

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

The Research Project on Technical Information Basis for Aging Management in Fukui and Kinki Area

藤村 公也 (Kimiya Fujimura)*¹ 渡海 親衛 (Chikae Watarumi)*² 藤堂 二彦 (Tsugihiko Toudou)*¹

概要 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。

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つの分野から選定した。

- 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」という）による研究の実施母体として、域内の大学、研究機関、電気事業者やメーカーと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19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7件、検査技術関連で4件、補修溶接および主要構築物について各1件、計13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 FY2007, 13 research subjects were proposed for this project and all were accepted. Of these, 7 subjects were related to the first topic (pipe thinning), 4 subjects were related to the second topic (inspection technique) and 1 subject was related to each of the other two topics (weld repair & main structures). All were completed, fulfilling the requirements and expectations.

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

* 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

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。

このような社会的要請の中で、INSSは福井地域を基盤とした近畿圏連携（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、電気事業者やメーカーと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ている。このような大規模な公的事業の受注はこの事業が始めてであり、目標成果の達成はもとより、そのための事業運営ノウハウの取得も、今後の事業基盤強化上重要な課題となった。

このようなことから本報告では、平成19年度事業

の成果と共に、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19年度テーマ4件を、その目的と共に示す。

- ①技術情報の基盤整備：事業全体を総合的・俯瞰的にとらえつつ、産学官が連携して実施する研究成果に基づき、高経年化対策のための技術情報の整備を図る。
- ②健全性に関する評価手法等：原子炉圧力容器鋼の中性子照射脆化に関する現行評価手法の妥当性評価を行うとともに、ケーブルの劣化挙動のより定量的な評価や監視・診断手法の適用性、炉内構造物および配管における応力腐食割れに関する評価手法の妥当性を判断するための技術基盤を形成する。
- ③経年劣化挙動の解明等：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の劣化現象の究明を行う。
- ④経年劣化事象における進展予測手法の解明等：

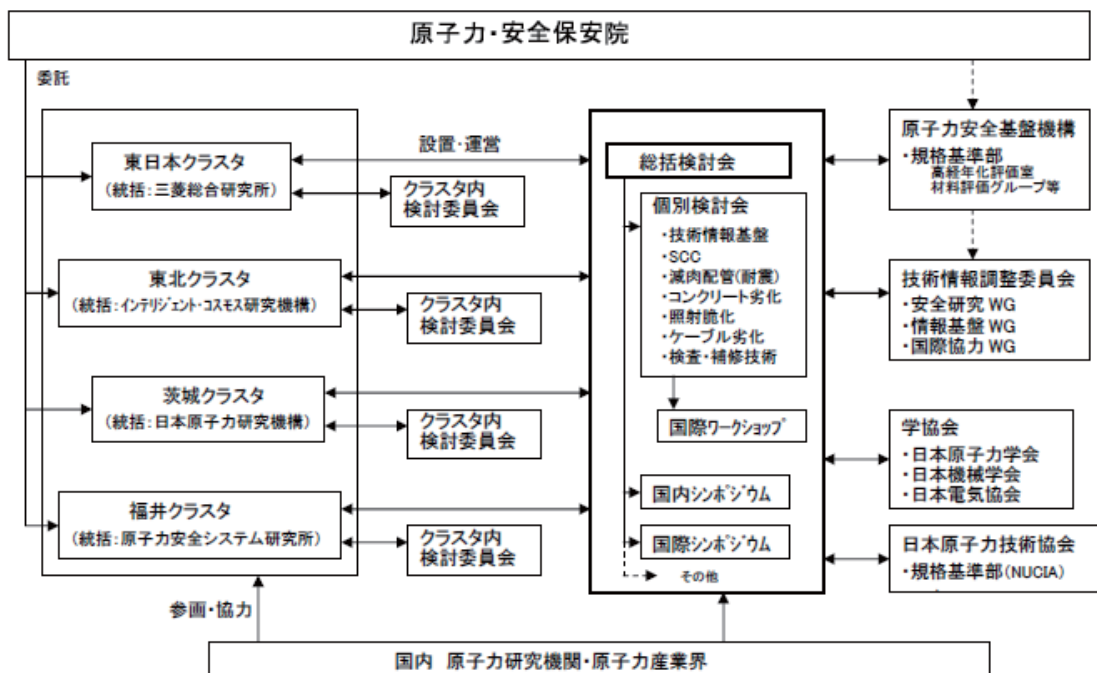


図1 高経年化対策強化基盤整備事業の実施体制

原子力発電設備の経年劣化対策について、経年劣化事象の進展予測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により、科学的合理性を持った安全規制に資する。

これらのうち、INSSが福井地域コンソーシアム代表として受注したのが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（東京クラスター）、②（特）日本原子力研究開発機構（茨城クラスター）、③（株）インテリジェント・コスモス研究機構（東北クラスター）機構の取り纏めとなった。また、これらのクラスター相互間の情報の共有や研究内容の調整等の概要は図1に示す通りである。

3. 研究課題と実施体制

前述の通り、福井クラスターの平成19年度受託研究テーマは「経年劣化事象における進展予測手法の解明等」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、多くの原子力発電設備が立地し、近隣の近畿圏を含め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すことを考慮した。最終的には表1に示すように、下記の4分野について、合計13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。

- 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

表1 平成19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	a. 配管減肉における物質伝達機構関する試験・解析・調査	名古屋大大学院	久木田豊教授
		b. 電気化学反応と水素に着目した原子力発電所配管の減肉挙動の検討	福井工大	羽木秀樹教授
		c. 材料組成に注目した原子力発電所配管の減肉挙動の検討	福井大大学院	岩井善郎教授
	(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. 配管減肉の定量評価法の有効性検証(配管サイジングの高度化)	神戸大大学院	小島史男教授	
	b. 配管減肉の定量評価法の有効性検証(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	
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) 溶接部の高精度ハイブリット非破壊検査技術の評価法開発		京都大大学院	松本英治教授
	(2) 高調波によるNi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	a. 高調波によるNi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) (名古屋工科大学院)	川嶋紘一郎所長 (琵琶史郎准教授) (伊藤智啓准教授)
		b. ニッケル基合金溶接部のSCC深さサイジング3次元超音波探傷技術の確立	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の評価手法開発	福井工大 大阪大	砂川武義准教授 関修平准教授		
3) 溶接補修技術に関する研究	(1) 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		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	大野義照教授

* () は他機関研究協力者（同一機関内研究協力者は記載省略）

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

また、専門性の活用と連携を図るため、個別研究実施者、INSSを含む関係各組織の専門家で構成するクラスター内検討委員会を設置し、事業の計画、実施内容及びその成果等に関する検討会を開催した。

この検討会では、独立行政法人原子力安全基盤機構や本事業関係の他クラスター代表者の随意オブザーバー参加を得て、事業関係者間の情報共有を図った。

このような福井クラスター内の事業活動の全体像を図2に示す。

これらの活動に加え、前節で紹介した平成19年度高経年化対策強化基盤整備事業全体に係る東日本クラスター主導の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積極的に参加し、研究動向把握や情報交流に努めた。

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、各研究担当者からの報告書について、研究内容の確認と共に当初事業計画との整合性や本事業で購入した機器の使用の適確性の吟味・確認を行い、研究成果に対する事業統括者としての見方を反映することを心掛けた。

4. 研究内容および成果の概要

ここでは、各研究課題について、内容および成果の概要を紹介する。

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基礎情報の収集を行うもので、このために以下の4つの研究が実施された。

① 配管減肉予測・評価法の精度向上

オリフィス下流のような複雑な流れ場に特有な乱流変動成分が減肉機構の重要な要素である物質伝達に及ぼす影響に着目し、電気化学的手法を導入した流動実験装置を作製し、局所物質伝達率測定実験(図3)が行われた。その結果、限界電流法によって求めた物質伝達率が理論値と良好に一致すること、物質伝達を行わせる作用電極に隣接する電極によって濃度境界層を定量的に検出できること等が確認された。また、数値シミュレーション解析を実施し、高シュミット数条件下では濃度境界層厚さが速度境界

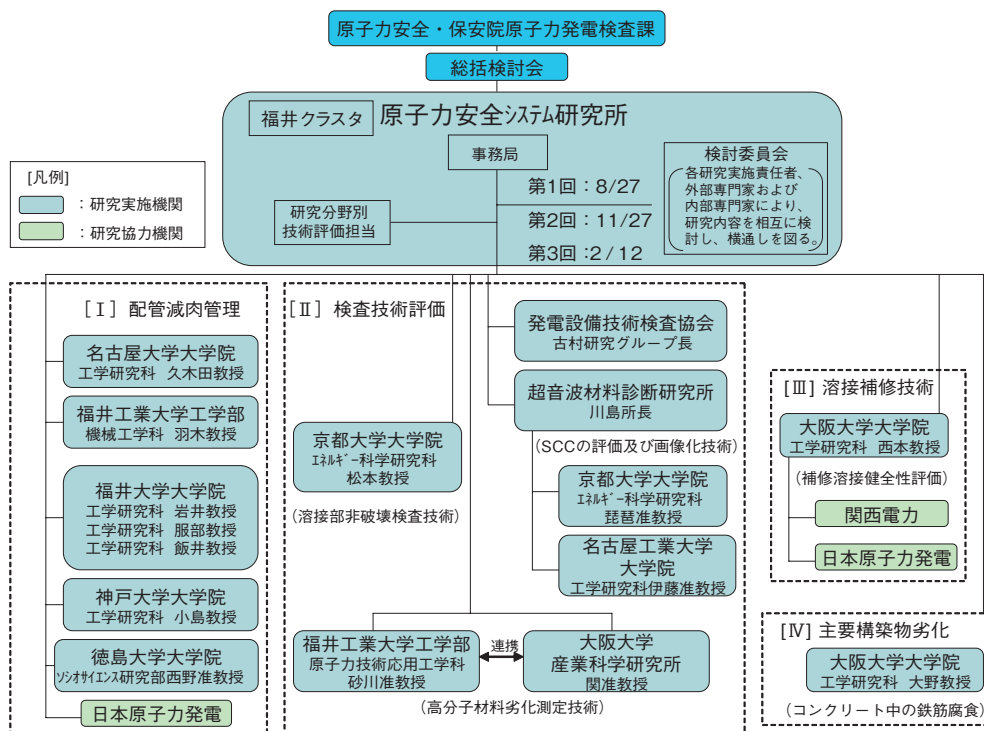


図2 高経年化対策強化基盤整備事業活動の全体像

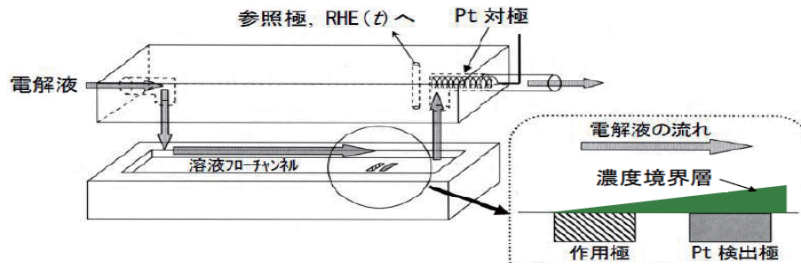


図3 物質伝達試験部電極配置

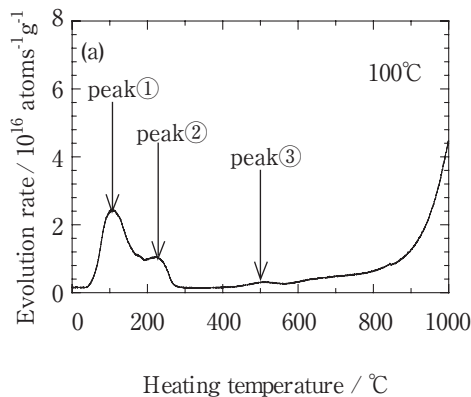


図4 熱処理後の炭素鋼の水素昇温脱離スペクトル(例)

層の数分の一となり、壁面ごく近傍の粘性底層内の流れ場が物質の対流拡散速度を決定することや、粘性底層内の流れ場は、濃度境界層厚さの10倍程度の規模を持つ組織構造を含んでおり、これが物質の対流拡散を促進していることが明らかになった。

さらに、電気化学反応が減肉挙動に及ぼす影響を明らかにするため、水素分析法を導入した流動実験等により、組織の異なる0.19% C炭素鋼の水素分析法として昇温脱離法が適用できること(図4)や、0.19% C炭素鋼中の常温では放出されない水素固溶体の濃度の測定により、炭素鋼表面での腐食反応機構を検討できる可能性があることが明らかになった。また、0.19% C炭素鋼、SUS304ステンレス鋼に水素を注入すると腐食反応が変化することが分かった。これは、流動加速腐食(Flow Accelerated Corrosion: FAC)等の腐食反応を検討する際に固溶水素の存在を考慮する必要性を示唆するものと考えられる。

また、材料組成が減肉機構に及ぼす影響を明らかにするための、炭素鋼中の微量化学成分で

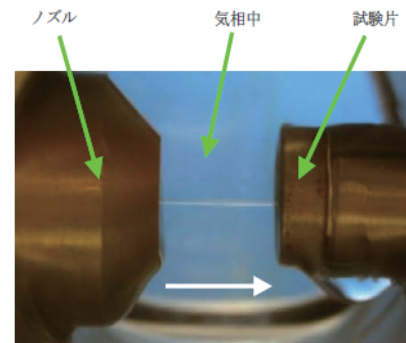


図5 液滴衝撃エロージョン試験

あるCr, Ni, Cuに着目した減肉加速試験により、これらの微量化学成分が減肉量の抑制に有効であること、その程度はCrが顕著であることが確認された。

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

液滴衝撃エロージョン試験装置を用いた、炭素鋼配管相当材料S15C及びステンレス鋼配管相当材料SUS304についての液滴衝撃エロージョン試験により(図5)、液滴衝撃エロージョン速度は、本研究の範囲ではスタンドオフ距離に依存しないこと、S15C及びSUS304のエロージョン速度に及ぼす流速の影響、および上記両材料の損傷の発生しない限界流速は、それぞれ80m/s, 120m/sであること等が確認された。また、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた試験片の観察を通して、S15C及びSUS304エロージョン過程が明らかになり、その結果と別途取得済みのテーション壊食試験片の観察結果との比較により、既に壊食速度の相関性は認められている⁽¹⁾液滴衝撃エロージョンとキャビテーション壊食機構に類似性が有ることが確認された。

③ 減肉配管の破壊モード評価法の高度化

直管試験体を用いた減肉配管内圧破裂試験

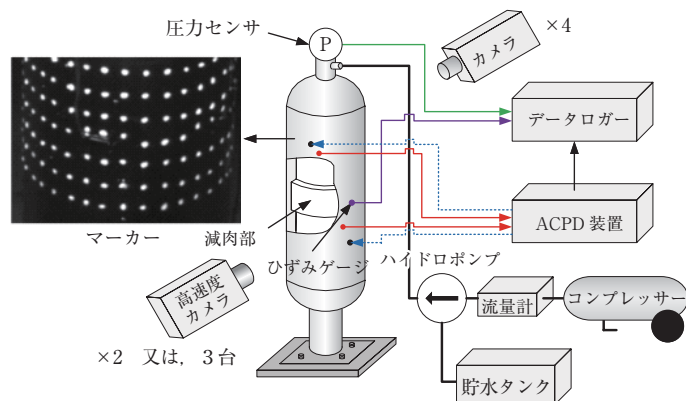


図6 減肉配管内圧破裂試験システム概要

(図6) および有限要素解析 (Finite Element Analysis : FEA) を通して、実測肉厚データを反映した3次元解析モデルを高精度破裂内圧予測に適用することの有効性、および降伏後のひずみ比の挙動により破壊モードの予測ができることが確認された。また、試験結果とFEA結果でひずみ比の挙動に違いがあるケースについての改善点も明らかになった。

さらに、高速度カメラの映像により、減肉形状によっては周方向割れが生じることや、き裂長さは破壊モード(軸方向割れ、周方向割れを含む割れ)に影響されることが明らかにされた。また、FEAによる破裂位置の特定の可能性が確認できたことは、今後の検討の方向性を考える上で重要である。加圧停止中の圧力変動のほとんどない状態でも破裂が生じること、また、その際に交流電位差法装置による試験モニタリング結果に変化が現れることが確認された。これにより、通常運転時には内圧の変動が殆ど無い発電プラントにおいても、交流電位差法装置を用いたモニタリングを通して破裂時期の予測が可能となる見通しが明らかになった。

その他、配管の詳細な変形挙動観察のため開発した3次元ひずみ計測システムの配管破裂現象への適用可能性や、内圧による配管破裂現象はき裂発生点の膨らみが他の箇所比べて徐々に大きくなる非均一な膨張であること等が確認された。さらに、FEA結果より減肉配管の破裂のクライテリオンとなりうることを示唆された相当塑性ひずみを、この3次元ひずみ計測システムにより評価できる可能性が明らかとなった。また、文献調査を通して、将来の規格の議論に

必要と考えられる、ASME⁽²⁾での non-planar flaw (非平面状欠陥:いわゆる減肉一必要最小肉厚による管理) と planar flaw (平面状欠陥:溝状の欠陥) の分類に、本研究が貢献できる可能性も確認された。加えて、さらなる知見の充実に向けて、エルボ管試験体を設計・開発、および内圧破裂予備試験も実施された。

④ 配管減肉の定量評価法の有効性検証

本研究は、超音波ガイド波を用いた減肉測定広域モニタリングシステム関連と電磁超音波探触子 (Electro Magnetic Acoustic Transducer : EMAT) による減肉サイジング関連の2つからなっている。

減肉測定広域モニタリングシステムに関する研究では、周方向8チャンネル、軸方向2列で合計16チャンネルのセンサ・エレメントから成る多チャンネル圧電センサシステムの構築、およびこれを用いた高次モード利用の欠陥の検出実験が行われた。その結果、周方向の減肉欠陥位置の同定の可能性が示され、また高次モードにおいても高効率ガイド波励起検出効果が発現することが明らかになった。さらに、この圧電システムと既存の磁歪システムの両システムによるガイド波法の比較検討により、ともに断面欠損率0.5%程度の最小減肉欠陥検出感度を有していること、最小検出効率が反射体の有無によらないことが明らかになった。また断面欠損率1%以上では、反射体を用いることで概ね2倍から2.5倍の検出効率向上が図れることが確認された。一方で、磁歪システムではS/Nが圧電式に比較して半分程度となる結果も得られている。また、高い励起効率の向上を目指す手法

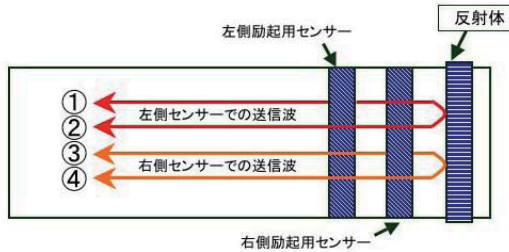


図7 2段増幅法と反射体を利用した高効率励起法（原理図）

として、励起用センサを2段利用して励起効率を向上させる方法（2段増幅法）⁽³⁾に反射体を併用した方法（2段反射体併用法：図7）を考案し、両システムに適用した結果、共にセンサ単体での振幅に対し3.6～3.7倍の最大増幅効果が確認されている。さらには、微小欠陥に対する検出感度と検出検査範囲の広さとが相反関係にあるガイド波によるモニタリング手法の有効な利用法として、新たに考案した2個の反射体を設置しそれらに挟まれる範囲を検査対象とする多重反射エネルギー閉じ込め法の、中域モニタリングシステムへの適用可能性も確認されている。

また、欠陥形状によるガイド波の検出性能の評価、複雑形状部を含んだ配管部位における欠陥検出性能の評価、および中域モニタリング手法の確立のための基礎評価等の今後の課題も明らかにされた。

EMATによる減肉サイジングに関する研究では、任意の部分減肉形状の検査法のシミュレーションが可能のように改良したシミュレータとテストベッドを用いて、形状モデリングによる配管減肉サイジングの高度化を目的とした検証が実施された。まず、シミュレータで減肉サイジング検査に有効な信号を検討し、減肉の中心位置および長さの推定には第1反射波のピーク電圧、深さの推定には第1反射波と第2反射波のピーク時間間隔が有効であることが確認され、引き続いてシミュレーションによる検証結果を基に、試験体を用いた検証実験が行われた。また、コイル径を小さくしたフレキシブル・センサを製作し、これを用いることによりサイジング精度の向上が図れることが実験で確認された。これらの結果から、EMATの減肉位置および長さについての定点監視への適合性が明らか

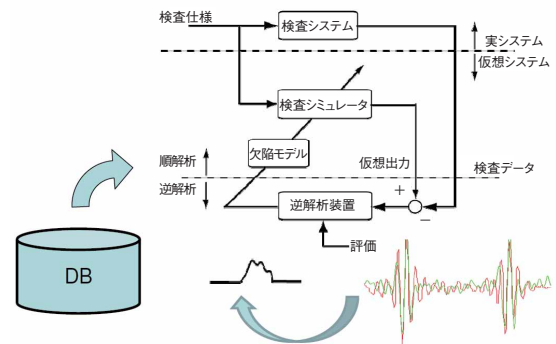


図8 減肉診断データベース利用検査システム

になった。なお、減肉深さの同定については使用した直角センサの感度が不十分で減肉形状によってはS/N比が落ちることが明らかになったが、その原因は裏面からの反射情報の不測であることが解析で確認された。これは実機適用に向けての重要な検討課題と考えられる。さらに、シミュレータ解析や実験で得られ知見をもとに、実用性の観点からオンラインで配管減肉形状同定を可能とする検査システム構築（図8）のための欠陥情報と検査データに関するデータベース、およびこれを活用するためのPOD（Proper Orthogonal Decomposition）法を用いた、計算次元を飛躍的に減少させた逆問題解析技法に基づく形状復元解析アルゴリズム構築され、これが数秒程度の短時間で98%以上の精度で非常に高い信頼性を持つことが確認された。

これらは、減肉サイジング法の性能向上と診断データベースの充実や、EMATによる定点監視技術とガイド波による広域監視技術との組み合わせ運用に向けてのシミュレーション技術の統合といった、今後の実用化の方向性を考える上で有益な成果である。

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

この研究は、原子力発電所の容器・配管に用いられているNi合金・ステンレス鋼溶接部に発生し得るSCC（Stress Corrosion Cracking：応力腐食割れ）を極めて高感度、高精度で検出、サイジングできるよう企図した非破壊検査技術、および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企図した診断技術について、それらの妥当

性を評価するものであり、得られた成果を整備することで、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としている。このために実施された4つの研究の概要を以下に示す。なお、最初の3件はSCCサイジングに、最後の1件がケーブル劣化に関連するものである。

① 溶接部の高精度ハイブリット非破壊検査技術の評価法開発

この研究は、イ. フェーズドアレイ型探触子による材質分布と欠陥の画像化技術の評価、ロ. モデル化微視組織におけるき裂成長解析、ハ. き裂先端近傍における微視組織の比較検討、の3点に着目して実施された。

イ. フェーズドアレイ型探触子による材質分布と欠陥の画像化技術⁽⁴⁾の評価

従来のフェーズドアレイ型超音波探触子に、指向性や出力、受信波形の精度、波形のサンプリング周期などに関して性能改良を図った、32チャンネルのフェーズドアレイシステム（任意の1チャンネルから送信し、任意の1チャンネルで受信することで得られる合計32×32個の反射波の波形・スペクトル解析を行う）を用いて、これをき裂などの劣化損傷だけでなく、非均質性、異方性や減衰特性（粘弾性特性）などの分布、複雑な形状の試験体の接合面や境界面の位置の高精度同定に適用することの妥当性を確認するため、あらかじめ指定した位置やサイズの疲労き裂を導入した溶接部のサンプルに対する試験が行われた。その結果、音響インピーダンスの分布の測定により、表面および内部の溶接部および熱影響部における非均質性を可視化できること、またノッチ部分のSCC先端近傍における

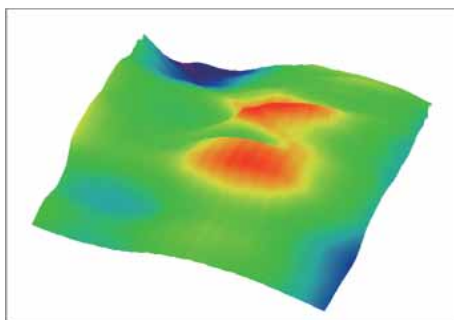


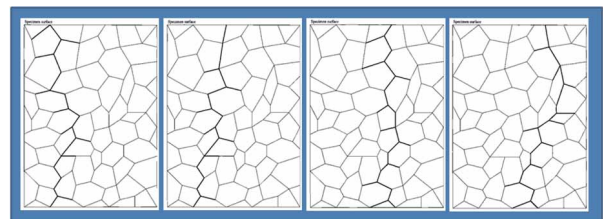
図9 ノッチ先端部画像例（表面の音響インピーダンスを考慮）

材質のばらつきや、SCCの形状も同定できることが明らかになった（図9）。

また、高感度磁気センサを用いて材料表面近傍の磁場分布を測定することにより、従来非磁性体と見なされていたオーステナイト鋼に対しても、漏洩磁束法が適用できることや、微小な割れの寸法、加工や溶接による材質変化、ノッチなどの幾何学的形状も可視化できることが明らかにされた。

ロ. モデル化微視組織におけるき裂成長解析

オーステナイト系ステンレス鋼溶接部について、溶接熱影響部（Heat Affected Zone：HAZ部）の結晶粒径粗大化による材料の不均質性や機械的性質の変化を考慮した解析モデル化に基づき、具体的な材料パラメータに基づくシミュレーションが行われた。また、溶接により生じる残留応力を考慮するため、HAZ部に機械的負荷を重畳させるアルゴリズム、界面でき裂の生成、およびき裂を進展させるための駆動力を与えるため組織の変化を考慮したモデルを適用することを考え、基本的なシナリオとアルゴリズムが検討された。なお、疲労き裂成長シミュレーションによる寿命推定および統計解析については、これまでの成果を発展拡張させて、2次元微視組織においてSCC対時間き裂進展速度式によるき裂長さの経時変化シミュレーション手法の構築、およびこれに基づいたSCCによるき裂成長パターン解析が実施された（図10）。その結果、この手法がき裂長さの経時変化の解析の基本的手法として適用できることが確認でき、今後実際の溶接部を模擬したモデル化組織におけるSCC解析が可能となる見通しが得られている。また、3次元リアルサーフェスビュー顕微鏡を用いた、ステンレス鋼



太線:SCCき裂, 細線:粒界

図10 SCCによるき裂成長パターン解析例



図 11 き裂先端写真例 (3次元リアルサーフェスビュー顕微鏡)

の疲労き裂試験片や製造法の異なる純銅材で微視組織の解析により、SCCによるき裂先端の同定やき裂成長経路観察の基礎的知見が得られた (図 11)。

- ハ、き裂先端近傍における微視組織の比較検討
オーステナイト系ステンレス鋼溶接部においてき裂先端近傍に生じる加工誘発型マルテンサイト組織の数値的評価や、超音波音速分布の測定や磁氣的探傷法による検査結果との比較検討により、観察の容易な疲労き裂を対象にしたき裂先端における微視組織のモデル化により実際の組織を十分再現できることが確認された。また、疲労き裂近傍の磁束密度分布や音響インピーダンス分布の測定により、き裂近傍での加工による組織変化や磁性相の析出、硬化領域を検出できることが確認され、これにより、今後予定している SCC 試験片の組織観察と数値的評価、非破壊評価の比較検討が技術的に可能性である見通しが得られた。

② 高調波による Ni 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

本研究は、イ、高調波画像化法による溶接 HAZ 部近傍の SCC 検出性の検討、ロ、SCC 模擬き裂面の開閉に伴うヒステリシスを考慮した高次高調波の解析、およびハ、数値解析による溶接部高調波発生 の検討、の 3 つから成っている。

イ、高調波画像化法による溶接 HAZ 部近傍の SCC 検出性の検討

PWR 加圧器安全弁台セーフエンド及び加圧器サージ管台の SUS/低合金鋼接合部の Ni 基合金溶接部試験体に導入された SCC の検出に、水浸法で点集束探触子を用い、大振幅バースト波を溶接 HAZ 部から進展した閉口

IGSCC (Intergranular SCC : 粒界応力腐食割れ) 部に入射し、き裂面の繰返し打撃/すべりにより励起される高調波の後方散乱波を同一探触子で受信しその振幅を画像化する方法の検証が行われた。分割具体的には、円筒型試験体に適用できる手動走査画像化装置を用いて、円周方向及び軸方向高調波 B スキャン像に基づき、SCC 深さを 1mm 程度の分解能で画像化し、さらには、SUS316 板状試験体溶接部およびインコネル 600 に導入した SCC を高調波法で画像化することにより、密着き裂部パルス反射法により明瞭に表示できることが実証された。また、疲労き裂を含むはり状試験体の一端を大振幅低周波 (周波数 F : 2-4kHz) ポンピング波で加振しながら周波数 f (70-100kHz) の超音波を送受したとき、き裂の有無によりサイドバンド ($f \pm \Delta F$) 振幅が顕著に変化すること、その分布はサイドバンド周波数の多重反射波により形成される分布を示すことが確認された (図 12)。

また、ニッケル基合金溶接部の SCC 深さサイジング 3次元超音波探傷技術 (3次元 UT 法) を確立するために、原子力安全基盤機構から借用した安全弁管台セーフエンド試験体およびサージ管台セーフエンド試験体専用の探触子取り付け用シューを設計製作した上で、SCC 付与試験体の探傷試験が実施された。なお、探傷試験に先立つ、最適な探傷条件を選定するための解析・評価、および EDM (Electro Discharge Machining : 放電加工) ス

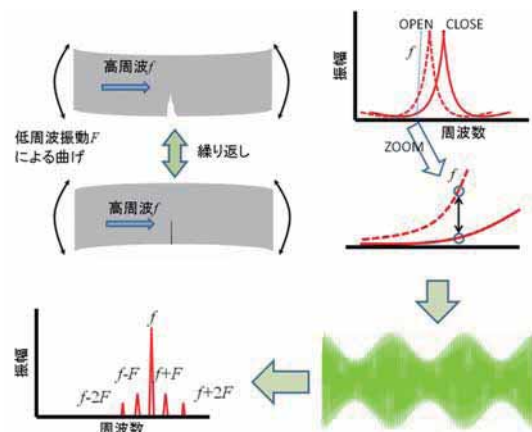


図 12 き裂開閉時の透過波によるサイドバンド発生原理 (高周波振動時)

リット付与試験体を用いた3次元超音波探傷法と現行探傷法との性能比較のための基礎特性試験も行なわれた。また安全弁管台セーフエンド試験体およびサージ管台セーフエンド試験体について付与されたSCCの探傷試験により、切断調査により真のSCC深さが求められている安全弁管台の試験体においては、欠陥の深さ測定率や深さ測定精度に関して現行の探傷法と比較評価が行なわれた。その結果、いずれにおいても3次元超音波探傷法が優れていることが確認された(図13)。以上の結果から、3次元超音波探傷法が実機適用された場合の評価基準データが得られる見通しが得られた。

ロ. SCC 模擬き裂面の開閉口に伴うヒステリシスを考慮した高次高調波の解析

閉口き裂を模擬した非線形界面モデル⁽⁵⁾(接触圧力依存性を考慮した接触面剛性モデル: 図14)、き裂面開閉口にともなう2次、3次の非線形性及びき裂面に作用する応力の負

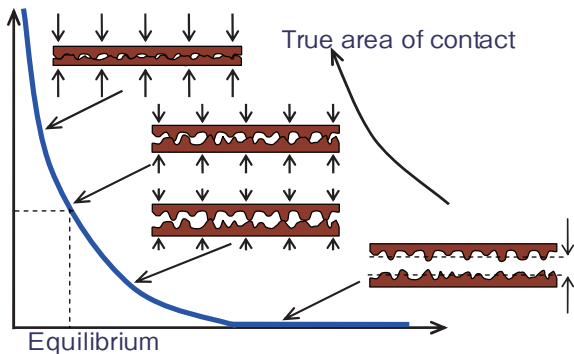


図13 3次元 UT 法と現行 UT 法の比較 (サージ管台 SCC 付与試験体の例)

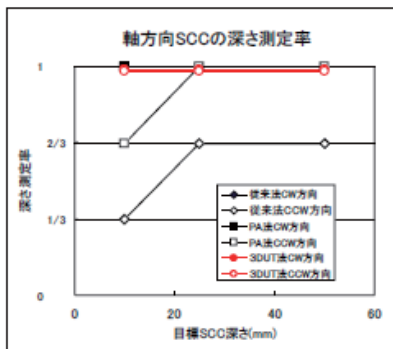


図14 接触界面における接触圧力と空隙幅の関係 (模式図)

荷除荷に伴うヒステリシスを考慮し、接触界面(閉口き裂面)にバースト波を入射した場合の2次から5次までの高調波発生特性の解析により、非線形性の種類によって各次数の高調波振幅は異なる入射波振幅依存性を示すことが明らかになった。

また、インコネル600合金に導入した疲労き裂を含む試験体について、5MHzの縦波バースト波をき裂面に垂直入射した場合の透過波に含まれる高次高調波を測定し、5次までの高調波について入射波強度との関係が調べられた。その結果、特に2次高調波、3次高調波については、それぞれ入射波強度の2乗、3乗に比例して増加していることが明らかになった。

ハ. 数値解析による溶接部高調波発生の検討

粒界閉口SCC部分で励起される斜角入射高調波の最適送受信形態を見出すため、個々の結晶粒形状と弾性異方性を考慮できる有限要素法波動伝搬数値解析法により、板裏面から成長したSCCを対象に種々の方向から入射した超音波について、密着き裂からの高調波散乱状況が解析された。その結果、高調波を入射角70度で送信し、き裂面から50度の方位で受信することで、安定して高調波を検出できることが明らかにされた。

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の評価手法開発

本研究は、対象試料の作製、マイクロ波検出技術を用いた劣化特性測定、およびその結果を踏まえて採った精度向上策を適用し、得られたデータを直接的な劣化測定データと比較することにより精度向上の確認を行うものである。

イ. 高分子材料試料の作製

照射雰囲気、吸収線量、温度を変えた照射条件等の劣化条件の異なるケーブル絶縁材の劣化試料については、INSSや原子力安全基盤機構(JNES)の協力で準備された。またポリエチレン、シリコンゴムおよびEPゴムを対象として、原子燃料工業の電子線照射装置(10MeV)による照射サービスや大阪大学産業科学研究所のコバルト60ガンマ線照射施設の協力を得て、吸収線量及び照射雰囲気を変えた照射劣化試料が作製された。

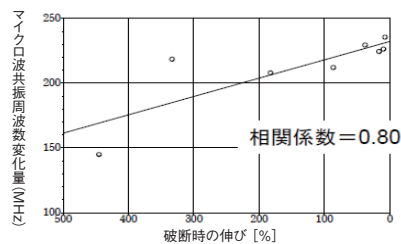
ロ. 高分子材料の劣化過程の解明

高分子材料の放射線照射による劣化に伴う誘電特性の変化に対する雰囲気中の酸素の影響が考えられることから、ポリエチレンの⁶⁰Coガンマ線照射劣化試料について酸素およびアルゴン雰囲気下での測定が実施された。具体的には、マイクロ波誘電吸収測定法による、照射による材料の構造変化に伴う誘電損失変化量に比例する共振周波数信号の時間変化の測定である。その結果、共振周波数の変化量は、両者とも20kGy程度までの急速な上昇の後、200kGy程度まではやや飽和傾向ながら単調に増加するが、それ以降は、アルゴン雰囲気では単調増加傾向が継続するのに対し、酸素雰囲気では減少に転じることが確認された。また、大気中での電子線照射でも、上記の酸素雰囲気での結果と同様に200kGy付近でピークを生じる傾向を持つことが確認されている。これらのことは、ポリエチレンの放射線劣化が高エネルギー電子線とγ線とで同じ機構によるものを示唆するものと考えられる。

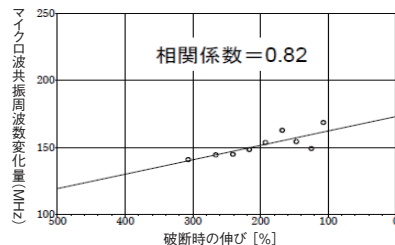
このような酸素の影響については、ポリエチレンのモデル化合物（n-ペンタン）について分子軌道計算を用いた考察が行われ、酸素付加により双極子モーメントが大幅に増加することが明らかにされた。この極性の増加はマイクロ波測定では低周波数側へのシフトとして現れることから、前述の測定結果とあわせ、高分子材料の放射線照射による劣化過程で酸素付加が生じている可能性の指摘がなされた。ポリエチレンロッドのようなバルク材では、放射線により長寿命ラジカル種が残る可能性が報告されていることから、これらのラジカル種が主に表面でクエンチされることで誘電特性に影響する可能性もあり、この点については、厚さや架橋度の調整により酸素透過性を変えたポリエチレンでの検討が必要との考えが示されている。

ハ. 経年劣化測定技術の評価精度の向上

マイクロ波誘電吸収測定法による評価精度向上には、適切な測定回数の設定のほか、測定の際の試料の固定・位置決め精度、同一質量の維持が重要であることに留意し、これらの点を再吟味した上で、共振器内にポリスチレン板を挿入しサンプルを固定するなど必要



C社EPゴムケーブル



C社難燃EPゴムケーブル

図 15 共振周波数と破断時伸びの相関例（熱・放射線劣化 EP ゴム）

な改良を加え、イ. で準備した全ての試料を対象に測定が行われ、精度の向上の状況が確認された。また、信頼性の面では、破断時の伸びのデータが入手可能な劣化試料について、共振周波数変化量と破断時の伸びとの相関を確認し以下のような良好な結果が得られた。すなわち、INSS 提供の熱劣化された材料での相関係数は、難燃 EP ゴムが 0.87~0.99、シリコンケーブルが 0.63~0.92 であり、JNES 提供の熱・放射線劣化された材料では、EP ゴムと難燃ゴムケーブル、ともに 0.8~0.9 であった（図 15）。

以上の結果から、マイクロ波技術の、高分子ケーブルの熱、放射線による経年劣化の検査への適用性が検証された。この成果を基にして、本測定法の実機適用を念頭に、試料の成型加工を必要としない接触診断による測定が可能なピンホール型空洞共振器を作製し、性能確認試験が行われた。その結果、感度の点からはさらなる改良が必要であるものの、成立性そのものについては問題が無いことが確認された。

3) 溶接補修技術に関する研究

本研究は、Ni 基合金多層盛溶接（補修）について、既存構成材料の不純物元素含有量および溶接材料中の微量添加元素含有量の差、溶接入熱量、施工方法の違いによる溶接性、および、補修部の

再供用における経年変化に対する健全性評価技術を確認することを目的として、① 補修溶接施工における健全性評価技術の確立、② 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、③ 補修溶接の健全性評価技術に対する実施工による検証、の3つが実施された。

① 補修溶接施工における健全性評価技術の確立

ここでは、多層盛溶接割れ機構の解明および健全性評価、および補修溶接時の応力・ひずみ履歴を評価するための多層盛溶接大規模高速解析技術の整備のための検討が行なわれた。

イ. 多層盛溶接割れ機構の解明および健全性評価

Ce 添加量を変化させたインコネル 690 溶加材を作製し、バレストレイン試験による再熱溶接金属の溶接割れ感受性の定量評価で Ce 添加による溶接割れ性改善効果を検証し、あわせて溶接金属の組織解析および溶接割れ性改善機構の解明が行なわれた。その結果、バレストレイン試験からは、適正な Ce 含有量は 0.01wt%~0.03wt%にあると考えられることが明らかにされた。(図 16)。また、Ce 添加インコネル 690 溶加材の溶接金属部の組織観察からは、Ce の酸化物、硫化物およびリン化合物、Ce 含有量 0.049wt%の溶接金属部においては低融点の Ce と Ni の金属間化合物の存在が確認された。以上のことから、Ce 添加により不純物元素 P および S の粒内への固着が進み、P および S の粒界偏析が軽減され、高温での粒界強度が向上したため、延性低下

割れ感受性が改善したと推察されることや、液化割れおよび凝固割れ感受性の増加は、Ce の過剰添加により低融点の Ce と Ni の金属間化合物が生成されたためと推察されることが示された。また、Ce 添加インコネル 690 溶接金属部の高温延性の評価により、Ce 含有量 0.019wt%の溶接部が最も高温延性値が高いことが、また局部変形能の評価により、Ce を添加することで粒界強度が増加することが明らかとなった。

また、P および S の粒界偏析の理論解析および割れ発生の起因となる溶接ひずみの熱弾塑性解析が行われた。その結果、粒界偏析の理論解析ではデンドライト径の変化に関わらず、P および S の偏析量に差は見られず、冷却速度が増加すればわずかに偏析量も増加することが明らかにされた。一方、実際の溶接部にて割れが発生した条件と発生しなかった条件での、延性低下温度範囲 (Ductility-dip Temperature Range : DTR) の測定結果と熱弾塑性解析によるひずみ挙動の解析結果との比較から、延性低下割れ発生温度域で増加する塑性ひずみを理論的に求め DTR と比較することで、溶接部での割れの発生を予測できる可能性を明らかになった。

ロ. 多層盛溶接大規模高速解析技術

補修溶接において延性低下割れなどの発生に影響を与える補修溶接時の応力・ひずみ履歴を評価するため、以下に示すような熱源のモデル化や多層盛溶接における割れ生成の力

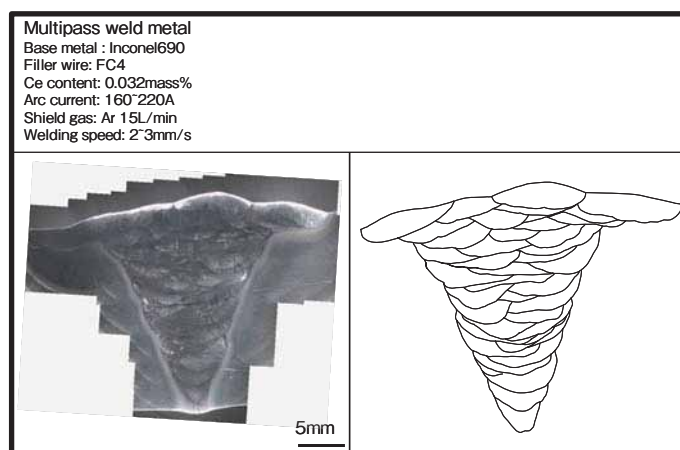


図 16 Ce 添加溶加材による多層盛溶接部の断面様相例 (0.032wt% Ce 添加)

学的モデル化等に関する検討を基に、解析の高速化が図られた。

応力解析においては、昨年度開発した反復サブストラクチャ法の適用で、計算速度を要素数が10万程度の問題が約10時間という現実的な計算時間で計算できることが確認され、熱伝導（温度）解析では反復法を採用することで高速化が図られた。また、割れ生成のモデル化については、界面要素を用いた限界応力モデルおよび限界塑性ひずみモデルについて、スポットバレストレイン試験のシミュレーションに適用しその有効性評価が行われ、その結果塑性変形による延性低下が直接取り扱えるという点で限界塑性ひずみモデルの方が優れていることが明らかになった。また、多層溶接がビード下の部分が延性低下温度範囲で受けるDTR塑性ひずみおよびDTR停留時間に及ぼす影響についての単純な2パス溶接モデルを用いた検討により、多層溶接の場合に、DTR塑性ひずみ、DTR停留時間ともに増加する傾向が認められることが明らかになった。

② 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

ここでは、マイクロおよびマクロ応力場による補修溶接部の力学的評価、および応力腐食割れに及ぼす不均一応力場および環境の効果の検討が行われた。

イ. マイクロおよびマクロ応力場による補修溶接部の力学的評価

マクロ応力数値解析技術等により算定した残留応力を有する部材に、初期き裂が発生したと仮定し、これまでに検討したき裂進展評価手法を用いて、き裂の進展に及ぼす諸因子の影響評価解析が実施された。具体的には、直径300mm、板厚30mmの500A配管の残留応力分布下での計算を基本ケースとして、配管直径、板厚、初期き裂の形状や応力分布を変化させることにより、諸因子のき裂進展に及ぼす影響が評価された。その結果、き裂は、発生から10年程度までは内表面付近での残留応力分布が引っ張り方向であることにより比較的早く進展し、その後はき裂の進展に伴うき裂先端部での残留応力が引っ張りから圧縮への変化に伴い次第に緩やかになるという、

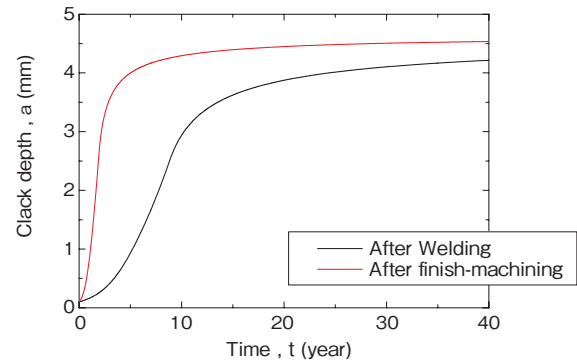


図 17 き裂長さの進展状況評価例（き裂初期長さ=0.1mm、同深さ=3.18mm）

き裂進展の基本的な挙動が明らかになった（図17）。あわせて、初期き裂の大きさ、配管板厚、配管直径の影響も明らかになった。これにより、マクロ残留応力場の観点でのき裂進展への残留応力の影響の力学的評価からは、き裂進展挙動に及ぼす初期き裂の深さの影響はほとんど無いが、初期き裂の長さの影響は大きいということが判った。しかし、初期き裂深さは、材料の微視的不均一性の影響を受けて決定されるとともに、その発生、成長および進展はマイクロ残留応力場の影響を大きく受けるものと考えられることから、その解明にはマイクロ残留応力場の評価技術、及びこれを適用した応力腐食割れ挙動評価法の検討が必要であることも明らかにされている。

ロ. 応力腐食割れに及ぼす不均一応力場および環境の効果

オーステナイト系ステンレス鋼ならびにニッケル基合金補修後の補修溶接部の応力腐食割れ挙動に対する結晶組織およびマイクロ応力場の関連を明らかにするため、オーステナイト鋼を主な対象とし、応力腐食割れに対する一軸応力、不均一応力、さらに結晶粒内のマイクロ応力場と結晶学的方位関係に注目し、き裂発生に及ぼす力学条件と環境条件の影響が検討された。さらに、600合金について、強加工部の応力腐食割れ挙動を検討された。具体的には、Ni合金と同様にオーステナイト組織を有すSUS316Lステンレス鋼を用いて応力腐食割れ感受性のマイクロ応力場における発生挙動の解析方法を確立するために、SUS316L鋼の高温高圧水中での応力腐食割れき裂の後方電子散乱回折像（Electron Back-

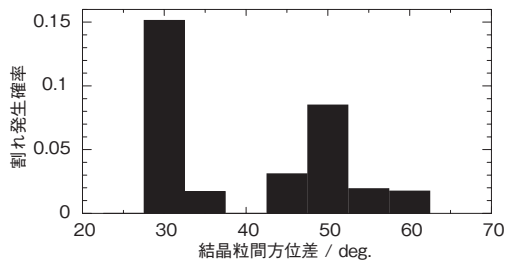


図 18 粒界割れを生じた結晶粒界と隣接粒界との結晶方位差の分布

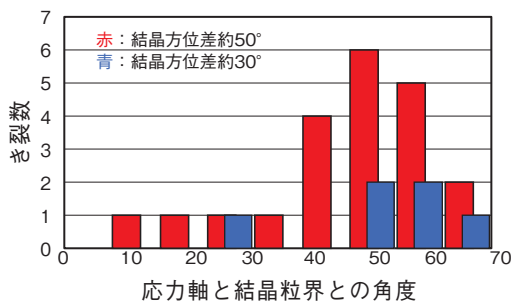


図 19 粒界割れを生じた結晶粒界と応力軸のなす角度の分布

Scattering Pattern : EBSD) 解析が行われた。さらに、冷間加工したインコネル 600 の PWR 模擬環境での応力腐食割れ試験を実施し、き裂の EBSD 法による解析が試みられている。その結果、20%冷間加工した SUS316L 鋼の高温高压水中での応力腐食割れが粒界と粒内のすべり線ないしは双晶境界にて生じる、粒界に生じたき裂は隣り合う結晶間の方位差が 30° 付近に特異的に多く分布すること (図 18) や、き裂を生じた結晶粒界と応力方向とのなす角は 60° 付近に多く分布する (図 19) こと等が示され、これにより、EBSD を用いた、高温高压水中の応力腐食割れ発生・進展に及ぼすミクロな応力場、あるいは金属組織との対応を解析する手法の妥当性が確認された。また、20%冷間加工したインコネル 600 は 360℃、水素注入の PWR 模擬環境において、低ひずみ速度法 (Slow Stress Rate Technique : SSRT 法) により試料表面に多数の粒界応力腐食割れき裂が生成することも明らかになった。これらの知見は Ni 基合金の補修溶接後の再供用時における信頼性評価に反映できるものである。

③ 補修溶接の健全性評価技術に対する実施工に

よる検証

イ. 実補修溶接プロセスに基づく施工健全性の検証

実際の高経年化プラントを補修する際に生じる可能性がある問題点の抽出、本研究で確立される補修プロセスを実施工への適用の妥当性検証、および高経年化プラントの予防保全・補修技術の技術情報基盤の整備を目的として、実機プラントにおける高ニッケル基合金溶接使用部位をまとめるとともに、潜在的に補修を行う可能性のある箇所を調査し、実施工補修条件の抽出が実施された。その結果、国内では、2003 年以降、多数のインコネル 600 合金部位での損傷事例が確認されており、インコネル 690 合金による補修や部分取替に係る溶接技術の確立等の万全の対策が必要となっていることが確認された。またこのためには、補修工法の確立が期待される部位の中でも厳しい施工条件下にある原子炉容器出入口管台についての既実施の溶接条件検討の成果や、加圧器サージ管や蒸気発生器の水室内溶接部等他の適用部位を考慮に入れた研究計画の立案や結果の考察が重要であることも確認された。

4) 主要構築物の劣化に関する研究

原子力発電所の主要構築物である鉄筋コンクリート構造物について、その耐久性を支配する鉄筋腐食に着目した研究で、鉄筋腐食に影響を及ぼす要因及びその特性を把握するための腐食促進試験、並びにこれを基にした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が行なわれた。腐食促進試験は、曲げ荷重によってひび割れの生じた梁模型 (図 20) を用い、ひび割れ幅、コンクリートのかぶり厚さ、コンクリートの中酸化の程

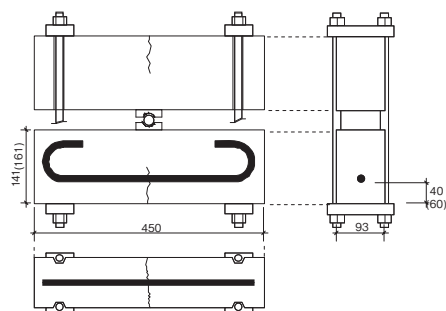


図 20 試験体図

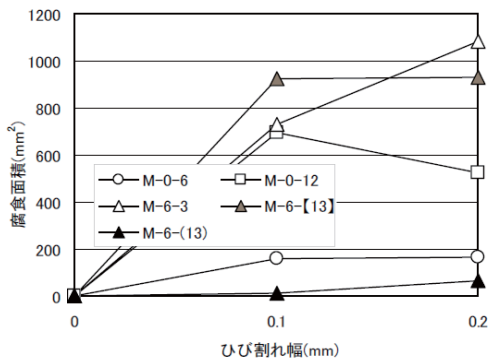


図 21 ひび割れ幅と腐食面積の関係 (図中凡例の2つの数字は、それぞれ、中性化促進と腐食促進の期間 [週] を表す)

度、及び含有塩化物イオンの有無の各要因と鉄筋腐食の関係を調べる乾湿環境下で実施され、その結果、中性化が鉄筋の腐食に与える影響は非常に小さく、コンクリートの水・セメント比の鉄筋腐食への影響は認められなかった。また、ひび割れが有る場合、二酸化炭素や塩化物イオンがひび割れを通して鉄筋位置まで到達するため、鉄筋腐食の進行はひび割れが無い場合に比べて著しいこと、ひび割れ幅が大きいほど鉄筋の腐食面積が増加する傾向にあることが確認された(図 21)。なお、かぶり厚さの鉄筋腐食面積への影響は認められなかった。さらに、打ち込み方向の違いによる鉄筋腐食への影響は、ブリージング(肌離れ:鉄筋とコンクリートとの間に隙間ができること)の存在により、逆打ちの方では引っ張り側だけでなく圧縮側にも明確に認められた。また、明瞭な鉄筋腐食が認められた試験体の自然電位は $-300\text{mV}\sim-400\text{mV}$ で、ASTMの判定基準にほぼ対応するものであった。

鉄筋腐食の観点から許容されるひび割れ幅に関しては次の様な推定が示されている。すなわち、ひび割れ(鉄筋位置側面で 0.1mm と 0.2mm 、引張縁ではそれぞれ約2倍)があると、いずれも鉄筋が錆び、ひび割れ幅が大きいほど鉄筋腐食面積は大きくなっている。今回の試験は促進試験であるので試験結果からだけでは許容値を見つけることはできないが、本研究が対象とする厳しい条件に対しては 0.1mm 前後の値になると考えられる。以上の結果、鉄筋位置まで到達するひび割れが生じれば、その鉄筋腐食への影響は大きく、コンクリート品質(水セメント比)やかぶり厚さの影響

はひび割れが無い場合に比べ小さくなることが確認された。これにより、ひび割れ発生の恐れのある場合は予め表面塗装する、あるいはひび割れ発生後速やかにひび割れに樹脂注入するなどの対策をとる必要があることが再確認された。

5. 結言

このように、平成19年度の福井クラスタの事業は、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御指導・御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。また、コンソーシアム体制での事業運営のノーハウの蓄積を図ることができた。なお、本年度の研究は充実した内容であるが、本事業の最終目標である規制情報としての活用に資するには、得られた成果を基にして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、委託元である経済産業省原子力安全・保安院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、より実用性の高い成果を得るという本事業のニーズに即した研究の企画・推進に努力することとしている。

謝辞

平成19年度の福井クラスタの事業の遂行に当たって、研究実施機関・研究者各位の御努力・御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的確な指導・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) 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 CAI-2005, pp.53 - 70, 2005-3
- (2) ASME, “Requirements for analytical evaluation of pipe wall thinning Section XI”, Case N-597-2, (2003)
- (3) 山崎友裕, “ガイド波用電磁超音波センサーによるワイヤー, パイプ, 薄板の非破壊評価, 非破壊検査”, 54 (2005) 606-611

- (4) 泉谷亨, 松本英治, 柴田俊忍, “弾性波波形解析による傾斜機能材内部の不均質の測定”, 日本機械学会論文集, 平成7年11月号, 61A, 591, 93-100 (1995)
- (5) S.Biwa, S.Nakajima and Ohno, Trans.ASME J. Appl.Mech., 71, 508 (2004)