではアーク溶接に比べ施工安全裕度が大きいことを示した。

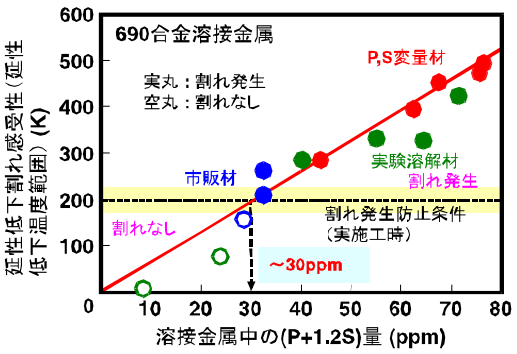


図 3.3.1-1
690 合金多層盛溶接における
溶接金属中の不純物元素量パラメータ
（P+1.2S）と延性低下割れ感受性
の関係

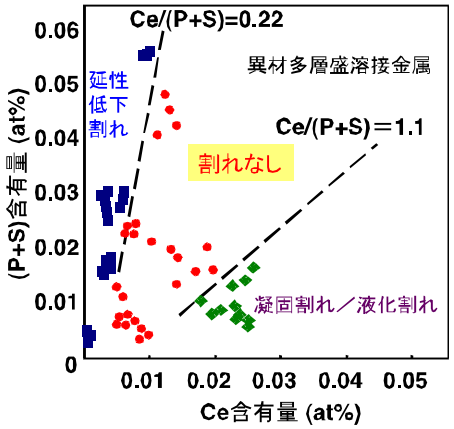


図 3.3.1-2
溶接金属中の
不純物元素（P+S）含有量、Ce 含有量
と高温割れ発生の関係

b．補修溶接部の再使用における信頼性検証評価データおよび SCC 発生予測技術の整備

各種 690 合金溶接部の耐 PWSCC 性を評価し、あわせて結晶組織オーダーの微視的材質不均質を考慮した溶接部のミクロ応力・ひずみ場解析により、SCC の発生部位と金属組織の相関性を明らかにした。これらの結果に基づき、690 合金補修溶接部において、SCC の発生が最も危惧される部位においても、SCC 発生は生じず、再使用時の補修溶接部の信頼性が担保されることを明らかにした。以下に得られた成果の要点を示す。

(1) IGSCC 加速試験法：コロイダルシリカによる化学腐食研磨処理により、SCC 発生が助長され、IGSCC 加速試験法として有効である。

(2) 耐 PWSCC 性の検証：各種 690 合金溶接部に対して、PWSCC 試験（SSRT 試験および U ベンド試験）を実施したところ、600 合金では SCC の発生が認められたが、690 合金では SCC の発生は確認されなかった（表 3.3.1-1 参照）。

(3) SCC 発生部位と金属組織の相関：600 合金溶接金属を用いた場合について、SCC 発生部位と金属組織の相関をミクロ応力場の解析により検討した結果、ミクロ応力が高い（応力集中が顕著な）粒界において、SCC 発生の頻度が高いことが明らかとなった。一方、690 合金補修溶接部においては、SCC の発生が最も危惧される部位においても、SCC 発生は生じないことが確認された。

表 3.3.1-1 各種 690 合金溶接部の PWSCC 試験結果

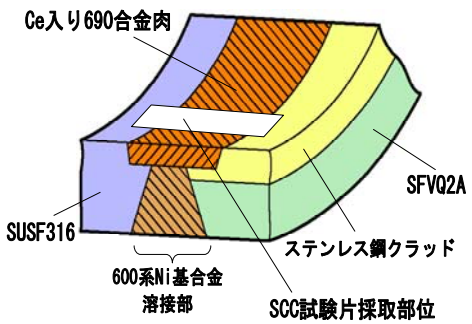
試験対象および条件	P+S (ppm)	ひずみ量	定ひずみ保持時間	IGSCC
600 合金　溶体化材，10%CW，20%CW	＜100	5%	0	発生
600 合金　溶体化材，10%CW，20%CW	＜100	10%	0	発生
600合金　溶接材	＜100	10%	50	発生
690合金　母材	＜110	10%	10, 50	発生なし
690合金　溶接材	＜110	10%	100	発生なし
超高純度690合金　母材	17	10%	100	発生なし
超高純度690合金　溶接材	17	10%	100	発生なし
690合金　Ce添加溶接材	＜70	10%	100	発生なし

c. 補修溶接の実機適用における施工健全性および再供用時の長期信頼性のモックアップ検証データの整備

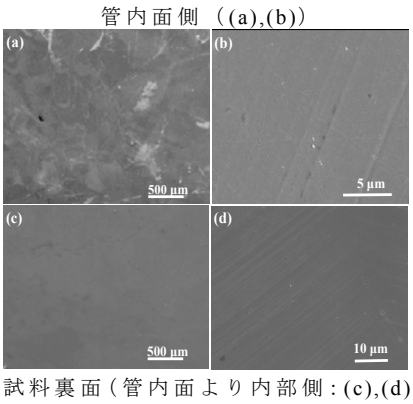
実機プラント（原子炉容器出入口管台）を模擬した４つのモックアップ試験により、耐溶接割れ性と補修溶接部の耐 PWSCC 性を評価した。その結果、下記のように、いずれのモックアップ試験体においても、溶接施工健全性と補修後再使用時の長期信頼性は確保できていることを明らかにした。なお、モックアップ試験は、690 合金による実機補修対象として、原子炉容器出入口管台を模擬した条件とした。また、施工健全性の検証の具体的内容は下記の通りである。

(1)施工健全性の検証：モックアップ試験体溶接部における施工健全性を調査した結果、溶接不良や溶接割れの発生は認められず、十分な施工健全性が得られることを明らかにした。また、モックアップ試験の溶接施工安全裕度を力学的に評価することにより、DTR 塑性ひずみ分布が明らかとなり、施工安全裕度を提示できた。

(2)補修溶接部の長期信頼性の検証:モックアップ試験体溶接部の施工健全性確認のための SSRT 試験を実施した結果、いずれも SCC の発生は確認されず、補修溶接部の施工健全性は確保できていることが明らかになった（図 3.3.1-3 参照)。



a. SCC 試験編採取部位



b. SCC 試験後の試料表面状況

図 3.3.1-3 モックアップ試験体溶接金属の SCC 試験結果

3.3.1.3 成果の反映先

本事業成果は、日本機械学会発電用原子力設備維持規格 JSME S NA1 補修章 RA-3000 補修・取替技術の適用「補修・取替えを行う場合、原則として溶接規格・設計・建設規格による。ただし、本規格の個別の補修技術を用いる場合は、この限りではない。」等への諸成果反映に際しての基礎的知見を与えるとともに、国が規制基準として技術的内容を検討・確認する際の技術的根拠を与える資料として活用できる。

3.4 主要構築物の劣化に関する研究

原子力発電所の鉄筋コンクリート構造物の耐久性を支配する鉄筋腐食に着目し、鉄筋腐食に影響を及ぼす要因およびその特性を把握し、これに基づいて鉄筋腐食に着目したコンクリート耐久性評価手法の検討を行うものである。ここでは特に、ひび割れの発生したコンクリートを対象としている。

3.4.1 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

3.4.1.1 実施内容

ひび割れの生じた鉄筋コンクリート試験体を用いた、中性化および塩分浸透に因る鉄筋腐食実験を行い、その結果を基に発生の経時的なメカニズムや塩分浸透に因る鉄筋腐食予測式を検討した。また、鉄筋の降伏強度算定式の検討も実施した。また、「ひび割れ内部への中性化進展予測式」を適用するための精緻化の一環として、風の中性化への影響を、数値流体力学(CFD) 解析により評価した。なお、本研究の実施経緯の概要は以下の通りである。

平成 18 年度 : コンクリートの品質の中性化への影響特性確認試験（中性化促進試験)。

平成 19 年度:コンクリートの品質の中性化・塩分腐食への影響特性確認試験(腐食促進試験)。

平成 20 年度：中性化特性データの精緻化試験と中性化進展特性の解析的検討(中性化予測式導出)、および自然環境曝露試験実施(ステップ１：試験体製作・設置および初年度分調査)。

平成 21 年度 : ひび割れ内塩分浸透特性確認実験、鉄筋腐食進展データの精緻化試験、ならびに鉄筋腐食量評価手法の検討(鉄筋腐食速度評価式原案の導出および降伏強度低下率算定式原案の導出)。あわせて自然環境曝露試験（ステップ２：２年度分調査）を行うとともに、外部気象条件の影響（風による換気効果）の有意性に関する解析評価。

平成 22 年度：追加試験により、中性化・塩分浸透による鉄筋腐食特性データの充実を図るとともに、自然環境曝露試験(ステップ３：最終年度分調査および過年度分とあわせての取り纏め評価)および鉄筋腐食量評価手法の高度化、ならびに鉄筋コンクリート耐久性評価手法を検討。これらの結果を総合し、中性化予測式、鉄筋腐食速度評価式（降伏強度低下率算定式）を基にした鉄筋コンクリート耐久性評価手法を提案。

3.4.1.2 最終成果

ひび割れ幅と中性化および塩分浸透の進展状況を精度よく予測できる算定式を誘導し、鉄筋腐食量の評価に基づき鉄筋の降伏強度低下を評価予測することが可能になった。

具体的成果は以下の２項に集約される。

a. ひび割れによる鉄筋腐食を考慮したコンクリート構造部材の力学的性能劣化評価法の提案

海岸近くに建設されるコンクリート構造物を対象として、海風による塩分飛来を想定した腐食促進試験をひび割れの発生した鉄筋コンクリート供試体を対象に実験を行い、ひび割れ近傍の鉄筋腐食状態（鉄筋腐食率）を調査し、その結果と鉄筋のみが腐食環境下に曝される場合の腐食進行速度（降伏強度低下程度）を比較することにより、ひび割れのあるコンクリート中にある鉄筋の降伏強度低下率の算定式を導いた（下式参照）。

$$P_{w_c} = \frac{2.31}{63} \times 45n \times \frac{17}{63} \times 2.06 w_c$$
$$= 0.92 \times n \times w_c$$

P_{w_c} ：ひび割れ幅 w_c(mm)の降伏強度低下率（%）

n：自然暴露時間（年）、w_c：ひび割れ幅（mm） ただし、Wc≦0.48

α ：汀線からの距離による低減係数 下表による

α （汀線からの距離による低減係数）		海岸からの距離（km）				
		汀線付近	0.1	0.3	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道、東北、北陸、沖縄	1.00	0.50	0.30	0.22	0.17
飛来塩分が少ない地域	関東、東海、近畿、中国、四国、九州	0.50	0.28	0.22	0.17	0.11

※実際のαの値は、表中の”各「海岸線からの距離」の時のα”を線形補完して求める

b. コンクリート構造物のひび割れ内部の中性化予測式の提案

コンクリート中にひび割れを模した空隙を有するコンクリート供試体を用いた中性化促進試験の結果をもとに、コンクリート構造物中にひび割れが発生している場合の、ひび割れ内部への中性化予測式を導出した（下式参照）。

$$D_s = 0.8 \cdot a \cdot t^b$$

ここで、

D_s ： ひび割れに沿った中性化深さ(mm)

t ： 経過時間（年）

a,b はコンクリートの水セメント比、ひび割れ幅により決まる係数

$$a = (1.9 \cdot (w_c - 0.1)^{0.6} + 1) \cdot (0.03 \cdot (65 - w/c)^2 + 22)$$

$$b = 0.004 \cdot (65 - w/c) + 0.3$$

w_c：ひび割れ幅(mm)、w/c：水セメント比（%）

なお、この試験結果の特徴的な知見として、水セメント比が小さい試験体（高強度コンクリートの試験体）ほど中性化速度（ひび割れ面に沿った深さ方向への中性化速度）は大きいことがあげられる。また、ひび割れ内部に存在する二酸化炭素量が極めて微量（対象とするひび割れ幅が 0.1～0.5m と非常に小さいため）である事に着目し、外部からひび割れ内部への二酸化炭素の浸入が濃度差による拡散によるもので、浸入した二酸化炭素はコンクリートひび割れ側面に吸収されるという仮定に基づき中性化速度計算を行い、実験の結果をよく再現できることを確認した。

c. コンクリート構造物のひび割れ内部への塩化物イオン浸透予測式の提案

ひび割れの発生した鉄筋コンクリート供試体を対象に、海風による塩分飛来および海水干満による浸積をうける状況を想定した腐食促進試験を実験を行い、鉄筋位置での塩化物イオン濃度を調査した。その結果、浸積を受ける構造物では、ひび割れ内部の塩化物イオン濃度はひび割れ幅に関係なく、ほぼ外部（ひび割れが発生している表面）位置での濃度とほぼ同じであること、一方飛来塩分を受ける構造物では、ひび割れ内部の塩化物イオン濃度比（ひび割れ内部塩分濃度／外部塩分濃度）はひび割れ幅にほぼ比例して高濃度となり、ひび割れ幅がおよそ 0.3mm 以上では一定値（外部濃度の 1.5）とすれば安全側となることが明らかになった（図 3.4.1-1 参照）。

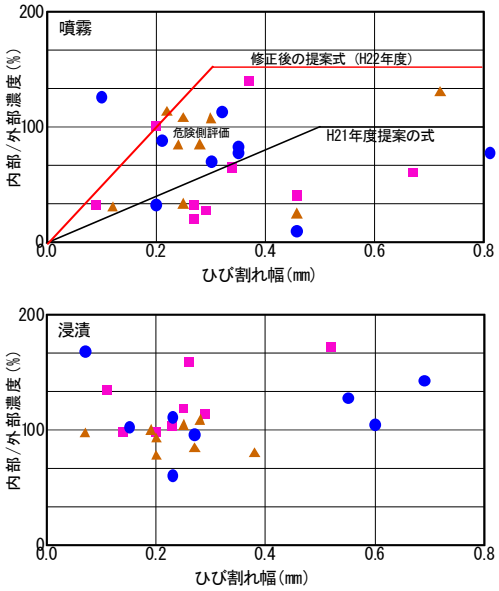


図 3.4.1-1
ひび割れ幅と塩化物イオン濃度比（内部濃度／外部濃度）

3.4.1.3 成果の反映先

本事業の成果は、定期安全レビューの一環として実施されている、原子力発電所内建屋の耐久性評価法(一次評価および二次評価)のひび割れが生じた場合の技術評価に係る、原子力安全基盤機構の高経年化技術評価審査マニュアルーコンクリートの強度低下および遮蔽性能低下－JNES-SS-0513-02 への反映に際しての基礎データとして活用できる。

3.5 研究成果のまとめ

以上の実施項目別の事業の成果を含む概要を表 3.5-1(1/5～5/5)にまとめる。なお、表中の研究成果の反映先とは、特に記述がない限りあくまで現時点での見通しであり、実際の反映に当たっては、学協会関係者(JNES を含む)の合意を得ながら、然るべき手順が取られるものである。

表　3.5-1 (1/5)　　実施項目別事業概要[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]

項目	必要性	目標	実施概要	成果	成果の反映先
ａ．配管減肉予測・評価手法の精度向上 [名古屋大学・辻教授]	○減肉管理においては、省令 62 号 9 条－2 に基づき、民間規格「日本機械学会発電用設備規格(配管減肉管理に関する規格)」等が定められており、国は最小肉厚(Tsr)を下回らない管理を要求しているが、最小肉厚を満足できないケースが生じている。これは流れ加速型腐食(ＦＡＣ)による減肉予測精度が必ずしも十分でないためで、減肉メカニズム(流動や物質拡散等)の事象解明や知見の充実を通して、より精度の高い予測手法の整備が必要と考えられている。	減肉現象のうち、流れ加速型腐食(ＦＡＣ)に着目し、流れ場中の乱流による物質伝達の解明および減肉予測・評価手法の検討。 ①流動実験による流れ場の解明。 ②物質伝達実験による壁面近傍の物質伝達の解明。 ③解析モデルの調査、評価	①流動実験と物質伝達実験により、オリフィス下流部での物質伝達率と乱流統計量の空間分布との相関、物質伝達特性の調査を行なった。 ②上記調査結果を基に、既存の数値計算コードを用いた予測手法の検討を実施した。	○流れ加速型腐食(FAC)のメカニズムの一要因と考えられている物質伝達率を測定し、それに流れが与える影響を調査し、オリフィス後流の配管減肉に関し、物質伝達の観点から既存減肉予測式を修正すると共に、新たに最大減肉位置の予測モデルを提案するなど予測手法の高度化を図った。また、減肉予測の数値計算コードの検証と高精度化に不可欠な物質伝達データを実験的に取得した。	日本機械学会 発電用設備規格：配管減肉管理に関する規格 JSME S CA-1 2005 の参考資料「配管減肉に関する技術の現状」 ２．流れ加速型腐食(FAC) 2.1 流れ加速型腐食のメカニズム、 2.3 影響パラメータ、 2.4 流れ加速型腐食のモデルおよび予測コード
ｂ．液滴衝撃エロージョン(LDI)に対応した配管減肉評価手法の構築 [福井大学・服部教授]	○減肉管理においては、省令 62 号 9 条－2 に基づき、民間規格「日本機械学会発電用設備規格(配管減肉管理に関する規格)」等が定められており、国は最小肉厚(Tsr)を下回らない管理を要求しているが、最小肉厚を満足できないケースが生じている。これは液滴衝撃エロージョン(ＬＤＩ)の基礎となる減肉予測精度が必ずしも十分でないためで、ＬＤＩの事象解明や知見の充実を通して、より精度の高い予測手法の整備が必要と考えられている。	減肉現象のうち、液滴衝撃エロージョン(ＬＤＩ)に着目し、損傷過程の解明および減肉量の評価手法の検討。 ①限界流速の解明 ②減肉メカニズムの解明 ③減肉に及ぼす流速、液滴径、衝突角度の検討	①限界流速の解明実験、ならびに②減肉メカニズムの解明実験を行い、あわせて酸化被膜の剥離メカニズムおよび剥離強度の流速依存性を調査した。また、③減肉に及ぼす流速、液滴径、衝突角度の影響を実験により調査し、液滴衝突角度と損傷量の関係に係るデータ拡充と相関解明、より精密な観測手法を用いた液滴の流速と液滴径などの影響確認実験で得られたデータを基に、LDI に対応した配管減肉評価式の検討を行った。	○炭素鋼、低合金鋼、ステンレス鋼の LDI の限界流速、液滴径、衝突角度などの影響について明らかになり、LDI を定量的に評価することが可能になる。またそのメカニズムについても液滴の機械的作用による疲労破壊に基づく減肉現象との見通しが得られる。 ○本研究では減肉規格に基づき、LDI の潜伏、発生、進展（潜伏期・加速期・速度期）を中心に評価。	日本機械学会 発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 JSME S CA-1 2005 の参考資料「配管減肉に関する技術の現状」 ３．エロージョン 3.1 液滴衝撃エロージョン。
ｃ．減肉配管の破壊モード評価法の高度化 [福井大学・飯井教授]	○減肉管理においては、省令 62 号 9 条－2 に基づき、民間規格「日本機械学会発電用設備規格(配管減肉管理に関する規格)」等が定められており、国は最小肉厚(Tsr)を下回らない管理を要求しているが、最小肉厚を満足できないケースが生じている。この場合設備の健全性を評価することが必要となるが、現時点ではその評価法がなく健全性評価法を確立しておく必要がある。(米国 ASME 規格では、Tsr を下回ったとしても健全性評価で問題が無ければ良いとしており、評価法が確立している。) ○ さらに、平成 19 年 7 月発生の中越沖地震を踏まえた、現行の弾性設計が持つ強度余裕を定量的に説明への要望や新しい耐震設計審査指針による基準地震動の見直し等に対応したバックチェックの際、「残余のリスク」として設計地震動を上回る地震動の影響についての確率論的評価の強度評価基準として、現行の基準を踏襲するのではなく、限界強度との比較も必要になる可能性がある。	溝状減肉を含む各種減肉配管の、過大な外荷重に対する限界強度、破壊モードを実験と有限要素解析（FEA）を用いた検討を行うことより、現行の弾性設計が持つ余裕を評価できるようにする。あわせて、破壊モードと強度を考慮した、すべての減肉欠陥に適用できる配管に生じた様々な減肉形状に着目し、地震など曲げ荷重下の配管の破壊モードに与える影響を実験と数値解析により明らかにし、健全性評価手法を検討する。 ①破壊モードと強度を考慮した、すべての減肉欠陥に適用できる新しい破裂内圧評価式を提案。 ②破壊モードと強度を考慮した、すべての減肉欠陥に適用できる新しい限界曲げ荷重評価式を提案。	様々な減肉形状を有する配管について、曲げ荷重下の配管の破壊モードに与える影響の確認実験と数値解析を行い、減肉配管の限界強度に対する以下の余裕を明らかにした。 （１）減肉の平面形状を考慮することによる余裕 （２）限界荷重到達時に割れないことによる余裕 （３） FEA と対応する損傷基準の持つ余裕 （４） 加工に起因する余裕 その結果を基に、 ①破壊モードと強度を考慮した、すべての減肉欠陥に適用できる新しい破裂内圧評価式 ②全ての減肉欠陥（肉厚、軸・周方向減肉）に適用できる減肉直管の内圧+曲げ評価に対する限界曲げ荷重評価式 の検討を行った。 あわせて、エルボ管での面外曲げ荷重の影響の実験的評価を行い、評価式の減肉エルボ管への適用に向けても検討した。	○左欄の（１）～（４）、各々の成果は下記の通り。 （１） すべての減肉欠陥（軸・周き裂、軸・周方向に長い減肉）に適用できる減肉直管限界強度評価式を提示（直管内圧、内圧+曲げ） （２）限界曲げ荷重到達時の割れ発生予測法を提案 （３） FEA 結果を用いた損傷評価基準を提案（直管内圧、内圧+曲げ） （４）加工硬化，製作寸法の影響をエルボについて評価 ○減肉寸法(減肉長さ、減肉幅)と破壊モード(軸、周方向割れ)との関係および強度を破壊評価試験に基づき明確にし、解析により平面状・非平面状欠陥両者に適用可能な局部減肉破壊評価式を提示する。これによってJNES にて実施されている高経年化技術評価において、より良い精度での減肉配管の健全性評価が可能となる。 ○本研究では直管形状であるオリフィスを中心に検証。	○日本機械学会発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 JSME S CA-1 C-1430 評価 C-1431 評価方法 ○原子力安全基盤機構高経年化技術評価審査マニュアル JNES - SS - 0513 - 02-耐震安全性評価。

表　3.5-1 (2/5)　　　実施項目別事業概要[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]

項目		必要性	目標	実施概要	成果	成果の反映先
d．配管減肉の定量評価法の有効性検証	ｱ.ガイド波による広域モニタリング手法の検証 [徳島大学・西野准教授]	○減肉管理においては、省令62号9条－2に基づき、民間規格「日本機械学会発電用設備規格(配管減肉管理に関する規格)」等が定められており、国は最小肉厚(Tsr)を下回らない管理を要求しているが、最小肉厚を満足できないケースが生じている。これは対象箇所の抽出基準が保守的なため、減肉管理箇所が膨大(1000～2000箇所／定検)となっている。減肉箇所が偏っているにも関わらず、1部位30～60点のポイントを画一的に実施しているなどによると考えられ、実機減肉に適した検査の品質向上が必要と考えられる。	実機減肉形状に適した検査の品質向上に着目し､超音波ガイド波を用いた広域モニタリングによる定量評価法の有効性の検証をおこなう。 ①世界的2方式である圧電式と磁わい式による直管とエルボ管におけるガイド波の検出性能評価。 ②多重反射エネルギー閉込め法の評価。 ③欠陥形状によるガイド波の検出特性の知見蓄積。	①FACとLDIを視野に漸増減肉欠陥を導入した試験体に対して、減肉の検出性能を直管とエルボ管において評価した。また，実機での欠陥形状に対するガイド波の検出特性の知見を蓄積した。 ②多重反射エネルギー閉じ込め法が高感度で減肉検出出来ることを評価した。 ③欠陥形状とガイド波の検出感度の関係を実験的にもとめ，科学的合理的なモデルによる検証を行った。	○ガイド波に関しては、減肉発生のある領域を広範囲に一度に抜けなく測定し、減肉状況を把握できる技術を確立した。これにより超音波厚さ測定の実施範囲の絞り込みができ、効果的な管理が可能となる。 ○本研究では、口径50Aの直管とエルボ管についてガイド波の有効性を確認した。また科学的合理的な検出性能の見積もりを行うことで，減肉形状の概略を推定ができることを確認した。	○日本非破壊検査協会NDIS2427規格「ガイド波を用いたパルス反射法による探傷試験方法通則」(H２２年度改訂反映済み) ○日本機械学会発電用原子力設備規格　配管減肉管理に関する技術規格、(PWR)JSME S NG1および(BWR) JSME S NH1 CA-2000 試験 CA-2100 試験方法 （１）超音波厚さ測定方法による場合
	ｲ.配管減肉サイジングの高度化 [神戸大学・小島教授]	○減肉管理においては、省令62号9条－2に基づき、民間規格「日本機械学会発電用設備規格(配管減肉管理に関する規格)」等が定められており、国は最小肉厚(Tsr)を下回らない管理を要求しているが、最小肉厚を満足できないケースが生じている。今後維持基準に基づき減肉を残した運転がなされた場合、運転中のモニタリングによる設備維持の信頼性を向上する必要がある.	維持基準に基づき減肉を残した運転がなされた場合､運転中のモニタリングによる設備維持の信頼性の向上に着目し､ガイド波による広域監視と電磁超音波法(以下ＥＭＡＴ)による定点常時監視(運転中モニタリング)を組み合わせた検査法について､配管減肉管理への適用可能性の検証。 ①電磁超音波(EMAT)を用いた局所モニタリングの有効性検証。 ②ガイド波とEMATの統合化による欠陥寸法計測の高度化。 ③配管減肉進展予測と運転中モニタリングの確立	①電磁超音波(EMAT)を用いた局所モニタリングの有効性検証のための実験および解析による調査を行った。 ②オリフィス下流直下FACを模擬した試験体に対して、複数のEMATセンサーによる減肉要領寸法計測の有効性を検証し、これを基に、ガイド波とEMATの統合化による欠陥寸法計測の高度検討を行った。 ③計測実験で収集したデータを基に、配管減肉量評価法を確立し、減肉進展予測コードを改良整備し、運転中モニタリング法を検証した。	○EMATにより既存のUT並みの精度が得られることを検証。またガイド波による超音波厚さ測定結果とシミュレーションによる減肉進展予測評価に基づき、EMATの最適配置を決定し、運転中高温状態でオンラインモニタリングによる減肉管理が実施可能となる。 ○本研究でのEMATの検証は、主としてオリフィス下流部での軸･周方向減肉の測定の可能性が対象。	

表　3.5-1（3/5）　　実施項目別事業概要[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]

項目	必要性	目標	実施概要	成果	成果の反映先
a．非線形超音波（高調波）を用いた高散乱Ni基合金溶接部粒界SCCの非破壊検査法に関する研究 [超音波材料診断研究所・川嶋所長]	原子炉設備のステンレス鋼溶接部については、超音波探傷法による深さサイジングのPD認証基準が3.2mmに定められ、この認証を受けたものが検査し、維持規格に基づき健全性評価を行ったことを、国が確認している。 ①原子炉容器と配管をつなぐNi基合金溶接部でSCCが頻繁に発生しているが、この部分は超音波の散乱・減衰が大きく深さサイジング性が充分でなく、PD認証基準もないため、維持規格が運用できていない。このため、深さサイジングの精度向上が必要である。	ニッケル基合金溶接部の応力腐食割れの非線形超音波探傷（高調波）法適用の妥当性を、検証する。 ①深さサイジング性能の検証	SCCからの高調波を接触および水浸ならびに単独および複数探触子を用いて受信･画像化することでよい精度で深さを測定できること，さらにフェイズドアレイ探触子を用いる高調波測定が可能であることを検証した．	異種材料継手模擬平板ニッケル基合金溶接部について，SCCを従来法より良い精度で深さ測定できることを明らかにした．	事業者が、今後非線形超音波探傷法を開発し、供用期間中検査における超音波探傷試験規程(JEAC 4207)の付属書Aに新しい超音波探傷法として、非線形超音波探傷(高調波)法を追加記載するときの、その技術的妥当性を国が評価するためのデータ。
b．三次元超音波探傷法によるNi基合金溶接部SCCの高精度サイジングに関する研究 [発電設備技術検査協会・ 古村研究グループ長]	原子炉設備のステンレス鋼溶接部については、超音波探傷法による深さサイジングのPD認証基準が3.2mmに定められ、この認証を受けたものが検査し、維持規格に基づき健全性評価を行ったことを、国が確認している。 ①原子炉容器と配管をつなぐNi基合金溶接部でSCCが頻繁に発生しているが、この部分は超音波の散乱･減衰が大きく深さサイジング性が充分でなく、PD認証基準もないため、維持規格が運用できていない。このため、深さサイジングの精度向上が必要である。 ②対象箇所の形状の問題により、検査できない部分があり、これを検査できる技術の検証が必要である。 ③検査の結果、事業者が運転を継続しようとする場合、速いと言われているNi基合金溶接部のSCC進展を監視できること、および事前の評価どおりのき裂進展速度であることを実際に確認することが必要である。	ニッケル基合金溶接部の応力腐食割れに対する3次元超音波探傷法適用の妥当性を、検証する。 ①深さサイジング性能の検証 ②検査不可能箇所に対する有効性の検証 ③オンラインモニタリング可能性の検証	①3種類の肉厚のSCC欠陥付与試験体において溶接線直交欠陥および溶接線平行欠陥に深さサイジング特性を評価。 ②EDM欠陥およびSCC欠陥付与試験体を用いて、外形形状等による検査不可能箇所を想定した探傷を行い、最適ではない位置からの検出性・深さサイジング性を検証。 ③SCC試験体に高温用マトリックスアレイ探触子を適用して、運転中モニタリングの可能性を評価。	①周方向欠陥および溶接線直交欠陥は、共に従来法より良い精度で深さ測定可能であることを明らかにした。 ②従来法では深さサイジング困難な箇所（溶接線直交欠陥）も深さサイジング可能であることを明らかにした。 ③運転中のき裂進展モニタリングへの適用可能性を明らかにした。	①②事業者が、今後3次元超音波探傷法を開発し、供用期間中検査における超音波探傷試験規程(JEAC 4207)の付属書Aに新しい超音波探傷法として、3次元超音波探傷法を追加記載するときの、その技術的妥当性を国が評価するためのデータ。 ③事業者が、今後3次元超音波探傷法を運転中モニタリングに使用するときの、その技術的妥当性を国が評価するためのデータ。
c．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 [福井工業大学・ 砂川准教授、 大阪大学・ 関教授]	原子力発電所の安全上重要なケーブルについては、JNESの研究成果に基づき、NISA文書(平成19・07・30原院第5号)にて健全性の確認を要求している。また、民間規格の試験案により事業者が長期健全性を確認している。 ケーブルの健全性確認は、熱・放射線加速劣化供試材を用いた破壊試験データに基づき、実機の熱・放射線環境のシミュレーションデータにより確立された劣化予測手法を用いている。 ①すべてのケーブル絶縁材について、電気的特性を高精度に測定し、実機の劣化を非破壊検査する診断方法は確立されていないので、これを測定できる新しい非破壊検査手法が必要である。	原子力発電所の安全上重要なケーブルについては、JNESの研究成果に基づき、NISA文書(平成19・07・30原院第5号)にて健全性の確認を要求している。また、民間規格の試験案により事業者が長期健全性を確認している。 ケーブルの健全性確認は、熱・放射線加速劣化供試材を用いた破壊試験データに基づき、実機の熱・放射線環境のシミュレーションデータにより確立された劣化予測手法を用いている。 ①すべてのケーブル絶縁材について、電気的特性を高精度に測定し、実機の劣化を非破壊検査する診断方法は確立されていないので、これを測定できる新しい非破壊検査手法が必要である。	①マイクロ波検出技術の、安全上重要なケーブルの絶縁機能劣化を非破壊検査する技術としての妥当性を評価する。	①マイクロ波誘電吸収測定法により、ケーブルの電気的特性（誘電率変化）を精度良く測定し、ケーブルの劣化を非破壊的に検査できることを確認した。ポリエチレン、EPゴムの劣化ケーブル模擬供試体にでのマイクロ波誘電吸収測定データの充実を図れた。さらに、実機適用にために装置の小型軽量化を図り、精度検証を行とともに、実機環境下での作動確認や実機材での計測により性能を確認した。	事業者が今後ケーブル劣化の非破壊検査技術を開発し、民間規格(JEAG「ケーブル評価試験ガイドライン」)に反映するときの、その技術的妥当性を国が評価するためのデータ。

表　3.5-1（4/5）　　実施項目別事業概要[溶接補修技術に関する研究]

項目	必要性	目標	実施概要	成果	成果の反映先
a.高経年化プラントの補修における溶接健全性評価技術および補修後溶接部における信頼性評価技術研究 [大阪大学・西本教授]	○溶接施工管理においては、省令62号9条(15項)に基づき、材料および構造の主要な耐圧部の溶接健全性を要求している。この要求に基づき民間規格「日本機械学会発電用原子力設備規格(溶接規格)」が定められているが、高Cr系Ni基合金(インコネル690等)については、一般に溶接施工性に潜在的弱点があり、溶接割れ感受性(特に、高温割れ)が高いことが知られていることから、原子力発電設備の信頼性確保を規制側から確認する観点から、溶接施工健全性を評価する必要がある。また、インコネル600などのNi基合金は、耐PWSCC性に条件によっては問題があることが指摘され，一部のプラントでは顕在化していることから、補修溶接後の溶接残留応力状態とSCC発生裕度の関係を明らかにし、高Cr系Ni基合金(インコネル690等)溶接部と合わせて補修後溶接部の再使用時の長期信頼性をあわせて評価・確認することも必要である。	○Ni基合金補修溶接部について、材料特性および溶接施工条件の観点から溶接施工健全性を評価するとともに、金属組織とSCC発生の相関関係に基づき補修後溶接部の再使用時における長期信頼性を評価・確認することを目的とし、以下の項目を評価検討する。 ①微量・不純物元素の影響評価 ②溶接施工条件の影響および施工安全裕度の評価 ③補修後溶接部における微視的(結晶組織レベル)残留応力状態の評価 ④補修溶接部の耐PWSCC性の評価およびSCC発生とミクロ応力場の相関の評価 ⑤モックアップ試験による補修溶接施工法の実機施工健全性および長期信頼性の検証	①690合金溶接部および690合金／SUS316L異材溶接部における溶接施工健全性を確保するため、微量・不純物元素の含有量に着目した溶接割れ試験を実施し、溶接施工健全性が担保できる材料的要件を明確にした。 ②690合金多層盛溶接部における熱履歴および応力・ひずみ状態を明らかにし、施工健全性に及ぼす溶接施工条件の影響および施工安全裕度を定量的に評価した。 ③補修後の690合金溶接部の耐PWSCC性を評価するとともに、結晶方位解析に基づき、SCC発生と金属組織の相関について評価した。 ④微視的材質不均一に起因した結晶組織レベルの応力・ひずみ場を評価・確認する手法を確立するとともに、SCC発生特性・裕度をミクロ応力に注目して評価した。 ⑤モックアップ試験により補修溶接施工法の実機施工健全性評価方法を検証するための基礎的知見を得た。	①690合金溶接部の高温割れ発生に及ぼす不純物元素(P、Sなど)の影響を明確にし、不純物元素量の上限を提示した。ステンレス鋼との異材溶接において、不純物元素の固定を図るため、希土類元素(Ce)を微量添加し、高温割れを防止できる組成範囲を整理した。これらの結果に基づき、690合金溶接部における施工健全性を担保するための微量・不純物元素の規制すべき基準を提示した。 ②690合金溶接部におけるDTR塑性ひずみ指標に基づき、アークおよびレーザ溶接施工条件による施工安全性および安全裕度を評価できる方法を確立した. ③690合金補修部の再供用下における耐PWSCC性を評価し、SCC感受性が十分に低いことを確認した。 ④SCC発生特性と金属組織およびミクロ応力の相関に着目して、補修後溶接部の再使用時の長期信頼性評価技術を確立した. ⑤実機プラントを模擬したモックアップ試験により補修溶接部の施工健全性と耐PWSCC性を評価し、実機施工健全性評価方法の検証に向けた基礎的知見を得た。	日本機械学会発電用原子力設備維持規格 JSME S NA1 補修章 RA-3000 補修・取替技術の適用「補修・取替えを行う場合、原則として溶接規格・設計・建設規格による。ただし、本規格の個別の補修技術を用いる場合は、この限りではない。」等への諸成果反映に際しての基礎的知見ならびに国が規制基準として技術的内容を検討・確認する際の技術的根拠。

表　3.5-1（5/5）　　　実施項目別事業概要[主要構築物の劣化に関する研究]

項目	必要性	目標	実施概要	成果	成果の反映先
a.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研究 [大阪大学・岸本准教授]	○原子力発電所のコンクリート構造物は、厳しい管理の元で施工されており、定期的な点検および補修を実施している。 コンクリート構造物のひび割れについては、有意なひび割れが生じていないか、生じていても軽微であるとして、ひび割れを前提とした判断基準はない。 しかし、ひび割れが発生すると中性化および塩分浸透による鉄筋腐食が促進され、コンクリート構造物の強度が低下することが懸念されていることから、ひび割れが生じたコンクリート構造物の耐久性評価を行うための判断基準が必要である。	ひび割れの発生したコンクリート構造物の鉄筋腐食に着目したコンクリート耐久性評価手法の検討。 ①中性化および塩分浸透に因る鉄筋腐食発生の経時的なメカニズムの明確化。 ②中性化および塩分浸透に因る鉄筋腐食予測式の策定。	①②中性化および塩分浸透に因る鉄筋腐食実験を行い、その結果を基に発生の経時的なメカニズムや塩分浸透に因る鉄筋腐食予測式を検討した。また、③鉄筋の降伏強度算定式の検討も実施した。また、「ひび割れ内部への中性化進展予測式」を適用するための精緻化の一環として、風の中性化への影響を、数値流体力学(CFD)解析により評価した。	○ひび割れ幅と中性化および塩分浸透の進展状況を精度よく予測できる算定式を誘導し、鉄筋腐食量の評価に基づき鉄筋の降伏強度低下を評価予測することが可能になった。	原子力安全基盤機構高経年化技術評価審査マニュアル JNES-SS-0513-02（コンクリートの強度低下および遮蔽性能低下）での、原子力発電所内建屋の耐久性評価法(一次評価および二次評価)のひび割れが生じた場合の技術評価。

4. まとめ

4.1 5ヵ年の成果と総括

前章で示した、国内実用原子力発電プラントにおける高経年化に係る技術情報基盤の整備に、比較的直接的に資すると思われる成果およびその反映先の概要を表 4.1-1 にまとめる。

表 4.1-1（1/2） 成果項目および反映先の概要

	研究項目	成果項目	反映先
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	配管減肉予測・評価手法の精度向上	(1)FAC配管減肉メカニズムに基づく予測式の提案	・日本機械学会「配管減肉のための技術規格」JSME S CA-1への諸成果反映反映に際しての基礎データ、および国が検証する際のデータ。具体的には参考資料「配管減肉に関する技術知見の現状」（改訂版：現在反映取り纏め中）
		(2)FAC配管減肉メカニズムに関わる物質伝達率と流動データの整備	
	液滴衝撃エロージョン(LDI)に対応した配管減肉評価手法の構築	(1)LDI配管減肉メカニズム検証データの整備	・日本機械学会発電用原子力設備規格「配管管理に関する規格」JSME S CA1への諸成果反映反映に際しての基礎データ、および国が検証する際のデータ。具体的には、「配管減肉に関する技術知見の現状」。
		(2)LDI配管減肉メカニズムに基づく予測・評価法の改良提案	
	減肉配管の破壊モード評価法の高度化	(1)直管の平面状/非平面状欠陥に適用可能な破裂内圧式の提案	・日本機械学会発電用設備規格「配管減肉管理に関する規格」：JSME S CA-1、C-1430 評価とC-1431評価方法 ・原子力技術基盤機構高経年化技術評価審査マニュアル-耐震安全性評価：JNES - SS - 0513 - 02（例：弾塑性有限要素解析を用いた減肉配管強度評価の代替規定）
		(2)直管の平面状/非平面状欠陥に適用可能な限界曲げ荷重式の提案	
		(3)有限要素法解析結果に適用可能な直管の限界曲げ荷重評価基準の提案	・原子力技術基盤機構高経年化技術評価審査マニュアル-耐震安全性評価：JNES - SS - 0513 - 02（例：弾塑性有限要素解析を用いた減肉配管強度評価の代替規定）
	配管減肉の定量評価法の有効性検証	(1)世界的2方式によるガイド波手法の有効性検証	・日本非破壊検査協会規格「ガイド波を用いたパルス反射法による配管の探傷試験方法通則」：NDIS2427に本事業により反映済み。
		(2)ガイド波多重反射エネルギー閉じ込め法の検証	・日本機械学会発電用設備規格「配管減肉管理に関する規格」：JSME S NG1)BWR)および同NH1(PWR)の追加参考-4(EMAT)および5(ガイド波)への諸成果反映反映に際しての基礎データ、および国が検証する際のデータ。
		(3)ガイド波によるエルボ管における減肉欠陥の検出性能評価	
		(4)EMATによる配管減肉定点監視法性能評価	
		(5)減肉進展予測評価を導入した配管減肉運転中モニタリング法提案	
		(6)EMAT/ガイド波統合減肉監視システムの検証	

表 4.1-1（2/2） 成果項目および反映先の総括(続き)

	研究項目	成果項目	反映先
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	高調波を用いたケル基合金溶接部粒界型応力腐食割れ(IGSCC)の非破壊評価法に関する研究	(1) ニッケル基合金溶接部粒界型応力腐食割れ(IGSCC)のサイジング精度向上	・事業者が今後非線形超音波探傷法を開発し、日本電気協会電力技術規定原子力編「軽水型原子力発電所の供用期間中検査における超音波探傷試験規定」（JEAC4207）の付属書Aに新しい超音波探傷法として非線形超音波探傷(高調波)法を追加記載するときに、その技術的妥当性を国が評価するためのデータ。
	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に関する研究	(1)3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部SCCサイジング技術の確立	
		(2)3次元超音波探傷法による探傷不可能範囲の低減技術の検証	・事業者が、3次元超音波探傷法を形状不連続による探傷不可能範囲に対処するために使用するときに、その技術的妥当性を国が評価するためのデータ。
		(3)3次元超音波探傷法による運転中定点・継続監技術の検証	・事業者が、3次元超音波探傷法を運転中モニタリングに使用するときに、その技術的妥当性を国が評価するためのデータ。
	マイクロ波検出技術を用いた高分子材料への熱・放射線照射による経年劣化測定技術に関する研究	(1)マイクロ波検出技術を用いた高分子材料経年劣化の電気的特性測定技術の確立	・民間規格「ケーブル評価試験ガイドライン、原子力発電所の安全電気・計装品の耐環境性能の検証に関する指針」、JEAG4623の今後の改訂に際し、その技術の妥当性を国が評価するためのデータ。
		(2)マイクロ波検出技術を用いたケーブルの非破壊的経年劣化測定技術の確立	
		(3)マイクロ波検出技術に基づく高分子材料経年劣化に係る健全性余裕度評価法の提案	
溶接補修技術に関する研究	高経年化プラント補修における溶接健全性評価技術および補修後溶接部における信頼性評価技術に関する研究	(1)補修溶接健全性技術指針の材料学的・力学的要件および施工安全裕度の評価技術	・発電用原子力設備規格　維持規格（JSME S NA1）の補修章の事例規格または溶接規格（JSME S NB1），ならびに規制基準に対する技術的根拠を与える情報。
		(2)補修溶接部の再使用における信頼性検証試験データおよびSCC発生予測技術	
		(3)補修溶接の実機適用における施工健全性および再供用時の長期信頼性のモックアップ検証データ整備	・規制基準に対する技術的根拠を与える情報。
主要構築物の劣化に関する研究	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	(1)ひび割れによる鉄筋腐食考慮したコンクリート構造部材の力学的性能劣化評価法の提案	・原子力安全基盤機構の高経年化技術評価審査マニュアル－コンクリートの強度低下および遮蔽性能低下－JNES-SS-0513-02での原子力発電所内建屋の耐久性評価法(一次評価および二次評価)のひび割れが生じた場合の技術評価。
		(2)コンクリート構造物のひび割れ内部の中性化予測式の提案	
		(3)コンクリート構造物のひび割れ内部への塩化物イオン浸透予測式の提案	

4.2 今後に向けた提言

4.2.1 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

FAC に関する研究に関しては、これまでの研究により、オリフィス下流における物質伝達率分布や物質伝達率分布と流動パラメータの空間分布について、かなりの知見は得られたものの、配管形状の点で一般化するまでには至っておらず、T 字管やエルボなど、実機配管で多くみられる他の複雑流動場が生じる部位への適用には、それらの部位における局所的な物質伝達率や流動場に関する実測情報から、データベースの充実を通してメカニズムの解明を進め、より精度の高い予測法を開発する必要がある。

LDI に関する研究に関しては、配管減肉管理技術の規格・基準等への技術知見への反映に向けては、これまでの研究で得られた、ジェット噴流を用いた液滴衝撃エロージョンの母材損傷メカニズムについての知見をさらに発展させる必要があり、そのためには酸化被膜材の損傷メカニズムの解明や当該研究で明らかになった疲労破壊に基づくメカニズムに関してもさらに研究をすすめ、スプレーノズルを用いたエロージョン機構の検討や酸化被膜材の破壊メカニズムの検討も必要である。また、これまでの本事業を進めてきた経験から、改めて各研究機関間のデータの互換性を保障する標準試験法の確立も重要と考えられる。

破壊モードに関する研究に関しては、配管の構造健全性の観点から、溝状矩形減肉のモデル化による、組み合わせ荷重などでの破壊モードへの影響と余裕の評価を適切なものとするには、これまでの研究の前提としての、一様肉厚、つまり完全な矩形減肉形状を、実機で発生する肉厚分布を有する減肉欠陥の観点からパターン化し、その矩形減肉に対し有する強度余裕を定量化し、得られたデータを基に、規格・基準化する場合の実機で発生する減肉欠陥のモデル化方法の提案につなげる必要がある。また、複合荷重の影響検討についても、実機のプラント配管では面内曲げと同時に面外曲げ（ねじり）荷重が付加される複合荷重に対し、有限要素解析結果に適用可能な直管およびエルボの限界曲げ荷重評価基準を提案することも検討する必要がある。

ガイド波および EMAT による配管減肉の定量評価および広域監視技術の高度化に関しては、これまでの研究により、直管部におけるガイド波による広域監視技術の基礎の確立は、非破壊検査協会規格 NDIS2427 の制定と言う形でなされているが、複雑部位（チーズ，レデューサ等）における高度化は未だなされていない。各部位別に詳細な検査手法の規格化によりその解決を目指すには、適用性拡大のための検証の実施が必須である。また、これまでの成果を踏まえて、配管減肉の形状と位置をガイド波で完全に計測・モニタリング可能とする技術を確立するには、配管周方向の減肉の分布を定量的に明らかにする手法として、高次モードを併用する方法とガイド波の減肉反射の数学モデルの詳細化の２つのアプロー

チが不可欠である。その他、これまでにその重要性を明らかにした複雑部における差分計測適用や、詳細位置による周波数依存性を利用した高感度な計測法の検証、その効率的かつ一般性を維持した形での実施のための波動シミュレーションによる検証解析等の必要もある。多重反射エネルギー閉じ込め法についても、これまでの直管とエルボ管での検証に加えて、オリフィス管、ティ管、レデューサ部へ実証を拡大し、その適用性および実用可能性、さらには適用性向上に関する検討が望まれる。また、これまでの研究でその基礎を確立した、ガイド波による FAC 減肉の検出とあわせて EMAT での詳細計測・常時監視を可能とする統合監視システムの複雑部位への適用性検討、さらには環境適応性向上や操作性の向上等も重要な課題である。

4.2.2 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

高散乱ニッケル基合金溶接部 IGSCC 非破壊検査法に関しては、これまでの研究で実用性を確認した高調波を用いたニッケル基合金溶接部での SCC 高精度サイジング技術について、その実機顕在事象への対応をより確実かつ合理的なものとするためには、SCC 進展域を鋭敏化処理した加速試験体だけでなく、実機に近い模擬 SCC に対して検出およびサイジング能力を検証する必要がある。このためには平成 23 年度の国際共同プロジェクト PARENT で計画中の各種 Ni 基溶接部 SCC 試験体の測定への参加が有効である。また、高調波法を実機に適用するためには、焦点ビーム径の小さい接触式焦点探触子の開発が必要であり、さらに超音波入射波面が円筒状である実機に対応するには軸方向と周方向での焦点距離が異なる複曲率集束探触子が必要となり、そのためには高調波だけでなく分調波の利用も含めた技術の開発も必要である。

３次元超音波探傷法に関しても、上記の国際共同プロジェクト PARENT への参加等によるニッケル基合金溶接部の SCC の検出性・深さ測定率・深さ測定精度・探傷不可範囲の低減に関する検証データの拡充ならびに高温環境下で行われる運転中き裂監視への適用性検証が有効である。また、き裂監視技術に関しては、本 UT 法を補完するガイド波と光ファイバータイプ AE（アコースティツク・エミッション）や、高感度磁気センサを用いた技術の開発も視野に入れたい。

マイクロ波検出技術を用いたケーブル絶縁劣化診断技術に関しては、これまでの研究でその基礎を確立し、マイクロ波誘電吸収法そのものについては、診断法としての新たな課題はないと考えるが、実機適用性の向上に向けて、測定機器のさらなる小型軽量化、実機環境によるノイズ対策の必要性の有無、実機ケーブル仕様への対応性向上等の改良研究が必要と考える。あわせて、ケーブル添加物の中で、本検出法の高感度プローブとなり得る化学種を同定することにより、材料普遍的に適用できる検出手法へと発展させることも重要である。また、加速劣化試料を用いた検証データ収集に関しては、加速劣化手法、特に熱劣化と放射線劣

化各々の加速効果について､それぞれの寄与の相対評価を行うことも重要となる。さらに、これまでの研究成果をもとに、マイクロ波誘電吸収法を用いた PE 材料中の酸化防止剤消費の定量的計測により、実際の高分子材料の機械的・絶縁劣化を前広に確認し、その材料健全性・余裕度を見極めることができる技術の具体化に向けた研究が重要と考える。

4.2.3 溶接補修技術に関する研究

その高度化を目指したこれまでの研究により、健全性を高めた溶接補修技術(TIG 溶接技術)について一定の知見が得られた。今後は、その高度化をはかるとともに、民間ニーズが高まりつつある封止溶接補修部（キズ残し補修）の施工健全性評価と補修部の長期耐食安定性評価への拡張、690 合金補修溶接施工へのレーザプロセスの適用性評価と施工安全の力学的評価方法の検証、既存ならびに今後使用が想定される種々の実機 690 系合金補修溶接部の施工健全性と耐 SCC 性の金属組織学的・力学的評価、溶接補修部およびピーニング施工部の長期健全性評価検証､BWR 材料を対象とした長期耐食安全評価方法の確立および実機適用性検証についての研究を深め､補修技術の規格･基準等への反映を目指す必要がある。

4.2.4 主要構造物の劣化に関する研究

これまでの研究で、ひび割れのあるコンクリートの鉄筋腐食による構造物劣化の特性に関する基礎的な知見が得られた。今後はその成果を踏まえて、実際の建物の外部環境条件（強風，降雨，日射等）の影響を、長期の暴露試験や解析により精査し提案算定式に考慮することや、ひび割れを生じさせた試験体の鉄筋表面の詳細観察で見られた孔食等に関する研究も必要と考える。また、現状では作製可能なひび割れ幅の限界値が 0.1mm 程度であるため、これ以下のひび割れ幅についても、その必要性に応じた実験・調査を進めるには、これを可能とする試験方法（ひび割れ作製方法）の開発が必要である。

略語表

DTR	Ductility Transition Temperature Region	延性低下温度域
EMAT	Electro Magnetic Scoustic Transducer	電磁超音波探触子
EP	Ethyren Propylene	エチレン・プロピレン（ゴム）
FAC	Flow Accelerated Corrosion	流れ加速型腐食
FEA	Finite Element Analysis	有限要素解析
IGSCC	Inter Granuler Stress Corrosion Cracking	粒界型応力腐食割れ
LDI	Liquid Droplet Impingement Erosion	液滴エロージョン
PE	Poly-Ethylene	ポリエチレン（ゴム）
PWSCC	Primary Water Stress Corrosion Cracking	１次冷却材応力腐食割れ
SCC	Stress Corrosion Cracking	応力腐食割れ
UT	Ultrasonic Test	超音波探傷試験

（参考）外部発表成果一覧

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

1.1 論文

[配管減肉予測・評価手法の精度向上]

無し

[液滴衝撃エロージョン(LDI)に対応した配管減肉評価手法の構築]

1. Shuji Hattori, Makoto Takinami," Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate", Wear,volume 269,issues 3-4, pp310-316, 18 June 2010.
2. 服部修次,早川裕規,,"炭素鋼、ステンレス鋼の液体衝撃エロージョンの流速依存性", 日本機械学会論文集(A編), 76 巻,772 号, No.10-0611, 2010.12,

[減肉配管の破壊モード評価法の高度化]

1. 辻将隆飯井俊行, "画像ひずみ計測による減肉配管の破壊挙動観察", 日本機械学會論文集 A 編. 2010; 第 76 巻, 第 772 号:pp.1667-1673,(2010).
2. 辻将隆･飯井俊行, "減肉配管の平面状/非平面状欠陥に適用可能な破裂内圧式の提案", 保全学. Vol.9,No.4, pp.76-81,(2011).
3. K. Hasegawa, T. Meshii and D.A. Scarth, "Assessment of piping field failures and burst tests on carbon steel pipes with local wall thinning using asme section XI code case N-597-2",. Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology., vol.133, pp. 297-305, (2011)

[配管減肉の定量評価法の有効性検証-ガイド波による広域モニタリング手法の検証]

1. Hideo Nishino, Keiji Ogura, Toyokazu Komatsu and Kenichi Yoshida, "Defect detection of a pipe using guided wave generated by an efficient transduction method with a reflector", Japanese J. Appl. Phys., Vol.48 (2009) 094501(1-7).
2. Hideo Nishino, Keiji Ogura, Toshiro Tanaka and Kenichi Yoshida, "Highly sensitive detection of defect in piping using Multireflecting Guided wave Energy Trapping (MGET) method": accepted for publication in Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49 (2010) 066602(1-7).
3. Hideo Nishino, Shuichi Masuda, Yuki Mizobuchi, Tadashi Asano and Kenichi Yoshida: Long range testing of a welded elbow pipe using the T(0,1) mode ultrasonic guided wave, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.49, 2010. Accepted in Press.
4. Hideo Nishino, Toshiro Tanaka, Saori Katashima and Kenichi Yoshida: An experimental investigation of mode conversions of the T(0,1) mode guided wave propagating in an elbow pipe, submitted to Japanese Journal of Applied Physics.

［配管減肉の定量評価法の有効性検証−配管減肉サイジングの高度化］

1. Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA, Hiroshi YAMAGUCHI and Kosuke UMETANI, “Monitoring System for Pipe Wall Thinning Management using Electromagnetic Acoustic Transducer,” E-Journal of Advanced Maintenance, Vol. 2, No. 1 (2010) (34-42)
2. Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Hiroshi YAMAGUCHI, "Quantitative evaluation of wall thinning in pipe wall using electromagnetic acoustic transducer," Accepted in Press in International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. (2010)
3. Duong Thanh NGUYEN and Fumio KOJIMA, “Identification of Sub-surface Defect Parameters in Plates using Electromagnetic Acoustic Interaction,” Accepted in Press in International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. (2010)

1.2 国際会議

［配管減肉予測・評価手法の精度向上］

1. R. Kojo, Y. Kuroda, M. Kondo, Y. Tsuji, ”Flow accelerated corrosion mechanism behind The orifice in pipe flow”, NTHAS7, Chuncheon, Korea, November 14-17. 2010.
2. F. Shan, M. Tatematsu, M. Kondo, Y. Tsuji, ”Application of Particle Image Velocimetry and Proper Orthogonal Decomposition to the Turbulent Flow behind the Orifice inside a Pipe”, NTHAS7, Chuncheon, Korea, November 14-17. 2010.
3. F. Shan, M. Tatematsu, M. Kondo, Y. Tsuji, ”The flow field of pipe-wall thinning area bihind the orifice”, NTHAS7, Chuncheon, Korea, November 14-17. 2010.

［液滴衝撃エロージョン(LDI)に対応した配管減肉評価手法の構築］

1. S. Hattori, M. Takinami, T. Otani, “Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate”, Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation, Michigan, USA, 2009.8.17-22.
2. Hattori, M. Takinami, “Liquid Impingement Erosion and Cavitation Erosion for Aging Management”, The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Kanazawa, Japan, 2009.9.27-1

［減肉配管の破壊モード評価法の高度化］

1. I. Herman, O. Kuwazuru, T. Meshii, “Effect of Flaw Geometry on the Fracture Behavior of Wall-thinned Pipe under Internal Pressure”, Proceedings of the 12th International Conference on Fracture, Ottawa, Canada, 2009.7.
2. K. Hasegawa, T. Meshii, D. A. Scarth, “Assessment of Piping Field Failures and Burst Tests on Carbon Steel Pipes with Local Wall Thinning Using ASME Section

XI Code Case N-597-2", Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference, Prague, Czech Republic, 2009.7.26-30.
3. T. Meshii," Proposal of an internal burst equation applicable to planar/non-planar flaw in wall thinned pipes", Proceeding of 2010 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, CD-Rom, Seattle, ASME, pp. 1-6 (2010), PVP2010-25873.

[配管減肉の定量評価法の有効性検証-ガイド波による広域モニタリング手法の検証]

1. Shuichi Masuda, Toshiro Tanaka, Kenichi Yoshida and Hideo Nishino, "Defect detections in welded elbow pipes using guided waves and their propagation phenomena" , Coference handbook on The 13th Asia-pacific Conference on Non-Destructive Testing, Yokohama (2009. Nov.) pp. 130
2. Keiji Ogura, Saori Katashima, Kenichi Yoshida and Hideo Nishino, "Advanced and efficient defect detection using Multireflecting Guided wave Energy Trapping (MGET) method", Coference handbook on The 13th Asia-pacific Conference on Non-Destructive Testing, Yokohama (2009. Nov.) pp. 131
3. Hideo Nishino and Kenichi Yoshida：Efficient defect detection of a pipe using multirefelcting guided wave energy trapping method, The fourth Japan-US Symosium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World, US Hawaii, Jun. 2010.
4. 西野秀郎：反射体を利用した高効率ガイド波励起検出法による欠陥の検出，超音波テクノ，Vol. 22, No.5 (2010) 85-88.（解説記事）

[配管減肉の定量評価法の有効性検証-配管減肉サイジングの高度化]

1. Fumio KOJIMA, "Mathematical formulation of nondestructive test by EMAT for corrosion detection of structural materials," Proc. of the 2nd International Conference on Approximation Methods for Design and Control, Buenos Aires (2007, March).
2. Fumio KOJIMA, "Corrosion shape identification arising in nondestructive evaluation by electromagnetic acoustic transducer," Proc. of the 4th International Conference on Inverse Problems, Modeling, and Simulation, Fethiye, Turkey (2008, May).
3. Daigo KOSAKA and Fumio KOJIMA, "Corrosion Shape Recovery by Electromagnetic Acoustic Transducer and its Application to Pipe Wastage Management," Proc. of SICE Annual Meeting 2008, Tokyo (2008, Aug.) pp. 184.
4. Fumio KOJIMA, Daigo KOSAKA, and Duong Thanh NGUYEN, "Sizing

methodology of piping wastage using electromagnetic acoustic transducer,", Proc. of 7th International Conference on NDE in relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Yokohama (2009, May)

5. Fumio KOJIMA and Jyun-ichi TSUBOTA, "Development of Guided Wave Simulator and Application to Sizing Methodologies of Pipe Wall Thinning," Proc. of ICCAS-SICE 2009 Joint International Conference, 2009 Fukuoka (2009, Aug.)
6. Daigo KOSAKA and Fumio KOJIMA, "Quantitative Evaluation of Corrosion Shape on Back Surface of SUS Samples by EMAT," Studies on Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 32 (2009) pp. 388-393.
7. Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Hiroshi YAMAGUCHI, "Sizing methodologies of pipe wall thinning and visualization of wave propagation by EMAT simulator in nuclear power plant," Studies on Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 33 (2010) pp. 111-118.
8. Fumio KOJIMA, Akinori FURUSAWA, Masayuki HIGUCHI, and Jun-ichi TSUBOTA, "Sizing methodologies of pipe wall-thinning arising in guided wave analyses," Proc. of Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo, Tokyo (2010, Oct.)

1.3 国内会議

[配管減肉予測・評価手法の精度向上]

1. 田子多明男, 黒田祐志, 辻義之, 久木田豊, "オリフィス直下の再付着点における流動場の可視化tと三次元速度の計測", 日本原子力学会 中部支部第 40 回研究発表会, 名古屋, 2008 年 12 月 9-10 日.
2. 田子多明男, 黒田祐志, 辻義之, 近藤昌也, 久木田豊, "配管減肉におけるオリフィス流動場の計測", 日本機械学会 2009 年度年次大会, 盛岡, 2009 年 9 月 13-16 日.
3. 近藤昌也, 田子多明男, 黒田祐志, 辻義之, 久木田豊, "壁面からバルク水中への物質伝達の測定", 日本機械学会 2009 年度年次大会, 盛岡, 2009 年 9 月 13-16 日.
4. 黒田祐志, 近藤昌也, 辻義之, 久木田豊, "配管内面の流動加速腐食現象に関わる壁面近傍の物質輸送機構に関する研究", 日本原子力学会 2009 年秋の大会, 仙台, 2009 年 9 月 16-18 日.
5. 田子多明男, 黒田祐志, 立松昌, 近藤昌也, 辻義之, 久木田豊, "配管減肉におけるオリフィス流動場の PIV 計測", 日本機械学会流体工学部門講演会, 名古屋, 2009 年 11 月 7-8 日.
6. 小城烈, 黒田祐志, 近藤昌也, 辻義之, "配管オリフィス下流における流動加速腐食

の物資輸送機構に関する研究”, 日本原子力学会中部支部 第 41 回研究発表会, 名古屋, 2009 年 11 月 30 日-12 月 1 日.
7. 黒田祐志, 小城列, 近藤昌也, 辻義之, “オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する研究:(1)電気化学法による側面近傍の物質伝達率の測定1”, 日本原子力学会「2010 年春の年会」, 茨城大学, 2010.3.26-28..
8. 小城烈, 黒田祐志, 辻義之, 近藤昌也, “オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する研究:(2)電気化学法による側面近傍の物質伝達率の測定 2, 日本原子力学会「2010 年春の年会」, 茨城大学, 2010.3.26-28..
9. 立松昌, 単峰, 辻義之, 近藤昌也, “オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する研究:(3)高 Re 数流動場における PIV 計測, 日本原子力学会「2010 年春の年会」, 茨城大学, 2010.3.26-28..
10. 古谷真伍, 近藤昌也, 辻義之, “オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する研究:(4)側面近傍流れにおける数値解析, 日本原子力学会「2010 年春の年会」, 茨城大学, 2010.3.26-28..
11. 近藤昌也, 辻義之, 黒田祐志, 小城列, "FAC による減肉位置における物質伝達係数", 日本機械学会 第 15 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 関西大学, 2011.6.28-24.
12. 辻義之, 立松昌, 単峰, 近藤昌也, 古谷真伍, "FAC による減肉位置における流動場の計測", 日本機械学会 第 15 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 関西大学, 2011.6.28-24.
13. 小城列, 黒田祐志, 近藤昌也, 辻義之, "オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する実験的研究", 日本保全学会 第 7 回学術講演会, 静岡大学, 2010.7.13-15.
14. 七條慎太郎, 古谷真伍, 近藤昌也, 辻義之, "オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する数値的研究", 日本保全学会 第 7 回学術講演会, 静岡大学, 2010.7.13-15.
15. 立松昌, 単峰, 辻義之, 近藤昌也, "配管減肉におけるオリフィス下流の PIV 計測", 日本機械学会 2010 年度年次大会, 名古屋工業大学, 2010.9.5-8.
16. 古谷真伍, 近藤昌也, 辻義之, "配管減肉におけるオリフィス流動場の数値的研究", 日本機械学会 2010 年度年次大会, 名古屋工業大学, 2010.9.5-8.
17. 黒田祐志, 小城列, 近藤昌也, 辻義之, "配管減肉におけるオリフィス下流の物質伝達率計測", 日本機械学会 2010 年度年次大会, 名古屋工業大学, 2010.9.5-8.
18. 黒田祐志, 小城列, 近藤昌也, 辻義之, "配管減肉予測および検査技術の高度化;(9)配管減肉予測評価式におけるオリフィス形状係数の定量化", 日本原子力学会「2010 年秋の大会」, 北海道大学, 2010.9.15-17.
19. 小城列, 黒田祐志, 近藤昌也, 辻義之, "配管減肉予測および検査技術の高度

化;(10)配管減肉予測評価式における粗面形状因子に関する考察", 日本原子力学会「2010 年秋の大会」, 北海道大学, 2010.9.15-17.

20. 立松昌, 単峰, 近藤昌也, 辻義之, , "配管減肉予測および検査技術の高度化;(11)配管減肉予測評価式における流動パラメータの実験的評価", 日本原子力学会「2010 年秋の大会」, 北海道大学, 2010.9.15-17.
21. 古谷真伍, 七條慎太郎, 近藤昌也, 辻義之, "配管減肉予測および検査技術の高度化;(12)配管減肉予測および検査技術の高度化", 日本原子力学会「2010 年秋の大会」, 北海道大学, 2010.9.15-17.
22. 単峰, 立松昌, 辻義之, , "Turbulent flow behind orifice in a circular pipe", 日本流体力学会年会 2010, 北海道大学,2010.9.9-11.

[液滴衝撃エロージョン(LDI)に対応した配管減肉評価手法の構築]

1. 服部修次,早川裕規,滝波誠,"A115 鉄鋼材料の液体衝撃エロージョン", 日本機械学会 第 13 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 札幌, 2008 年 6 月 19-20 日.
2. 服部修次,滝波誠,大谷友晃, "キャビテーションエロージョンと液体衝撃エロージョンの比較", キャビテーションに関するシンポジウム(第 14 回), 仙台市, 2009 年 3 月 19-20 日.
3. 服部修次,早川裕規,滝波誠,"J30 配管減肉予測および検査技術の高度化 14.液滴衝撃エロージョンに及ぼす衝突速度の影響", 日本原子力学会「2010 年秋の大会」, 北海道大学, 2010 年 9 月 15-17 日.
4. 中村隆太,服部修次,林崗,"J31 配管減肉予測および検査技術の高度化 15.液滴エロージョンに及ぼす液滴径の影響", 日本原子力学会「2010 年秋の大会」, 北海道大学, 2010 年 9 月 15-17 日.

[減肉配管の破壊モード評価法の高度化]

1. 辻将隆,イルワンヘルマン,日下貴文,飯井俊行, "広領域ひずみ計測技術の局部減肉配管破壊現象への適用", 日本機械学会北陸信越支部第 47 期総会・講演会, 新潟大学, 2010.3.10.
2. 桑水流理,小林直紀,モハマドカイリ イルワンヘルマン,辻将隆,日下貴文,ヌルハイマン, 飯井俊行, "減肉エルボ配管の内圧および面内曲げ崩壊挙動", 日本機械学会動力エネルギーシンポジウム, 東京, 2010.6.21-22.
3. 辻将隆,飯井俊行, "画像ひずみ計測による減肉配管の破壊挙動評価", 日本機械学会動力エネルギーシンポジウム, 東京, 2010.6.21-22.
4. 辻将隆,飯井俊行, "減肉配管の平面状/非平面状欠陥に適用可能な内圧破裂式の提案", 日本保全学会第 7 回学術講演会, 静岡大学,2010.7.13-15.
5. 辻将隆,飯井俊行, "減肉配管の破壊モード評価法の高度化(内圧破裂評価)", 日本原子力学会秋の大会, 北海道大学,2010.9.15-17.
6. 桑水流理,小林直紀,飯井俊行, "有限要素解析によるエルボ配管の内圧および面内

曲げ崩壊挙動評価", M&M2010 材料力学カンファレンス講演, 長岡市, (2010),
7. 伊藤嘉晃,飯井俊行, "減肉配管の有限要素解析結果に対する限界曲げ荷重評価基準の提案", 日本機械学会北陸信越支部第48期総会・講演会, 長野市, 2011.3.5. to be published.
8. 山田拓男,飯井俊行, "減肉直管の限界曲げ荷重下破壊モードの有限要素解析予測手法", 日本機械学会北陸信越支部第 48 期総会・講演会, 長野市, 2011.3.15.. to be published.
9. 石黒貴寛,飯井俊行, "減肉エルボ配管の面内・面外曲げ非比例負荷試験装置の開発", 日本機械学会北陸信越支部第 48 期総会・講演会, 長野市, 2011.3.15. to be published.
10. 辻将隆,飯井俊行, "減肉配管の平面状/非平面状欠陥に適用可能な破裂内圧実験式の解析による検証.", 日本原子力学会春の年会. 福井市: 日本原子力学会, 福井市, 2011.3.28-30. to be published.

[配管減肉の定量評価法の有効性検証-ガイド波による広域モニタリング手法の検証]

1. 西野 秀郎, 近藤 浩徳, 吉田 憲一 : 配管を伝搬するガイド波の効率的励起検出法 : 日本保全学会第4回学術講演会, 2007年7月.
2. 近藤浩徳、吉田憲一、西野秀郎 : 磁歪センサーと反射体におけるガイド波の反射と透過に関する検討 : 機械学会年次大会2008講演論文集 1 p335, 2008年8月
3. 小倉圭二、近藤浩徳、吉田憲一、西野秀郎 : 反射体を利用したガイド波励起検出法による欠陥検出性能の評価 : 機械学会年次大会2008講演論文集 1 p337, 2008年8月
4. 田中康浩、近藤浩徳、吉田憲一、西野秀郎 : ２つの磁歪センサと反射体を併用した高効率ガイド波励起法:機械学会年次大会2008講演論文集 1 p339, 2008年8月
5. 近藤浩徳、小倉圭二、田中康浩、吉田憲一、西野秀郎 : 反射体を用いたガイド波の高効率励起法に関する基礎的検討（磁歪センサー部と反射体におけるガイド波の反射率と透過率に関する考察）: 非破壊検査協会平成２０年度春季大会講演論文集p155
6. 西野秀郎、小倉圭二、吉田憲一 : 反射体を利用した高効率ガイド波励起検出法による欠陥の検出 : 2008年超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
7. 小倉圭二、吉田憲一、西野秀郎 : 反射体を用いたガイド波の高効率励起検出法による欠陥検出性能の検証 : 第16回超音波による非破壊評価シンポジウム2009, 講演論文集p47, 2009年1月
8. 増田修一、近藤浩徳、吉田憲一、西野秀郎 : 反射体を用いたガイド波の高効率励起法のメカニズムの基礎的検討～磁歪センサと反射体におけるガイド波の反射率と透過率の評価～ : 第16回超音波による非破壊評価シンポジウム2009, 講演論文集p103, 2009年1月
9. 田中康浩、近藤浩徳、吉田憲一、西野秀郎 : ２つのセンサーと反射体を利用した高効率ガイド波励起法 : 第16回超音波による非破壊評価シンポジウム2009, 講演論文集p105, 2009年1月
10. 小倉圭二、西野秀郎 : ガイド波多重反射エネルギー閉じ込め法による高感度

欠陥検出法：日本保全学会第6回学術講演会要旨集p64, 2009年8月
11. 田中康浩、小松豊和、吉田憲一、西野秀郎：管軸方向に対して斜めに導入した減肉欠陥におけるガイド波の欠陥検出性能評価：機械学会年次大会2009講演論文集 Vol.6 p449, 2009年9月
12. 小松豊和、田中康浩、吉田憲一、 西野秀郎：管軸長さ方向に漸増した減肉欠陥のガイド波による検出感度:機械学会年次大会2009講演論文集 Vol.6 p451, 2009年9月
13. 増田修一、田中俊郎、吉田憲一、西野秀郎：ガイド波のエルボ管における伝搬挙動と欠陥検出感度：機械学会年次大会2009講演論文集Vol.6 p455, 2009年9月
14. 小倉圭二、佐藤旭、吉田憲一、西野秀郎：ガイド波多重反射エネルギー閉じ込め法による欠陥検出性能向上の検討：機械学会年次大会2009講演論文集 Vol.6 p457, 2009年9月
15. 小松豊和、田中康浩、吉田憲一、 西野秀郎：管軸方向に漸増した減肉欠陥のガイド波による検出感度：第17回超音波による非破壊評価シンポジウム，講演論文集p41, 2010年1月
16. 溝渕裕貴，増田修一，吉田憲一，西野秀郎：T(0,1)モードガイド波を用いたエルボ管における欠陥検出性能評価：機械学会年次大会2010講演論文集Vol.6, p415, 2010年9月
17. 片島左帆里，吉田憲一，西野秀郎：T字管を伝搬するT(0,1)モードガイド波のモード変換：機械学会年次大会2010講演論文集Vol.6, p413, 2010年9月
18. 西野秀郎：配管減肉予測および検査技術の高度化：原子力学会2010秋の大会 Ｊ３７
19. 片島左帆里，吉田憲一，西野秀郎：T字管を伝搬するT(0,1)modeガイド波のモード変換：非破壊検査協会平成２２年度秋季大会講演論文集10月
20. 溝渕裕貴，増田修一，吉田憲一，西野秀郎：T(0,1)モードガイド波によるエルボ管に導入した欠陥の検出感度評価：非破壊検査協会平成２２年度秋季大会講演論文集10月

[配管減肉の定量評価法の有効性検証-配管減肉サイジングの高度化]

1. 小島　史男, 鳥越　誉史: 電磁超音波法による配管減肉検査シミュレータの開発: 日本保全学会　第 5 回学術講演会, 2007 年 7 月
2. 小坂　大吾, 小島　史男 : 電磁超音波法によるステンレス系配管の減肉サイジング : 第 20 回電磁力関連ダイナミクスシンポジウム, 2008 年 5 月.
3. 山口　紘史, 小島　史男 : 電磁超音波法による発電プラントの配管減肉検査シミュレータの開発: 安全工学シンポジウム 2008, 2008 年 7 月
4. 小坂 大吾, 小島 史男 : 電磁超音波による減肉の定量評価 : 日本保全学会

第 5 回学術講演会, 2008 年 7 月.

5. 小坂　大吾, 山口　紘史, 鳥越　誉史, 小島　史男: 電磁超音波による減肉管理手法の検討, 日本非破壊検査協会シンポジウム, 2008 年 10 月
6. 小坂　大吾, 小島　史男, 鳥越　誉史: EMAT を用いた減肉形状推定の検討: 第 17 回 MAGDA コンフェレンス, 2008 年 11 月
7. 山口　紘史, 小島 史男 ： 電磁超音波法のモデリングと原子力プラントの配管減肉診断への応用 ： 第 53 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI09) 2009 年 5 月.
8. NGUYEN Thanh Duong, 小島 史男 ： Sizing methodology of pipe wall thinning using inverse analysis with EMAT signal Sizing methodology of pipe wall thinning using inverse analysis with EMAT signal：日本保全学会第 6 回学術講演会, 2009 年 8 月.
9. 古澤　彰憲, 小島 史男：ガイド波検査シミュレータの構築とその配管減肉モニタリングへの応用：日本保全学会　第 6 回学術講演会, 2009 年 8 月.
10. 山口　紘史, 小坂 大吾, 小島 史男 ： 写像法を用いた電磁超音波による配管減肉計測シミュレータの開発 ： 日本保全学会　第 6 回学術講演会, 2009 年 8 月.
11. 小坂 大吾, 小島 史男, 山口　紘史 ：EMAT を用いた配管減肉寸法計測法：日本保全学会　第 6 回学術講演会, 2009 年 8 月.
12. 樋口　真之, 小島 史男 ： ガイド波による配管減肉状態監視のための高効率励起法の研究 ： 第 52 回自動制御連合講演会, 2009 年 11 月.
13. 小島 史男 :電磁超音波法とガイド波の組み合わせによる減肉配管の状態監視技術：シンビオ社会研究会　平成 21 年度技術交流会 2010 年 1 月.
14. 小坂　大吾, 小島 史男、梅谷 浩介 ： 電磁超音波共鳴法を用いた配管減肉計測: 第 22 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2010 年 5 月.
15. 小島 史男、古澤 彰憲、長谷 一輝: FDTD 法を用いたガイド波検査シミュレータの構築とその非破壊検査への応用 ： 日本保全学会　第 7 回学術講演会, 2010 年 7 月.
16. 植田 正裕、小島 史男、坪田 淳一 ： カルマンフィルタを用いた流れ加速型腐食による減肉進展予測モデルの構築: 日本保全学会　第 7 回学術講演会, 2010 年 7 月.
17. 小島 史男、小坂 大吾､梅谷 浩介 ： 電磁超音波共鳴法を用いた配管厚さ寸法計測のための信号処理法: 日本保全学会　第 7 回学術講演会, 2010 年 7 月.
18. 小坂　大吾, 小島 史男、梅谷 浩介 ： 流れ加速腐食を想定した配管厚さ測定への電磁超音波探触子の適用について: 日本保全学会　第 7 回学術講演会, 2010 年 7 月.

19.小島　史男, 小坂　大吾, 梅谷　浩介: 配管減肉予測および検査技術の高度化 (17) 電磁超音波法による配管減肉定量評価法の有効性検証: 日本原子力学会, 2010 年秋の大会, 2010 年 9 月

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

2.1 論文

[非線形高調波を用いた高散乱 Ni 基合金溶接部粒界 SCC の非破壊検査法に関する研究]

1. 川嶋紘一郎、ものづくりのための超音波非破壊評価・検査、養賢堂、pp137-138, 2009（著書：結果の一部を記載）
2. 川嶋紘一郎、阪上隆英、巨　陽、非破壊検査工学最前線、pp.60-61, 64,共立出版、2009（著書：結果の一部を記載）
3. S. Biwa, S. Hiraiwa and E. Matsumoto, Pressure-Dependent Stiffnesses and Nonlinear Ultrasonic Response of Contacting Surfaces, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 3, No. 1 (January 2009), pp.10-21
4. 林高弘,　村瀬守正,　川嶋紘一郎,　琵琶志朗, ポンピング波による亀裂開閉口を利用した非線形超音波非破壊検査, 非破壊検査 Vol.58 No.5, pp.196-201,2009
5. K, Kawashima, K, Sekino, K. Ichigo Higher Harmonic Imaging of Tight Cracks in Glass Plates and Weld Interface with Mode-Converted Transverse Waves Proc. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, 2008, pp.537-540

[３次元超音波探傷法による Ni 基合金溶接部の高精度サイジングに関する研究]

1. 古村一朗, 古川敬,「開口合成 3 次元超音波探傷法による Ni 基合金溶接部 SCC の探傷特性」, 発電設備技術検査協会技術レビュー, 第 6 巻（2010）, pp13-19

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

1. 砂川武義, 佐伯昭紀, 関修平“マイクロ波検出技術を用いた高分子材料への熱・放射線照射による経年劣化測定技術に関する研究（Ⅰ）”, 福井工業大学研究紀要第 40 号 pp.395-400 (2010)

2.2 国際会議

[非線形高調波を用いた高散乱 Ni 基合金溶接部粒界 SCC の非破壊検査法に関する研究]

無し

[３次元超音波探傷法による Ni 基合金溶接部の高精度サイジングに関する研究]

1. Ichiro Komura, "DMW inspection by real time 3D-SAFT technique",

KOREA-JAPAN JOINT WORKSHOP on Inspection and Mitigation of Dissimilar Metal Welds, Gyongju, Korea(July 1-3, 2009)

2. Ichiro Komura, Takashi Furukawa, "Improvement of SCC Detection and Depth Sizing Capability in Ni Alloy DMW by Real Time 3D-SAFT UT Technique", 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Berlin, Germany(September 29-30, 2010)

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

1. T.Sunagawa,A.Saeki,S.Seki“Non-contact Quantitative Micr-owave Detection of Radiation Induced Degradation of Polymers”,[ISaG2008] International Symposium on the Ageing Management and Maintenance of Nuclear Power Plants,Tokyo,July 24, 2008
2. T.Sunagawa,A.Saeki,S.Seki“Non-contact Quantitative Microwave Detection of Radiation Induced Degradation of Polymers Ⅱ”,[ISaG2010]- International Symposium on the Ageing Management and Maintenance of Nuclear Power Plants,Tokyo,May 27, 2010

2.3 国内会議

[非線形高調波を用いた高散乱 Ni 基合金溶接部粒界 SCC の非破壊検査法に関する研究]

1. 川嶋紘一郎、今西龍介、高調波によるニッケル基合金溶接部ＩＧSCC の画像化とサイジング、日本機械学会 2010 年次大会、2010
2. 福井妙佐，伊藤智啓，非線形超音波伝播解析による複数探触子の効果の検討，日本機械学会2010年次大会講演論文集Vol.1，pp. 63-64，2010
3. 川嶋紘一郎、今西龍介、異種材料継手模擬炭素鋼/SUS316L 試験体のバタリング部と突合溶接部内ＳＣＣの高調波画像化,日本非破壊検査協会平成 22 年度春期講演会, pp.65-66, 2010
4. 川嶋紘一郎、今西龍介、Ｎｉ基合金溶接部中の IGSCC の高調波画像化とサイジング,日本機械学会 2009 年次大会、pp.439-440, 2009
5. 川嶋紘一郎、今西龍介、高調波による Ni 基合金溶接部粒界ＳＣＣの画像化、日本非破壊検査協会平成 21 年度春期講演会, pp.65-68, 2009
6. 林高弘，村瀬守正，琵琶志朗，川嶋紘一郎，サイドバンドピーク測定による疲労き裂の検出 日本機械学会 2008年次大会，Vol.1 pp.341-342, 2008
7. 林高弘，村瀬守正， 川嶋紘一郎， 琵琶志朗，ポンピング波と基本波によるサイドバンドピークの発生を用いた疲労亀裂の検出，日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集 pp.3-4, 2008

[3次元超音波探傷法によるNi基合金溶接部の高精度サイジングに関する研究]

1. 古村一朗,「3 次元開口合成 UT 法による Ni 基合金溶接部の探傷特性改善と高温探傷への取り組み」、NDE シンポジウム 2010, 東京（2010 年 12 月）

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

1. 砂川武義, 佐伯昭紀, 関修平“マイクロ波誘電吸収法による高分子材料の劣化評価”, 第 53 回日本放射線化学討論会, 名古屋, 2010 年 9 月 21-23 日
2. 砂川武義, 田中健司, 佐伯昭紀, 関修平“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の評価手法開発(2)”, 日本化学会第 90 春季年会, 東大阪, 2010 年 3 月 26-29 日
3. 砂川武義, 佐伯昭紀, 関修平“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の評価手法開発”, 日本化学会第 89 春季年会, 東京, 2009 年 3 月 27-30 日
4. 砂川武義, 田中健司, 小林茂樹, 林　賢太, 廣本和也 “マイクロ波誘電吸収法による高分子材料の経年劣化評価”, 日本保全学会第 5 回学術講演会,水戸,2008 年 7 月 10-12 日.

3. 溶接補修技術に関する研究(高経年化プラントの補修における溶接健全性評価技術および補修後溶接部における信頼性評価技術に関する研究)

3.1 論文

1. Kazuyoshi SAIDA, Kenji OHTA and Kazutoshi NISHIMOTO : "Microcracking Susceptibility in Dissimilar Multipass Welds of Alloy 690 to Type 316L Stainless Steel using La added Filler Metals", Science and Technology of Welding and Joining, Vol.12 No.7 (2007), p.594-603.
2. S. Itoh, H. Noda, M. Shibahara, K. Masaoka, “Development of Temperature Dependent Interface Element for 3D Welding Hot Cracking Problems”, Mathematical Modelling of Weld Phenomena 8 (2007), PP. 153-164.
3. H. Nishikawa, H. Serizawa and H. Murakawa, “Actual Application of FEM to Analysis of Large Scale Mechanical Problem in Welding”, Science and Technology of Welding and Joining Vol.12, No.2 (2007), pp.147-152.
4. Kazuyoshi SAIDA, Masashi SAKAMOTO and Kazutoshi NISHIMOTO : "Mechanical Approach for Prediction of Microcracking in Multipass Weld Metal of Ni-Base Alloy 690 ", Advanced Welding and Micro Joining / Packaging for the 21st Century, Materials Science Forum, Vol.580-582 (2008), p.1-4.

5. Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA, Masashi SAKAMOTO and Wataru KONO："Effect of Filler Metal La Additions on Microcracking in Multipass Laser Overlay Weld Metal of Alloy 690", Hot Cracking Phenomena in Welds II, ed. by H.Herold, C.E.Cross and J.C.Lippold, Springer-Verlag, (2008), p.389-408.
6. Dean Deng, Hidekazu Murakawa and Wei Liang, “Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe”, Computational Materials Science Vol.42, No.2 (2008), pp.234-244.
7. Hiroya Masaki, Tomo Saito, Fahmi Azhari Mukhlis and Shinji Fujimoto : Initial Stage of SCC of Type 316L Stainless Steel in High Temperature and High Pressure Aqueous Solution, ECS Transactions, Vol.16 [52], pp227-231 (2008).
8. Kazuyoshi SAIDA, Akira TANIGUCHI, Masashi SAKAMOTO and Kazutoshi NISHIMOTO ： "Effect of Ce Addition to Filler Metal on Microcracking Susceptibility of Alloy 690 Multipass Weld Metal", Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.27 No.2 (2009), p.144s-148s.
9. A. Maekawa, M. Noda, S. Takahashi, T. Oumaya, H. Serizawa and H. Murakawa, “Evaluation of Residual Stress Distribution in Austenitic Stainless Steel Pipe Butt-Welded Joint”, 溶接学会論文集 Vol.27, No.2 (2009), pp.240s-244s
10. Tomo Saito, Hiroya Masaki, Fahmi A. Mukhlis and Shinji Fujimoto : “Crystallographical Characterization of Stress Corrosion Cracking Initiation on Type316L Stainless Steel in High Temperature and High Pressure Water”, Journal of Physics; Conference Series Vol. 165, No.012037, (2009).
11. Kazuyoshi SAIDA, Yuki NOMOTO, Hironori OKAUCHI, Hiroyuki OGIWARA and Kazutoshi NISHIMOTO："Influences of Phosphorus and Sulphur on Ductility-Dip Cracking Susceptibility in Multipass Weld Metal of Alloy 690", Science and Technology of Welding and Joining, 掲載予定.

3.2 国際会議

1. Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA, Masashi SAKAMOTO and Wataru KONO："Effect of La Addition to Filler Metal on Microcracking in Multipass Laser Overlay Weld Metal of Alloy 690", 2nd International Workshop "Hot Cracking Phenomena in Welds", March (2007), Berlin

(Germany).
2. Kazuyoshi SAIDA, Masashi SAKAMOTO and Kazutoshi NISHIMOTO : "Mechanical Approach for Prediction of Microcracking in Multipass Weld Metal of Ni-Base Alloy 690", International Welding/Joining Conference-Korea 2007 (IWJC-Korea 2007), May (2007), Seoul (Korea), p.24-25.
3. Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA and Wataru KONO : "Mechanism and Improvement of Hot Cracking in Welds of Inconel 690", Proceedings of the International Symposium on Research for Aging Management of Light Water Reactors, October (2007), Fukui City (Japan).
4. M. Mochizuki, R. Higuchi, Y. Mikami and M. Toyoda : Evaluation of Heterogeneity of Microscopic Deformation and Stress Distribution in Steel and Its Weld by FEM-MD Coupling Simulation, 60th Annual Assembly of the International Institute of Welding, IIW Doc. X-1617-07, Dubrovnik, Croatia 2007
5. Shinji Fujimoto Masahiko Kubo, Fahmi A. Mukhlis, Nobuhiro Tsuji, Takumi Haruna and Sigeo Nakahigashi, : “SSRT Study on SCC of Cold Rolled Type316L Stainless Steels in High Temperature Aqueous Solution”, Prfesented at Workshop on Cold Work in Iron- and Nickel-Base Alloys Exposed to High Temperature Water Environments, June 3-8, (2007), Ontario, Canada.
6. Kazuyoshi SAIDA, Akira TANIGUCHI, Masashi SAKAMOTO and Kazutoshi NISHIMOTO : "Effect of Ce Addition to Filler Metal on Microcracking Susceptibility of Alloy 690 Multipass Weld Metal", Proceedings of the 8th International Symposium of the Japan Welding Society, November (2008), Kyoto (Japan), p.255.
7. Ryosuke Uraguchi, Yoshiki Mikami, Ryota Higuchi, Masahito Mochizuki and Masao Toyoda : A 3-D Analytical Study of the Microscopic Stress Distribution Considering the Heterogeneity of Microscopic Structure of Steel, Proceedings of 8th International Welding Symposium, p. 285 2008
8. Tomo Saito, Hiroya Masaki, Fahmi A. Mukhlis and Shinji Fujimoto : “Crystallographical Characterization of Stress Corrosion Cracking Initiation on Type316L Stainless Steel in High Temperature and High Pressure Water”, Presented at International Conference on Advanced Structural and Functional Materials Design 2008”, 10-12 November 2008,

Osaka, Japan

9. Shinji Fujimoto, Hiroya Masaki and Tomo Saito : “Effect of Surface Finish and Micro Metallographic Condition on the Initiation of Stress Corrosion Cracking of Type316L Stainless Steel in High Temperature and High Pressure Aqueous Solution”, Presented at Workshop on Detection, Avoidance, Mechanisms, Modeling, and Prediction of SCC Initiation in Water-Cooled Nuclear Reactor Plants, September 7-12 (2008), Beaune, Burgundy, France.
10. Hiroya Masaki, Tomo Saito, Fahmi Azhari Mukhlis and Shinji Fujimoto : “Initial Stage of SCC of Type 316L Stainless Steel in High Temperature and High Pressure Aqueous Solution”, Presented at 214th Electrochemical Society Fall Meeting, 12-17 October, 2008, Honolulu, USA
11. Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA and Yasuyuki FUJIYA : "Amelioration of Micro-cracking in Multipass Weld Metal of Alloy 690 by Adding Rare Earth Metals", 2009 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77235, July (2009), Prague (Czech Republic).
12. Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA, Yuki NOMOTO and Akira TANIGUCHI："Role of Sulphur and Phosphorus on Ductility-Dip Cracking in Multipass Weld Metal of Alloy 690", IIW Intermediate Meeting of Sub-Commission IX-H, Doc. IX-H-728-10, March (2010), Columbus, Ohio (USA).
13. Kazutoshi NISHIMOTO and Kazuyoshi SAIDA : "Recent Topics of Weldability of Materials for Nuclear Plants, -Hot Cracking Issues of Stainless Steels and Ni base alloys-", Proceedings of IURS2010 (The Inter-University Research Seminar 2010), May (2010), Busan (Korea), p.1-5.
14. Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA, Yuki NOMOTO, Akira TANIGUCHI and Hironori OKAUCHI："Prevention of Microcracking in Multipass Welds of Alloy 690 and Dissimilar Multipass Welds of Alloy 690 to Type 316L Stainless Steel", Welding and Repair Technology for Power Plants, Ninth International EPRI Conference, June (2010), Fort Myers, Florida (USA).
15. Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA, Yuki NOMOTO, Akira TANIGUCHI and Hironori OKAUCHI："Role of Sulphur and Phosphorus on Ductility-Dip Cracking in Multipass Weld Metal of Alloy 690", IIW Doc.

IX-2332-10, IX-H-728-10, July (2010), Istanbul (Turkey).

16. Kazuyoshi SAIDA, Yuki NOMOTO, Akira TANIGUCHI, Hironori OKAUCHI and Kazutoshi NISHIMOTO："Improvement of Microcracking Susceptibility in Dissimilar Multipass Weld Metal of Alloy 690 to Type 316L Stainless Steel by using Ce-Containing Filler Metal", MS&T '10 (Materials Science & Technology 2010 Conference & Exhibition), October (2010), Houston, Texas (USA).
17. Hironori OKAUCHI, Yuki NOMOTO, Hiroyuki OGIWARA, Kazuyoshi SAIDA and Kazutoshi NISHIMOTO ： "Metallurgical Mechanism of Ductility-Dip Cracking in Multipass Welds of Alloy 690", The International Symposium of Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW2010), 11-12th November (2010), Osaka (Japan) .
18. Y. Mikami, R. Uraguchi, K. Sogabe and M. Mochizuki : SCC Prediction in Weld Components by Multi-scale Analysis Incorporating Crystal Plasticity, 9th International Seminar Numerical Analysis of Weldability, Graz-Seggau, Austria, Paper No. 27903, 2010

3.3 国内会議

1. 西本和俊，才田一幸，坂本　昌，河野　渉：“MA690 合金レーザ肉盛溶接部のミクロ割れに及ぼす La 添加の影響”，溶接学会　平成 19 年度春季全国大会〈溶接学会全国大会講演概要　第 80 集　(2007)　p.84-85〉.
2. 才田一幸，坂本　昌，西本和俊：“Ni 基合金多層盛溶接部における延性低下割れ発生予測”，溶接冶金研究委員会資料　WM-2018-07，(2007)　＜溶接学会＞.
3. 才田一幸，坂本 昌，谷口 彰，西本和俊：“690 合金多層盛溶接金属のミクロ割れ感受性に及ぼす Ce 添加の影響”，溶接学会　平成 20 年度秋季全国大会〈溶接学会全国大会講演概要　第 83 集　(2008)　p.372-373〉.
4. 才田一幸，谷口　彰，野本裕己，西本和俊：“690 合金多層盛溶接金属のミクロ割れ感受性に及ぼす不純物元素の影響”，溶接学会　平成 21 年度秋季全国大会　〈溶接学会全国大会講演概要　第 85 集　(2009)　p.188-189〉.
5. 正木博也，斉藤　知，Fahmi A. Mukhlis，土谷博昭，藤本慎司：Type316L 鋼の高温高圧水中低ひずみ速度試験における応力腐食割れ発生挙動，第 55 回材料と環境討論会，2008 年 9 月 17-19 日
6. 才田一幸，西本和俊：“690 合金多層盛溶接金属のミクロ割れ発生挙動”，溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集，溶接構造研究委員会　(2009)　p.633-640　＜溶接学会＞.

7. 三上欣希, 曽我部恵典, 浦口良介, 望月正人：応力腐食割れ発生に及ぼす微視的応力の影響に関する数値解析的検討,溶接学会　平成 21 年度春季全国大会、溶接学会全国大会講演概要 第 84 集, (2009), pp.352-353
8. 曽我部恵典, 三 欣希, 倉敷哲生, 望月正人:マルチスケール解析手法による溶接部の微視的残留応力分布特性の検討,溶接学会　平成 21 年度春季全国大会、溶接学会全国大会講演概要 第 84 集, (2009), pp.34-35
9. 三上欣希, 浦口良介, 曽我部恵典, 望月正人, 藤本慎司：溶接部の不均質材料組織を考慮した微視的残留応力分布特性の評価, 溶接学会　平成 21 年度春季全国大会、溶接学会全国大会講演概要 第 84 集, (2009), pp.36-37-118
10. 斉藤　知, 森田裕也, 藤本慎司：冷間加工した低炭素ステンレス鋼の高温高圧水中における応力腐食割れ発生挙動, 溶接構造シンポジウム 2009, 2009 年 11 月 17, 18 日
11. 森田裕也, 正木博也, 斉藤　知, 土谷博昭, 藤本慎司：高温高圧水環境における Alloy600 の粒界応力腐食割れ発生挙動, 第 56 回材料と環境討論会, 2009 年 9 月 28-30 日
12. 斉藤　知, 森田裕也, 藤本慎司：高温高圧水中における低炭素ステンレス鋼の粒内および粒界応力腐食割れ発生挙動」, 日本金属学会 2009 年 秋 期 大 会, 2009 年 9 月 15-17 日
13. 才田一幸, 谷口　彰, 野本裕己, 西本和俊：“Ce 添加による 690 合金/316L ステンレス鋼異材多層盛溶接部のミクロ割れ抑制”, 溶接学会　平成 22 年度春季全国大会　〈溶接学会全国大会講演概要　第 86 集　(2010)　p.74-75〉.
14. 才田一幸, 野本裕己, 谷口　彰, 西本和俊：“690 合金多層盛溶接金属のミクロ割れ発生および REM 添加によるその抑制”, 溶接冶金研究委員会資料 WM-2139-10, 溶接法研究委員会資料　SW-3316-10, JIW 第 IX 委員会資料 JIW-IX-730-10, (2010)　＜溶接学会＞.
15. 才田一幸, 野本裕己, 岡内宏憲, 荻原寛之, 西本和俊：“690 合金多層盛溶接金属のミクロ割れ感受性と REM 添加によるその改善”, 溶接冶金研究委員会創設 50 周年記念シンポジウム「溶接冶金研究の進歩とイノベーション」講演論文集（2010）p.32-35.
16. 森田裕也, 土谷博昭, 藤本慎司：PWR 模擬環境における Ni 基合金の粒界応力腐食割れ, 日本金属学会 2010 年秋期大会, 2010 年 9 月 27-29 日
森田裕也, 正木博也, 斉藤　知, 土谷博昭, 藤本慎司：高温高圧水環境における Ni 基合金の粒界応力腐食割れ発生挙動, 日本金属学会 2010 年春期大会, 2010 年 3 月 28-30 日

4. 主要構築物の劣化に関する研究

4.1 論文

1. 松田 紗弥，島田 崇博，大野 義照，岸本 一蔵：“曲げひび割れを有するコンクリートの中性化に関する実験的研究”，コンクリート工学年次論文集，第 30 巻 3 号，pp.657-662，(2008)

4.2 国際会議

1. Ichizo Kishimoto, Progress of Neutralization at Inner Part of Cracked Concrete Specimens, ISaG2010 proceedings
2. Ichizo Kishimoto, Experimental Study on the Corrosion Condition of Steel Bars in Cracked Reinforced Concrete Specimen, ISaG2010 proceedings

4.3 国内会議

1. 松本行平・岸本一蔵・大野義照，“コンクリートのひび割れ部における中性化進行に関する研究”，日本建築学会学術講演梗概集（東北），C-2　pp.761-762
2. 松本行平・岸本一蔵・大野義照，“ひび割れのある鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食状態に関する実験的研究”，，日本建築学会学術講演梗概集（北陸），C-2 pp.1305-1306