

溶接・非破壊検査技術センター

技術レビュー

Vol.11 2015

研究報告

欠陥検出評価技術に関する研究
溶接継手の健全性確保に関する研究
技術基準・規格化関連調査

研修・講習活動報告

NDTレベル2実技試験対策研修開設

JAPEIC
JAPAN POWER ENGINEERING AND INSPECTION CORPORATION

一般財団法人 発電設備技術検査協会

社会インフラ狂騒雑感

現在我が国では、少子高齢化による構造的な予算の欠如の中、高度成長期に造った社会インフラの老朽化が着々と進行している。利用者の多いインフラは、受益者負担で新設も進められるが、あらゆる局面で都市部への一極化が進む中、今後人口減少にも拍車がかかると、地方では利用率の悪い社会インフラが溢れかえる。既に米国地方都市では生き残りをかけて、投資する地域と見捨てる地域を分け、限られた税金を効率的に運用する施策が始まっており、我が国でも筆者が3月まで在住した富山市では、「お団子と串」構想に基づくコンパクトシティ (http://creative-city.jp/doc/CitySummit2012_toyama.pdf) を目指して、再開発地区と決めた幾つかの“団子”を新たに整備した公共交通手段の“串”で結んで税金を集中投入する試みが注目されている。

一方で、老朽化インフラをそのまま安全に使い続けるための技術は、さらに重要である。構造物を“安全に使い続ける”ための最小限の要請は、建築基準法に見るように、壊れても利用者が亡くならないことであり、老朽化した構造物が安全かどうかを専門家が判断するための定量計測技術が不可欠であることは、鋼構造物の厳しい保守体制に関わる技術者には自明である。構造物の老朽化と検査の関係は、医療における検査と治療に例えられる。医療では例えば癌の早期発見技術は、医療のトータルコストを下げるとして、大きな予算が投下し続けられている。これに比べ、構造物の癌ともいえる欠陥の評価手法については、関係者の地道な努力は見られるものの、国を挙げて有効な検査法を開発すべきという動きは無い。特にコンクリート構造物では、鋼構造物と異なり、これまでメンテナンスに注力してこなかったつけが顕在化しており、老朽化構造物の強度が保証できない状況に向かいつつある。

一昨年からは総務省の肝いりで、「社会インフラの強靱化」プロジェクトが省庁の垣根を越えて展開されている。今回の騒ぎの主体は、コンクリート構造物であり、「非破壊検査技術の開発」もキーワードに取り上げられている。ただ、コンクリート部材の定量非破壊検査の難易度はただでさえ高く、一方で新しい実用検査技術の創出には、多大の資金と時間、何よりも技術を開発しようと言う強い意志が不可欠だが、現在までのところ、センサーを内在したスマート構造物の建設と、打音法を中核とするセンサーを搭載した各種ロボットの開発に予算の多くが使われ、新しい検査法自体を開発しようとの声は極めて小さい。欧米各国の様に、非破壊検査専門の大きな研究センターを持たない我が国では、老朽化する広範な社会インフラの評価に実用できる、非破壊検査技術の開発を担う、研究センターの整備は急務の課題の一つであろう。発電技検の溶接・非破壊検査技術センターは、現在我が国で、実用非破壊計測技術を研究する、最も実績を持つ非破壊検査研究センターであり、発電構造物の強度保証を実現してきた知見をベースに、広く社会インフラについても最終的には構造物の強度保証までを俯瞰した、積極的な情報の発信が期待される。



東北大学教授

三原 毅

巻頭言	社会インフラ狂騒雑感	1
	東北大学教授 三原 毅	
ご挨拶	3
	理事長 藤富 正晴	
トピックス	NDEシンポジウム2014の開催	
	SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)公募に採択	4
	一般社団法人日本保全学会論文賞を受賞	
研究報告	欠陥検出評価技術に関する研究	
	溶接部の超音波探傷シミュレーションとその活用	6
	水野 亮二, 上山 芳教, 古川 敬	
	圧電フィルムによる超音波伝搬可視化手法の改善	12
	上山 芳教, 古川 敬	
	ハーモニックバランス法によるヒステリシスのモデリング	17
	程 衛英	
	配管エルボ部のガイド波試験における 配管寸法の欠陥検出性への影響調査	23
	山本 敏弘, 古川 敬, (徳島大学) 西野 秀郎	
	溶接継手の健全性確保に関する研究	
	182合金の耐粒界腐食性に及ぼす ショットピーニングと熱時効処理の影響	28
	西川 聡	
	X線回折による塑性ひずみ評価手法の検討	36
	水野 亮二, 西川 聡, 古川 敬, (金沢大学) 佐々木 敏彦, (東北大学) 三原 毅	
	技術基準・規格化関連調査	
	ASME規格Section Iの溶接設計に関する改正案の紹介	40
	大石 勇一	
	ASME B31規格委員会への参加によせて	45
	佐藤 長光	
	欧州における700℃級発電プラントの実用化に向けた活動について ...	49
	長谷川 忠之	
研修・講習 活動報告	JIS Z 2305:2013対応のレベル2実技試験対策研修コース開設 ...	53
	牧原 善次	
成 果	(1)出願特許一覧	59
	(2)学協会誌等への論文発表	60
	(3)学協会等への口頭発表	64
	(4)論文等表彰	70
編集後記		

ご挨拶

一般財団法人 発電設備技術検査協会
理事長

藤富 正晴



2014年度における協会、溶接・非破壊検査技術センター（NDEセンター）の研究活動と成果を技術レビュー Vol.11として取りまとめましたのでご覧いただきたいと思います。

当協会は、1970年に創設され、今年45周年を迎えることができましたのも、皆様のご支援のおかげと感謝いたしております。今後とも、顧客の皆様が直面する多様な課題について丁寧な対応に努め、審査、検査、認証、規格基準、非破壊検査・研修・講習の業務分野や、規格基準における自主調査、試験研究における自主調査研究で、更に一層確実・的確に業務を遂行してゆく所存です。

「技術が支える安全と信頼」を基本理念とし、エネルギー環境が、内外で大きく変化している時代の流れの中で、新たなフロンティアにも対応できる実力をつけ、組織を挙げて顧客の皆様が直面する多様な課題に、丁寧に対応してまいりたいと思います。

試験研究における自主研究では、NDEセンターにおいて、①超音波探傷シミュレーション／伝播可視化技術、②フェーズドアレイ法、ガイド波などの超音波探傷技術、③電磁気シミュレーション技術、④パルス渦電流などの電磁気探傷技術、⑤残留応力・塑性ひずみ評価技術、⑥耐熱鋼・耐食鋼経年変化評価技術、⑦非破壊検査e-ラーニング教材などのセンターが保有しているコア技術をより一層深化させ、現場ニーズに適合できるように研究活動に取り組んできました。

NDEセンターは、自主調査研究にて、保有するコア技術に一層の深みと独自性を追求しつつ、その成果をもとにした研究提案などを通じて、皆さまの直面する課題解決に貢献するとともに、現場での実機適用評価、火力発電分野や船舶など、社会インフラ全般における非破壊評価技術の提案など、新しい分野にも積極的に取り組んでいく所存です。

規格基準における自主調査では、米国機械学会（ASME）規格の改正動向調査をはじめ、欧州など国外の関連技術情報を含めて、いち早く入手し、技術情報の検討結果を規格・基準などへ反映してきました。今後も自主調査活動を継続し、わが国における溶接などに関する規格基準の作成維持に貢献してまいります。

当協会は、発電分野におけるベストエネルギーミックスの実現に向けて、一層の研さんを積み、技術力に基づく高品質の業務を皆様に提供してまいります。関係各位の一層のご指導、ご理解を賜りますようお願い申し上げます。

NDEシンポジウム2014を 開催しました。

平成26年12月17日（水）

東京大学
山上会館大会議室



シンポジウム会場の様子

当協会は、平成26年12月17日（水）に東京大学山上会館大会議室において、NDEシンポジウム2014を開催しました。

本シンポジウムはテーマを「構造健全性と非破壊評価」と題し、原子力設備の安全を維持するうえで溶接継手部の健全性を確保が必要不可欠であり、そのためには構造健全性を評価する分野とさまざまな有無や材質変化を非破壊評価（NDE）する分野の研究者／技術者の緊密な連携により健全性をより一層確かなものに高めていくことが重要という趣旨に基づいて企画したものです。

当協会理事長の藤富より開会の挨拶が行われた後、基調講演として、北海道大学の奈良林直教授より「規格基準と検査：事業者と規制の弛まぬ安全性向上のための共通ルールとその検証」について、過酷事故の教訓と提言を基に、規格基準と検査について事業者と規制をつなぐ共通のルールとそれを検証する検査の役割をご講演いただきました。続いて招待講演として、広島大学の篠崎賢二教授より「溶接部の高温割れ発生予測」について、レーザ溶接時の凝固割れ発生現象のその場観察、ひずみの実測及びシミュレーション解析技術等に基づき確立された高温割れ発生予測技術についてご講演いただきました。また、新たな分野として、遠隔非破壊計測技術について（株）アトックスの毛利氏より「超音波探傷技術を用いたS/C（サブプレッションチェンバ）内水位測定のための遠隔基盤技術開発」を紹介していただきました。

一般セッションでは、三菱重工業（株）の山本氏より「薄膜UTセンサの高機能化」、（株）日立製作所の柳田氏より「低合金鋼平板突合せ継手の相変態

を考慮した溶接残留応力解析」、（株）東芝の江波戸氏より「炉内構造物の地震時構造健全性評価技術」について発表していただくとともに、当協会から「凝固組織予測に基づく超音波シミュレーションとその応用」及び「2次元検出器を用いたX線計測：残留応力と塑性ひずみ計測」について報告をいたしました。



講演される奈良林教授



講演される篠崎教授

トピックス②

SIP(戦略的イノベーション創造プログラム) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」 点検・モニタリング・診断技術の研究開発に 採択されました。

SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)とは、内閣府 総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)が自らの司令塔機能を発揮して、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために新たに創設するプログラムです。平成26年度に「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」

の課題が公募され、岡山大学、九州大学、国際超電導産業技術研究センターと共同で「インフラ劣化評価と保全計画のための高感度磁気非破壊検査」の研究開発課題に応募し採択されました。関係機関と連携し、鋼材の内部、裏面の腐食・き裂等を高感度に検出・評価する技術を開発します。

トピックス③

一般社団法人日本保全学会論文賞を 受賞しました。

当協会の職員である 西川 聡研究員(元参与 山口篤憲氏、元非常勤嘱託員 大北 茂氏との連名)が、「応力改善工法で付与される圧縮残留応力の持続性」についての論文で、平成26年5月26日(一社)日本保全学会にて論文賞を受賞いたしました。

論文賞表彰論文は、保全学誌に掲載された論文から「新規性」、「応用上の有用性」、「内容の完成度」の視点で評価して優秀論文として選定された賞です。

なお、受賞した論文は「保全学」Vol.11 No.4(2012) P.69-76に掲載されています。



溶接部の超音波探傷シミュレーションと その活用

Simulation of ultrasonic testing for austenitic weld and its utilization

溶接・非破壊検査技術センター 水野 亮二, 上山 芳教, 古川 敬

Ultrasonic testing (UT) is one of the most appropriate NDT technique for detection and depth sizing of flaw. But it is generally said that the flaw detection in austenitic weld is difficult because of dispersion and attenuation of the ultrasonic wave. UT simulation is a very useful technique for understanding the phenomena in the propagation of ultrasonic wave and for evaluating the UT results.

On UT simulation for weld used austenitic welding material, modeling of columnar crystal structure of weld metal is important. The method to predict columnar structure with crystal orientation by solidification simulation is being developed. The predicted columnar structure in the dissimilar weld metal joint by simple heat input was modeled for UT simulation. Ultrasonic reflection and scattering from boundary between columnar structures and fusion boundary could reproduce using the simulation model in this study.

Keywords

Ultrasonic testing, UT simulation, solidification simulation, dissimilar weld joint, columnar structure

1 緒言

オーステナイト系ステンレス鋼溶接部やニッケル基合金溶接部の超音波探傷試験 (UT) によるき裂の検出, サイジングにおいて, その溶接金属部は柱状晶組織 (集合組織) であるため, 音響異方性等による超音波ビームの屈曲, 減衰, ノイズ (散乱) 等により UT 結果の評価が困難な場合がある。超音波伝搬シミュレーションにより超音波の伝搬方向やノイズ, 減衰等を把握できれば, UT 条件の最適化や UT 結果の評価方法を検討するのに有効であると考えられる。

柱状晶組織や圧延鋼板等の集合組織が音響異方性を有することは, 音速測定の結果により知られている^[1,2]。柱状晶組織における音速分布は横等方性を示すことから, UT シミュレーションでは六方晶モデルとして扱われ, 超音波の伝搬経路が再現されてきた^[3,4]。また, 柱状晶組織を後方散乱電子回折像 (EBSP) 測定し, 結晶方位から柱状晶を結晶として扱いモデル化する方法も提案されている^[5,6]。ステ

ンレス鋼のシミュレーションモデルでは, 柱状晶組織を結晶として扱い, 実際の結晶構造に基づいた立方晶モデルを用いることにより超音波の散乱も再現できることが示唆されている^[7]。溶接金属の柱状晶組織の UT シミュレーションにおいては, 柱状晶組織を結晶として扱うために, 柱状晶組織の形状や結晶方位が必要となるが, 溶接条件によって柱状晶組織は異なる。従って, 溶接金属の柱状晶組織を予測する手法があれば, UT シミュレーションと組み合わせることによって, 溶接部の超音波伝搬特性を簡便に把握することが出来ると考えられる。

本研究では, 柱状晶組織を有するオーステナイト系溶接金属部の UT シミュレーションにおいて, 柱状晶組織予測手法を検討し, その柱状晶組織を用いて UT シミュレーションにおけるオーステナイト系溶接金属の柱状晶モデルの高度化を図り, 簡便な手法により超音波の伝搬特性を評価する方法を開発することを目的としている。本研究では, オーステナイト系溶接金属の柱状晶組織を凝固シミュレーションにより予測する手法を検討し, 先ず簡易なモデル

により柱状晶組織を予測し、UTシミュレーションにおいて柱状晶の境界や溶接金属と母材との境界での反射（散乱）の再現性について評価した。また、UTシミュレーション結果をUT訓練用データとして活用することを検討している。

2 溶接金属の柱状晶組織予測手法

柱状晶組織の予測は、凝固シミュレーションを用いて铸造組織に対して行われている^[8,9]が、多層盛溶接金属の柱状晶組織に対してはほとんど行われていない。本研究では、铸造組織の凝固シミュレーションを基にして溶接金属の柱状晶組織を予測する手法を検討した。

铸造組織の凝固シミュレーションは、熱伝導、溶質拡散を決定論的方法（差分法）で計算し、核生成、核成長を確率論的方法（モンテカルロ法）で計算するZhuらによって提案されたモデル^[8]を用いて行った。また、多成分系への適用については野上らの手法^[9]を参考にした。

図1に示すように熱伝導、溶接拡散の計算は粗い格子の差分格子を用い、核生成、核成長は細かく配置したモンテカルロセルを用いて計算する。計算は、まず熱伝導、溶質拡散を全差分格子点で計算した後、核生成、核成長を全セルに対してモンテカルロ計算を行い、凝固終了までこれらの計算を繰り返し行う。

熱伝導及び溶質拡散の計算は、(1)式及び(2)式に示す熱伝導方程式及び拡散方程式を一次差分陽解法を用いて計算する。ここで、 λ は熱伝導率、 C_p は比熱、 ρ は密度、 q_t は凝固したセルによる潜熱放出量、 D は溶質の拡散係数、 q_c は凝固したセルからの溶質再分配量である。熱伝導率及び拡散係数は、隣接差分要素間の液相率を考慮して求める。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_t = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + q_c = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

核生成計算及び核成長計算は、(3)及び(4)式に示す核生成確率及び核成長確率に基づいて計算する。ここで、 ΔT は過冷度、 S_m はモンテカルロセルの面積、 A は核生成頻度パラメータ、 n_{sl} は固液界面の増減、 n_{ss} は結晶粒界面の増減、 σ_{sl} は固液

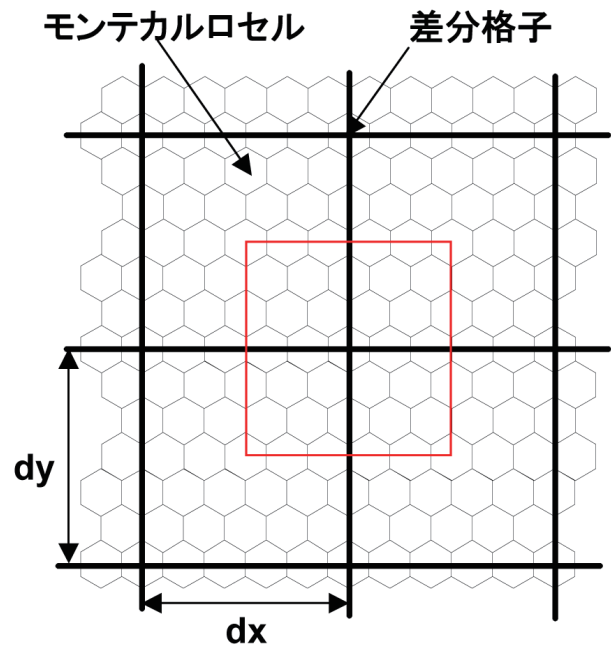


図1 差分格子とモンテカルロセル

界面エネルギー、 σ_{ss} は粒界エネルギー、 δ はセルの厚さ、 ΔH_f は潜熱、 T_m は融点である。

$$P_n(x_i, y_i, t + \Delta t) = A [\Delta T^2(x_i, y_i, t + \Delta t) - \Delta T^2(x_i, y_i, t)] S_m \quad (3)$$

$$P_s(x_i, y_i, t + \Delta t) = \exp(-\Delta F_g(x_i, y_i, t)/kT) \quad (4)$$

$$\Delta F_g(x_i, y_i, t) = \frac{(n_{sl}\sigma_{sl} + n_{ss}\sigma_{ss})^2 \delta}{6\sqrt{3}\Delta H_f \cdot \rho_s \cdot \Delta T(x_i, y_i, t)/T_m(x_i, y_i, t)} \quad (5)$$

UTシミュレーションにおいて柱状晶組織をモデル化するためには、柱状晶の寸法（幅や長さ）、結晶粒界の形状、結晶方位の情報が必要となる。上記の凝固シミュレーションでは、柱状晶の形状、寸法の予測は可能であるが、結晶方位の予測はモデルに含まれていない。そこで、結晶方位に対して、柱状晶の成長方向については、 $\langle 100 \rangle$ 方向が成長方向に配向しているため凝固シミュレーションで予測する手法を検討する。成長方向に直交方向の結晶方位はランダムに配向している^[5,6]ので凝固シミュレーションによる予測は困難である。柱状晶の成長方向の結晶方位は、オーステナイト系溶接金属の場合、溶融境界から $\langle 100 \rangle$ 方向にエピタキシャル成長するため、優先成長方向と熱流方向が一致するほど先行して成長する。従って、溶融境界の母材から結晶成長したセルの熱流方向を計算し、その方向を $\langle 100 \rangle$ 方向とした。溶接金属の熱流方向を考慮すると $\langle 100 \rangle$ 方向（図2中の θ ）は $0 \sim 180^\circ$ の範囲とな

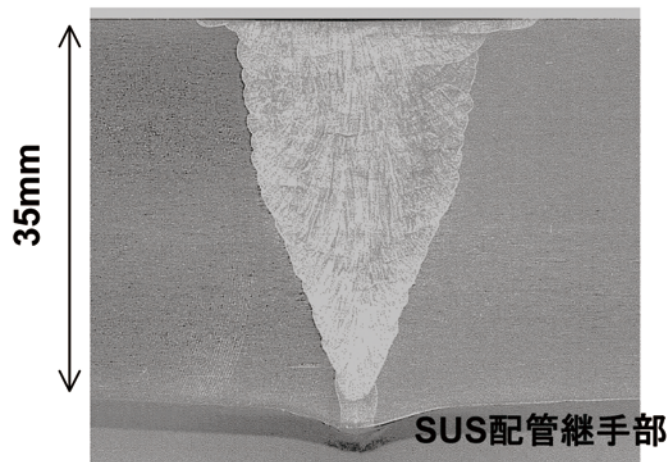


図2 板厚35mmのSUS配管溶接部

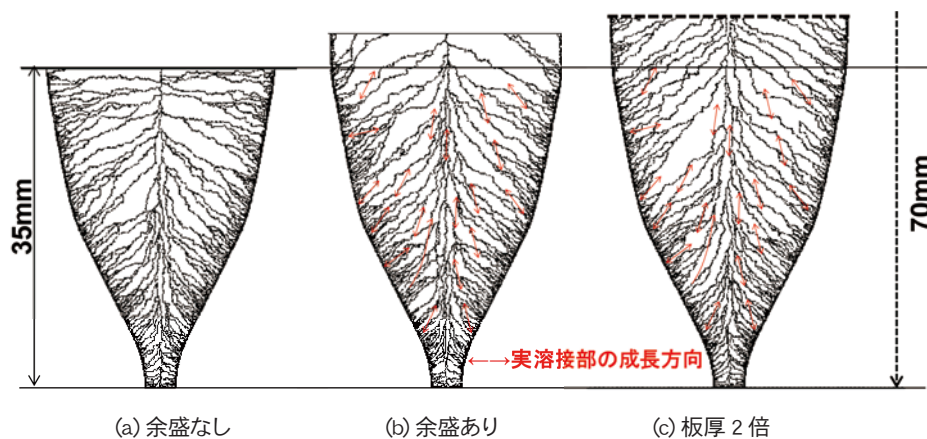


図3 凝固シミュレーション結果

るので、熱流方向に応じて0～1800のセル番号(ID)を与え、セル番号/10がそのセルの<100>方向(熱流方向)となるように定義した。その後、そのセルから結晶成長したセルは同じ柱状晶として同じセル番号とし、隣接した同じセル番号のセルが一つの柱状晶(結晶)となり、柱状晶は曲がって成長するが結晶方位の変化はない。

溶接金属の柱状晶組織予測は、図2に示すステンレス鋼配管継ぎ手部(板厚35mm)に対して行った。通常溶接部は多層盛溶接となるが、今回はUTシミュレーション向けに特化した第一段階として、溶接パスを一つにグルーピングしたモデルとした。図2に示す開先部に入熱を与え、融点以上に加熱された領域を溶接金属部として冷却過程において凝固シミュレーションを行った。凝固シミュレーションにおいては、差分格子間隔250 μ m、六角形のモンテカル

ロセルのサイズは母材の結晶粒と同等の50 μ mとし、Fe-18%Cr-8%Niのオーステナイト系ステンレス鋼の物性値を用いてシミュレーションを行った。

図3に凝固シミュレーションの結果の例を示す。図3(a)では板厚の中心部より下位の部分では、柱状晶のサイズ及び成長方向の曲がりはある程度模擬できているが、上位の部分では、柱状晶はほぼ水平に成長し、実溶接部とは大きく異なる。そこで、溶接時の余盛を考慮したモデル及び板厚を2倍にしたモデルで凝固シミュレーションを行った。その結果を図3(b)(c)に示す。板厚の中心部より上位の部分でも柱状晶は斜め上方に成長し実溶接部の成長方向に近い結果となった(図中矢印は図2の柱状晶の方向を示す)。今後、各溶接パスを模擬し、各パラメータを最適化することによって、柱状晶組織の予測精度を向上させることが出来ると考えられる。

表1 弾性定数 (GPa) [4]

結晶モデル	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}	C_{66}
立方晶	216	145			129	
六方晶	263	98	145	216	129	82.5

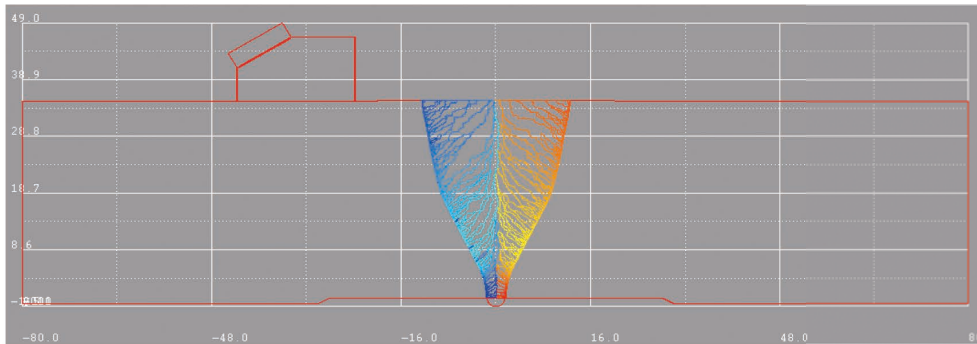


図4 超音波探傷シミュレーションモデル

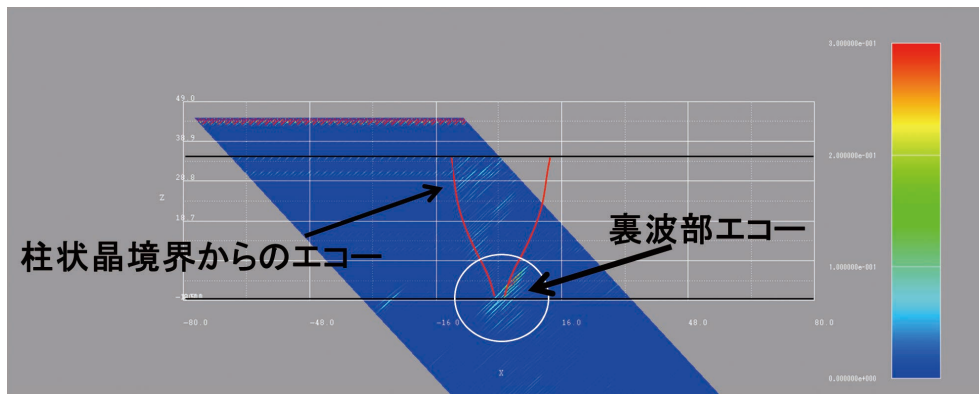


図5 UTシミュレーションによるBスコープ画像

3 超音波伝搬シミュレーション

2章の凝固シミュレーションにより計算した柱状晶(図3(c))を用いて超音波シミュレーションを行った。超音波シミュレーションには、超音波解析ソフト ComWAVE(伊藤忠テクノソリューションズ社製)を用いた。凝固シミュレーションの結果は、各セルの座標と成長方向の結晶方位を含む各セルのセル番号である。凝固シミュレーションの結果は、UTシミュレーションのFEMメッシュに座標変換して用いた。また、セル番号は、そのままFEMメッシュの材料番号として用いた。各柱状晶の成長方向の結晶方位(<100>方向)はセル番号(材料番号)であり、成長方向に直交方向の方位はランダムに与えた。図4にUTシミュレーションに用いた解析モデルの概略図を示す。凝固シミュレーションにおいて、板厚

上部は実際の溶接部と大きく異なるので、底部から15mmの柱状晶組織をUTシミュレーションにおいてモデル化した。

柱状晶の結晶構造は、立方晶モデルとしてシミュレーションを行った。また、比較のため六方晶の物性値を設定したモデルについてもシミュレーションを行った。弾性定数はオーステナイト系鋼の文献値^[4]を用いた。表1に各モデルの弾性定数を示す。

図5にUTシミュレーション結果を示す。図5は超音波入射後5 μ s後の波面を立方晶モデルと六方晶モデルでの比較を示している。立方晶モデルでは、比較のために計算した六方晶モデルに比べて溶接金属と母材の境界部や柱状晶の境界での反射(散乱)による信号が見られ、また、溶接金属内を伝搬することで減衰することも確認できる。これにより、各々の柱状晶の境界等での反射(散乱)や減衰を再現で

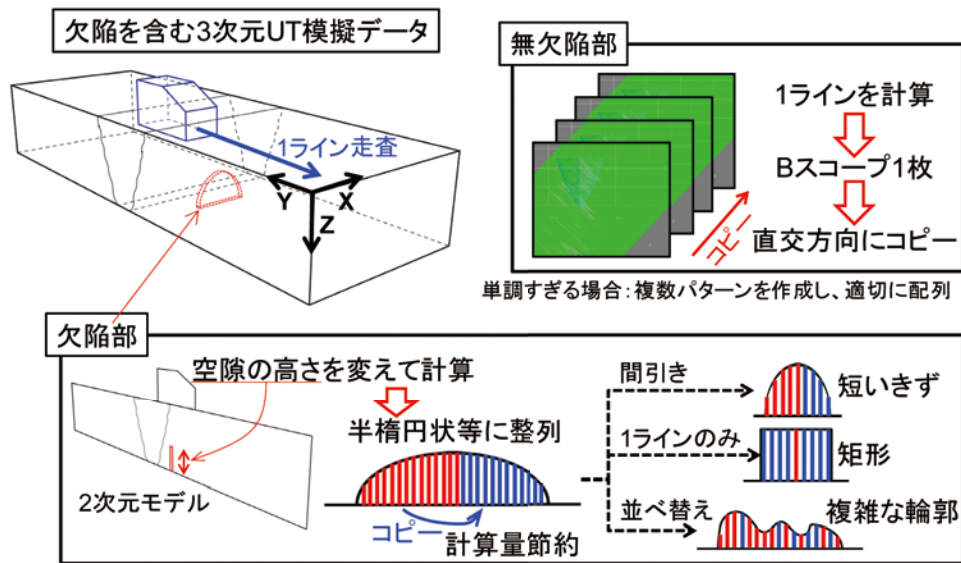


図6 UT訓練用データ構築の概念図

きるものと考えられる。簡易モデルを用いて予測した柱状晶の形状及び成長方向の方位をモデル化したUTシミュレーションにおいて、立方晶モデルを用いることによって超音波伝搬状況を再現できる可能性が示唆された。今後、柱状晶組織の予測精度を向上させ、更なる検討を行いその適用性を検討していくことによってUTシミュレーションの精度向上を図ることが出来ると考えられる。

4 UTシミュレーションの活用策

UTシミュレーションの活用策の一つとして、UT探傷技術者の技術力向上への活用が考えられる。活用方法の一つには、超音波がどの様に伝搬するかといった可視化の結果^[10]をテキスト等に整理し、知識レベル向上への活用がある。

もう一つの方法としては、技量向上のために探傷の訓練への活用が考えられる。技量向上のための多少の訓練では、数多くの試験体を探傷する訓練が有効である。UTシミュレーションデータが活用できれば、数多くの試験体を代替することができると考えられる。その概念の例を図6に示す。実際の探傷データは3次元となるものの、現時点でのシミュレーション解析は、計算速度等の制約上、断面を再現できる程度の薄い3次元モデルとしている。そのため、図6に示すように断面のデータを配列して、

探傷領域全体を疑似的に再現する方法を検討している。無欠陥部については、単純に無欠陥モデルのデータを複数ラインコピーして配列する方法が考えられるが、溶接部からの指示が単調すぎる場合には、溶接部の形状等を変えた複数のモデルのデータを周期的に配列する方法も考えられる。欠陥部についても欠陥の位置や寸法、断面形状を変えた複数のデータを、欠陥の長さ等に応じて適切に配列する方法が考えられる。

5 まとめ

凝固シミュレーションを用いたオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織予測手法を検討し、簡易モデルによりオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織を予測した。予測した柱状晶組織をモデル化しUTシミュレーションへの適用性を検討した結果、立方晶モデルを用いることにより超音波の反射（散乱）、減衰が再現できる可能性が示唆された。

今後、柱状晶組織の予測精度向上を図り実際の溶接組織と比較した妥当性検証を行うとともに、UTシミュレーション解析でも実際の探傷結果と比較して精度検証を行う。

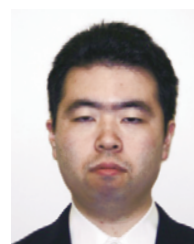
また、UTシミュレーション解析結果を超音波探傷技術者の訓練データへ活用する方法の一例を示した。

参考文献

- [1] 松本ら, "ステンレス鋼オーバーレイの減衰, 音速の方位依存性", 非破壊検査, 第32巻, 第2号 (1983) p.134
- [2] 廣瀬ら, "音響異方性を有する材料中における超音波伝搬特性", 非破壊検査, 第39巻, 第2号 (1991) P.74
- [3] J.A.Ogilvy, "A model for elastic wave propagation in anisotropic media with applications to ultrasonic inspection through austenitic steel", British Journal of NDT, January 1985, P.13
- [4] J.A.Ogilvy, "An iterative ray tracing model for ultrasonic nondestructive testing", NDT & E International Volume 25 Number 1 1992, P.3
- [5] C Nageswaran et al., "Microstructural quantification, modeling and array ultrasonics to improve the inspection of austenitic welds", Insight, Vol. 51., No. 12 December 2009, P.1
- [6] 中畑ら, "異材溶接部のイメージベース波動伝搬シミュレーションとその実験的検証", 保全学, Vol.10, No.2 (2011) P.49
- [7] 坂本ら, "ステンレス鋳鋼配管における超音波伝搬シミュレーション", 保全学, Vol.11, No.2 (2012) P.77
- [8] P.Zhu and R.W.Smith, "Dynamic simulation of crystal growth by Monte Carlo method-II. Ingot microstructures", Acta metall. mater., Vol.40, No,12 (1992) P.3369
- [9] 野上ら, "ハイブリッドモデルと計算熱力学連成による凝固組織シミュレーション", まてりあ, 第42巻, 第10号 (2003) P.731
- [10] 上山ら, "超音波の可視化技術を用いたフェーズドアレイ UT 法の適用性評価", 溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー, Vol.9 2013, P.6



水野亮二



上山芳教



古川 敬

圧電フィルムによる 超音波伝搬可視化手法の改善

Improvement of Ultrasonic Wave Visualization by Using Piezo-electric Films

溶接・非破壊検査技術センター 上山 芳教, 古川 敬

The ability to predict the propagation path of ultrasonic waves is necessary for ultrasonic testing engineers. The visualization of ultrasonic propagation enhances understanding and prediction capability. Previously, we had developed a method to visualize ultrasonic propagation by mechanically scanning the surface of a test object with a piezoelectric ceramic transducer used as a receiver. However, the previous method had inherent problems with anisotropic sensitivity, limited spatial resolution, and stability of transverse wave sensitivity. We have now developed a new visualization method using piezo-electric films that has possibility to solve those problems. In this paper, we explain the new method and present an application result of the new method.

Keywords *Ultrasonic wave propagation, Visualization, Piezoelectric film, PVDF*

1 はじめに

超音波探傷を実施する際には予め、対象の試験体で発生すると考えられる欠陥によるエコーの伝搬時間や、試験体による形状エコーの伝搬時間を予測しておくこと効率が良い。予測を立てるためには、試験対象箇所における超音波の屈折、反射、減衰、音速異方性による偏向等に関する知識の他、試験対象の構造が複雑で超音波が複数回の反射やモード変換を経て伝搬するような状況であっても、超音波の伝搬経路を予測できる技能が必要である。超音波を可視化して観察することは、超音波伝搬に関する理解を深め、超音波探傷に必要な超音波伝搬を予測するための知識を向上させる最も有用な方法の一つである。また、超音波の伝搬経路が複雑になるような状況では、伝搬経路の予測に計算機によるシミュレーションを用いることも有用であると考え、シミュレーションの正否を検証するためにも、実験的な可視化手法は有用といえる。

超音波を可視化する手法として著者らは、光弾性

法による手法^[1]やFEMシミュレーション^[2]に加え、送信探触子設置面と直交し、超音波伝搬方向と平行な面上で受信探触子を2次元走査して動的なひずみをマッピングする手法^[3]等について研究を行ってきた。これらの内、仮想ではない実際の金属材料を用いて探傷箇所を模擬した試験体を作成することで、探傷試験対象に近い状況における超音波伝搬を比較的簡便に可視化できる手法として、受信探触子を2次元走査して動的なひずみをマッピングする手法を研究してきた。しかし現行の手法では、横波における受信感度の異方性や、圧電素子で受信することによる分解能の限界、接触媒質による測定値の不安定性などの課題があった。これらの課題に対し、受信センサに圧電フィルムを利用することで解決できる見込みを得られた。本稿では、圧電フィルムを利用した可視化装置と、可視化事例を紹介する。

2 現行手法の課題

著者らがこれまで研究してきた超音波可視化手法では、図1のように送信用探触子を設置した面と直

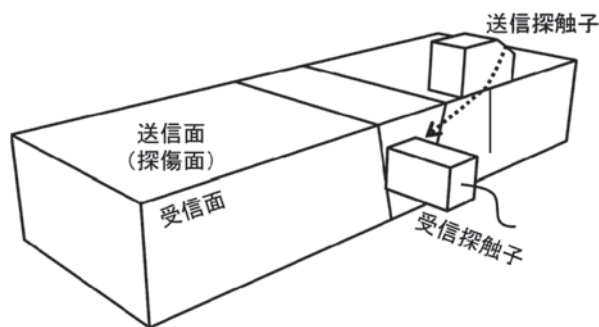


図1 現行の可視化装置における送受信探触子の配置

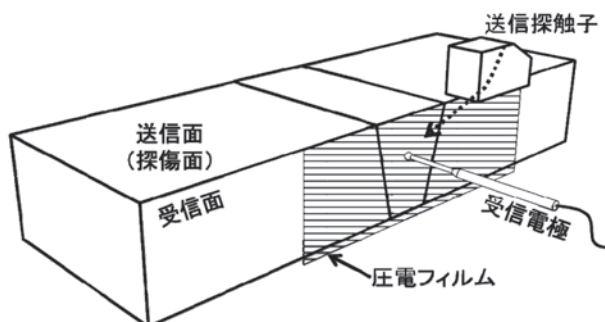


図2 圧電フィルムを使用した可視化装置における送受信探触子の配置

交する面上で探触子を2次元走査することにより、金属材料中を伝搬する超音波によって生じる動的なひずみの時間変化をマッピングし、走査後に各時刻の振幅値を色に変換することで超音波波面の画像を作成している。比較的簡易な実験による可視化手法としては光弾性を利用する手法もあるが、透明なガラス試験体を用いる必要があるため、金属組織により超音波の伝搬が影響を受けるような状況は可視化できない。本手法は受信探触子を走査するための平滑な断面が必要ではあるが、複雑な金属組織を持つ溶接部内等を可視化することも可能である。

現行の圧電素子を用いた可視化手法には、主に次に示す課題があった。1つ目の課題は受信感度の異方性である。横波を可視化する場合、現行手法ではSH波を測定可能な横波垂直用のプローブを受信素子として使用しているが、横波の振動方向により受信感度に変化する。底面やき裂等で反射した後の横波は振動方向が変化するため、反射前と同様の感度で評価するには受信探触子の向きを変えて再測定するなどの工夫が必要である。2つ目の課題は空間分

解能の限界である。圧電セラミックスを受信に使用しているため、可視化画像の解像度を向上するには、単純には受信用圧電セラミックスの面積を小さくする必要がある。しかし、セラミックスを小さく加工するのは困難であり、現状、測定対象の波長に対して十分に小さい素子を使用できているとは言い難い。3つ目の課題は受信感度の安定性である。走査する受信探触子と受信面の間には接触媒質が必要であるが、特に横波用の接触媒質は粘度が高く、走査速度が高くなるほど探触子の接触状態が不安定になり易い。圧電セラミックスで受信する場合、受信感度は接触状態に大きく影響を受けるため、受信感度も不安定になる。これらの課題を改善できる可能性がある方法として、圧電フィルムの利用を試みた。

3 圧電フィルムによる改良

新しく開発した可視化手法では、図2のように、圧電フィルムを受信面に設置して超音波の波面を観察する。本稿の実験では、圧電フィルムとしてPVDF（ポリフッ化ビニリデン）を使用した。PVDF

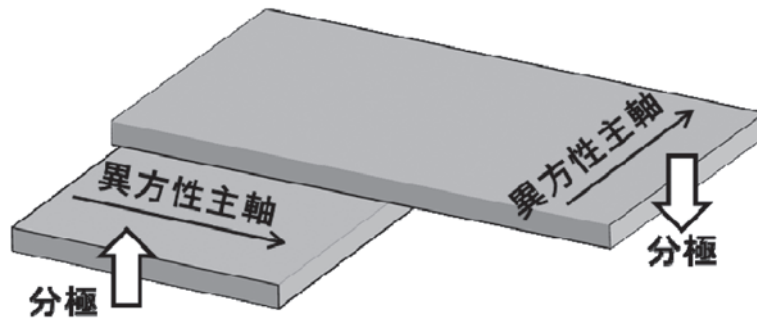


図3 横波用センサとして使用するためのPVDF積層方法

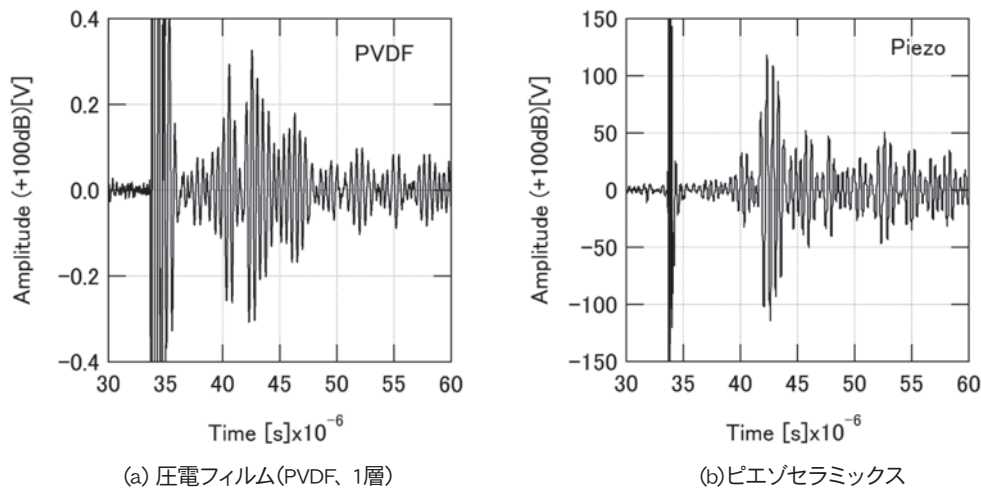


図4 受信波形の比較(横波垂直2MHz)

はポリマー自身が圧電性を持つ材料であり^[4]、近年、スピーカや歪みセンサの他、ガイド波計測への応用^[5]も研究されている。本手法では、PVDFの試験体側の面に設けた電極層を負極、反対側の面に設置する針状の電極を正極として超音波による局所的な動的ひずみを受信し、針状の電極を2次元機械走査して受信信号のマッピングを行う。

本稿では横波について検証するため、田中らの手法^[5]を参考に、図3のように分極方向を対向させ、異方性主軸を直交させて積層することで、横波に対して感度を持つセンサを構成した。単層でも積層でもPVDFは横波の受信感度に異方性を持つ。しかし、測定方法に工夫を加えることで横波に対する感度が等方性になる可能性があるため、今後検討する。

圧電セラミックスによる可視化装置では可視化画像の空間分解能がセラミックスの大きさにより制限されるが、圧電フィルムを使用する手法では、空間

分解能は針状の電極の先端形状とスキャンピッチのみに依存すると考えられる。電極の先端を細く加工することは比較的容易であるため、空間分解能を改善できる可能性がある。

圧電セラミックスを受信に使用する手法では接触媒質を塗布した面上を直接、セラミックス素子で走査するため、接触状態が不安定になり易い。圧電フィルムを使用する場合、試験体と圧電フィルムの間には接触媒質が必要であるが、機械的走査を行う受信電極と圧電フィルムの間には接触媒質が不要であるため、接触状態の安定化が見込める。

4 圧電フィルムによる可視化装置の実現可能性

局所的なひずみをPVDFにより検出するためには細かい針状の電極が必要と考えられるが、電極が細いため、超音波の可視化に十分な受信感度を確保できるか否かが課題となる。大凡の受信感度を確認す

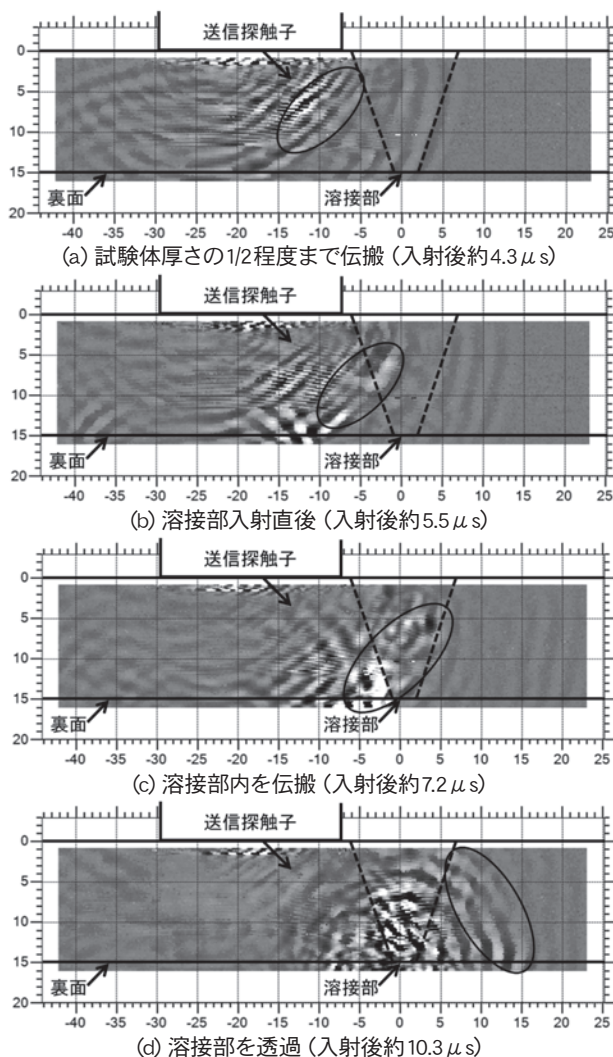


図5 圧電フィルムによる可視化装置を使用した超音波伝搬可視化結果 (2MHz、横波、45度)

るため、2MHzの横波垂直探触子により超音波を送信し、従来使用していた圧電セラミックスによるセンサとPVDFによるセンサでそれぞれ受信した波形の比較を行った。PVDFは厚さ110 μ mのシートを1層のみ使用し、針状の受信電極と負極側電極層の間の電圧を観察した。送信探触子、受信電極の配置は図1または図2と同様であるが、測定条件に乖離がないように、送信側探触子の中央付近が試験体の縁に当たるように固定し、受信側のみを入れ替えて測定を行った。試験体はステンレス製の200 \times 50 \times 30mmの直方体であり、200 \times 50mmの面を受信面、200 \times 30mmの面を送信面とした。

図4(a)はPVDFにより測定した結果である。振幅が小さいため、20dBのプリアンプを通した後に

さらに超音波探傷機 (USIP12, クラウトクレマー製) のアンプを80dBの設定で使用した。図4(b)は現行手法で使用している圧電セラミックス探触子により測定した結果である。探傷機のアンプを40dBに設定して測定した上で、PVDFとゲインを揃えるため、60dB分を乗算してグラフを作成した。図4(a)(b)共に43 ~ 45 μ s付近が横波による受信波である。PVDFでは38 ~ 42 μ s付近に縦波による受信波も明瞭に観察できるが、これは1層のPVDFにより受信したためであり、田中らの研究^[5]を参考にすれば、図3のような方法で横波用のセンサを構成すると、縦波の感度は低下すると考えられる。

図4(a)と図4(b)の横波受信波の振幅を比較するとおよそ1:400であり、PVDFによる受信信号は非常に小さい。しかし、37 μ s程度から始まる超音波

送信時のノイズよりも早い時刻を超音波と関係のない電気ノイズのみの領域であると考え、電気ノイズに対する信号強度を見るならばPVDFと圧電セラミックスは同程度であると見做せる。故に、PVDFを使用した新しい可視化装置は圧電セラミックスを使用している現行手法に対し、少なくとも同等に鮮明な可視化画像を得られると考える。

5 圧電フィルムを使用した可視化手法の適用例

溶接によりステンレス材料を接合した厚さ約15mmの試験体に対し、圧電フィルム(PVDF, 2層, 各相厚さ110 μm)を使用した可視化装置により超音波伝搬の可視化を実施した。PVDFは図3のように積層し、横波に対して感度を持つセンサ^[5]とした。試験体中央部(図5の破線部)の溶接部に向けて、2MHz, 45度の横波(MWB45-2, クラウトクレマー製)を入射し、0.2mmピッチで受信を行った。図5に測定結果を示す。図5(a)～(d)の各時刻における波面の先頭を図内に黒楕円で表示している。図5(a)は試験体厚さの1/2程度まで伝搬した時刻、図5(b)は溶接部入射直後の画像である。図5(b)では波面の一部が溶接部に入射しており、溶接部に入射した部分の波面で散乱が生じている様子が確認できる。図5(c)では溶接部内を通過している波面、図5(d)では溶接部を透過した後の波面が試験体底面で反射した後の波面が確認できる。

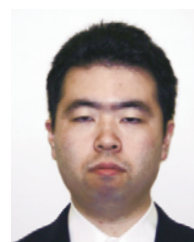
6 まとめ

圧電セラミックスを使用している現行の可視化手

法では、横波受信特性の振動方向への依存性、素子サイズによる可視化画像の高解像度化の制限、受信感度の安定性に課題があったが、圧電フィルムを利用することで、これらの課題を改良できる可能性がある。本稿では、圧電フィルムを使用して横波超音波を受信した波形の観察結果と、横波超音波伝搬の可視化結果を示し、圧電フィルムを使用した可視化装置が実現可能であることを示した。

参考文献

- [1] 上山芳教, 古村一郎, 古川敬, 超音波の可視化技術を用いたフェーズドアレイ UT 法の適用性評価, 発電設備技術検査協会 技術レビュー Vol.9 (2013), pp.6-10
- [2] 水野亮二, 上山芳教, 古川敬, UT シミュレーションにおけるオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織のモデル化及びその妥当性検証, 発電設備技術検査協会 技術レビュー Vol.10 (2014), pp.4-9
- [3] K. Furukawa, H. Yoneyama, Y. Horii and N. Uesugi, Measurement of ultrasonic wave propagation in austenitic stainless steel welds-(I), Proceedings of the Second International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components (2000), pp. B195-201.
- [4] 森山信宏, PVDF ピエゾフィルムの特徴とその応用, 機能材料 Vol.33 No.10 (2013), pp.37-46
- [5] 田中義和, 池田隆, 問山清和, 桑子創太郎, 藤本由紀夫, 圧電フィルムを用いたガイド波計測の基礎的研究, 日本機械学会論文集 (A 編) 72 巻 718 号 (2006-6), pp.141-146



上山芳教



古川 敬

ハーモニックバランス法による ヒステリシスのモデリング

Modeling and Analysis of Hysteresis by Harmonic Balance Method

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英

B-H loop and its modeling are essential for ferromagnetic material characterization and electromagnetic simulation. The objective of this study was to characterize material change by analyzing the corresponding B-H loops, and construct a general B-H model for electromagnetic simulation. A B-H loop was decomposed in terms of either ideal or normal magnetization curves, and the respective curves are single-valued functions of B and dB, which can be constructed using harmonic balance method. The B-H loop analysis and modeling were simplified by the loop decomposition approach.

Keywords *Hysteresis, B-H Loop, harmonic balance method, simulation*

1 はじめに

磁界強度 H と磁束密度 B との大きさの関係を表す B-H ループは磁性材料の最も基本的な特性を表す。材料は固有の磁気特性、即ち B-H ループを持っているため、B-H ループおよびそこから抽出したパラメータは材質評価に適用可能である。また、磁気特性は製造過程、熱影響、応力、不純物などによって変化するため^[1,2]、B-H ループはそれらの変化の定量評価にも適用可能と考えられる^[1,2]。これらの応用において、単なるグラフにより、数学的に定式化されたものは定量評価に適すると考えられる。

一方、材料の磁気特性は電磁気シミュレーション解析に不可欠である。B-H 関係は非線形で、履歴に依存、非一価関数などの特徴がある。磁気特性の複雑性、実際の工作条件の多様性、また、B-H の値は測定した経路しか分からないため、シミュレーションに必要なすべての計算条件に適する B-H 値の提供はほぼ不可能である。一部の研究者は既存の B-H データにおける内挿や外挿によって必要な B-H デー

タを得るが^[3]、他の一部の研究者は数学的な B-H 関係を表すモデルを構築し、それによって必要な B-H 値を計算する^[1,4-9]。

B-H モデルは大きく二種類に分類される：マイクロ磁気学や磁気物理などに基づいた物理的なモデル^[4,5]と、測定で得られた磁性バルク材の B-H 曲線自身に基づいた現象論的なモデルである^[6-9]。物理的なモデルは理想的であるが、現在の大部分のエンジニアリング問題にまだ適用できない。現象論的なモデルはよりシンプルで、非線形性、非一価性、また、マイナーループの多様性や周波数依存性などの課題が解決できるならば、様々なエンジニアリング問題に適用できると考えられる。

本研究では、ハーモニックバランス法^[10,11]を用いて、材料評価とシミュレーション解析に適用できる現象論的な B-H モデルを構築した。古典的な理想磁化曲線^[12]と正規磁化曲線^[12]によって、B-H ループは二つの曲線に分解された：理想磁化曲線とその他の部分、または正規磁化曲線とその他の部分。理想磁化曲線において、磁場強度 H は磁束密度 B の

一価関数であり、その他の部分は dB の一価関数である (dB は時間変化する二つの隣接する B の差である)。ヒステリシスはその他の部分にしか現れない。よって、B-H 関係は大幅に簡略化された。

2 B-Hループの分解及びモデル構築

2.1 理想磁化曲線及び材質評価

文献^[1]によると、等方性物質のヒステリシスは転位や不純物などの‘欠陥’によって引き起こされる。この仮説が成立するならば、B-Hループは無欠陥の‘完全’な物質の磁化特性を表す部分と‘欠陥’による部分に分けられる。即ち、

$$H(B) = H_{an}(B) + H_{hys}(B) \quad (1)$$

ここで、 $H(B)$ は B-H 関係を表す、 $H_{an}(B)$ は‘完全’な磁化特性である理想磁化曲線を表す、また $H_{hys}(B)$ は‘欠陥’によるヒステリシス効果を表す。式(1)によると、 $H(B)$ と $H_{an}(B)$ が分かるならば、 $H_{hys}(B)$ は求められる。すべての不純物を取り除いて‘完全’な物質を得るのはほぼ不可能であるため、 $H_{an}(B)$ を得るのは不現実であるが、理想磁化曲線は以下の方法で近似的に得られる：材料に直流磁界と交流磁界を重ねて磁化し、交流磁界の振幅を飽和磁化に達する大きな値から徐々に小さくして最終的にゼロにする、このとき得られた直流磁界と、それによる磁束密度との関係を表す曲線は理想磁化曲線である。Bozorth^[12]は、飽和領域まで達した周期的磁化状態の B-H ループの上昇曲線と下降曲線の、同一磁束密度 B に対する磁界 H の平均値をトレースした曲線は、極めてよく理想磁化曲線と一致することを指摘

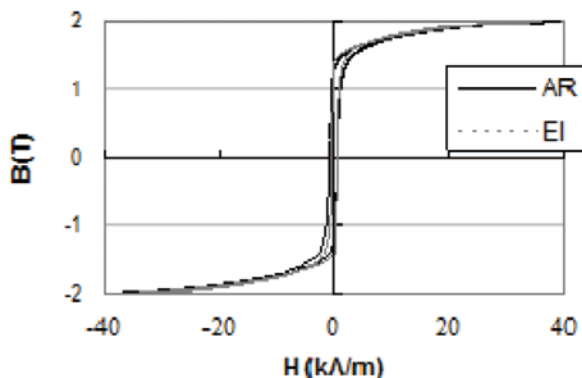
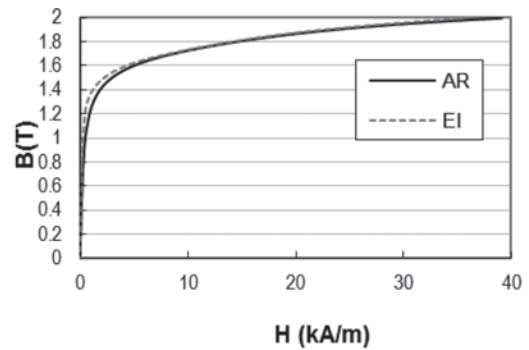


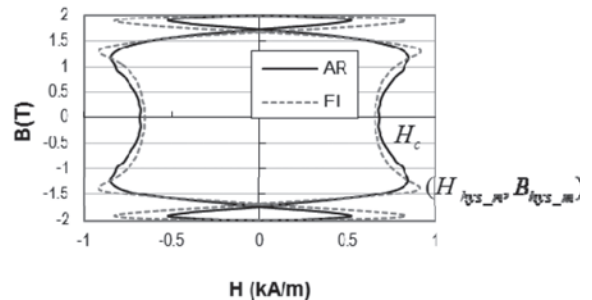
Fig. 1 Major B-H loops of the as-received (AR) and electron-beam irradiated (EI) SQV2A specimens.

した。本研究では、このシンプル且つ実用的な方法を用いて理想磁化曲線を求めた。

本研究の対象は原子力圧力容器の低合金鋼の SQV2A である。磁気特性変化によって放射線による劣化を定量的に評価するために、受け取り材 (AR)、電子線照射材 (EI)、中性子照射材の B-H 特性を測定した^[13]。



(a) The anhysteretic curves $H_{an}(B)$ of AR and EI specimens (in the 1st quadrant).



(a) The hysteresis loops of the AR and EI specimens.

Fig. 2 Decomposition of major B-H loop (shown in Fig. 1) into anhysteretic curve and hysteresis loop.

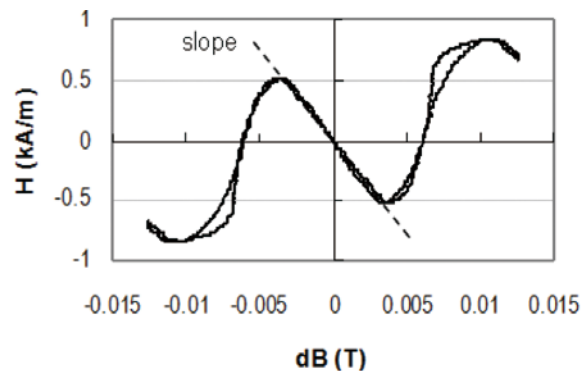


Fig. 3 The single-valued $H_{Tvs}(dB)$ function.

Table 1 Parameters calculated from the anhysteretic and hysteresis curves to describe the change of magnetic properties

specimen	μ_{an_in}/μ_0	H_c (A/m)	μ'_{hys}/μ_0	H_{hys_m} (A/m)	B_{hys_m} (T)	W_h (J/m ³)	Slope
AR	3268	683	19280	849	1.195	4502	-1.61×10^5
EI	4220	655	48170	915	1.335	4055	-2.96×10^5

Fig.1 に SQV2A の受け取り材と電子線照射材の B-H メジャー ループを示す (計測周波数は極めて低周波の 20 m Hz であるため、直流磁化曲線とみなせる)。受け取り材と電子線照射材の B-H 曲線が異なっているが、その差はわずかである。これらの曲線をそれぞれ式 (1) の通り、理想磁化曲線とヒステリシス曲線に分解して、Figs.2(a) と (b) に示す。‘スケルトン’ である理想磁化曲線を除くことによって、 $H_{hys}(B)$ に受け取り材と電子線照射材の磁気特性の違いはより顕著に表れる。また、 $H_{an}(B)$ と $H_{hys}(B)$ は下記のパラメータを算出して、材質評価に使われる。

- ・理想磁化曲線の初期透磁率

$$\mu_{an_in} = \frac{B}{H} \Big|_{B \rightarrow 0, H \rightarrow 0}$$

- ・ $H_{hys}(B)$ の半幅、この値は保磁力に相当する。

- ・ $H_{hys}(B)$ の最大半幅 H_{hys_m} 及び対応する B_{hys_m}

- ・ $B=0$ のところの差分透磁率 $\mu'_{hys} = \frac{dB}{dH} \Big|_{B=0}$

- ・ $H_{hys}(B)$ の面積

- ・ $H_{hys}(B)$ における $H=0, dB=0$ 箇所の傾斜 (Fig.3)

受け取り材と電子線照射材において、これらのパラメータを計算し、Table 1 にまとめ、電子線照射による磁気特性の変化を定量的に表した。

また、B-H ループの分解によって、B-H ループのパラメータ同定はより簡単になる。

2.2 ハーモニックバランス法によるモデリング

Fig.2 に示すように、 $H_{an}(B)$ は一価関数であるが、 $H_{hys}(B)$ はそうではない。ところが、 dB を変数にする $H_{hys}(dB)$ は一価関数である (Fig.3)。 dB は B より 90° ずれるため、 $H_{hys}(B)$ はずれ、或いは、ヒステリシスを表す。ここでは、

$$H_{an} = f(B), H_{hys} = g(dB)$$

と仮定して、B-H ループを下記の式で表示する

$$H = H_{an} + H_{hys} = f(B) + g(dB) \quad (2)$$

上式中 dB を直流の場合における dB/dt とみなせるならば、方程式 (2) は Chua-Type モデルの $H = f(B) + g(dB/dt)$ と一致している。

関数 f と g が事前に決められるならば、関数 $f(B)$ と $g(dB)$ はカーブフィッティングや逆問題解析などの手段で構築できる。Fourier 級数は周期的な波動のような関数の表現によく使われており、また、 B と H は周期性を持つ、更に、 $H(B)$ に高調波成分が含まれる、などを考慮し、本研究はハーモニックバランス法によって関数 f と g を構築する。

励磁磁束密度を $B = B_m \cos(\omega t)$ と仮定する。ここで、 B_m は最大振幅、 ω は角周波数、 t は時間である。 $H_{an} = f(B)$ と $H_{hys} = g(dB)$ とともに奇関数対称、 $f(t) = -f(t+T/2)$ (T は周期である)、また、 $f(B)$ と $g(dB)$ は奇数次関数であるため、奇数次の高周波成分を含む H_{an} は以下の式で表示する：

$$H_{an}(t) = \sum_{k=2n+1}^N [c_k \cos(k\omega t) + d_k \sin(k\omega t)] \quad (n=0, 1, \dots) \quad (3)$$

ここで、 c_k と d_k はそれぞれの cosine と sine 成分の係数、 n は非負の整数、 $N \rightarrow \infty$ が、十分大きな整数で切り捨てられる。したがって、 H_{an} に対応する多項式関数は

$$f(B) = \sum_{i=1}^M f_i(B) = \sum_{i=1}^M r_i B^i \quad (4)$$

である。ここで、 M は項の数 (本研究において、10 くらいでは十分である)、 r_i は求められる係数である。 $B = B_m \cos(\omega t)$ を式 (4) に代入し、式 (3) と (4) の各次の高周波成分の左右の‘バランス’をとると、係数 r_i は求められる。また、全ての偶数次の係数は 0 である。低い次元の係数を下記にリストする。

$$r_1 = (c_1 - 3c_3 + 5c_5 - 7c_7 + 9c_9 - 11c_{11}) / b$$

$$r_3 = 4(c_3 - 5c_5 + 14c_7 - 30c_9 + 55c_{11}) / b^3$$

$$r_5 = 16(c_5 - 7c_7 + 27c_9 - 77c_{11}) / b^5$$

$$r_7 = 64(c_7 - 9c_9 + 44c_{11}) / b^7$$

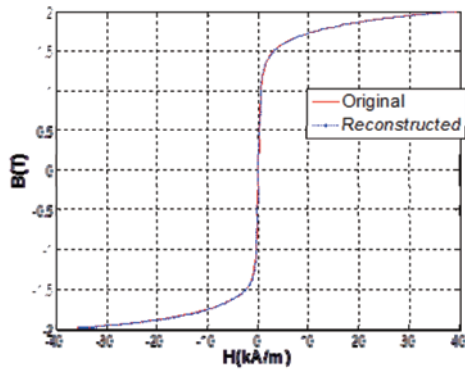
$$r_9 = 256(c_9 - 11c_{11}) / b^9$$

$$r_{11} = 1024c_{11} / b^{11}$$

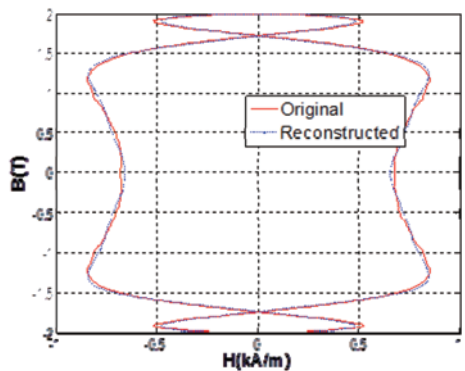
ここで c_i 、 $H_{an}(B)$ はの各高周波成分の振幅であり、また、 $b = B_m$ である。

$H_{hys} = g(dB)$ の係数は同じアプローチで計算できる。

Fig.4 に SQV2A の受け取り材のオリジナルと再



(a) Original and reconstructed anhysteretic curves of the AR specimen.



(b) Original and reconstructed hysteresis loops of the AR specimen.

Fig. 4 Comparison of the original and the reconstructed curves.

構成されたと $H_{an}(B)$ と $H_{hys}(dB)$ を示す。再構成曲線が元の曲線とよく一致することによって、ハーモニックバランス法による B-H 曲線のモデリングの有効性を示した。

3 電磁気シミュレーションのためのマイナーループの構築

定常の電磁気問題において、通常では単一周波数（基本波）で励磁を行う。材料の非線形によって、応答に高周波が含まれる。磁気特性が高周波成分の組み合わせによって表示されるならば、非線形の電磁気問題は各高周波の問題の組み合わせに変換される。よって、ハーモニックバランス法に基づいた B-H モデルは電磁気シミュレーションに必要とされる。

大部分の電磁気問題において、B と H が場所、時間毎に変化するため、全ての B-H 値、或いは全てのマイナーループが必要である。特定の B における係数 r_i が計算された場合、事前に構築できた r_i -B 関係

によって電磁気シミュレーション計算中に必要な磁気特性 (B-H) は算出できる。このアプローチは理想ではないが、実用的である。

理想的かつ一般的な B-H モデルは、幾つかの変数を用いてメジャーLoopとマイナーループともに構築できるものである。通常メジャーLoopが提供されるため、メジャーLoopからパラメータを抽出することが想定される。2 節における $H = H_{an} + H_{hys}$ 分解において、マイナーループの $H_{an}(B)$ 曲線とメジャーLoopの $H_{an}(B)$ 曲線がかなり離れるため、メジャーLoopの係数によってはマイナーループの構築に大きな誤差が存在する。

代わりに、飽和領域まで達した周期的磁化状態の B-H ループの上昇と下降曲線の同一磁界 H に対する磁束密度の平均値をトレースした曲線が正規磁化曲線に極めて一致することが報告された^[12]。また、マイナーループの正規曲線はメジャーLoopの正規曲線とほぼ一致することが観察された。したがって、メジャーLoopの正規曲線から得られた係数によってマイナーループを構成可能と考えられる。以上の分析に基づいて、メジャーLoopを以下のように分解する

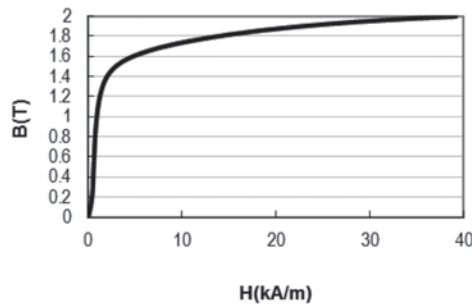
$$H = H_{nor} + H_{exnor} \quad (5)$$

ここで、 H_{nor} はメジャーの正規曲線を表示し、 H_{exnor} はメジャーLoopとメジャー正規曲線の差を表示する（同じ B における差である）。Fig.5 に受け取り材の $H_{nor}(B)$ と $H_{exnor}(B)$ を示す。ところで、 $H_{exnor}(B)$ は更に分解され、B あるいは dB の一価関数を構築する。

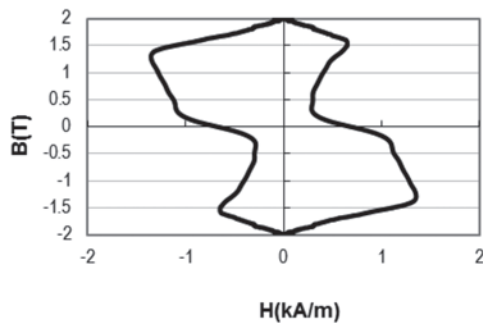
$$H_{nor} = f(B) \quad \text{また} \quad H_{exnor} = h(B) + g(dB)$$

2 節で説明したハーモニックバランス法で $f(B)$ と $h(B)$ と $g(dB)$ の係数を求めて、 $f(B)$ と $h(B) + g(dB)$ を構築した。構築された $f(B)$ と $h(B) + g(dB)$ はオリジナルのものとよく一致している。

メジャーLoopから得られた係数をほかの励磁強度へ適用することによって、マイナーループを構築した。Fig.6 はオリジナルのメジャー (B = 2 T) とマイナーループ (B = 1 T, 0.5 T)、及び構築されたマイナーループを示す：オリジナルと構築されたマイナーループはほぼ一致しているが、Loopの先端部にずれが現れる。その理由はマイナーループの正規曲線はまだメジャーLoopの正規曲線と完全



(a) The normal curve (in the first quadrant).



(b) The normal-excluding loop obtained by taking the difference of the B-H loop and the normal curve.

Fig. 5 Decomposition of B-H loop in terms of normal curve.

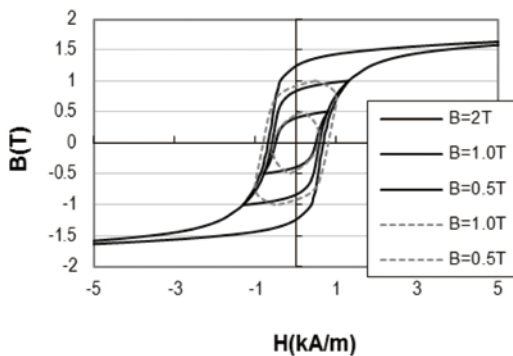


Fig. 6 The original loops and the constructed minor loops (solid line: original; dot line: constructed).

に一致していないことと考えられる (Fig.7)。励磁強度に従う係数の修正, また直接に励磁強度に依存する係数 $r_i(B)$ を求めることによってより一致するモデルの構築が期待される。

4 結論

B-H ループとそのモデリングは磁性材料の特性評価や電磁気シミュレーションに不可欠である。本研究では, B-H ループを理想磁化曲線とヒステリシス

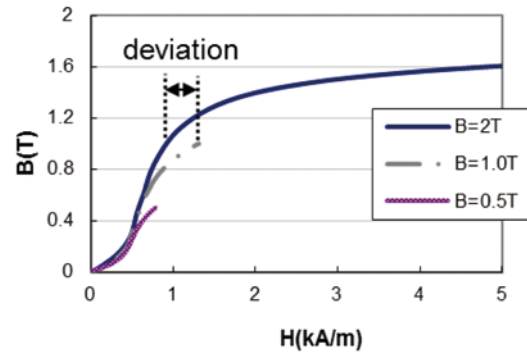


Fig. 7 Deviation of minor normal curves from the major normal curve (normal curves of the B=0.5T, 1.0T minor loops deviate from that of the B=2T major loop).

曲線に分解することによって, 磁気特性の変化はヒステリシス曲線により顕著にあらわれ, いくつかのパラメータによって定性的に評価できることを示した。分解された理想磁化曲線とヒステリシス曲線はそれぞれ B と dB の一価関数である。これらの関数はハーモニックバランス法によって構築できる。電磁気シミュレーションに必要な一般的な B-H モデルを構築するために, B-H ループは正規曲線に分解された。メジャーloopから得られた係数によって構築されたマイナーループの正規曲線はメジャーloopの正規曲線にほぼ一致しているが, ループ端部に多少のずれが現れた。如何に一般的な B-H ループを構築するかが課題である。

参考文献

- [1] D. Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials (Chapman & Hall, 1998).
- [2] Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Elsevier science, 2002).
- [3] K. Muramatsu et al., IEEE Trans. Magn. MAG-33, 1584 (1997).
- [4] I. D. Mayergoyz, Mathematical Models of Hysteresis (Springer-Verlag, New York, 1991).
- [5] D.C.Jiles and D.L.Atherton, J. Magnetism and Magnetic Materials, 61, 48(1986).
- [6] S. Bobbio et al., IEEE Trans. Magn. MAG-33, 4417(1997).
- [7] M. L. Hodgdon, IEEE Trans. Magn. MAG-24, 3120(1988).
- [8] L. Chua, IEEE Trans. Circuit Theory, CT-17, 564(1970).
- [9] Y. Saito et al., IEEE Trans. Magn. MAG-23,

2227(1987).

[10] R. DHAOUADI, et al., Sys. Analysis Model Simul, 2003

[11] F. Albertson, J. Sound and Vibration, 541(2001).

[12] R. M. Bozorth, Ferromagnetism (IEEE Press, 2003).

[13] W. Cheng et al., Intl. J. Appl. Electromagnetics and Mechanics, 25, 145(2007).



程 衛英

配管エルボ部のガイド波試験における配管寸法の欠陥検出性への影響調査

Study on influence of the dimensions of an elbow on defect detection by guided wave testing at an elbow of piping

溶接・非破壊検査技術センター 山本 敏弘, 古川 敬
徳島大学 西野 秀郎

In our previous studies, laboratory experiments showed that positions where high defect sensitivity is obtained are changed according to the frequency of guided waves when guided wave testing is applied for defect detection at an elbow of piping. Also, along with these experimental results, numerical simulations corresponding to these experiments imply that constructive and destructive interference of guided waves causes unevenness of defect sensitivity at an elbow. Even if guided waves entering the elbow are coherent, the shape of the elbow gives rise to constructive and destructive interference of the guided waves. This interference should be changed by not only the frequency of the guided waves but also the dimensions of the elbow. This paper introduces the results of numerical simulations using several different-sized simulation models of piping that includes an elbow to investigate influence of the dimensions of an elbow on defect sensitivity of guided wave testing at elbow part.

Keywords *guided wave, piping, elbow, simulation, finite element method, FEM*

1 はじめに

ガイド波試験は、配管やレールなどの長い構造物を一度に検査する能力を持ち、また、対象部位より離れた場所から検査することが可能であるため、埋設配管やラック上の配管、保温材の巻かれた配管などの検査に活用することが期待されている^[1-3]。しかしながら、ガイド波試験における反射波の解釈にはまだ課題があり、適用対象が直管の場合にはその反射波の解釈は比較的単純であるものの、ガイド波の伝搬経路にエルボが含まれるとその形状により伝搬するガイド波が乱れるため反射波の解釈が難しくなる。その一方で、液滴衝撃エロージョン (LDI) や流れ加速腐食 (FAC) などの配管減肉はエルボ周辺に発生しやすいため、エルボを含む配管の検査にもガイド波試験が活用できることが望まれる。本研究では、エルボ部におけるガイド波の伝搬特性を調べることにより、エルボを含む配管に対するガイド波試験の欠陥検出能力を向上させることを目的としており、これまでにエルボ内での欠陥検出感度が高

くなる位置とガイド波の周波数との関係を確認してきた。本稿では、ガイド波の周波数とエルボ部で欠陥検出感度が高くなる位置の関係がエルボの寸法とどのような関係にあるかを数値シミュレーションによって調査した結果を示す。

2 既往の研究成果

T(0,1) モードのガイド波を使ったガイド波試験によるアルミニウム合金製の 50A Sch40 配管試験体の測定実験 (図 1) では、ガイド波の周波数が 30 kHz の場合はエルボの腹側での欠陥検出感度が高くなり、ガイド波の周波数が 40 kHz および 50 kHz

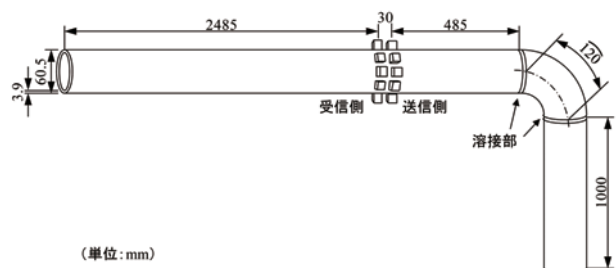


図1 ガイド波試験の測定実験の構成

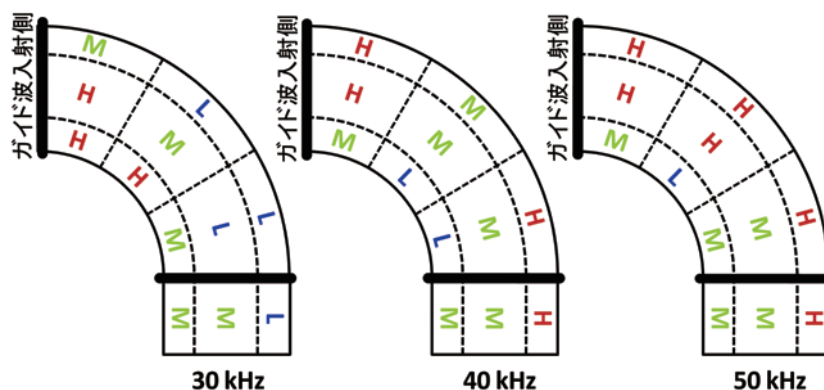


図2 測定実験で得られた欠陥検出感度 (L: 感度小、M: 感度中、H: 感度大)

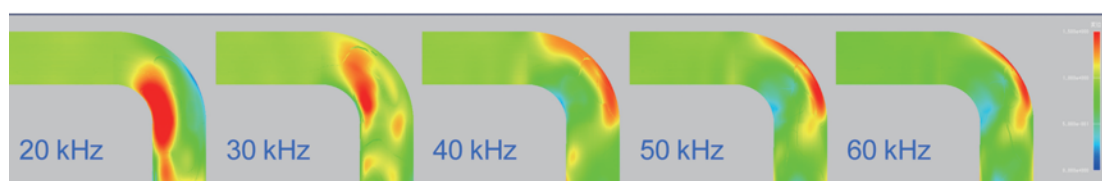


図3 計算で得られた表面変位の最大値分布 (50A Sch40) (青: 変位小、赤: 変位大)

の場合はエルボの背側での欠陥検出感度が高くなる傾向が得られている(図2)^[4]。また、この実験に対応する計算モデルで数値シミュレーションを行い、配管外面の各点で得られるガイド波による表面変位の最大値に着目したところ、実験での欠陥検出感度と同様に、ガイド波の周波数が30 kHzの場合はエルボの腹側で表面変位の最大値が大きくなり、ガイド波の周波数が40 kHzおよび50 kHzの場合はエルボの背側で表面変位の最大値が大きくなるという傾向が見られた(図3)^[5]。この欠陥検出感度と表面変位の最大値の関係は、ガイド波が伝搬するときに変位が大きくなる場所では、そこに欠陥があった場合、欠陥による反射波の振幅が大きくなると考えれば理解できる。

図2はエルボの各位置での欠陥検出感度の大小関係であり、図3は各点の全時刻を通しての最大変位の分布である。図3においてエルボの入口以降の最大変位の分布が不均一になるのは、それまで軸対称に伝搬していたガイド波の対称性がエルボ部から崩れ、ガイド波同士が干渉して場所によって強めあいや弱めあいを起こすからと考えられる。ガイド波の干渉はガイド波の波長に依存するため、ガイド波の周波数が変わると強めあう場所や弱めあう場所が変

化すると考えた。今回は、エルボの寸法変えて同様の現象が生じるかを確認した。

3 数値シミュレーションによる分析

ガイド波の数値シミュレーションには、伊藤忠テクノソリューションズ(株)の超音波シミュレーションソフトウェア ComWAVE Ver. 7 を使用した。計算モデルは、図1で示したようなエルボのあるアルミニウム合金製の配管とし、配管の材料の縦波音速を6,400 m/s、横波音速を3,120 m/s、密度を2,700 kg/m³と設定した。ガイド波の送信部は、配管の外周上に等間隔で並んだ8個の振動ブロックで構成し、計算モデルを小さくするためエルボの入口から200 mmの位置に配置した。このシミュレーションでは超音波の減衰を考慮していないため、直管を伝搬するガイド波の振幅は伝搬距離によって変わらず、送信部の設置位置はシミュレーションで得られる最大変位分布に影響を与えない。送信部からT(0,1)のガイド波を発生させるため8個の振動ブロックは同一位相で配管周方向に振動させた。振動の変位は入力信号として与え、設定した中心周波数をもつ5波のパルスとした。ここでは、ガイド波による表面変位の最大値の分布を確認することを目的としているの

表1 計算モデルに使用した配管の寸法

呼び径	外径	肉厚		
		10S	20S	40
15A	22.0	2.0	2.5	3.0
20A	27.0	2.0	2.5	3.0
50A	61.0	3.0	3.5	4.0
100A	114.0	3.0	4.0	6.0

で受信部は省略した。

計算を行った配管の寸法を表1に示す。計算モデルを構成するボクセル要素の大きさを一辺 0.5 mm としたため寸法値はこれにあわせて丸められている。エルボは、それぞれの寸法に対応する JIS B 2313 に準拠したロングエルボとした。計算モデルは、基本図形を組み合わせて作成し、エルボを含む配管を円柱と 4 分の 1 のトーラスを組み合わせて構成した。エルボの両端にある溶接部の裏波および余盛はガイド波の反射を引き起こすが、表面変位の最大値分布には大きな影響を与えないため、計算モデルではこれらを省いた。

上記のシミュレーションで配管寸法を 50A Sch40 とした場合に得られた表面変位の最大値分布が前掲の図3である。ガイド波の周波数が 30 kHz 以下ではエルボの腹側で表面変位が大きくなり、ガイド波の周波数が 40 kHz 以上ではエルボの背側で表面変位が大きくなっている。これに対し、配管の外径を 2 倍した上でエルボの位置に対するガイド波の干渉効果を同じにするには、配管寸法とガイド波の波長の比を保つ必要があり、ガイド波の周波数を半分にすればよい。配管寸法を 100A Sch10S とし、ガイド波の周波数を図3の各場合の半分にして得られた結果が図4である。予想したとおり、図3と図4のそれぞれ対応する条件で表面変位の最大値分布に同様の傾向が見られることが確認できる。

図5は、配管の外径が 50A で、配管の肉厚が異なる場合の表面変位の最大値分布を比較したものである。一般的に、肉厚が小さいほど全体的に表面変位が大きくなる傾向があるが、肉厚が異なってもガイド波が強めあうまたは弱めあう位置は大きく変わらないことが確認された。

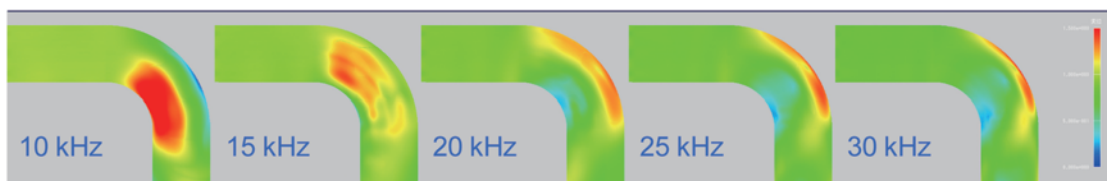


図4 計算で得られた表面変位の最大値分布 (100A Sch10S) (青：変位小、赤：変位大)

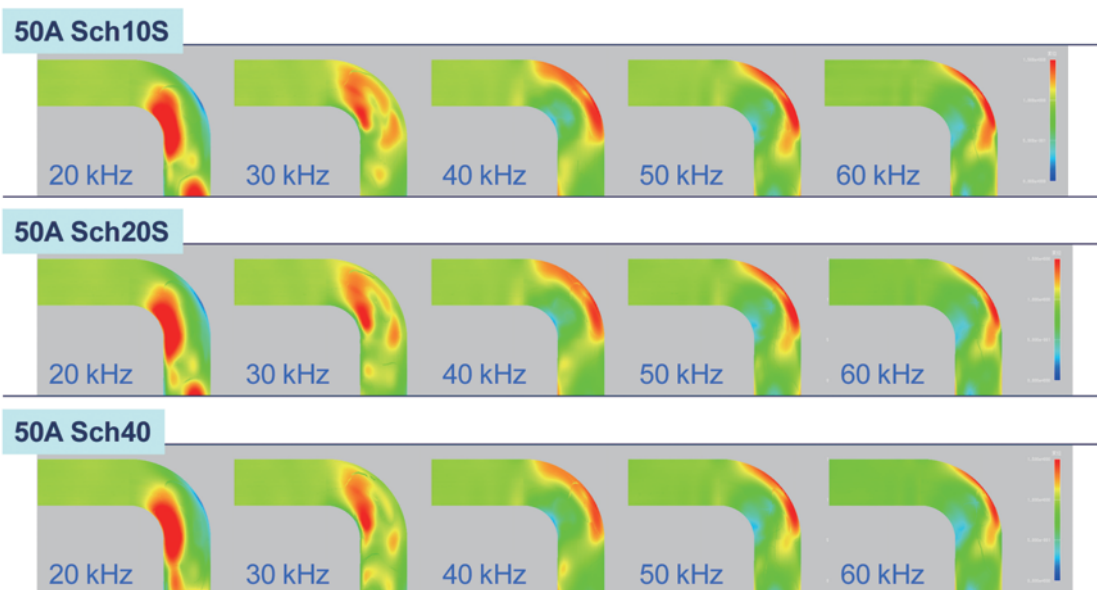


図5 異なる肉厚に対する表面変位の最大値分布 (50A) (青：変位小、赤：変位大)

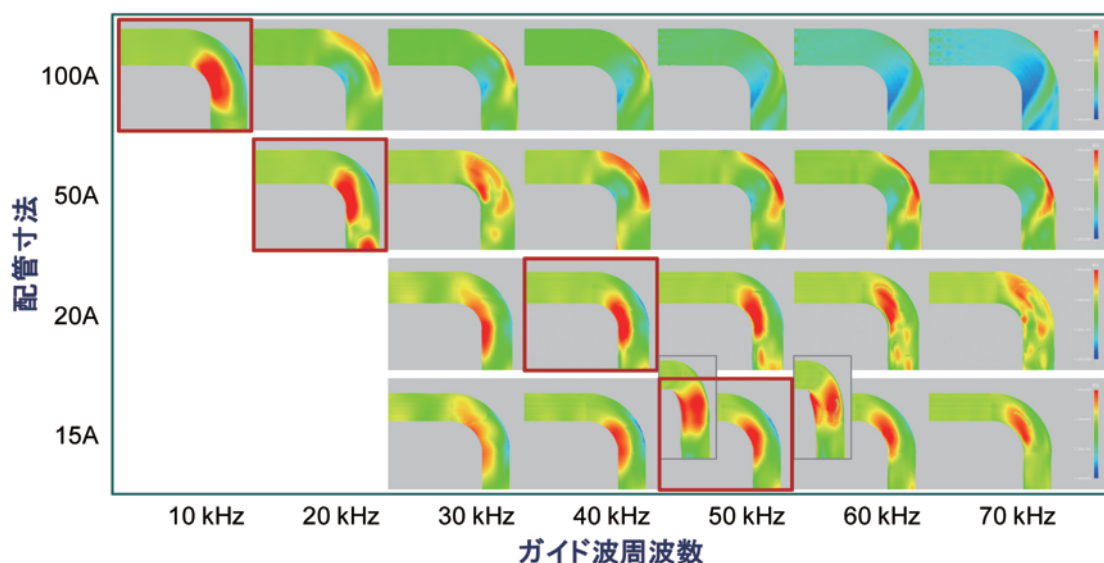


図6 エルボの腹側の表面変位が大きくなる最大のガイド波周波数の比較

配管寸法とガイド波の波長の比が同じであれば同様の表面変位の最大値分布を持つことを示すために、いささか定性的であるが、各配管外径に対してエルボの腹側の表面変位が大きくなる最大のガイド波の周波数に着目してまとめたものが図6である。ガイド波の周波数は10 kHz刻みで変化させた。“エルボの腹側の表面変位が大きくなる”とは、表面変位の最大値分布において高い値が腹側に集まっており、この集まりの中央に明確な谷間ができていないこととした。例えば、15Aでは側面から見たとき“エルボの腹側の表面変位が大きくなる”境目が判断しづらいが、腹側からみると60 kHzで赤色の領域が腹側中央ではっきりと分離しているのがわかる。図7は、ここで定めたエルボの腹側の表面変位が大きくなる最大のガイド波周波数と配管外径の関係をグラフにしたものである。ほぼ線形な関係が得られており、配管寸法とガイド波の波長の比で表面変位の干渉の仕方が決まるという仮定の裏付けとなった。また、第1節で述べたように、これまでの研究より表面変位が大きくなる位置では欠陥検出感度が高くなる傾向が見られるため、ここで述べた特性は欠陥検出感度にも当てはまると考えられる。

4 まとめ

本稿では、エルボを含む配管を伝搬するガイド波の数値シミュレーションの結果より、配管寸法とガ

イド波の周波数の組合せでエルボでのガイド波の干渉の仕方が変化し、ガイド波による表面変位が大きくなる場所が変化することを示した。特に、配管寸法とガイド波の周波数の比がエルボのどの位置で表面変位が大きくなるかを決定する要因となる。また、これまでの研究において表面変位が大きくなる位置では欠陥検出感度が高くなる傾向が確認されているため、この特性を利用すれば、任意の寸法の配管に対してエルボの腹側や背側などで欠陥検出感度が高くなるガイド波の周波数を求めることができ、エルボを含む配管に対するガイド波試験の欠陥検出性を向上できると考える。

参考文献

- [1] 西野秀郎, 非破壊計測のためのガイド波の基礎と展開, 非破壊検査, Vol. 52, No. 12, pp. 654-661, 2003.
- [2] 永井辰之, 兵藤雅己, 高村健一, ガイド波探傷の実用技術, 非破壊検査, Vol. 52, No. 12, pp. 667-671, 2003.
- [3] 池田隆, 金原了二, 宮澤正純, 松岡勲, 藤原光明, プラント配管の検査実務におけるガイド波技術の展開, 非破壊検査, Vol. 54, No. 11, pp. 595-600, 2005.
- [4] H. Nishino, S. Takamatsu, T. Yamamoto and T. Furukawa, Efficient defect detections in an elbow part of piping by guided waves using appropriate frequency 1 —Reflection phenomena at defects and sensitivities of defect detections—, Proceedings of

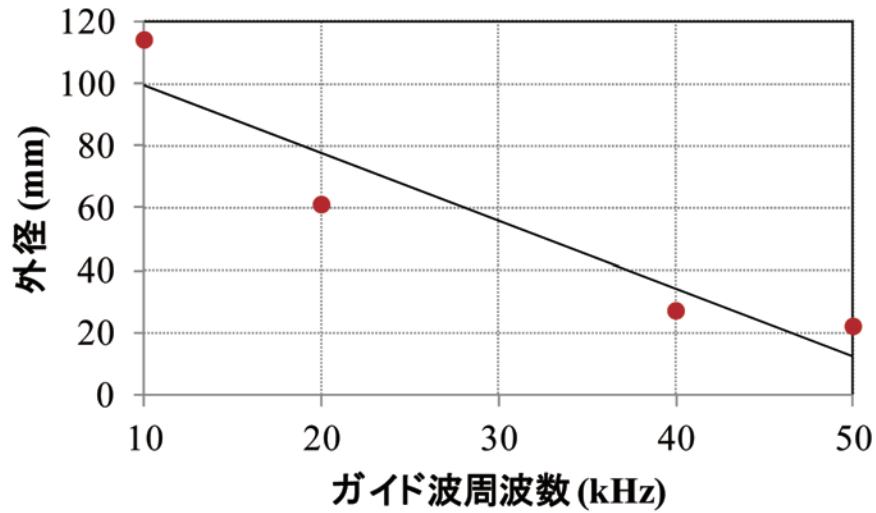


図7 配管外径とエルボの腹側の表面変位が大きくなる最大のガイド波周波数の関係

Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, pp. 75-76, 2013.

- [5] T. Yamamoto, T. Furukawa and H. Nishino, Efficient defect detections in an elbow part of piping by guided waves using appropriate

frequency 2 —FEM analyses and a method for efficient defect detections—, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, pp. 77-78, 2013.



山本敏弘



古川 敬

182合金の耐粒界腐食性に及ぼす ショットピーニングと熱時効処理の影響

Effect of shot peening and thermal aging treatment on intergranular corrosion resistance of alloy182

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡

Shielded metal arc weld metal for type 600 nickel base alloy (alloy 182) is used for weld components in nuclear power plants. To evaluate the intergranular corrosion resistance of alloy 182 after application of shot peening and subsequent thermal aging treatment at 593–793 K, we conducted the corrosion test (immersed in boiled 16% sulfuric acid + 5.7% copper sulfate aqueous solution at 57.6 ks) using specimens of alloy 182. The results show that the intergranular corrosion resistance of alloy 182 subjected to heat treatment at 893 K for 72 ks was improved by shot peening. Also, the intergranular corrosion resistance was not changed by thermal aging treatment at 593–793 K subsequent to shot peening. Because remaining chromium depletion layers along grain boundaries were still observed by transmission electron microscope (TEM) after shot peening, disappearance of chromium depletion layers cannot be a factor in the improvement of the intergranular corrosion resistance. The results of measurement of surface residual stress by the X-ray diffraction method show that the compressive residual stress introduced by shot peening still remained on the surface of the specimens. Based on these observations, we assumed that chromium depletion layers along grain boundaries near the surface were dissolved by the environment of the corrosion test, the dissolved regions were closed by the compressive residual stress on the surface, and then the remaining chromium depletion layers were protected from the corrosive environment. This assumption explains why the intergranular corrosion resistance was improved although chromium depletion layers remained.

Keywords Alloy182, Shot peening, Thermal aging treatment, intergranular corrosion resistance, Compressive residual stress, Chromium depletion layer, Grain boundary

1 緒言

原子力発電プラントの構造物において、ニッケル基合金溶接金属に応力腐食割れ (SCC) の発生が報告されている^{1), 2)}。そのため、SCCを予防することは機器の安全性を確保する上で重要となり、実機で対策が講じられている。SCCは「材料」, 「環境」, 「応力」の三要因が重畳したときに発生するため、SCCを予防するには個々の要因を除外する必要がある。沸騰水型原子炉の高温純水中に発生するSCCは、「材料」要因の一つに粒界クロム欠乏層の存在が挙げられる³⁾⁻⁶⁾。これは、溶接や熱処理等で高温に曝されたときに結晶粒界にクロム炭化物が析出し、その周囲にクロム欠乏層が形成されて耐粒界腐食性が低下するためである。したがって、固溶炭素濃度を低下させればクロム炭化物の析出は抑制されるため、低炭素濃度にして、かつ固溶炭素を安定化させるためにNbやTiを添加した溶接材料を用いることが耐粒界腐食性を向上させるのに有効となる。

一方、「応力」要因は、溶接や加工等により発生

する引張応力がある¹⁾。そのため、原子力発電プラントでは対策の一つとして、ピーニング法により表面に圧縮残留応力を付与することでSCCの発生を予防⁷⁾⁻⁹⁾しており、代表的なピーニング法の一つにショットピーニング法がある。Fig. 1にショットピーニングによる圧縮残留応力の付与過程の模式図を示す。カットワイヤ、または球が表面に当たると表面が伸ばされて引張ひずみを生じるが、板全体で表面の伸びを拘束するため圧縮残留応力が表面に発生し、SCCを予防している。しかし、上出ら¹⁰⁾は引張予

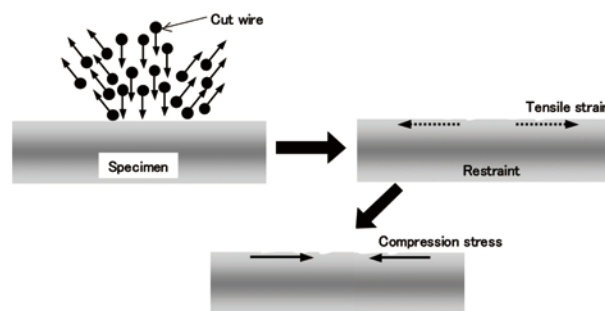


Fig. 1 Schematic illustration of mechanism of tensile strain and compression stress by shot peening.

Table 1 Chemical compositions of weld metal used for the corrosion test. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Nb	Ti	O	N
0.061	0.80	7.07	0.005	0.006	68.3	14.4	7.46	1.53	0.43	0.039	0.014

ひずみを付与したインコネル 600 合金の耐粒界腐食性を調べた結果、30%までの予ひずみ量の増加とともに耐粒界腐食性が低下することを報告している。一般に、ショットピーニングは20%以上の塑性変形を生じる¹¹⁾とされていることから、ショットピーニングで表面に付与される引張ひずみは耐粒界腐食性を低下させる可能性がある。これまでに、ショットピーニング後のニッケル基合金溶接金属の特性について、圧縮残留応力の持続に関する検討はされているが¹²⁾、耐粒界腐食性に関する検討はほとんどされていない。そこで本研究は、沸騰水型原子炉の機器でSCCの発生事例があるニッケル基600合金被覆アーク溶接金属(182合金)について、ショットピーニングと熱時効処理を施したときの耐粒界腐食性を把握し、微細組織や残留応力との関係を考察した。

2 実験方法

2.1 試験片の作製

溶接変形を抑制するため、板厚80mm、幅200mm、長さ180mmのS45C炭素鋼板上に棒径4mmの被覆アーク溶接棒を用いて厚さ15mmに182合金を肉盛溶接した。なお、溶接条件は直流で電流140V、電圧24V、溶接速度3.5mm/sで、溶接棒を正極とした。そして、製作した溶接試験体の一部に893K、72ksの熱処理を施した。この条件は、原子炉圧力容器の製造時に溶接金属が受ける応力除去焼鈍を模擬したものである。母材の希釈が少ない最終層に寄せて厚さ10mmの板を肉盛溶接金属部から採取し、表面の機械研磨等による加工層を除去するため、最終層側の表面を約100 μ m電解研磨してこの面を評価面とした。そして、溶接金属板を厚さ10mm、幅15mm、長さ25mmに切断して評価試験片とした。Table 1に試験片の化学成分を示す。試験片の一部は、HV=500のスチールカットワイヤ(0.8mm ϕ 、0.8mmL)を用いて電解研磨面に投射速度60m/s、カバレッジ200%でショットピー

ニングを施した。その後、ショットピーニング有無の試験片に593-793K、0-18Msの熱時効処理を施した。

なお、2.2節で実施する腐食試験において、熱時効処理時に形成される表面酸化皮膜が耐粒界腐食性に影響を及ぼす可能性があることから、試験片をガラス管に真空封入して793K、3.6Msで熱時効処理したもの、および大気中で同様の熱時効処理を施したものを腐食試験に供した。その結果、耐粒界腐食性に大きな差は見られなかったことから、熱時効処理で表面に形成される酸化皮膜は耐粒界腐食性に及ぼす影響は少ないと考え、大気中で熱時効処理した。

2.2 16%硫酸+5.7%硫酸銅の沸騰水溶液中での浸漬試験による耐粒界腐食性の評価

山内ら⁵⁾はASTM G28試験中における溶液の安定性を向上させるため、硫酸第二鉄量を二倍にした改良ASTM G28試験により182合金の耐粒界腐食性を評価している。本研究においても改良ASTM G28試験の適用を試みたが、ほとんどの試験片で激しい全面腐食を生じ、耐粒界腐食性を適正に評価することが困難であった。この理由は、本研究で用いた182合金のクロム濃度が14.4mass%と規格内ではあるが低目のクロム濃度であるためと考えられる。したがって、本研究では改良ASTM G28試験と比較して腐食環境が緩やかな16%硫酸+5.7%硫酸銅の沸騰水溶液中に57.6ks浸漬させた試験を適用した。Fig. 2に腐食試験後の試験片断面における観察結果を示す。激しい全面腐食の発生は見られず、断面観察より粒界腐食が支配的であったことから、本研究は16%硫酸+5.7%硫酸銅の沸騰水溶液中での浸漬試験を用いて耐粒界腐食性を評価した。腐食試験数は、各条件で2個とした。

腐食試験後の試験片をファインカッターで4つに切断し、10mm \times 15mmの合計8断面について1500番まで湿式研磨後、1 μ mのダイヤモンドペーストで鏡面研磨して光学顕微鏡で割れ深さを測定した。ただし、腐食試験で深さが約15 μ mの凹みが

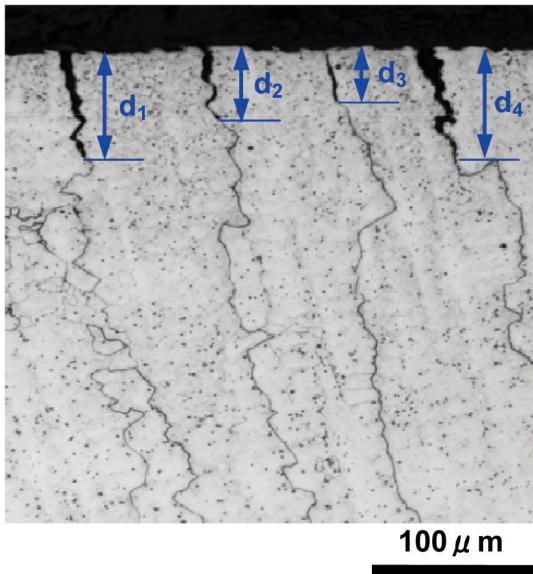


Fig. 2 Optical micrograph of cracks observed in a cross section of as heat treatment specimen after the corrosion test.

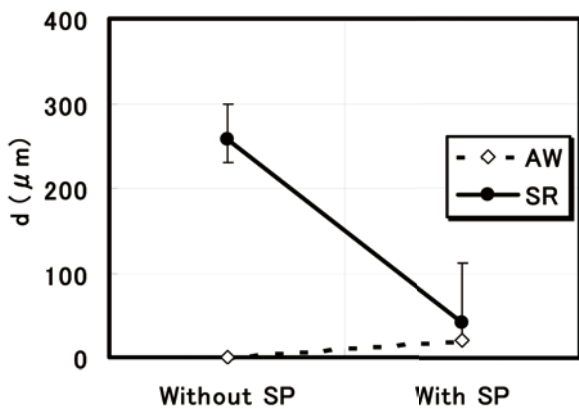


Fig. 3 Effect of shot peening on crack depth d after the corrosion test.

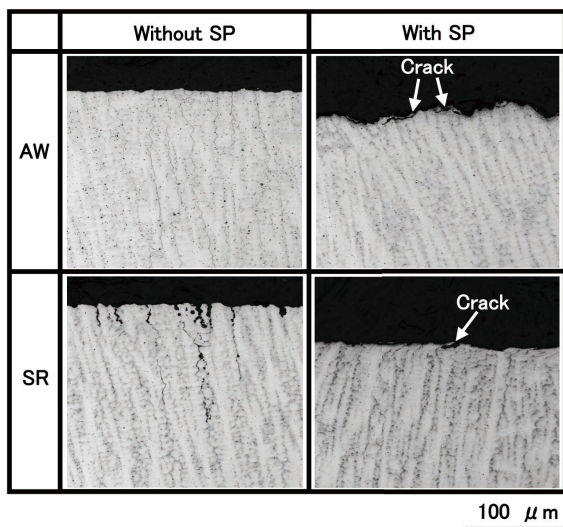


Fig. 4 Optical micrographs of near surface in a cross section of specimens after the corrosion test.

Table 2 Condition of residual stress measurement by X-rays diffraction method.

Radiations/filter	Cr-K β
Diffraction	Ni, 311
Diffraction angle $2\theta_0$	153.6 °
Tube voltage/current	30 kV/ 10 mA
Irradiated area	ϕ 2.0 mm

生じる場合があり、粒界腐食と判断することは困難であることから、15 μ m 未満の割れは測定データから除外した。そして、観察された割れの中で最も深い割れ上位 10 本の平均値 (d) を求めた。d が大きいほど耐粒界腐食性が低いことを意味している。なお、15 μ m より深い割れが 10 本に満たない場合は、測定できた本数の割れの平均値を d とし、最も少ない割れ本数は 2 本であった。また、ショットピーニングを施した試験片の一部に、表面近傍は粒内で割れ、その後粒界に沿って進展する割れが観察された。初期の粒内割れは腐食試験以外の要因で割れた可能性があるが、本研究では粒内のみの割れも含めて観察された深さ 15 μ m 以上の割れ深さを測定した。

2.3 X線回折法による応力測定

製作した試験片中央部の表面応力を X 線回折法で測定した。残留応力の測定条件を Table 2 に示す。 $2\theta - \sin^2 \psi$ 法¹³⁾を用いて、溶接線方向 (L 方向) と溶接線直交方向 (T 方向) の残留応力と $\psi_0=0^\circ$ における回折強度曲線の半価幅を求めた。

2.4 金属組織評価

組織観察は、光学顕微鏡、電解放出型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM)、および電解放出型透過型電子顕微鏡 (FE-TEM) を用いた。試験片断面をエメリー紙で 1500 番まで湿式研磨後、1 μ m のダイヤモンドペーストで鏡面研磨仕上げした。そして、10% シュウ酸水溶液中で電圧 1.5-2.0 V、10-15 s で電解腐食させて光学顕微鏡観察した。FE-SEM は加速電圧 5 kV で、FE-TEM は 200 kV で観察を行った。FE-TEM 試料は、試験片断面の表面近傍から集束イオンビーム加工観察装置 (FIB) を用いて採取し、エネルギー分散型 X 線分析 (EDS) 時のビーム径は約 1 nm とした。

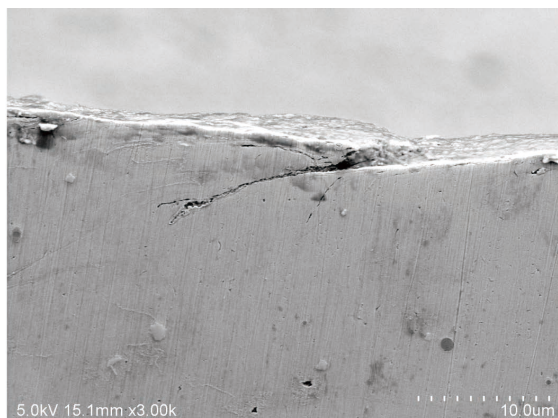


Fig. 5 SEM micrograph of crack observed in an as-welded specimen after shot peening.

3 実験結果および考察

3.1 ショットピーニングと熱時効処理が耐粒界腐食性に及ぼす影響

Fig. 3 に溶接のまま 893 K, 72 ks の熱処理を施した溶接金属について、ショットピーニング前後の d の変化を示す。溶接のままは、ショットピーニング前の d が 0 であるのに対し、ショットピーニング後は $20 \mu\text{m}$ となり、ショットピーニングにより d が大きくなった。一方、熱処理材では、ショットピーニング前の d は $257 \mu\text{m}$ であったが、ショットピーニング後は $42 \mu\text{m}$ となり、ショットピーニングにより d が小さくなって溶接のままと逆の傾向を示した。Fig. 4 に各試験片における腐食試験後の断面観察結果を示す。ショットピーニングを施した溶接のまま材では、割れはデンドライトの成長方向に沿って進展していないことから、粒内割れであると考えられる。そのため、観察された割れは腐食試験による割れでは無い可能性が示唆されるため、腐食試験前の断面を観察した。Fig. 5 に腐食試験前の SEM 観察結果を示す。Fig. 4 と同様の形態の割れが観察されたことから、Fig. 4 に示したショットピーニング後の割れは腐食試験で発生したのではなく、ショットピーニングで生じた可能性が高い。ショットピーニングは表面に強い衝撃が負荷されることが知られている。本研究では、カバレッジ 200% でショットピーニングを行っているため、初期に表面が加工硬化し、さらにショットピーニングによる衝撃が加わり、Fig. 5 に示した割れが形成されたもの

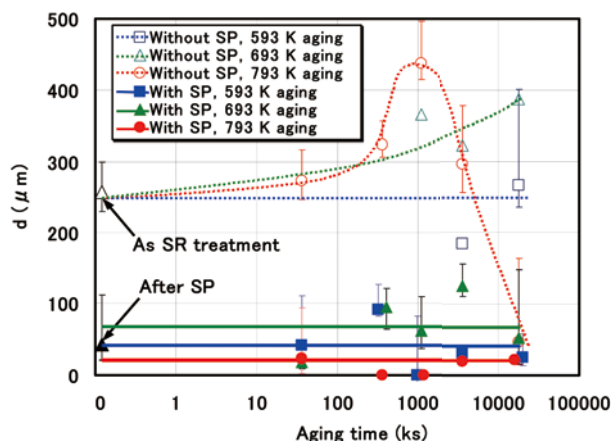


Fig. 6 Effect of thermal aging treatment at 593-793 K on crack depth d in the weld metals with and without shot peening.

と考えられる。

一方、Fig. 4 に示すように、熱処理のまま 200 μm 以上の深い割れが多く観察され、ほとんどの割れは柱状晶粒界に沿って進展していた。これは、893 K, 72 ks の熱処理により粒界にクロム炭化物が析出し、その周囲にクロム欠乏層が形成されるため、耐粒界腐食性が低下したものと考えられる。しかし、ショットピーニングにより d は低下し、観察された割れは Fig. 5 と同様の形態であったことから、この割れはショットピーニングにより生じた割れと示唆される。そのため、腐食試験で割れはほとんど発生しないと考えられることから、ショットピーニングで耐粒界腐食性は向上すると言える。

Fig. 6 に熱処理を施したショットピーニング有無の溶接金属において、593-793 K で熱時効処理したときの d の変化を示す。ショットピーニング無しは、593 K で d はほとんど変化しないが、693 K では時間経過に伴い高くなった。そして、793 K では 1.08 Ms までは d が大きくなるが、1.08 Ms より長時間で d が小さくなる傾向を示し、18 Ms は熱時効処理前より d が小さくなって耐粒界腐食性が向上した。これは、1.08 Ms まではクロム欠乏層が成長するが、それ以降はクロム欠乏層中に周囲からクロムが拡散・充填されてクロム欠乏層のクロム濃度が上昇したためと考えられる。一方、ショットピーニング有りは、593-793 K の熱時効処理で d に大きな変化は見られず、耐粒界腐食性に顕著な低下は見られなかった。

以上より、ショットピーニングで耐粒界腐食性は向上する結果を得た。この理由について、次節以降

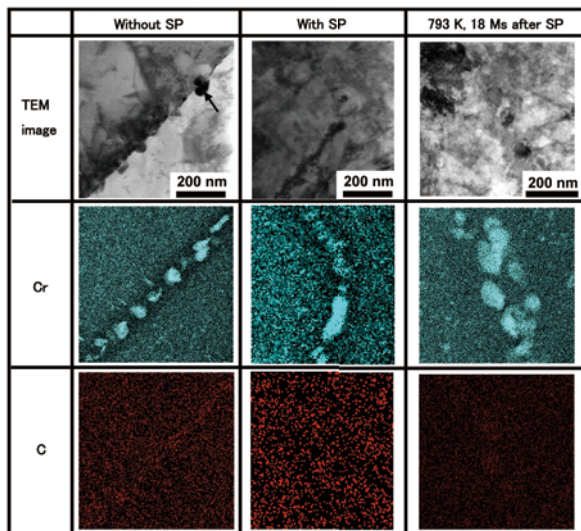


Fig 7 TEM Fig. micrographs and EDS maps of near surface of without peening, with peening, and subsequent thermal aging treatment for 18 Ms at 793 K in the weld metals subjected to the SR treatment.

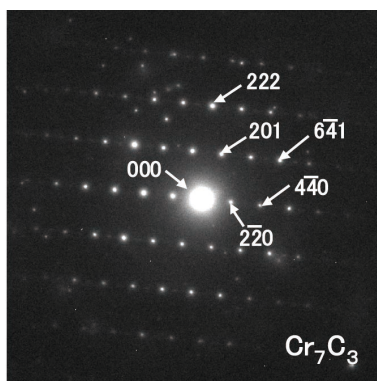


Fig. 8 Electron beam diffraction image of the grain boundary precipitation of without peening in Fig. 7.

で金属組織，引張ひずみ，圧縮残留応力の点から考察を行った。

3.2 ショットピーニングによる耐粒界腐食性向上の金属組織からの考察

ショットピーニングで耐粒界腐食性が向上する理由を明らかにするため，表面近傍の微細組織観察を行った。Fig. 7 に熱処理材のショットピーニング前後とショットピーニング後に 793 K, 18 Ms 熱時効処理したときの柱状晶粒界近傍における組織と EDS 分析結果を示す。また，Fig. 8 に Fig. 7 中のピーニング無しの TEM 写真に示す矢印の粒界析出物の電子線回折結果を示す。ショットピーニング前は柱状晶粒界に炭化物が析出しており，Fig. 8 の結果より M_7C_3 型の炭化物と同定された。炭化物の周囲はクロ

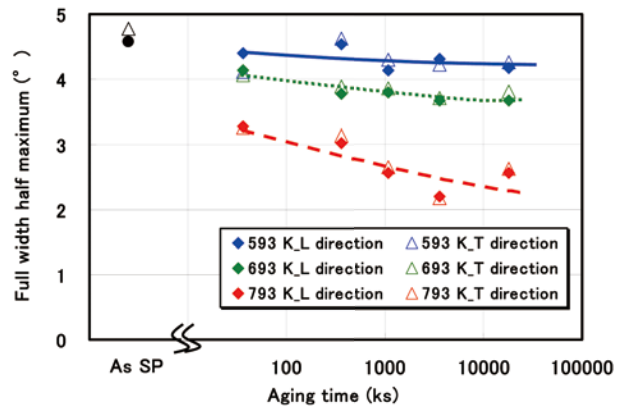


Fig. 9 Effect of thermal aging treatment at 593-793 K on full width half maximum by X-ray diffraction method in weld metals after application of shot peening.

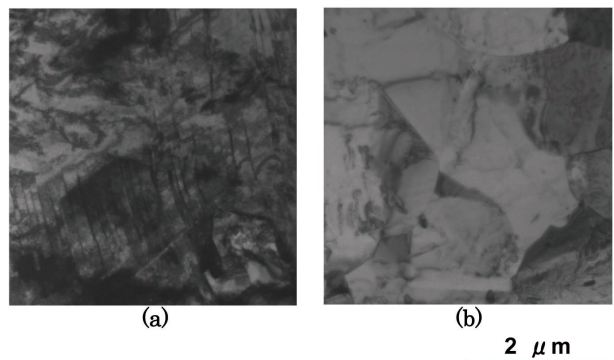


Fig. 10 TEM micrographs of near surface in the weld metals subjected to the SR treatment: (a) as shot peening (b) thermal aging treatment for 18 Ms at 793 K after application of shot peening.

ム濃度が低下した領域，すなわちクロム欠乏層が幅約 100 nm に渡り形成されている。ショットピーニング後は表面から約 2 μ m 板厚内部の観察結果で，柱状晶粒界に炭化物の析出が見られ，ショットピーニング前と同様の幅のクロム欠乏層が残存していた。そのため，ショットピーニングを施すと耐粒界腐食性が向上するのは，粒界クロム欠乏層が消失したためでは無いと言える。そして，ショットピーニング後に 793 K, 18 Ms で熱時効処理したものは炭化物の周囲に明瞭なクロム欠乏は生じていなかった。これは，高温かつ長時間の熱時効処理で，クロム欠乏層の周囲からクロムが拡散・充填されてクロム欠乏層のクロム濃度が上昇したためと考えられる。

以上より，ショットピーニングで耐粒界腐食性が向上するのはクロム欠乏層が消失するためでは無い。そのため，力学的な要因が耐粒界腐食性に影響を及ぼしていると考えられることから，ショット

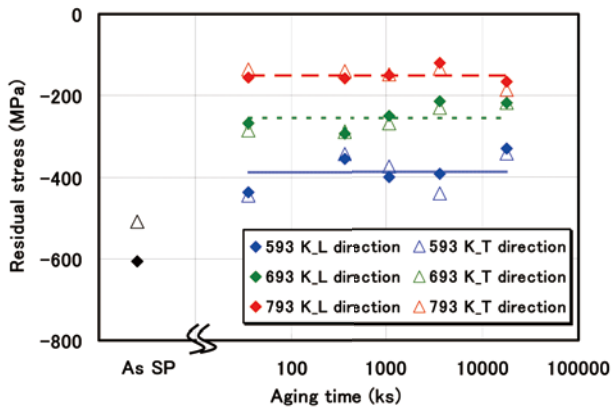


Fig. 11 Effect of thermal aging Fig. treatment at 593-793 K on residual stress by X-ray diffraction method in weld metal subjected to the SR treatment.

ピーニングで表面に付与される引張ひずみと圧縮残留応力の各々について、耐粒界腐食性に及ぼす影響を考察した。

3.3 ショットピーニングによる耐粒界腐食性 向上の引張ひずみの挙動からの考察

ショットピーニングにより表面に付与される引張ひずみを定量測定することは困難であることから、X線回折法で得られるX線プロファイルの半価幅を用いて検討した。一般に、半価幅と塑性ひずみは相関がある¹⁴⁾とされており、熱時効処理による塑性ひずみの定性的な変化を把握できる。Fig. 9に熱処理した溶接金属におけるショットピーニング後の熱時効処理による半価幅を示す。同一条件下ではL方向とT方向の値に大きな差は見られなかった。ショットピーニングのままの半価幅は 4.7° であるが、熱時効処理温度が高温になるほど時間経過に伴う低下量が大きくなった。したがって、ショットピーニングで付与された引張ひずみは熱時効処理で低下し、高温かつ長時間になるほど大きく低下する。Fig. 10にショットピーニングのままとショットピーニング後に793 K、18 Ms熱時効処理したときの表面近傍の組織観察結果を示す。ショットピーニングのままでは、すべり線が多く観察され、転位密度が高い。一方、熱時効処理後は約 $0.5\text{-}2\ \mu\text{m}$ の微細な結晶粒からなる組織を呈し、すべり線は消失して転位密度が低下した。これは、Fig. 9に示した熱時効処理でひずみが低下することと符合する。なお、新たに形成された微細結晶粒の粒界に炭化物の析出は見られなかった。

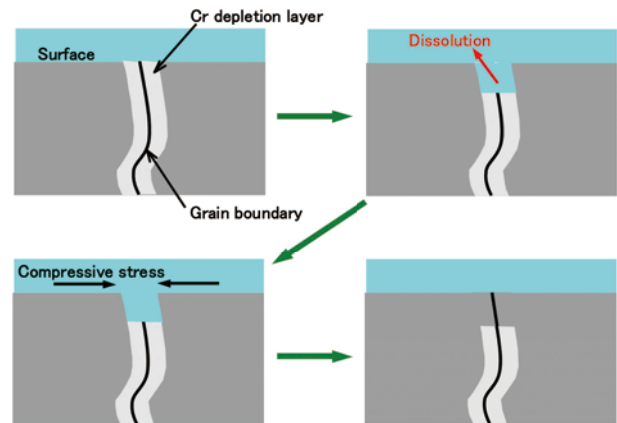


Fig. 12 Schematic illustration of the mechanism to improve of the intergranular corrosion resistance by compressive residual stress.

以上より、ショットピーニングで表面に付与される引張ひずみは、593-793 Kの熱時効処理で低下することが示唆された。しかし、耐粒界腐食性に顕著な変化は見られないことから、引張ひずみが耐粒界腐食性に及ぼす影響は少ないと考えられる。上出ら¹⁰⁾は、600合金の母材に対して引張予ひずみの付与で耐粒界腐食性が低下することを報告しているが、本研究では逆の傾向を示している。そのため、力学的要因の一つである圧縮残留応力の観点から、耐粒界腐食性に及ぼす影響を考察した。

3.4 ショットピーニングによる耐粒界腐食性 向上の圧縮残留応力の挙動からの考察

Fig. 11にショットピーニング後に熱時効処理したときの各方向の表面残留応力の変化を示す。なお、残留応力値のマイナスは圧縮を表している。同一条件で溶接線方向(L方向)と溶接線直交方向(T方向)に大きな差は見られなかった。ショットピーニングのままでは $-600\ \text{MPa}$ 近くの高い圧縮残留応力が付与されているが、熱時効処理により圧縮残留応力が緩和し、熱時効温度が高温になるほど緩和が大きくなった。しかし、初期に圧縮残留応力が緩和した後には保持時間が18 Msまで大きな変化は見られず、最も高温の793 Kにおいても $-120\ \text{MPa}$ 以上の高い圧縮残留応力が表面に持続していた。そのため、表面に作用する圧縮残留応力により耐粒界腐食性が向上したものと考えられる。このメカニズムについて、以下に考察する。Fig. 12に耐粒界腐食性向上のメカニズムについての模式図を示す。3.2節の観察結果より、ショットピーニング後も表面近傍の粒界に

クロム欠乏層が残存していることから、腐食試験によりクロム欠乏層は溶解する。しかし、表面に圧縮残留応力が作用していることから、溶解した部分が閉じて、粒界の表面近傍はクロム欠乏がほとんど生じていない部分に覆われる。これにより、粒界クロム欠乏層が腐食環境に直接曝されないため、粒界は溶解が進行せず、耐粒界腐食性が向上したものと考えられる。ただし、Fig. 7 に示したように、高温かつ長時間の熱時効処理でクロム欠乏層は消失する傾向を示すことから、この場合は圧縮残留応力が作用しなくても耐粒界腐食性は高くなっていることが推察される。また、893 K、72 ks で熱処理を施し、かつ幅 15 mm、長さ 25 mm に切断した試験片を用いているため、溶接時に生じた表面の引張残留応力は大幅に低下していると考えられるが、腐食試験後は 200 μ m 以上の深い割れが観察された。そのため、本研究で観察された割れは引張応力が重畳して発生する応力腐食割れではなく、粒界腐食であると言える。圧縮残留応力の付与で応力腐食割れが抑制¹⁾されることは広く知られているが、粒界腐食においても圧縮残留応力が割れの抑制に有効であることが示唆された。

以上より、ショットピーニングで引張ひずみと圧縮残留応力が表面に付与され、このうち圧縮残留応力の作用により耐粒界腐食性が向上したものと考えられた。

4 結言

本研究は、182 合金を対象にショットピーニングおよびショットピーニング後の熱時効処理が耐粒界腐食性に及ぼす影響を調査した。結果を以下にまとめる。

- 1) 893 K、72 ks で熱処理を施した 182 合金は、ショットピーニングを施すことで耐粒界腐食性が向上する。ショットピーニング後も柱状晶粒界にクロム欠乏層が残存しているにも関わらず耐粒界腐食性が向上するのは、ショットピーニングで付与される表面圧縮残留応力によるものと考えられた。
- 2) 593-793 K で 18 Ms まで熱時効処理を施してもショットピーニング後の耐粒界腐食性に顕著な変化が見られないのは、熱時効処理後も表面圧縮残留応力が持続するためと考えられる。

- 3) 引張ひずみと耐粒界腐食性との間に明瞭な相関は見られないことから、引張ひずみが耐粒界腐食性に及ぼす影響は少ないと考えられた。

参考文献

- 1) T. Aoki, S. Hattori, H. Anzai and H. Sumimoto: Stress Corrosion Cracking In Ni-base Alloy Used for a Long Time in a BWR, *Mentology*, 4-1 (2005), 34-41. (in Japanese)
- 2) T. Fukumura and N. Totsuka: Primary Coolant Leakage Path Research of Reactor Vessel Head Penetration, *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, 15 (2008), 113-124. (in Japanese)
- 3) N. Saito, S. Tanaka and H. Sakamoto: Effect of Corrosion Potential and Microstructure on the Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Nickel-Base Alloys in High-Temperature Water, *Corrosion*, 59-12 (2003), 1064-1074.
- 4) C. L. Briant and E. L. Hall: The Microstructural Causes of Intergranular Corrosion of Alloys 82 and 182, *Corrosion*, 43-9 (1987), 539-548.
- 5) K. Yamauchi, I. Hamada, T. Okazaki and T. Yokono: Improvement of Intergranular Corrosion and Intergranular Stress Corrosion Cracking Resistance of Nickel-Base Weld Metals by Stabilization Parameter Control, *Boshoku Gijyutsu*, 35 (1986), 605-615. (in Japanese)
- 6) S. Nishikawa, Y. Horii and K. Ikeuchi: Effects of Carbon and Niobium Contents on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Shielded Metal Arc Weld Metals for 600 Type Alloy in High Temperature Pressurized Pure Water, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 27-3 (2009), 247-260. (in Japanese)
- 7) Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki and Y. Ochi: Retardation of Crack Initiation and Growth in Austenitic Stainless Steels by Laser Peening without Protective Coating, *Materials Science and Engineering*, A417 (2006), 334-340.
- 8) W. Sagawa, F. Yoshikubo, R. Morinaka, A. Kanno, H. Hato and N. Saitou: Application of Water Jet Peening (WJP) Technology to BWR Core Support Structures, *Mentology*, 7-4 (2009), 69-76. (in Japanese)
- 9) K. Okimura, T. Ohta, T. Konno, M. Narita and M. Toyoda: Reliability of Water Jet Peening as Residual Stress Improvement Method for Alloy 600 PWSCC Mitigation, *Proceeding of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE16, May11-15, 2008,

Orlando, Florida, USA.

- 10) H. Kamide and T. Dakazume: Effect of Prestrain on Intergranular Corrosion of Inconel 600 Alloy in H₂SO₄-NaCl Solution, Zairyo-to-Kankyo, 50 (2001), 577-581.
- 11) P. Peyre, X.Scherpereel, L.Berthe, C.Carboni, R.Fabbro, G.Beranger and C.Lemaitre: Surface modifications induced in SUS316L Steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance, Materials Science and Engineering, A280(2000), 294-302.
- 12) S. Nishikawa, S. Okita and A. Yamaguchi: Sustainability of compressive residual stress by stress improvement processes, Mentenology, 11-4 (2013), 69-76. (in Japanese)
- 13) 日本材料学会 X線材料強度部門委員会：X線応力測定法標準（2002年版）－鉄鋼編－（JSMS-SD-5-02）.
- 14) カリティ：X線回折要論，アグネ(1963)，265-271.



西川 聡

X線回折による 塑性ひずみ評価手法の検討

Investigation on evaluation method of plastic strain by X-ray diffraction

溶接・非破壊検査技術センター 水野 亮二, 西川 聡, 古川 敬
金沢大学 佐々木 敏彦
東北大学 三原 毅

It is important to know the degree of plastic strain in order to evaluate integrity assessments of components. Correlation between the plastic strain and the full width at half maximum (FWHM) of diffracted X-ray profile was investigated using X-ray apparatus with 2 dimension detector for austenitic materials. As a result, it was shown that the FWHM depended on the plastic strain. However, in case there was surface working layer by machining, the FWHM hardly changed for the plastic strain.

Keywords plastic strain, full width at half maximum, X-ray diffraction, 2 dimensions detector

1 はじめに

一般的に構造物の塑性ひずみは、疲労強度等の材料特性に影響を及ぼす場合があり、構造物の塑性ひずみを測定、評価することは有益である。原子力発電設備でも地震後の機器の健全性評価において、塑性ひずみを評価する場合がある^[1,2]。塑性ひずみの評価は現場測定であり、検出は硬さ法が用いられており、測定は妥当性が確認された方法を用いることになっている^[3]。近年、X線回折法において2次元検出器（イメージングプレート）を用いることによりX線装置の小型・軽量化及び計測時間短縮ができ、

現場で簡便に塑性ひずみを測定できる可能性がある。本研究では、原子力機器材料であるオーステナイト系ステンレス鋼及びNi基合金を対象にX線回折により塑性ひずみを測定する技術の実用化を目的として、2次元検出器及び0次元走査型検出器（シンチレーションカウンター）を用い、X線回折線の半価幅と塑性ひずみの相関性について調査した。

2 実験方法

SUS304,SUS316L（ γ 系ステンレス鋼）、NCF600（Ni基合金）及びSS400（炭素鋼）を供試材として

Table 1 Measurement condition for 2-dimension detector.

Characteristic X-ray	CrK α	CrK β	MnK α
Diffraction line	α Fe-211	γ Fe-311、Ni-311	
Tube voltage(kV)	20	20	15
Tube current(mA)	1	1	0.9
Irradiated area	ϕ 2mm		
Incident angle($^{\circ}$)	0		

Table 2 Measurement condition for 0-dimension detector.

Characteristic X-ray	CrK α	CrK β
Diffraction line	α Fe-211	γ Fe-311、Ni-311
Tube voltage(kV)	30	30
Tube current(mA)	10	10
Irradiated area	4x4mm ²	
ψ angle($^{\circ}$)	0, 20.7, 30, 37.8, 45	

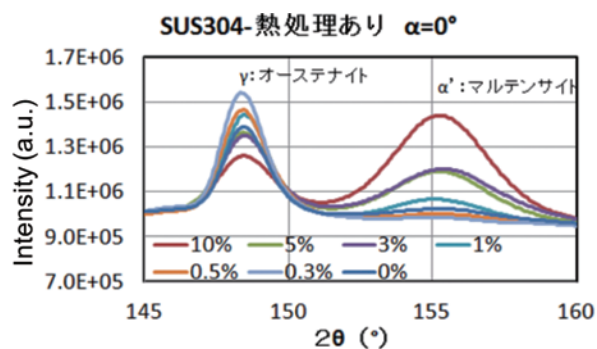


Fig. 1 X-ray diffraction lines for SUS304 specimen with heat treatment by 2D detector with CrK β .

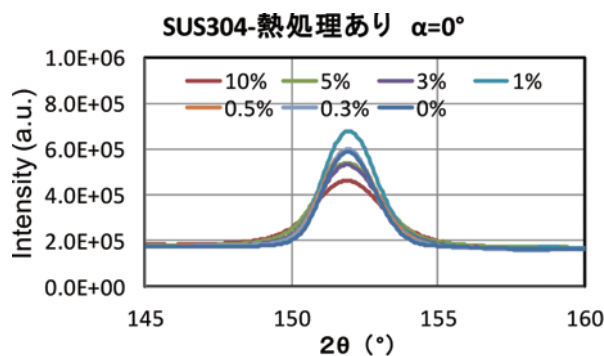


Fig. 2 X-ray diffraction lines for SUS304 specimen with heat treatment by 2D detector with MnK α .

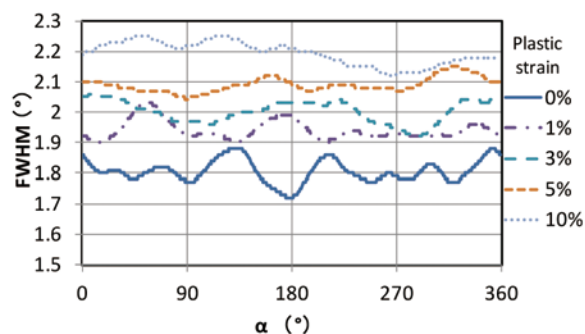


Fig. 3 Relation between α angle and full width at half maximum (FWHM) for SUS304 specimen with heat treatment by 2D detector with CrK β .

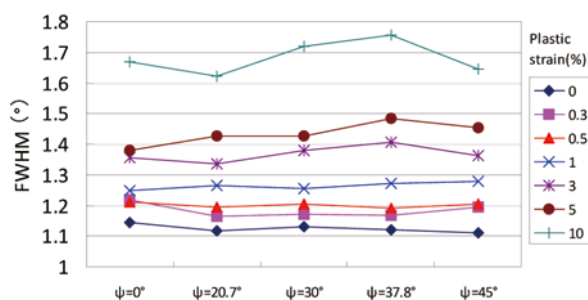


Fig. 4 Relation between ψ angle and full width at half maximum (FWHM) for SUS304 specimen with heat treatment by 0D detector.

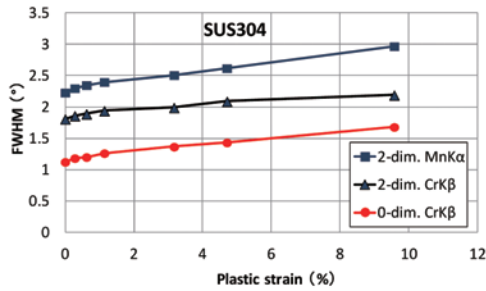
用いた。各材料は、平行部長さ $120 \times 30 \times 5t$ (mm) の引張試験片に加工し、加工時のひずみを除去するために、一部の供試材に対して応力除去焼鈍(熱処理)を行った。その後、引張試験により塑性ひずみを(0), 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10(%)付与し、熱処理あり及び熱処理なしの塑性ひずみ付与試験片を作製した。X線回折線の測定は、2次元検出器及び0次元走査型検出器を用いて行った。各検出器による測定条件を表1及び表2に示す。2次元検出器の測定は、PULSTEC製 μ -X360を用い、入射角 0° で一個の回折環に対して周方向に500点測定した。また、0次元走査型検出器による測定は、RIGAKU製 MSF-3Mを用い、引張軸方向に ψ 角一定で0から 45° の5点で測定した。半価幅は、各X線回折線から半価幅中点法により求めた。測定は、機械加工のままの表面において行った。

3 実験結果

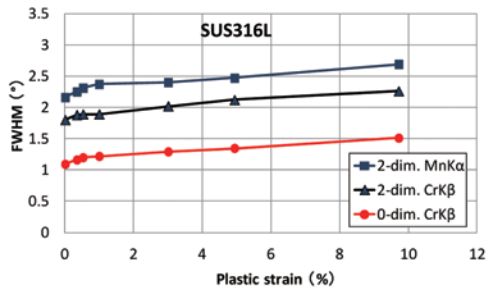
図1にCr-K β を用いた2次元検出器のSUS304の測定におけるX線回折線の一例を示す。付与した

塑性ひずみ量に対してX線回折線は変化し、塑性ひずみ量が増加するに従って、オーステナイトのピークが弱くなり、加工誘起マルテンサイトと考えられるピークが強くなることが認められた。図2にMn-K α を用いた2次元検出器のSUS304の測定におけるX線回折線の一例を示す。付与した塑性ひずみ量に対してX線回折線は変化し、塑性ひずみ量が増加するに従って、オーステナイトのピークが弱くなりことが認められた。Mn-K α の場合、 α Fe(211)のピークは 2θ の測定範囲外であるのでオーステナイトのピークのみ計測された。

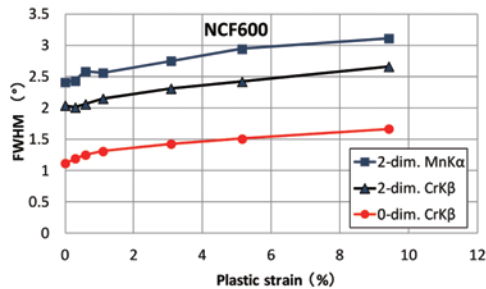
図3にCr-K β を用いた2次元検出器の測定における α 角(回折環の中心角)と半価幅の一例を示す。図2は焼鈍処理を行ったSUS304の結果であり、 $\alpha = 0, 180^\circ$ が引張軸方向に対応する。 α 角に対する半価幅に明確な相関性は見られなかった。図4に0次元検出器の測定における ψ 角と半価幅の関係の一例を示す。図4はSUS304の結果である。 ψ 角に対する半価幅に明確な相関性は見られなかった。 ψ 角及び α 角に対する半価幅の相関性は、他の材料につい



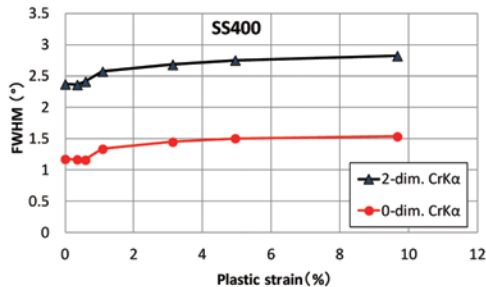
(a) SUS304



(b) SUS316L



(c) NCF600

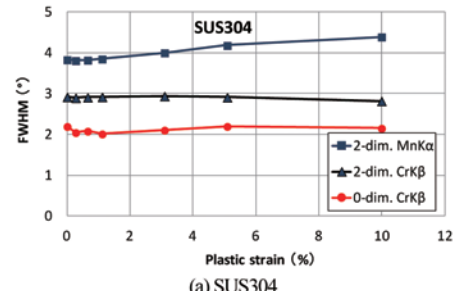


(d) SS400

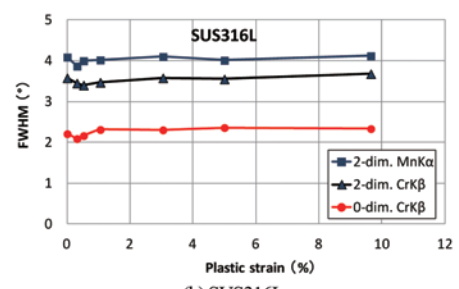
Fig.5 Relation between plastic strain and full width at half maximum(FWHM) for specimens with heat treatment.

ても同様の傾向であった。

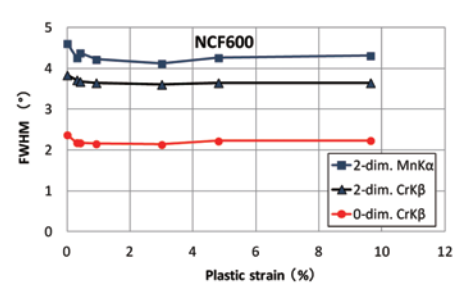
図 5 に各材料の熱処理ありの試験片の塑性ひずみと半価幅の関係を示す。半価幅は、0次元検出器の場合は、 ψ 角 5 点の平均値、2次元検出器の場合は、 α 角 500 点の平均値である。いずれの材料においても塑性ひずみと半価幅に明らかな相関性がみられ、塑性ひずみの増加と共に半価幅も大きくなっている。いずれの測定条件においても絶対値は異なるが、塑性ひずみに対する半価幅の増加傾向は同様であった。



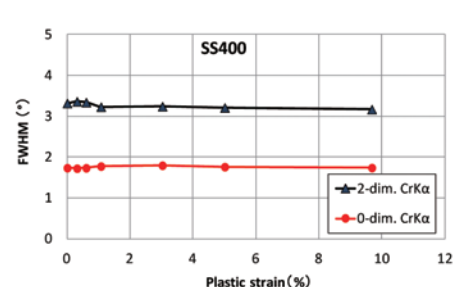
(a) SUS304



(b) SUS316L



(c) NCF600



(d) SS400

Fig.6 Relation between plastic strain and full width at half maximum(FWHM) for specimens without heat treatment.

図 6 に各材料の熱処理なし試験片の塑性ひずみと半価幅の関係を示す。SUS304 では MnK α を用いた 2次元検出器の測定では、相関性が見られたが、他では見られなかった。相関性があるのは、加工誘起マルテンサイトの析出による影響と考えられる。CrK β の計測では、オーステナイトと加工誘起マルテンサイトのピークが重なるため半価幅の評価に誤差が生じたためと考えられる。他の材料では、塑性ひずみと半価幅に相関性は見られず、熱処理ありの場合の塑性ひずみ 10% のときの半価幅より大きかつ

た。熱処理を行っていないため機械加工時のひずみがあり、その後引張試験で塑性ひずみを付与しても加工効果により塑性ひずみ量は変化しなかったと考えられる。付与した塑性ひずみを評価するためには、表面加工層を除去した後計測する必要があると考えられる。

各計測条件において半価幅の絶対値が異なるのは、照射面積やデータ処理条件が異なるためと考えられる。オーステナイト系材料の2次元検出器を用いたCrK β とMnK α による半価幅は、MnK α の方が大きいですが、回折角の違いのためと考えられる。CrK β でのX線照射時間は、120秒であるのに対して、MnK α では同等の測定データを取得するのに15秒であった。

4 まとめ

塑性ひずみとX線回折線の半価幅の相関性を調査した結果、熱処理あり試験片では、いずれの測定条件においても明確な相関性が認められ、塑性ひずみ評価の見通しが得られた。熱処理なし試験片では、表面加工層の影響により付与した塑性ひずみの評価

は出来なかった。今後、表面加工層を除去し、付与した塑性ひずみとX線回折線の半価幅の相関性について調査し、表面加工層がある場合の塑性ひずみ評価の可能性について検討する。

本研究の成果は、文部科学省エネルギー対策特別会計委託事業委託業務「原子力発電機器の強度保証のための高信頼性に関する研究開発」（課題番号：120804、平成24年度～平成27年度）によることを記し、感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価 平成22~23年度報告, JANTI-SANE-04, 一般社団法人 日本原子力技術協会 中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会, 平成24年3月
- [2] 地震後の機器健全性評価ガイドライン[地震前計画と地震後の点検・評価], JANTI-SANE-G1-第1版, 一般社団法人 日本原子力技術協会, 平成24年3月
- [3] 地震後の機器健全性評価ガイドライン[検査手法-配管・基礎ボルト等], JANTI-SANE-G2-第1版, 一般社団法人 日本原子力技術協会, 平成24年3月



水野亮二



西川 聡



古川 敬

ASME規格Section Iの溶接設計に関する 改正案の紹介

The Introduction of Revision for Welding Design of ASME B&PV Codes, Section I

規格基準室 大石 勇一

After 2013 Addenda had been published, the publication interval of ASME Boiler and Pressure Vessel Codes was changed from 3 years to 2 years, and Addenda were abolished. Namely, the publication frequency of revised version of the Codes is reduced from every year to every other year. However, Committee activities to improve and correct the Codes have been continued energetically. This paper is intended to introduce the recent approvals of revision which are concerned with welding design for Section I (Power Boilers) 2015 Edition.

Keywords ASME Code, Section I, welding design

1 はじめに

ASME Boiler and Pressure Vessel Code (以下、「ASME 規格」という。)は、我が国の規格基準と比較して改正が早く、特に安全に係る見直しや最新技術の採り入れ等は、積極的に行われているといえる。従来は、3年毎に新しい年版 (Edition), そしてその間の年は追補版 (Addenda) を発行することにより、迅速な改訂が行われてきた。しかし、2013年以降は新しい年版 (Edition) の発行が2年毎になったものの、追補版 (Addenda) が廃止された。言い換えれば、これまで毎年改正されてきたものが、2013年以降は隔年の改正に変わったことになる。

しかし、ASME 規格委員会における規格の見直し作業は、従来どおり多くのメンバーが参集して行われており、しかもボランティア活動である。さらに、メンバー以外の多くのボランティアも参加して、この活動を支えているという状況に変わりはない。

そこで、最近検討された多くの課題のうち、溶接設計関係の改正案を紹介する。紹介する改正案は既

に可決されており、2015年版のSection I (Rules for Construction of Power Boilers) に反映されることになっている。

2 Ni基合金の継手強度低減係数 (WSRF)

Section Iは、ボイラ用の耐熱材として種々のNi基合金の使用を認めている。しかし、継手強度低減係数 (Weld Joint Strength Reduction Factor : WSRF) が与えられておらず、これら材料で製造された長手継手を有する機器をクリープ領域で使用することができないという問題があった。このため、WSRFが初めて導入された時の基本概念、及びNi基合金溶接部のクリープ強度データに基づいて、Ni基合金のWSRFを追加する改正提案が行われた。Section Iの場合、PG-26にWSRFに関する規定が設けられている。

提案されたWSRFを表1に示す。WSRFは、高温で長時間使用すると、特に改良9Cr鋼溶接部のクリープ強度が低下するという問題を考慮して導入されたものであり、B31.3 (プロセス配管規格) 委員

会の主導で検討が行われ、2008年版から関係する規格共通の設計ルールとして規定されている。従来の継手効率（非破壊試験の有無によって与えられる品質係数）とは異なり、具体的な強度の低減率を表すものであり、溶接部のクリープデータが存在する場合はそれに基づいて係数が決定される。提案されたNi基合金のWSRFのうち、617合金（UNS N06617）、230合金（UNS N06230）及び740合金（UNS N07740）等は、十分なデータの提供があったため厳密に値が決定されている。一方、十分なクリープデータがない材料（前出の3種類以外のNi基合金）の値は、クリープが支配する許容応力の開始温度より50°F（27.8°C）低い温度（TSとする）のWSRFを1.0、TSより550°F（305°C）高い温度の値を0.5（最低値）とし、その間を次式により直線で近似する。そして、550°F（305°C）高い温度を超えて許容応力が規定されている場合は、そのWSRFを一律0.5にするという方法で与えられている。これを式で表すと、次のようになる。

$$W = 1 - 0.000909 \times (T_D - T_S)$$

T_D ：設計温度

参考： $(1 - 0.5) \div 550 [^{\circ}\text{F}] \cong 0.000909$

この方法は、実績のある代表的なオーステナイト

系耐熱材料の溶接部のクリープデータに基づいて策定されたものであり、保守的な値を与える。そして、既に与えられている改良9Cr鋼溶接部のWSRFも同様の方法を用いて決定された。表1に示すNi基合金のWSRFは承認されて、2015年版のSection Iに反映されている。

なお、ASME規格は、年版（Edition）の発行間隔が2年に短縮されたものの、新旧の年版の間の改正を補完する目的で発行されていた追補版（Addenda）が廃止されたため、追加のWSRFが反映された規格が発行されるのは2015年となり、それまでの間、長手継手を有するNi基合金の構造物を高温で使用することができない。この対応策として、上述の改正案をCode Caseとして与え、早期に使えるようにする提案も行っている。Code Caseは、新しい技術や知見に基づいた暫定的なルール、又は緊急を要するルールとして年4回発行されるものである。このNi基合金のWSRFも、改訂を待たずに至急使えるようにする必要があると判断され、Code Case 2805（Supplement 6に含まれている）として発行された。

3 高温で使用される管寄せの溶接設計

高温で使用されるボイラの管寄せに発生する損傷事例として2番目に多く報告されているものは、ス

表1 Ni基合金のWSRF

Temperature °F	Temperature °C																	
	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650
Nickel Base Alloys	427	454	482	510	538	566	593	621	649	677	704	732	760	788	816	843	871	899
N06045	1.00	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.55	0.50	0.50	0.50	0.50	NP	NP	NP
N06600	1.00	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
N06690	—	1.00	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
N06601	—	—	1.00	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.55	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
N06025	—	—	—	1.00	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.55	0.50	0.50	0.50	0.50
N10276	—	—	—	1.00	0.95	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
N06022	—	—	—	—	1.00	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
N06230	—	—	—	—	1.00	0.95	0.91	0.86	0.82	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
N06625	—	—	—	—	—	—	1.00	0.95	0.91	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
N06617 (except SAW) ^[Note 1]	—	—	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
N06617 (SAW) ^[Note 2]	—	—	—	—	—	—	1.00	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
N07740	—	—	—	—	—	—	1.00	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	NP	NP
Autogenous welded Nickel Base alloys ^[Note 3]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

NP = Not permitted

Note 1: Includes SMAW, GTAW, and GMAW filler metal welds.

Note 2: SAW filler metal welds.

Note 3: Autogenous welds (made without weld filler metal) have been assigned a WSRF of 1.0 for Austenitic stainless steel materials up to 1500°F (816°C) and for Nickel Base alloys up to 1650°F (899°C), provided that the product is solution annealed after welding and receives nondestructive electric examination in accordance with the material specification.

タブチューブの溶接部に発生する割れである。その原因として、クリープによる管寄せのスウェリング、及びスタブチューブと管寄せの間で生じる酸化物の成長が考えられている。原因が後者の場合、管寄せにチューブを接続する部分溶け込み溶接として代表的な Fig. PW-16.1 (y-1) 及び (z-1) において問題となる。これらを図 1 に示すが、各々発電用火力設備の技術基準の解釈（以下「火技解釈」）の別図第 4(25) 及び (26) に相当する。

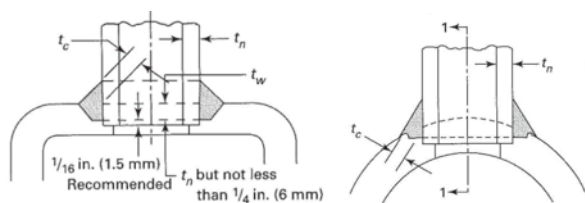


Fig. PW-16.1(y-1) Fig. PW-16.1(z-1)

図1. 高温で酸化物が問題となる設計

母材がフェライト系の場合、溶接部が 900° F (480° C) 以上に曝されると、スタブチューブ端部と管寄せのリセス（座繰り穴）底部との間の隙間に酸化物が生成され、それが隙間を押し広げるように成長することにより、溶接部が損傷するような応力が発生する。このため、この問題を解決するべく、EPRI (Electric Power Research Institute) において調査研究が行われた。

EPRI からの報告によると、チューブ端部と管寄せのリセス（座繰り穴）底部との間に 1/16 in. (1.5 mm) 以上の間隔（ギャップ）を設けるだけで酸化物が剥落し、隙間での酸化物の成長が生じないことが確認された。ギャップ以外に、チューブ又はリセスのどちらかに 10° 以上の勾配を設けるだけでも同様の効果が得られることが確認された。このため、900° F (480° C) 以上の高温で使用するフェライト系鋼材の管寄せにスタブチューブを接続する溶接を行う場合は、1/16 inch (1.5 mm) 以上の隙間を設けるか、あるいはチューブ端又は管寄せのリセスに 10° 以上の勾配を設けるという要求事項を PW-16.8 に規定し、そのことを例示する図を Fig. PW-16.8 として追加することになった。それらを図 2 に示す。

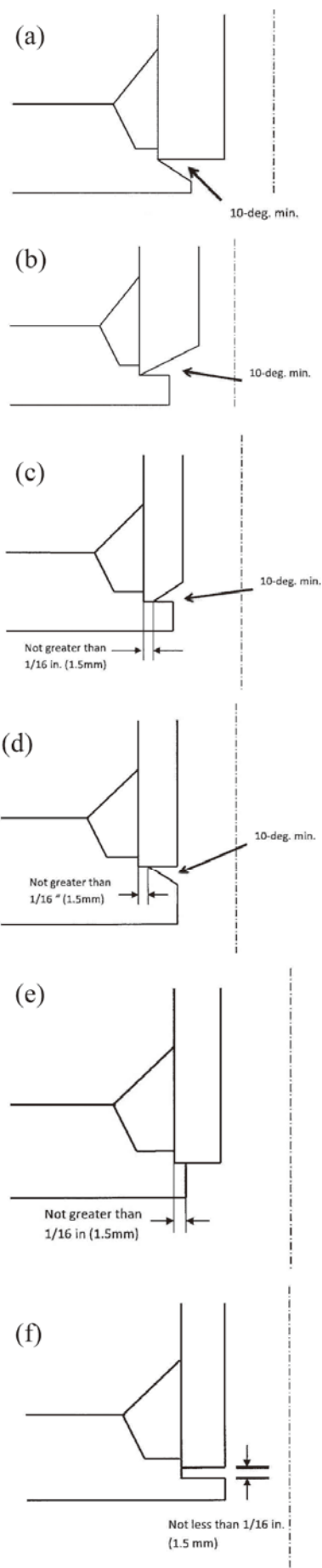


図2. 高温で使用される管寄せにチューブを取付ける設計

なお、当初提案されていた図は(a)、(b)及び(f)の3つであった。しかし、次のコメントを行った結果、(c)、(d)及び(e)を追加することになった。

①酸化物が成長する隙間の範囲を小さくすれば、溶接部の損傷を引き起こすような応力は生じない。「1/16 inch (1.5 mm) 以下」ならば、問題にならないと考えられる。

②(a)及び(b)の場合、勾配を設けた部分をシャープに仕上げる必要があると誤解される可能性がある。

③図(c)、(d)及び(e)に示すような「1/16 inch (1.5 mm) 以下」の寸法は、加工時の公差になるだけでなく、開先合せ等における部品の位置決めに有用である。

4 鏡板と胴の接続部の設計

Section Iは、厚さが異なる母材の突合せ溶接を行う場合について勾配を設けるよう規定しており、そのことを説明する図を Fig. PW-9.1 として掲げている(図3参照)。この図は、火技解釈の第141条に掲げられている図に相当し、厚さが異なる母材の突合せ溶接を行う場合、テーパ1/3より緩やかな勾配を設けて厚さの整合を図ることを示している。しかし、次のような問題が見出されたため、図の見直し検討が行われた。

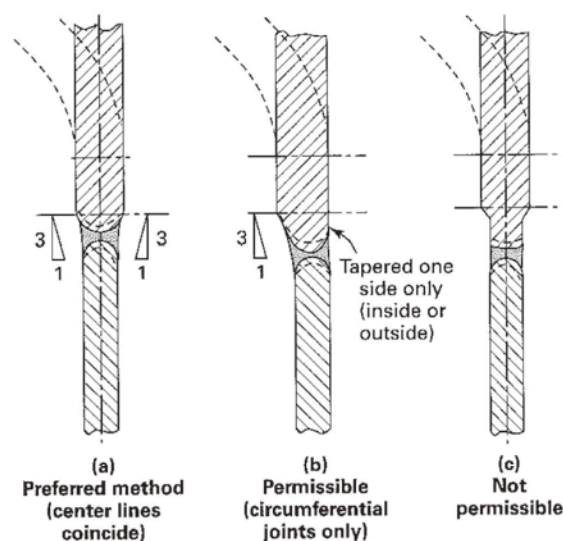


図3. 厚さが異なる場合の突合せ溶接 (Fig. PW-9.1)

①点線で表した曲線は、鏡板を表しているように見えるが、具体的に何を表しているのか説明がない。

②点線で表した曲線が鏡板であると仮定すると、全半球鏡板と胴の溶接部の場合、鏡板側の方が薄くなるため図と合わない。

③ Fig. PW-9.1 は、溶接部の位置に関係なく勾配を設けることを要求しているだけであり、その他の設計に関する重要な情報が含まれていない。

上述の問題を解決する目的で、鏡板と胴の接続方法を図として与える提案が行われた。当初は、胴よりも鏡板の方が薄くなる場合の図(半球形鏡板と胴を接続する図)を追加する提案が行われたが、鏡板の方が厚くなる場合の図(皿形又は半だ円形鏡板と胴を接続する図)も必要と判断された。また、鏡板と胴を接続する場合、両部材の内面又は外面を一致させるか、あるいは板厚の中心線を一致させる方法があるが、Section Iにはそのような情報を与える図がなく、Section VIII Division 1 (圧力容器)の Fig. UW-13.1 を参考にした図を追加するべきと判断された。追加されるものは図4に示すとおりであり、2015年版のSection Iに Fig. PW-9.3.3 として掲げられている。

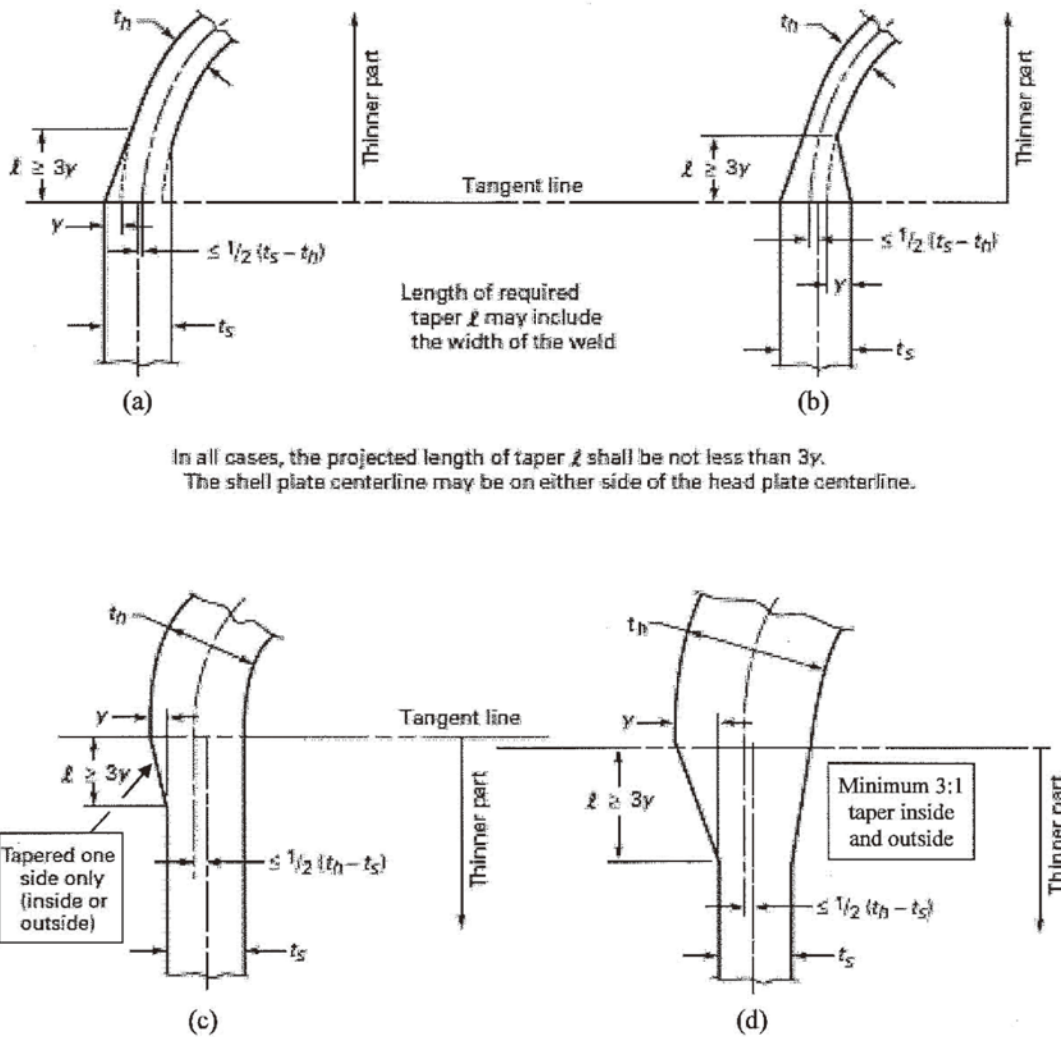
5 まとめ

2項及び3項で紹介した内容は、最新知見に基づいた改正案である。また、4項で紹介した内容は、他の関係するSectionとの整合化だけでなく、将来の規格ユーザのことを考えて、規定内容を高度化する、又はより参考となる情報を与えるという観点で検討された改正案である。

前述のとおり、ASME規格の改正版の発行頻度が毎年から隔年に減らされたが、編集及び出版に係る労力を低減するために行われたことである。しかし、規格委員会における見直し作業は従来どおり活発に行われている。また、改正が2年間隔になったという問題に対しては、Code Case (事例規格) や Interpretation (質疑応答) を適時発行し、改正版が発行されるまでの埋合せを行っている。さらに、誤記訂正については、委員会で承認されるとASME規格委員会 (ASME Code & Standard) のホームページ

ジで速やかに公表されている。しかし、改正版が発行されると、新たに誤記が生じることがある。また、改正の繰り返しにより規定間の齟齬が生じる場合も

あるため、おかしいと思われる場合は連絡して頂きたい。迅速に対応する所存である。



In all cases l shall be not less than $3y$ when t_h exceeds t_s . Minimum length of skirt is $3t_h$ but need not exceed $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm) except when necessary to provide required length of taper.
When t_h is equal to or less than $1.25t_s$, length of skirt shall be sufficient for any required taper.

Length of required taper l may include the width of the weld. The shell plate centerline may be on either side of the head plate centerline.

Definitions

t_h = nominal thickness of head

t_s = nominal thickness of shell

図4. 鏡板と胴の接続部の設計



大石勇一

ASME B31 規格委員会への参加によせて

Participation in ASME B31 Code Committee

規格基準室 佐藤 長光

The Boiler and Pressure Vessel Code (B&PV Code) which issues The American Society of Mechanical Engineers (ASME) is famous as the pressure equipment standard. ASME Code often indicates B&PV Code in Japan. A lot of Japanese Member and Visitor attend the B&PV Code Committee. The many Japanese is especially attending the Code Committee related to nuclear power. The standard of the pressure equipment also includes the piping standard, and on the other hand, ASME similarly organizes and issues the committee. However, the Japanese does not attend here excluding the author. Therefore, B31 Code, the history of B31 Code, organization and role of B31 Code Committee, topics are outlined in this report.

Keywords ASME, B31 Code, B31 Code Committee

1 はじめに

圧力設備の規格として、米国機械学会（以下、ASME という）が Code Committee を組織して発行しているボイラー圧力容器規格（以下、B&PV Code という）が有名である。日本では単に ASME 規格といえば、B&PV Code を指すことが多い。日本人の Member や Visitor も B&PV Code Committee に多く出席している。特に原子力関連の B&PV Code Committee には出席者が多い。

一方、圧力設備の規格としては、配管規格（以下、B31 Code という）もあり、同様に ASME が Code Committee を組織して発行している。しかし、こちらへの日本人の出席は、著者以外には見当たらない。

そのため、本報告では、B31 Code, B31 Code の歴史、B31 Code Committee の組織と役割及びトピックスについて概説する。

2 B31 Code

2014（平成 26）年 9 月現在、B31 Code Committee

が発行又は発行を予定している規格を表 1 に示す。13 の規格が発行され、2 つの規格が作成中である。

表 1 発行又は発行予定の B31 Code

Code No. (1th Edi.)	タイトル
B31.1 (1935)	Power Piping
B31.3 (1959)	Process Piping
B31.4 (1959)	Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids
B31.5 (1962)	Refrigeration Piping and Heat Transfer Components
B31.8 (1955)	Gas Transmission and Distribution Piping Systems
B31.9 (1982)	Building Services Piping
B31.11 (2002)	Slurry Transportation Piping Systems
B31.12 (2008)	Hydrogen Piping and Pipelines
B31G (1984)	Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines
B31Q (2006)	Qualification of Pipeline Operators
B31J (2008)	Standard Test Method for Determining Stress Intensification Factors (i-Factors) for Metallic Piping Components

B31E (2008)	Standard for the Seismic Design and Retrofit of Above Ground Piping Systems
B31H (作成中)	Standard Method to Establish Maximum Allowable Design Pressures for Piping Components
B31T (2010)	Standard Toughness Requirements for Piping
B31D (作成中)	Design of Piping System for Dynamic Load from Fluid Transients

なお、B31.2 “Fuel Gas Piping”, B31.6 “Chemical Plant Piping”, B31.7 “Nuclear Power Piping” 及び B31.10 “Cryogenic Piping” は後述する理由により、欠番となっている^[1]。

3 B31 Codeの歴史^[1-4]

1926 (昭和元) 年, American Engineering Standards Committee (以下, AESC という) において B31 Code を開発するため, B31 プロジェクトが開始された。1935 (昭和 10) 年, 最初の B31 Code として “Pressure Piping” が発行された。この規格は, 1942 (昭和 17) 年～1955 (昭和 30) 年には, ASA B31.1 “Pressure Piping” と呼ばれていた。その後, 種々の産業に対応するため, 表 1 で示すような種々の規格に分かれ, B31.1 は “Power Piping” とタイトルを変更している。種々の産業に対応するため, まず, 1955 (昭和 30) 年には ASA B31.8 として “Gas Transmission and Distribution Piping Systems” が発行され, 1959 (昭和 34) 年には ASA B31.3 として “Petroleum Refinery Piping” が発行されている。各規格の初版の発行年も表 1 に示している。

B31.2 は, 米国防火協会が発行している NFPA 54-1980 “National Fuel Gas Code” に編入されたため, 1988 (昭和 63) 年に廃止された。

B31.6 のドラフトは, 1974 (昭和 49) 年に完成したが, B31.3 と密接に関連していた。このため, B31.6 の fluid service categories (例, Category M), 非金属配管及び安全装置等は B31.3-1976 に編入されて発行された。その後, 非金属に関しては, 1980 (昭和 55) 年に B31.3 の Chapter VII として 1 つの Chapter に統合された。

B31.7 は, ASME Sec. III “Rules for Construction of Nuclear Facility Components” に編入されたため, 廃止された。

B31.10 のドラフトは, 1981 (昭和 56) 年に完成したが, B31.3 と適用範囲が重複していた。このため, 両規格を合併させ, シンプルで包括的な規格として, B31.3-1984 が発行された。この版では Chapter IX として 高圧配管に関する規定が新たに追加された。

上述の様な背景があり, B31.3 は内部流体の種類, 圧力及び温度等について非常に広範囲をカバーしている。

規格番号の頭文字は, ASA から ANSI に, ANSI から ASME に変わっている。AESC は 1918 (大正 7) 年に設立され, 1928 (昭和 3) 年に American Standards Association (以下, ASA という) となっている。ASA は, 1966 (昭和 41) 年に United States of America Standards Institute (以下, USASI という) として組織変更を行い, 1969 (昭和 44) 年に現在の American National Standards Institute (以下, ANSI という) に名称変更をしている。1978 (昭和 53) 年, B31 Code Committee は, ASME の基で, ANSI の承認をもって運用する現在のシステムに再編された。このため, B31 Code の発行年により, 上述の頭文字が変わっているが, B31 Code Committee の組織や規格の変更は伴っていない。

なお, 1977 (昭和 52) 年以前, ASA 規格はアルファベットの 大分類 (例, A は建設分野, B は機械分野) とその後の小分類を表わす数字 (例, 1 はねじ, 3 はベアリング, 16 はフランジ, 31 は圧力配管) で規格番号が表示されていた。B31 Code もその作番方法を踏襲している。B31 Code は, 機械分野で圧力配管を表わす規格との意味を持っていた。

4 B31 Code Committeeの組織と役割

規格の B31.X での “X” が数字の Section 規格は, 各 Section Committee がその作成と改正等を担当している。例えば, B31.1 Section Committee が B31.1 Code の作成と改正等を担当している。Section Committee は, B31.1 ～ B31.12 の 8 つの Section Committee がある。Section Committee の下部組織として, Subgroup が設けられ, 実質的な作成と改正の作業はここでされる。例として, B31.1 Section Committee での下部組織は, 表 2 に示す 7 つ Subgroup が設けられている。Forum は正式な Subgroup ではないが, Subgroup から名称を

変更して、事故情報、新技術及び報告等について Member の情報共有のため開催されている。

表 2 B31.1 Section Committee の Subgroup

No.	Subgroup
1	Subgroup on Operation and Maintenance
2	Piping System Performance Forum
3	Subgroup on Design
4	Subgroup on Fabrication & Examination
5	Subgroup on General Requirements
6	Subgroup on Materials
7	Subgroup on Special Assignments

例として、2016（平成 27）年 5 月の Piping System Performance Forum でプレゼンテーションされたタイトルを表 3 に示す。

表 3 Forum での発表例（2016 年 5 月）

No.	タイトル
1	Coatings power plant piping applications
2	Desuperheater applications with serious issues caused by trapped condensate
3	B31.E follow-up report on current status, history, and probable proposal.
4	Lowering the minimum PWHT requirement for Grade 91 steel

加えて、特別な問題を解決するため、必要に応じて Task Group が設けられる。例として、2014（平成 26）年 9 月現在、B31.1 Section Committee に設けられている Task Group は、表 4 に示す 2 つある。

表 4 B31.1 Section Committee の Task Group

No.	Task Group
1	Task Group on Quality Control
2	Task Group on Undercut

規格の B31.X での“X”がローマ字の技術規格は、Technical Committee が作成と改正を担当している。Technical Committee は、次の 3 つの役割を担っている。

- ① 各 Section をレビューし、各 Section 要求の整合性に関して Section に変更を提案する。
- ② 技術的なガイダンスを Section Committee に提供する。
- ③ 技術規格の開発と維持を行う。

これらの役割を担うため、表 5 に示す 4 つの Technical Committee が設置されている。

表 5 Technical Committee

No.	Technical Committee
1	Qualification of Pipeline Personnel Technical Committee
2	Mechanical Design Technical Committee
3	Materials Technical Committee
4	Fabrication and Examination Technical Committee

Qualification of Pipeline Personnel Technical Committee は B31Q について、Mechanical Design Technical Committee は B31E, B31D, B31G, B31H, B31J について、Materials Technical Committee は B31T について作成と改正を担当している。

その他に、Executive Committee や Honors & Awards Committee があり、全体を統括する B31 Standards Committee が設置されている。

Committee 等の Member は、その Committee 等へ Visitor として出席し、プレゼンテーション等による貢献が認められ、Committee 等が承認して Member となる。Visitor として出席を要する期間は約 2 年が必要となるようである。Committee 等の開催はオープンであり、ASME のホームページに開催案内がアップされる。Visitor として出席しても意見やコメント等は自由に発言することができる。Member は、ボランティアであるが、所属組織が Member の旅費等についてサポートする必要がある。Member の主な所属組織は、圧力設備の所有者、ファブリケータ及び第三者等の研究所やコンサルタントであるが、そのバランスが重視される。

会合型の B31 Standards Committee は、年 1 回 9 月に Section Committee 等と合同で 5 日間を要して開催される。会合型の B31.1 Section Committee は、この他にも、1 月と 5 月に各 3 日間を要して開催され、年間で合計 3 回開催される。また、必要に応じて、電話等を活用して委員会等が開催される。

Committee 等において、制定や改正の検討課題は、Member の発議により採用され、検討課題番号が附される。その後、書面投票により制定や改正がおこなわれるが、検討課題番号は、最後まで維持される。また、採用された検討課題について、書面投票で反対が多く改正等が適切でない判断されれば、Committee 等の承認のもと取り下げられる。このように、Committee 等の意思決定は、書面投票に基づいている。会合型委員会等は主に、書面投票での状

況報告や特定の検討課題等について Member 間で議論する場としての機能を有している。

5 トピックス

最近のトピックスとしては、2014 (平成 26) 年 9 月現在、Nonmetallic Pressure Piping Systems Standards Committee が設置され、その下部組織として Subcommittee On Thermoplastic Piping (NM - 1), Subcommittee on Nonmetallic Materials (SC - NMM) が設置され非金属圧力配管規格についての検討が行われている。これは、各 Section Code 毎に規定していた非金属圧力配管規定を統一した規格とするために検討されている。

B31D については、2009 (平成 21) 年 8 月 17 日に発生したロシアの Sayano-Shushenskaya 水力発電所での事故を契機として配管のウオーターハンマーを防止するための規格として検討が行われている。

B31J については、Stress Intensification Factors の試験方法の改正、適用可能な Stress Intensification Factors 等の追加、Flexibility Factors の試験方法の追加及び Sustained Stress Index の試験方法の追加について検討が行われている。

6 おわりに

圧力設備の規格としては、B&PV Code 以外にも B31 Code があり、ASME が両 Code Committee を組織して発行している。しかし、B31 Code Committee に出席している日本人は著者以外には見当たらず、B31 Code の日本での知名度も低い。

そのため、本報告では、B31 Code, B31 Code の歴史、B31 Code Committee の組織と役割及びトピックスについて概説した。

圧力設備の規格の 1 つとして、B31 Code についての理解と B31 Code Committee 活動への認識が深まり、B31 Code Committee 等に日本人の出席が多くなれば幸いである。

参考文献

- [1] Charles Becht IV, Process Piping : The Complete Guide to ASME B31.3, Second Edition, ASME
- [2] ANSI 規格の基礎知識, 1989 年 9 月 10 日, 第 2 版, 財団法人日本規格協会
- [3] 世界の規格辞典, 1995 年 7 月 31 日, 第 3 版, 財団法人日本規格協会
- [4] NFPA 54, National Fuel Gas Code, 1994 Edition, National Fire Protection Association



佐藤長光

欧州における700°C級発電プラントの実用化に向けた活動について

The EU R&D Project for the practical application of 700°C operating pulverized fuel power plant

規格基準室 長谷川 忠之

Cutting of greenhouse gas emissions such as carbon dioxide is an urgent issue on a global scale in order to reduce the effect of the gas on environment. In Japan, the technology improvement for the high efficiency operation of power boiler is now conducting as well as the propulsion of power generating by renewable energy. Meanwhile, in Europe, power supplier and boiler manufacturer have developed to improve the efficiency of conventional pulverized coal-fired power plant technology from the beginning of 1990s. The fundamental test project, called “COMTES700”, was performed from 2004 to 2011 to develop and demonstrate the boiler component operating at 700°C of maximum temperature. In the final report of COMTES700 project, it is reported that the boiler component operating at 700°C was achieved for superheater, attemperator, evaporator and some kind of valves. At the same time, a problem to be solved has come up to the surface in the project. Especially, Stress Relaxation Cracking (SRC) occurred in nickel-based alloy weld is very important problem for high temperature components.

Keywords COMTES700, Power Plant, Nickel-based Alloy, Stress Relaxation Cracking

1 はじめに

これまで広く用いられてきた「省資源・省エネルギーの推進」, 「自然エネルギーの有効活用」, 「CO₂排出削減」, 「エネルギーのベストミックス」等の表現は, 増え続ける電力需要をいかに効率よく賄うかと同時に, それを達成するために環境負荷をいかに抑えるかを論じる際のキーワードとなる。

「CO₂排出削減」について, 京都議定書に基づく日本の2008年から2012年の5ヶ年平均の温室効果ガス排出量は基準年に対して速報値で8.2%減^[1]と目標である6%減が達成された。2012年12月の京都議定書第8回締約国会合(CMP8)で採択された第二約束期間に対して日本は数値目標がないものの, 京都議定書の実効性が問われる点を考慮すれば, 温室効果ガスの排出量削減に対する活動が継続されるべきものであることは明らかである。このような状況は世界的な趨勢であるが, さらに日本では東日本大震災の影響で原子力発電所が稼働停止しており, 電力需給面で特殊な状況にある。

このような背景の下, 日本では自然エネルギーを利用した発電の推進に加えて, 既存の火力発電設備の効率化に向けた技術開発が進められている。経済産業省の事業として, 平成20年度から平成28年度の計画で実施されている「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」はこれらの取り組みの一つであり, 現在主流となっている600°C級USC(Ultra Super Critical: 超臨界圧)ボイラーよりさらに高温となる700°C級Advanced-USCボイラーを実用化するための機器の要素技術について, 試験検討が行われている。他方, 欧州(以下, EUという)では日本と同様の目的のプロジェクトである“COMTES700”が2011年まで行われていた。COMTES700では, 700°Cでの供用に耐えられる機器の信頼性を実証するため, ニッケル基合金を主体とする材料で製作された高温機器を実機の一部へ組み込んだ性能試験を実施しており, それらの成果は報告書として公開されている。

本稿では, 700°C級石炭火力発電プラントの実用化に向けたEUプロジェクトであるCOMTES700の

概要と、その中で行われた高温機器の一部の性能試験の状況について、報告書^[2]をもとに紹介する。

2 ボイラーの効率化に向けたEUの動向

EUでは1990年代前半から、環境やエネルギー、医療、バイオ、農業分野等に関連した調査や技術開発がEU委員会の下で“Framework Programme”(以下、FPという)として大規模に実施された。1990年代末から行われた第4期のFPでは、ボイラーのさらなる高温化に向けた対応として700℃で石炭火力発電プラントを稼働させるためのプロジェクトである“Advanced 700℃ PF Power Plant Project”(略称、AD700)を開始した。

これまでに前例のない温度領域に踏み込むことから、まずAD700の第1フェーズでは、700℃級発電プラントの基本概念の実現可能性とそれを達成する材料の特性が検討され、続くフェーズ2では材料特性の実証とフェーズ3へ向けた検討がそれぞれ行われた。その結果、フェーズ3では要素試験施設(以下、CTFという)を用いて実際に700℃で高温機器の実証試験を行うことの必要性が提言された。AD700全体の概略を表1に示す。

表1 AD700の概略(当初計画)

期間	検討項目
1998-2004	基礎概念と材料特性の検討
2002-2005	材料特性の実証 実証プラントに向けた基本設計
2004-2008	COMTES700
2006-2014	実規模実証プラント建設と運転

石炭はエネルギー源として欠くことのできない資源であることは、日本のみならずEUにおいても例外ではない。2010年当初の時点で、EU 25ヶ国では、2020年までに経年劣化により取り替えが必要になるプラントが電力量換算で200,000MW(2億kW)分と試算される一方、電力消費量が上昇し、100,000MW(1億kW)が不足すると推定されている。そのため、石炭火力発電プラントの700℃で稼働させることは、環境保護と資源確保の両立を達成する上で重要なファクターとなる。

3 COMTES700

先述の提言を受け、具体的に効率50%以上の石炭

火力発電を可能とする新たな高温耐性材料を試験するためのCTFの設計を行い、高温耐性材料で製作した高温機器を設置して実証試験を行うプロジェクトとしてCOMTES700は開始された。CTFの概要を表2に示す。

表2 要素試験施設(CTF)の概要

表2 要素試験施設(CTF)の概要	
対象プラント	Scholven F(ドイツE.ON社)
蒸気温度	535℃
最高圧力	230bar(≈23MPa)
最高出力	740MW
燃料	石炭
年平均運転時間	≥5,000h

CTFの対象として、ドイツEON社が所有するScholven発電所F号機が選定された。Scholven発電所F号機は営業運転中にあるため、運転を妨げないよう主系統から独立した系統を設けて高温機器を設置することとした。現在、ドイツの火力発電プラントは温度545～600℃、圧力262-275barの条件で概ね運転されているが、これを700℃、350barとすることを目標としている。

CTFは2005年4月に建設開始、同年7月には運転が開始されており、運転開始2日後には過熱器出口で706℃が達成されている。COMTES700で計画されたCTFでの試験期間は2万時間であり、次の点に着目して試験は実施された。

- ・材料の製造性、曲げ加工性、溶接性
- ・実規模およびその他の設計上考慮すべき点と関連する長時間のクリープ挙動
- ・リブドチューブに堆積するマグネタイトに関する知見の収集
- ・燃焼ガスによる腐食および水蒸気酸化
- ・スートブローによるエロージョンの影響
- ・配管およびバルブ用ニッケル基合金の運用試験
- ・全機器の動作状況
- ・プラント内のモニタリング
- ・余寿命評価
- ・供用中検査

このうち、700℃での運転を達成する上でまず重要になるのが高温機器の材料選定である。以下ではニッケル基合金で製造された高温機器の概要とプロジェクトを通じて明らかとなった高温機器の課題について紹介する。

4 ニッケル基合金を用いた高温機器

4.1 高温機器

これまで述べたように、ニッケル基合金は700°Cに達する機器に適用される。表3に高温機器の製作に選定された材料を示す。

表3 選定された高温機器材料

ニッケル基合金	ニッケル基合金以外
Alloy174	T24, P91, P92, HCM12
Alloy617B	HR3C/DMV310N
Alloy740	13CrMo4-4, 10CrMo9-10 Sanicro25

ニッケル基合金はAlloy174, Alloy617BおよびAlloy740である。一方、ニッケル基合金以外では、オーステナイト系としてHR3CやSanicro25, フェライト系としてT24やP92等が選定されている。

プラント稼働中に700°Cに達するのは主に過熱器とその周辺のエバポレータや冷却器、バルブであるが、経済性も考慮する観点から、実際に700°Cに達する部分にニッケル基合金を使用し、それ以外の部分には、その他のオーステナイト系またはフェライト系の耐熱合金を組み合わせることで高温機器は製作されている。

図1には一例として、表3に掲げた材料を用いて製作された過熱器管の模式図を示す。1列16本の管を2列配置した状態を1バッチとして過熱器は製作されている。過熱器管の入口温度は520°C前後、出口温度は680°C前後となるが、700°Cを超えるような部位にはAlloy740のような高温強度の高い材料が配置されている。これらの配置は燃焼の火炎の状態を考慮して設計される。

なお、700°Cにおけるニッケル基合金の許容引張応力の目安として、例えばASME Section II Part DではAlloy617のAnneal材について81.0MPa (Metric版)と規定されている。また、Alloy740については、700°Cの許容引張応力がおよそ130MPaと試算された報告^[3]がある。

4.2 高温機器に対する問題

高温機器に対する問題は、割れに起因するAlloy617B溶接部からの蒸気漏洩の発生が端緒であった。割れはエバポレータや冷却器の管台部など

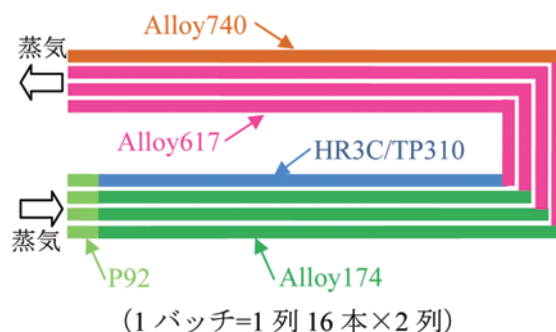


図1. 過熱器管の模式図

肉厚の厚い箇所でも顕著に発生しており、浸透探傷試験では多数の欠陥指示が確認された。

最初の割れは運転開始の2年後である2007年7月に確認された。割れや欠陥が認められた箇所に対しては補修溶接が行われ再び運転に供されることとなったが、その後、2008年から2009年にかけて肉厚の厚いAlloy617B溶接部および補修溶接後の同じ部位で、相次いで同様の割れや欠陥が生じる事態となった。割れ部の組織観察等の調査の結果、Stress Relaxation Cracking (以下、SRCという)であると推定された。

SRCは、粒内または粒界に炭化物や γ' 相が析出することで強度が低下した粒界近傍のマトリックス組織に、溶接や冷間加工により蓄積されたひずみが重畳することでボイドやキャビティが形成され、これが成長して割れに発展する現象と考えられており、現在では材料の化学成分や使用温度、残留応力(ひずみ)の条件がそろって腐食環境になくても割れが発生することが再現試験で確認されている。SRCはオーステナイト系材料の溶接部や冷間加工部に割れが生じる現象としてかなり以前から知られており、1990年代に入って高温機器に適用され始めた800Hや800HTといったニッケル基合金では運転開始から1~2年以内にSRCによる損傷が発生するという事例が多数報告されていた^[4]。

現在、SRCを防止する上で溶接後熱処理(以下、PWHTという)または応力除去のための熱処理は有効であることが確認・認知されているが、漏洩が問題となった時点においてAlloy617BでSRCが発生することは必ずしも認知されていなかった。そのため、高温機器の製作時および補修溶接時のいずれの際にもPWHTは行われていなかったが、SRC発生

の原因調査の結果を反映し、全ての補修溶接部に対して980℃で3時間のPWHTを実施することで、SRCの発生を抑制した。

一方、肉厚の薄い過熱器管でも隣接する2本の管において、Alloy617BとSanicro25との異材継手部からの漏洩が認められた。漏洩はAlloy617B側の溶融線から3～5mmの位置に粒界型の割れとして発生し、一方で、2本の管に膨張や巨視的な変形は認められなかった。原因調査の結果、これは製作時の加工不良に起因して1本の管から漏洩し、そこから漏洩蒸気によりもう1本の管にエロージョンが生じ、蒸気漏洩に至ったと推定されている。

なお、SRCはニッケル基合金以外のオーステナイト系材料についても発生する可能性があるとして、現在、ASMEでは規定化を含めた技術的検討が行われている^[4]。

5 終わりに

本稿ではEUにおける石炭火力発電プラントの効率化に向けたプロジェクトであるCOMTES700の概

要について紹介した。「CO₂排出削減」や「エネルギーのベストミックス」を図る上で、既存の火力発電プラントの効率化は重要な課題である。

現在、COMTES700で建設されたCTFは既に解体されているが、このプロジェクトを通じてEUは既に多くの成果を獲得している。日本においても先述の事業を通じて研究開発を進め、EUを超える多くの成果が得られることを期待したい。

参考文献

- [1] <http://www.47news.jp/47topics/e/247636.php>
(閲覧日：平成27年8月20日)
- [2] Component test facility for 700 °C power plant (Comtes700) Final Report, EUR25921, 2013
- [3] 平成22年度 火力関係設備効率化技術調査報告書, 平成23年2月, 財団法人発電設備技術検査協会
- [4] 大石勇一, オーステナイト系耐熱材料に対するPWHTのルール改正の動向, 溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー, Vol.9, PP.34-37, 2013



長谷川忠之

JIS Z 2305:2013対応の レベル2実技試験対策研修コース開設

溶接・非破壊検査技術センター 研修センター 牧原 善次

1 はじめに

発電プラント，化学プラント，鉄道，航空機，船舶など，その多くは社会的基盤を形成し，また，日常生活を支える役割を担っている。このような公共性の高い設備を構成する機器は，その品質を製造時から供用中の寿命期間中にわたって適切に管理しなければならない。品質管理の一つとして非破壊試験技術があげられ，非破壊試験の信頼性が機器の信頼性（安全性を含む）に直結するといっても過言ではない。

非破壊試験は，製品を壊すことなく直接又は間接的にきずの有無などの状態を調査する技術であり，その種類として浸透探傷試験（PT），磁粉探傷試験^{注1)}（MT），放射線透過試験（RT），超音波探傷試験（UT），渦流探傷試験^{注2)}（ET）などがある。これらの技術を使って取得する試験結果及び評価（合否判定）は，それぞれに応じた試験手順，試験機材及び試験技術者の技量によって変わることがあり，とくに試験技術者の技量に左右され易い。したがって，非破壊試験技術者の技術レベルを一定にするために，日本工業規格 JIS Z 2305:2001 “非破壊試験－技術者の資格及び認証”により技量認証が行われている。この認証は，レベル1，2において新規の場合，一次試験（筆記試験），二次試験（実技試験）に合格した者が認証される。一方，資格継続のための再認証試験では事実上，筆記試験に限られている。すなわち，新規資格取得以降，10年近くにわたり実技に携わらないいわゆる“ペーパードライバー”が存在することも完全には否定できない。これに対して2013年（平成25年）にISO 9712:2012を基にJIS Z 2305の改正が行われ，再認証試験において実技試験が取

り入れられることになった。JIS Z 2305:2013による新規試験は2015年（平成27年）秋期，再認証試験は2017年（平成29年）春期から始まる。

当協会では，2004年（平成16年）から外部（官庁，企業等）の検査に関わる人材育成支援をテーマに掲げ，材料，溶接，非破壊試験技術等の研修を開始した。その中で資格取得研修はUTレベル2の一次試験対策研修にとどまっていたが，資格試験のうち実技試験の重要性に鑑み二次試験対策研修の計画を始めた。計画はその過程でJIS Z 2305の改正作業が始まったことから規格動向を注視しながら進めた。その結果，レベル2技術者の輩出及び技量維持支援を方針としたレベル2実技試験対策研修コースをJIS Z 2305:2013による資格試験の開始時期に合わせて開設することとした。以下，JIS Z 2305:2013による資格試験及び当協会が開設する“JIS Z 2305:2013対応のレベル2実技試験対策研修”について紹介する。

注1)：JIS Z 2305:2013では磁気探傷試験という。

注2)：JIS Z 2305:2013では渦電流探傷試験という。

2 非破壊試験技術者の資格試験

2.1 技量認定及び認証の変遷

国内における非破壊試験技術者の技量認定及び認証は，開始以降40年以上が経過し，これまでに以下の変遷を辿ってきた。

- (1) 1968年（昭和43年）制定の日本非破壊検査協会規格NDIS 0601“非破壊検査技術者技量認定規程”に基づく資格試験が開始された。
- (2) 1990年代に入って，非破壊試験技術者の国際的な統一の機運が高まり，1992年（平成4年）に国際規格ISO 9712:1992“Non-destructive testing－Qualification and certification of

personnel”が制定された。国内においても国際化に向けた資格認証の要望が高まり、日本工業規格（JIS）化の検討が始まった。1998年（平成10年）にJIS化までの移行措置としてISO 9712:1992を基にNDIS J001:1998“非破壊試験－技術者の資格及び認証”を制定し、これによる資格試験が開始された。

- (3) その後、JIS化の検討が進み、ISO 9712:1999に対応した日本工業規格 JIS Z 2305:2001“非破壊試験－技術者の資格及び認証”が制定され、NDIS J001:1998から切り替わり、現在に至るまで JIS Z 2305:2001による資格試験が行われてきた。
- (4) ISO 9712:2005と欧州規格 EN 473:2008を整合化したISO 9712:2012が発行されたことに伴い、JIS Z 2305の改正作業が行われ、JIS

Z 2305:2013が発行された。JIS Z 2305:2013による資格試験は、新規試験が2015年（平成27年）秋期、再認証試験が2017年（平成29年）春期に開始される。

2.2 JIS Z 2305:2013による資格試験

(1) JIS Z 2305:2001とJIS Z 2305:2013の相違点

JIS Z 2305の2001年度版と2013年度版における資格試験（新規、再認証）の主な相違点を表1に示す。

(2) レベル2実技試験の内容

(a) 新規試験

JIS Z 2305:2001に基づき行われている新規レベル2の実技試験とJIS Z 2305:2013で予定されている実技試験の比較を表2に示す。

表1 新規試験及び再認証試験

レベル	新規試験		再認証試験	
	JIS Z 2305:2001	JIS Z 2305:2013	JIS Z 2305:2001	JIS Z 2305:2013
1	一次：筆記試験	一次：筆記試験	筆記試験	実技試験
	二次：実技試験	二次：実技試験 ^{注2)}		
2	一次：筆記試験	一次：筆記試験	筆記試験	実技試験
	二次：指示書作成 実技試験	二次：指示書作成 実技試験 ^{注2)}		
3	一次：筆記試験	一次：筆記試験	筆記又は 書類審査 ^{注3)}	筆記又は書類審査 ^{注3)} 及び 認証機関による 実技能力証明 、 又は レベル2実技試験
	二次：筆記試験 実技 ^{注1)} 試験	二次：筆記試験 実技 ^{注1), 2)} 試験		
変更点	<ul style="list-style-type: none"> ・新規における実技試験で出題される試験体数の増加。 ・再認証試験が筆記試験から実技試験に変更。 ・レベル3の再認証は実技能力の証明が必要。 			
備考	注1) レベル2保有者は免除。 注2) 試験体数が増える。 注3) 再認証試験の代替としてクレジットシステムを用いてもよい。			

表2 レベル2実技試験（新規試験）の内容

手法	JIS Z 2305:2001 ¹⁾ （現行）	JIS Z 2305:2013 ²⁾ （2015秋期～）
PT	①PT指示書の作成 ②実技 <ul style="list-style-type: none"> ・水洗性浸透探傷 ・溶剤除去性浸透探傷 ・探傷結果の評価と報告書の作成 最大時間：150分	①PT指示書の作成 ②実技 <ul style="list-style-type: none"> i) PT機器材システム（探傷感度、探傷剤管理含む）の確認及び準備 ii) 3体の試験体の探傷 iii) 試験結果の記録、合否判定及び報告 正味試験時間：120分

MT	①MT指示書の作成 ②実技 ・極間法 ・通電法 ・コイル法 ・探傷結果の評価と報告書の作成 最大時間：150分	①MT指示書の作成 ②実技 i) MT機器材システムの確認及び準備 ii) 3体の試験体の探傷 iii) 試験結果の記録， 合否判定及び報告 正味試験時間：110分
UT	①UT指示書の作成 ②実技 ・探傷装置の設定 ・垂直・斜角探傷 ・探傷結果の評価と報告書の作成 最大時間：150分	①UT指示書の作成 ②実技 i) UT機器材システム（試験機器の調整・管理含む）の確認及び準備 ii) 3体の試験体の探傷 iii) 試験結果の記録， 合否判定及び報告 正味試験時間：160分
RT	①RT指示書の作成 ②実技 ・X線装置の設定 ・試験体の撮影， 写真処理 ・探傷結果の評価と報告書の作成 最大時間：150分	①RT指示書の作成 ②実技 i) RT機器材システム（X線発生装置， 恒温現像槽， X線フィルム及び現像剤等の管理を含む）の確認及び準備 ii) 2体の試験体の撮影及び写真処理 iii) 2枚の透過写真のきずの像の分類 iv) 24枚の透過写真の解釈 v) 試験結果の記録， 合否判定及び報告 正味試験時間：165分
備考	本内容は（一社）日本非破壊検査協会認証事業部公開資料 ^{1), 2)} に基づく。	

表3 レベル2再認証試験の内容

手法	JIS Z 2305:2001 ¹⁾ （現行）	JIS Z 2305:2013 ²⁾ （2017春期～）
PT	【筆記試験】	表2と同じ （新規試験と同じ要求） ・指示書の作成 ・実技試験
MT	当該NDT方法の専門試験問題20問以上30問以下で実技に関する問題を含む。	
UT	試験時間：1時間	
RT		
備考	本内容は（一社）日本非破壊検査協会認証事業部公開資料 ^{1), 2)} に基づく。	

(b) 再認証

JIS Z 2305:2001 に基づき行われているレベル2の再認証試験と JIS Z 2305:2013 で予定されている再認証試験の比較を表3に示す。

3 レベル2実技試験対策研修開設に向けた取り組み

(1) 方針

JIS Z 2305:2013 に基づく非破壊試験の資格取得支援及び資格継続（技量維持）を研修方針とする。とくに現場で主戦力となるレベル2技術者の輩出及び技量維持を目的とし，新規受験者のための実技研修（二次試験対策研修）及び資格継続のための実技研修（再認証試験対策研修）を開設する。

(2) 計画及び進捗状況

表4にレベル2実技試験対策研修開設に向けた取り組みを示す。2012年度よりレベル2実技試験対策研修の構想を立て，ニーズ調査，設備計画等を始めた。その過程で JIS Z 2305:2001 の改正作業が始まり，大きな改正として，再認証試験に関し従来の筆記試験から実技試験に変更されることが分かった。これら JIS Z 2305 の改正動向とニーズ調査等に基づき上記(1)の方針を立て，「JIS Z 2305:2013 対応のレベル2実技試験対策研修」の名称で具体化に取り組んできた。その結果，2015年秋期にRTを除く3手法（PT, MT, UT）の実技対策研修を開始，また，翌2016年春期にRTの実技対策研修を開始する。

表4 レベル2実技試験対策研修コースの計画及び進捗状況

	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度
JIS Z 2305:2013 運用時期					◇新規試験 開始	◇再認証 開始
調査・計画						
資格試験状況反映						
PT, MT, UTレベル2 実技対策研修				準備	★ 開設	→
RTレベル2 実技対策研修					準備	★ 開設

(3) レベル2実技試験対策研修の開設

開設する研修コースを表5に示す。研修コースは、ニーズの高い（受験者数、資格保有者数の多い）PT, MT, UT, RTの4種類のレベル2受験者（新規、再認証）を対象とすることとした。また、研修期間は技量習得に必要な日数（2日又は3日）とし、実施日は可能な限り受験日に近い日で計画する。

表5 研修コース

コース	対象		開設時期	研修期間
	レベル	試験区分		
PT	2	新規	2015秋	2日間
		再認証	2017春	2日間
MT	2	新規	2015秋	2日間
		再認証	2017春	2日間
UT	2	新規	2015秋	3日間
		再認証	2017春	3日間
RT	2	新規	2016春	2日間
		再認証	2017春	2日間

4 各種レベル2実技研修の概要

JIS Z 2305:2013によるレベル2実技試験（新規試験、再認証試験）に向けて当協会が提供する研修内容及び研修設備の概要を以下に示す。

(1) 浸透探傷試験（PT）

PT実技研修の内容及び主な設備概要を表6及び図1に示す。

(2) 磁気探傷試験（MT）

MT実技研修の内容及び主な設備概要を表7及び図2に示す。



図1 PTレベル2実技研修用試験体の例

表6 PT実技研修内容及び設備の概要

項目	内容		備考
研修内容	(1) 溶剤除去性染色浸透探傷試験 (2) 水洗性蛍光浸透探傷試験 (3) 後乳化性蛍光浸透探傷試験 他		従来の資格試験で出題された内容の他に、下記探傷装置、探傷剤の組合せで様々な種類の研修に対応可能
探傷装置	水洗性浸透探傷試験装置（据置き） ブラックライト		実際の資格試験で使用されている探傷装置とほぼ同じ仕様
探傷剤	浸透液	蛍光浸透液	—
		蛍光浸透液（水洗性）	—
		染色浸透液	—
	除去剤	水	—
		有機溶剤除去剤	—
		乳化剤（水性）	—
	現像剤	湿式現像剤	—
速乾式現像剤		—	
乾式現像剤	—	—	
対比試験片	タイプ1, タイプ3		—
附属品	温度計, 照度計, 紫外線強度計他		—
試験体	図1参照		2015秋期試験の状況に応じて拡充する。

表7 MT実技研修内容及び設備の概要

項目	内容		備考
研修内容	(1) 極間法 (2) コイル法 (3) 電流貫通法		従来の資格試験で出題された内容に対応可能
探傷装置	磁粉探傷試験装置（定置式）		実際の資格試験で使用されている探傷装置とほぼ同じ仕様
	極間式磁粉探傷器		
	ブラックライト		
探傷剤	磁粉	湿式黒色磁粉	—
		蛍光磁粉	—
		乾式黒色磁粉	—
	分散剤		—
標準試験片	A形標準試験片（A1-30/100） C形標準試験片（C1）		—
附属品	照度計，紫外線強度計， 方向コンパス他		—
試験体	図2参照		2015秋期試験の状況に応じて拡充する。

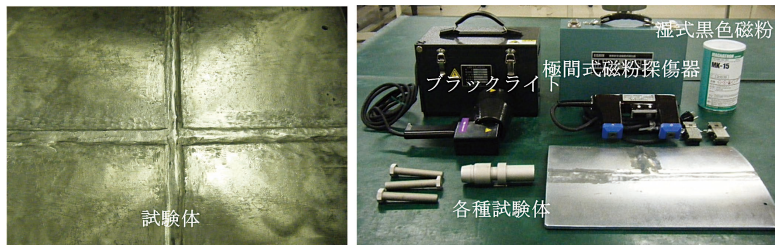


図2 MTレベル2実技研修用機材（探傷器，試験体等）の例

表8 UT実技研修内容及び設備の概要

項目	内容		備考
研修内容	(1) 垂直法（装置の調整を含む） (2) 斜角法（装置の調整を含む）		従来の資格試験で出題された内容に対応可能
探傷装置	超音波探傷器	Rタイプ	実際の資格試験で使用されている探傷装置と同じ仕様
		Gタイプ	
	垂直探触子	5Z20N	
	斜角探触子	5Z10×10A70	
試験片	標準試験片（STB）	STB-N1	—
		STB-A1	—
		STB-A2,A3	—
		STB-G	—
	対比試験片（RB）	横穴対比試験片	—
接触媒質	マシン油，グリセリンペースト		
附属品	探傷ケーブル		—
試験体	図3参照		2015秋期試験の状況に応じて拡充する。

(3) 超音波探傷試験（UT）

UT 実技研修の内容及び設備概要を表8及び図3に示す。



図3 UTレベル2実技研修用機材（探傷器，試験体等）の例

表9 RT実技研修内容及び設備の概要

項目	内容		備考
研修内容	(1) 試験体の撮影及び写真処理 (2) 透過写真のきずの像の分類 (3) 透過写真の解釈		試験体の撮影, 写真処理 (現像他) の研修を予定
機材 ・探傷 ・現像 ・観察 ・評価	X線発生装置	250kV	図4参照
	フィルム	IX50, 80, 100	
	増感紙	金属箔 (鉛)	
	透過度計 (針金)	一般形, 帯形	
	階調計		
	現像設備	タンク現像装置	
	濃度計		
	観察器		
	分類ゲージ	JIS Z 3104他	
試験体	管試験体	アルミ製	(準備中)
教材	透過写真集		きずの分類, 解釈に用いる教材



図4 RTレベル2実技研修用機材の例

(4) 放射線透過試験 (RT)

2016年春期の開設に向けて準備, 計画しているRT実技研修の内容及び設備概要を表9及び図4に示す。

5 今後の展開

今後は, ニーズの高い4手法 (PT, MT, UT, RT) のレベル2実技試験対策研修コースを計画通りに開始し定着化を優先する。定着化のためには, 2015年度秋期に開始される新規試験の実施状況に応じて研修の充実化を図り, 受講者の期待に応じていく。その後, レベル1実技試験対策研修, ETレベル2実技試験対策研修等, 技術者を目指す人のニーズを捕え研修の充実化を目指していく。さらに, 技量維持のためのリフレッシュ (復習) 研修, スキルアップ研修等についても検討を進める。

6 まとめ

2015年秋に開設する非破試験技術者の資格取得, 資格継続を支援する“JIS Z 2305:2013対応のレベル2実技試験対策研修”について述べた。

工業製品の健全性維持は, 安心した社会生活を続

けるために大切であり, その意味で非破壊試験は極めて重要な役割を担っている。一方で, 非破壊試験の信頼性は人的要因により左右され易く, とくに試験技術者における実技面での高い技量の習得及び維持が不可欠である。このため, 当協会では資格取得及び継続を目指す技術者に提供する研修を開設することとした。今後は, 資格取得及び継続後もさらなる技量向上又は技量維持 (技量低下の防止) を図り現場で重用される技術者を目指していただくための研修を提供できるように努めていく。

参考文献

- 1) 「資格試験のレベルと試験内容」(2015.1)
- 2) 「資格試験のレベルと試験内容 (新規試験, 再認証試験) と参考文献」(2015.6.29)



牧原善次

出願特許一覧

1	特許件名	高Cr系鋼構造物のじん性評価方法	発明者	西川 聡 他
	出願番号-出願日	特願2008-198193 2008/7/31	登録番号-登録日	特許第4664399号 2011/1/14
	概要	Cr含有量が8～14wt%のラーベス相が析出する高Cr系鋼構造物で、アノード分極曲線を利用してじん性を評価する方法		
2	特許件名	渦電流探傷信号処理方法	発明者	兼本 茂 他
	出願番号-出願日	特願2006-027648 2006/1/6	登録番号-登録日	特許第4235648号 2008/12/19
	概要	検査対象物表面の金属組織内部の自然欠陥を非破壊で外部から計測するための渦電流探傷信号処理方法		
3	特許件名	クリープボイドの非破壊検出方法	発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2002-308129 2002/10/23	登録番号-登録日	特許第3803314号 2006/5/12
	概要	供用中のボイラなどの高温機器において、交流磁化測定により、簡便かつ非破壊的に現地においてクリープボイドを検出する方法		
4	特許件名	非破壊高温クリープ損傷評価方法	発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2002-308126 2002/10/23	登録番号-登録日	特許第3728286号 2005/12/21
	概要	供用中のボイラなどの高温機器において、非破壊的に測定された物理量を用いて、クリープ損傷率を評価し、余寿命時間を求める方法		
5	特許件名	超音波探触子の位置・首振り量の測定方法及び装置	発明者	古川 敬 他
	出願番号-出願日	特願2002-29015 2002/2/6	登録番号-登録日	特許第3585467号 2004/8/13
	概要	超音波探触子の相対的な位置（または移動量）及び探触子の首振り量を自動的に測定する方法及び装置		
6	特許件名	Method and Apparatus for Visualizing Elastic Wave Propagation in a Solid Substance(米国特許出願)	発明者	古川 敬 他
	出願番号-出願日	09/695,911 2000/10/26	登録番号-登録日	US6,535,828 B1 2003/3/18
	概要	超音波が固体内を伝わる様子を、目に見えるようにした(可視化)手法及び装置		
7	特許件名	交流磁化を用いた強磁性体構造物のクリープ損傷評価方法及び装置	発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2000-62965 2000/3/8	登録番号-登録日	特許第3461781号 2003/8/15
	概要	特許第3355322号装置を、強磁性体金属材料及び溶接構造物のクリープ損傷評価に適用		
8	特許件名	交流磁化を用いた強磁性体の溶接物の溶接後熱処理評価装置	発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2000-62964 2000/3/8	登録番号-登録日	特許第3355322号 2002/9/27
	概要	強磁性体の溶接構造物が熱処理されたかどうか及び熱処理した時の温度を、非破壊的で簡単に評価できる装置		
9	特許件名	皮膜切断法による微粉末積層皮膜厚測定法	発明者	三好 滋
	出願番号-出願日	特願平5-271499 1993/10/29	登録番号-登録日	特許第2522635号 1996/5/31
	概要	浸透探傷試験用現像剤を塗布したときの積層皮膜の厚さを、切断法により測定する方法		
10	特許件名	膜厚指示計を用いた微粉末積層皮膜厚測定法	発明者	三好 滋
	出願番号-出願日	特願平5-271500 1993/10/29	登録番号-登録日	特許第2506557号 1996/4/2
	概要	浸透探傷試験用現像剤を塗布したときの積層皮膜の厚さを、膜厚指示計を用いて測定する方法		

学協会誌等への論文発表

学協会誌名	著 者	論文名称	掲載誌発行年月
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	西野秀郎 石井誠吾 古川 敬	Resonant Phenomena of Circumferential SH Waves Converted from T(0,1) Mode Guided Waves at Non-Axisymmetric Defects	Vol. 34 Mar,2015
Journal of Nuclear Science and Technology	青木孝行 高木敏行 古村一朗 古川 敬 遊佐訓孝 浦山良一	Study of a methodology of identifying important research problems by the PIRT process	Volume 51,pages 832-844 Apr 2014
大阪大学接合科学研究所共同研究成果報告書	西川 聡	SUS316L 溶接金属の高温純水中における応力腐食割れ形態	2014年8月
平成25年度火力原子力発電大会論文集	水野 亮二	原子炉容器鋼テンパーヒード補修溶接部の低温割れ性及びじん性	平成25年度火力原子力発電大会論文集 (CD-ROM)
月刊 検査技術	西川 聡	応力改善工法のSCC予防効果の長期持続性	2013年7月号
超音波テクノ誌	古川 敬 他	ねじりモードガイド波によるエルボ部の減肉計測手法の新展開	2013年5-6月誌 Vol.25, No.3, P.45-48
火力原子力発電大会論文集	西川 聡 大北 茂 山口篤憲	ショットピーニングで異材溶接部に付与した圧縮残留応力の長期安定性	火力原子力発電大会論文集 (CD-ROM)
非破壊検査	程 衛英	高性能磁気センサによる損傷検出・評価	第61巻 (2012) 9号 P.468-474
Proceedings of the 9 th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	程 衛英 古村一朗	Pulsed Eddy Current Testing of a Carbon Steel Pipe's Wall-thinning	EUR 25752 EN-2012 P.336-342
保全学	西川 聡 大北 茂 山口篤憲	応力改善工法で付与される圧縮残留応力の持続性	日本保全学会誌 Vol.11, No.4, P.69-76
E-Journal of Advanced Maintenance	古川 敬 古村一朗	Simulation and visualization of guided wave propagation by large scale 3D FEM	Vol. 3, No. 3, AA36 November,2011
火力原子力発電大会論文集	古村一朗 古川 敬	開口合成3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部SCC探傷特性評価	福岡大会 CD-ROM 2011年10月
Journal of Nondestructive Evaluation	程 衛英	Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding	Vol.31, No.3 p215-224 2012
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	程 衛英	Simulation for the assessment of Wall thinning Using Eddy Current Method	Vol.30A(2011) p.372-379
E-Journal of Advanced Maintenance	古村一朗 古川 敬	Visualization Method of UT Wave Propagation Phenomena for assisting The Better Understanding of Inspection Results	Vol. 2, No. 2, NT25 August,2010
火力原子力発電大会論文集	長谷川忠之 西川 聡	FEMを用いた溶接終端部の残留応力評価	大阪大会 CD-ROM 3-4 2009年10月

Proceeding of the 7 th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear Pressurized Components.	古川 敬 古村一朗	Numerical simulation of guided wave propagation using large scale FEM code	EUR 24115 EN-2009 p.252-259
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	程 衛英 古村一朗	Optimum Inducement of Eddy Current for NDE of Deep Lying Defects : an Analytical Approach	33(2010) p.377-385
圧力技術	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼす化学成分、熱処理の影響	Vol.48, No.1 p.26-39 2010
溶接学会論文集	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼすPの影響	第27巻 (2009) 第4号 p.287-296
非破壊検査	関野晃一 他	ガラス板に挿入した表面楕円き裂の光干渉法による破壊挙動の解析	第59巻 (2010) 第3号 p.138-144
E-Journal of Advanced Maintenance	古村一朗 古川 敬	Simulation technique for UT wave propagation as an effective tool for predicting the inspection results and interpreting the root cause of unexpected indications	Vol. 1, No. 1, NT1 May,2009
溶接学会論文集	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼすC,Nbの影響	第27巻 (2009) 第3号 p.274-260
溶接学会論文集	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼすCrの影響	第27巻 (2009) 第4号 p.278-286
Electromagnetic Nondestructive Evaluation(XII)	程 衛英 古村一朗	'Ac Magnetization and Barkhausen Noise Measurement for the Characterization of Degradation of Ferromagnetic Steels'	32.IOS Press 2009 p.215-223
IEEE Trans. Magnetics	程 衛英 古村一朗	'Simulation of Transient Eddy-Current Measurement for the Characterization of Depth and Conductivity of a Conductive Plate'	Vol. 44, No.11, November, 2008, p.3281-3284
保全学	中東重雄 古村一朗 山口篤憲 他	放射光による原子炉材料のSCCき裂観察	Vol.8, No.3, p.69-75, 2009
Advanced Materials Research	中東重雄 他	EFFECT OF COLD-ROLLING ON PRECIPITATION PHENOMENA IN 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL	Vol.126-28(2007) p.1287-1290
平成20年度 火力原子力発電大会論文集	古川 敬 古村一朗 他	超音波伝搬シミュレーション解析を用いた超音波探傷の支援技術	仙台大会 CD-ROM 3-5 2008年10月
平成20年度 火力原子力発電大会論文集	西川 聡 大北 茂 堀井行彦	長期間使用した改良9Cr-1Mo鋼溶接部のじん性評価方法	仙台大会 CD-ROM 3-3 2008年10月
溶接学会論文集	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ形態	第27巻 (2009) 第1号 p.67-72
溶接学会論文集	西川 聡 大北 茂 堀井行彦	長時間熱時効された改良9Cr-1Mo鋼溶接金属のじん性回復と電気化学計測による評価	第26巻 (2008) 第3号 p.220-226

保全学	中東重雄 程 衛英 古村一朗 山口篤憲 他	原子炉圧力容器鋼の照射による組織変化と磁気構造変化	Vol.7, No.3, p.47-55, 2008
Int. J. Nuclear Knowledge Management	兼本 茂 程 衛英 古村一朗	Intelligent system supporting defect identification and sizing using eddy current testing signals in nuclear power plants	Vol.2, No. 4, 2007, p.396-408
IEEE, Transaction on Magnetics	程 衛英 兼本 茂 古村一朗	Numerical Evaluation of the Depth of Branched-off Cracks using Eddy Current Testing Signals	Vol. 44, No. 6, June, (2008), p.1030-1033.
日本実験力学学会	関野晃一 他	種々の形状を有する自然き裂の耐熱ガラス板への付与とそのき裂開口変位の光干渉法による評価	p.59-64 2008年
SPring-8 Research Frontiers 2007	中東重雄 他	Detection of Cracks due to SCC in Ni-base Alloys by Synchrotron Radiation CT Imaging	p.158-159 2008年7月
平成19年度 先端大型研究施設戦略活用 プログラム成果報告書 (Spring-8戦略活用プログラム 2007B)	中東重雄 他	放射光CTによるステンレス鋼中SCCき裂の検出とサイジング	p.191-194 2008年3月
平成19年度 火力原子力発電大会論文集	米山弘志 杉林卓也	PD研修とその実績	高松大会 CD-ROM 3-4 2007年10月
平成18年度 火力原子力発電大会論文集	古川 敬 古村一朗 米山弘志 山口篤憲	超音波探傷試験によるき裂深さ測定精度の評価	名古屋大会 CD-ROM 3-4 2006年10月
溶接学会論文集	西川 聡 古川 敬 古村一朗 堀井行彦	ニッケル基合金の溶接金属組織と超音波探傷による欠陥検出性の関係	第25巻(2007) 第1号 p.179-186
平成18年度 火力原子力発電大会論文集	大石勇一 吉田和夫 他	発電用火力設備に関する外国規格の適用調査(その3:構造関係)	名古屋大会 CD-ROM 8-1 2006年10月
Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics 28 Electromagnetic Nondestructive Evaluation(X)	程 衛英 古村一朗 兼本 茂	Identification of Defects from ECT Signals using Linear Discriminant Function	No.28 p.251-258 2007
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	程 衛英 中東重雄 志波光晴 古村一朗 他	Investigation of the Micro-structural Dependence of the Magnetic Properties of SQV2A Steel for NDE	Vol.125, p.145-149, 2007
保全学	兼本 茂 程 衛英 志波光晴 古村一朗	部分接触SCCの渦電流探傷による新しいサイジング法	Vol.5, No.4 p.51-58 2007年1月号
Science & Technology of Welding and Joining	堀井行彦 他	Recent Development of Repair Welding Technologies in Japan	Vol.11, No.3, p.255-264 May 2006
平成17年度 火力原子力発電大会論文集	水野亮二 松田福久 他	原子炉圧力容器鋼(SQV2A)のテンパーピード溶接法に関する研究	東京大会 CD-ROM 3-2 2005年10月

Review of Quantitative Nondestructive Evaluation	志波光晴 程 衛英 中東重雄 古村一朗 他	Nondestructive Evaluation of irradiation embrittlement of SQV2A Steel by using Magnetic Method	Vol.25, p.1163-1170, 2006
NDT&E International	程 衛英 兼本 茂 古村一朗 志波光晴	Depth sizing of partial-contact stress corrosion cracks from ECT signals	Vol.39, p.374-383, 2006
保全学	兼本 茂 程 衛英 志波光晴 古村一朗	渦電流探傷における欠陥形状復元のための新しい信号処理法 の提案	Vol.5, No.1, p.63-70, 2006年4月号
Review of Quantitative Nondestructive Evaluation	程 衛英 志波光晴 古村一朗 他	FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR THE VERIFICATION OF POSTWELD HEAT TREATMENT OF 9Cr-1Mo WELDS	Vol.24, p.1204-1211, 2005
保全学	古川 敬 古村一朗 米山弘志 山口篤憲	超音波探傷試験による応力腐食割れ深さサイジングにおける 教育訓練目標の指標について	Vol.4, No.3, p.50-55, 2005
PROGRESS REPORT ON NEUTRON SCIENCE	水野亮二 他	中性子回折によるNCF600-SQV2Aの異材溶接継手部の残留 応力評価	JAERI-Review 2005-045, p.136, September, 2005
Journal of Pressure Vessel Technology	程 衛英 古村一朗 志波光晴 兼本 茂	Eddy Current Examination of Fatigue Cracks in Inconel Welds	Vol. 129, p.169-174 February 2007
火力原子力発電	西川 聡 堀井行彦 佐藤正信 他	配管周継手の局部後熱処理の適正施工条件について	Vol.56, No.585, p.43-52, 2005
日本鉄鋼協会「鉄と鋼」 欧文誌	中東重雄 他	Effects of surface grinding hardness distribution and residual stress in low carbon Austenitic stainless steel SUS316L	Vol. 44, No.10, 2004
平成16年度 火力原子力発電大会論文集	程 衛英 古村一朗 志波光晴 他	炉内構造物検査への渦流探傷技術の摘要評価	広島大会CD-ROM 1-2-6 2004年10月
Journal of Synchrotron Radiation	中東重雄 他	High temperature and high pressure in-situ SCC device for SR diffraction Experiments and application for an austenitic stainless steel	13, p.13-18, 2006年
保全学	古川 敬 古村一朗 他	原子炉再循環系配管のSCC深さサイジング技術	Vol.3, No.3, p.51-55 2004
火力原子力発電	志波光晴 衆 亮一 他	高Cr鋼の交流磁化法によるクリープ損傷評価技術の開発	Vol. 55, No.8, No.575 p.26-32 2004
Recent Advances in Nondestructive Evaluation Techniques for Material Science and Industries PVP2004-2836	程 衛英 古村一朗 志波光晴	Analytical and Experimental Approaches for the Sizing of Fatigue Cracks in Inconel Welds by Eddy Current Examination	PVP-Vol.484, p.191-197 2004

学協会等への口頭発表

平成26年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	日本AEM学会 「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム	2014/5/21-23 アイーナ岩手県民情報 交流センター	程 衛英 上山芳教 古川 敬 三原 毅	パルス渦電流試験法による鋳鉄配管の減肉評価
	(一社)日本非破壊検査協会 H26春季講演大会	2014/6/3-4 アルカディア市ヶ谷	水野亮二 古川 敬	UTシミュレーションにおけるオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織のモデル化及びその妥当性検証 Modeling of columnar crystal structure in Austenitic weld metal and its validation for UT simulation
	第48回 X線材料強度に関するシンポジウム	2014/7/24-25 エル・おおさか (大阪府立労働センター)	水野亮二 佐々木敏彦	X線回折による塑性ひずみ測定技術の開発
			佐々木敏彦 宮崎利行 古川 敬 三原 毅	MnK α 線および二次元検出器によるオーステナイト系材料のX線応力測定
	神奈川県非破壊試験技術交流会 研究発表会	2014/6/9 関東学院大学(関内)	水野亮二 古川 敬	UTシミュレーションにおけるオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織のモデル化及びその適用性検討
	平成26年度 保守検査ミニシンポジウム	2014/7/4 大田区産業プラザ(Pio)	水野亮二 西川 聡 古川 敬 佐々木敏彦 三原 毅	X線回折による塑性ひずみ測定技術の開発
	八光オートメーション(株)	2014/5/30 八光オートメーション (株)(福岡)	程 衛英	パルス渦電流試験法および減肉評価
	Ni基合金異材継手のISIと メンテナンスに関するワークショップ (International Workshop on In- service Inspection and Maintenance of Aged Ni-based Dissimilar Metal Weld(DMW) Components in NPPs)	2014/6/2 KINS(韓国 太田市)	古村一朗 古川 敬	Data Base for NDT-related National Project(Outcome of APN/Accumulation & Preparation of Nondestructive Inspection Data for Nuclear Power Plants)
	日本保全学会第11回学術講演会	2014/7/24-25 八戸工業大学	古川 敬 水野亮二 上山芳教	超音波探傷訓練へのシミュレーション解析技術の適用
	平成26年度火力原子力発電大会	2014/10/23 名古屋国際会議場	程 衛英 比翼 賢 古川 敬 加古晃弘 池堂和仁	パルス渦電流試験法による保温材上からの配管減肉計測
	日本原子力学会 第13回材料部会夏期セミナー	2014/8/5 山形県山形市 蔵王温泉 ホテル樹林	古川 敬 程 衛英	超音波・電磁気による非破壊検査技術
	59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference	2014/11/5-9 Hawaii, USA	程 衛英 斎藤兆古	Modeling and Analysis of Hysteresis by Harmonic Balance Method
	ICMST-KOBE 2014	2014/11/2-5 神戸大学	山本敏弘 上山芳教 古川 敬 古村一朗	Evaluation of the Capability to Estimate a Crack Profile by 3D SAFT UT

非破壊	(一社)日本非破壊検査協会 秋季講演大会	2014/10/28-29 名古屋国際会議場	三原 毅 古川 敬 長 秀雄	疑似SCC探傷研究委員会活動報告1および疑似SCC探傷研究委員会活動報告2
	(一社)日本非破壊検査協会 平成26年度第2回超音波部門講演会	2014/10/2-3 茨城空港	上山芳教 水野亮二 古川 敬	超音波探傷訓練へのシミュレーション解析技術の適用
溶接	溶接冶金研究委員会	2014/5/23 鐵鋼会館(大阪)	西川 聡 大井浩一 高橋 誠 古川 敬	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の耐粒界腐食性に及ぼすショットピーニングと熱時効処理の影響
	日本保全学会第11回学術講演会	2014/7/24-25 八戸工業大学	西川 聡 生島一樹 柴原正和	理想化陽解法FEMを用いた実機多パス溶接継手の残留応力解析

平成25年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	システム情報学会	2013/5/15 ~ 5/17 兵庫県民会館	古川 敬	ガイド波試験による配管非破壊評価シミュレーション
	日本非破壊検査協会 平成25年度春季講演大会	2013/6/3 ~ 6/4 アルカディア市ヶ谷	程 衛英	渦電流の乱れと磁束分布に着目した電磁誘導試験
	ENDE2013	2013/6/25 ~ 28 (スロバキア、プラチスラヴァ、パーク・イン・ダニューブ)	山本敏弘 古川 敬 古村一朗 他	Visualization of ultrasonic propagation for EMATs by scanning the side surface of the specimen with a piezoelectric transducer
	3rd International symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing	2013/6/25 ~ 28 Yokohama	古川 敬 他	Control of the Amplitude Distribution of the Guided wave in an Elbow Pipe by Changing the Frequency and Efficient Defect Detections
	QNDE2013	2013/7/21 ~ 26 米国・ボルチモア ヒルトン・ボルチモア	山本敏弘 古川 敬 他	Efficient defect detections of elbow pipes using propagation characteristics of guided waves
	日本保全学会 第10回学術講演会	2013/7/24 ~ 26 ホテル阪急エキスポパーク(大阪)	程 衛英 古川 敬	多次元の渦電流信号の活用によるき裂評価
			古川 敬 山本敏弘 他	ねじりモードガイド波を用いた複数のエルボ超え探傷の数値解析
	16th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM'2013)	2013/7/31 ~ 8/3 Quebec city, Canada	程 衛英	Pulsed Eddy Current Characterization of Local Wall Thinning
	電気学会 平成25年基礎・材料・共通部門大会	2013/9/12 ~ 13 横浜国立大学	程 衛英	渦電流の乱れと磁束分布に着目した電磁誘導試験
	日本非破壊検査協会 シンポジウム「社会インフラのメンテナンスを支える非破壊検査技術」	2013/9/30 きゅりあん 小ホール	古川 敬	フェーズドアレイ超音波法の概要と適用事例紹介
第10回NDE国際会議	2013/10/1 ~ 3 フランス・カンヌ ホテル・マルティネス	山本敏弘 古川 敬 古村一朗 他	Property study on EMATs with visualization of ultrasonic propagation	

非破壊	USE2013	2013/11/20 ~ 22 同志社大学 室町キャンパス	山本敏弘 古川 敬 他	Efficient defect detections in an elbow part of piping by guided waves using appropriate frequency 2 - FEM analyses and a method for efficient defect detections -
	日本溶接協会 原子力構造機器の材料、設計、施工、検査、維持に関する講習会	2013/12/5 溶接会館	牧原善次	原子力機器に適用される検査方法
	日本機械学会 北陸信越支部主催 特別講演会 「原子力発電機器の強度保障のための高信頼性に関する研究開発」	2013/12/12 金沢大学 角間キャンパス	古川 敬	原子力発電機器の強度保障のための高信頼性に関する研究開発 ～ 現状技術等の紹介 ～
	日本非破壊検査協会 第21回 超音波による 非破壊評価シンポジウム	2014/1/20 ~ 21 東京都立産業技術 研修センター	上山芳教 他 古川 敬 他	数値シミュレーションを用いた横波斜角アレイ探触子の特性検討 T(0,1) モードガイド波の非軸対称減肉における伝搬挙動
溶接	溶接学会 平成25年度秋季全国大会	2013/9/2 ~ 4 岡山理科大学	西川 聡 他	ニッケル基合金溶接部における熱サイクル中の残留応力変化
	平成25年度 火力原子力発電大会	2013/10/17 広島国際会議場	水野亮二 大北 茂	原子炉容器鋼 (SQV2A) テンパーヒード補修溶接部の低温割れ性及びじん性に関する研究
	日本非破壊検査協会 第21回超音波による 非破壊評価シンポジウム	2014/1/20 ~ 21 東京都立産業技術 研修センター	水野亮二 古川 敬	オーステナイト系溶接金属の柱状晶組織予測手法及びモデル化による超音波伝搬シミュレーション Prediction method and modeling of columnar crystal structure in Austenitic weld metal for UT simulation

平成24年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター講演会	2012/5/18 広島県立 総合技術研究所 西部工業技術センター	古川 敬	超音波検査へのシミュレーション解析の活用 (バルク波とガイド波)
	日本保全学会 第9回 学術講演会	2012/7/25-27 国立大学財務 ・経営センター	古川 敬 他	ねじりモードガイド波によるエルボ部の減肉の 最適計測手法
	日本保全学会 第9回 学術講演会	2012/7/25-27 国立大学財務 ・経営センター	程 衛英	パルス渦電流試験法による保温材付配管の肉厚評価の 基礎検討
	産業技術総合研究所	2012/8/27 産業技術総合研究所	程 衛英	パルス渦電流試験法による保温材付配管の減肉評価の 基礎検討
	法政大学 理工学部電気電子工学科 斎藤兆古研究室	2012/10/5 法政大学 理工学部 電気電子工学科 斎藤兆古研究室	程 衛英	電磁気非破壊検査法及び構造物健全性評価への活用 パルス渦電流試験法による保温材付配管の減肉評価の 基礎検討
	日本非破壊検査協会 平成24年度秋季講演大会	2012/10/22-24 アルカディア市ヶ谷	上山芳教 古川 敬	フェーズドアレイ法における表面近傍を伝搬する 超音波の音場の観察
日本非破壊検査協会 平成24年度秋季講演大会	2012/10/22-24 アルカディア市ヶ谷	程 衛英	AMR センサを用いたパルス渦電流試験法による 保温材付き炭素鋼配管の減肉評価の基礎検討	

非破壊	MAGDAコンファレンス	2012/11/21-22 仙台市戦災復興記念館	山本敏弘 古川 敬 古村一朗 他	超音波探触子での側面走査によるEMATが発生する超音波の伝播の可視化
	日本非破壊検査協会 第20回超音波による 非破壊評価シンポジウム	2013/1/28-29 きゅりあん(大井町)	古川 敬 山本敏弘 他	T(0,1) モードガイド波を用いたエルボ超え探傷の数値シミュレーション
	日本原子力学会 2013年春の年会	2013/3/26-28 近畿大学	古川 敬 他	使用済燃料貯蔵施設用コンクリートキャスクのキャニスタ蓋溶接部のUT検査方法 その2
溶接	日本保全学会 第9回 学術講演会	2012/7/25-27 国立大学財務・ 経営センター	西川 聡 他	ショットピーニングを施したニッケル基合金溶接部の熱履歴による圧縮残留応力と耐粒界腐食性の変化
	平成24年度 火力原子力発電大会	2012/10/4 さっぽろ芸術文化の館	西川 聡	ショットピーニング施工した異材溶接部における圧縮残留応力の長期安定性

平成23年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	平成23年度電気学会 基礎・材料・共通部門大会	2011/9/21 東京工業大学	程 衛英	パルス渦電流試験法による減肉評価
	平成23年度 第1回非線形超音波の基礎と 応用に関する研究会	2011/8/10 徳島大学	古川 敬	現行UT法(基本波を用いたフェーズドアレイ及び固定角UT)によるき裂高さサイジング技術の現状
	平成23年度 火力原子力発電大会	2011/10/13 福岡国際会議場	古村一朗 古川 敬	開口合成3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部SCC探傷特性評価
	第2回 次世代高温センサ研究会	2011/11/18 東北大学流体科学 研究所 大会議室	古村一朗	開口合成3次元UT法と高温用マトリックスアレイセンサー
溶接	溶接学会 平成23年度秋季全国大会	2011/9/7-9 皇學館大学	西川 聡 他	ショットピーニングが施された異材溶接継手における圧縮残留応力の持続性

平成22年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	QNDE2010(37 th Annual of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation)	2010/7/18-23 米国サンディエゴ	程 衛英 古村一朗	Simulation for the Eddy Current Method Measurement of Pipe-wall Thinning
	The 15 th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2010)	2010/6/14 ポーランド シュチェチン	山本敏弘 他	An ECT probe with widely spaced coils for local wall thinning in nuclear power plant
	日本保全学会 第7回 学術講演会	2010/7/14.15 浜岡原子力館	程 衛英 古村一朗	渦電流探傷法による配管減肉評価のシミュレーション
			小林輝男	ステンレス鋼溶接金属を透過したUT確認試験研究成果
			古村一朗 古川 敬	超音波探傷における結果の評価、結果の推定、及び探傷条件の最適化を支援するシミュレーション技術
創立60周年記念 火力原子力発電大会	2010/10/14 東京フォーラム	小林輝男	ステンレス鋼溶接金属を透過したUT確認試験研究成果	

非破壊	日本非破壊検査協会 平成22年度秋季講演大会	2010/10/27-29 沖縄県市町村自治会館	古川 敬 古村一朗	大規模FEM解析を用いたガイド波の伝搬及び探傷波形シミュレーション
	第8回 NDE国際会議	2010/9/29-10/1 ドイツ ベルリン	古村一朗 古川 敬	Improvement of SCC depth sizing capability by 3D-SAFT UT method in Ni alloy weld
			古川 敬 古村一朗	Numerical simulation of guided wave propagation in elbow pipe and welds
	第18回 超音波による非破壊評価 シンポジウム	2011/1/27 きゅりあんホール	古川 敬 南 康雄 杉林卓也 古村一朗	音響異方性を有する材料へのPhased array UTの適用
日本非破壊検査協会 「電界計測に基づく非破壊評価 応用研究会」	2011/3/11 日本非破壊検査協会	程 衛英	渦電流探傷技術への取り組みとその新展開	
溶接	日本保全学会 第7回 学術講演会	2010/7/14.15 浜岡原子力館	西川 聡 大北 茂 山口篤憲 他	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の高温高圧純水中の応力腐食割れ感受性に及ぼすCr濃度の影響
			西川 聡 大北 茂 山口篤憲 他	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の高温高圧純水中の応力腐食割れ感受性に及ぼすC、Nb濃度の影響
	溶接学会 平成22年度秋季全国大会	2010/9/7～9 日本大学工学部 (福島県郡山市)	西川 聡 水野亮二 大北 茂 他	残留応力解析用材料物性値の取得 -原子炉圧力容器クラッド境界部の残留応力評価(第1報)-
			水野亮二 西川 聡 他	低合金鋼の相変態が溶接残留応力に及ぼす影響についての感度解析 -原子炉圧力容器クラッド境界部の残留応力評価(第2報)-
	防食腐食協会 第57回 材料と環境検討会	2010/10/20～22 沖縄県市町村自治会館	西川 聡 山口篤憲 他	ニッケル基合金溶接金属/低合金鋼境界部における微視的残留応力評価手法の検討
	溶接冶金研究委員会 50周年シンポジウム	2010/10/7～8 大阪大学	西川 聡 大北 茂 山口篤憲 他	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の高温高圧純水中の応力腐食割れ感受性に及ぼす化学成分、熱処理の影響

平成21年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	JIMA2009 総合検査機器展 「アカデミックコーナー」	2009/4/8～10 東京ビックサイト	関野晃一	光学的応力・ひずみ測定法の非破壊検査法への適用例
	KOREA-JAPAN JOINT WORKSHOP on Inspection and Mitigation of Dissimilar Metal Welds	2009/7/1～3 Gyongju KyoYuk MunHwa HoeKwan, Gyongju, Korea	古村一朗	DMW Inspection by Real Time 3D-SAFT Technique
	Short Course on Quantitative NDE for Life Extension in Power Plants University of Rhode Island Ballentine Hall	2009/7/25～26 Kingston, Rhode Island,	古川 敬 古村一朗 山口篤憲	Verification of Inspection Performance of Phased Arrays under Different Inspection Parameters by an Ultrasonic Visualization Technique

非破壊	日本金属学会 2009 秋期 (第145回) 大会	2009/9/15 ~ 17 京都大学: 吉田キャンパス	中東重雄 長谷川忠之 他	放射光CTによるステンレス鋼中のSCCき裂観察
	日本原子力学会 2009年秋の大会	2009/9/16 ~ 18 東北大学・青葉山 キャンパス	中東重雄 長谷川忠之 他	γ線イメージングによるSCCき裂の観察
	「第6回SPring-8 産業利用報告会 ポスター発表」	2009/9/3 東京ステーション コンファレンス (東京丸の内)	中東重雄 長谷川忠之 他	放射光CTイメージングによるステンレス鋼応力腐食 割れ(SCC) き裂の観察
	ISME'2009(The 14 th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics)	2009/9/20 西安、中国	程 衛英 古村一朗	Optimum Inducement of Eddy Current for NDE of Deep Lying Defects
	第17回 超音波による非破壊評価 シンポジウム	2010/1/28 ~ 29 きゅりあん	古川 敬 古村一朗	エルボ管及び溶接部におけるガイド波伝搬シュミレー ション
			古川 敬 古村一朗	可視化法を用いたフェーズドアレイによる集束音場の 観察
	日本原子力学会 2010年春の年会	2010/3/26 ~ 28 茨城大学 ・水戸キャンパス	中東重雄 長谷川忠之 古村一朗 山口篤憲 他	X線イメージングによるステンレス鋼中SCCき裂の観察
	兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 先端技術セミナー 2010	2010/3/11 イーグレ姫路 あいめっせホール	中東重雄	ステンレス鋼中SCCのコンプトン散乱γ線イメージングに よる観察
	SPring-8 金属材料評価研究会 (第2回)	2010/3/1 五反田 ゆうぼうと	中東重雄	ステンレス鋼溶接部のSCCのき裂観察における 高エネルギー X線利用における試験片寸法拡大の検討
日本非破壊検査協会 平成22年度春季講演大会	2010/5/25 ~ 26 TFT (江東区 有明)	古川 敬 古村一朗	エルボ部におけるねじりモードガイド波伝搬の 数値シミュレーション	
溶接	溶接学会 平成21年度秋季全国大会	2009/9/9 ~ 11 徳島大学	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属 の応力腐食割れ感受性に及ぼすCrの影響
	火力原子力発電大会	2009/10/8 大阪国際会議場	長谷川忠之 西川 聡 他	溶接始末端部の残留応力解析
	溶接構造シンポジウム2009	2009/11/17 ~ 18 大阪大学銀杏会館	水野亮二 他	中性子回折による配管周溶接部の残留応力測定
長谷川忠之 西川 聡 他			平板試験体を用いた溶接始末端部の残留応力評価	
		西川 聡 他	Ni基合金溶接金属部のCBB試験における 微視的応力分布の数値解析	

論文等表彰

氏名	受賞名等	機関等・受賞日	受賞内容
西川 聡 大北 茂 山口篤憲	平成26年度 論文賞	(一社)日本保全学会 平成26年5月26日	論文賞表彰論文は、保全学誌に掲載された論文から「新規性」、「応用上の有用性」、「内容の完成度」の視点で評価して優秀論文として選定された賞である。 受賞対象論文：「応力改善工法で付与される圧縮残留応力の持続性」
古村一朗 古川 敬	平成24年度 論文賞	(一社)火力原子力発電協会 平成24年10月3～4日	論文賞表彰論文は、会誌「火力原子力発電」平成23年1月号から12月号及び平成23年度火力原子力発電大会論文集に掲載された論文から優秀論文として選出された賞である。 受賞対象論文：「開口合成3次元超音波探傷法によるNi合金溶接部SCCの探傷特性評価」
西川 聡	平成21年度 溶接学会論文奨励賞	(社)溶接学会 平成22年4月21日	本賞は、溶接学会論文集に掲載された論文の中からとくに優秀な一連の論文を対象に授与されるものであり、学術上大いに貢献があったとして送られる賞である。 受賞対象研究：「高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ形態」
関野晃一	第12回技術研究会 奨励賞	神奈川県非破壊試験技術 交流会 平成20年6月13日	本賞は、第12回技術研究会において優れた発表を行いその努力が非破壊検査技術の向上に寄与するところ大と評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究：「光学的ひずみ測定法の非破壊検査法への応用について」
関野晃一 古川 敬	平成19年度 学術奨励賞	(社)日本非破壊検査協会 平成20年5月21日	本賞は、研究報告の内容が非破壊検査技術の向上に寄与するところが大きいと評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究：「硝子板に付与したき裂近傍における超音波の可視化」
西川 聡	平成19年度 溶接冶金研究委員会 優秀研究賞	(社)溶接学会 平成20年5月14日	本賞は、溶接冶金研究委員会で発表された研究が優秀であり、今後の発展性が高いと評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究：「改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の靱性影響因子と電気化学計測を用いた簡易評価方法の提案」
大北 茂	溶接学術振興賞	(社)溶接学会 平成20年4月9日	本賞は、溶接学会会員として永年にわたり優れた学術業績を積み、所属支部の活性化にその識見を発揮し溶接の学術振興に大きく貢献した者として贈呈されたものである。
古村一朗 古川 敬	平成19年度第4回学術講演会 第1回産学協同セッション銅賞	NPO法人日本保全学会 平成19年7月3日	産学協同セッションは、『研究者が提案する研究成果を商品とみなし、企業や国などを購買者と位置づけ、研究成果を売買する市場を保全学会が提供するという市場原理に近い新しい試み』として初めて開催されたものである。当センターは、超音波探傷シミュレーション技術を「実機探傷で得られるエコー群が、欠陥かどうかの評価を可能にする技術」として発表し、非常に完成度の高い技術として銅賞を授与されたものである。
関野晃一	平成18年度 新進賞	(社)日本非破壊検査協会 平成18年10月27日 (NDI協会秋季大会)	本賞は、平成18年度に行なわれたNDI協会大会での発表の中から、特に優れた発表を行なった若手研究者に送られる賞である。 受賞対象論文：「光干渉法と超音波可視化法を併用した手法によるき裂の評価」
糸 亮一 志波光晴	優秀論文賞	(社)火力原子力発電技術 協会 平成17年10月12日	優秀論文表彰は、平成17年度に会誌「火力原子力発電」に掲載された論文の中から、優秀であった論文に対して授与されるもので「高Cr鋼の交流磁化法によるクリープ損傷評価技術の開発」が対象となった。

水野亮二	平成15年度 木原奨励賞	(財)溶接接合工学振興会 平成16年5月13日	本賞は、毎年1回、溶接接合工学の分野における新進気鋭の原則として35歳以下の研究者、技術者に授与されるもので、(財)溶接接合工学振興会会員、関連団体及び理事会の推薦によるものである。回原子炉圧力容器等原子力プラント溶接部の品質保証溶接施工法に係る研究開発に関する論文、学会発表等に対して受賞したものである。
青野健二郎	「火力原子力発電」掲載論文賞	(社)火力原子力発電技術協会 平成14年9月25日	論文「斜角探触子の距離振幅特性曲線と欠陥検出能力の評価」に対して受賞したものである。
志波光晴 西川 聡 米山弘志 山口篤憲	技術賞 開発奨励賞	(社)日本溶接協会 平成14年5月29日	研究成果報告「交流磁化法による施工後の溶接熱処理温度評価」に対して受賞したものである。
西川 聡	平成14年度 科学技術 奨励賞	(社)日本高圧力技術協会 平成14年5月24日	若手研究者に対する賞で、発表論文「鑄造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効評価―第1・2報―」に対して与えられたものである。
西川 聡	平成13年度 溶接学会 研究発表賞	(社)溶接学会 平成14年4月25日	35歳未満の若手研究者に対する賞で、発表論文「熱処理条件の非破壊的評価手法の検討―局部PWHT溶接部の性能評価に関する研究(第1報)」に対して与えられたものである。
青野健二郎	平成13年度 新進賞	(社)日本非破壊検査協会 平成13年5月31日 (NDI協会春季大会)	本賞は、平成13年度に行なわれたNDI協会大会での発表の中から、特に優れた発表を行なった若手研究者に与えられる賞である。 受賞対象論文：「溶接金属内部欠陥とUT及びRTによる非破壊信号量との関係」

技術レビュー・編集後記

今年も無事に「技術レビュー」を発行することができました。ご協力をいただいた皆様にはこの場を借りて御礼申し上げます。

この編集後記を書いている頃は暑かった夏も終わり、今年は土曜日が休みであれば9月19日の土曜日から9月23日の水曜日までの5連休となる秋の大型連休の手前頃です。

2015年現在、世界における日本の有給休暇の取得率はワーストクラスに近いですが、年間の祝祭日の日数はトップクラスだそうです。祝祭日を有効利用して是非リフレッシュをしましょう。

当センターは、溶接・非破壊検査技術のより一層の向上を目指して邁進して参りますので、今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.11 2015 (非売品)

発行編集人 吉田 弥美 (溶接・非破壊検査技術センター管理グループ長)
発行所 一般財団法人発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター
〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町14-1
TEL(045)511-2751 FAX(045)511-2750
編集・協力 電気新聞メディア事業局

印刷 日本印刷株式会社

《無断転載を禁じます》

本誌は古紙再生紙を使用しています。

技術レビュー

Vol.11 2015



一般財団法人 発電設備技術検査協会
溶接・非破壊検査技術センター

〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町14-1
TEL 045-511-2751 FAX 045-511-2750