

## エネルギー最前線における 価格と数量

1977年冬に私は北海道住友赤平炭鉱に行き、ヘルメットにヘッドライト、防塵マスクを着けて、立坑のエレベータに乗り、地下数百メートル下に降りた。坑道を歩くと、時折支保坑の間から石炭の塊が落ち冷やりとする。最前線で切羽の炭層は1メートルであった。地上に戻ると、黒くなった顔をシャワーで洗い、往時を偲ばせる大浴場でホッとした。赤平炭鉱はその後1994年に閉山した。日本最後の閉山は、2002年釧路の太平洋炭鉱であったが、現在はアジアからの研修生に安全教育を行う釧路コールマインとして存在している。

2004年オーストラリアのシドニーから車で数時間北上して、バルガ炭鉱を訪問する機会に恵まれた。露天掘りの炭層は20メートルもあり、数十トンのダンプトラックが蟻のように動き回って石炭を運んでいた。この時の世界エネルギー会議では、豪州首相自らが、日本の電力会社に対して豪州炭購入について感謝を述べていた。

北海道苫小牧にある原油と天然ガス田の生産現場は、整然とパイプが配置されたきれいな工場であった。原油を生産し、天然ガスをLNG化している唯一の製油所である。1973年の第一次石油ショック後に原油の備蓄が国際エネルギー機関を中心に始まり、日本列島には、十カ所の国家備蓄石油基地があり、油断に備えている。

米国テキサス州の原野には、ゆっくりと大きなアームが上下する原油生産井戸が、点在し、また、メキシコ湾にも海上リグが原油を生産している。戦略石油備蓄基地（SPR）もテキサス州にあり、地下岩塩層の空間に原油やガソリンが備蓄され、付近にある石油精製会社とパイプでつながっており、大統領の命令があれば、いつでも備蓄は市場に放出可能という職員の説明であった。むろん入口には銃を持った警備の人がいた。

「無名碑」という曾野綾子氏が土木技術者の家族を描いた小説がある。小説の舞台の一つが田子倉水力発電所（1959年竣工）で、福島県の只見川をせき止めた高さ145メートルの重力式ダムで五億トンの水をたたえることができ、電気出力は40万kWである。

ベトナムの首都ハノイから北へ数時間ゆくとソンラ水力発電所の建設現場があり、山間の川をせき止め、120万kWの発電能力（2011年竣工）を目指していた。2期工事はさらに120万kWを増設すると聞いた。国を挙げてエネルギーを確保するため水力開発をしているとの説明があった。

日本の一次エネルギー供給（2012年度）の95%は石油（44%）、天然ガス（25%）、石炭（23%）、水力（3%）により供給されている。その太宗は海外からの輸入化石燃料である。従って、世界のエネルギー生産・価格動向と日本のエネルギー状況は密接不可分である。

エネルギーの最前線は、現場を経験できれば最善だが、次善の策として信用できるエネルギー統計やインターネットのサイトを利用して疑似体験をしてみたい。日本の一次エネルギーで最大の物は石油なので、その製品であるガソリン価格は、エネルギー全体の動きを知る良い指標になる。レギュラーガソリンの小売価格は現在1リットル当たり170円で、日本への原油の輸入価格は1バーレル当たり110ドルである。「石油の世紀」(The Prize) という20世紀の石油と社会のかかわりを描いたダニエル・ヤーギン博士がピューリッツァー賞を受賞したドキュメンタリー本がある。これを映像化した作品があり、インターネットで見られるのでぜひお勧めしたい。

日本が消費する石油の8割はOPEC加盟国であるサウジアラビア、UAE、カタールなどから輸入されるが、石油は欧州の北海や深い海底油田からも産出する。もう十年程前になるが、ウィーンのOPEC本部で会議に参加した時に示された原油の生産コストは、中東のOPEC諸国は、1バーレル当たり約4ドル、北海や深い海底からの物は約10ドル、また、タールサンドや原油の2次回収（EOR）では約16ドルといわれ、その生産コストの幅の大きさに驚いた。原油価格は世界市場で油の性状が似ていれば、同一価格で取引されるので、生産コストの安いOPEC諸国は有利に取引ができる。どのエネルギー源を、どれ位の価格及び数量で確保できるかは、個別の会社やその国全体の情報分析力、資金力など実力の勝負である。

これらの化石燃料とともに、地熱・太陽光など再生可能エネルギーや原子力というエネルギー選択枝を次世代に残すために、発電設備技術検査協会は、1970年発足以来の経験と技術の蓄積に基づき、エネルギーの最前線で、努力を続けてまいります。皆様の温かいアドバイスをいただけたら幸いです。



一般財団法人  
発電設備技術検査協会  
理事長

藤富 正晴

巻頭言	「エネルギー最前線における価格と数量」…………… 1 一般財団法人 発電設備技術検査協会 理事長 藤富 正晴	1
トピックス	・NDEシンポジウム2013を開催…………… 3	3
研究報告	欠陥検出評価技術に関する研究	
	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…………… 4 水野 亮二, 上山 芳教, 古川 敬	4
	配管エルボ部での欠陥検出性向上のための ガイド波伝搬シミュレーションの活用…………… 10 山本 敏弘, 古川 敬 (徳島大学) 西野 秀郎	10
	パルス渦電流試験法による局部減肉評価…………… 14 程 衛英	14
	溶接継手の健全性確保に関する研究	
	ニッケル基合金溶接金属の残留応力測定を試み…………… 18 西川 聡, 山本 敏弘, 古川 敬	18
	原子炉容器鋼テンパービード補修溶接部の低温割れ及びじん性…………… 23 水野 亮二	23
	技術基準・規格化に関する調査研究	
	米国機械学会規格における溶接後熱処理の免除規定の動向…………… 29 大石 勇一	29
	米国におけるボイラーおよび圧力容器に関する安全規制について…………… 33 長谷川忠之, 大石 勇一, 佐藤 長光	33
	発電技検における確性試験の回顧と展望…………… 40 佐藤 長光, 長谷川忠之	40
研修・講習 活動報告	研修・講習事業の歩みと今後の展開…………… 45 牧原 善次	45
成 果	(1)出願特許一覧…………… 50 (2)学協会誌等への論文発表…………… 51 (3)学協会等への口頭発表…………… 55 (4)論文等表彰…………… 60	50 51 55 60
編集後記		

# NDE シンポジウム2013を 開催

平成25年11月28日(木)

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25年11月28日(木)に東京大学山上会館大会議室において、NDE シンポジウム2013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、原子力発電設備の安全性を維持するうえで溶接継手部の健全性を確保するため、構造健全性を評価する分野ときずの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が必要不可欠であり、両分野の関係者が一堂に会して、研究開発や実機適用事例に係る現状及び課題を共通に認識し、今後の研究開発課題や方向性を議論することで、原子力設備の安全性の維持・向上に大きく貢献することが期待される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、東京大学の酒井信介教授より「リスクベース検査の考え方」、東京大学の岡本孝司教授より「安全規制の高度化」について貴重なご講演をいただきました。

セッション1：非破壊評価では、三菱重工業株の藤田氏より「高温用薄膜 UT センサを用いた高精度な厚さ測定・減肉傾向監視技術の開発」、(株)東芝の市川氏より「複雑形状部に対する非破壊検査技術の開発動向」、(株)IHIの山口氏より「超音波による溶射皮膜厚計測の適用検討」についてそれぞれ発表が行われました。

セッション2：構造健全性評価では、(株)日本製鋼所の小山氏より「原子炉圧力容器用胴部材料の製造プロセス及び水素系欠陥防止の考え方」、(株)日立製作所の岩松氏より「残留応力場における SCC き裂進展評価システムの開発」、住友化学株の戒田氏よ

り「減肉を有する圧力設備の供用適性評価技術」について発表が行われました。

その他当協会から、セッション1では「電磁超音波探触子から発生する超音波音場の可視化」、セッション2では「原子炉容器鋼テンパービード補修溶接部の低温割れ性及びじん性に関する研究」に関する2件の技術報告をいたしました。



講演される酒井教授



講演される岡本教授



# 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

溶接・非破壊検査技術センター 水野 亮二, 上山 芳教, 古川 敬

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 by simple heat input was modeled for UT simulation and its validation was evaluated. It was suggested that ultrasonic reflection and scattering from boundary between columnar structures and fusion boundary could simulate using the model in this study.

**Keywords** *UT simulation, columnar crystal, austenitic weld metal, solidification simulation*

## 1 はじめに

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<sup>[1,2]</sup>。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<sup>[3,4]</sup>。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<sup>[5,6]</sup>。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<sup>[7]</sup>。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できると思われる。

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。本稿では, 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, 先ず簡易なモデルにより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シミュレーションを行った。立方晶モデルを用いて、柱状晶の境界での反射（散乱）の再現性について評価し<sup>[8]</sup>、また、溶融境界が平らなモデルと波状なモデルにおいて溶融境界部での反射（散乱）を評価した<sup>[9]</sup>。

## 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<sup>[10,11]</sup>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<sup>[10]</sup>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<sup>[11]</sup>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す。

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、 $\lambda$ は熱伝導率、 $C_p$ は比熱、 $\rho$ 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、 $\Delta T$ 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、 $ns_l$ は固液界面の増減、 $nss$ は結晶粒界面の増減、 $\sigma_{sl}$ は固液界面

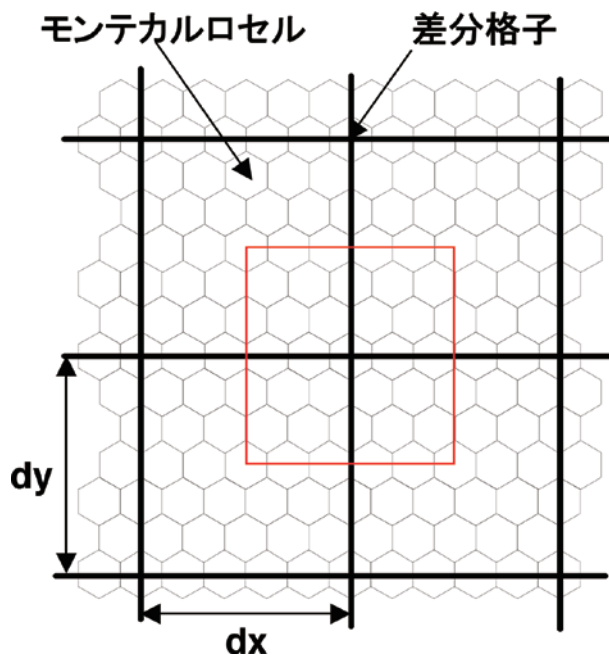


図1 差分格子とモンテカルロセル

エネルギー、 $\sigma_{ss}$ は粒界エネルギー、 $\delta$ はセルの厚さ、 $\Delta H_f$ は潜熱、 $T_m$ は融点である。

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

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

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

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である。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<sup>[5,6]</sup>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 $\theta$ ）は $0 \sim 180^\circ$ の範囲とな

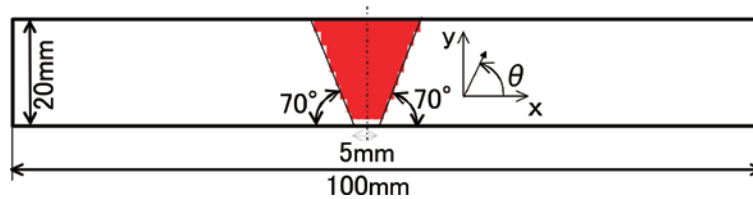


図2 2次元凝固シミュレーションモデル

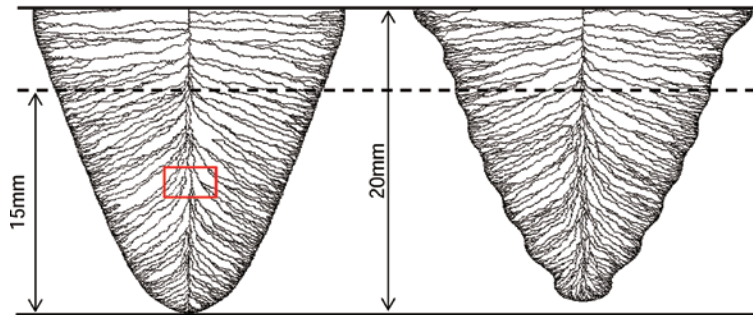


図3 凝固シミュレーション結果 [8,9]

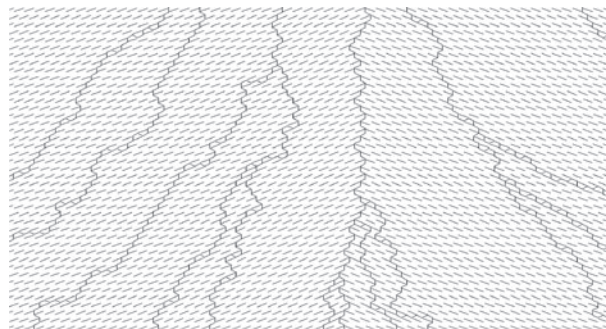


図4 結晶方位予測結果 (図3中の四角内の拡大図)

るので、熱流方向に応じて0～1800のセル番号(ID)を与えた。従って、セル番号/10がそのセルの<100>方向(熱流方向)となる。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た。従って、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2次元モデル(100×20mm)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シミュレーションへのモデル化への第一歩として、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250μm、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50μm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結果を示す。溶融境界が平らなモデルと実際に近い波状のモデルの2モデルに対して凝固シミュレーションを行った。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、柱状晶の成長方向が実溶接部とは大きく異なる。これは、今回のシミュレーションにおいて入熱を一括で与えたためと考えられる。また、図4に柱状晶の成長方向の結晶方位の予測結果を示す。図中の線の方向が<100>方向を示している。柱状晶の方位は成長開始時の熱流方向を<100>方向と

表1 弾性定数 (GPa) [4]

Crystal model	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{66}$
Cubic	216	145			129	
Hexagonal	263	98	145	216	129	82.5

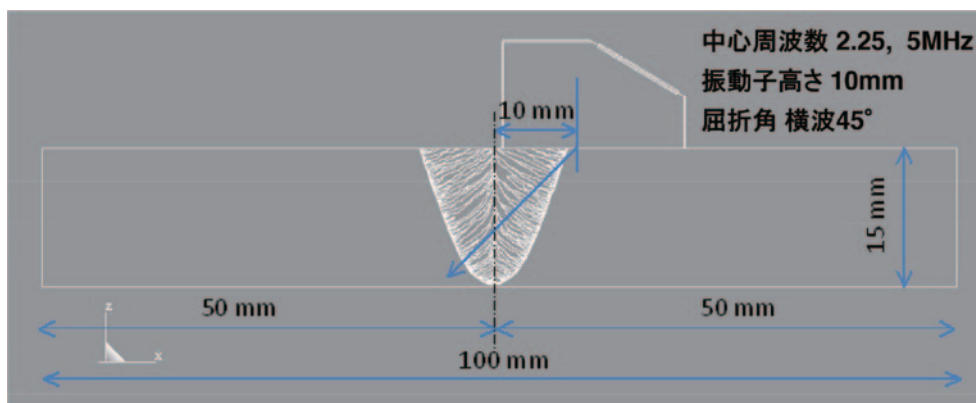


図5 UTシミュレーションモデル

定義しており、柱状晶は曲がって成長しているため溶接金属部中央では成長方向と  $\langle 100 \rangle$  方向は必ずしも一致していない。今後、各溶接パスを模擬することによって、柱状晶組織の予測精度を向上させることができると考えられる。

### 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 ( $\langle 100 \rangle$  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 5 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。

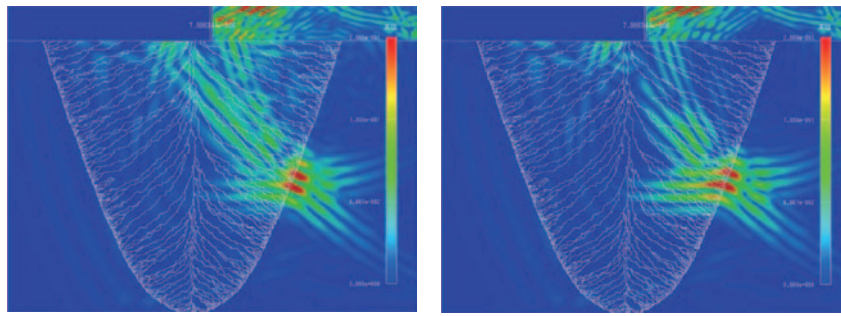
溶融境界が平らなモデルに対して、柱状晶の結晶

構造を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<sup>[4]</sup>を用いた。表 1 に各モデルの弾性定数を示す。超音波は、横波 45°、中心周波数 2.25MHz とした。また、溶融境界が波状のモデルに対しては、横波 45°、中心周波数 5MHz 結晶構造は立方晶モデルとして UT シミュレーションを行った。

図 6 及び図 7 に溶融境界が平らなモデルの UT シミュレーション結果を示す。図 6 は超音波入射後 3  $\mu\text{s}$  後の波面、図 7 は超音波入射後 5  $\mu\text{s}$  後の波面を示している。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、立方晶モデルを用いることにより各々の柱状晶の境界等での反射 (散乱) や減衰を再現できるものと考えられる。

図 8 に溶融境界が波状モデルの UT シミュレーション結果を示す。図 8 は超音波の伝搬の様子を示す波面である。溶融境界で超音波が反射し、探触子方向に戻っている様子が確認できる。溶融境界の形状を考慮することにより溶融境界での反射 (散乱) が再現可能であることが示唆された。



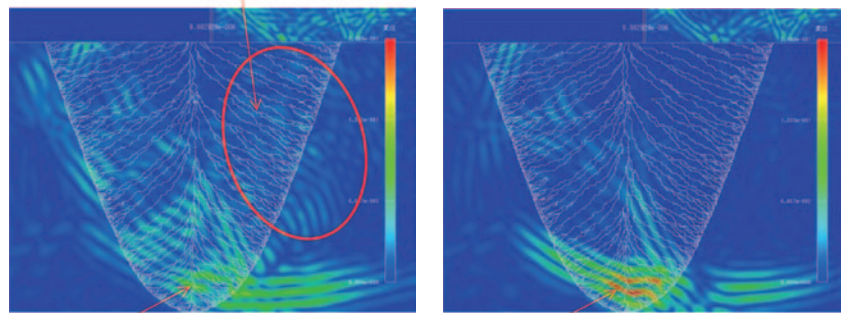


(a)立方晶モデル

(b) 六方晶モデル

図6 UT シミュレーション結果（横波2.25MHz の送信後3 $\mu$ s の波面） [8]

境界部や柱状晶での反射（散乱）が再現



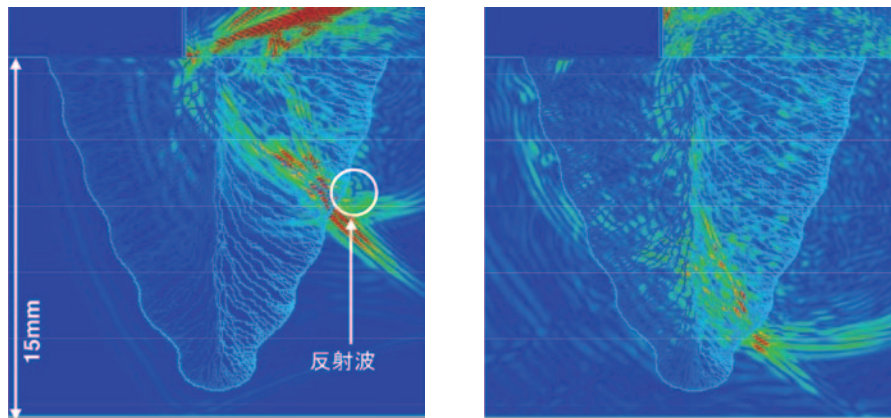
減衰が再現

(a) 立方晶モデル

減衰小

(b) 六方晶モデル

図7 UTシミュレーション結果（横波2.25MHzの送信後5 $\mu$ sの波面） [8]



(a) 送信後7.0 $\mu$ s の波面

(b) 送信後8.7 $\mu$ s の波面

図8 溶融境界が波状の場合のシミュレーション結果（横波5MHz） [9]

#### 4 おわりに

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柱状晶境界や溶融境界からの反射（散乱）が再現できる可能性が示唆された。また、溶融境界形状を模擬することによ

り溶融境界からの反射（散乱）に溶融境界の形状が影響することが示唆された。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できると考えられる。

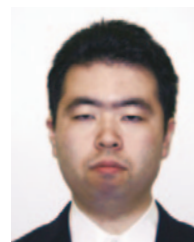
今後、柱状晶組織の予測精度を向上させることによって、UT シミュレーションの精度向上を図ることができると考えられる。

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] 水野, 古川, “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”, 第21回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 平成26年1月, p.185
- [9] 水野, 古川, “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のモデル化及びその妥当性検証”, 日本非破壊検査協会平成26年度春季講演大会講演概要集, 平成26年6月, p.19
- [10] 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
- [11] 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



水野亮二



上山芳教



古川 敬

# 配管エルボ部での欠陥検出性向上のための ガイド波伝搬シミュレーションの活用

Utilization of numerical simulation of guided wave propagation for enhancement of defect detection at an elbow in 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

Guided wave inspection offers an efficient screening method to detect wall thinning of piping because of its long inspection range and ability to inspect pipes with limited access (covered with insulation, buried, etc.) However, while interpretation of guided wave signals is relatively simple for a straight pipe, it becomes much more difficult when the wave propagation path includes an elbow. Here we show the results of numerical simulation of guided waves that propagate along piping including an elbow. These results indicate that the frequency of transmitted guided waves changes the locations of high-amplitude regions in the amplitude distribution of displacement on the outer surface of an elbow. Because a high-amplitude region is considered to be a defect-sensitive region, defect detection at an elbow can be improved based on information obtained by numerical simulation of guided wave propagation.

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

## 1 はじめに

ガイド波を利用した非破壊検査では、長距離にわたる検査が可能であり、また、これにより対象部位から離れた場所からも検査が可能であることから、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でき、配管のスクリーニング検査の手法として期待されている<sup>[1-3]</sup>。ただし、ガイド波検査における反射波の解釈は、配管の直管部に関しては比較的単純であるが、ガイド波の伝搬経路にエルボが含まれる場合は非常に複雑になる。一方で、液滴衝撃エロージョン (LDI) や流れ加速型腐食 (FAC) などの配管減肉はエルボ周辺で生じることが多く、配管の検査ではエルボ部の欠陥を見つけれることが求められる。著者らは、エルボを含む配管でのガイド波の伝搬特性に関する数値シミュレーション結果<sup>[4, 5]</sup>を背景として、実験においてガイド波検査によるエルボ部の欠陥の検出感度が欠陥の位置によって大きく異なっており、この検出感度の欠陥位置に対する大小関係と数値シミュレー

ションで得られたエルボ部におけるガイド波による表面変位の位置に対する大小関係が対応していることを示し、また、これらの大小関係はガイド波の周波数によって変化することを示した<sup>[6, 7]</sup>。

本稿では、エルボ部におけるガイド波による表面変位の大きさの分布がガイド波の周波数によってどのように変わるかを示した数値シミュレーションを紹介し、この結果をエルボ部の欠陥検出性の向上に利用する方法について論じる。

## 2 計算モデル

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. 6 を使用した。ComWAVE では、計算モデルを立方体形状のボクセル要素のみで構成し、時間に関しては 2 次の中心差分により陽解法で解く有限要素法によって波動の伝搬を動的に計算し波面の伝搬状況や探傷の波形等の予測を行う。

図 1 に計算モデルの構成を示す。文献 [6] の実験



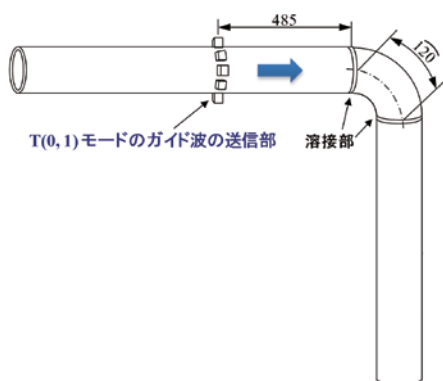


図1 計算モデルの構成

に合わせて、配管の直管部はアルミニウム合金製の50A Sch40 (外径 60.5 mm, 肉厚 3.9 mm), エルボ部は JIS B 2313 に準拠したロングエルボのモデルとしている。これにより、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/m<sup>3</sup> 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、エルボの入口から 485 mm の位置に配置した。送信部から基本ねじりモード T(0, 1) のガイド波を発生させるために 8 個の振動ブロックを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。このシミュレーションでは、エルボ部におけるガイド波による表面変位の大きさの分布を確認することを目的としているため、受信部は省略した。

計算モデルの作成では、基本図形を組み合わせて計算モデルを作成する ComWAVE の機能を活用し、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。また、エルボの両端にある溶接部を再現するために、配管内外面の裏波及び余盛部をそれぞれトーラスにより模擬した。モデルを構成するボクセル要素の大きさは一辺 0.5 mm とした。

図 2 は、メッシュを表示した画像である。管壁以外の領域にはメッシュはあるものの物性値を定義していない。ComWAVE には物性値が与えられていない領域の計算を省略する機能があるため、この機能を利用して超音波伝搬の計算に必要なメモリ使用量を減らすとともに計算時間も削減した。本稿で紹介する規模の計算を CPU が Intel Xeon X5660 (2.8 GHz, 6 コア), メインメモリが 32 GB のパソコンにおいて CPU の 4 コアで並列計算すると、計算時間は数時間程度であった。

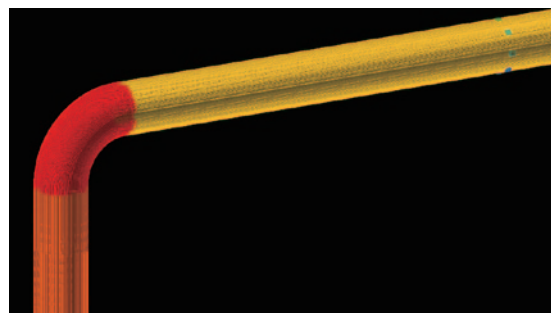


図2 計算モデル

### 3 シミュレーション結果

時間に関して陽解法を利用した有限要素法では、物理値を時間ステップごとに計算するため、超音波が伝搬する媒質の変位の過渡変化を得ることができる。図 3 (a) は、ガイド波の波束がエルボを通過するときの三つの時刻における配管の表面変位の分布を並べたものである。最初の直管部では波束は配管の軸に関して対称に伝搬しているが、エルボ部に達すると配管の同一周上の超音波の伝搬経路が均一でなくなるため、整っていた波束の変位分布が乱れ始める。図 3 (b) は、変位が大きくなる場所を 1 枚の画像で確認するために、各点における全時刻を通しての最大変位を分布で表示したものである。

図 4 は、入力信号の中心周波数を 30 kHz, 40 kHz, 50 kHz とした場合の経過時間 250  $\mu$ s におけるエルボ部の表面変位分布である。30 kHz ではエルボの腹側の変位が大きいものに対して、40 kHz と 50 kHz ではエルボの背側の変位が大きいのが確認できる。図 5 は、同じく 3 周波数に対する各点での全時刻を通しての最大変位の分布である。ここでは、入力信号の最大値 1 に対して、カラーマップの最大値を 1.55, 色を表示させるしきい値を 0.7 としている。最大変位の分布においても上記の経過時間ごとの表面変位分布と同様の傾向が確認できる。これは、エルボの形状とガイド波の波長の関係から生じるもので、ガイド波の波長が変わることで超音波の干渉によって強めあう位置と弱めあう位置が変わることが原因と考えられる。よって、ガイド波の周波数が同じでも、配管やエルボの寸法が変わればエルボ部で変位が大きくなる位置は異なってくる。

前述の通り、この数値シミュレーションは実際に行われた実験に対応させており、この実験結果とシ

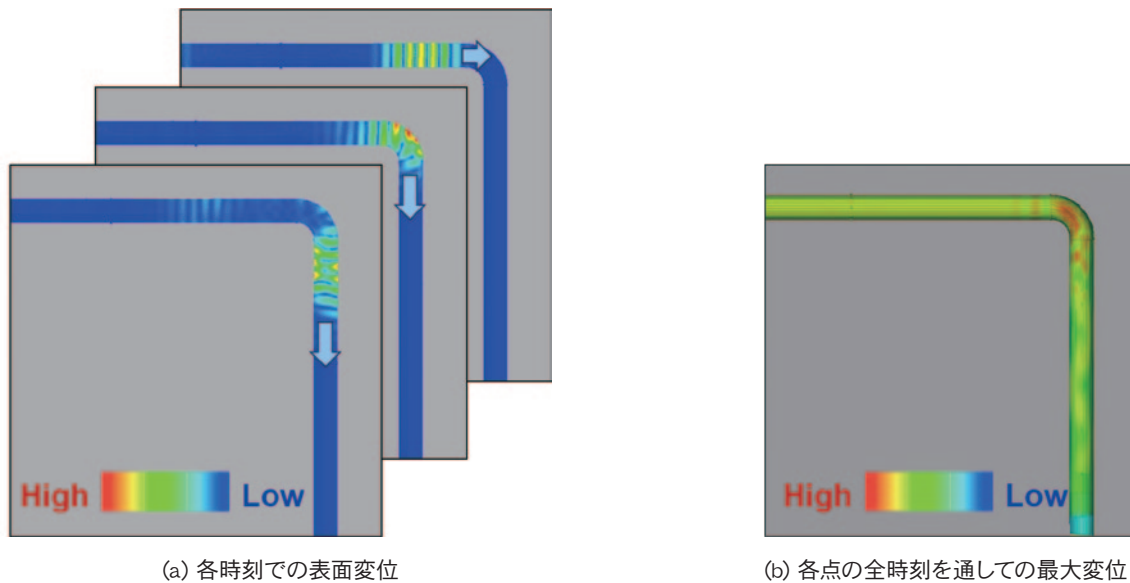


図3 シミュレーションにより得られた変位分布

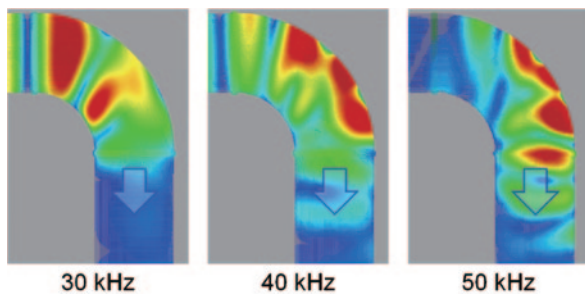


図4 経過時間250  $\mu$ sにおける表面変位分布

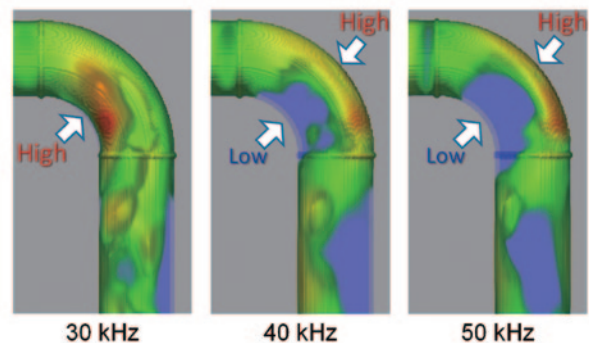


図5 各点での全時刻を通しての最大変位の分布

シミュレーション結果を比較した結果、シミュレーションによってエルボ部で高い変位が得られる場所では、ガイド波検査による欠陥検出感度が高くなることが確認された<sup>[6, 7]</sup>。これは、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ものと考えられる。これを踏まえると、図5の結果から、このエルボを含む配管では40 kHzまたは50 kHzのガイド波のみを使って検査を行った場合、エルボの腹側の欠陥を見落とす恐れがあることがわかる。より一般的に言えば、エルボを含む配管に対して1周波数のみのガイド波で検査を行うと、エルボ部においてガイド波による変位が小さくなる場所で欠陥を見逃すことが懸念される。よって、エルボを含む配管のガイド波検査では、複数の周波数を使用

することが望ましく、単一の周波数のみを使用するときには、例えば図5の30 kHzの場合のように極端に変位が小さい場所ができない周波数を使用するといった条件を選定することが重要といえる。検査する対象に対応するモデルでシミュレーションを行えば、どの位置で欠陥の検出感度が高くなるのかを確認でき、特定の場所で欠陥検出感度を高めるために適切な周波数を見つけることができる。さらに、この関係を逆に利用すれば、ガイド波検査でエルボ部の欠陥が検出されたとき、使用したガイド波の周波数と欠陥からの反射波の振幅を基にその欠陥がエルボの腹側にあるのか背側にあるのかなどを推定する手段になるといえる。

## 4 おわりに

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を紹介し、エルボ部におけるガイド波による表面変位の大きさの分布がガイド波の周波数によって大きく変動することを示した。この表面変位の大きさは、その位置に欠陥があったときの欠陥検出感度に対応するため、シミュレーションの結果を利用すれば、着目している箇所の欠陥検出感度が高くなる周波数を見つけることができ、ガイド波検査を行うのに適切な周波数を求めることができる。

ここではエルボを含む配管について取り上げたが、これらのことは他の形状でも成り立つと考えられ、ガイド波検査を複雑な形状の構造物に適用する際に、対応するガイド波の伝搬シミュレーションの結果を活用することにより複雑形状部での欠陥検出能力を向上させることができると期待できる。

### 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] 古川敬, 西野秀郎, ねじりモードガイド波によるエルボ通過後の欠陥反射のシミュレーション, 溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー, Vol. 8, pp. 9-14, 2012.
- [5] 古川敬, 山本敏弘, 金原了二, 池田隆, ねじりモードガイド波を用いたエルボ越え探傷への挑戦, 溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー, Vol. 9, pp. 11-16, 2013.
- [6] 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 Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, pp. 75-76, 2013.
- [7] 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



# パルス渦電流試験法による 局部減肉評価

## Pulsed Eddy Current Characterization of Local Wall-Thinning

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英

Local wall-thinning is thinning relative to 'thinning over an entire surface', referring specially to thinning in an area comparable or smaller than the excitation coil's footprint in pulsed eddy current testing (PECT). FEM simulation on local wall-thinning showed that the PECT signal's decay coefficient is a function of both thinning area and thinning depth, making it impossible to characterize a local wall-thinning by only applying the decay-coefficient vs. thinning depth relation, which is effective in characterizing 'thinning over an entire surface'. In this study, a two-step algorithm was established to characterize local wall-thinning: obtaining the thinning area first and acquiring the thinning depth thereafter. The concept of 'point spread function (PSF)' was adopted and the PSF corresponding to a 'point thinning' was obtained by curve fitting and extrapolation operation. The thinning area was attained from deconvolution operation, and the thinning depth was estimated after thinning area.

**Keywords** Pulsed Eddy Current Testing, Local wall-thinning, Deconvolution

### 1 はじめに

先行研究により得られた知見である“パルス渦電流試験法では時間に伴い変化する信号に被検体肉厚方向各層の情報が現れ、信号解析することにより肉厚方向各層の情報が得られる”を活用して、対数スケールの磁束密度信号の減衰係数と肉厚との相関性に着目し、事前に用意した減衰係数と肉厚の関係を表すマスターカーブにより、同じ測定条件で測定したパルス渦電流試験信号から肉厚評価の可能を既報で提案した<sup>[1]</sup>。この方法は、被検体の厚さ評価や、全面減肉、あるいは、減肉範囲が励磁コイルのフットプリントより十分大きな全面減肉相当の減肉深さ評価に適用可能と考えられる。

しかし現場で発生する減肉は、範囲が十分大きくはない局部減肉であることが多く、また、特に初期段階の減肉において、減肉範囲が励磁コイルのフットプリントより小さいケースは多い。このような局部減肉の信号は減肉深さのみならず、減肉範囲にも影響されるため、板厚あるいは全面減肉の評価に有

効な減衰係数と肉厚の関係を示すマスターカーブが直接に適用できなくなる。局部減肉を評価するためには、減肉深さと減肉範囲両方を評価することが必要である。

局部減肉を評価するためには、フットプリントを小さくする検討も解決方法の一つではあるが、本報では減肉深さと範囲の両方を評価する局部減肉評価法について検討した。

### 2 局部減肉のパルス渦電流試験信号

Fig.1は板金と保温材に覆われ、裏面に深さD、半径Rの円盤状の局部減肉が存在する板厚Tの被検体である。励磁コイル底面中心に配置した磁気センサーで、励磁電流が遮断した後の磁束密度を計測する。

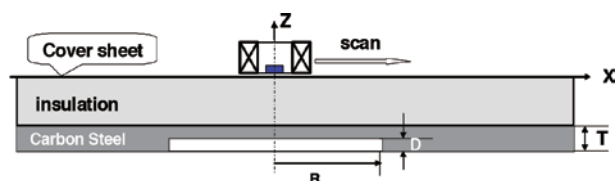


Fig.1 Local thinning and scan.

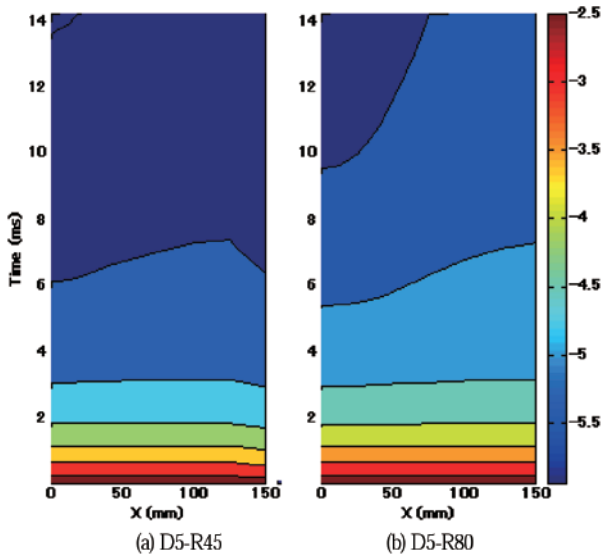


Fig.2 Logarithmic scaled PECT signals in B-scan. (the numbers in color bar are in  $\log_{10}(\text{Volt.})$ )

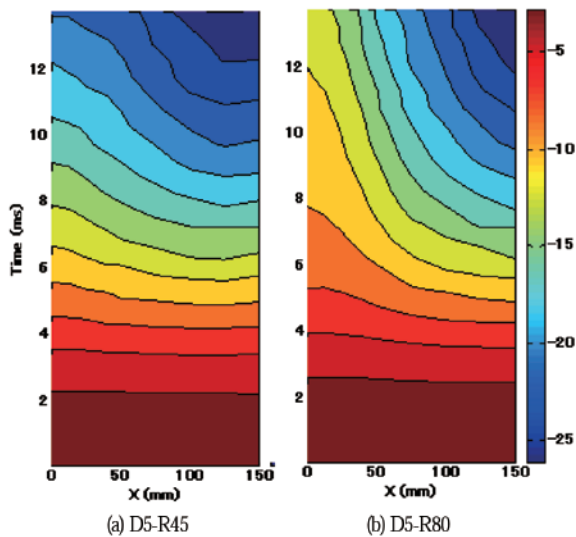


Fig.3 PECT decay coefficients in B-scan. (the numbers in color bar are in  $\text{second}/\log_{10}(\text{Volt.})$ )

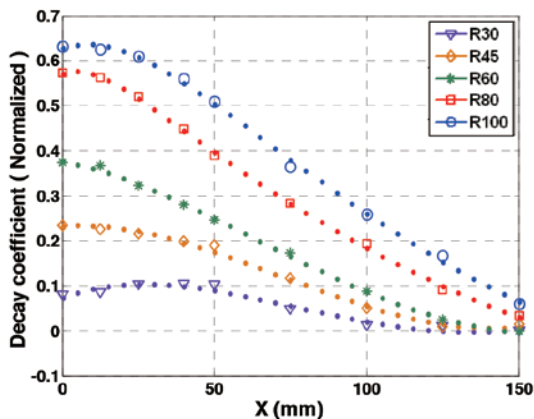


Fig.4 Decay coefficient against scan position.

パルス渦電流プローブの走査により、位置ごとに変化するパルス渦電流試験信号を得ることができる。

有限要素法を用いてプローブが円盤状局部減肉の中心から半径方向に走査するときの各走査点のパルス渦電流信号を解析し、シミュレーション解析で局部減肉評価方法を検討した。この解析に当たって、板金は厚さ 0.5mm のアルミ合金（導電率 38MS/ m, 比透磁率 1）、保温材厚さ 40mm、被検体は局部減肉を有する 10mm 厚の炭素鋼板（導電率 4.3MS/ m, 比透磁率 250）である。減肉がそれぞれ半径 45mm と 80mm の円盤範囲に発生し、減肉深さは 5mm である（それぞれを D5-R45 と D5-R80 で記述する）。小フットプリントの Double-coil 型の励磁コイルの Inner と Outer コイルの幅はともに 30mm、平均半径はそれぞれ 45mm と 77mm であり、励磁強度はそれぞれ 300AT と 99AT である。

シミュレーション解析結果を用いて、B-Scan の形で走査位置ごとに時間とともに変化するパルス渦電流信号を Fig.2 に表示する。横軸は走査位置を表し（円盤状減肉の中心を  $X=0$  とする）、縦軸は励磁電流が遮断する時点をと  $t=0$  とした時間経過波形の振幅を表す。また、この時間とともに変化する信号を用いて、 $dt/d(\log_{10}(S))$  で減衰係数を計算し、その B-Scan を Fig.3 に表示する。走査点ごとのパルス渦電流信号は時間とともに変化する、減衰係数も時間的に変化する。板金と保温材を有する構造の被検体の肉厚に関する情報が減衰しつつ信号のより後期に表すことに基づいて、励磁電流が遮断された後 13ms と 14ms の対数スケール信号の差をとり、減衰係数を計算し、Fig.4 にプロットした。なお、この係数は健全な 10mm 炭素鋼板の減衰係数を 0 として正規化した。Fig.4 から以下のことがいえる：

- ・一般的に、プローブが減肉の中心である  $X=0$  に位置するときの減衰係数が最も大きい。
- ・同じ深さの減肉に対して、減肉範囲が大きいほど、減衰係数は大きい。
- ・減肉量（減肉深さと減肉範囲）と減肉係数～位置曲線の対応関係がある。逆に、減肉係数～位置の曲線により局部減肉の減肉量を推定可能と考えられる。

簡略化のため、これから減肉係数信号を「信号」で記述する。

### 3 ConvolutionとDeconvolutionによる局部減肉評価

減肉が半径 R の範囲内に発生すると仮定すると、信号 S は減肉深さ D と減肉範囲を表す半径 R の関数である、すなわち、 $S = S(D, R)$ 。局部減肉評価は信号 S から D と R を求めることである。D と R がともに不定のため、逆問題の解を求めるのは容易ではない。ここでは、減肉範囲を推定してから減肉深さ D を求める二段階の局部減肉評価法を検討した。

#### 3.1 パルス渦電流信号の点広がり関数

点広がり関数 (point spread function, PSF) は画像処理などに良く使われる概念であり、渦電流信号を画像化する ECT Image や ECT (Eddy Current Testing) 信号復元などにも使われている<sup>[2,3]</sup>。点広がり関数のソースである「点」は数学の  $\delta$  関数に相当し、減肉評価に当たる「ポイントソース」は「ポイント面積の減肉」、すなわち、半径が 0 に近い範囲における減肉に相当する。

当然のことながら、半径が無限に小さい範囲における減肉のパルス渦電流信号の計算は不可能である。シミュレーション解析結果から得た減肉深さ 5mm、半径 30mm、45mm、60mm、80mm 及び 100mm の円状減肉信号から、カーブフィッティングと外挿により、半径が 0 に近い「ポイント減肉」の信号を求めた。そのために、以下の式で Fig. 4 に示す各信号曲線を近似した。

$$O_i(R, x) = p_2(R) + p_1(R)x + p_5(R)x^2 - p_3(R) \times e^{-p_4(R)x} \quad (1)$$

ここで、 $(i=1 \sim 5)$  はフィッティング係数であり、R は円盤状減肉の範囲を表す減肉半径、x はプローブの位置を表す。なお、円盤状減肉の中心を  $x=0$  としている。

内挿と外挿演算により、減肉深さ 5mm、半径 R=0 から R=100 までの円状局部減肉の走査信号が得られる。Fig.5 はそれらの信号である。その R=0 に該当する減肉信号を 2次元に拡張したものを Fig.6 に示す。すなわち、Fig.6 に示したのは今回の研究対象と使われたプローブに準ずる点広がり関数である。

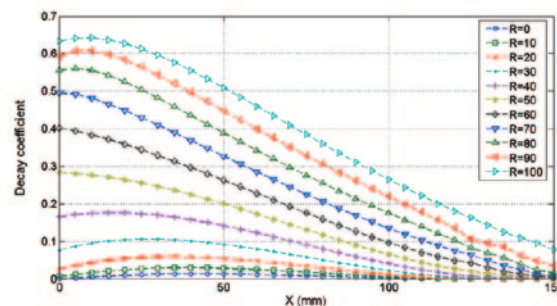


Fig.5 Decay-coefficient curves of thinning in areas of radius from R=0 to R=100mm.

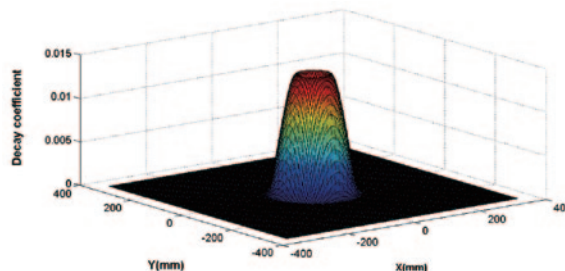


Fig.6 Two dimensional point spread function of PECT

#### 3.2 Convolutionによるパルス渦電流信号の計算

理想的に、点広がり関数と減肉のプロファイルがあれば、その減肉に該当する信号は以下の Convolution 操作で得られる。

$$O(r) = T(r) \otimes H(r) \quad (2)$$

ここで、 $\otimes$  は Convolution 操作、 $r$  は空間座標、 $T(r)$  は減肉関数、 $H(r)$  は点広がり関数、 $O(r)$  は出力信号である。

式 (2) に示す Convolution 操作を行い、深さ 5mm、半径 R=10mm から R=100 mm の円盤状局部減肉のパルス渦電流試験信号を求めた。Fig.7 には、D=5mm、R=80mm の局部減肉の有限要素法解析信号と Convolution 法で得られた信号を示す。この二つの信号は良く一致しており、Convolution 法によるパルス渦電流信号計算の有効性を示した。

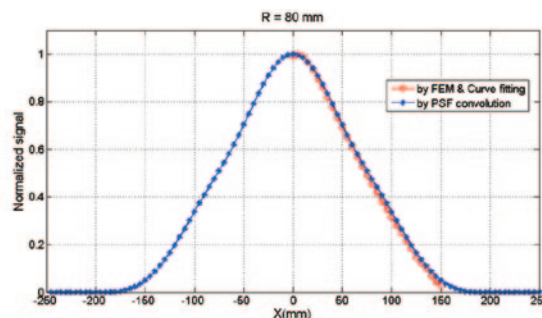


Fig.7 Comparison of decay-coefficient signal of local thinning D5-R80, calculated by FEM and PSF convolution.



### 3.3 Deconvolution操作及び減肉範囲の推定

減肉関数  $T(r)$  は、Convolution 計算の逆演算、Deconvolution 操作によって得られる：

$$T(r) = O(r) ./ H(r) \quad (3)$$

ここでは、Fig.5 に示すパルス渦電流試験信号を用いて、Deconvolution 操作で減肉プロファイルを求める。その結果の一つを Fig.8 に示す。Fig.8 (a) は一次元のパルス渦電流信号、(b) は (a) に示す信号と Fig. 6 に示す点広がり関数を用いた deconvolution 演算で得られた減肉関数の一次元表

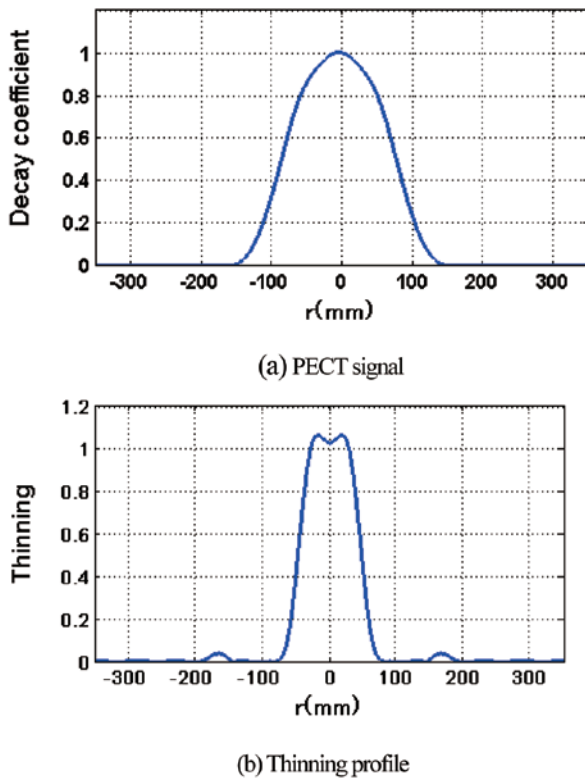


Fig.8 PECT signal of D5-R50 thinning, and the thinning profile obtained by deconvolution operation ( in 1-D).

現である。(b)において、縦軸の Thinning の値の 0 が減肉なし、1 が 5mm 深さ減肉を表す。(a)に示したようなパルス渦電流信号が半径 150mm ぐらいに広がることに對し、Thinning の値が 0 以上になるのは半径 70mm ぐらいに留まる。Aliasing 効果などを考慮し、Thinning の値を 0.5 以上の範囲を減肉範囲にすると、減肉が半径約 50mm の範囲に発生すると推定できた。これは実際の減肉範囲とよく一致している。従って、Deconvolution 操作により減肉範囲を推定できることを確認できた。

減肉の範囲が推定できるならば、そこそこのマスターカーブから、減肉深さを推定できると考えられる。

## 4 おわりに

局部減肉における減肉量を評価するために、二段階に分けた定量評価法を提案した：まず、Deconvolution 法によって減肉範囲を同定し、次に、それぞれの減肉深さと減肉係数関係を基に減肉深さを同定する。シミュレーション解析でこの方法の局部減肉評価への有効性を確認した。

### 参考文献

- [1] W. Cheng: Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding, J Nondestructive Eval, 31(3), 2012
- [2] W. Cheng and K. Miya: Reconstruction of parallel cracks by ECT, Intl. J. Appl. Electromagnetics and Mechanics, 14(2001/2002) 495-502.
- [3] T.W. Guttinger, K.Grotz and H.Wezel, Eddy Current Imaging, Material Evaluation, April, 1993



程 衛英

# ニッケル基合金溶接金属の 残留応力測定を試み

Trying of residual stress measurement on nickel base alloy weld metal

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡, 山本敏弘, 古川敬

Because stress corrosion cracking (SCC) has been found in nickel-base alloy weld metal used for important components of nuclear power plants, it is required to establish a method to measure residual stress in nickel-base alloy weld metal. When it is considered to use the X-ray diffraction method for this purpose, the  $2\theta$ - $\sin^2\psi$  method is inadequate. Then, we evaluated the applicability of the  $\cos\alpha$  method using a two-dimensional X-ray detector to measurement of residual stress. As a result, it turned out to be difficult to calculate residual stress by this method because the resulting diffraction image became an aggregation of spots that extends in the radial direction and the Debye-Scherrer ring was not formed. We also conducted tensile tests to obtain the correlation between the strain and the eddy current testing (ECT) signal due to the strain. To verify this result, the strain distribution of a weld joint specimen was estimated based on the calibration line derived from this correlation. Whereas appropriate strain values were obtained in the center region of the weld metal, the values obtained in the fusion boundary region became abnormal values. This is considered to be caused by the change of permeability and conductivity of the material due to the difference of the base material dilution.

**Keywords** *nickel base alloy weld metal, residual stress measurement, X-ray diffraction method,  $\cos\alpha$  method, ECT*

## 1 はじめに

原子力発電プラントの炉容器等の重要機器に用いられるニッケル基合金溶接金属において、定期検査で応力腐食割れ(SCC)が検出されている。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を予防する観点から残留応力の大きさを把握することが重要になる。残留応力の測定方法は、応力弛緩法、固有ひずみ法、DHD法、X線回折法、中性子線回折法等があり、このうちX線回折法は表面残留応力を非破壊で測定できることから現場での適用が期待されている。しかし、ニッケル基合金の溶接金属は結晶粒の大きさが母材と比較して粗大で、かつ結晶方位が $\langle 100 \rangle$ に優先配向するためにX線のピークを検出するのが困難となり、X線回折法による残留応力測定を難しくしていた。

X線回折法では、表面近傍で回折したX線を零次元の検出器で捕らえて $2\theta$ - $\sin^2\psi$ 法<sup>1)</sup>により応力を求めるのが一般的である。一方で、1978年に二次元で測定したデバイシユラー環全体から応力を算出

する $\cos\alpha$ 法<sup>2)</sup>が提案され、1993年にはイメージングプレートによる二次元検出器を用いた測定が行われている<sup>3)</sup>。そして、現在では現場で適用できる装置で $\cos\alpha$ 法を用いた測定が行われている<sup>4)</sup>。このような二次元検出器を用いた測定では、零次元の検出器では検出困難な粗大結晶粒の回折ピークを検出することができることから、残留応力を測定できる可能性がある。そこで、本研究ではニッケル基合金溶接金属に対して $\cos\alpha$ 法による応力算出の可能性を検討した。さらに、渦流探傷試験(ECT)で検査を行いながら残留応力や歪みの把握の可能性を調査するため、ECT信号の測定も行った。

## 2 二次元検出器を用いたX線回折法による測定

板厚 32 mm の炭素鋼板上にニッケル基合金溶接金属の一つである 82 合金を電流 170 A、電圧 10.5 V、溶接速度 1.5 mm/s、ワイヤ送給速度 0.19 g/s でティグ溶接し、厚さ 13 mm の肉盛溶接金属を作製した。そして、肉盛溶接金属の最終層近傍から板厚 3 mm、幅 35 mm、長さ 60 mm の平板試験片を採取し、

表1 供試材料の化学成分 (mass%)

	$\psi_0=0^\circ$	$\psi_0=25.2^\circ$
X線源	Mn	
回折面	Ni, 311	
管電流	30 mA	
管電圧	20 kV	
照射面積	$\phi$ 2.7mm	$\phi$ 3.0mm
測定時間	5 min	10 min

評価面の機械加工層を除去するため電解研磨を施した。表1にX線の測定条件を、図1に測定状況を示す。イメージングプレート (IP) の中央から入射したX線が試験片で回折してIPにデバイシユラー環が映し出される。なお、デバイシユラー環の回折中心を求めるため、試験片表面にW粉末を塗布し、W (220) のデバイシユラー環を同時に測定した。

図2に外部からのひずみ負荷0の状態での $\psi_0=0^\circ$ のときの回折像を示す。溶接金属の回折像は多数のスポットになり、回折環は形成されなかった。そして、回折像の一部を拡大すると、半径方向に幅を持つスポットの集合体になっていた。cos $\alpha$ 法で残留応力を算出する場合、線状のデバイシユラー環になる必要がある。そのため、本回折像からcos $\alpha$ 法により応力を算出することは困難であることが示唆された。

このような半径方向に幅を持つスポットの集合体になる理由について以下に考察する。格子定数をd、回折角を $\theta$ 、波長を $\lambda$ としたとき、Braggの回折条件より

$$2d\sin\theta = n\lambda \dots\dots (1)$$

となる。ここで、nおよび $\lambda$ は一定値となり、半径方向に幅を持つということは $\theta$ が異なることを示しているため、結晶方位は同じであるが、dが異なる相が混在した金属組織になっていることが想定さ

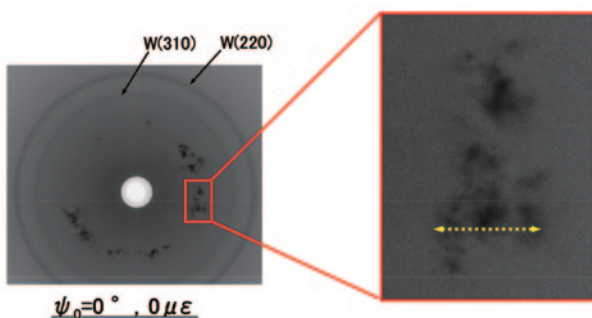


図2 二次元検出器の回折像

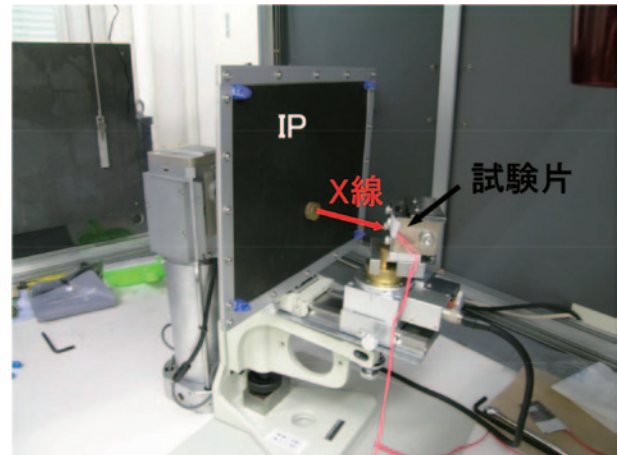


図1 二次元検出器を用いた測定状況

れる。本研究で用いたニッケル基合金溶接金属のように複数成分からなる溶接金属は凝固偏析が存在する。過去の研究<sup>5)</sup>より、今回用いた溶接金属と同じ成分系の溶接金属に対してEPMA分析を実施したところ、デンドライトコアに偏析する元素はNi, Cr, Fe、デンドライト境界に偏析する元素はNb, Ti, Mn, C, Si, P, Sであった。そのため、デンドライトコアとデンドライト境界は成分濃度が大きく異なるため、格子定数に違いが生じると考えられる。すなわち、一つの柱状晶内にdが異なるデンドライトコアとデンドライト境界が複数存在し、これらの結晶方位はほぼ同一であるため、回折像は半径方向に幅を持つスポットの集合体になったものと考えられる。

以上より、二次元検出器を用いたX線回折法でニッケル基合金溶接金属の残留応力測定を試みたが、半径方向に幅を持つスポットの集合体となり、cos $\alpha$ 法による残留応力の算出は困難であることが示唆された。しかし、X線回折で二点法により残留応力を測定した例<sup>6)</sup>があり、今後はこのような方法を考慮して測定方法を検討していくことが重要である。

### 3 ECT信号を用いた測定

ECT信号の測定では、ニッケル基合金の溶接試験体を製作し、溶接部から引張試験片を作製し、まず引張試験を行いながらECT信号を取得し、信号強度と引張特性との校正直線を得た。その後、ニッケル基合金溶接金属を有する異材溶接継手についてECT信号を取得し、校正直線から溶接金属の歪み分



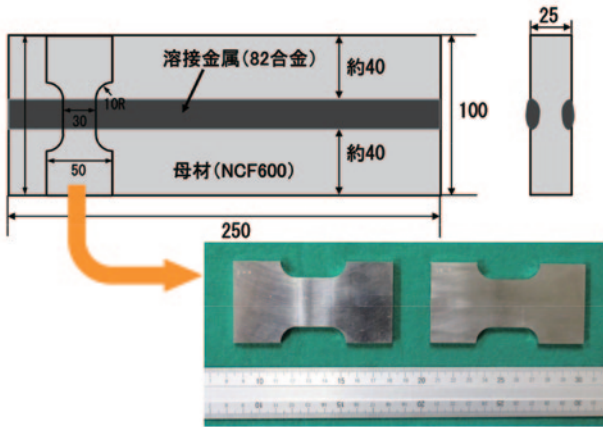


図3 ECT測定用の引張試験片

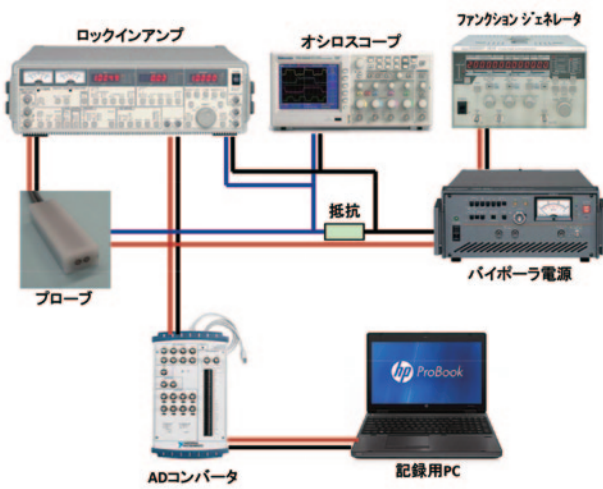


図4 ECT装置の構成

布を求めた。

図3に引張試験片の作製方法を示す。板厚25mmの板の両面に開先加工を施し、電流150-180A、電圧10V、溶接速度1.5mm/s、ワイヤ送給速度0.16-0.24g/sでティグ溶接を行った。なお、溶接材料はX線回折法による測定の検討で用いたのと同じ材料とした。そして、溶接直交方向から板厚5mmの引張試験片を採取した。

図4にECT計測装置の構成を示す。プローブを引張試験片に固定し、歪み速度 $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で引張ひずみを10%まで付与した。なお、ECT信号取得時の周波数は20kHzと100kHzを用いた。図5に各周波数の信号強度と応力または歪みとの関係を示す。20kHz、100kHzともに応力および歪みの増加に伴い信号強度が上昇した。しかし、応力については除荷後も信号強度は高いままであるのに対し、歪みについてはほぼ同じ変化を示していた。したがって、信号強度は応力よりも歪みと良い相関があると言える。ここで、100kHzにおける歪みと信号強度との関係から校正直線を得て、溶接試験体の測定を行った。

測定する溶接試験体は、母材がSUS316LとNCF600、溶接金属が82合金の異材溶接継手とした。

図6に溶接試験体の外観写真を示す。板厚20mm、

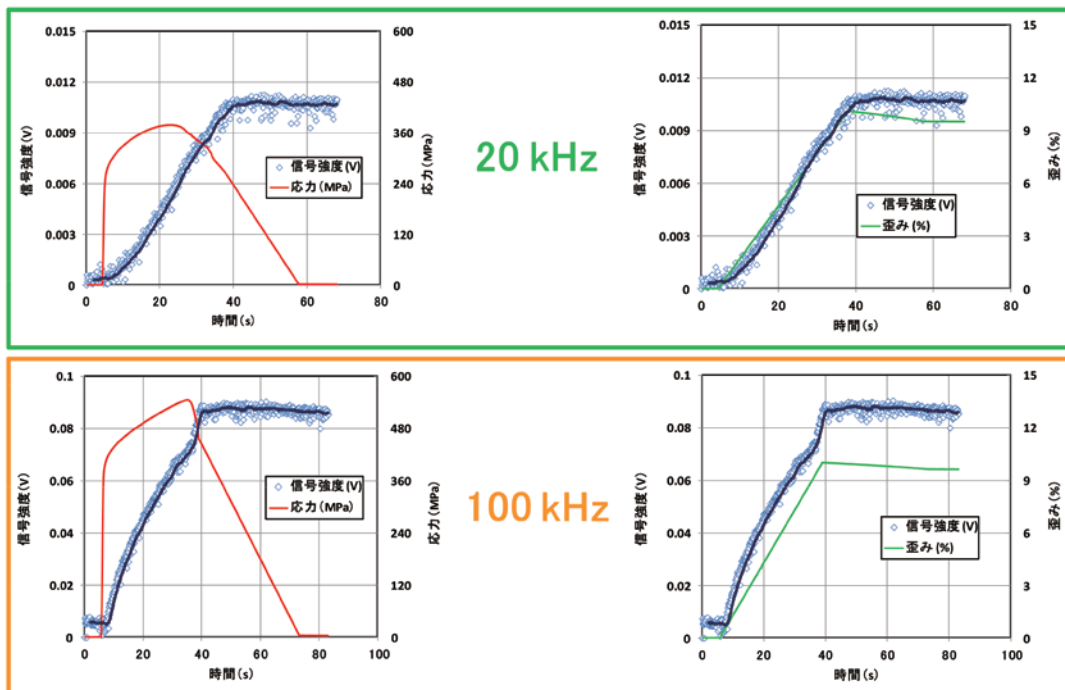


図5 信号強度と応力および歪みの関係

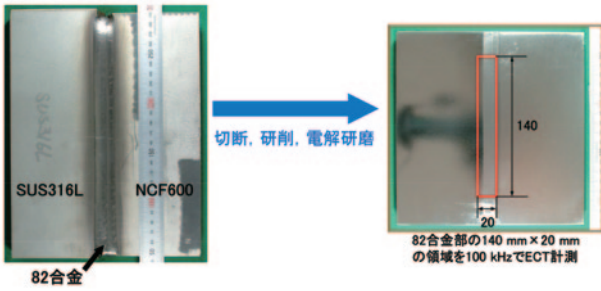


図6 ECT測定した溶接試験体の外観写真

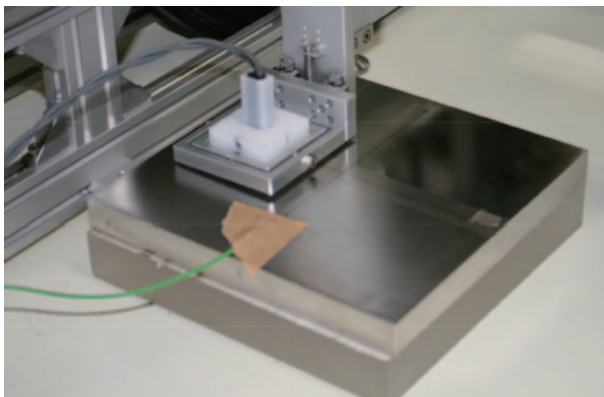


図7 ECTの測定状況

幅 200 mm, 長さ 200 mm とし, 使用した溶接材料と溶接条件は引張試験片と同じとした。図 7 に測定状況を示す。図 6 に示す溶接金属の 20 mm × 140 mm の領域について, ECT プローブをスキャナで走査させ, 周波数 100 kHz で信号を取得した。図 8 に信号強度の分布とそれを校正直線で歪み分布に変換した図を, 図 9 に溶接方向で平均化したひずみの分布を示す。なお, 信号強度が歪み 10% を超える場合は校正直線を延長した値を用いたことから, 図 9 で 10% を超える部分は白抜きで示している。溶接金属中央部は歪みが 3-5% であったが, SUS316L と NCF600 に近い部位でひずみが高くなる傾向を示した。これは, 母材の希釈を生じることで溶接金属中央部と比較して透磁率と導電率が異なることで高い歪みになったものと考えられ, 特に透磁率の変化が大きいものと推察される。したがって, 溶接金属中央部は ECT 信号を用いて歪みを評価できる可能性があるが, 材質が異なる部位は測定が困難であることが示唆された。

以上より, ニッケル基合金溶接金属の残留応力測定を試みたが,  $\cos \alpha$  法では半径方向に幅を持つス

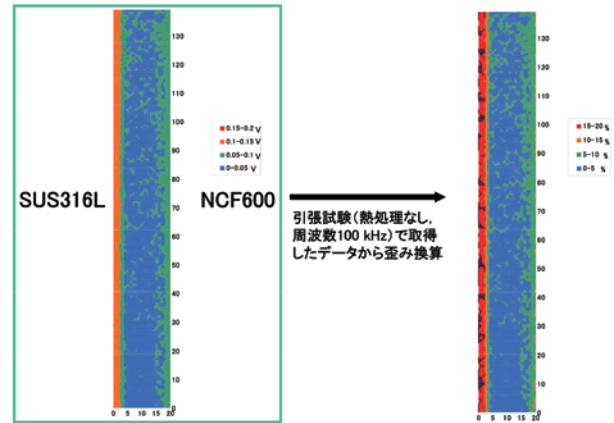


図8 ECTの測定結果および歪み分布

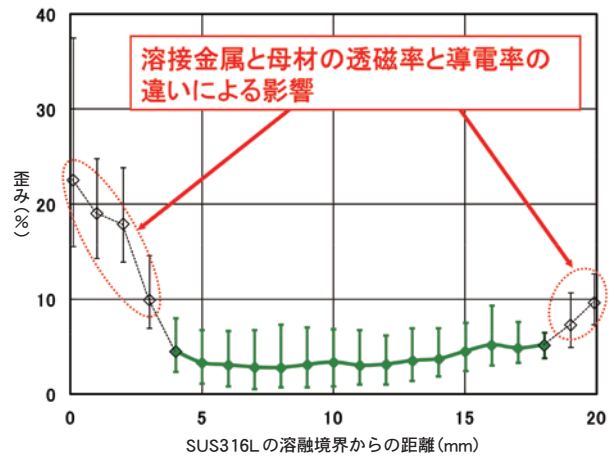


図9 溶接線方向で平均化した歪み分布

ポットの集合体が測定されたため残留応力の算出が困難であった。また, ECT を用いた測定では母材希釈等による材質の違いにより信号強度が大きく変化するため, ECT 信号を用いて評価する場合はこのような特性を理解して測定する必要がある。

#### 4 おわりに

- 1) 二次元検出器を用いた X 線回折法でニッケル基合金溶接金属の残留応力測定を試みたが, 半径方向に幅を持つスポットの集合体となり,  $\cos \alpha$  法による残留応力の算出が困難であった。
  - 2) ECT 信号は歪みと良い相関が見られた。溶接金属中央部は ECT 信号で歪みを評価できる可能性があるが, 母材希釈等で材質が異なる部位は歪みを適正に評価することが困難であった。
- なお, 本研究の二次元検出器を用いた X 線応力測

定においては新潟大学教育学部長 鈴木賢治博士の協力をいただいたので、ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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），（2002）。
- 2) 平修二，田中啓介，山崎利春：細束 X線応力測定の一方法とその疲労き裂伝ば問題への応用，材料，Vol.27（1978），251-256。
- 3) 吉岡靖夫，大谷眞一：イメージングプレートによる微小領域の X線応力測定，非破壊検査，Vol.42（1993），669-673。
- 4) 佐藤光，谷和彦，佐々木敏彦：SUS304 溶接部に対する IP 方式の  $\cos \alpha$  法 X線応力測定，第46回 X線材料強度に関するシンポジウム講演集，（2012）。
- 5) 西川聡：ニッケル基 600 合金溶接部の高温高圧純水中における応力腐食割れ特性と超音波探傷による割れ検出性の向上，大阪大学工学博士論文（2010），43-44。
- 6) 秋田貢一，吉岡靖夫，佐野雄二，小川和夫，久保達也，小畑稔，田中寛大：Ni 基合金溶接金属の X線残留応力測定，材料，Vol.54（2005），710-716。



西川 聡



山本敏弘



古川 敬



# 原子炉容器鋼テンパービード補修溶接部の低温割れ及びじん性

Cold cracking and toughness of temperbead repair weld for reactor vessel steel

溶接・非破壊検査技術センター 水野亮二

Temper bead welding is applied as one of repair methods for reactor vessels made of low alloy steel. Cold cracking susceptibility and toughness of the weld was evaluated. Though maximum hardness in the heat affected zone with Ni-based alloy welding materials was more than 350HV1, cold cracking didn't occur. Toughness of coarse-grained heat-affected zone(CGHAZ) and thermal aged at about 300°C was degraded, but that of intercritically reheated CGHAZ(ICCGHAZ) was improved. In temper bead welding using Ni-based alloy welding material, it was suggested that cold cracking hardly occurred, but CGHAZ needed to be absolutely given temper effect under welding.

**Keywords** *Temper bead welding, repair welding, cold cracking susceptibility, toughness, low alloy steel*

## 1 はじめに

原子力設備の補修溶接時に原子炉容器等の低合金鋼が溶接熱影響部 (HAZ) となる場合で溶接後熱処理 (PWHT) が困難な場合にはテンパービード溶接 (TBW) 法が適用されている。その補修溶接技術の技術基準適合性確認の場において、機械的性質の要求と共に、一般的に溶接熱影響部の最高硬さが 350HV 以下では溶接低温割れが発生しないとされることから、溶接熱影響部の硬さが 350HV 以下であることを確認している。低温割れは応力(拘束力)、拡散性水素量、硬さ(組織)の3要因が重畳したときに発生するとされる。現行の TBW 法で使用される溶接方法はティグ (TIG) 溶接法であることから溶接部に入る水素量が低く、かつ溶接材料に Ni 基合金が用いられる場合、溶接金属から HAZ への水素の拡散が起りにくいことから低温割れは発生しにくいことが想定される。

そこで、本研究では、原子炉容器用低合金鋼である SQV2A を用いて、現行のテンパービード補修溶

接工法 (TIG 溶接, Ni 基合金溶接材料使用) において低温割れが発生する硬さについて調査した。また、SQV2A は溶接熱サイクルの履歴によっては局部的に脆化相が生成する可能性がある。この脆化相のじん性が、供用中温度により回復するかどうか調査した。

## 2 実験方法

### 2.1 溶接低温割れ感受性評価

溶接熱影響部の硬さと低温割れ感受性の評価を行った。低温割れ感受性の評価は JIS Z 3158 (1993) 「y 形溶接割れ試験方法」に準拠して行った。母材には表 1 に示す炭素当量の異なる 2 種類の原子炉容器鋼 SQV2A を用いた。現在使用されている実機材の内炭素当量の高い実機相当材 ( $C_{eq}=0.597$ ) と規格の成分範囲内で炭素当量を高くした高炭素当量材 1,2 ( $C_{eq}=0.641$ ) を用いた。溶接法はテンパービード溶接法として規定されている TIG 溶接法及び被覆アーク溶接法 (SMAW) を用いた。溶接材料には表 2 に示す Ni 基合金、オーステナイト系ステンレス鋼及び共金系の溶接材料を用いた。溶接熱影響部の

表1 供試材 (SQV2A) の化学成分と炭素当量 (Ceq)

材 料	C	Si	Mn	P	S
実機相当材	0.16	0.26	1.43	-	-
高C当量材1	0.23	0.35	1.44	0.012	0.013
高C当量材2	0.23	0.35	1.45	0.011	0.014
材 料	Cu	Ni	Cr	Mo	Ceq
実機相当材	-	0.65	0.16	0.56	0.597
高C当量材1	0.15	0.65	-	0.56	0.641
高C当量材2	0.15	0.65	-	0.55	0.640

表2 溶接材料

溶接材料	C	溶接法	サイズ	規格
Ni合金	0.16	TIG	Φ2.0mm	JIS SNi6082
Ni合金	0.23	SMAW	Φ2.6, 3.2mm	JIS ENi6182
ステンレス鋼	0.23	TIG	Φ2.0mm	JIS YS309L
ステンレス鋼	Cu	SMAW	Φ4.0mm	JIS ES309-16
共金系	-	TIG	Φ2.0mm	JIS W55P2 N1M3
共金系	0.15	SMAW	Φ3.2, 4.0mm	AWS E9016-G

最高硬さを変えるために、入熱条件を変えて割れ試験を行った。TIG 溶接では入熱 7.1 ~ 19.4kJ/cm の範囲内で溶接を行った。被覆アーク溶接では、2.6mm, 3.2mm, 4.0mm の溶接棒を用いて、各溶接棒の推奨電流で溶接を行い、入熱は、7.3 ~ 24.0kJ/cm の範囲で行った。すべての条件において予熱、後熱なしで行った。溶接後、恒温・恒湿内で48時間以上放置後マクロ試験片を作製し、割れの観察及び荷重 1kg でのビッカース硬さ (HV1) の測定を行った。

また、各溶接法及び溶接材料の拡散性水素量測定を行った。水素量の測定は、JIS Z 3118 (2007) 「鋼溶接部の水素量測定方法」に準拠して行った。

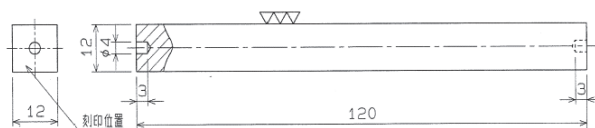


図1 溶接熱サイクル再現試験片

表3 溶接熱サイクル再現試験条件

入熱条件	第1サイクル	第2サイクル	第3サイクル
	ピーク温度	ピーク温度	ピーク温度
入熱小	冷却速度	冷却速度	冷却速度
	1350℃ 100℃/s	750℃ 50℃/s	450℃ 30℃/s
入熱中	1350℃ 50℃/s	750℃ 30℃/s	450℃ 10℃/s
入熱大	1350℃ 33℃/s	750℃ 10℃/s	450℃ 5℃/s

## 2.2 供用中じん性評価

脆化相のじん性調査では、溶接熱サイクル再現試験により脆化相を模擬した試験片を作製した。図1に試験片の寸法を示す。供試材には表1に示す実機相当材を用いた。表3に溶接熱サイクル再現試験で模擬した溶接熱サイクルを示す。溶接熱サイクルは、試験片の中央に約 15mm 程度の均熱域で与えられる。溶接部の脆化相には、主に粗粒熱影響部 (CGHAZ) 及び CGHAZ が Ac1 ~ Ac3 変態点温度間の 2 相域に再加熱された領域 (ICCGHAZ) がある。1 サイクル試験では、ピーク温度 1350℃ の熱サイクルを与え、粗粒熱影響部を模擬した。2 サイクル試験では、第 1 サイクルで模擬した CGHAZ に Ac1 ~ Ac3 変態点温度間のピーク温度 750℃ の熱サイクルを第 2 サイクルで与え、2 相域に再加熱された ICCGHAZ を模擬した。3 サイクル試験では、第 3 サイクルで焼戻し効果のあるピーク温度 450℃ の熱サイクルを与えた。溶接入熱条件は、溶接入熱 8kJ/cm (入熱小), 15kJ/cm (入熱中), 20kJ/cm (入熱大)

の3通りの条件とし、それぞれ熱サイクルの冷却速度の条件を変えた。供用中温度による脆化相の挙動を調査するために、作製した入熱小の条件の試験片を250℃から350℃までの温度で熱時効した。熱時効時間は、各熱時効温度によって異なり、各温度でラーソンミラーパラメータが同等となる熱時効時間とした。

熱サイクル付与後及び熱時効後、シャルピー衝撃試験により0℃での吸収エネルギー及び荷重1kgでのビッカース硬さ(HV1)を測定した。

### 3 実験結果

#### 3.1 溶接低温割れ感受性評価の結果

図2に割れ観察結果の例を示す。(a)はNi基合金溶接材料を用いた小入熱のTIG溶接の結果、(b)は共金系溶接材料を用いた大入熱の被覆アーク溶接

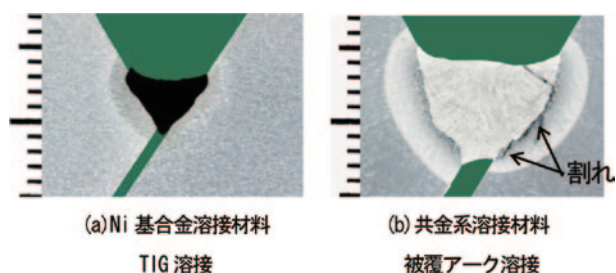


図2 ECT測定した溶接試験体の外観写真

の結果である。(a)では、割れは発生していないが、(b)では、溶接熱影響部に割れが発生していた。

表4に割れ観察結果、硬さ測定及び水素量測定の結果をまとめた表を示す。溶接熱影響部の最高硬さは、溶接入熱に対して明確な相関性はなく、ほとんど差はなかった。Ni基合金及びステンレス鋼溶接材料を用いた条件では、溶接法及び母材の種類に問わず低温割れの発生はなかった。共金系の溶接材料を用いた条件では、すべての試験において割れは発生した。Ni基合金溶接材料及びオーステナイト系ステンレス鋼溶接材料を用いた条件のHAZの最高硬さは、高炭素当量材の場合は530-630HV1の範囲であり、実機相当材の場合は470-550HV1の範囲であった。これらオーステナイト系の溶接材料を用いた場合、630HV1以下の硬さでは低温割れは発生しなかった。オーステナイト系溶接材料を用いた場合、低温割れが発生しなかったのは、水素量が低いことが要因の一つと考えられる。オーステナイト系材料の場合、一般に水素の拡散速度が遅く溶接金属から低合金鋼母材への水素の移動量が少なかったためと考えられる。一方、共金系の溶接材料を用いたTIG溶接で水素量が低いにもかかわらず低温割れが発生したのは、溶接金属の硬さが高いことと、その

表4 y型溶接割れ試験結果のまとめ

試験板	溶接方法	溶接材料	割れ部位	HAZ最高硬さ(HV1)	WM硬さ(HV1)	水素量(mℓ/100g)
高炭素当量材	TIG	Ni基合金	なし	540-600	180-270	0.1
		ステンレス鋼	なし	530-590	190-220	0.8
	SMAW	Ni基合金	なし	550-620	200-280	1.1
		ステンレス鋼	なし	630	290	0.8
		共金	HAZ→WM	610	380	5.17
	HAZ	560	320			
実機相当材	TIG	Ni基合金	なし	470-550	180-320	0.1
		ステンレス鋼	なし	490-520	210-320	0.8
		共金	WM	500	430-440	0.5
	SMAW	Ni基合金	なし	500-550	200-280	1.1
		ステンレス鋼	なし	500-530	210-260	0.8
		共金	WM	520	390	5.17
	HAZ	540	320			

HAZ：溶接熱影響部，WM：溶接金属



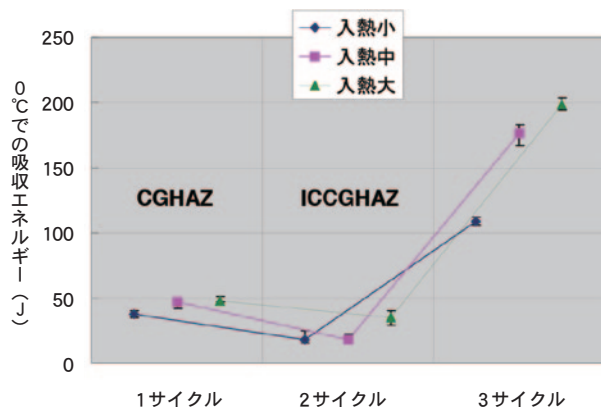


図3 模擬した脆化相の吸収エネルギー

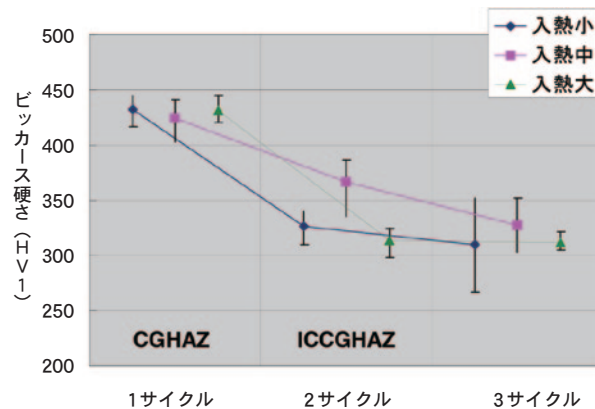


図4 模擬した脆化相のピッカース硬さ

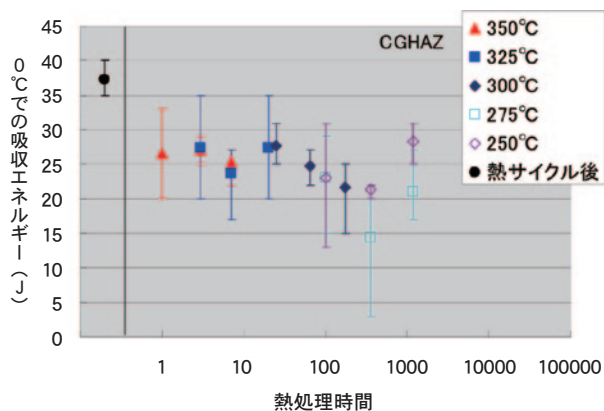


図5 粗粒溶接熱影響部 (CGHAZ) の熱時効後のじん性

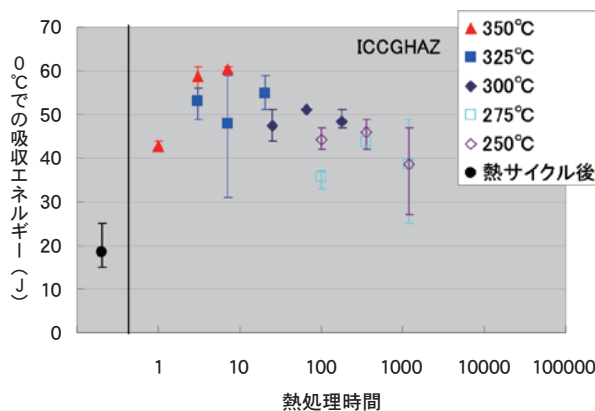


図6 2相域に再加熱されたCGHAZ(ICCGHAZ)の熱時効後のじん性

ため拘束力が大きかったことが、低温割れが発生した要因と考えられる。被覆アーク溶接において共金系の溶接材料を用いた場合、水素量は約 5mℓ/100g であり、TIG 溶接の場合と比べて高く、水素量と硬さが大きいことが低温割れ発生 の要因と考えられる。

以上の結果により、Ni 基合金等のオーステナイト系溶接材料を用いた予後熱なしのテンパービード溶接において硬さ 350HV1 以上でも低温割れが発生しないことがわかった。

### 3.2 供用中じん性評価の結果

図3及び図4にシャルピー衝撃試験結果及びピッカース硬さ測定結果を示す。1サイクル試験で模擬した粗粒熱影響部 (CGHAZ) の0°Cでの吸収エネルギーは50J以下であり、母材の吸収エネルギー213Jに比べて低かった。CGHAZの硬さは400HV1以上まで硬化していた。CGHAZ組織は、主にマルテンサイト組織である。

2サイクル試験で模擬した2相域に再加熱された

粗粒熱影響部 (ICCGHAZ) の吸収エネルギーは40J以下であり、CGHAZに比べて更に低くなっていた。2サイクル試験で模擬したICCGHAZの硬さは350HV1前後まで軟化していた。ICCGHAZの組織は、主に焼戻しマルテンサイトに島状マルテンサイトが生成した組織である。島状マルテンサイトが破壊の起点となるため、じん性は低下する。

1サイクル試験及び2サイクル試験により、目的とした脆化相を模擬した試験片が作製できた。ICCGHAZにピーク温度450°Cの熱サイクルを付与した3サイクル試験片の吸収エネルギーは、100J～母材の吸収エネルギー(213J)程度まで回復していた。ICCGHAZにピーク温度450°Cの熱サイクルを付与した3サイクル試験の硬さは350HV1以下であり、2サイクル後のICCGHAZに比べてやや軟化していた。

入熱小、中、大の3熱サイクル条件に対して傾向に顕著な差はなかった。

図5、図6にCGHAZ及びICCGHAZの熱時効後

のシャルピー衝撃試験結果を示す。1サイクル試験で模擬した熱サイクル付与後のCGHAZの0℃での吸収エネルギーは約37Jであるのに対して熱時効後の吸収エネルギーは平均値で30J以下まで低下していた。これは、低温焼戻し脆性のためと考えられる。2サイクル試験で模擬した2相域に再加熱されたICCGHAZの吸収エネルギーは約18Jであるのに対して熱時効後の吸収エネルギーはほぼ40J以上まで大きくなっていった。増加傾向は温度が高いほど大きく、又、時間が長いほど大きかった。

熱サイクル付与後のCGHAZの硬さは432HV1であるのに対して熱時効後の硬さに顕著な変化は見られなかった。2サイクル試験で模擬した熱時効なしのICCGHAZの硬さは326HV1であるのに対して熱時効後の硬さに大きな変化は見られなかった。

250℃～350℃の熱時効によってCGHAZのじん性は低下し、ICCGHAZのじん性は回復したが、硬さに顕著な変化は見られなかった。CGHAZのじん性の低下は、マルテンサイトの低温焼戻し脆性のためと考えられる。また、ICCGHAZにおいてじん性が回復したのは、ICCGHAZのじん性低下要因が、島状マルテンサイト生成による要因が大きく寄与しており、熱時効により島状マルテンサイトが分解したことが、じん性が回復した要因と考えられる。

以上の結果により、脆化相であるICCGHAZは供用中温度によりじん性は改善するが、CGHAZのじん性は改善しないことが確認された。

#### 4 テンパービード溶接に係わる考察

テンパービード溶接部のHAZの硬さ指標である硬さ $\leq 350\text{HV}$ は低温割れ防止とともに機械的性質確保のための焼戻し効果の確認のための指標とされている。図3、4に示すように熱サイクル試験の特性評価の結果、HAZ硬さが350HV以下でも吸収エネルギーが低い場合がある。低温割れ感受性の評価ではオーステナイト系の溶接材料を用いた場合、硬さ $\geq 350\text{HV}$ でも割れは発生しなかった。焼戻し効果の確認という観点で $\text{HV} \leq 350$ を考えると、初層粗粒熱影響部の領域の硬さが350HV以下の場合、それ以降の溶接熱サイクルにより600℃～750℃程度の温度に加熱されたと考えられる。Ac1変態点温度～750℃に加熱された領域(ICCGHAZ)が、そ

の後焼戻されていなければ局部的にじん性が劣る領域が残る可能性がある。しかしながら、HAZ硬さが350HV以下であることは、焼戻しの不十分な粗粒熱影響部(CGHAZのままの部位)が無いと考えられる。機械試験によりテンパービード溶接部の機械的性質が保障されるならば、HAZ硬さが350HV以下であることは十分に安全側の評価であると考えられる。テンパービード溶接熱影響部で焼戻し効果が不十分な場合、シャルピー衝撃試験で評価困難である局部的な脆化相がある場合がある。局部的な脆化相があったとしても、衝撃試験でじん性が保障されるならば問題とならないが、脆化相はない方がよい。脆化相には粗粒熱影響部(CGHAZ)の焼戻しが不十分な場合と2相域に加熱された粗粒熱影響部(ICCGHAZ)の脆化相がそのまま残る場合が考えられる。硬さが350HV前後であるICCGHAZは、供用中温度によりじん性低下の要因である島状マルテンサイトが分解しじん性が改善するため、脆化相はなくなると考えられる。もう1つの脆化領域である硬さが400HV以上であるCGHAZは供用中温度により硬さは軟化せず、じん性も改善しなかった。

粗粒熱影響部のままの硬さは400HV以上であるが、焼戻しが不十分なピーク温度600℃以下の熱サイクルによる粗粒熱影響部のじん性、硬さの評価を実施していないため、一概に400HV以下ならば焼戻しが不十分な粗粒熱影響部とは断定できない。硬さ350HV以上の場合、焼戻しが不十分な粗粒熱影響部の可能性もあるので、組織観察と併せて評価することが望ましい。硬さが350HV以上の組織は、粗粒熱影響部及び細粒熱影響部があるが、細粒域の場合じん性は問題とならない。

テンパービード溶接法では、通常2層目でAc3変態点温度以上の熱サイクルを与え、結晶粒を微細化しじん性を向上させ、3層目以降で焼戻す溶接条件で施工される。従って、粗粒熱影響部のような結晶粒の大きな焼戻しが不十分なマルテンサイト組織が存在する可能性は低いと考えられる。

#### 5 おわりに

原子炉容器鋼の低温割れ感受性及び熱時効後のじん性を評価した結果、Ni基合金及びオーステナイト系ステンレス鋼溶接材料を用いた溶接法では、硬さ

630HV1でも低温割れが発生しておらず、硬さ350HV以上でも低温割れが発生しないことが分かった。また、脆化相であるICCGHAZのじん性は供用中温度により回復するが、CGHAZのじん性は回復しなかった。

Ni基合金溶接材料を用いたテンパービード法では、低温割れの発生する可能性は低いが、局所的な脆化相(CGHAZ)が問題となる恐れがある。従って、CGHAZに確実に焼戻し効果を与える必要がある。溶接施工法確認試験において、硬さ及び組織観察に

より局所的な脆化相がないことを確認することが必要である。

本研究は、関西電力株式会社、九州電力株式会社、北海道電力株式会社、四国電力株式会社、日本原子力発電株式会社からの委託研究として実施した。

出典：平成25年度火力原子力発電大会論文集(2014), pp78-82

(一般社団法人火力原子力発電技術協会より許諾を得て転載)



水野亮二



# 米国機械学会規格における 溶接後熱処理の免除規定の動向

The Movement of ASME Boiler and Pressure Vessel Codes for PWHT Exemptions

規格基準室 大石勇一

Postweld Heat Treatment (PWHT) is the important process to recover the mechanical properties and reduce residual stress of weld. However, it can raise manufacturing cost and elongate manufacturing process. Furthermore, mishandling of PWHT can cause significant degradation of weld and base metal. Therefore, more proper exempt conditions from PWHT of ASME Boiler and Pressure Codes have been examined and revised. For example, Carbon Equivalency (CE) was innovated in Section I, 2009 Addenda.

**Keywords** PWHT, Carbon Equivalency, ASME Code

## 1 はじめに

鉄鋼材料の場合、溶接後熱処理（PWHT）は、溶接部、特に溶接入熱によって組織が変質した熱影響部（HAZ）の性質を改善し、溶接残留応力を軽減するために行う重要なプロセスである。しかし、熱処理温度の保持操作を誤ったり、製造工程の不備や溶接補修等が原因で過剰な時間のPWHTを行ったりすると、逆に劣化する恐れがある。また、局部熱処理においては、熱処理中の溶接部が拘束状態にあると割れを生じることがあり、不適切な加熱範囲を設定すると、健全な母材部にまで悪影響を及ぼすこともある。さらに、コストや製造工程にも大きく影響するため、ボイラー、圧力容器及び配管等の規格基準には、PWHTを免除することのできる条件が与えられている。たとえば、2004年版の主な米国機械学会規格（ASMEコード）の場合、母材区分がP-1（炭素鋼）の突合せ周継手については、表1に掲げるとおり、厚さによってPWHTが免除されていた。表中の厚さの定義は、溶接部の厚さと耐圧部材の厚さ

（異なる厚さの部材を突合せ溶接する場合は、薄い方の部材の厚さ）のいずれか小さい方である。ただし、B31.1は少し異なる定義を採用しており、異なる厚さの耐圧部材を突合せ溶接する場合は、厚い方の部材の厚さを適用している。

表1 主なASMEコードにおけるPWHTの免除条件（厚さ）の比較

コード	厚さ	予熱温度
Section I	≦19 mm	—
Section VIII Division 1	≦32 mm	—
	32<t≦38 mm	≧95° C
B31.1	≦25 mm	—
	B31.1	≧95° C

(注) Section I : Power Boilers  
Section VIII Division 1 : Pressure Vessels  
B31.1 : Power Piping

ここで注目すべき点は、Section Iの免除条件が最も保守的であり、厚さが19 mm以上になるとPWHTを免除することができないということである。他のコードの場合、厚さが19 mmを超えても

免除条件が存在し、表 1 には掲げていないが、たとえば原子力設備のクラス 1 容器 (Section III Part NB) でさえ、厚さ 38 mm まで PWHT の免除条件が与えられている。このため、従来から Section I にも厚さ 38 mm まで PWHT を免除する条件を規定してほしいという要望が多かった。しかし、他のコードで認められている (または実績がある) からという理由だけで免除条件を拡大することは認められなかった。なぜなら、基本となる設計要求が異なるためである。

## 2 炭素当量 (CE) の導入

Section III や Section VIII に規定されているような靱性要求を追加すると、Section I にも厚さ 38 mm までの PWHT の免除条件を同様に採り入れることが可能となる。しかし、衝撃試験は米国のボイラーメーカーにとって馴染みが薄く、却って混乱することが予想される。このため、BPV I 委員会 (Section I に関する委員会) は、炭素当量 (CE) を導入して、免除できる厚さを他のコードと整合させる検討を行った。B31.1 委員会が、先行して CE の採り入れ検討を開始したことも一因である。また、免除条件を拡大するための技術的根拠として、EPRI (Electric Power Research Institute) が行った調査研究の技術レポート<sup>[1]</sup>が活用された。

EPRI の技術レポートの要点を掲げると、以下のとおりである。

- ① 厚い材料は、大きなヒートシンクとして振る舞い、溶接部は伝熱により急冷される。急冷されると、溶接金属及びその近傍の HAZ が硬化し、靱性または延性が低下する恐れがある。
- ② 材料の焼入れ性を管理する上で、P-No. よりも炭素当量 (CE) の方が信頼性は高い。CE は、引張強さが 45 ~ 95 ksi (310 ~ 655 MPa) という幅広い強度範囲の炭素鋼に適用することが可能である。
- ③ 予熱は、変態段階での冷却速度を遅くするため、溶接部の硬さを低く抑えるのに有効である。初期温度を  $T_0$  とすると、冷却速度は溶接方法に関係なく  $(T - T_0)^2$  に比例する。
- ④ 免除条件の 1 つである「厚さを拡大するための最低予熱温度は、現行の免除条件である 200° F (95

° C) よりも高い 250° F (120° C) が推奨される。

- ⑤ 冷却速度を遅くするために、大入熱の溶接を行う方法が考えられる。しかし、靱性が確認項目となっている施工法の場合は、逆に小入熱の溶接が要求されるため、適当な方法とはいえない。
- ⑥ 一般的なマルチパス溶接を行った場合、小入熱であっても引き続き行われるパスの溶接入熱により、テンパービード法と同様の焼戻し効果を期待することができる。ただし、各溶接パスの最大溶着厚さは、1/4 inch (6 mm) とする。
- ⑦ CE を求める式は次のとおりであり、合金元素 Cr, Mo, V, Ni 及び Cu の量が不明の場合は、式②を用いる。

$$CE = C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad \text{(式①)}$$

$$CE = C + (Mn + Si)/6 + 0.1 \quad \text{(式②)}$$

## 3 Section II における検討

Section I で検討された改正案の要点は、次のとおりであり、前出の EPRI の技術レポート及び B31.1 の改正案を参考にしている。

### 【PWHTの免除条件を拡大する改正案】

以下の場合、P-1 材に対する PWHT は、必須要求ではない。

- (1) 公称厚さが 19 mm 以下であり、かつ、いずれかの母材の厚さが 25 mm を超える場合は最低予熱温度 95° C を適用すること。
- (2) 公称厚さが 19 mm を超え、38 mm 以下の場合は、次の条件を満足すること。
  - (a) 炭素当量の計算結果 (前出の式①または②を用いる) は、0.45 以下であること (材料仕様における合金元素の上限値、あるいは化学分析または材料試験報告書による実際の値を計算に用いること)。
  - (b) 最低予熱温度 120° C を適用すること。
  - (c) 各溶接パスの厚さは、6 mm 以下とすること。

検討における主な問題点とその検討結果は、以下のとおりである。

- ① 「公称厚さ」の定義が Section I と B31.1 で異なるが、Section I の定義を用いた方が保守的である

ため、定義を変更しないことにした。

- ②代表的な高温用炭素鋼鋼管の規格である SA 106 (JIS G 3456 相当) の場合、Cr, Mo, Ni, Cu 及び V の量の合計が 1% を超えないように規定している。このため、これら 5 元素の量が不明の場合、 $(Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$  を 0.10 とするのは不十分であり、より保守的な 0.15 に修正した。
- ③伝熱フィン、ピン、スタッド等の非耐圧部材を取り付ける溶接部は、CE に関係なく PWHT が免除されるため、そのことが明確になるように規定を追記した。
- ④ CE を考慮した PWHT の免除規定は、手直し溶接にも適用可能であるため、手直し溶接（ハーフビード法）の規定と競合しないように手直し溶接の規定を修正した。また、母材の両側から研削して溶接を行った場合、手直し溶接に適用される溶接厚さと同じ定義が適用されるように、「溶接が行われる位置の溶接深さの合計」を追加した。
- ⑤提案された CE の式は、材料仕様において使用される式と少し異なり Si が含まれている。整合性が問題になったが、提案された式の方が保守的であるため採用した。
- ⑥圧力容器用鋼板の場合、一般に SA 20 の規定が適用されるが、その S20.3 Table 2 には、引張強さが 415 MPa 以上 550 MPa 未満であって厚さ 50 mm 以下の材料の場合、CE を 0.45 以下に制限する規定がある。このため、CE を 0.50 以下から 0.45 以下に変更した。

上述の CE の導入は 2009 年版で行われたが、大幅な改正による混乱が生じると考えられたため、その適用は周継手に限定された。しかし、その後、ノズルや付着物の溶接にも CE に基づく免除条件が適用されるように、免除条件全体を整理する改正が行われ、現在に至っている。

なお、同時期に Section VIII Division 1 (圧力容器) にも CE が導入されたが、Section I のような免除条件の拡大ではなく、Code Case 2130 の採り入れが目的である。Code Case 2130 は、TMCP (熱加工制御) を用いて作られる鋼板の SA-841 Grade A 及び B を圧力容器に適用するルールである。SA-841 Grade A 及び B は、溶接性に優れた鋼板であるため、

PWHT の免除条件の一つである予熱をも免除するというものであり、その溶接性の指標として CE が導入された次第である。この材料は、製造工程において 650°C 以上に加熱することが禁止されている。これは、過度に大きな溶接入熱や高いパス間温度を適用すると、逆に引張強さや靱性等の機械的性質が低下する恐れがあることを意味している。

#### 4 今後の動向

現在、各コードによって付帯条件は異なるものの、P-1 材に対しては厚さ 38 mm まで PWHT が免除されている。しかし、依然として、可能な限り PWHT を免除したいという産業界からの要望は多い。そこで、B31.1 (パワー・パイピング規格) 委員会が主体となって、EPRI で行われた最新の調査研究結果に基づき、より最適な PWHT の免除条件を策定する検討が行われている。

現在の免除条件は、主に母材の焼入れ性に基づいて決められており、その妥当性はジョミニー試験等により実証されている。言い換えれば、PWHT の免除条件は、Ac3 変態点以上に加熱した後、常温まで急速に冷却するという、1 回の熱サイクルを与えた時の材料の機械的性質 (硬さ、靱性) に基づいている。しかし、実際の溶接施工の場合、多パス溶接がほとんどであり、溶接部 (特に HAZ) には複数回の熱サイクルが加わるため、ジョミニー試験とは少し条件が異なる。すなわち、多パス溶接の多重熱サイクルにより、溶接部にはある程度の焼戻し効果が与えられるので、現行の PWHT の免除条件はかなり保守的と考えられる。近年、この多パス溶接による焼戻し効果は、テンパービード溶接として技術的に確立し、多くの適用実績がある。しかし、テンパービード溶接のような厳密な入熱管理は一般的でない。このため、入熱管理を行わない一般的な多パス溶接を行った時の焼戻し効果に基づいて、PWHT の免除条件を見直す検討が行われている。将来的には、多パス溶接 (エレクトロスラグ溶接やエレクトロガス溶接のような大入熱の溶接方法を除く) を P-1 材に適用する場合について、PWHT を免除する範囲が拡大されるか、または付帯条件が減少する可能性がある。



参考文献

- [1] Andrew McGehee and P. D. Flenner, "PWHT Exemptions for Low Hardenability Materials (No. 1008277)"



大石勇一

# 米国におけるボイラーおよび 圧力容器に関する安全規制について

An introduction on the regulation of the boiler and pressure vessel in the U.S.A

規格基準室 長谷川 忠之, 大石 勇一, 佐藤 長光

The concrete concept on the heat engine arises from the idea by C.Huygens in 17th century. And, it is no exaggeration to say that the origin of the mainstream boilers in the world nowadays is Newcomen engine implemented early 18th century in Great Britten. The efficiency of boiler (i.e. pressure and temperature) has largely improved in the past two centuries in Europe and the U.S.A. However, the incident related to the boiler has increased with the efficiency improvement, which has become an opportunity to take growing interest in the safety and the legislation to the boiler. In Japan, the originals of current code as “Kagi-Kaishaku” are the technical codes legislated in 1954 and 1958 although the legislation activity to the boiler has already started in Meiji era. Kagi-Kaishaku and its original codes are referenced in ASME code. ASME code is incorporated in the state law as a part of the regulation in the U.S.A. Therefore, knowing to the regulation in the U.S.A may provide us getting hint for the role of domestic regulation.

**Keywords** Kagi-Kaishaku, ASME Code, Regulation, Boiler, Pressure Vessel

## 1 はじめに [1-10]

燃焼エネルギーを機械的運動に変換する内燃機関に関する具体的概念は、17世紀のオランダの科学者である Huygens にその証左が見出されるが、現在のボイラーの起源となるものは18世紀初頭に英国で実用化された Newcomen 機関であるといっている。Newcomen 機関の登場は熱機関時代の始まりといわれており、その後、18世紀後半に Watt 機関が実用化されるとその性能は向上し、これにより産業革命は飛躍的な発展を遂げ、ボイラーは英国の今日の発展の礎を築く原動力となった。このようにボイラーを使った工業化の流れは米国も同様であり、例えば、1800年には Evans による横煙管ボイラーの原型となる機関が発明されている。21世紀の現在、欧米各国および日本では 25MPa・600℃超の超々臨界圧ボイラーが稼働しているが、35MPa・700℃超を志向した、より高効率のボイラーに関する研究開発が盛んに行われている。

一方、19世紀初頭に、熱効率を高めるためのボイ

ラー圧力・温度の上昇に伴って破裂事故が発生するようになると安全に運転するための規制（以下、安全規制という）とそのための法制化への関心が高まり、その動きが始まった。例えば、英国ではロンドンで発生した初のボイラー事故を契機に原因究明と安全規制とそのための法制化に向けた動きが活発化した。また、米国では蒸気船ボイラーの破裂事故を受け、フィラデルフィア市議会が州法による安全規制を提言している。

日本においても、明治16（1883）年の福岡県における汽缶、汽機に関する取締り規則を皮切りに、ボイラーに関する様々な安全規制が設けられるようになった。現行の「発電用火力設備の技術基準の解釈」（以下、火技解釈という）は昭和29（1954）年に制定された「発電用ボイラ技術基準（暫定）」および昭和33（1958）年に改正された「発電用ボイラ技術基準」をその源流としている。昭和29年の技術基準は ASME<sup>1</sup> Code を参考としつつ、当時の船

<sup>1</sup> American Society of Mechanical Engineers

舶に関する安全規制を一部取り入れて制定された。

日本で技術基準の策定が検討されていた当時の米国では、ASME Codeに基づいて良品質で安価なボイラーが大量に供給されており、米国以外の国でも採用されていた。これはASME Codeが“de facto standard”として認められていたことによるところが大きく、現在も同様である。このような現状に加え、火技解釈の変遷を鑑みれば、米国におけるボイラーおよび圧力容器（以下、ボイラー等という）の安全規制を知ることは、日本における安全規制の内容を検討する上で役立つと考えられる。

そこで、本稿では主として公開されている情報を基に米国におけるボイラー等の安全規制に関する状況を概観する。

## 2 米国におけるボイラー等の安全規制の概要<sup>[11-12]</sup>

### 2.1 連邦法による規制

米国では連邦法である“The Occupation Safety and Health Act”（労働安全衛生法）が1970（昭和45）年に制定された。この法律は、「同法に基づき策定された基準の執行を許可し、各州の安全で衛生的な労働条件を保証する努力を支援・促進し、労働安全衛生分野における研究、情報、教育・訓練を実施することで、労働者のための安全で衛生的な労働条件を保証すること」等を目的に制定された。

労働安全衛生法の施行規則として連邦規則29CFRが発行されており、この中の1910.2(g)項において“国内総意基準：National Consensus Standards（以下、NCSという）”が定義されている。これは、国家的に認知された基準作成機関が発行した基準もしくは改正基準であり、多様な意見を考慮できるように作成され、かつ、その影響下にある者により合意されていることを労働長官または次官が認めたもののことをいう。同規則ではANSI<sup>2</sup>およびNFPA<sup>3</sup>が承認した基準はNCSとみなされている。したがって、ANSIで承認されたASME CodeもNCSとして扱われ、例えば1910.6項ではボイラー、圧力容器および配管等のCodeが是認されている。

<sup>2</sup> American National Standards Institute

<sup>3</sup> National Fire Protection Association

表1 米国におけるボイラーと圧力容器にする行政区と安全規制の有無（一例）

行政区 (略号)	ボイラー	圧力容器
Florida (FL)	Y	N
Hawaii (HI)	Y	Y
Maryland (MD)	Y	Y
New Jersey (NJ)	Y	Y
New York (NY)	Y	Y
Washington, D.C.	Y	Y

Y：安全規則あり，N：安全規則なし

ただ、ここでの対象は、上述のように労働者の安全である。

### 2.2 州規則等による安全規制

ボイラー等に関する安全規制は主にエネルギー（DOE<sup>4</sup>所管）、環境（EPA<sup>5</sup>所管）、労働安全（DOL<sup>6</sup>所管）の3分野の法体系が関連することになるが、ボイラー等に関しては、州等をまたいで影響を及ぼすことはない。そのため、安全規制の権限や責任を有するのは州や自治区（以下、行政区という）である。表1<sup>[13]</sup>に行政区の一例を示す。ボイラー等の安全規制に関する行政区は州と大都市であり、その数は66である。安全規制は行政区毎に行われており、そのほとんどでボイラー等の安全規制を定めているが、IdahoとWyomingの2つの州については安全規制を定めておらず、他の14の行政区ではボイラーのみに安全規制を定めている。圧力容器のみに安全規制を定めている行政区はない。

### 2.3 ASME CodeおよびNBIC<sup>7</sup>の適用

行政区は、州規則等でボイラー等に関する製造時と供用期間中の安全規制を行っているが、具体的な要求はなく、主に製造時にはASME Codeを、供用期間中についてはNBBI<sup>8</sup>が発行しているNBICを

<sup>4</sup> Department of Energy

<sup>5</sup> Environmental Protection Agency

<sup>6</sup> Department of Labor

<sup>7</sup> National Board Inspection Code

<sup>8</sup> The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors



表2 行政管区が引用しているASME規格およびNBICの年版(一例)

行政管区 (略号)	ASME Code		NBIC	
	Ed	Add	Ed	Add
Florida (FL)	1998	1999	1998	1999
Hawaii (HI)	2010	—	2011	—
Maryland (MD)	1998	2000	2001	—
New Jersey (NJ)	2007	All	2007	All
New York (NY)	Current	Current	Current	Current
Washington, D.C.	2001	2002	—	—

Ed : Edition Add : Addenda

引用することで具体性を持たせている。表2<sup>[13]</sup>に行政管区が引用しているASME CodeとNBICの年版の一例を示す。年版は行政管区により異なるが、概ね80年代後半から最新版までの間で引用版を定めている。

ASME Codeでは主要なConstruction Sec.がSec. I, Sec.IV, Sec.VIIIであり、これらに従って製造する際に引用されるService Sec.としてSec.II, Sec.V, Sec.IXが存在する。大半の行政管区は前述の主要Sec.を引用しているが、各行政管区が必ずしもこれらのCode全てを引用しているわけではない。例えば、Georgia州ではSec.IIとSec.IVを引用していない。また、ASME CodeまたはNBICの引用に際して、施工工場が両規格で要求される品質管理が十分であることを証明するStampingを保有している必要がある。

このように、要求されるCodeおよびStampingの種類は個々の行政管区の裁量に委ねられており、行政管区が規制に関する十分な権限を有していることが分かる。

### 3 Maryland州での安全規制の状況<sup>[14-17]</sup>

#### 3.1 安全規制の概要

以下ではMaryland州を例に、米国における実際の安全規制の状況を紹介する。

Maryland州におけるボイラー等の安全規制は以下が柱となっている。

- (1) ボイラー及び圧力容器条例 (州法)
- (2) ボイラー規則委員会が作成した規定

#### (3) 職業及び専門職に関する条項 § 6.5 (州法)

(1)は公衆の安全に関する州法の1つであり、ボイラー等の安全規制の基本となる法律である。この条例では、ボイラー等に対する規則をはじめ、検査や検査官に関する事項、オーナーやユーザー、公認保険会社の義務等が定められており、第12条第9項でボイラー等の安全規制が定められている。同項では、技術基準として引用する規格類がいくつか指定されているが、ASME Codeはその中の1つである。従って、ASME Codeに基づいて製造され、適合していることが証明されたボイラー等は州内で使用することが許容される規定となっている。なお、特殊な設計や製造方法については、ボイラー規制委員会が承認し、特別設置または運転許可証を発行した場合に使用が認められる。

Maryland州では、労働者保護を目的とした安全基準の策定や公衆防護のための安全検査等を担当する部署は労働免許規制省(以下、DLLR<sup>9</sup>という)の中の労働産業局(以下、DLI<sup>10</sup>という)である。DLIには安全検査の管理監督を行う部署(検査ユニットという)が4つあるが、そのうちの1つが「ボイラー及び圧力容器の安全検査ユニット」であり、その主担当者は前述の州法で規定されている主任ボイラー検査官でもある。

(2)はボイラー等を安全に運用するための技術的要件や検査、行政上の手続き等について維持管理に関する要求事項を主体としてボイラー規則委員会が定めた規則である。

ボイラー規則委員会は1920(大正9)年に設立され、DLI内に設けられた組織であり、主たる役割は州内で使用されるボイラーの建造や据え付け、使用、保守管理、補修、および検査のための規則類を策定することであり、ボイラー規則委員会の策定した規則類はDLLR長官の承認を経て、DLI局長によって採用される。ボイラー規則委員会の委員は、州政府により任命された9名にDLI局長を加えた10名で構成される。DLI局長以外の9名の内訳は、ボイラー等のオーナーやユーザー、製造業者や保険会社の代

<sup>9</sup> Department of Labor, Licensing, and Regulation

<sup>10</sup> Division of Labor and Industry

表、あるいは消費者委員等である。

Maryland 州内で専門的な職業に従事する者は、その専門性に応じた免許が必要となる。これはボイラー等の運転や維持管理をする者にも適用されるが、専門性を認められ免許を持った技術者は“Stationary Engineer”（以下、SE という）と呼ばれる。前述(3)の規定はその要件とともに Stationary Engineer 委員会（以下、BSE<sup>11</sup> という）について定めている。なお、SE は前述のボイラー規則委員会の構成メンバーの 1 人でもある。

BSE は DLLR の一部門である専門職免許局（以下、DOPL<sup>12</sup> という）内に設けられており、1892（明治 25）年に設立された組織である。当初は Maryland 州の 1 つの都市である Baltimore 市に設置され、エンジンまたは市内で使用される可搬型エンジンの運転申請に対する試験・証明書発行業務を行っていた。しかし、2005（平成 17）年にボイラー等の運転も含まれるよう範囲が拡大され、現在は州法で定める BSE の規定を遂行するための規則類の採択や、SE 試験の運営管理、免許証の発行と免許保持者のリスト管理等を主な業務としている。

BSE は州知事に指名された 8 名で構成される。これら 8 名については、“3 名は SE であること”、“1 名はボイラーのオーナーであること”あるいは“消費者（免許を有しない一般公衆）であること”といったように構成要件が定められている。

### 3.2 製造時の安全規制の検査

前述のとおり、ボイラー等の製造時（設計・建設段階）については ASME Code が適用され、これに適合した Stamp 品のみ使用することが許容される。従って、州法には製造時の具体的な検査規定や検査を行う者の資格要件は与えられていない。

製造規格として用いられる主要な Sec. (Construction Sec.) は、先述のように Sec.I, Sec. IV, Sec.VIII であるが、次の条件を満たすボイラーおよびボイラー部品については Sec.I が適用される。

・ 15 psi (100 kPa) より高い圧力で蒸気（水蒸気以外

のものを含む）を生成するボイラーであり、蒸気がその外部で使用されるもの。

・ 160psi (1.1 MPa) より高い圧力及び / または 250° F (120° C) より高い温度で運転される予定の高温水ボイラー。

Sec.I では検査に関する基本的な要求事項は PG-90 に規定されており、ボイラー、過熱器、水冷壁、節炭器等は製造中及び完成後に公認検査官（以下、AI<sup>13</sup> という）による検査を受けなければならないとしている。AI に関する要求事項は PG-91 に規定されており、“AI は ASME Code を採用している米国またはカナダの州規則の下で実施される記述試験によって認証された者”であるとしている。

2013 年版の PG-90 では AI による検査として、例えば、検定水圧試験の立会及び承認、溶接施工法や溶接士技能の認証記録の確認、認証された要員による非破壊試験及び機械試験等の実施、試験結果の記録の確認等を行うことが規定されている。

AI には規定された段階以外でも必要に応じて検査を実施する権限が与えられており、製造者や組立業者は AI の要求に応じて指定された検査を行うことができるよう対応する必要がある。

### 3.3 ボイラー検査官

前述のボイラー及び圧力容器の条例では、ボイラー検査官について次のように規定されている。

- (a) 州内のボイラー等を保証する保険会社または公認検査機関（以下、AIA<sup>14</sup> という）からの依頼により、DLI 局長から委任状を発行された者。
- (b) NBBI の委任状を有する者。
- (c) 委員会による試験に合格した者。

現在は、DLI には行政官である主任ボイラー検査官の下、これを補佐する行政官である 5 名のボイラー補佐官及びアシスタントが 3 名在籍している。しかし、検査だけを行う行政官としてのボイラー検査官

<sup>11</sup> Board of Stationary Engineers

<sup>12</sup> Division of Occupational and Professional Licensing

<sup>13</sup> Authorized Inspector

<sup>14</sup> Authorized Inspection Agency

表3 事故率

年	ボイラー及び圧力容器の登録総数	OSHA データ		2003 年の NBBI アンケート	
		Total Incidents Reviewed	事故率 (%)	事故件数	事故率 (%)
2002(平成 14)	1,210,314	798	0.066	—	—
2003(平成 15)	1,333,234	895	0.067	1,489	0.112
2004(平成 16)	1,403,761	849	0.060	—	—
2005(平成 17)	1,373,387	838	0.061	—	—
2006(平成 18)	1,418,279	775	0.055	—	—
2007(平成 19)	1,481,807	861	0.058	—	—

は在籍していない。このため、ボイラーや圧力容器のオーナーは、要求される定期検査を行うために AIA を雇用するか、または当該機器に保険をかけて保険会社に検査を行わせるよう、DLLR から通知が出されている。

## 4 不適合報告と事故報告

### 4.1 不適合報告 [18-22]

NBBI では、Violation Findings Report（不適合報告）と Incident Report（事故報告）から抽出したデータを一部公開している。圧力機器が安全であるためには、これらの報告書のデータを分析し問題を把握することが重要であると NBBI は認識している。不適合報告は、検査プロセスを通じて認められた不具合やトラブル等から事故の原因となる要素を洞察し、事故を未然に防止するために役立つ。

データは四半期ごとのものが公開されているが、2012（平成 24）年の第 3 四半期（7 月 1 日～9 月 30 日）分から、より詳細な情報を収集する方法に変更されている。変更の最大の特徴は機器の種類と不適合件数を関連付けたことであり、以前の方法に増して機器の設置、運転、保守及び補修に関する問題点と傾向を示唆するようになった。

2012（平成 24）年全体の Violation（不適合）件数はおおよそ 57,134 件であり、全検査件数の 9% である。2012（平成 24）年の第 4 四半期（11 月 1 日～12 月 30 日）の詳細を見ると、高温高圧ボイラーや圧力容器の不適合率はそれぞれ 7% 及び 3% である

のに対し、低圧蒸気ボイラーと高温水加熱供給ボイラーの不適合率はそれぞれ 14% 及び 21% となっている。なお、ここでの件数は製造時と供用中の両検査における不適合を含んでおり、低圧蒸気ボイラー等は供用中の運転、保守及び管理不良が影響して高めの不適合率になっていると考えられる。

### 4.2 事故報告 [23-26]

前述のように、不適合報告から得られる情報は事故を未然に防止するために有用であるが、事故報告は事故事象を明らかにするとともに、他のボイラー等でも同様の事故が生じないよう水平展開する上で極めて重要な情報となる。

Incident Report は、2003（平成 15）年に発生した事故のものが最新版であり Bulletin Summer 2004 で報告されている。これは、NBBI から規制関係の機関および AIA へ調査書を送り、その回答（回答率 63%）を基にしている。

このような状況の中、情報技術の発展に伴い、2012（平成 24）年から国家単位での公開データに基づく新たな事故情報の収集・共有に関する検討をはじめ、OSHA<sup>15</sup> が保有するデータベース（以下、DB という）を基に、関連する事故件数を抽出することが試みられている。表 3 に 2002（平成 14）～2007（平成 19）年の件数を示す。

表 3 は 2007 年までのデータであるが、これは

<sup>15</sup> Occupational Safety and Health Administration



OSHA のデータが正式なデータとして承認されるまでに数年を要するためである。このように、データ発表にタイムラグが生じること、また、OSHA のデータは人身事故に限られることから、ボイラー等の損傷件数を的確に示したものではない。そこで、NBBI はより有効な DB として、消防関係の DB である NFIRS<sup>16</sup> の活用を要望している。現在の NFIRS は NBBI が要望するデータを提供するには完全ではないが、DB の高度化と拡張が行われており、これが完了すればボイラー等の事故に関するさらに有用なデータを提供できることになる。

## 5 おわりに

行政管区ごとに行われる米国でのボイラー等の安全規制は、20 世紀初頭に Massachusetts 州の工場で発生したボイラー事故を契機として同州にボイラー製造に関する安全法令が制定されたことに端を発する。その後、他の州や市が各々の安全法令を制定するようになったが、当初施行された法令は各州及び市の間で統一されておらず、かつ不十分であったため、ボイラーに要求される品質を十分に規定することができていなかった。

ASME Code の発行や NBBI の組織化はこのようない不十分さ、あるいは非合理的な状況の解消に大きく寄与し、業種に関係なく機器として統一的に安全規制できるようになった。

一方、日本ではボイラー等については電気事業、ガス事業、高圧ガス事業及び一般事業ごとに安全規制が施行されており、米国とは大きく異なっている。また、火技解釈の源流が ASME Code によるものであるとしても、例えば、ボイラー等の耐圧部の溶接継手のみに対する局所的な健全性の確認に主眼を置いた日本のような検査制度は米国にはない。

安全規制の制定・改廃は、その背景や社会風土、慣例、国民性が色濃く反映されており、米国の安全規制や規定をそのまま日本で適用できるものではない。しかし、技術的かつ合理的に日本の実情を踏まえた形で取り入れることは可能であり、そのようにして実効的に最低限の安全を確保する安全規制を構築することは安全文化を醸成する一助となるだろう。

う。ただし、積極的かつ適時に規定の制定・改廃を行うことや、常に先んじて新しい技術を取り入れ、現実に即した規定の策定を志向する米国の姿勢は見習うべき点であり、望ましい姿である。

## 参考文献

- [1] 石谷清幹, 赤川浩爾, 蒸気工学, 株式会社コロナ社, 1991 年 3 月 20 日, 第 23 版
- [2] 菅原菅雄, 蒸気ボイラおよび蒸気原動機, 丸善株式会社, 昭和 45 年 3 月 10 日, 第 7 版
- [3] ASME 規格の基礎知識 [改訂版], 財団法人日本規格協会, 1989 年 1 月 6 日, 改訂版第 1 版
- [4] 寺本憲宗, ボイラー技術の系統化調査, 平成 19 年 3 月 30 日, 独立行政法人国立科学博物館
- [5] 熊谷伸一, ASME 品質保証マニュアル, 昭和 56 年 8 月 1 日, 株式会社アイピーシー
- [6] Arthur M. Greene, Jr., History of The ASME BOILER CODE, The American Society of Mechanical Engineers
- [7] JIS B 8201-1954 「陸用鋼製蒸気ボイラの構造解説」, 財団法人日本規格協会
- [8] JIS B 8201-1972 「陸用鋼製ボイラの構造 解説」, 財団法人日本規格協会
- [9] 相部嘉輔, 火力発電技術行政の経緯について, 発電用火力設備の技術基準 省令・告示及び解釈 [解説] (平成 17 年改訂版), 平成 18 年 8 月, 社団法人火力原子力発電技術協会
- [10] <http://kjs.nagaokaut.ac.jp/mikami/>
- [11] <http://www.jniosh.go.jp/icpro/jicosh-old/japanese/country/usa/ministry/all-about-osha/allaboutosha-index.html#2>
- [12] National Board Synopsis of Boiler and Pressure Vessel Laws, Rules and Regulations, NB-370, NBBI, This edition was last updated 10/29/12
- [13] [http://www.nationalboard.org/SiteDocuments/Synopsis/2014\\_code\\_edition.pdf](http://www.nationalboard.org/SiteDocuments/Synopsis/2014_code_edition.pdf)
- [14] [https://govt.westlaw.com/mdc/Browse/Home/Maryland/MarylandCodeCourtRules?guid=N7010CFA09CC211DB9BCF9DAC28345A2A&originationContext=documenttoc&transitionType=Default&contextData=\(sc.Default\)](https://govt.westlaw.com/mdc/Browse/Home/Maryland/MarylandCodeCourtRules?guid=N7010CFA09CC211DB9BCF9DAC28345A2A&originationContext=documenttoc&transitionType=Default&contextData=(sc.Default))
- [15] <http://www.dsd.state.md.us/comar/SubtitleSearch.aspx?search=09.12.01>
- [16] [https://govt.westlaw.com/mdc/Browse/Home/Maryland/MarylandCodeCourtRules?guid=NF B223FC0A7D511DBB5DDAC3692B918BC&originationContext=documenttoc&transitionType=Default&contextData=\(sc.Default\)](https://govt.westlaw.com/mdc/Browse/Home/Maryland/MarylandCodeCourtRules?guid=NF B223FC0A7D511DBB5DDAC3692B918BC&originationContext=documenttoc&transitionType=Default&contextData=(sc.Default))
- [17] <http://www.dsd.state.md.us/comar/>

<sup>16</sup> National Fire Incident Reporting System

SubtitleSearch.aspx?search=09.17

- [18] Report of Violation Findings for First Quarter of 2012, <http://www.nationalboard.org/NationaBoardNews.aspx?NewsPageID=413>
- [19] Report of Violation Findings for Second Quarter of 2012, <http://www.nationalboard.org/NationaBoardNews.aspx?NewsPageID=433>
- [20] New Violation Tracking System Results for Third Quarter, <http://www.nationalboard.org/NationaBoardNews.aspx?NewsPageID=452>
- [21] New Violation Tracking System Results for Fourth Quarter, <http://www.nationalboard.org/NationaBoardNews.aspx?NewsPageID=469>
- [22] Bulletin Winter 2013, The Journal of National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors
- [23] Bulletin Winter 2013, The Journal of National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors
- [24] Bulletin Summer 2004, The Journal of National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors
- [25] Bulletin Fall 2004, The Journal of National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors
- [26] Bulletin Fall 2008, The Journal of National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors



長谷川忠之



大石勇一



佐藤長光

# 発電技検における確性試験の回顧と展望

The recollection and prospect to the KAKUSEI examination in JAPEIC

規格基準室 佐藤 長光, 長谷川 忠之

Japan Power Engineering and Inspection Corporation (JAPEIC) has started on the KAKUSEI examination in 1974 and has received 118 requests of the examination by 2014. The average number of the KAKUSEI examination requested in these 40 years is 2.95. In regulation period of 27 years from 1974 to 2000, the average number is 2.85 per year. The other side, the average number is 3.15 per year in non-regulation period of 13 years from 2001 to 2013. The average number requested in each year in non-regulation period has increased more than that in regulation period. The KAKUSEI examination is to confirm technical validity of new technology not described in the standard or code, which is carried out objectively as a third party. In these days, it is very important for new technology users to explain the technical validity on the technology to regulation-related organization by their self. JAPEIC provides the KAKUSEI examination as the scheme to make use of new technology.

**Keywords** JAPEIC, KAKUSEI, New Technology, Technical Validity, Third Party

## 1 はじめに

一般財団法人 発電設備技術検査協会（以下、発電技検という）は、昭和 49（1974）年 1 月から確性試験を開始し、平成 26（2014）年 3 月までに 118 件の確性試験の依頼を受け、実施している。平成 25（2013）年は、40 年目の記念すべき年にあたる。

時々、「確性」の意味や、英語での表記について質問を頂くことがある。この言葉は、古くから他産業を含めて広く用いられており<sup>[1]</sup>、我々には認知されているものの、詳細な国語辞典<sup>[2]</sup>でもその意味は記載されておらず、正確な日本語ではないようである。何かの造語かもしれないという方もおられるが、その詳細は定かではない。英語では「Confirmative」<sup>[1]</sup>や「Property and Performance Qualification」<sup>[3]</sup>のように表記されている例もあるが、正しい表記か疑問が残る。日本語で正確に説明できないため、英語でも表記しにくく、「KAKUSEI」とご回答している。

このため、発電技検における確性試験（以下、確性試験という）は、「技術基準や規格等に記載され

ていない新たに開発された材料、設計、製造及び検査等に関する技術（以下、新技術等という）の技術的妥当性を第三者として客観的に確認すること」と定義している。

依頼のあった 118 件を材料、設計、製造、検査及びその他の技術分野の割合で表わすと、7%、3%、60%、29%及び 1%となる。多くは、製造と検査の技術分野で、両技術分野で約 90%を占めている。なお、原子力に関する依頼が多く、全体の 92%を占めている。例として、平成 26（2014）年 3 月 31 日現在で実施中のものを表 1 に、直近に終了したものを表 2 に示す<sup>[4]</sup>。

実用火力発電所の材料及び構造の技術基準は平成 9（1997）年に、実用発電所の溶接の技術基準は平成 12（2000）年に、実用原子力発電所の材料及び

表1 実施中の確性試験  
(平成26年3月31日現在)

No.	件名(略号)
1	ライニングに関する水中乾式TIG溶接による当て板溶接工法確性試験(BTS)



表2 直近に終了した確性試験

(平成26年3月31日現在)

No.	件名(略号) <証明書発行日>	備考
1	再処理施設の配管等に関する接着材補修工法についての確性試験 (ARR) <平成26年2月18日>	報告書はHPで公開
2	再処理施設の配管等に対する当板・肉盛溶接補修工法に関する確性試験 (BBR) <平成25年11月21日>	報告書はHPで公開
3	小口径管台補修工法(テンパービード溶接)適用に関する確性試験 (MTS) <平成25年6月25日>	
4	原子炉容器炉内計装筒及び下部鏡補修溶接部への開口合成法による超音波探傷試験の適用に係る確性試験 (MSU) <平成25年6月14日>	
5	原子炉容器炉内計装筒及び下部鏡補修工法(テンパービード溶接)適用に関する確性試験 (MTB) <平成25年6月10日>	
6	高震度対応型(フリースタンディング方式)PWR使用済燃料ラックの確性試験 (FSR) <平成24年6月22日>	

No.	件名(略号) <証明書発行日>	備考
7	BWRプラントの手动TIG溶接による封止溶接補修に関する確性試験 (BERM) <平成24年3月5日>	
8	ホウ酸水注入・差圧検出ノズル取付溶接部及びICMハウジング取付溶接部の封止溶接工法に関する確性試験 (HER2) <平成23年12月22日>	
9	原子炉容器炉内計装筒補修工法(封止溶接)適用に関する確性試験 (MER) <平成23年7月25日>	
10	高ニッケル合金溶接部の渦電流探傷試験法及び炉内外超音波探傷試験法に関する確性試験 (HEU) <平成23年1月20日>	
11	補修IHSIの適用性に関する確性試験 (RIHSI) <平成22年8月9日>	
12	水中レーザによるテンパービード溶接及びクラッド溶接適用に関する確性試験 (TCW) <平成22年7月8日>	

構造の技術基準は平成 17 (2005) 年にそれぞれ性能規定化され、技術的妥当性の説明性の自由度が増した。しかし、自由度は説明性とトレードオフの関係にあり、スムーズに実機適用可能な新技術等とするには、開発の初期段階で純技術的な検討と合わせて技術基準適合に対する説明性を見据えておくことが重要なポイントとなる。加えて、技術基準非対象機器に新技術等を適用する場合でも、技術的妥当性を説明することは重要な時代となってきた。

本報では、確性試験に関するこれまでの 40 年間の振り返るとともに、今後の展望について述べる。なお、「発電技検の確性試験について」<sup>[5]</sup>において、規制との関連や技術的妥当性の説明性、実施の意義、手続き及び効率的に進めるための視点等について報告している。こちらをあわせてご覧いただければ幸いである。

## 2 確性試験の回顧

発電技検は、溶接検査を行うために財団法人 発電用熱機関協会として昭和 45 (1970) 年に通商産

業省許可の公益法人として設立され、昭和 60 (1985) 年に発電技検に名称変更した。その後、平成 24 (2012) 年に一般財団法人に移行し現在に至っている。

設立当時から全体を振り返り、昭和 49 (1974) 年から平成 25 (2013) 年の年別の確性試験の依頼件数を、発電技検の内外での主な出来事と共に図 1 に示す。図 1 では確性試験について、規制期間と非規制期間の 2 つに分けて示している。昭和 52 (1977) 年は、沸騰水型原子力発電所の再循環配管に生じる応力腐食割れへの予防保全としての溶接残留応力改善工法等に関するニーズが多かったため、件数が多くなっている。以降、新技術等の開発に応じて依頼がなされている。40 年間で平均すると 2.95 件/年の依頼があったことになる。

確性試験が実用発電所に適用される新技術等の技術的な検討の場として開始され、かつ、長期にわたり規制の一部として実施されていた。そのため、確性試験は現在でも規制との関連があるように捉えられることもあるが、平成 13 (2001) 年の原子力安全・保安院 (以下、NISA という) 設立とほぼ同時に規

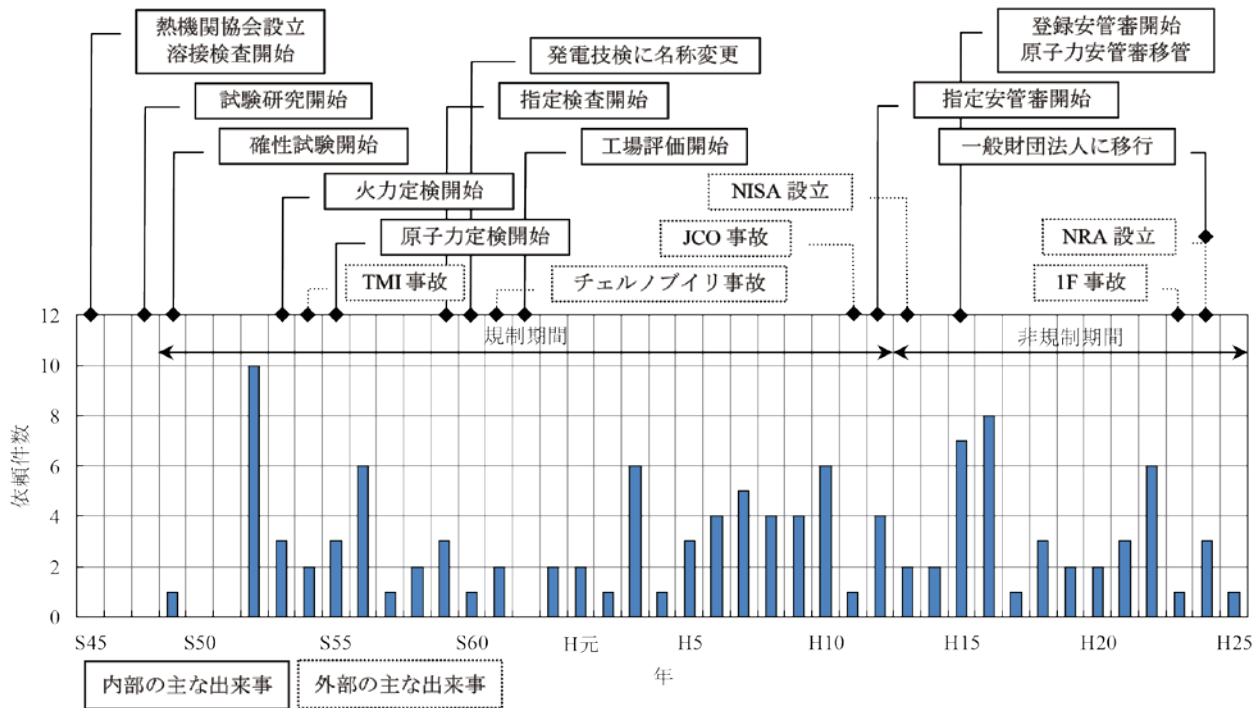


図1 確性試験の年別依頼件数と発電技検内外での主な出来事

制との関連はなくなっている。

新技術等に対する技術的妥当性を第三者として客観的に確認するため、依頼内容も供用期間中に適用されるものが多い。開始当初は予防保全に関する依頼が殆どであったが、平成 15 (2003) 年頃からは欠陥を残存させた状態での事後保全に関する依頼もあり、技術的な難易度も高まっている。

確性試験の多くは実用原子力発電所の補修技術に関する依頼であるが、その成果の多くは、一般社団法人 日本機械学会 (以下、JSME という) が発行している「発電用原子力設備規格 維持規格 (以下、維持規格という)」の補修章の規定として反映されている。その内でも多くの技術は、実機施工の実績を有しているが、維持規格の補修章は、原子力規制委員会 (以下、NRA という) に是認されていない。

## 2.1 規制期間

確性試験は、火力及び原子力の実用発電所への特殊設計認可申請の内容が技術的に妥当か否かを第三者として検討するために開始された。その後、当時の規制機関の行政指導により実用原子力発電所での定期検査で用いられる検査機器等 (データ処理装置を含む) が規格等の試験条件を満足しているかを確

認 (以下、検査機器確認という) することが追加された。この様に当時は第三者としてはあるが、規制の一部として実施されていた<sup>[6]</sup>。この期間は規制期間とも呼べるもので、昭和 49 (1974) 年から平成 12 (2000) 年の 27 年間である。この間の平均依頼件数は 2.85 件 / 年となっている。

## 2.2 非規制期間

平成 13 (2001) 年には規制機関として NISA が設立され、設立当時は新技術等の技術的妥当性について、NISA が自ら判断するとしていた。したがって、それまでの確性試験はその役割を終えたものと考えられた。しかし、NISA では新技術等については、「法令適用事前確認手続き」によることとしたため、確性試験は第三者としてこの申請の技術的内容が妥当かを事前に検討することに活用された。「法令適用事前確認手続きは、一般に「ノーアクションレター」といわれ、民間企業等が実現しようとする自己の事業活動に係わる具体的行為に関して、当該行為が特定の法令の規定の適用対象となるかどうかを、あらかじめ当該規定を所管する行政機関に確認し、その機関が回答を行う手続きとして、平成 13 (2001) 年 3 月 27 日に閣議決定された。

平成 24 (2012) 年には原子力の規制機関として NRA が、火力の規制機関として経済産業省内に商務流通保安グループ電力安全課がそれぞれ設立されている。原子力についての新安全基準等の新たな規制が施行されているが、その内容の詳細は明確ではなく、NRA の新技術等への取り組みの方針や技術的能力も明らかではない。

この期間は、非規制期間とも呼べるもので、平成 13 (2001) 年から平成 25 (2013) 年の 13 年間である。13 年間での平均依頼件数は、3.15 件/年となっており、僅かではあるが、規制期間より年あたりの平均依頼件数は増えている。このことは、非規制期間での確性試験の役割は、規制期間と同等以上であったことを示している。

### 3 確性試験の実施体制

確性試験は、依頼毎に検討内容に応じた専門分野の学識経験者等の委員により構成される確性試験委員会（以下、委員会という）を設置し、この委員会でも新技術等の技術的妥当性を第三者として客観的に確認している（検査機器確認は除く）。依頼者のノウハウやプラント情報を含んで検討する必要があるため、通常委員会は非公開で開催される。一般公開していないという意味での非公開であり、委員の他にも関係者がオブザーバとして委員会に参加している。規制に関連する新技術等の技術的妥当性を確認する場合は、オブザーバの一人として規制機関職員も委員会に参加している。オブザーバは委員会で見解を述べることができ、意見は委員会の検討に反映されている。

委員会で最終的にとりまとめる報告書は、委員会での検討結果をまとめたものであるため、委員、オブザーバ及び依頼者のみに配布される。報告書は、委員会の設置者である発電技検名で発行されるが、著作権は依頼者が有している。

近年では時代の要請もあり、委員会の開催状況は発電技検ホームページ（以下、HP という）で一般公開するようにしている。加えて、委員会の検討結果から依頼者のノウハウやプラント情報のみを除いてまとめた報告書も依頼者の了解後、HP で一般公開することで、プロセスの改善に努めている。

事務局を構成する発電技検職員は、国内外での規

格委員会における規格の作成・改正活動を通じて規格としての必要要件や説明性について理解しており、委員会での検討に際してサポートを行うことができる。また、発電技検職員は、発電所の溶接検査等を通じて機器や現場環境等についても理解しており、これらもサポート要素となっている。ただし、委員会での意思決定について、事務局は関与せず、委員の合議により最終判断がなされる。

確性試験の検討結果をまとめた報告書には、実機での施工を考慮した要領をまとめることとしている。実機適用までを想定した検討がなされる点についても、発電技検における確性試験ならではの付加価値といえる。また、事務局としては、40 年間にわたる確性試験の実施経験に基づいた、次の基本方針を代々引き継いでおり、これも特徴の一つといえる。基本方針はごく当たり前の内容ではあるが、常に身を持って実行することはなかなか難しい。

- ①新技術等の実機への施工によって、施工前の状態に悪影響を与えない。
- ②委員会での説明には、まず戦略を構築し、委員会での検討で承認を得たいものを明確にする。
- ③委員会での検討範囲や対象を明確にする。
- ④マイナス要素となる試験データや事象があった場合、委員会には正直にかつ積極的に提示し、委員会の判断を仰ぐ。
- ⑤委員との信頼関係を構築するように常に心がける。

### 4 確性試験の展望

確性試験は、開始当時から一貫して第三者として新技術等の技術的妥当性を確認している。

NRA が設立されてはいるものの、一部の地方自治体では、従来の様に NRA が認めれば、そのまま認める時代ではなくなっている。言い方を変えれば、文書上の権限は NRA が有しているものの、実質上の権限は地方自治体が有しているといっても過言ではない。

特に新技術等については、適用したい者自らが、NRA や地方自治体等の関係者に説明することが重要かつ必要な時代になったともいえる。

確性試験は、その開始の経緯から、規制との関連



が重視されてきた。しかし、新技術等の技術的妥当性については、規制か非規制かの区別は意味のないものである。このため、新技術等の技術的妥当性が確認されれば、以降は、手続きとして NRA に許認可を申請するバックデータとして活用するか、あるいは依頼者自らが新技術等の技術的妥当性の説明性を関係者に対して高めるために活用するかなど、確性試験結果をどの様に活用するかは依頼者の選択となる。

なお、確性試験結果については、依頼者が国内外で学術発表し、かつ、維持規格の補修章等にも反映されているが、グローバル化の現在では、海外での実機適用をスムーズに行うためには、米国機械学会規格等のデファクトスタンダードへの規格提案も必要な時代となってきた。

発電技検では、そのような活用の方向を選択できるようなスキームとして確性試験を提供している。

ただし、確性試験は、委員会を設置するため、ある程度の検討期間が必要となり、少なからず費用が発生する。このため、機動性が発揮しにくいという短所がある。これを改善するため、委員会を設置しない「第三者評価」というスキームも準備している。

この「第三者評価」というスキームでは、関連業務経験者等が依頼内容に対する確認を行うものであり、専門分野の委員による委員会を設置しない、従って、委員会の審議による検討は行わない点のみが異なっている。この関連業務経験者等については、まず発電技検職員から選定することになる。

## 5 おわりに

昭和 49 (1974) 年から確性試験を開始し、平成

25 (2013) 年には 40 年という節目の年を迎えた。確性試験は、時代により規制や非規制の相違はあるが、この間、118 件の新技術等について一貫して第三者としての立場で技術的妥当性について客観的に確認を行っている。

新技術等については、適用する者自らが NRA や地方自治体等の関係者に説明することが必要かつ重要な時代になってきたが、新技術等の技術的妥当性が確認された後は、手続きとして NRA への許認可申請の際のバックデータとして活用するか、あるいは自ら新技術等の技術的妥当性の説明性を関係者に対して高めるために活用するか等、確性試験結果をどのように活用するかは依頼者の選択となる。発電技検では、そのような活用の方向を選択できるようなスキームとして確性試験を提供している。

## 参考文献

- [1] 例えば、川部義邦、金尾正雄、宗木政一、中野恵司、国産および米国産超強度鋼の確性試験、鉄と鋼、第 59 年 (1973) 第 9 号、pp. 122 ~ 131
- [2] 例えば、日本国語大辞典、株式会社小学館、昭和 48 年 9 月 1 日
- [3] 機械工学英和和英辞典 : <http://ejje.weblio.jp/content/property+and+performance+qualification+test>
- [4] 発電技検 HP : <http://www.japeic.or.jp/gyoumu/kakusei/oshirase/oshirase.htm>
- [5] 亀山雅司、発電技検の確性試験について、技検レビュー、Vol. 8、2012、pp. 40 ~ 43
- [6] 発電技検三十年史、平成 12 年 7 月 14 日、財団法人 発電設備技術検査協会、pp. 187 ~ 200



佐藤長光



長谷川忠之

# 研修・講習事業の歩みと今後の展開

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

発電プラントは経済基盤を支える役割とライフラインの役割を担い、安全かつ安定に電気を供給しなければならない。このために発電設備の良質な製造品質と供用中の適切な維持管理が求められ、製造検査及び定期検査を通じて“安全かつ安定運転の継続”を確保している。例えば、各種非破壊試験を用いて、製造品質の管理では溶接欠陥等の製造欠陥を検出して補修・取替えにより良質な品質を確保する。また、定期検査ではき裂などの供用中の欠陥を検出して健全性評価を行い、運転継続又は補修・取替えの適切な処置を講じる。

このように“安全かつ安定運転の継続”の確保には信頼性の高い検査が不可欠である。信頼性の高い検査は、①検査手順、②検査装置、③検査員の技量のいずれもが高い水準でなければならず、一つでも欠けたら実現しない。近年の検査手順は研究・開発及び実機経験等で得た知見に基づき高度化が図られ、また、検査装置も高性能、高機能化が進み検査の信頼性向上に寄与している。今後、検査手順と検査装置は現在の水準から下がることはない。一方で、検査員は必ず世代交代が生じ、人的要因による検査水準の低下またはばらつきが懸念される。検査水準の低下とばらつきを抑えるためには、人材育成が大切であり、計画的かつ継続的な教育・訓練による円滑な技術伝承に取り組む必要がある。技術伝承は、プラント機器製造会社、発電設備を所有する会社等で積極的に取り組んでいる。しかし、技術伝承に係わる労力は大きく、担当する教育指導員も日々の業務との兼務で負担が大きいことも事実である。

当協会では、金属材料、溶接、非破壊検査技術に

関する調査研究及び火力、原子力発電設備の検査実務に長年携わってきた知識、経験を活かして検査業務に関する研修部門を設立し、第三者機関として研修・講習サービスを提供することで企業等の人材育成支援を行っている。ここでは、当協会の研修・講習業務の紹介及び今後の展開について述べる。

## 2 研修・講習業務の歩み

当協会は昭和 45（1970）年発足以降、発電設備の検査業務及び信頼性等に関する調査研究に携わり、検査実務と研究の両面で発電設備の安全確保に関するノウハウを蓄積してきた。現在、これまで培ってきた豊富なノウハウを活かし、検査に関わる人材育成を支援するために研修・講習業務を展開している。

### （1）溶接・非破壊検査技術研修

昭和 47（1972）年に発電設備の信頼性等に関する調査研究を開始、昭和 62（1987）年に調査研究の拠点として鶴見試験研究センターを開設、平成 16（2004）年に溶接・非破壊検査技術センター（NDE センター）に名称を改めて現在に至る。この間、一貫して発電設備に使用する材料、溶接、非破壊試験に関する自主調査研究、国及び民間からの委託調査研究に従事し発電設備の安全確保に貢献してきた。

ここで蓄積した多くの専門的な知識、経験を検査に関わる人材育成に提供するために NDE センターへの改称と合わせて平成 16 年に溶接・非破壊検査アカデミー（現在の研修センター）を開校し、溶接及び非破壊試験に関する定期研修、委託研修、当協会の職員向けの資格取得及び技量習得研修を開始した。また、平成 18（2006）年に PD 認証機関の承認を得て PD 研修センター<sup>(※)</sup>を溶接・非破壊検査

表1 溶接・非破壊検査技術研修実績（平成18年～平成25年）

区分	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25
定期研修 <sup>注1)</sup>	6回	6回	5回	4回	7回	2回	6回	3回
	67名	121名	108名	98名	145名	127名	105名	79名
個別研修 <sup>注2)</sup>	35回	44回	50回	34回	45回	44回	49回	37回
	189名	179名	208名	173名	278名	211名	207名	161名
合計	41回	50回	55回	38回	52回	46回	55回	40回
	256名	300名	316名	271名	423名	338名	312名	240名
備考	上段：研修回数 下段：受講者数 注1)：溶接関連の規格基準講座（火力，原子力）を含む 注2)：国，民間委託の総数							

アカデミー（現在の研修センター）に付設し，原子力発電所の機器に生じた応力腐食割れ（SCC）等のき裂深さ寸法を測定するPD技術者の技量維持，向上のための研修を行っている。平成18年度～平成25年度までの研修実績（PD研修を除く）を表1に示す。

(※)：超音波探傷試験システムの性能実証に関する認証制度（NDIS 0603）により認証されたPD技術者に課せられた，き裂の深さ寸法測定に関する研修を実施する機関

### (2) 事業者検査講習

長年にわたる原子力・火力発電設備の検査実務の実績により，事業者検査，安全管理審査等に関して豊富な経験，ノウハウを培ってきた。また，発電設備に関する国内外の規格・基準等の制改訂に直接関わり，動向あるいは解釈に精通している。これらの知識，経験を事業者検査に関わる人材育成のための講習会を習得レベル（基礎，実践）に合わせて開催，また，要請により個別講習にも応じている。

## 3 研修・講習事業の紹介

### 3.1 研修・講習事業の概要

#### (1) 研修・講習の概要

平成26（2014）年の研修・講習の概要を表2に示す。本表に示すように溶接・非破壊検査技術研修，事業者検査講習及び学術セミナーの3つに分類し，プログラム，日程，場所等を決めて実施する定期（または合同）コースと相手先の希望に応じてプログラム，日程，場所等を柔軟に設定した個別・講師派遣

型研修・講習を提供している。このうち溶接・非破壊検査技術研修の個別・講師派遣型では，非破壊試験機材を持ち込んで行っている。

表2 研修・講習の概要

発電技 検	(1) 溶接・非破壊検査 技術研修	(a) 定期研修（6コース）
		(b) 個別・講師派遣型研修 （オプションルコース）
	(2) 事業者検査講習	(a) 合同講習（3コース）
		(b) 個別・講師派遣型講習 （オプションルコース）
	(3) 学術セミナー	(a) 火力技術セミナー
		(b) 原子力技術セミナー

#### (2) 研修・講習実施体制

研修・講習の実施体制を図1に示す。研修・講習全体の運営を溶接・非破壊検査技術センター内の研修センター及び管理グループで総括し，具体的な計

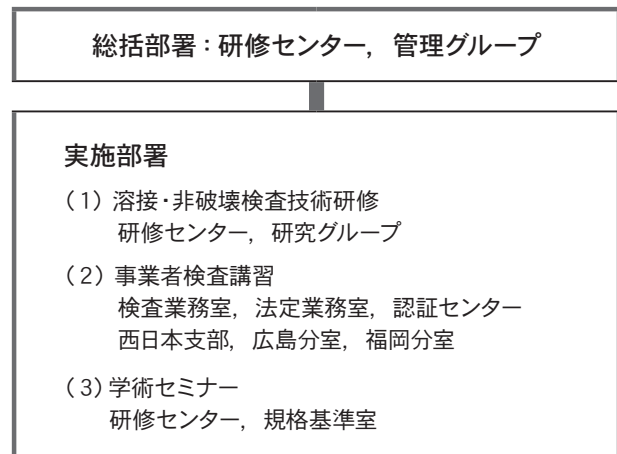


図1 研修・講習体制



画、テキスト作成、研修・講習の実施は研修ごとに力量を持つ者で構成する実施部署で行う。また、定期的に研修・講習責任者会議を開催し、研修・講習の実施状況に応じて、より充実した研修・講習の提供に向けたフィードバックを行う体制を構築している。

### 3.2 溶接・非破壊検査研修

溶接・非破壊検査技術研修内容の概要を以下に紹介する。

#### (1) 定期研修

表3に溶接・非破壊検査技術研修の定期研修を示す。定期研修は、超音波探傷試験に関する6コースを開催している。そのうち5コースは現場実践形式の研修であり、欠陥検出及び欠陥評価の実務経験のある講師が解説、指導する。残りの1コースはJIS Z 2305「非破壊試験－技術者の資格及び認証」に基づく超音波探傷試験レベル2技術者の1次試験対策の研修であり、長年にわたり1次試験対策に関わり受講者の80%以上を合格に導いてきたベテラン講師が指導する。

#### (2) 個別・講師派遣型研修（オプションコース）

本研修は、相手先の要望に応じ柔軟に研修内容、

実施時期及び期間、実施場所を定めて実施する研修であり、溶接・非破壊検査技術研修の実績の多くは個別・講師派遣型研修である。

この研修は相手先の要望によるため、非破壊試験だけで構成する研修から金属材料、溶接、非破壊試験、健全性評価（破壊力学手法による評価）で構成する等、研修内容は多様であり、また、非破壊試験の実習の他に材料調査、簡単な溶接実習にも対応している。研修日程も1日から5日程度にわたり対応することもある。個別研修の一例を表4に示す。

### 3.3 事業者検査講習

事業者検査講習内容を以下に紹介する。

#### (1) 合同講習会

合同講習会はいずれも火力設備を対象とした3コースを開催している。

##### (a) 溶接事業者検査関係者向け(火力)基礎コース

経済産業省の通達文書「電気事業法第52条に基づく火力設備に対する溶接事業者検査ガイド」で示す「溶接事業者検査に従事する要員に対する「必要な力量」の例」として「15」の必要な力量例が示されている。本講習会は「必要な力量が持てるような教

表3 溶接・非破壊検査技術研修「定期研修」

日程	研修名	対象	研修内容
検出	きず検出 (D-1) 実技コース	(一般工業分野) ・斜角探傷技術の習得を目指す人	・JIS Z3060 に基づく実践形式の研修規格、探傷手順を解説し、鋼溶接部の欠陥（人工、疲労き裂）検出を指導する。
	欠陥検出 (D-2) 実技コース	(原子力分野) ・初めて従事する人 ・久しぶりに従事する人	・JEAC4207 に基づく実践形式の研修規格、探傷手順を解説し、鋼溶接部の欠陥（人工、疲労き裂）検出を指導する。
	欠陥検出 (D-3) 実技コース	(原子力分野) ・1ランク上を目指す人	・JEAC4207 に基づく実践形式の研修ステンレス鋼溶接部の応力腐食割れ検出を指導する。
サイジング	欠陥寸法測定 (S-1) 実技コース	(基礎) ・基礎知識の習得を希望する人	・NDIS2418 に準拠した実践形式の研修端部エコー法、フェーズドアレイ技術による測定原理、測定手順を解説し、鋼溶接部の欠陥（人工、疲労き裂）寸法測定を指導する。
	欠陥寸法測定 (S-2) 実技コース	(応用) ・1ランク上を目指す人 ・PD 資格の取得を目指す人	・JEAC4207 に基づく実践形式の研修規格構成、モード変換波法、端部エコー法、フェーズドアレイ技術による測定原理、測定手順を解説し、ステンレス鋼溶接部の応力腐食割れの寸法測定を指導する。
資格取得	UT レベル2 1次試験対策研修	UT レベル2取得を目指す人	・重要問題を取り上げた集中講義の実施。

育・訓練」の補助的な位置づけで、溶接事業者検査に従事する要員に対し、必要な知識等についてより理解を深めていただけるよう分かりやすく解説する。

(b) 溶接事業者検査関係者向け（火力）実践コース

上記（a）からさらにスキルアップを目指す人を対象に設計審査の手法、溶接構造物の図面及び溶接部詳細一覧表を用いた設計審査の演習、検査記録のチェック方法等を多数の溶接事業者検査計画書のサンプルにより実践的に学び、溶接設計に関するチェックポイントや検査記録の審査ポイント（間違いが生じやすい箇所等）について分かりやすく解説する。

(c) 使用前自主検査及び定期事業者検査関係者向け（火力）

発電用火力設備の使用前自主検査及び定期事業者検査で照合する発電用火力設備の

技術基準及び電気事業法施工規則で規定する十分な方法による検査（検査の方法の解釈）に関する考え方を分かりやすく解説する。

(2) 個別・講師派遣型研修（オプションコース）

上記（1）の（a）で述べた「必要な力量が持てるような教育・訓練」を相手先の要望（日程、実施場所等）に応じて個別に講習を行っている。

### 3.4 学術セミナー

学術セミナーは、発電設備に係わる技術者の交流の場を提供し、発電設備の規格・基準の現状把握と今後の動向に関する討論を目的として平成16年度に開講した講座を引き継ぎ、平成26年度にプログラムをリニューアルして名称を改めたものである。セミナーは火力技術セミナーと原子力技術セミナーの2コースを開講、それぞれに著名な先生をお招きした特別講演の他、火力コースに関しては溶接関連、原子力コースに関しては維持関係及び海外展開を中

表4 非破壊検査中級コース(工事監理員育成, 2日コース)

日程	研修内容	時間
1日目	<b>【金属材料】</b> ・金属材料の基礎（金属材料の種類と特徴） ・金属材料の破壊（破壊形態とメカニズム）	2日 (16時間)
	<b>【溶接技術】</b> ・溶接施工・管理（溶接材料、手順の管理、溶接変形防止、溶接欠陥の種類と防止等）	
	<b>【非破壊試験－浸透探傷試験(PT)】</b> ・浸透探傷試験（原理と特徴） ・試験体を用いた探傷実習と記録作成 ・記録審査におけるチェックポイントの解説	
	<b>【非破壊試験－磁粉探傷試験(MT)】</b> ・磁粉探傷試験（原理と特徴） ・試験体を用いた探傷実習と記録作成 ・記録審査におけるチェックポイントの解説	
2日目	<b>【非破壊試験－放射線透過試験(RT)】</b> ・放射線透過試験（原理と特徴） ・放射線透過写真の観察ときずの等級分類 ・記録審査におけるチェックポイントの解説 ・放射線防護に関する解説	
	<b>【非破壊試験－超音波探傷試験(UT)】</b> ・超音波の原理と特徴 ・超音波探傷試験の基礎（垂直法及び斜角法） ・超音波探傷装置の操作方法の解説、指導 ・垂直法による厚さ測定の実験 ・斜角法による欠陥検出及び記録（解析図）作成の実験 ・記録審査におけるチェックポイントの解説	

心としたプログラムを計画している。

### 3.5 PD研修

平成18年度から開始したPD研修の累積実績を表5に示す。これまでに延べ42回・55名について研修を実施してきた。

表5 PD研修実績

年度	研修回数	人数
2006	2	2
2007	10	12
2008	7	10
2009	7	9
2010	6	7
2011	2	3
2012	5	6
2013	3	6
延べ	42回	55名

## 4 今後の展開

### (1) 工事監理員向け総合研修の提供

平成26年度に協会内一体の研修・講習運営体制を構築した。これに伴い、別々に行ってきた溶接・非破壊検査技術専門研修と規格・基準体系に従った事業者検査講習を融合した工事監理員向け総合研修を提供する環境が整った。今後、総合研修サービスを提供し、これまで以上の充実した人材育成支援を展開する。

### (2) 非破壊試験資格取得のサポート強化

現在、「JNSDI UTレベル2 1次試験対策研修」を受験時期直前に開催している。これまで協会職員を含めた受講者の合格率は80%を超え、非破壊試験資格取得に貢献してきた。UTレベル2の1次試験対策研修の実績から他の種目の対策研修のニーズも高まっているため、非破壊試験資格取得をサポートする研修強化を目指す。

### (3) 検査技量の維持向上に貢献する訓練機関

非破壊検査に関わる技量の基礎的な部分はJIS Z 2305に基づく認証で担保されるが、各工業分野に展開する場合、分野ごとに検査目的、検査手順等が異なるため、分野ごとに教育・訓練を行って技量向上

を図っている。この検査技量の維持向上は検査会社、プラント機器製造会社等で定めたプログラムに基づくことが多く、会社ごとのプログラムに格差が生じたり、対外的な説明性または透明性が問われることもある。これらを解消し、また各社で負担となる試験設備(会場、訓練用試験体等)の貸与を含めた教育・訓練を肩代わりする中立的訓練機関の構築を目指す。

### (4) 検査技術支援

当協会では、原子力発電所機器の検査で疑義が生じた結果について、第三者機関として公正に評価してきた実績がある。今後も検査結果に疑義が生じた場合の技術相談、検査結果に透明性が求められる場合の中立的立場での技術支援を積極的に行う。

### (5) 溶接・非破壊検査技術研修教材(eラーニングコンテンツ)の提供

当協会では、超音波探傷試験の研修教材を相手先のeラーニングシステムにインストールすることで教材を提供した実績がある。

現在行っている溶接・非破壊検査技術研修では、限られた期間で理解を深めてもらうように努めているが、研修後一定期間を経ると知識が薄れていく。また、何かの機会に素早く知識を引き出したいことがある。このように復習または調査に速やかに対応する便利なeラーニング教材の提供を行っていく。

## 5 まとめ

平成16年に溶接・非破壊検査アカデミーを開校、研修を開始してから10年の節目を迎え、これまでの研修・講習の歩み、現在の活動及び今後の展開についてまとめた。

今後も社会を取り巻く環境を注視し、時代に合った研修・講習サービスを提供し、多くの方から便利な中立研修機関として認められるように活動していく。



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	クリープポ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ポ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
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 <sup>th</sup> 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 <sup>th</sup> 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精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	Vo1.26-28(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) のテンパービ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 ホテル阪急エクス 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
	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	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
古川 敬 他			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 研究センター	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 超音波の首場の観察
	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
	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カスクの 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 <sup>th</sup> 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 <sup>th</sup> 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
	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 Gyeongju KyoYuk MunHwa HoeKwan, Gyeongju, 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
	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 <sup>th</sup> 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	

非破壊	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ミュレーション
			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 $\gamma$ 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
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：「高温高压純水環境下の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」
衆 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。 今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「鋳造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

---

今回の「技術レビュー」で発刊10冊目となりました。これもひとえに皆様のご支援、ご協力のお蔭です。この場を借りて御礼申し上げます。

十年一昔と申しますが、この10年で世の中はめまぐるしく変わってきました。震災と未曾有の大災害の発生、原子力発電所をとりまく環境など、10年前には考えられなかったことが多々ありました。そういえばスマホも普及していなかったし、消費税率も5%でしたね。そして、これからも時代とともに速やかに、あるいは緩やかに変わっていくのでしょうか。

当センターは、これからも皆様のお役に立てるよう進化して参りますので、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.10 2014 (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。