

溶接・非破壊検査技術センター

技術レビュー

Vol.12 2016

研究報告

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

JAPEIC
JAPAN POWER ENGINEERING AND INSPECTION CORPORATION

一般財団法人 発電設備技術検査協会

巻頭言	<u>発電設備の検査に関する最近の話題についての個人的雑感</u> 2 大阪大学教授 望月 正人
ご挨拶 4 理事長 藤富 正晴
トピックス	<u>NDEシンポジウム2015の開催</u> 5 <u>日本海事協会との共同研究成果がホームページに公開</u> 5
研究報告	欠陥検出評価技術に関する研究
	<u>低磁化強度漏洩磁束法による裏面減肉評価</u> 6 程 衛英
	<u>EMATが発生する超音波の伝搬の有限要素法シミュレーション</u> 10 山本 敏弘
	<u>超音波フェーズドアレイ法と従来の斜角探傷法によるきず指示の比較</u> 20 上山 芳教, 古川 敬
	<u>超音波探傷試験技術者の探傷技量に及ぼす教育・訓練の有効性に関する検討</u> 26 平澤 泰治, 小林 輝男, 牧原 善次, 南 康雄
	溶接継手の健全性確保に関する研究
	<u>SUS316L系溶接金属の高温純水中に発生する応力腐食割れ形態</u> 32 西川 聡
	技術基準・規格化関連調査
	<u>「発電用火力設備の技術基準の解釈」に関する最近の改正について</u> 36 長谷川 忠之
	<u>火技解釈での放射線透過試験方法と判定基準の根拠</u> 41 佐藤 長光
	<u>非破壊試験の判定基準の安全裕度に関する考察</u> 52 大石 勇一, 長谷川 邦夫
成 果	(1) 出願特許一覧 56 (2) 学協会誌等への論文発表 57 (3) 学協会等への口頭発表 61 (4) 論文等表彰 65

発電設備の検査に関する最近の話題についての個人的雑感



大阪大学教授

望月 正人

平成26(2014)年に閣議決定されたエネルギー基本計画によれば、「国民生活と産業活動の血脈であるエネルギーの安定的な確保は、国の安全保障にとって不可欠なものであり、我が国にとって常に大きな課題であり続けている」と、また、「国際的な地政学的構造の大きな変化に直面する中で、我が国のエネルギー安全保障を巡る環境は、厳しさを増してきている」ともあり、国民生活と産業活動に必要な不可欠な電気を供給するためには、再生可能エネルギーを中心とする新エネルギー源の導入加速はもとより、既存の発電設備の有効活用・長寿命化や需給バランスに応じた新設・増設の重要性が以前にも増して高まっている。

発電設備を安全かつ効率的に運用するためには、有用性の高い検査を適切な時期に実施することが重要である。検査の中でも、特に何かと問題になることの多い溶接部の検査はもちろんのこと、設備全般に渡る重要部位の非破壊検査、さらには運転中の状態監視保全を適切に実施することが肝要なことは論を待たないが、ここでは、火力発電設備と原子力発電設備について、最近の検査関係のトピックス、その中でも検査間隔を中心に些末ではあるが個人的雑感を述べたい。

火力発電設備では、代表的設備の高稼働時における点検周期として、昭和62(1987)年に、それまでは定期検査周期はボイラー設備1年、蒸気タービン設備2年であったところから、定期検査時期変更承認申請制度により検査周期の延長(ボイラー+1年、蒸気タービン+2年まで)が認められるようになって以降、平成7(1995)年には、検査インターバルがボイラー設備は2年以内、蒸気タービン設備は4年以内に改められ、平成11(1999)年の検査周期延長制度導入(ボイラー+2年まで、蒸気タービン+3月まで)を経て、平成23(2011)年には、東日本大震災に伴う特例措置として、定期事業者検査時期を、ボイラー、蒸気タービンの両者とも、検査周期延長制度分に加えてさらに+2年の延長が可能になっている。

この震災特例を適用した発電プラントの長期運転時の成績が適用前と同等ないしはむしろ良好なことから、今後、電力システム改革・第3段階の電気事業法改正を受けて、ボイラー、蒸気タービンともに定期検査時期が最大6年に延伸されようとしている。定期検査時期は事業者の保安力に応じて審査され、異常兆候を早期に発見・把握する態勢や、運転中検査の導入などが、高度な運転管理に関する追加的要件としての審査基準になる見込みのようである。なお、今回の電気事業法改正により、溶接安全管理審査が廃止されることとなっている。

一方、原子力発電設備では、平成21(2009)年に、保全プログラムを基礎とする検査制度が導入され、一律の検査からプラント毎の特性に応じたきめ細かい検査に移行することにより、定期検査の間隔については従来の13カ月を超えない時期から、13カ月を超えない時期、18カ月を超えない時期、24カ月を超えない時期の3つの間隔について選択されることとなった。その後、東北地方太平洋沖地震を経て、平成25(2013)年に新規規制基準が施行され、定期検査間隔の選択制度そのものは継承されてはいるものの、発電用原子炉設置者さんの立場からすれば、まずは再稼働優先、このところ検査間隔に関する議論はあまり見受けられないように聞き及ぶ。

ところで、原子力規制委員会においては、本年から検査制度の見直しに関する検討チームが設置され、IAEA安全基準や米国の原子炉監督プロセス(ROP)、IAEAの総合規制評価サービス(IRRS)での指摘事項、海外の規制機関の事例、原子力事業者などの保安活動の現状などを踏まえつつ、監視・評価の位置付けや方法、得られた所見の内容に応じた対応の多様化などの制度設計案を作成することとなっている。今後、原子力事業者自らによる高い安全確保の水準を目指した取組みや継続的改善の促進、事業者側・規制機関側の双方における透明性・予見性の確保を前提に、平成30(2018)年中に運用のための規則や運用ガイドを作成し、試運用を経て実運用のための成案が確定される見込みのようである。なお、これらの監視・評価の実施に当たっては、リスク情報の活用や、原子力事業者の安全確保の実績の反映も予定されていることから、新制度の下では、定期検査間隔を大きく取ることによって安全性が向上すると言うような、従来では禁忌と見なされていた次元での種々の議論も出現していくものと思われる。

このように、火力発電設備、原子力発電設備ともに、それぞれの特徴に応じた「よりよい」検査制度を目指した取り組みがなされており、今後も、産業界、官界、学术界、中立研究機関、学協会などが、継続的にそれぞれの立場で貢献していくことが重要であるが、それぞれ個々が自身の専門分野・得意分野のみならず、もう少し幅広に、さらにできれば全体の相場観をある程度は理解した上で議論に参画していくことが、さらに「よりよい」結果をもたらすことに繋がるであろうし、当方自身もそのような意識を常に強く持ち続けなければと思っている。

一般財団法人発電設備技術検査協会の事業内容は、安全管理審査、発電設備検査、ISO認証、製品認証、確認試験、規格基準調査、確性試験、試験研究、研修・講習、PD研修、等と多岐にわたるが、それらの技術基盤については溶接・非破壊検査技術センターが屋台骨を担うところ大かと思う。協会の幅広い事業すべての重要性に鑑み、単に試験研究・技術開発分野のみならず、NDEセンターの広範囲での益々の活躍と発展を期待したい。

ご挨拶

一般財団法人 発電設備技術検査協会
理事長

藤富 正晴



2015年度における協会、溶接・非破壊検査技術センター（NDEセンター）の研究活動と成果を技術レビュー Vol.12として取りまとめましたのでご高覧いただきたいと思います。

当協会は、1970年の創立以来、発電設備の品質の維持・向上及びこれらに係る技術の進歩、発展を図り、人命及び財産の安全の確保に寄与するとともに、電気事業及び電機工業の健全な発展に資する事を目的として努力してまいりました。今後とも、顧客の皆様が直面する多様な課題について丁寧な対応に努め、審査、検査、認証、規格基準、非破壊検査・研修・講習の業務分野や、規格基準における自主調査、試験研究における自主調査研究で、更に一層確実に業務を遂行してゆく所存です。

「技術が支える安全と信頼」を基本理念とし、エネルギー環境が、内外で大きく変化している時代の流れの中で、新たなフロンティアにも対応できる実力をつけ、技術品質が高く、設置者・メーカー・国から頼りにされ、安定した経営基盤を持つ発電技検の実現に向け組織を挙げて顧客の皆様が直面する多様な課題に、丁寧に対応してまいりたいと思います。

試験研究における自主研究では、NDEセンターにおいて、①超音波探傷シミュレーション／可視化技術、②フェーズドアレイ法、ガイド波などの超音波探傷技術、③電磁気シミュレーション／探傷技術、④残留応力・塑性ひずみ評価技術、⑤耐熱鋼余寿命予測技術、⑥非破壊検査e-ラーニング教材などのセンターが保有しているコア技術をより一層深化させ、現場ニーズに適合できるように研究活動に取り組んできました。また、新たなコア技術として、非線形超音波計測技術、高感度磁気計測技術、電磁超音波探触子のシミュレーション技術の研究活動に取り組んでいます。

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

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

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

NDEシンポジウム2015を開催しました。

平成27年11月18日（水）

東京大学
山上会館大会議室

当協会は、平成27年11月18日（水）に東京大学山上会館大会議室において、NDEシンポジウム2015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、発電設備の安全と信頼性を維持し安定的に運転していくためには、溶接継手部を含めた構造物の健全性を確保することが必要不可欠であり、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、構造健全性をより一層確実なものに高めていくことが重要という趣旨に基づいて企画したものです。

当協会理事長の藤富より開会の挨拶が行われた後、2件の基調講演が行われました。東北大学の三原毅教授より「大変位超音波送信技術の研究と超音波探傷応用」と題して、き裂端部エコーの識別性向上技術として大振幅超音波を入射し発生するサブハーモニック波を用いた超音波探傷技術についてご講演頂きました。続いて、徳島大学の西野秀郎教授より「ガイド波による欠陥サイズ定量に関する試み」と題して、ガイド波を用いた減肉評価技術として反射挙動の数学モデルとその実験的検証から逆問題解析により減肉形状を推定する方法等についてご講演頂きました。

第一部応力ひずみ測定・解析技術のセッションでは、招待講演として日本原子力研究開発機構の秋田



講演される三原教授



講演される西野教授

氏より「中性子・放射光 X線回折による応力測定技術」、大阪府立大学の柴原准教授より「最新の溶接力学シミュレーション技術を用いた残留応力解析」についてご講演いただきました。当協会から「二次元検出器を用いた X線回折によるひずみ測定」について報告いたしました。

第二部産業インフラの非破壊評価技術のセッションでは、特別講演として関西エックス線（株）の永田氏より「ハイパワーガイド波を活用した埋設配管探傷技術の開発」についてご講演いただきました。当協会から「ガイド波によるエルボー部探傷への取り組み」について報告をいたしました。

日本海事協会との共同研究成果が 同協会のホームページに公開されました。

一般財団法人日本海事協会と常石造船株式会社との共同研究「カーゴホールド側に発生した疲労き裂に対する超音波探傷の研究開発」の研究成果が日本

海事協会のホームページ (<http://classnk-rd.com/index.html>) に公開されました。

低磁化強度漏洩磁束法による裏面減肉評価

Low Level Magnetized Magnetic Flux Leakage Testing of Back-side Thinning

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英

This study focused on the very low-field region of the initial magnetization curve and developed a method to inspect and evaluate back-side wall-thinning on a ferromagnetic test object by using very low strength magnetized magnetic flux leakage testing. The principle of the method was derived based on the magnetic circuit theory, and a parameter named as differential magnetic-leaking reluctivity was found to be a linear function of the remaining thickness of a ferromagnetic steel plate with thinning on the back-side. This approach was verified by electromagnetic numerical simulation, and highly sensitive Magneto-Impedance sensor utilized measurements. Preliminary measurements demonstrated that it is possible to measure and estimate the thicknesses of ferromagnetic plates using very low-level magnetized magnetic flux leakage testing, suggesting the applicability of using this approach to inspect and evaluate over a sufficiently large area back-side thinning.

Keywords *Magnetic flux leakage testing, low-field, low strength magnetization, wall thinning, magneto-impedance sensor, numerical simulation*

1 はじめに

強磁性鉄鋼構造物に発生した損傷（腐食や欠陥、材質劣化）の磁気探傷試験は、強磁性被検体が磁化されたとき、表面または表面直下の損傷によって磁力線の流れが乱され、被検体表面上に現れた漏洩磁束を検知することにより、表面や表面直下の損傷を検出する方法である。漏洩磁束量が被検体の磁化程度に依存しているため、通常の漏洩磁束法では、被検体の磁化特性に応じて、被検体に数百～数千 A/m (Ampere/meter) 程度の磁界を加え、被検体内部の磁束密度が該当材料の飽和磁束密度の約 0.7～0.8 倍になるよう磁化させる必要がある（通常の鉄鋼材料では 1.0～1.4 tesla 程度である）^[1]。裏面損傷の検出においては、更なる強力な磁化が必要である。被検体をこのような高磁界・高磁束密度レベルに磁化させるために、大起電力を供給できる磁化装置（磁化器）と電源が必要である。例えば、電磁石を用いた極間法で被検体を磁化させる場合、許容電流が大きく且つ多くの巻き数を有する励磁コイルと大容量

の電源装置が必要である。よって、磁気ヘッドが大型化・重量化され、現場操作に負担を与える一方、検出の空間分解能が低い、コイルが発熱するなどの問題も現れる。更に、検査時の強力な磁化によって被検体が磁化されるため、検査後消磁するプロセスが必要となり、検査の効率が低下してしまう。また、従来の漏洩磁束法は漏洩磁束信号自身から損傷を評価するが、簡易かつ定量的に漏洩磁束探傷信号から損傷を評価する方法はまだ確立されていない。

本研究は、空気の透磁率がゼロではなく、磁束は必ず空気中に‘漏れる’こと、極小磁界付近では材料の透磁率が磁界強度によって変化しないこと、また、磁界の接線成分が連続であることに基づいて、磁化特性の低磁界領域に着目し、低電流の直流或いは低周波交流電流を磁化器の励磁コイルに流して試験体を弱く磁化させ、高感度磁気センサを用いて空気中に漏れる微弱な磁束密度信号を検知することによって、裏面減肉を検知・評価する。

2 低励磁強度漏洩磁束法による裏面減肉検査の原理

厚さTの強磁性体板に裏面減肉が発生して、減肉箇所の厚さはtになると仮定する。図1に示す極間法を用いて減肉を検査する場合、コの字型の磁気コアが直流或いは低周波交流電流を流す励磁コイルに巻かれ、被検体の上に置かれて磁気回路を形成し、被検体を磁化する。

磁気回路全体のリラクタンスはヨーク、空気ギャップと試験体の三部分で構成される、

$$R = R_{core} + R_{gap} + R_{TP} \quad (1)$$

$$= \frac{l_{core}}{\mu_{core}A_{core}} + \frac{l_{gap}}{\mu_0 A_{gap}} + \frac{l_{TP}}{\mu_{TP}A_{TP}}$$

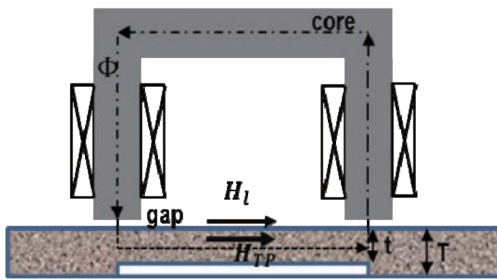


図1 極間磁化法による減肉評価

ここで、 μ 、 l と‘A’がそれぞれ透磁率、磁気パスの長さ及び断面積を表す。

磁化器の起電力はコイルの巻き数nと流す電流iの積のniであり、磁気回路に流す磁束Φはni/Rである。磁気回路中に流す磁束が連続であるため、経路中の漏洩を無視する場合、磁気コア、空気ギャップ、及び被検体断面に流す磁束は等しい。磁束が被検体の断面に均一に分布しているならば、被検体中の磁束密度と磁界強度は下記の式で求められる。

$$B_{TP} = \frac{\Phi_{TP}}{A_{TP}}, \quad H_{TP} = \frac{B_{TP}}{\mu_{TP}} \quad (2)$$

磁界の接線成分が連続であるため、図1に示す試験片中の磁界強度 H_{TP} は試験片表面に漏れる磁界 H_l に等しい。

$$H_l \approx H_{TP} \quad (3)$$

ヨークと空気ギャップのリラクタンスは試験片の肉厚によって変化しないため、それらの和を R_0 で記入するならば、式(1)は以下の形に書きかえる。

$$R = R_0 + R_{TP} = R_0 + \frac{l_{TP}}{\mu_{TP}A_{TP}} \quad (4)$$

式(4)を式(2)に代入すると、

$$H_l \approx H_{TP} = \frac{B_{TP}}{\mu_{TP}} = \frac{ni}{\left(R_0 + \frac{l_{TP}}{\mu_{TP}A_{TP}}\right)A_{TP}\mu_{TP}} \quad (5)$$

が得られる。

磁化電流iと漏洩磁束信号 $B_l (= \mu_0 H_l)$ をそれぞれ横軸と縦軸にとり、「磁化電流～漏洩磁束密度」図を描く。更に、以下の式でその傾斜を計算する。

$$\gamma = \frac{\Delta i}{\Delta B_l} \quad (6)$$

ここで、磁化電流が0になるときの傾斜

$$\gamma|_{i=0} = \frac{i}{B_l} \quad (7)$$

を初期磁気漏洩抵抗率と定義する。Rayleighによって、低磁界強度の場合の透磁率が^[2]

$$\mu(H) = \mu_{i0} + \nu H$$

で近似できており、 $\mu(H)|_{H \rightarrow 0} = \mu_{i0}$ のため、初期磁気漏洩抵抗率は

$$\gamma_{in} \approx \frac{i}{\mu_0 H_{TP}} = \frac{R_0 \mu_{i0}}{n \mu_0} A_{TP} + \frac{l_{TP}}{n \mu_0} = a A_{TP} + b \quad (8)$$

と書ける。ここで、 $a = \frac{R_0 \mu_{i0}}{n \mu_0}$ 、 $b = \frac{l_{TP}}{n \mu_0}$ 。

減肉が十分広い範囲に発生する場合、クロスセクション面積の A_{TP} が減肉厚tに比例しているため、式(8)は式(9)に書き換えられる

$$\gamma|_{i=0} = \hat{a}t + b \quad (9)$$

したがって、初期磁気漏洩抵抗率は減肉厚に比例しており、初期磁気漏洩抵抗率から減肉厚を評価できると考えられる。

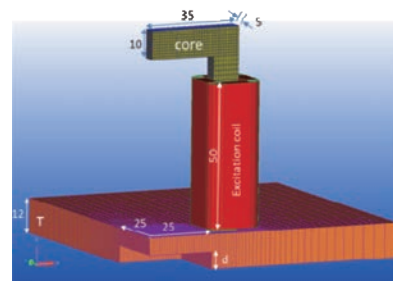


図2 解析モデル(1/4領域)

3 電磁気シミュレーションによる検証

電磁気シミュレーションを用いて2章に述べた初期磁気漏洩抵抗率と減肉厚の関係を検証する。試験片厚Tは12mm、減肉が試験片裏面の50mm×50mm×dに発生すると仮定した。減肉厚tはそれぞれ10.8mm、

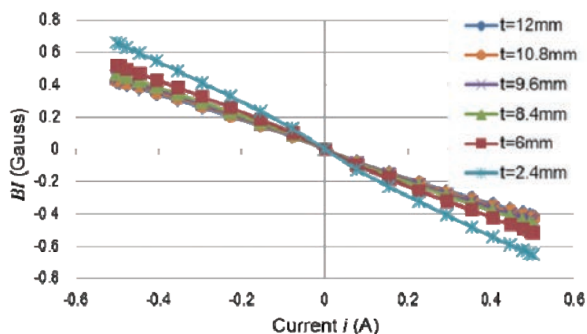


図3 各減肉試験片の「励磁電流～漏洩磁束密度」プロット

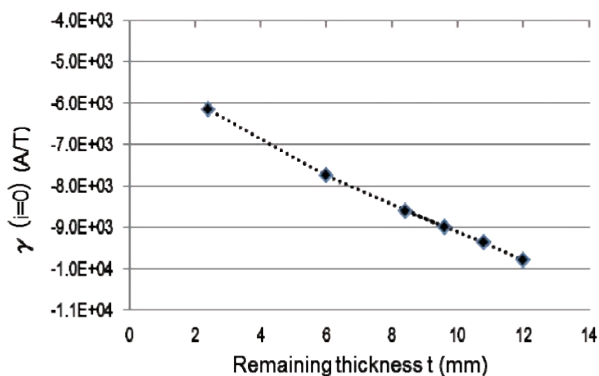


図4 シミュレーションで得られた減肉試験片の初期磁気漏洩抵抗率と残肉厚の関係

9.6mm, 8.4mm, 6mm, 2.4mm である。図2に空気を除いた1/4解析領域を示す。周波数0.02Hz, 1A p-pの交流電流が励磁コイルに流れ、試験体を磁化する。

初期磁化曲線を用いて非線形シミュレーション解析を行い、両極中間点上部の漏洩磁束密度を計算した。図3は各減肉試験片の「励磁電流～漏洩磁束密度」プロットである。そこから式(7)を用いて初期磁気漏洩抵抗率を求め、初期漏洩抵抗率と残肉厚の関係を図4にまとめた。初期磁気漏洩抵抗率は残肉厚の線形関数であることを示した。

4 基礎試験：低励磁強度漏洩磁束法による強磁性鋼板の板厚評価

2章に述べた原理に基づいた低励磁強度漏洩磁束法による減肉検出・評価の基礎試験として、強磁性SB410鋼板の板厚測定を行った。板は100mm×100mmであり、板厚はそれぞれ10mm, 8mm, 6mm, 4mm, 3mmである。

0.6 Ampere p-p(peak-to-peak), 周波数1Hzの交

流電流を図1に示す小型ヨーク型電磁石の励磁コイルに流し、極間法でSB410鋼板を磁化した。極間中心に高感度のMIセンサ(MI-CB-1DM)^[3]を設置して漏洩磁束密度信号(電圧信号)を収集した。また、励磁コイルに抵抗を直列に接続して抵抗にかかる電圧を取り、磁化電流信号を収集した。励磁電流信号を横軸に、漏洩磁束信号を縦軸にとり、「励磁電流～漏洩磁束密度」波形を描いた。

図5に各試験片の「励磁電流～漏洩磁束密度」波形を示す。磁気ヒステリシスがあるため、漏洩磁束密度は磁化電流の一価関数ではない。ここでは、図6に示すように、一価である「正規励磁電流～漏洩磁束密度」を求める：「励磁電流～漏洩磁束密度」波形を上昇(ascend)と下降(descend)部分に分解し、「正規励磁電流～漏洩磁束密度」波形は「励磁電流～漏洩磁束密度」波形の上昇と下降部分の同一電流に対する漏洩磁束信号の平均値をトレースした曲線である。

$$B_{ln} = \frac{1}{2}(B_{la} + B_{ld}) \quad (10)$$

ここでは、(10)式を用いて、図5に示す波形を正規化した。図7に各板厚試験片の「正規励磁電流～漏洩磁束密度」を示す。そこから初期漏洩抵抗率を計算し、初期漏洩抵抗率と板厚の関係を図8にまとめる。2章の説明通り、初期漏洩抵抗率が板厚の線形関数であることを示した。

以上の理論解析および基礎試験により、事前に肉厚が異なる試験体を用いて、マスターカーブを用意し、このマスターカーブを用いることによって、同じ試験条件下の測定信号から被検体の板厚、或いは残肉量を推定できると考えられる。

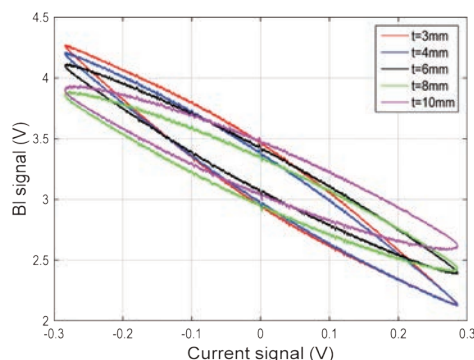


図5 各板厚試験片の「励磁電流～漏洩磁束密度」プロット

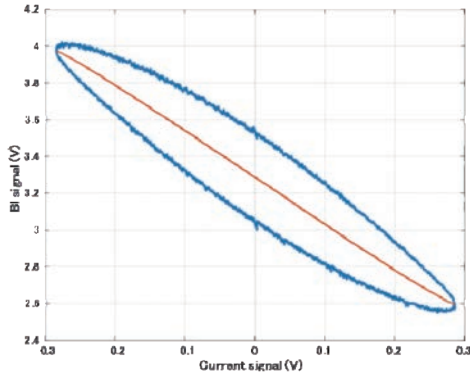


図6 「正規励磁電流～漏洩磁束密度」プロットの求め方

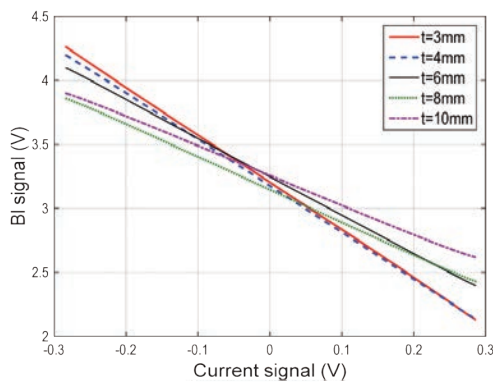


図7 各板厚試験片の「正規励磁電流～漏洩磁束密度」プロット

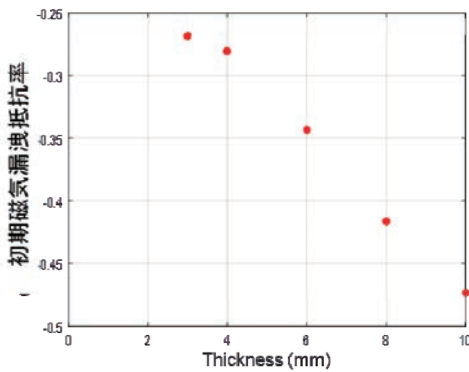


図8 板厚～初期磁気漏洩抵抗率

5 結論

磁気回路理論に基づいて、初期磁気漏洩抵抗率は板厚の線形関数であることを導き、高感度磁気センサを用いて、低強度磁化された強磁性試験体からの弱い漏洩磁束を検出し、励磁電流信号と漏洩磁束信号から作った「励磁電流－漏洩磁束密度」により、磁化電流が0である時点の初期漏洩抵抗率を計算できた。電磁気シミュレーション及び初期板厚測定試験により、初期漏洩抵抗率は板厚の線形関数であることを示し、本手法の適用性を確認した。よって、低磁化強度で強磁性材料被検体の裏面減肉を簡易に検出・評価できることが期待される。

参考文献

- [1] 日刊工業新聞社, 新非破壊検査便覧, pp6-7, pp516-534.
- [2] D.C.Jiles and D.L.Atherton, J. Magnetism and Magnetic Materials, 61, 48(1986).
- [3] <http://www.aichi-mi.com/topics/> 高感度磁気センサ /type-dm/



程 衛英

EMATが発生する超音波の伝搬の有限要素法シミュレーション

FEM simulation of propagation of ultrasonic waves generated by EMATs

溶接・非破壊検査技術センター 山本 敏弘

An electromagnetic acoustic transducer (EMAT) generates ultrasonic waves using the electromagnetic interaction and does not require a coupling medium. However, an EMAT provides a relatively low signal-to-noise ratio (SNR) compared with generally-used piezoelectric transducers because of the low transfer efficiency of an EMAT. The final goal of this study is to provide a method to optimize the configuration of an EMAT for obtaining a higher SNR. As the first step, the present paper shows the results of numerical simulations performed to seek an EMAT configuration that makes shear waves or longitudinal waves dominant. Two commercial finite element method (FEM) simulation software packages were used for these simulations.

Keywords *electromagnetic acoustic transducer, EMAT, simulation, finite element method, FEM*

1 はじめに

電磁超音波探触子 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT) は、コイルと磁石で構成される超音波センサで、導体表面に設置することによって超音波の送受信が行える^[1]。EMATによる超音波の送受信には電磁相互作用を利用するため、圧電素子を使った超音波探触子では必要な接触媒質が不要である。この特長は、高温環境での検査や多孔質材料に対する検査などの接触媒質が使いにくい検査では特に有用となる。その一方で、EMATのエネルギー変換効率は低く、EMATを使用した場合、一般の圧電素子の探触子よりSN比が低くなるという欠点がある。よって、低いエネルギー変換効率を補うために、測定内容に合わせたEMATの構造の最適化が望まれる。

本研究では、EMATの構造の最適化を支援するために、あらゆるEMATの構造に対応できるEMATの数値シミュレーション手法を確立することを目指す。ここでは、市販の有限要素法 (FEM) シミュレー

ションソフトウェアを組み合わせて得られたEMATによる超音波の発生とその伝搬の計算結果を実験結果と比較して計算方法の妥当性の確認を行い、この計算方法の活用例を紹介する。

2 EMATが発生する超音波の伝搬の可視化

図1にEMATによる超音波の発生原理の概略を示す。EMATを導体表面に設置し、EMATのコイルに交流電流を流すと、コイルが導体表面に誘導する渦電流と磁石が作る静磁場とが組み合わさって導体表面にローレンツ力が生じ、この力が導体表面の粒子を振動させて超音波を発生する。さらに、導体が強磁性体の場合は、コイルが作る動磁場による磁場の変化で強磁性体に磁歪が生じ、磁歪によっても超音波が発生する。本稿では、対象を非磁性体に絞り、磁歪については考えない。

過去の溶接・非破壊検査技術センターの技術レビューにおいて、著者らはEMATが発生する超音波の伝搬を計測により可視化した結果を紹介した^[2]。文献^[3]で発表されたこの計測による可視化手法で

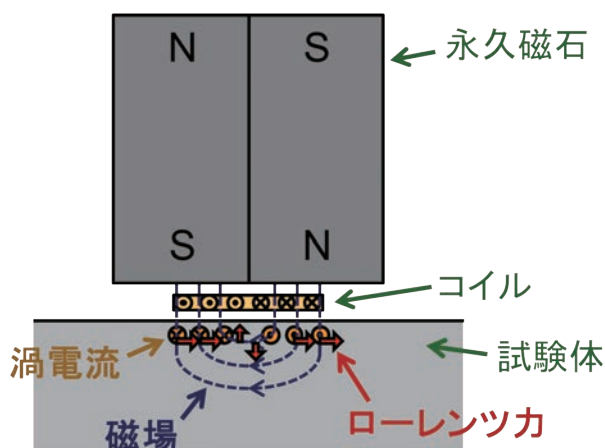


図1 EMATによる超音波の送信の原理

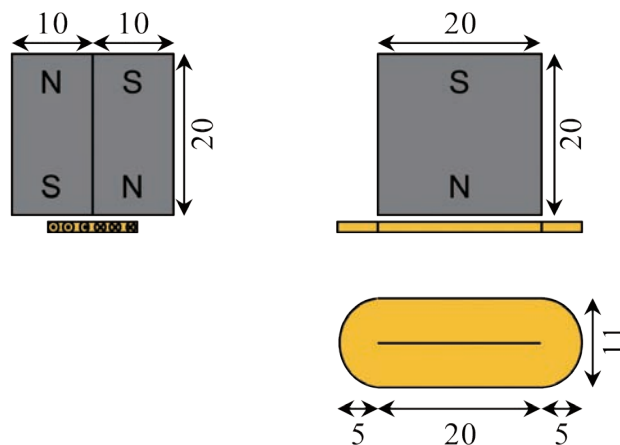


図3 使用したEMATの構造

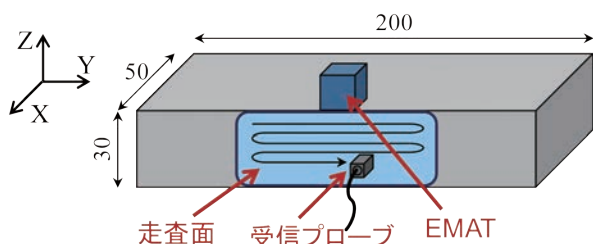


図2 側面走査による可視化手法

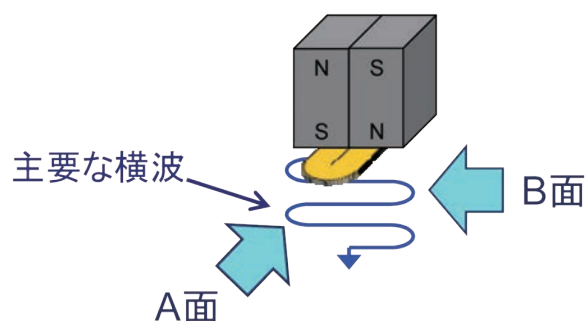


図4 超音波伝搬可視化における走査面の選択

は、図2に示すように、試験体の上面から送信探触子（ここではEMAT）で超音波を入射しつつ、試験体側面を小型の受信探触子で2次元走査する。このとき、なるべく超音波ビームの中心軸に近い伝搬挙動を得るため、図のように送信探触子は走査面に寄せて設置する。各走査点で得られた受信信号の時間変化を集めて再構成することにより、各時刻の走査面全体における超音波による変位の分布に相当する2次元分布画像を得ることができる。本稿では、上述の文献^[2]で示した超音波の伝搬の可視化結果を利用し、計測結果と計算結果を比較することにより計算方法の妥当性を確認する。

図3は、文献^[2]の測定で使用したEMATの構造である。コイルは、レーストラック型のコイルで、径0.12 mmのコイル線を1層のみ40回巻いている。磁石は、それぞれ大きさが10 mm × 20 mm × 20 mmの2個のサマリウムコバルト磁石を極性が互いに上下逆になるようにして組み合わせたものであ

る。このEMATの構造は軸対称でないため、側面走査による可視化を行うとき、図4に示すA面を走査面に向けたときとB面を走査面に向けたときで観測される超音波伝搬の様子が異なる。文献^[2]ではB面を走査面に向けたときの可視化結果を紹介したが、ここでは両方の条件について計測結果と計算結果の比較を行う。

上記の側面走査による可視化では、EMATのコイルに2 MHzの3周期分の正弦波パルスピーク・ピーク値が約700 Vになるように入力しており、受信探触子には公称周波数が2 MHzで振動子寸法が2 mm × 2 mmのものを使用した。受信探触子は、縦波探触子でも横波探触子でも、実際のところは意図した振動方向以外の変位も検出するため、各変位方向に対する感度に差があるものの、ある程度任意の振動方向の超音波を受信することができる。その上で、走査面の中央部での超音波の伝搬を明瞭にとらえるために、A面を走査面に向けたときは振動方向

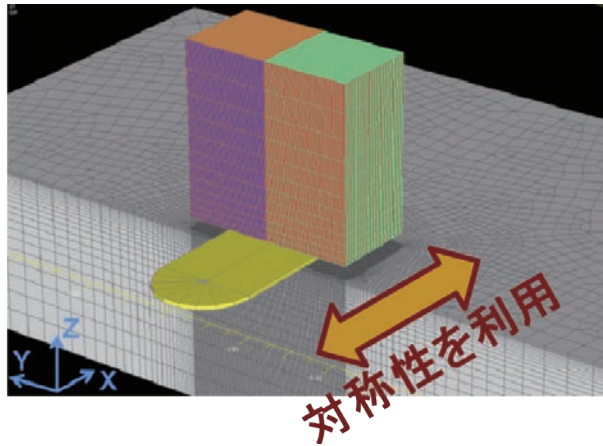


図5 EMSolution でのEMAT の形状モデル

を図2のZ軸方向にした横波探触子を、B面を走査面に向けたときは縦波探触子を受信探触子として使用した。また、受信探触子による側面走査では0.5 mm 間隔で受信信号を記録している（文献^[2]で1 mm としているのは誤り）。

図2で示したように、可視化計測には長さ200 mm、幅50 mm、厚さ30 mmの金属ブロックを使用しており、ここでは非磁性体を対象としているため、材料がオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 の場合の結果を使用した。

3 FEM シミュレーションによる超音波伝搬の可視化

以下に示す計算結果は、サイエンスソリューションズ社の辺要素有限要素法による電磁場解析ソフトウェア EMSolution (Release 11.1.2) と伊藤忠テクノソリューションズ社のボクセル要素有限要素法による超音波解析ソフトウェア ComWAVE (Version 7.0.1) を組み合わせて使用し、得られたものである。EMSolution により EMAT が発生するローレンツ力の分布を計算し、このローレンツ力の分布を入力として ComWAVE により超音波の伝搬を計算した。

図5は、図3に示した EMAT が発生するローレンツ力を EMSolution で計算するための形状モデルである。形状の対称性を利用し、中央に対称境界を置いて実際の形状の半分のみをモデル化している。コイルは、外部電流磁場ソースとして与えており、他の物体のメッシュから独立しているため、図では全体が表示されている。コイルと磁石の寸法は図3と一致させ、コイルの厚さおよびコイルの上下にあ

る隙間の間隔は単純化して0.5 mm とした。EMAT の直下にある金属ブロックは SUS316 として、導電率を 1.35×10^6 S/m、比透磁率を1と設定した。磁石の磁化ベクトルの大きさは1 Tとし、磁化ベクトルの向きを2個の磁石でそれぞれZ軸正方向および負方向とした。実際のところ、この構造では磁石の表面にもローレンツ力が生じて超音波が発生し、これが EMAT の受信信号に影響を与えるが、計測では磁石の底面にアルミ箔を貼って磁石に生じるローレンツ力を抑えている。この計算では、磁石の導体としての影響は無視できると仮定し、磁石の導電率を0 S/m、比透磁率を1とした。コイルへの励磁電流は、計測と同様に2 MHzの3周期分の正弦波パルスとし

$$w(t) = n \sin(2\pi f t) \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{3} t\right) \right\}$$

をコイル断面を流れる電流値とした。ここで、fは周波数で 2×10^6 Hz とし、nはコイルの巻数で40とした。

図6と図7は、前節で説明した計測による超音波伝搬の可視化結果と上記の計算による超音波伝搬の可視化結果を比較したものである。計測による可視化では、走査面の各点で得られた受信信号を再構成して、超音波の入射開始からある時間経過後の走査面の各点での信号値を負の最小値から正の最大値まで黒から白への濃淡で表し、2次元分布画像を構成している。計算による可視化では、計測における走査面に対応する面上の各点での超音波の入射開始からある時間経過後の変位の絶対値を青が0、赤が最

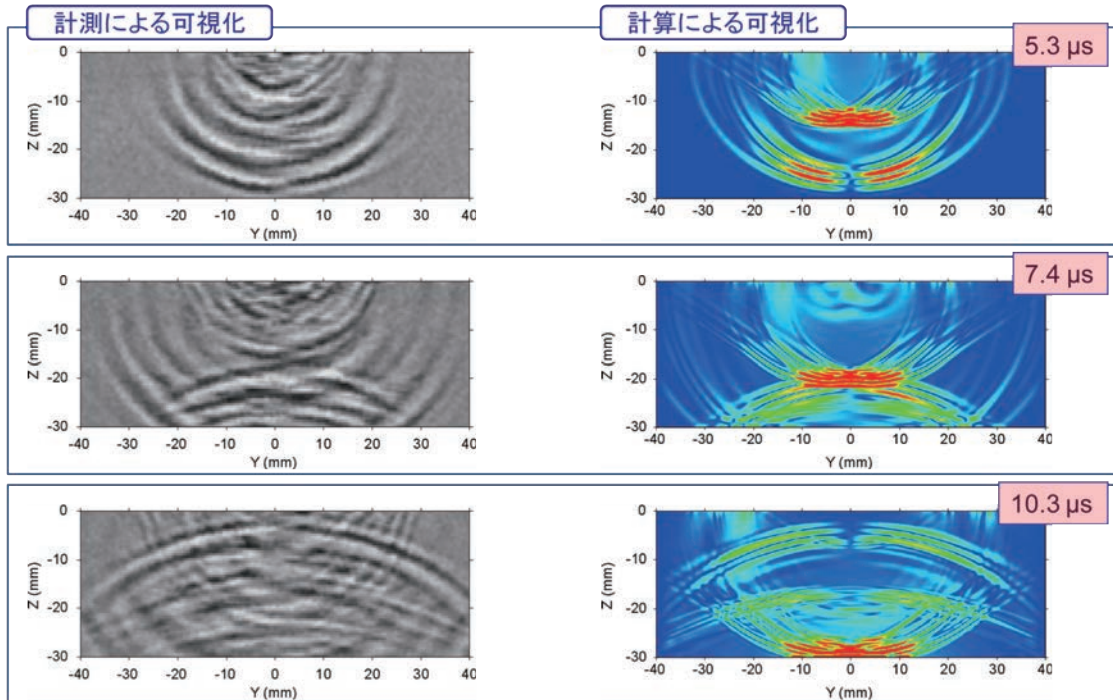


図6 計測と計算での超音波伝搬の可視化結果の比較 (A 面)

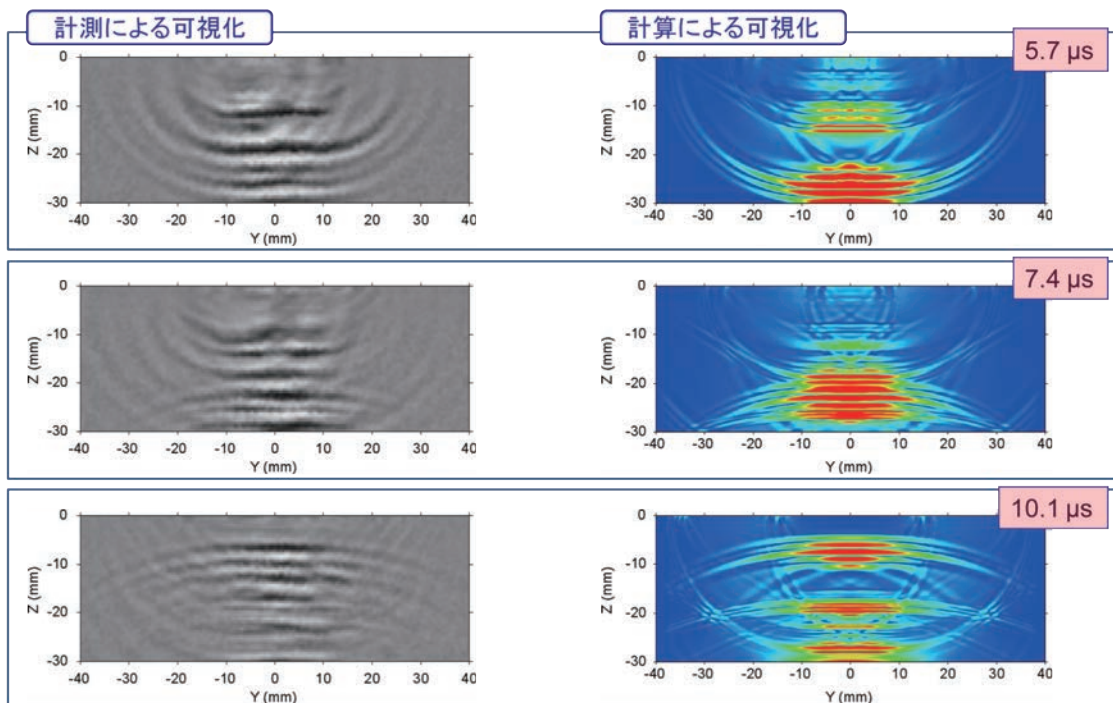
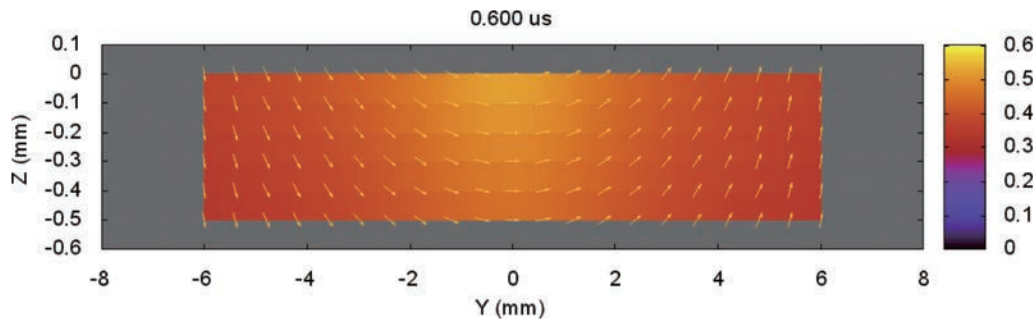


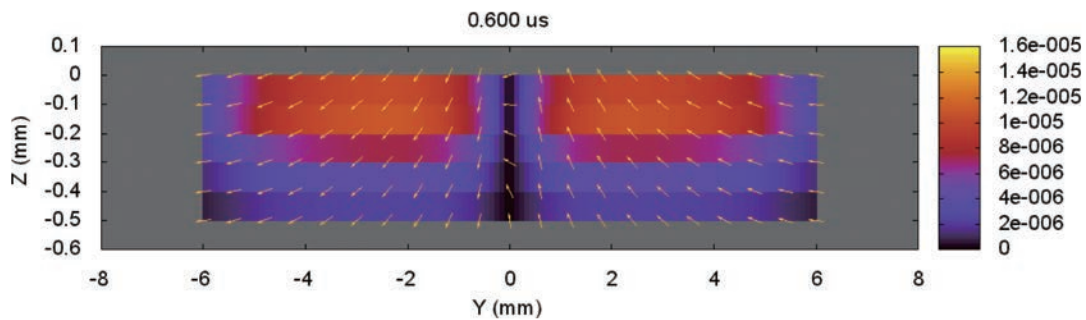
図7 計測と計算での超音波伝搬の可視化結果の比較 (B 面)

大値として色で表している。ここでは、対応する経過時間の計測による可視化結果と計算による可視化結果を左右に並べることによって比較を行っている。図6はEMATのA面を走査面に向けたときの結果で、図7はEMATのB面を走査面に向けたと

きの結果である。座標の原点は、EMATの中心軸と金属ブロックのEMATの設置面との交点としている。計測による可視化の受信探触子による走査面はEMATの中心軸よりX軸正方向へ10mm離れており、計算結果でもこれに対応する面を表示している。



(a) 磁場分布 (T)



(b) ローレンツ力分布 (N)

図8 計測による可視化に使用したEMAT 構造での計算結果

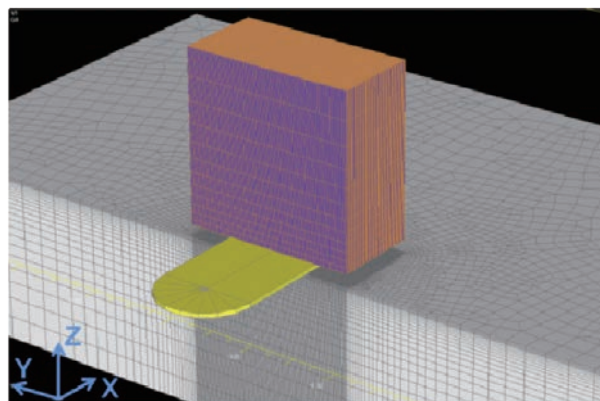


図9 EMSolution でのEMAT の形状モデル2

計算による可視化結果を見ると、先行する縦波に対して、横波が後を追う様子が確認できる。また、縦波が底面で反射するときモード変換により横波が生じている。計測による可視化では、やや不鮮明ではあるが、伝搬する超音波の波頭が連なって作る形状が確認でき、これらの形が計算結果で再現されていることから使用した計算方法はおおむね妥当であると言える。

4 超音波伝搬の可視化の活用例

次に、前節で述べた FEM シミュレーションによる超音波伝搬の可視化の活用例を紹介する。図6と図7では、縦波と横波の両方が強く発生していることが確認された。ここで使用されている EMAT の構成は、主に横波を発生させることを目的としている。不要な波はノイズの元となるので、計算結果を

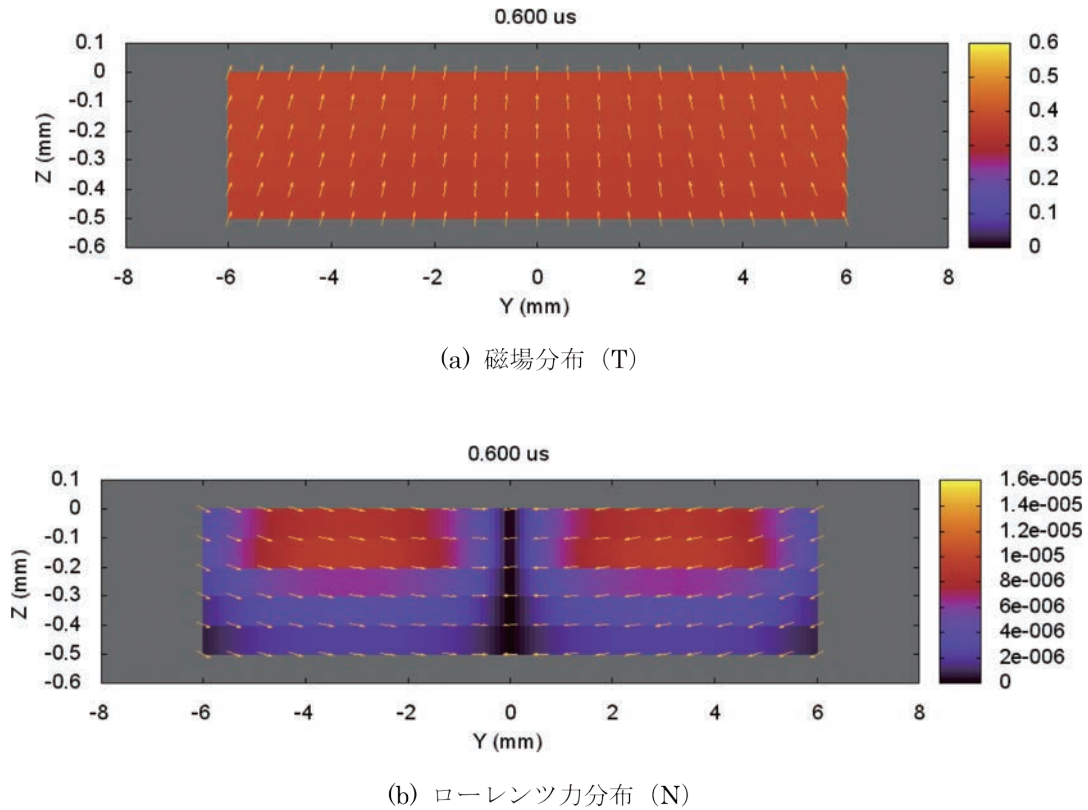


図10 EMAT の形状モデル2 での計算結果

分析することにより縦波が発生する原因と縦波を抑えるための方法を検討した。

前節では計算で得られた変位の絶対値を表示したが、計算過程では磁場、渦電流、ローレンツ力などの分布も得られる。図8は、図3の構造のEMATについて計算して得られた磁場分布とローレンツ力分布である。EMATを設置する向きはA面を走査面に向けた場合に対応する。どちらの分布もEMATの直下にある金属ブロックの $X=0$ の断面のうち表面近傍の幅12 mm、深さ0.5 mmの範囲を表示している。SUS316に対して励磁周波数が2 MHzのとき浸透深さは約0.3 mmであり、ローレンツ力の影響を考える上ではこの範囲に着目すれば十分である。分布図の矢印はベクトルの向きを、色は各物理量の値を表している。磁場、ローレンツ力ともに励磁電流の入力開始から0.6 μ sのときの分布を表示しているが、磁場に関しては静磁場が優位であるため全時間を通してほぼ変わらず、ローレンツ力に関してはこのときを全体的なピークとして値は変化するもののベクトルの向きは全時間でほぼ同じである。図8

(a)の磁場分布を見ると、2個の磁石が真下で弧を描いて磁場を作るため、中央では水平成分が大きいたことが確認できる。また、コイルが誘導する渦電流は主にX軸方向に流れているため、フレミングの左手の法則に従ってローレンツ力は図8(b)のようにYZ平面上で磁場の方向に対して垂直の向きとなる。よって、ローレンツ力は中央で鉛直成分が大きくなり、その結果、縦波が発生すると考えられる。そのため、極性を互いに上下逆にした2個の磁石を組み合わせる代わりに単体の磁石を使うことで全体的に鉛直方向の静磁場を作ることができ、ローレンツ力を水平方向に揃えられると考えた。

単体の磁石を使用したEMATの計算をするためにEMSolutionで使用した形状モデルを図9に示す。図10は、この形状モデルで計算して得られた磁場分布とローレンツ力分布である。意図したとおり、磁場は全体的に鉛直方向になり、ローレンツ力は全体的に水平方向になった。図11は、このローレンツ力分布で発生した超音波の伝搬の様子である。図6と比較すると縦波が弱くはなっているが、ローレ

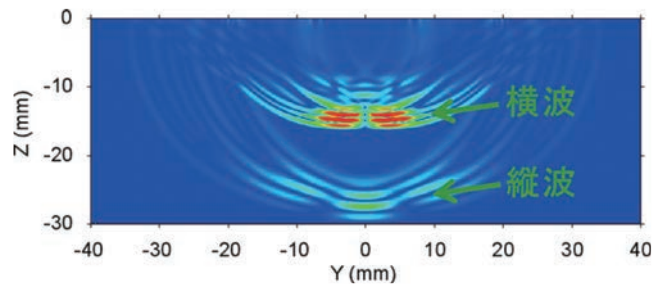


図11 EMAT の形状モデル2 での超音波伝搬の様子

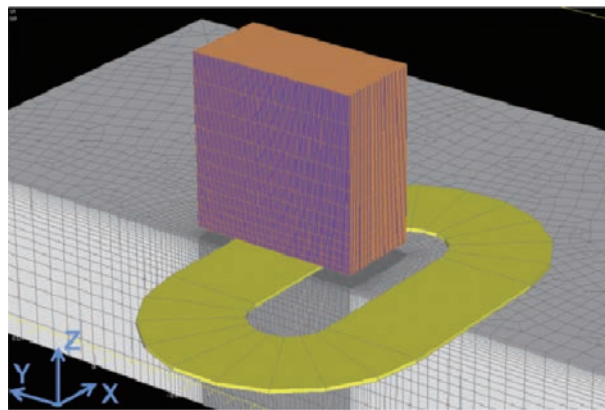


図12 EMSolution でのEMAT の形状モデル3

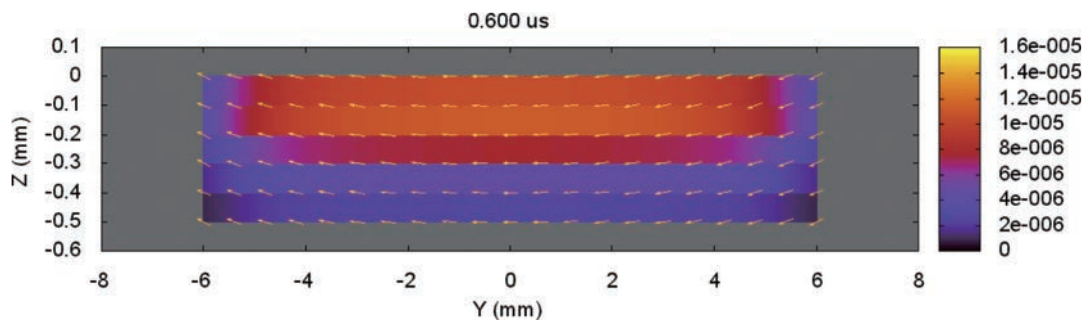


図13 EMAT の形状モデル3 でのローレンツ力分布 (N)

ンツ力の鉛直成分はごく僅かであるにもかかわらず、ある程度の強さの縦波が発生している。この EMAT ではループを作るコイルの両側の直線部分を使用しているため、渦電流の向きは図 10 の分布図の左右で X 軸正方向および負方向と逆向きになっており、図 10 (b) のローレンツ力分布では左右でローレンツ力の向きが逆になっている。このため、ローレンツ力の向きが反転する中央で左右からの引張と圧縮の応力が交互に加わることになり縦波が発生していると考えられる。これを避けるためには、使用する渦電流の向きが一方方向であればよく、コイルの

ループの片側のみを使用すればよい。

図 12 は、単体の磁石と大きくしたレーストラック型コイルの片側の直線部分を使用した EMAT の形状モデルである。コイルの断面積が 2 倍になったため、コイルの巻数は 80 とした。図 13 はこの形状モデルで計算して得られたローレンツ力分布であり（磁場分布は図 10 (a) とほぼ同じであるので省略する）、図 14 はこのローレンツ力分布で発生した超音波の伝搬の様子である。ローレンツ力は全体的に水平方向であり、その向きも一方向に統一されたが、縦波の発生を完全には抑えることができていない。

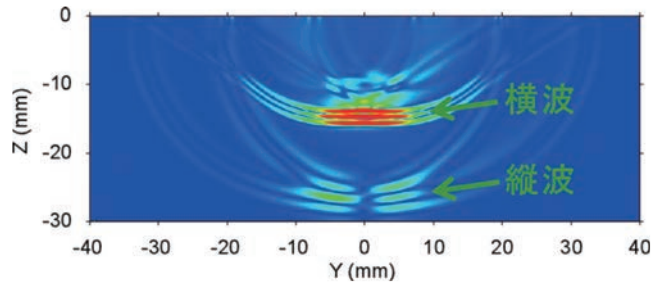


図14 EMAT の形状モデル3 での超音波伝搬の様子

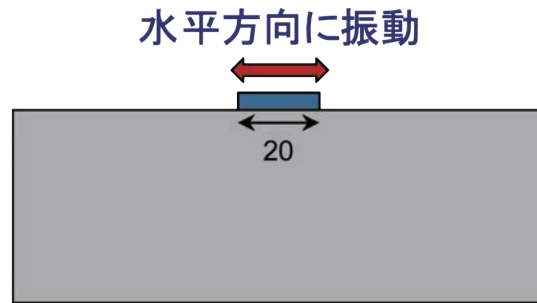


図15 振動子による横波超音波の発生

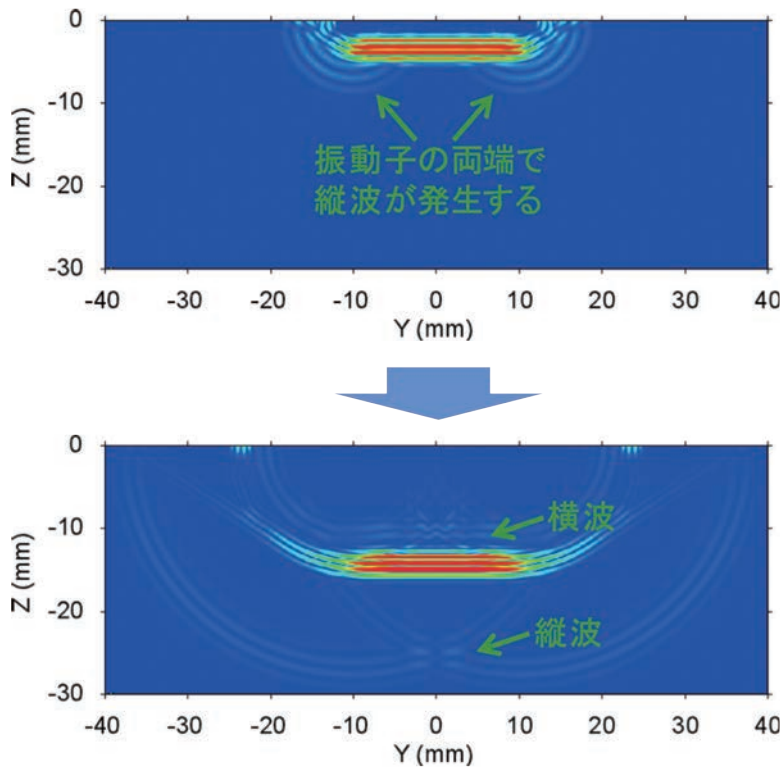


図16 振動子で発生した超音波の伝搬の様子

一つ前の EMAT の構造で縦波が発生する原因との関連を考えてみると、ローレンツ力の分布が途切れる左右の端でも片側からの引張と圧縮の応力が交互に加わり、縦波が発生すると推測できる。これが正

しければ、大きさを持つ振動子が発生する超音波にも同様の現象が確認できるはずであるため、ComWAVE により図 15 に示す条件での超音波の伝搬を計算した。振動子は一辺 20 mm の正方形で、

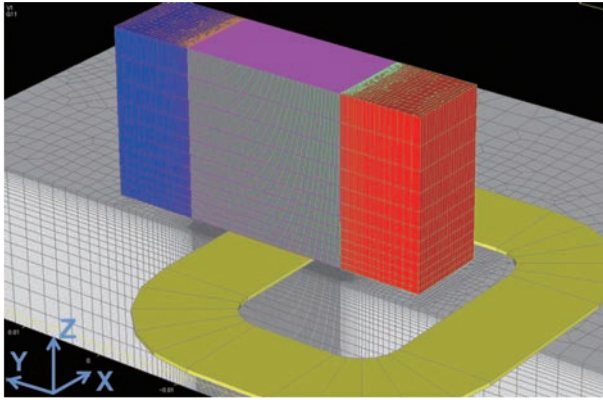


図17 EMSolution でのEMAT の形状モデル4

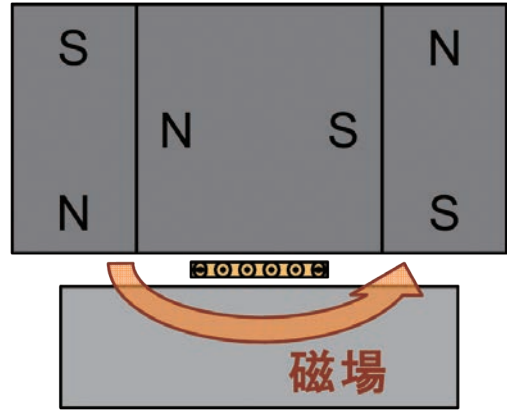


図18 EMAT の形状モデル4 の概略図

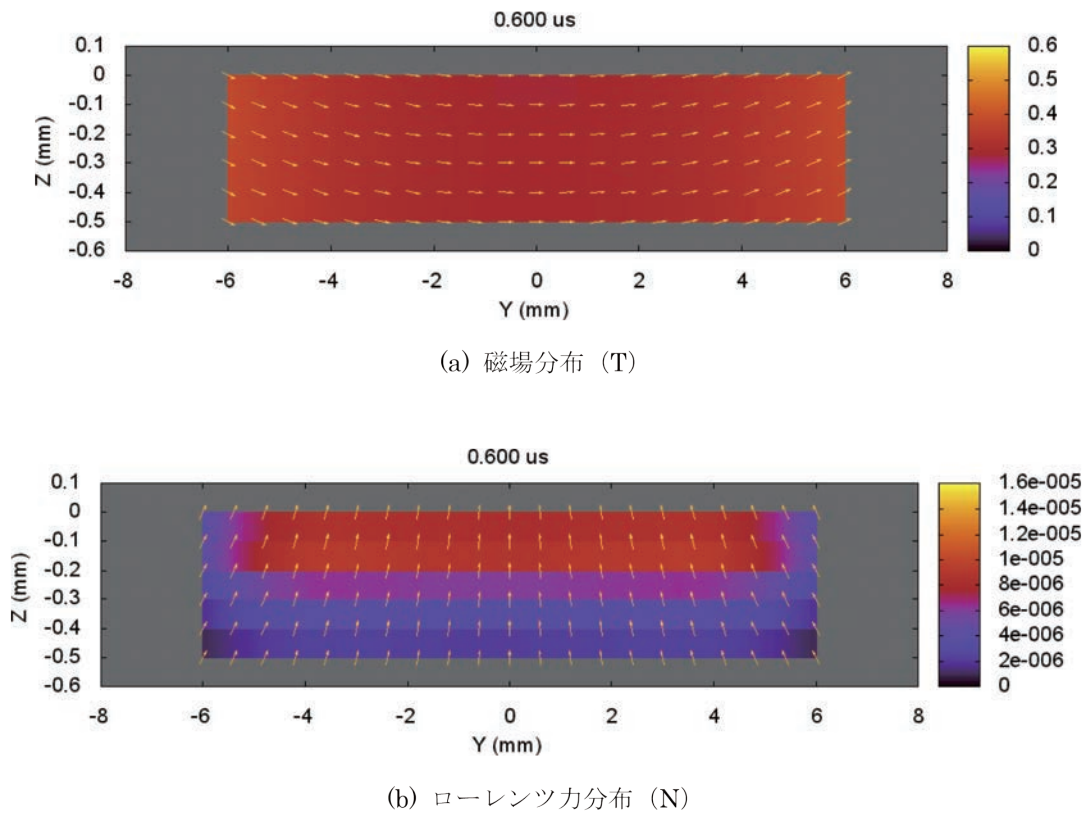


図19 EMAT の形状モデル4 での計算結果

EMAT のコイルに入力している 2 MHz の 3 周期分の正弦波パルスと同じ波形で左右に振動させた。その他の条件は EMAT の計算と同様である。この計算で得られた超音波伝搬の様子を図 16 に示す。予想通り、振動子の両端で縦波が発生しており、これらが伝搬して中央で交差する様子は図 14 のものと良く似ている。

以上の議論と同様に考えれば、水平方向の静磁場

を発生させることにより縦波が優位な超音波を発生されるはずであり、これを確かめるために図 17 の形状モデルで計算を行った。磁石は、図 18 に示すようにハルバツハ配列の一部を取り出した組み合わせにしており、金属ブロックの表面で水平方向の静磁場を作る。また、図 12 と同様に、大きいレースタック型コイルの片側の直線部分のみを使用している。図 19 はこの形状モデルで計算して得られ

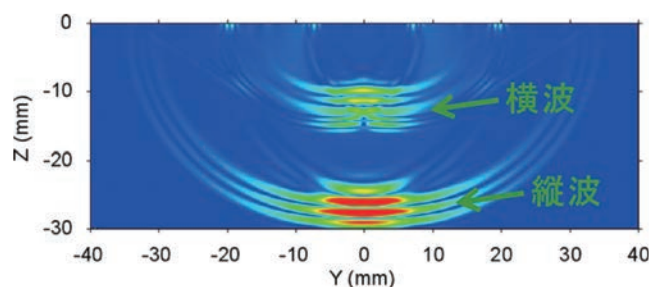


図20 EMATの形状モデル4での超音波伝搬の様子

た磁場分布とローレンツ力分布であり、図20はこのローレンツ力分布で発生した超音波の伝搬の様子である。意図したとおり、ローレンツ力は全体的に鉛直方向になり、発生する超音波は縦波が優位になった。

5 まとめ

数値電磁場解析と超音波伝搬シミュレーションを組み合わせることによってEMATが発生する超音波の伝搬を可視化し、計測による可視化結果と比較することにより計算方法の妥当性を確認した。また、この計算方法の活用例として、横波または縦波のみを発生するEMATの構造について検討した。その中で、ローレンツ力の分布により発生する超音波のモードが決まることを確認し、計算によって磁場分布とローレンツ力分布を確認することが有効であることを示した。さらに、ローレンツ力の向きを揃えても分布の両端で別の超音波モードが発生してしまう現象を確認した。

本稿で使用した計測による可視化結果はやや不鮮

明であるが、計測の可視化方法にも改善の余地があり、今後、より鮮明な可視化画像を作成して、より正確な比較ができるようにする予定である。また、現在、EMATによる超音波の受信過程の計算や材料が強磁性体の場合への対応にも取り組んでいる。

参考文献

- [1] M. Hirao and H. Ogi, *EMATs for science and industry: Noncontacting ultrasonic measurements*, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, pp. 39–42, 2003.
- [2] 山本敏弘, 古川敬, 古村一朗, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, EMATが発生する超音波の可視化, *溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー*, Vol. 9, pp. 17–21, 2013.
- [3] K. Furukawa, H. Yoneyama, Y. Horii and N. Uesugi, Measurement of ultrasonic wave propagation in austenitic stainless steel welds—(I), *Proceedings of the Second International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, EPRI, Palo Alto, pp. B195–201, 2000.



山本敏弘

超音波フェーズドアレイ法と 従来の斜角探傷法によるきず指示の比較

Comparison of Flaw Indications Measured by the Ultrasonic Phased Array Technique
and the Conventional Fixed Angle Beam Technique

溶接・非破壊検査技術センター 上山 芳教, 古川 敬

Ultrasonic phased array techniques have a capability to measure a large number of test objects in short time. Thus, it is effective to replace a conventional manual ultrasonic technique using fixed angle probe by the ultrasonic phased array techniques in order to reduce the time and costs. We already verified that the acoustic fields of phased array probes are similar to that of conventional fixed angle ultrasonic probes. In this paper, we show the results of comparison of flaw indications measured by a conventional angle beam technique and a phased array technique for verifying the equality of flaw detectability.

Keywords

Ultrasonic phased array technique, Conventional ultrasonic technique, Welded carbon steel joints, Comparison of flaw indications

1 はじめに

フェーズドアレイ探触子を用いて電子走査を活用する超音波探傷は、従来の単素子固定角の探触子による探傷よりも高速かつ効率的に試験を実施できる可能性があり、多くの研究が実施されると共に実用に向けた規格化も進められている^[1]。多量の試験対象に対し高い欠陥検出性能が求められる分野では、従来の手動探傷の代替として特に期待が大きいと考える。従来法の一部をフェーズドアレイ法に置き換えることで試験に要する時間が抑えられることは大きな利点であると考え、同一のきずに対する評価において、フェーズドアレイ法と従来法とで同等の評価結果が得られることを十分に検証する必要があると考える。著者らはこれまでフェーズドアレイ法による音場に着目し、グレーティングローブ等のフェーズドアレイ法特有の留意点はあるものの、従来法に相当する音場がフェーズドアレイ法により得られることを確認してきた^{[2][3]}。同等の音場を送信できるならば、従来法と同じ固定の屈折角を用いた

探傷では従来法と同等の探傷結果が得られると予測できるが、複数の屈折角を用いるセクタスキャンを使う場合は単純には同等とすることができない。フェーズドアレイ法の活用による探傷試験の効率化においてセクタスキャンの利用は重要であり、セクタスキャンを利用した探傷結果が、従来法による探傷結果と同等であることを検証する必要があると考える。

本報告では、セクタスキャンを使用するフェーズドアレイ法による探傷結果と従来法における探傷結果の同等性を検証するための基礎検討として、炭素鋼平板突合せ溶接部の探傷試験を両手法により実施し、各きず指示を比較した結果を報告する。従来法は JIS Z 3060(2002)により実施し、JIS 規格が未だ無いフェーズドアレイ法は ISO 13588(2012)に準拠した測定を実施した上で、きず指示の評価は次項に詳述するように JIS Z 3060 を基にして実施した。

2 評価基準

手動探傷について規定している JIS Z 3060 と自動

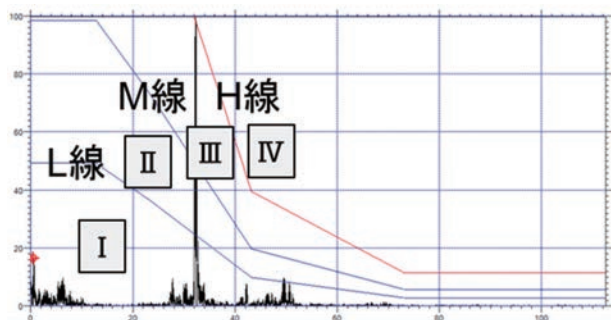


図1 エコー高さ区分線

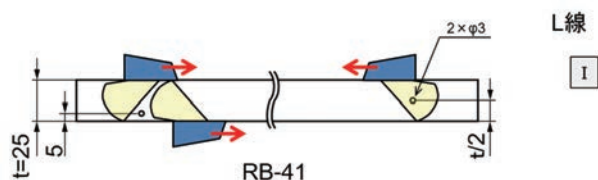


図2 対比試験片 (RB-41) を使用したエコー高さ区分線の作成

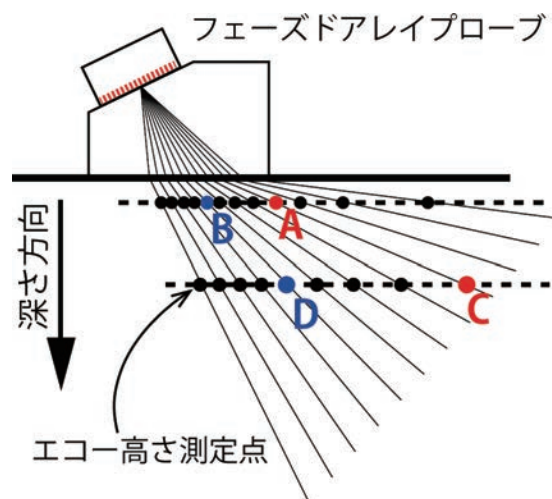


図3 エコー高さ測定点

及び半自動のフェーズドアレイ法を規定している ISO13588 は、厚さ 6mm 以上の鋼による完全溶け込み溶接部を試験対象とする点でほぼ同等であるが、それぞれが規定する探傷方法の他に、きずの具体的な評価基準を規定しているか否かの点も異なる。JIS Z 3060 ではエコーの大きさに基づくきずの区分の基準と指示長さの測定手順について具体的に規定している。一方で ISO13588 では指示の評価 (ISO13588, 14.6 項) について、エコーの大きさ等を基に、規定された許容可能な水準を満たしているか否かを判断するとされているが、具体的な許容の基準や測定手順までは規定されていない。本報告では両規格に基づく探傷結果を比較するため、ISO13588 に基づいて実施したフェーズドアレイ法の探傷結果の評価について、JIS Z 3060 を基にした方法を採用した。エコーの大きさを基にした評価方法であり、ISO13588 の定めるところを逸脱しない方法であると考え。

フェーズドアレイ法において採用した評価方法について説明する。JIS Z 3060 では横穴の開いた対比試験片等を使用して図 1 のようなエコー高さ区分線を作成し、区分された各領域に I ~ IV の値を当ててエコー高さを評価している。また、きず指示長さはエコー区分線の内、L 線を超えるエコーが得られる探触子の移動距離として規定されている。フェーズ

ドアレイによるセクタスキャンは多様な屈折角を利用する点で従来法と異なるが、今回は使用する全ての屈折角に対して各屈折角におけるエコー高さ区分線を作成することで、従来法と同様の手順できずの領域および指示長さを測定した。

セクタスキャンと 1 軸機械走査を組み合わせたフェーズドアレイ法による測定において、例えば、ある測定位置のある屈折角で L 線を超えるエコーを確認した場合、近接する測定位置および屈折角で L 線を超えるエコーがあれば一つのきずと見做し、一つのきずの中で最も高い領域にあるエコーの領域をそのきずの領域とした。きず指示長さについては、一つのきずと見做したエコーの一群に対応するフェーズドアレイ探触子の移動距離を指示長さとした。

きずの評価を実施する際は、エコー高さ区分線に応じた距離振幅補正をセクタスキャン結果の表示に適用することで、画面上の色と、きずの評価とを対応させ易くして、きずの見落としを抑制するように留意した。エコー高さ区分線の作成について、横穴を設けた対比試験片を使用した場合の手順の概略を図 2 及び図 3 で説明する。本測定では RB-41 対比試験片を使用した。図 2 のように横穴に対してフェーズドアレイを前後走査すると、例えばその横穴からの直射のエコーにより、図 3 の A 点及び B 点等に

表1 試験体の種類及び数量

板厚	開先形状	個数
9mm	V開先	1体
12mm	V開先	3体
25mm	V開先	1体
	X開先	1体

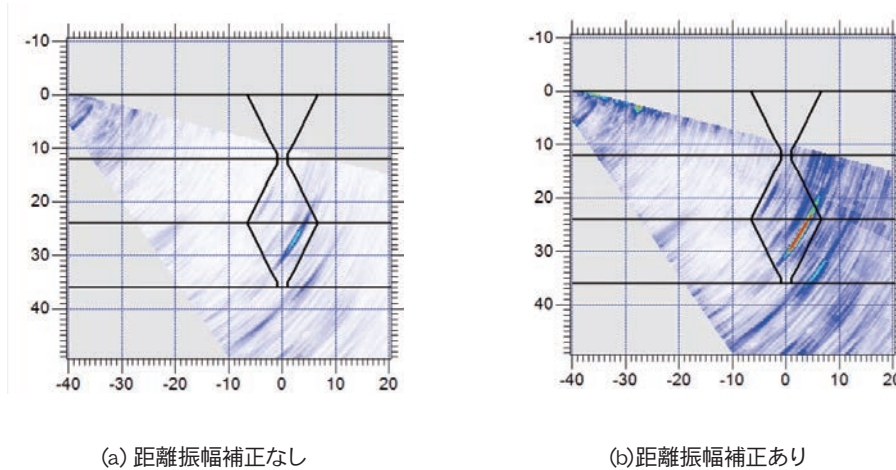


図4 セクタスキャン画像の例(板厚12mm, V開先)

おける最大エコー高さを記録することができる。また、同じ横穴の1回反射のエコーからはC点及びD点等の最大エコー高さを記録することができる。屈折角毎に、伝搬距離の異なる複数の横穴の最大エコー高さを記録し、これを基にエコー高さ区分線を作成する。屈折角のピッチが異なる場合でもプローブを前後走査する回数は変わらないため、平易にエコー高さ区分線を作成できる。距離振幅補正はエコー高さ区分線を基に適用し、セクタスキャンの画像の色に反映させる。距離振幅補正の有無を切り替えたセクタスキャン画像の例を図4(a)(b)に示す。

3 試験体

炭素鋼(SM490)による400×200mm平板を突合せ溶接した約400×400mmの試験体6体を使用した。板厚は9mm, 12mm, 25mmの3種類あり、開先形状はV開先及びX開先の2種類がある。板厚及び開先形状の組み合わせと試験体の数量を表1に示す。また、板厚25mmの試験体の外観を図5に示す。以降、試験体は板厚と開先形状を組み合わせ、板厚9mmのV開先を9V、板厚25mmのX開先を25Xなどと記す。

4 フェーズドアレイ法における探傷条件の設計

溶接部に想定されるきずの内、面状のきず等ではきずに対する超音波の入射角によって、きずの大きさに対するエコーの大きさが変化し、検出に関わる感度に変化する。フェーズドアレイのセクタスキャン等により得られる画像は一見、広範囲の探傷を一度に実施できているように見えるが、超音波の送信角度が試験対象部位に対して適正でない場合、その場所に生じるはずのエコーが探傷画像に表れていないという可能性もある。フェーズドアレイ法を実施する際には従来法と同様に、試験を実施する前に探触子の配置や使用する送信角度について十分に検討する必要がある。

本報告ではISO13588に規定されている探触子配置(ISO13588:2012内Table2)の内、Testing Level B(溶接部の品質による区分)におけるセクタスキャンを想定し、試験体の片面において溶接部の両側から、片側各1個所もしくは2個所に探触子を設置して、1軸半自動スキャンにより探傷を実施することとした。探触子配置位置の数量を決めた上で、具体的な探触子と溶接部の距離や使用する送信

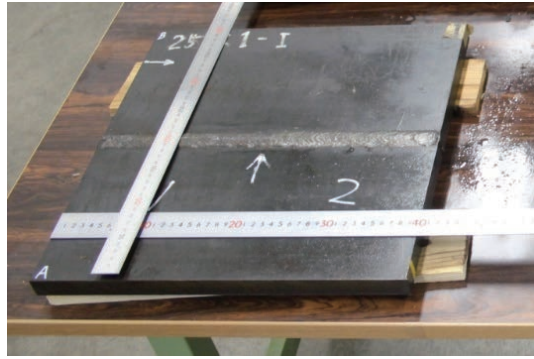


図5 試験体の外観 (板厚25mm)

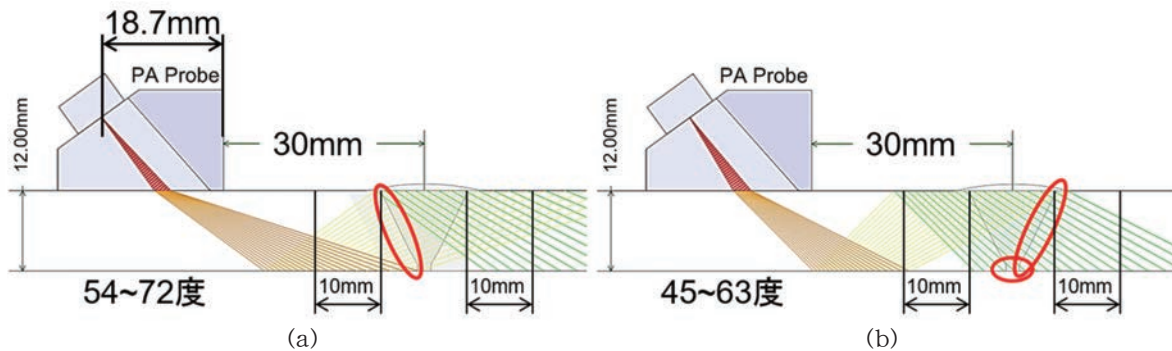


図6 板厚12mmV 開先における探触子配置の検討 (ES BEAM TOOL 6(Eclipse Scientific)により作図)

角度を検討した。

板厚 12mm の V 開先試験体について探触子配置等を検討した例を図 6 に示す。試験範囲は溶接ビードの端から 10mm とし、横波で測定することとした。送信角度を決めるため、方向性が推測し易いきずを考慮して次の 3 つの条件を設定した。

- (1) 開先面の融合不良等を想定して、開先面に対してほぼ垂直に入射すること。
- (2) 溶込み不良や裏波付近から発生するきずを想定して、屈折角 50 度前後の波がルート部付近へ入射すること。(裏面に垂直な反射源であれば、横波の屈折角 60 度付近で反射率が急激に低下するため)
- (3) 直射もしくは 1 回反射、2 回反射で (1)(2) を満足し、なおかつ試験範囲を網羅すること。

板厚 12mmV 開先の試験体では探触子前面と溶接線の距離を 30mm としたとき、図 6(a) に示すように屈折角 54 ~ 72 度で探触子側の開先面にほぼ垂直に入射し、また、図 6(b) に示すように屈折角 45 ~ 63 度で探触子と反対側の開先面にほぼ垂直に入射

し、裏波付近に 50 度前後で入射する。板厚 12mmV 開先の試験体では探触子前面と溶接線の距離を 30mm とし、溶接部の両側から探傷を実施した。

板厚 9mm, 12mm, 25mm の V 開先については上記の (1) ~ (3) の方針を適用して探触子配置を検討した。板厚 25mm の X 開先については、条件 (2) に相当するルート部への入射について下記の (2') のように条件を変更し、条件 (1)(3) は V 開先と同様に適用した。

- (2') 70 度程度の大きい屈折角で送信した波がルート部へ入射すること。(できるだけ反射波の指向性を低下させ、反射波を検出し易くするため)

5 探傷結果の比較

従来法及びフェーズドアレイ法における測定条件を表 2 に示す。従来法は JIS Z 3060 に基づく手動探傷を実施し、フェーズドアレイ法は ISO 13588 に基づくセクタスキャンと 1 軸半自動機械走査を組み合わせ合わせた探傷を実施した。測定結果として、各きず指示の領域 II 以上の始端、終端、指示長さを表 3 に

表2 探傷条件

	従来法	フェーズドアレイ法
探傷器	市販探傷器 (UI-25, 菱電湘南エレクトロニクス)	市販探傷器 (MC-256, 栄進化学)
探触子	4M8×9A70(GE, MWB70-4)	4MHz, 0.5 mmピッチ, 16ch, 開口約8×9mm(GE, 115-500-013)
くさび	一体型	ポリスチレン製, 入射角度36° (GE 118-350-024)
接触媒質	グリーンセリンペースト	マシン油
標準試験片	STB-A1	—
走査方法	固定角 (70度) 手動	セクタスキャン(集束なし) 半自動機械走査 (1軸)
測定範囲	直射, 1回反射	直射, 1回反射, 2回反射
対比試験片	RB-41(横穴φ3mm, 厚さ25mm), 横穴の深さ: 5mm, 12.5mm	
検出レベル	L検出レベル	
指示長さ	領域II以上, 領域IV以上	
資格	手順書	UTレベル3(JIS Z 2305)
	測定	UTレベル3(JIS Z 2305)

表3 従来法及びフェーズドアレイ法による探傷結果 [mm]

試験体	きず番号	従来法				フェーズドアレイ法 (PA)				長さの差 (PA-従来法)
		始端	終端	長さ	領域	始端	終端	長さ	領域	
9V	1	104	154	50	IV	104	162	58	IV	+8
	2	221	225	4	II	222	228	6	IV	+2
	3	244	275	31	IV	238	272	34	IV	+3
12V-1	1	81	147	66	III	115	136	21	IV	-45
	2	120	168	48	III	141	186	45	IV	-3
	3	200	245	45	IV	202	252	50	IV	+5
	4	274	329	55	IV	271	325	54	IV	-1
12V-2	1	79	97	18	II	*	*	*	*	*
	2	99	110	11	IV	100	109	9	III	-2
	3	129	144	15	IV	127	140	13	IV	-2
	4	153	193	40	IV	150	195	45	IV	+5
	5	218	236	18	IV	214	233	19	IV	+1
	6	271	274	3	II	*	*	*	*	*
	7	283	319	36	IV	280	318	38	IV	+2
12V-3	1	101	116	15	IV	103	124	21	III	+6
	2	142	183	41	IV	143	181	38	III	-3
	3	196	245	49	IV	196	246	50	IV	+1
	4	277	331	54	IV	272	337	65	IV	+11
25V	1	79	123	44	IV	83	127	44	IV	+0
	2	133	149	16	III	137	148	11	III	-5
	3	186	255	69	IV	197	259	62	IV	-7
	4	275	330	55	IV	279	326	47	IV	-8
25X	1	80	105	25	III	75	116	41	IV	+16
	2	112	169	57	III	101	161	60	III	+3
	3	216	231	15	IV	209	234	25	IV	+10
	4	260	311	51	IV	260	313	53	IV	+2

*: 検出不可

示す。また、フェーズドアレイ法と従来法による探傷結果の指示長さの差を表3の右端の列に示し、指示長さの差の範囲毎にきずの個数を集計した結果を表4に示す。表4に示すように、指示長さの差は、全体の6割にあたる16個が±5mm以内であり、8割にあたる21個が±10mm以内となった。エコーの領域について比較すると、約9割にあたる23個

は従来法とフェーズドアレイ法で同等、もしくはフェーズドアレイ法の方が領域が高くなっている。本測定の結果から、大凡のきずにおけるフェーズドアレイ法の探傷結果は、エコーの領域が過小評価にはならず、指示長さは従来法の±10mm程度以内に収まると考える。ただし、フェーズドアレイ法において領域が1段階下がってしまった3件(12V-2,

表4 指示長さの差(δX)の集計結果

差の範囲	個数
$10\text{mm} < \delta X$	2
$+5\text{mm} < \delta X \leq +10\text{mm}$	3
$-5\text{mm} \leq \delta X \leq +5\text{mm}$	16
$-10\text{mm} \leq \delta X < -5\text{mm}$	2
$\delta X \leq -10\text{mm}$	1
検出不可	2
計	26

きず2番等)や、L線による検出範囲が著しく狭くなった1件(12V-1, きず1番), 検出不可となった2件(12V-2, きず1番, 6番)については, 原因を十分に調査し, 測定条件の設計方針に反映できるような検討が必要と考える。探触子の首振り走査の有無等の原因は考えられるが, これらのきず指示については今後, 当該部の切断等による詳細な調査を実施する予定である。

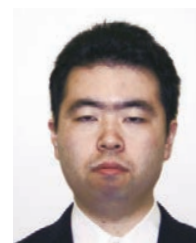
6 まとめ

セクタスキャンを使用するフェーズドアレイ法による探傷結果と単素子固定角探触子による従来法に

おける探傷結果の同等性を検討するための基礎データとして, 炭素鋼平板突合せ溶接継手の探傷試験を実施した。従来法はJIS Z 3060に基づく手動探傷, フェーズドアレイ法はISO 13588に基づく半自動走査による探傷を実施し, 両探傷結果が概ね一致することを確認した。今後, 両探傷の結果が一致しなかった部位の詳細な調査や, 他の非破壊検査手法も含めた探傷結果の比較等を実施する予定である。

参考文献

- [1] 三原, 超音波フェーズドアレイの基礎と広範な利用に向けて, 非破壊検査, Vol.65 No.2 (2016), pp.56-60
- [2] 古川ら, Phased Array 超音波探触子音場の数値シミュレーション, 発電設備技術検査協会 技術レビュー Vol.1 (2005), pp.14-18
- [3] 上山ら, 超音波の可視化技術を用いたフェーズドアレイ UT法の適用性評価, 発電設備技術検査協会 技術レビュー Vol.9 (2013), pp.6-10



上山 芳教



古川 敬

超音波探傷試験技術者の探傷技量に及ぼす教育・訓練の有効性に関する検討

The Investigation on the Effectiveness of Education and Training on the Inspection Skills of Ultrasonic Examination Personnel

溶接・非破壊検査技術センター 平澤 泰治, 小林 輝男, 牧原 善次, 南 康雄

In order to investigate the effectiveness of education and training for ultrasonic examiners, the defect detection capability test was examined in austenitic stainless steel piping welds specimen. From the analysis and evaluation of the test results, the major improvement of the defect detection capabilities after education and training was shown. On the other hand, in order to maintain the inspection skills of the ultrasonic examination personnel, it is necessary to construct the education and training system with transparency and objectivity. It has been investigated the establishment of education and training system for the ultrasonic examination personnel. This paper indicated the outline of the effect of education and training on the inspection skills of the ultrasonic examiners and the outline of the education and training system.

Keywords Education and Training, Flaw Detection Capability Test, Education and Training System

1 はじめに

わが国の原子力発電プラントの供用期間中検査 (ISI: In-Service Inspection) における超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing) は, (一社) 日本電気協会電気技術規程 JEAC 4207 「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」^[1] に従って実施している。この規程には, 検査員 (試験評価員及び試験員) の訓練・経験について要求しているものの, 具体的な訓練内容や経験については明記されていない。そのため, 各検査会社では, 独自の訓練内容や技量確認プログラムを定めて運用し, 探傷 (欠陥検出) 技量の習得・維持に努めている。これらの運用については, 現状, 問題が生じていないものの, 検査員の探傷技量の維持・向上が継続的に確保できる透明性及び客観性のある制度の整備が要望されている。

ここで, 海外の検査員の探傷 (欠陥検出) 技量の確認方法をみると, 米国では, 米国機械学会規格 (ASME Code, Section XI, Appendix VIII) の性能

実証 (PD: Performance Demonstration) 試験^[2]で, また, 欧州では, ENIQ (European Network for Inspection Qualification) の技術実証 (TJ: Technical Justification)^[3]で確認している。

一方, わが国では, 事前に検査会社の訓練を受けた検査員が ISI の UT を実施しているが, 多くの検査会社の訓練内容を網羅した標準的かつ適正な訓練プログラムに従った訓練を繰返し実施することで, 検査員の探傷技量を所定の水準以上で, かつ客観的に認知される技量を確保できるものと考えられる。このことから, 透明性及び客観性のある訓練制度が必要とされている。

このように, 検査員に対する教育・訓練の重要性は認識されているが, 過去の調査^{[4][5]}では, 検査員に対する教育・訓練の効果を定量的に評価した報告はない。そこで, 著者らは, オーステナイト系ステンレス鋼 (以下, ステンレス鋼) 配管溶接継手試験体を用いて UT による欠陥検出性試験を行い, 試験員の探傷技量に及ぼす教育・訓練の効果について検討した。その結果, 教育・訓練後に欠陥検出性が大

幅に改善され、試験員の探傷技量向上に教育・訓練が有効であることを明らかにした^[6]。

本報告では、試験員に対する教育・訓練の有効性に関する検討結果の概要を示すとともに、ISIでUTを実施する検査員の探傷（欠陥検出）技量の習得・維持を目的とした教育・訓練制度（案）の検討結果の概要についても紹介する。

2 教育・訓練の有効性

2.1 概要

わが国のISIにおいて、例えば、ステンレス鋼配管突合せ溶接継手のUTについては、対象継手の多さ、アクセス性等の観点から、一般に手動UTが行われ、一人の試験員が探傷から記録作成までの作業を行っている。これらの作業において、試験員には、探傷データから記録すべきエコーを確実に抽出し、さらに形状エコー等欠陥以外のエコーについても、エコーの反射源を特定し、分類するための技量が求められている。そのため、試験員個人の技量が探傷結果に大きく影響する。

このような状況から、著者ら^[6]は、ステンレス鋼配管の突合せ溶接継手試験体を用いた手動UTによる欠陥検出性試験を行い、試験員に対する教育前後の探傷結果について、主に欠陥検出性の観点から分析・評価を行った。

2.2 欠陥検出性試験

用いた試験体は、口径350A、板厚25mmの配管状及び短冊状のステンレス鋼配管突合せ溶接継手試験体で、その形状・寸法を図1に示す。これらの試験体は、欠陥付与試験体（内面にSCC亀裂又はEDMノッチを付与）及び無欠陥試験体である。

用いた装置は、汎用のデジタル超音波探傷器（型式：UI-25）及び振動子寸法10×10mm、周波数2MHzの横波斜角超音波探傷子（公称屈折角：45°）で、これらは、ISIのUTで使用しているものと同様の機材である。

欠陥検出性試験を行った試験員は、全員有資格者（UTレベル2）で、年齢構成は20～30代が11名、40代が1名、50代が2名の計14名であった。資格保持期間は、3年以下が11名で全体の約80%を占めた。また、斜角探傷の経験者が5名、未経験者

が9名で、その多くが探傷経験の比較的浅い試験員であった。これは、熟練した試験員より探傷経験の浅い試験員の方が、教育・訓練の効果が顕著に現れると考えたためである。

試験手順は、以下に示すように、試験員に対して指示書の説明を行った後、教育前探傷、教育、教育後探傷の順に行い、その後、教育前後の探傷結果の分析・評価を行った。

- ①試験員に対する指示書の説明
- ②教育前の探傷（記録作成を含む）
- ③中間段階での教育
- ④教育後の探傷（記録作成を含む）
- ⑤試験結果の分析・評価

試験員は、教育前後で各々8体程度の試験体を探傷した。試験体は、試験員に探傷時に1体ずつ支給し、試験体の後戻り探傷は行わないこと、また、同一の試験体の繰返し探傷による結果への影響を排除するため、教育前後で同一試験体の探傷は行わないこととした。また探傷時間は、教育前後で各々1日、中間段階の教育は0.5日とした。

中間段階の教育では、ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の超音波特性、実機で発生が想定される欠陥（SCC亀裂）の形態、配管溶接継手の探傷で検出されるエコー源の種類、欠陥検出の着眼点及び注意点等の説明を行った。

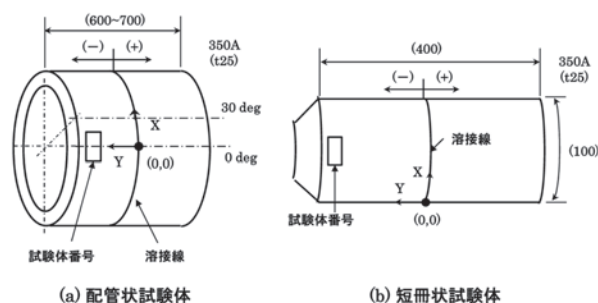


図1 オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接継手試験体の形状・寸法 (350A, t25)

欠陥検出性試験における教育前後の分析結果の一例を、図2に示す。図は、全ての試験体（欠陥付与試験体及び無欠陥試験体）の探傷データをもとに、教育前後の正答率、欠陥の見逃し率及び欠陥の誤検出率の変化を調べた結果である。ここで、正答率、欠陥の見逃し率及び誤検出率は、以下のように定義した。

- ・ 正答率：対象探傷部位（欠陥付与部位+無欠陥部位）において，対象件数（全指示数+無欠陥部位数）に対する正答数（欠陥を欠陥と評価した指示数+無欠陥部位を無欠陥と評価した数）の比率
- ・ 欠陥の見逃し率：対象件数に対する欠陥の見逃し数（欠陥エコーを欠陥以外のエコーと判定した数+欠陥の未検出数）の比率
- ・ 欠陥の誤検出率：対象件数に対する欠陥の誤検出数（欠陥以外のエコーを欠陥エコーと判定した数）の比率

図2より，正答率は，教育前に57%を示したものが，教育後に78%と大幅に向上した。一方，欠陥の見逃し率及び誤検出率はともに，教育前に20%程度であったが，教育後に各々半減する結果であった。

ステンレス鋼配管溶接継手の探傷で検出される代表的なエコーは，図3に示すように，欠陥エコーの他に，裏波部エコー，柱状晶伝搬エコー等のエコーが挙げられる。ここで，欠陥の見逃し及び誤検出の要因について調べた。欠陥見逃し時の誤判定エコーの要因を，図4に示す。図には，欠陥エコーを欠陥以外のエコー（裏波部エコー，内表面エコー，境界面エコー等）と誤判定したエコーの件数及び欠陥の未検出件数を，教育の前後で並べて示した。誤判定エコーの件数は教育後に半減したが，全体の約12%（25件）が残った。教育前の誤判定エコーの要因をみると，欠陥エコーを裏波部エコーと判定した件数は，24件と最も多く全体の約55%に達していたが，教育後には7件に減少した。これは，超音波探傷器の画面上で近接して表示される欠陥エコーと裏波部エコーの分離方法についての教育を行ったことの効果によるものと考えられる。また，欠陥の未検出数は，教育前の9件から教育後に13件（全体の約52%）と若干増加した。これは，溶接止端部近傍の浅い欠陥（特にSCC亀裂）を検出するための技量不足が主な原因と考えられる。このように，教育後の誤判定エコーの要因は，欠陥の未検出数と裏波部エコーの件数を合わせると20件となり，見逃し数全体（25件）の80%を占めた。この結果から，欠陥の未検出及び欠陥エコーと裏波部エコーの分離が課題として示された。

次に，欠陥の誤検出エコーの要因を調べた結果を

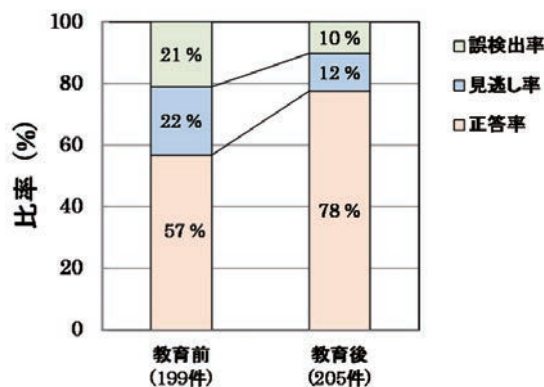


図2 全試験体における正答率，見逃し率及び誤検出率

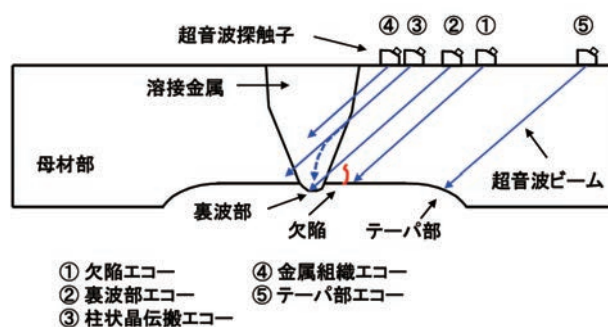


図3 オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接継手の探傷で検出される代表的なUT指示エコー

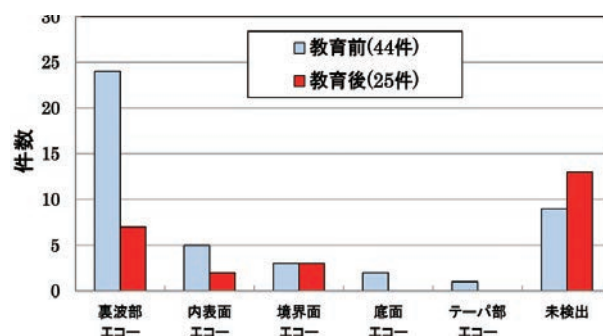


図4 欠陥の見逃しの要因

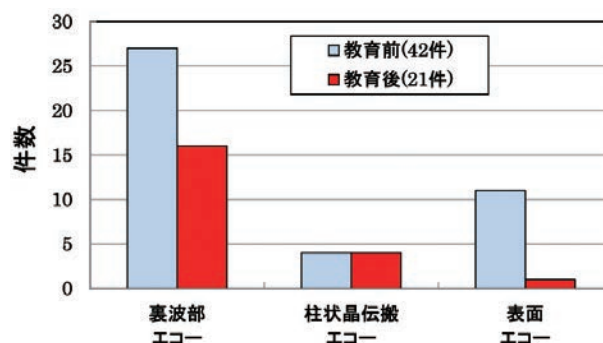


図5 欠陥誤検出の要因

図5に示す。欠陥以外のエコー（裏波部エコー，柱状晶伝搬エコー及び表面エコー）を欠陥エコーと誤検出した件数は，教育後に42件から21件に半減したが，裏波部エコーの件数が全体（21件）の76%程度（16件）を占め，裏波部エコーの誤検出が課題であることが示された。

上記の結果から，教育後に正答率は向上し，欠陥の見逃し率及び誤検出率が減少したことから，試験員に対する教育の効果が顕著に認められたと言える。一方，欠陥の見逃し率及び誤検出率の要因分析から，欠陥エコーと裏波部エコーの識別性向上及び欠陥の未検出の低減が改善項目として示された。なお，本試験に参加した試験員は，探傷経験が比較的浅かったこと，中間段階で実施した教育は，実技訓練ではなく座学による知識習得であったことなどから，上記で示した課題が示されたものと考えられる。

次に，試験員個人の教育前後の欠陥検出率を調べ，その結果を図6に示す。図は，斜角探傷経験者5名の結果であり，教育の効果が顕著な試験員（C，I），教育前でも欠陥検出率が100%の試験員（G，N）など，探傷技量に個人差が生じる結果も示された。この結果から，個人の技量レベルに応じた訓練を繰返し実施することの重要性も示された。

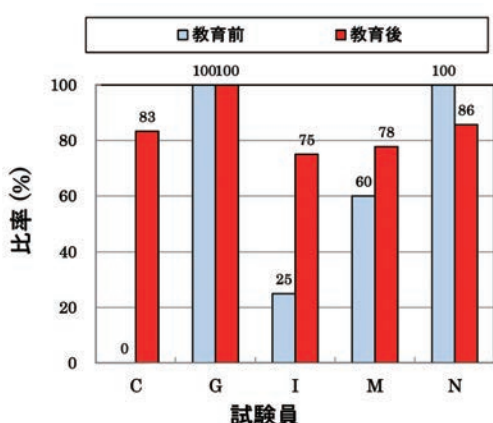


図6 斜角探傷経験者の欠陥検出率

3 教育・訓練制度の検討

3.1 検討方針

第2章で述べたように，試験員に対する教育・訓練が，探傷技量の向上に有効であることが示されたことから，ISIにおける検査員の探傷技量の習得及

び維持を目的とした教育・訓練制度について，以下の考え方をもとに検討することとした。

- ①本制度は，透明性，客観性を確保した第三者による訓練制度とする。
- ②訓練は，現行の UT 規程（JEAC 4207）に基づく手順書を用いた標準的な探傷訓練とする。
- ③訓練内容は，UTに関する知識及び探傷技量の習得（技量習得）とその確認（技量確認）で構成する。
- ④技量確認は，海外の方法（例：米国のPD制度）と同様に達成度を設けた内容とする。

3.2 制度の概要

上記の考え方をもとに検討した UT 教育・訓練制度（案）における訓練の種類を，表1に示す。認定訓練は，定められた業務を遂行するために必要な技量を習得するための訓練であり，探傷技量の習得（技量習得）とその確認（技量確認）で構成し，その有効期間を5年とする。更新訓練は，認定の有効期間が満了するとき，その技量を維持・継続するための訓練で，技量維持と技量確認で構成し，その有効期間を5年とする。これらの訓練は，透明性及び客観性を確保するため，中立訓練機関（第三者機関）で受講することとする。

次に，反復訓練は，認定の有効期間において，その技量の維持を目的に定期的に行う訓練であり，その有効期間を1年とする。この訓練は，一般訓練機関（訓練受講者が所属する組織）又は中立訓練機関で受講することとする。このような訓練を行うことで，検査員の探傷技量を維持・継続することができるものとする。

本制度における認定訓練（又は更新訓練）の枠組みを図7に示す。本制度では，透明性及び客観性を確保するため，中立訓練機関（第三者機関）を設置する。中立訓練機関では，訓練プログラム，訓練講師，訓練用教材（試験体，探傷機材，テキスト等）等を整備し，本制度の管理・運営を行うものとする。訓練対象者は，試験員及び試験評価員に加えて，試験員及び試験評価員に対して定期的に反復訓練を行う訓練指導員とする。訓練対象者は，中立訓練機関に対して受講申請し，所定の手続きを経て訓練を受講する。訓練講師は，訓練受講者に対して訓練を行う。

訓練では、ISIにおけるUTに関する知識と試験体を用いた実技訓練による探傷技量の習得（技量習得）とその確認（技量確認）で構成し、達成基準を満足した訓練受講者を認定することとする。

表1 訓練の種類

訓練区分	概要	構成	実施機関	有効期間
認定訓練	定められた業務を遂行するために必要な技量を習得するための訓練	技量習得 + 技量確認	中立訓練機関	5年
更新訓練	認定の有効期間が満了するとき、その技量を維持・継続するための訓練	技量維持 + 技量確認	中立訓練機関	5年
反復訓練	認定の有効期間において、その技量の維持を目的に定期的に行う訓練	技量維持	一般訓練機関 又は 中立訓練機関	1年

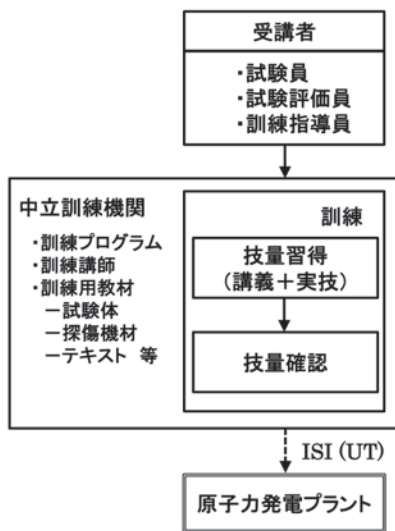


図7 訓練の枠組み

3.3 試運用の概要

上記3.1項及び3.2項では、UT教育・訓練制度の構築に当たっての考え方に基づいて、訓練内容等について検討した。これらの訓練内容が、実運用にあたって適切に実施できるかを評価するため、試験員、試験評価員及び訓練指導員に対して訓練の試運用を行い、訓練内容の妥当性の評価及び課題の抽出を行った。

認定訓練の試運用の概要を、表2に示す。表より、訓練の対象は、オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接継手、受講者は、試験員、試験評価員及び訓練指導員とし、受講者に対する訓練を実施した。ここで、受講者は、原子力発電プラントメーカーの協力を得て、実機プラントのISIでUT検査員としての経験を有する者とした。試験員訓練では、ISIにおけ

るUTに関する知識及び試験体を用いた実技訓練による探傷技量の習得及びその確認とし、訓練日数は5日間とした。試験評価員訓練では、検出エコーの反射源の特定、探傷記録の承認等に関する知識及び評価演習による技量習得及びその確認とし、訓練日数は3日間とした。さらに、訓練指導員訓練では、試験員及び試験評価員の技量維持を目的に定期的に反復訓練するときの指導方法に関する技量習得及びその確認とし、訓練日数は2日間とした。

上記の訓練内容に基づいて訓練の試運用を行った。その結果、試験員、試験評価員及び訓練指導員のすべての受講者は、業務を遂行する技量を十分保持していることが確認できた。また、訓練内容（カリキュラム、訓練方法等）については、概ね妥当であるとの評価を得た。なお、課題としては、訓練用試験体の物量不足、講義及び実技訓練の時間配分の見直し等が挙げられた。

表2 認定訓練の試運用の概要

対象	職務区分	役割と要求される技量	訓練内容	訓練日数
オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接継手	試験員	探傷手順に従って、正しい評価を導くための探傷記録を作成すること。	・技量習得 ・技量確認	5日
	試験評価員	試験員が規定に基づいて分類したエコーの妥当性確認及び最終評価を行うこと。	・技量習得 ・技量確認	3日
	訓練指導員	反復訓練において、試験員及び試験評価員に対して適切に指導できること。	・技量習得 ・技量確認	2日

4 まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接継手試験体を用いたUTによる欠陥検出性試験結果から、試験員の探傷技量の向上には、教育・訓練が極めて有効であることを示した。

次に、上記結果から、ISIにおけるUT検査員に対する探傷技量の習得・維持を目的としたUT教育・訓練制度について検討し、訓練内容等について纏めた。さらに、訓練内容の妥当性を評価するために、教育・訓練制度案に沿った「訓練の試運用」を行った結果、訓練内容は概ね妥当との評価が得られ、また、訓練用試験体の充実等が課題として挙げられた。

今後、UT教育・訓練制度案について、詳細内容の詰めを行うとともに、実効性のあるものに改善を図っていく予定である。

謝辞

本検討で実施した「訓練の試運用」には、原子力プラントメーカーの検査員に協力頂き、貴重なデータを得ることができた。ここに、感謝の意を表す。また、本検討は、電力共同委託として実施したものである。

参考文献

- [1] 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程 (JEAC 4207-2008), (社) 日本電気協会, (2008)
- [2] ASME: “Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components”, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI

Appendix VIII, (2006)

- [3] EC Joint Research Centre: “FINAL REPORT OF THE FIRST ENIQ PILOT SRUDY”, ENIQ Report No.20, EUR 19025 EN, 19025 EN, (1999)
- [4] PISC 計画総合報告書 (PISCIII 報告書和訳版), (財) 発電設備技術検査協会, (1999)
- [5] B. McGrath: “Programme for the assessment of NDT in industry PANI 3”, Health and Safety Execute, RR617 Research Report, (2008)
- [6] 平澤泰治, 小林輝男, 牧原善次, 南康雄: ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の超音波探傷試験員に対する教育・訓練の有効性に関する検討, 保全学, Vol.15, No.1, (2016), pp.77-91



平澤泰治



小林輝男



牧原善次



南 康雄

SUS316L系溶接金属の 高温純水中に発生する応力腐食割れ形態

Stress Corrosion Cracking Morphology That Occur in High Temperature Purity Water in Type SUS316L Weld Metal

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡

Abstract

We attempted the occurrence of SCC by a CBB test in high temperature pure water to subject the weld metal of austenite low carbon stainless steel (SUS316L), it investigated SCC morphology. As a result, both SCC propagating along the growth direction of the δ - ferrite and SCC passing through the δ - ferrite were presented. It was not indicated to tendency in common on metallographic about initiation and propagation of SCC. Therefore, it suggested that there were various types of SCC.

Keywords SUS316L, Weld metal, SCC, High temperature purity water, CBB test

1 緒言

2001年以降、国内の沸騰水型原子力発電プラントにおいて、オーステナイト系低炭素ステンレス鋼の溶接部に応力腐食割れ (SCC) が多数検出された¹⁾、²⁾。検出された SCC のほとんどは、溶接熱影響部から発生したものであるが、溶接金属から発生する SCC が数事例報告³⁾されている。しかし、オーステナイト系低炭素ステンレス鋼の溶接金属は耐 SCC 性が溶接熱影響部より優れているため、試験で SCC を発生させることが困難である。そのため、溶接金属の SCC の形態は溶接熱影響部の SCC と比較してあまり知られていないのが現状である。しかし、実機は数事例であるが SCC の発生が報告されているため、溶接金属に発生する SCC の形態を把握することは、SCC の予防策を考察する上で重要である。山田ら⁴⁾は、CT 試験により SUS316L 溶接金属に進展させた SCC について EBSD 法で結晶方位図を求め、オーステナイトとフェライトの境界部で SCC が進展するとしている。しかし、SCC の発生部については

不明な点が多く、金属組織的な要因について明らかにされていない。そこで本研究は、オーステナイト系低炭素ステンレス鋼の一つである SUS316L 系 TIG 溶接金属について、SCC の発生を長時間浸漬による Crevice Bent Beam (CBB) 試験により試み、SCC が発生した場合は SCC の発生部と進展部について、金属組織的な要因を調査した。

2 実験方法

2.1 試験片の作製

図1に溶接試験体の製作状況と製作した溶接試験体の外観写真を示す。板厚 25 mm の SUS316L 板と Y316L 溶接ワイヤを用いて、電流 165 A、電圧

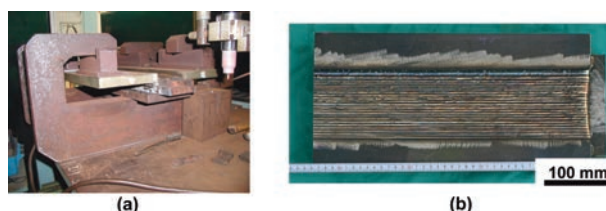


図1 溶接試験体の製作状況(a)と製作した溶接試験体の外観写真 (b)

表1 溶接金属の化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Mo	N	O
0.01	0.47	1.51	0.024	0.001	12.07	18.32	Bal.	2.13	0.020	0.003

10.5 V, 溶接速度 1.5 mm/s, ワイヤ送給速度 0.14 g/s, パス間温度 150 °C 以下の条件で TIG 溶接による多パス継手を製作した。表 1 に溶接金属の化学成分を示す。そして, 原子力発電プラントの運転温度および運転温度の加速条件を模擬するため, 製作した溶接試験体に 573, 623, 673 K の三温度で 23.4 Ms (約 9 カ月) の熱処理を行い, 最終層近傍の溶接金属から板厚 2 mm, 幅 10 mm, 長さ 50 mm の試験片を溶接線方向および溶接線直交方向から採取した。なお, 同じ熱処理温度・試験片採取方向で 4 枚の試験片を製作した。その後, 試験片の最終層側の 10 mm × 50 mm の面を 1 μm までのダイヤモンドペーストまで湿式研磨して鏡面仕上げし, この面を試験面とした。

2.2 SCC 試験

SCC は Creviced Bent Beam (CBB) 試験⁵⁾により発生の有無を調査した。図 2 に試験片のセット状況を示す。試験面に 1% の引張ひずみと 0.2 mm の隙間が一様に付与されるように試験片を治具にセットし, 高温純水環境試験装置を用いて沸騰水型原子炉の運転温度に相当する 563 K で, 溶存酸素量 8ppm, 入口側導電率 0.1 μS/cm 以下, 出口側導電率 0.3 μS/cm 以下の純水中で 11.59 Ms (約 4 カ月半) 浸漬を行った。通常, CBB 試験の浸漬時間は 1.8 Ms 程度で行われることが多いが, 本研究では SCC の発生を促進するため, 約 6 倍の浸漬時間とした。試験後の試験片に割れが開口する程度の曲げを加えた後, 断面を鏡面研磨仕上げして光学顕微鏡観察により SCC の有無を調査した。

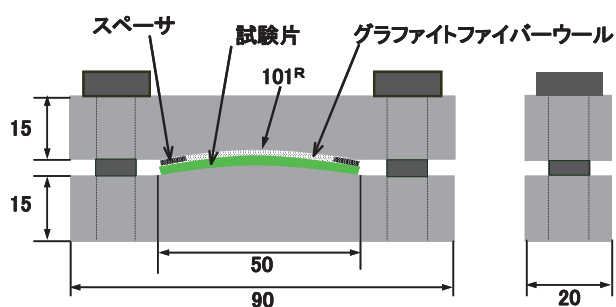


図2 試験片をセットしたCBB試験治具の模式図

2.3 金属組織評価

鏡面研磨による加工層を除去するため, 243 K の 5% 過塩素酸エタノール中で電圧 20V, 20s で電解研磨を行った。そして, SCC を包括する領域について, 電子後方散乱回折 (EBSD) 法により観察面に対して垂直方向のオーステナイトと δ-フェライトの結晶方位図を求めた。また, 集束イオンビーム加工観察装置を用いて SCC 先端部から薄膜試料を採取し, 電解放出型透過型電子顕微鏡 (FE-TEM) を用いて加速電圧 200 kV で組織観察した。さらに, ビーム径約 1nm でエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) を行い, SCC 先端部の元素分布を計測した。

3 実験結果および考察

表 2 に CBB 試験片の断面における SCC 観察結果を示す。全 24 枚の試験片について SCC の有無を調査したところ, 熱処理温度 673 K で溶接線方向から採取した試験片 1 枚のみに複数の SCC が発生しており, オーステナイト系低炭素ステンレス鋼 (SUS316L) において, 試験により高温純水中で SCC が発生することを確認した。観察された SCC の金属組織的な特徴を把握するため, EBSD 法により結晶方位図を求めた。図 3 ~ 6 に観察された SCC の光学顕微鏡写真と δ-フェライトとオーステナイトの結晶方位図を示す。観察された SCC は, 図 3 と 4 に示すように δ-フェライトの成長方向に沿って進展する割れと, 図 6 に示すように δ-フェライトを貫通するような応力支配型と見なすことができる割れがあった。表 3 に各図の SCC 発生部と進展部の金属

表2 SCCが発生したCBB試験片数

熱時効 処理温度 (K)	試験片の 採取方向	SCC が発生した 試験片数 / 試験片数
573	溶接線	0/4
	溶接線直交	0/4
623	溶接線	0/4
	溶接線直交	0/4
673	溶接線	1/4
	溶接線直交	0/4

表3 SCCの発生部と進展部の金属組織学的特徴

	発生部	進展部
図3	オーステナイト粒界	オーステナイト粒界と粒内 δ -フェライトと オーステナイトの境界
図4	オーステナイト粒内	オーステナイト粒内 δ -フェライトと オーステナイトの境界
図5	オーステナイト粒内	オーステナイト粒界と粒内 δ -フェライトと オーステナイトの境界
図6	オーステナイト粒内	オーステナイト粒内 δ -フェライトと オーステナイトの境界

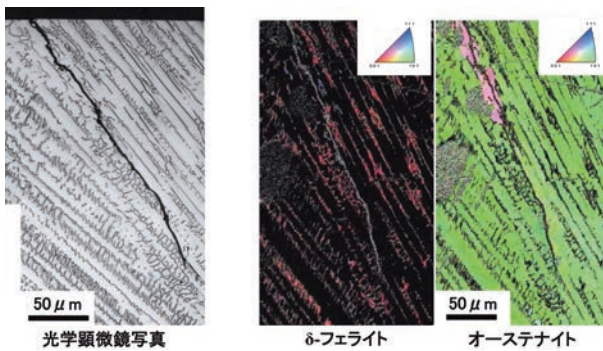


図3 CBB試験片断面のSCC部における光学顕微鏡写真および δ -フェライトとオーステナイトの結晶方位図(その1)

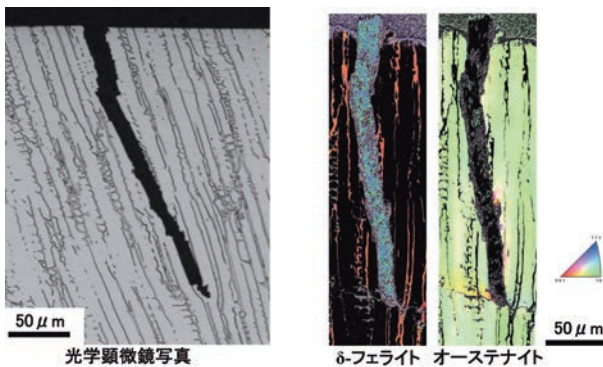


図4 CBB試験片断面のSCC部における光学顕微鏡写真および δ -フェライトとオーステナイトの結晶方位図(その2)

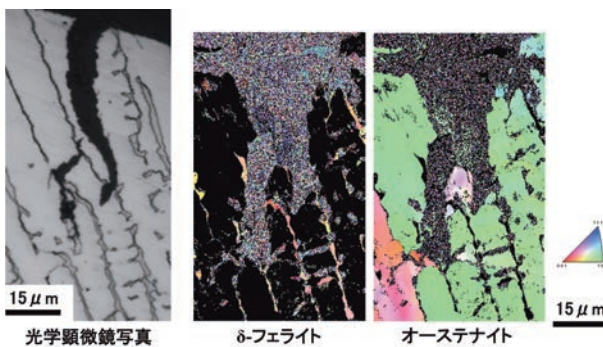


図5 CBB試験片断面のSCC部における光学顕微鏡写真および δ -フェライトとオーステナイトの結晶方位図(その3)

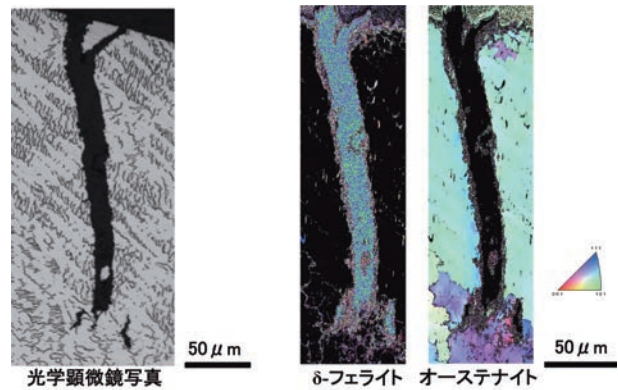


図6 CBB試験片断面のSCC部における光学顕微鏡写真および δ -フェライトとオーステナイトの結晶方位図(その4)

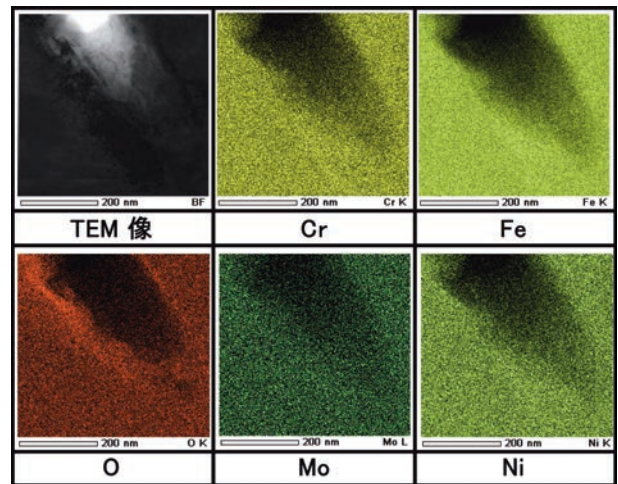


図7 図3のSCC先端部におけるTEM像とEDS分析結果

組織的な特徴をまとめる。SCCの発生部は、オーステナイト粒界の場合とオーステナイト粒内の場合があった。また、進展部は主としてオーステナイト粒内またはオーステナイトと δ -フェライトの境界部であったが、進展部の一部がオーステナイト粒界のSCCも見られた。すなわち、SCCの発生部と進展部に関して金属組織上共通した傾向は見られず、種々のタイプのSCCが存在することが示唆された。ここで、SCCの進展機構を把握するため、図3に示したSCCの先端部についてTEM観察を行った。図7にTEM像と元素分析結果を示す。割れ内面に酸素の濃化が見られることから内面の酸化が示唆されたが、他の元素に明瞭な濃化は見られず、酸化物を特定することができなかった。今回の観察でSCC進展の支配因子を特定することはできなかったが、今後は観察された他のSCCについても観察を行い、SCCに関するデータを蓄積する予定である。

4 結言

本研究は、オーステナイト系低炭素ステンレス鋼 (SUS316L系) の TIG 溶接金属について、高温純水中に 11.59 Ms (約 4 カ月半) 浸漬させた CBB 試験を試みて SCC 発生の有無を調査した。そして、発生した SCC について光学顕微鏡と EBSD を用いて形態を把握した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 673 K, 23.4 Ms で熱処理した試験片 1 枚に複数の SCC が発生し、高温純水中の浸漬試験で SCC を確認した。
- (2) SCC は、 δ -フェライトの成長方向に沿って進展するものと δ -フェライトを貫通するものがあった。
- (3) SCC の発生部と進展部に関して金属組織上共通した傾向は見られず、種々のタイプの SCC が存在することが示唆された。

参考文献

- 1) 鈴木俊一, 高守謙郎, 熊谷克彦, 大木俊, 福田俊彦, 山下裕宣, 二見常夫: BWR における低炭素ステンレス鋼の SCC 形態の評価, 圧力技術 第 42 巻, 第 4 号 (2004), 12-22.
- 2) 高守謙郎, 鈴木俊一, 熊谷克彦: 高温純水中における低炭素ステンレス鋼の SCC の発生と進展, 保全学 Vol.3, No.2 (2004), 52-58.
- 3) 鈴木俊一, 熊谷克彦, 岡村祐一, 福田俊彦, 山下裕宣, 山下理道: 維持基準を適用した炉心シェラウドの SCC 損傷評価, 保全学 Vol.3, No.2 (2004), 59-64.
- 4) 山田卓陽, 寺地巧, 宮本友樹, 有岡孝司: ステンレス鋼溶接金属部の高温水中 SCC 進展挙動, INSS Journal Vol.16 (2009), 127-135.
- 5) M. Akashi and T. Kawamoto: The Effect of Molybdenum Addition on SCC Susceptibility of Stainless Steels in Oxygenated High Temperature Water, 防食技術, 27-4 (1978), 165-171.



西川 聡

「発電用火力設備の技術基準の解釈」に関する最近の改正について

Latest trend on the revise of “Kagi-Kaisyaku” representing a technical requirement to thermal installations for power generation in Japan.

規格基準室 長谷川 忠之

A person who installs Electric Facilities obligates conforming requirements to technical standards provided in Electricity Business Act for their facilities in Japan. “Kagi-Kaishaku” is an actual example for the technical requirement to thermal power generation for Electric Facilities.

Kagi-Kaisyaku has revised February 2016. In this revise, most important point is to change from 4.0 of design margin (or safety factor) to 3.5. The author introduces the point of revise mainly on Section 10 “Welding” of Kagi-Kaisyaku in this review, including the revision of design margin.

Keywords *Kagi-Kaisyaku, Design Margin*

1 はじめに

電気事業法では、電気工作物が人体に危害を及ぼすことや物件の損壊を防止するとともに、安定的に電気を供給するため、「発電用火力設備の技術基準を定める省令」（以下、省令という）を定め、これに則って維持管理及び運用することを発電用火力設備の設置者に対して求めている。

省令は技術的要件を定めた基準であるものの具体的な記載ではないことから、技術的要件を満たす仕様を具体的に例示したものとして、国は「発電用火力設備の技術基準の解釈」（以下、火技解釈という）を予め公表している。このように、火技解釈には具体的な技術的事項が定められていることから、実際には、火技解釈に対する適合性が設置者の判断基準となっている。なお、火技解釈の前文では、省令で定める技術的要件を満たすべき仕様や技術的内容は火技解釈に限定されるものではなく、省令に照らして十分な保安水準の確保が達成できる技術的根拠があれば、省令に適合するものと判断されるとしている。

火技解釈の改正は、適宜行われているが、主に次のような形で行われている。

- ① 民間規格評価機関からの提案・要請
- ② 国の委託事業の成果の反映

①は、技術基準への適合性確認のプロセスの明確化^[1]に基づいて、民間規格評価機関としての要件を満たすと認められた機関や団体が、火技解釈の規定の改正等を提案するものである。日本電気協会で開催される日本電気技術規格委員会（以下、JESCという）は民間規格評価機関として認められており、これまで火技解釈に対する多くの改正要請を行っている。当協会はJESC内に設置された15の専門部会のうちの“溶接専門部会”を運営し、民間からの改正要望^[2]や自主調査の結果を基に火技解釈第10章溶接部に関する改正原案の作成を行っている。一方、②は国が委託事業として行っている調査等の成果を基に、火技解釈の改正を行うものである。

本稿では、上記①及び②を受けて平成28年2月に改正された火技解釈の内容について、第10章溶接部に対する改正を中心に紹介する。

表1 火技解釈第10章に関する改正内容

- (1) 一部容器へのペローズの適用 (第 136 条他)
- (2) 曲げ試験におけるローラ曲げ試験の適用 (第 146 条他)
- (3) 地下式液化ガス貯槽におけるリングプレートの追加 (第 154 条)
- (4) 揺動について許容される変動幅を設定 (別表第 10)
- (5) 溶接士技能試験で用いる試験材の厚さに関する JIS の区分との整合 (別表第 13, 17)
- (6) 特殊な材料を溶接士技能試験に用いる際の溶接後熱処理方法の規定の追加 (別表第 14)
- (7) 拘束条件の定義の明確化 (別表第 17)
- (8) 溶接金属の主要成分について、JIS における Cr 含有量との整合化 (別表第 19)
- (9) 溶接後熱処理温度及び保持時間の適正化 (別表第 21)
- (10) 低温長時間の溶接後熱処理で強度や靱性が改善する材料の明記 (別表第 22)
- (11) 放射線透過試験が要求される継手同士の接続箇所の明確化 (別表第 24)
- (12) 放射線透過試験の方法や判定基準に関する JIS の引用 (別表第 25)
- (13) 小径管台ののど厚に関する ASME 規格との整合化 (別図第 4 (23- ハ))
- (14) 管台を取り付ける継手の溶接における、外径の下限値の削除 (別図第 4 (28))
- (15) 初層ティグ溶接の溶接施工法確認試験について、表曲げ試験の追加 (附図第 1, 2)

2 JESCからの改正要請等の取り入れ

平成 28 年 2 月の改正では、JESC からの改正要請等を取り入れ、20 項目の改正が行われた。20 項目のうち、第 10 章溶接部に関連する内容を表 1 に示す。以下では、表 1 の具体的な改正内容を紹介する。なお、(5) (8) (13) については、JIS 等、他規格との整合化についてであるが、紙面の都合上、省略する。また、(12) の RT 関連の改正内容は本レビュー内で別途解説されている^[3]。

(1) は部分溶け込み溶接による熱交換器等の容器胴とペローズとの取り付けを可能とする改正である。火技解釈の別図第 7 にはペローズに関する溶接部の設計が規定されているが、これは平成 12 年の改正の際に、当時の原子力の第 4 種管 (現在のクラス 3 配管)、熱交換器等の容器及び配管継手への溶接部の設計に対する「特殊方法溶接の認可」(以下、特認という) を基に追加された規定である。この特認では、ペローズを取り付ける際に、ネックリングを介するという使用制限はなされていなかったことから、胴とは直接溶接されていた。容器胴とペローズを直接溶接する継手構造は特認において実績があり、かつ、問題が生じていないことから構造上問題がないものと判断し、今回、胴との直接溶接を可能とする改正が行われた。なお、別図第 7 のすみ肉溶接に関するものは、管との取り付けに限るという現行の規定から変更されていない。

(2) は、型曲げとローラ曲げの伸びは同等であるとの評価を踏まえ従来は型曲げのみと規定していた

曲げ試験を、型曲げとローラ曲げの両方を認めるとした改正である。この改正により、溶接士の技能試験、溶接施工法確認試験及び構造物の機械試験における曲げ試験方法が整合の取れたものとなった。

(3) は地下式 LNG 貯槽の屋根の支持構造として、リングプレートを新たに追加したものである。リングプレートは火技解釈が引用しているガス事業法関連の指針に既に取り入れられており、既に採用実績もある。リングプレートはコンプレッションリングやナックルプレートの延長として扱われており問題ないと考えられるため、規定として追加された。

(4) は溶接施工法確認試験における確認項目の 1 つである「揺動」の許容値についての見直しである。実機での溶接の際に許容される揺動の幅、頻度、停止時間は確認試験の際の値を基準に±10%の範囲は同一区分とみなすことを明確化したものである。

(6) は、溶接士の技量に関係なく材料によって溶接後熱処理 (以下、PWHT という) を必要とする場合には PWHT を実施できることとする改正である。火技解釈では、アルミニウム材 (合金を含む) 以外の溶接士技量試験の方法及び判定基準は JIS Z 3801 (1997) を引用しているが、同 JIS では、試験を通じて熱処理は行ってはならないとされている。しかし、例えば、改良 9Cr-1Mo 系鋼 (ASME Gr.91 系) では、図 1 に示すように、PWHT の有無によって溶接部の硬さ及び吸収エネルギーは大きく異なる。図 1 の場合、継手のじん性は著しく低く、PWHT を実施せずに曲げ試験を行えば、ほぼ不合格判定となる。このように溶接によって著しく変化する特性は、溶

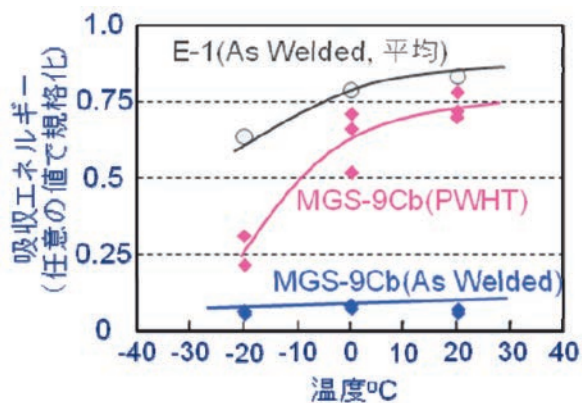


図1 PWHTの有無に伴う改良9Cr-1Mo系鋼溶接部の機械的特性の違い(E-1は炭素鋼)

表2 狭い場所の定義(火技解釈 附図第4)

試験材	溶接方法*	距離mm
アルミ又はアルミ合金以外	A	300
	G	
	T	
	PA	
	M	500
アルミ又はアルミ合金	A	500
	G	400
	G	500
	PA	
	M	

A:被覆アーク溶接 G:ガス溶接 T:ティグ溶接
PA:プラズマアーク溶接 M:ミグ溶接

接士個人の技量に依存するものではなく、材料自身が持つ固有のものである。したがって、このような材料を用いて溶接士の技量試験を行う場合には、PWHTを実施できることとした。

(7)は、火技解釈の附図第4が拘束条件の要件となることを明確に記載した改正である。従来の規定では拘束条件が明確ではなく、発電所においては有壁固定(r)の資格を有する溶接士のみが作業できる

とされていたが、今回の改正で、表2に示される距離以下が“狭い場所”であると明記することで、発電所及び工場内を問わず、表中の材料と溶接方法の組み合わせに応じて規定される距離以下では有壁固定(r)の資格を有する溶接士に、規定の距離を超える場所では有壁固定(r)と固定(e)のいずれかの資格を有する溶接士による施工が可能となった。なお、“狭い場所”の基準となる距離は、附図第4で規定されたものである。

(9)はPWHT温度の適正化についてである。9%Ni鋼に代表される、母材区分P-11A Gr.1のPWHTの範囲が従来は595～680℃とされていたが、この温度範囲では靱性の低下が懸念されるため、同母材区分のPWHTの温度範囲を550～585℃とした。

(10)は低温PWHTの有効性に関する改正である。火技解釈では、母材区分に応じて規定されたPWHTの下限温度以上で保持することが困難な場合には、下限温度以下でも保持時間を延ばすという条件付きのPWHT施工が認められている。しかし、従来の規定では全ての母材区分の材料に対して適用できると解釈され、保持時間を延長しても低温PWHTの効果が期待されない材料に対しても適用されることになるため、適用対象となる母材区分を明確にした。具体的には母材区分P-1、P-3、P-9A及び9Bについて、低温PWHTの保持時間延長を認めることとした。なお、P-9A及び9BのPWHT下限温度を540℃としている。

(11)は放射線透過試験(以下、RTという)が要求される継手接続箇所を明確化する改正である。継手接続箇所へのRT要求については、昭和33年版の技術基準では簡素な文言とともに図示された分かりやすい文書表現となっていた。その後、昭和40年版の技術基準から文章のみとなり、その後の改正において表現が複雑化し理解しにくい記載となっていた。今回の改正では、表現を見直すとともに図による説明を追記し、分かりやすい記載に改めた。

(14)は管台の差込部の継手形状に関連する改正である。火技解釈 別図第4には管台の溶接設計が規定されているが、従来はテーパタイプのものについて外径の下制限が設けられていた。しかし、応力解析による試算の結果、図2に示すように、テーパタイプの管台は外径の下制限のないストレートタ

タイプの管台と比べて発生応力が低く、発生応力比が0.5程度であった。また、特認によるこれまでの使用実績において問題が生じていないことから、テーパタイプの管台について、外径の下制限を外すこととした。

(15)は溶接施工法確認試験における、曲げ試験方法の見直しである。火技解釈では、初層ティグ溶接を行った場合の溶接施工法確認試験について、従来は裏曲げ試験のみを要求していた。しかし、継手は裏側と表側の両方を曲げる試験によって継手の延性を確認することが適切であるため、初層ティグ溶接を行った場合であっても裏表の両方を曲げる試験に改正した。これにより、試験片の本数は、裏曲げ4本であったものが裏曲げ2本と表曲げ2本となったが、総本数は変更されていない。

3 ASME 規格を踏まえた安全率の見直し等

現在の火技解釈のオリジナルとされる規定は、1953(昭和28)年に制定された「ボイラ技術基準(暫定版)」であると考えられる。これはASME規格を参考に作成したが、参考にした当時のASME規格がDMを4としていたことから、技術基準においてもそのままDM4を踏襲した。

ASMEは1915(大正4)年にDM5で設計していたが、第二次世界大戦中、戦時下の鋼材物資の保護や節約を目的に、暫定的にDM5から4に変更することを認めた。大戦後、戦時下で設計・製造された機器の運転実績が優れていることをうけ、1951(昭和25)年から圧力容器の規格は正式にDM4となった。その後、材料の品質や溶接技術の向上、検査技術の充実、規格の高度化、十分な製造実績等により、1999(平成11)年にボイラー及び圧力容器のDMを3.5とすることになった。また、圧力容器については、EN規格に対する規格の国際競争力を高める目的で、DM2.4である圧力容器規格(ASME Section VIII Division 2)を新たに制定した。

一方、我が国では、「ボイラ技術基準(暫定版)」で規定されたDM4がこれまで長く使われていたが、平成25年度の国の委託事業^[4]では、ASME規格を参考に、材料及び溶接部の品質向上や規格の高度化、試験検査技術の向上に加え、国内の圧力容器関連3法においても既にDM3.5が取り入れられているこ

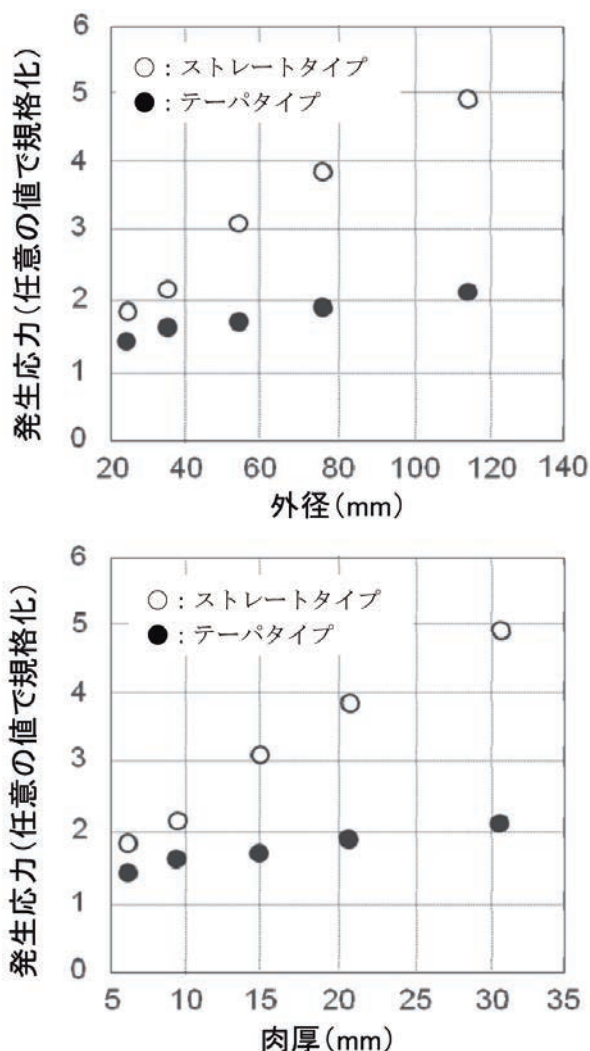


図2 継手形状の違いによる発生応力の比較

とが勘案され、火技解釈においてもDM3.5を取り入れても問題ないという報告がなされた。また、この報告を受けて平成26年度に実施された委託事業^[5]では、液化ガス設備及びガス化炉設備を除いた設備に関する具体的な改正案が検討された。

今回の改正では、これらの国の委託事業の成果を反映し、液化ガス設備及びガス化炉設備を除いた設備について、従来はDM4としていたものを、3.5に変更することとなった。図3にDMの変遷を示す。比較として、ASME規格のDMの変遷を合わせて示している。

DMの変更は火技解釈における材料の許容引張応力、換言すれば、機器の設計に大きく関連する。例えば、火技解釈では管について次の式を用いて肉厚を算出する場合がある。

$$t = \frac{Pd}{2\sigma_a \eta + 0.8P} \dots \text{式1}$$

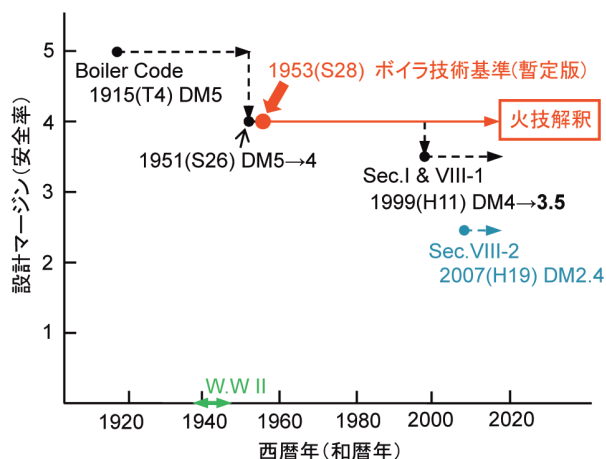


図3 技術基準とASME規格のDMの変遷

ここで、 t ：必要最小肉厚， P ：管内側の最高使用圧力， d ：管の外径， σ_a ：材料の許容引張応力， η ：長手継手の効率 である。

DM4 から 3.5 への変更に伴い、材料の許容引張応力値は概ね 14% 程度高くなる。したがって、式 1 により、従来の設計に比べて肉厚を薄くすることができる。したがって、DM3.5 でプラントを建設するには、これまでの保安水準を維持しつつ、経済的な利点を得られることになる。ただし、既設設備の補修や取替工事に際して DM3.5 を適用する場合には、DM3.5 と DM4 の取り合いになる箇所に対して技術的評価を行う必要がある。

また、DM の変更に伴い、日本機械学会の発電用火設備規格 基本規定（2012 年版，2015 年追補を含む）を取り入れることとなったが、同規定は基本事項をとりまとめたものであり、具体的には詳細規定（以下、JSME 規定という）に定められた要求事項に従うこととなる。JSME 規定は ASME 規格を参考に作成されたものであり、DM は 3.5 である。

JSME 規定が火技解釈に取り込まれたことは、同規定が技術基準で要求された技術的要件を満たすものと判断されたことになるが、その使い方に注意が必要である。すなわち、国は同規定をパッケージとして使用することを前提としており、火技解釈と組み合わせた技術基準適合性評価は認めていない（“いいとこ取りは不可”ということである）。なお、液化ガス設備及びガス化炉設備に対する DM の変更については平成 27 年度に検討されており、その結果をまとめた報告書が経済産業省の WEB サイトで公開されている^[6]。

4 終わりに

本稿では平成 28 年 2 月に改正施行された火技解釈の改正について、溶接部関連の内容を中心に紹介した。溶接部以外では、例えば、皿形及び半だ円体形鏡板の寸法精度に関する JIS の引用（第 8 条）や地下式貯槽に対する水張りをしない耐圧試験方法への見直し（第 72 条）、高クロム鋼に対する長時間使用における注意事項の追加（別表第 1 - 1, 1 - 2）等の改正が行われている。

なお、液化ガス設備及びガス化炉設備を除いた設備における DM4 から 3.5 への変更については、本稿の執筆時点（平成 28 年 8 月）で、国が改正に向けたパブリックコメントを実施している。

参考文献

- [1] 民間規格評価機関からの提案による新技術・民間規格の電気事業法に基づく技術基準への適合性確認のプロセスの明確化について，平成 16・06・24 原院第 2 号，平成 16 年 7 月 27 日
- [2] 発電技検では、次の URL にて火技解釈への改正提案を募集している。
<http://www.japeic.or.jp/gyoumu/kikakukijyun/shinsei/shinsei.htm>
- [3] 本技術レビュー（Vol.12，2016）の佐藤及び大石による記事を参照のこと。
- [4] 平成 25 年度 電気施設技術基準国際化調査（発電設備）報告書，平成 26 年 2 月，一般財団法人発電設備技術検査協会
- [5] 平成 26 年度 発電用火設備技術基準等国際化調査報告書，平成 27 年 2 月，一般財団法人発電設備技術検査協会
- [6] 平成 27 年度 電気施設保安制度等検討調査（発電用火設備に関する技術基準の性能規定化検討調査）報告書，平成 28 年 3 月，一般財団法人発電設備技術検査協会，



長谷川忠之

火技解釈での放射線透過試験方法と判定基準の根拠

Technical Base Document of Radiographic Examination Technique and Criteria in The Kagikaisyaku

規格基準室 佐藤 長光

The person who does Radiographic Examination(RT) by the Kagikaisyaku is demanding the qualified person based on JIS Z 2305. As for the qualification acquisition and the education of JIS Z 2305(2001) “Non - destructive testing – Qualification and Certification of Personnel” , JIS standard is used. The adjustment was not taken in the qualification demand and the RT technique. It was necessary to unite both. Therefore, JIS standard was quoted in the RT technique. This paper is technical base document of radiographic technique and criteria in the Kagikaisyaku

Keywords RT, JIS, Kagikaisyaku

1 はじめに

発電用火力設備の技術基準の解釈（以下、火技解釈という）では、放射線透過試験（以下、RTという）を行う者は、JIS Z 2305（2001）「非破壊試験－技術者の資格及び認証」に基づく有資格者を要求している。JIS Z 2305の資格取得及び教育については、RT関連日本工業規格（以下、JIS規格という）を基にしている。JIS規格では、材厚を基にした規定から母材の厚さを基にした規定に改正されており、材厚等に基づいた旧JIS規格に関する知識が薄れつつある。

一方、火技解釈のRTは、米国機械学会規格（以下、ASME規格という）、旧JIS規格及びJIS規格を適宜用いて独自に規定していた。

このため、資格要求思想とRT思想の整合が取れていない面があった。これを是正するため、平成28年2月25日改正施行された火技解釈では、JIS規格が引用された。

本報では、過去の規定概要、平成28年2月25日

改正施行されたRTの方法と判定基準の技術的根拠等について概説する。

2 過去の規定概要

RTが要求されるようになった昭和28年から平成26年12月10日改正施行までの主なRTの方法及び判定基準の概要を表1に示す。なお、火技解釈では、平成28年2月25日改正施行される前の改正施行日は、平成26年12月10日である。

昭和40年から原子力機器のRTが追加され、昭和45年からボイラー等は、第1種容器等と同じRTの方法と判定基準となり、平成28年2月25日改正施行まで継承されていた。また、平成17年から原子力機器のRTは、一般社団法人日本機械学会が発行しているJSME S NB1「発電用原子力設備規格溶接規格」に移行している。

3 RTの方法の技術的根拠等

平成26年12月10日改正施行の火技解釈別表第25のRTの方法とJIS Z 3104（1995）「鋼溶接継手

表1 主なRTの方法及び判定基準の概要

年	RTの方法の概要	RTの判定基準の概要
S28 [1]	<ul style="list-style-type: none"> 板厚の2%以上の欠陥の検出 板厚の2%以下の有孔形透過度計厚さの識別 $L_1 \geq 7L_2$ 	<ul style="list-style-type: none"> 割れ、溶込み不良等は不合格 ブローホールやスラグ巻込みは、標準写真等より悪い場合は不合格
S33 [2]	<ul style="list-style-type: none"> 板厚の2%以上の欠陥の検出 板厚の2%以下の有孔形透過度計厚さの識別 針金形透過度計の使用も可能 $L_1 \geq 7L_2$ 	<ul style="list-style-type: none"> 割れ、溶込み不良等は不合格 ブローホールは JIS Z 2341「金属材料のRT方法」の2級以上、スラグ巻込みは同JIS規格の3級以上が合格
S40 [3]	<ul style="list-style-type: none"> 板厚の2%以下の有孔形透過度計厚さ又は針金形透過度計線径の識別 $L_1 \geq 7L_2$ $1.0 \geq D \geq 3.0$ 	<ul style="list-style-type: none"> 割れ、溶込み不良等は不合格 ブローホールは JIS Z 2341「金属材料のRT方法」の1級又は2級が合格 スラグ巻込みは、第1種容器、原子炉格納容器及び第1種管にあっては、同JIS規格の1級又は2級が合格。ボイラー等、第2種容器及び第2種管にあっては、同JIS規格の1級、2級又は3級が合格
S45 [4]	<ul style="list-style-type: none"> 材厚の2%以下の有孔形透過度計厚さの識別 針金形透過度計は、JIS Z 3104「鋼溶接部のRT方法及び透過写真の等級分類方法」による 有孔形透過度計又は針金形透過度計の使用。原子力は有孔形透過度計のみ ボイラー等、第1種容器及び第1種管は $(L_1 \geq 5fL_2 \text{ or } L_1 \geq 3L_3)_{\max}$ 熱交換機等、第2種容器、第3種容器及び第2種管は $(L_1 \geq 2.5fL_2 \text{ or } L_1 \geq 2L_3)_{\max}$ $1.0 \geq D \geq 3.0$ 	<ul style="list-style-type: none"> JIS Z 3104「鋼溶接部のRT方法及び透過写真の等級分類方法」の1級が合格。ただし、熱交換機等、第2種容器、第3種容器及び第2種管のブローホールについては、試験視野を3倍にして欠陥点数を1/3にできる 隣接ブローホールを制限 隣接スラグ巻込みを制限
S55 [5]	<ul style="list-style-type: none"> 材厚の2%以下の有孔形透過度計厚さの識別 針金形透過度計は、JIS Z 3104「鋼溶接部のRT方法及び透過写真の等級分類方法」による 有孔形透過度計又は針金形透過度計の使用。原子力は有孔形透過度計のみ ボイラー等、第1種容器及び第1種管は $(L_1 \geq 5fL_2 \text{ or } L_1 \geq 3L_3)_{\max}$ 熱交換機等、LNG、第2種容器、第3種容器及び第2種管は $(L_1 \geq 2.5fL_2 \text{ or } L_1 \geq 2L_3)_{\max}$ $1.0 \geq D \geq 3.0$ 	<ul style="list-style-type: none"> JIS Z 3104「鋼溶接部のRT方法及び透過写真の等級分類方法」の1級が合格。ただし、熱交換機等、第2種容器、第3種容器及び第2種管のブローホールについては、試験視野を3倍にして欠陥点数を1/3にできる LNG以外は隣接ブローホールを制限 LNG以外は隣接スラグ巻込みを制限 LNGの導管以外は、同JIS規格の第1種欠陥は1級又は2級が合格。第2種欠陥は1級が合格 LNGの導管は、同JIS規格の1級、2級又は3級が合格
S60 [6]	<ul style="list-style-type: none"> 材厚の2%以下の有孔形透過度計厚さの識別 針金形透過度計は、JIS Z 3104「鋼溶接部のRT方法及び透過写真の等級分類方法」による 有孔形透過度計又は針金形透過度計の使用。原子力は有孔形透過度計のみ ボイラー等、第1種容器及び第1種管は $(L_1 \geq 5fL_2 \text{ or } L_1 \geq 3L_3)_{\max}$ 熱交換機等、LNG、第2種容器、第3種容器、第4種容器、第3種管、第4種管及び第5種管は $(L_1 \geq 2.5fL_2 \text{ or } L_1 \geq 2L_3)_{\max}$ $1.0 \geq D \geq 3.5$ 	<ul style="list-style-type: none"> JIS Z 3104「鋼溶接部のRT方法及び透過写真の等級分類方法」の1級が合格。ただし、熱交換機等、第2種容器、第3種容器、第4種容器、第3種管、第4種管及び第5種管の第1種欠陥については、試験視野を3倍にして欠陥点数を1/3にできる LNG以外は隣接第1種欠陥を制限 LNG以外は隣接第2種欠陥を制限 LNGの導管以外は、同JIS規格の第1種欠陥は1級又は2級が合格。第2種欠陥は1級が合格 LNGの導管は、同JIS規格の1級、2級又は3級が合格
H17 [7]	<ul style="list-style-type: none"> 材厚の2%以下の有孔形透過度計厚さの識別 針金形透過度計は、JIS Z 3104「鋼溶接部のRT方法及び透過写真の等級分類方法」による ボイラー等は $(L_1 \geq 5fL_2 \text{ or } L_1 \geq 3L_3)_{\max}$ 熱交換機等及びLNGは $(L_1 \geq 2.5fL_2 \text{ or } L_1 \geq 2L_3)_{\max}$ $1.0 \geq D \geq 3.5$ 	<ul style="list-style-type: none"> JIS Z 3104「鋼溶接継手のRT方法」の1類が合格。ただし、熱交換機等の第1種欠陥及び第4種欠陥については、試験視野を3倍にして欠陥点数を1/3にできる LNG以外は隣接第1種欠陥を制限 LNG以外は隣接第2種欠陥を制限 LNGの導管以外は、同JIS規格の第1種欠陥及び第4種欠陥は1類又は2類が合格。第2種欠陥は1類が合格 LNGの導管は、同JIS規格の1類、2類又は3類が合格
H26 [8]	同上	同上

L_1 : 線源と試験部の線源側表面間の距離
 L_2 : 試験部の線源側表面とフィルム間の距離
 L_3 : 試験部の有効長さ
 f : 焦点寸法(線源寸法)
 D : 試験部の濃度

表 2 技術評価結果の概要

別表第 25 の項目	技術評価結果の概要	
	JIS Z 3104, JIS Z 3105, JIS Z 3106	JIS Z 3107
—	適用範囲及び定義の明確化のため、JIS 規格での規定による。	適用範囲及び定義の明確化のため、JIS 規格での規定による。 協議事項については、火技解釈にはなじまないため JIS 規格での規定は引用しない。
非破壊試験を行う者	火技解釈 本文 第 127 条、第 145 条及び第 163 条により放射線透過試験を行う者が要求されているため、JIS 規格での規定は引用しない。	
—	放射線透過装置及び付属機器については、JIS 規格による撮影方法の性能保障及び透過試験の必要条件を確認するため JIS 規格での規定による。	
増感紙を使用する場合	鮮鋭度は、線源、フィルム及び増感紙の種類による組合せによる。増感紙の種類のみを規定することは意味がないため、JIS 規格での規定による。	増感紙を使用する場合は、厚さ 0.03 mm の鉛はく(箔)増感紙とすることとされており、火技解釈と同等と評価した。このため、JIS 規格での規定による。
撮影	<p>撮影は、試験部を透過する厚さが最小になる方向から放射線を照射することを原則としており、火技解釈と同等と評価した。</p> <p>透過写真の撮影方法は、溶接継手の形状に応じて、板の突合せ溶接継手及び撮影時の幾何学的条件がこれと同等とみなせる溶接継手又は管の円周溶接継手について附属書で要求されている。附属書 1 では単壁撮影方法を附属書 2 では内部線源撮影方法、内部フィルム撮影方法、二重壁片面撮影方法及び二重壁両面撮影方法の 4 種類を規定しており、火技解釈と同等と評価した。</p> <p>母材の厚さ 50 mm 以下の溶接継手に対して、階調計が要求されている。これは、透過写真の像質を評価する際に、透過度計による個人差を排除し、客観的な評価を可能とするために規定されている。このため、JIS 規格での規定による。</p>	<p>撮影は、試験部を透過する厚さが最小になる方向から放射線を照射することを原則としており、火技解釈と同等と評価した。</p> <p>透過写真の撮影方法は、溶接継手の幾何学的形状に応じて、平板溶接部の撮影方法、管円周溶接部の内部線源撮影方法、管円周溶接部の内部フィルム撮影方法、管円周溶接部の二重壁片面撮影方法、管円周溶接部の二重壁両面撮影方法及び管長手溶接部の二重壁片面撮影方法の 7 種類を規定しており、火技解釈と同等と評価した。</p> <p>二重壁片面撮影方法では、線源とフィルム間の距離等による必要条件(識別最小線径及び濃度範囲)により、試験部の有効長さが決まる。これにより、撮影回数が決まる。最低限の撮影回数を与える必要はないため、JIS 規格での規定による。</p> <p>二重壁両面撮影方法では、線源とフィルム間の距離等による必要条件(識別最小線径及び濃度範囲)により、試験部の有効長さが決まる。これにより、撮影回数が決まる。最低限の撮影回数を与える必要はないため、JIS 規格での規定による。</p> <p>フィルムは、溶接部に対して放射線源と反対の側にできるだけ接近して置くことを原則としており、火技解釈と同等と評価した。</p>
放射線源と溶接部の線源側表面との距離(全周を同時に撮影する場合を除く。)	<p>板の突合せ溶接継手及び撮影時の幾何学的条件がこれと同等とみなせる溶接継手に対し、ボイラー等の場合は B 級が熱交換器等及び液化ガス設備の場合は A 級が火技解釈と同等と評価した。</p> <p>しかし、A 級での撮影配置は、X 線フィルム上で X 線の強さの変化が大きくなりたくないと横割れの検出程度が試験部の中央と端部で大きく変化しないようにするための通常の像質として定められている。B 級は、余盛を削除して撮影することを前提に像質を要求しており、その適用は原子炉圧力容器等のような構造物全体として一段と高い安全性を必要とする高い感度を必要とする場合に限られる。</p> <p>これらのことから、ボイラー等、熱交換器等又は液化ガス設備の区別無く、通常の像質である A 級以上の規定によることが妥当と判断した。なお、JIS Z 3104 の B 級の撮影配置で通常の工業的撮影条件により、板厚 9.5 ~ 49 mm の平板を撮影した透過写真の必要条件の全体的な傾向としては、板厚が薄くなるに従って、透過度計識別最小線径、階調計の値の順に B 級から A 級に移行する。濃度範囲の移行はなく、B 級となっている。これらを改善し、全てを B 級とするためには、より低い管電圧での長時間露出等による撮影条件により可能と考えられるが、工業的には現実的ではない。これらを総合的に判断した結果からも A 級以上の規定によることが妥当と考えた。</p> <p>加えて、給水加熱器最終継手のように機器の構造上、線源とフィルム間の距離を満足することができない場合、フィルムの有効長を示すフィルムマークを線源側に置くことができない場合、これらの規定によることは不可能となるため、これらの規定にはよらなくてもよいことにする必要がある。</p> <p>同様に、内部線源撮影方法は通常の像質である A 級以上が、内部フィルム撮影方法は通常の像質である A 級以上が、二重壁片面撮影方法は通常の像質である P1 級以上が、二重壁両面撮影方法は通常の像質である P2 級以上が妥当と判断した。</p>	<p>平板溶接部の撮影方法では、熱交換器等及び液化ガス設備の場合の火技解釈と同等と評価した。チタンをボイラー等として使用することは考えられないため、JIS 規格での規定による。</p> <p>加えて、管円周溶接部の内部線源撮影方法、管円周溶接部の内部フィルム撮影方法、管円周溶接部の二重壁片面撮影方法、管円周溶接部の二重壁両面撮影方法及び管長手溶接部の二重壁片面撮影方法について、撮影配置を具体的に妥当性を有して規定しており、JIS 規格での規定による。</p>

散乱線の防止	散乱線に影響を及ぼす幾何学的因子は、焦点とフィルム間の距離、フィルムと試験体間の距離及び照射野の形状と寸法がある。散乱線の影響を及ぼさない焦点とフィルム間の距離、フィルムと試験体間の距離については、撮影配置として具体的に要求されている。その結果については、必要条件（識別最小線径、濃度範囲及び階調計の値）を満足する必要がある。このため、JIS規格での規定による。	散乱線に影響を及ぼす幾何学的因子は、焦点とフィルム間の距離、フィルムと試験体間の距離及び照射野の形状と寸法がある。散乱線の影響を及ぼさない焦点とフィルム間の距離、フィルムと試験体間の距離については、撮影配置として具体的に要求されている。その結果については、必要条件（識別最小線径及び濃度範囲）を満足する必要がある。このため、JIS規格での規定による。
透過度計の使用	透過度計は、針金形透過度計が規定されている。なお、円周溶接継手の撮影については、原則として帯形透過度計を用いることとするが、一般形の透過度計を用いることができる。有孔形透過度計の使用は規定されていないが、針金形透過度計の使用のみで必要条件の確認をすることが出来るため、JIS規格での規定による。 使用すべき透過度計は、母材の厚さに基づいて選定する必要がある。母材の厚さに基づいた選定は、材厚に基づいた選定を包含しているため、JIS規格での規定による。ただし、給水加熱器最終継手のように裏あて金を有する場合は、母材の厚さに裏あて金の厚さを加えないと、透過写真の必要条件を満足できないため、この厚さを加えてもよいとする必要がある。	透過度計は、針金形透過度計の一般形のT形が規定されている。管円周溶接部の撮影の場合は、帯形を使用してもよいと規定されている。有孔形透過度計の使用は規定されていないが、針金形透過度計の使用のみで必要条件の確認をすることが出来るため、JIS規格での規定による。 使用すべき透過度計は、材厚に基づいて選定する必要がある。これは、火技解釈と同等と評価した。このため、JIS規格での規定による。
透過写真の具備すべき条件	撮影された透過写真の試験部において、透過度計の識別最小線径の識別を要求しており、火技解釈と同等と評価した。 透過写真の濃度を要求しており、火技解釈と同等と評価した。 加えて、階調計の値についても要求されており、JIS規格での規定による。	撮影された透過写真の試験部において、透過度計の識別最小線径の識別を要求しており、火技解釈と同等と評価した。 透過写真の濃度を要求しており、火技解釈と同等と評価した。 このため、JIS規格での規定による。
-	試験成績書又は試験記録は、旧指定検査機関溶接検査実施要領の放射線透過試験記録例を参考として試験部との照合ができ、再現性を担保するように必要最低限の項目は従来から決められている。このため、JIS規格での規定は引用しない。	

表3 他法規でのRTの方法及び判定基準

法規	材料の種類	試験の方法	判定基準	
高圧ガス保安法 (特定設備の技術基準の解釈)	鋼材	JIS Z 3104 (1995) 「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」の6透過写真の撮影方法	JIS Z 3104 (1995) の附属書4透過写真によるきずの像の分類方法による1類又は2類	
	アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105 (1984) 「アルミニウム溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」の3透過写真の撮影方法	JIS Z 3105 (1984) の4透過写真の等級分類方法による2級以上	
	ステンレス鋼、耐食耐熱超合金、9%ニッケル鋼等	JIS Z 3106 (1971) 「ステンレス鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」の2透過写真の撮影方法	JIS Z 3106 (1971) の3透過写真の等級分類方法による2級以上	
	チタン及びチタン合金	JIS Z 3107 (1993) 「チタン溶接部の放射線透過試験方法」の5透過写真の撮影方法	JIS Z 3107 (1993) の附属書透過写真によるきずの像の分類方法による1類又は2類	
ガス事業法 (ガス工作物技術基準の解釈例)	鋼材(ステンレス鋼等は除く。)	JIS Z 3104 (1995) 「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」のA級以上(二重壁片面撮影の場合はP1級以上、二重壁両面撮影の場合はP2級以上)	JIS Z 3104 (1995) の1類又は2類。ただし、導管の周継手は、1類、2類又は3類	
	アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105 (2003) 「アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法」のA級以上(二重壁片面撮影の場合はP1級以上、二重壁両面撮影の場合はP2級以上)	JIS Z 3105 (2003) の1類又は2類。ただし、導管の周継手は、1類、2類又は3類	
	ステンレス鋼、耐熱鋼、耐食耐熱超合金、9%ニッケル鋼等	JIS Z 3106 (2001) 「ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法」のA級以上(二重壁片面撮影の場合はP1級以上、二重壁両面撮影の場合はP2級以上)	JIS Z 3106 (2001) の1類又は2類。ただし、導管の周継手は、1類、2類又は3類	
ボイラー及び圧力容器安全規則	(ボイラー構造規格)	鋼材(ステンレス鋼材を除く。)	JIS Z 3104 「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」	JIS Z 3104 の1類若しくは2類
		ステンレス鋼材	JIS Z 3106 「ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法」	JIS Z 3106 の1類若しくは2類
	(圧力容器構造規格)	鋼材(ステンレス鋼材を除く。)	JIS Z 3104 「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」	JIS Z 3104 の1類若しくは2類
		アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105 「アルミニウム平板突合せ溶接部の放射線透過試験方法」	JIS Z 3105 の1類若しくは2類であって、かつ、割れ若しくは銅の巻込みがないこと
		ステンレス鋼材	JIS Z 3106 「ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法」	JIS Z 3106 の1類若しくは2類
チタン及びチタン合金	JIS Z 3107 「チタン溶接部の放射線透過試験方法」	JIS Z 3107 の1類若しくは2類であって、かつ、割れ、溶込み不良若しくは融合不良がないこと		

表4 国内の関連規格のRTの方法及び判定基準

国内の関連規格	材料の種類	試験の方法	判定基準
JIS B 8201 陸用鋼製ボイラ 構造	鋼材の溶接部	JIS Z 3104	JIS Z 3104 の1類又は2類
	ステンレス鋼材の溶接部	JIS Z 3106	JIS Z 3106 の1類又は2類
JIS B 8265 圧力容器の構造 – 一般事項	鋼	JIS Z 3104	JIS Z 3104 の1類又は2類
	アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105	JIS Z 3105 の1類又は2類
	ステンレス鋼、耐食耐熱超合金、9%ニッケル鋼及びその他これらに類するもの	JIS Z 3106	JIS Z 3106 の1類又は2類
JIS B 8266 圧力容器の構造 – 特定規格	チタン及びチタン合金	JIS Z 3107	JIS Z 3107 の1類又は2類
	鋼	JIS Z 3104	JIS Z 3104 の1類。ただし、溶込み不良、融合不良、割れ及びこれに類するきずは不合格。
	アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105	JIS Z 3105 の1類。ただし、溶込み不良、融合不良、割れ及びこれに類するきずは不合格。
	ステンレス鋼、耐食耐熱超合金、9%ニッケル鋼及びその他これらに類するもの	JIS Z 3106	JIS Z 3106 の1類。ただし、溶込み不良、融合不良、割れ及びこれに類するきずは不合格。
JIS B 8267 圧力容器の設計	チタン及びチタン合金	JIS Z 3107	JIS Z 3107 の1類又は2類
	鋼	JIS Z 3104	JIS Z 3104 の1類又は2類
	アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105	JIS Z 3105 の1類又は2類
	ステンレス鋼、耐食耐熱超合金、9%ニッケル鋼及びその他これらに類するもの	JIS Z 3106	JIS Z 3106 の1類又は2類

の放射線透過試験方法」, JIS Z 3105 (2003) 「アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法」, JIS Z 3106 (2001) 「ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法」及びJIS Z 3107 (2008) 「チタン溶接部の放射線透過試験方法」のRTの方法について技術評価を行った。JIS規格のRTの方法は、火技解釈別表第25のRTの方法と同等と評価した。このため、JIS規格の適用範囲毎にJIS規格を引用することは妥当なものと判断した。ただし、給水加熱器胴の最終継手のように機器の構造上JIS規格による撮影が困難な場合については、JIS規格によらなくてもよい条件を付けることとした。この場合、チタンを用いた給水加熱器の製作は考えられないことから、チタンの溶接部については、この条件を付していない。技術評価結果の概要を表2に示す。

他法規でのRTの方法を参考として表3に示す。材料の種類毎に対応するJIS規格を引用している。

国内の関連規格のRTの方法を参考として表4に示す。材料の種類毎に対応するJIS規格を引用している。

平成28年2月25日改正施行された火技解釈の主な改正概要を表5に示す。

表5 火技解釈の主な改正概要

No.	主な改正概要
1	対象とする溶接部により、次のJIS規格を引用する。ただし、一部の項目については、引用しない。 ① 鋼の溶接部については、JIS Z 3104による。 ② アルミニウム及びアルミニウム合金の溶接部については、JIS Z 3105による。 ③ ステンレス鋼、耐熱鋼、耐食耐熱超合金並びにニッケル及びニッケル合金の溶接部については、JIS Z 3106による。 ④ チタンの溶接部については、JIS Z 3107による。
2	要求されていなかった放射線透過装置及び付属機器をJIS規格を引用することにより要求する。
3	要求されていなかった階調計を母材の厚さ50mm以下の溶接継手に対して要求する。
4	透過写真の像質は、板の突合せ溶接継手及び撮影時の幾何学的条件がこれと同等とみなせる溶接継手に対し、ボイラー等の場合はB級が熱交換器等及び液化ガス設備の場合はA級が要求されていたが、ボイラー等、熱交換器等又は液化ガス設備の区別無く、A級以上(二重壁片面撮影方法の場合はP1級以上、二重壁両面撮影方法の場合はP2級以上)であることを要求する。
5	透過度計は、有孔形透過度計又は針金形透過度計が要求されていたが、針金形透過度計のみを要求する。

4 RTの判定基準の技術的根拠等

4.1 JIS規格でのきずの分類における品質水準^[9]

JIS規格でのきずの分類は、溶接施工の品質管理基準として用いられ、等級分類結果を溶接継手における有害度として直接位置づけていたこれまでの考

え方を，単に内在程度に応じて分類する考えに修正されている。

図1は，製作時及び供用期間中の溶接継手の品質水準のイメージをA，B及びCの3つのレベルに分けて解説したものである。Aレベルは製作時の作業標準〔品質管理基準（平均値）〕を，Bレベルは製品が使用に耐えるか又は目的に合致するかの合目的基準〔品質管理基準（下限値）〕を，Cレベルは補修可否基準（下限値）を示している。ここで，1～4類のきずの分類は，多くの場合，Aレベルに相当していると考えられている。

4.2 JIS規格でのきずの種類による分類^[9]

溶接継手の疲れ強さに及ぼす影響は，きずの位置，形状（種類）及び寸法によって異なる。丸みのあるきずは，主に溶接継手の断面積の減少に起因して強さを低下させると考えられている。平面状のきずは，応力集中に起因して強さを低下させると考えられている。このため，きずの種類を次の4種類に分け，それぞれの種別毎に分類した後総合分類を行うこととしている。

- ① 第1種のきずは，丸みを帯びたブローホール，スラグ巻込み等で，主としてきずによる断面積の減少が溶接継手の強度を低下させると考えられるもの。
- ② 第2種のきずは，細長いスラグ巻込み，パイプ（細長いブローホール），溶込み不良，融合不良及びこれに類するきずで，主としてきず部の応力集中が溶接継手の強度を低下させると考えられるもの。

- ③ 第3種のきずは，各種の割れ及びこれに類するきずで，応力集中が非常に大きく，溶接継手の強さを著しく低下させると考えられるもの。溶接継手の強さについては，第2種と第3種のきずの差は明確ではないが，製造時の割れは，溶接施工を管理する上で一般に許容されないため，第2種のきずと分けて分類している。
- ④ 第4種のきずは，タングステン巻込みで，強度低下にはあまり影響しないもの。

JIS規格でのきずの分類は，上記のように溶接施工の品質管理基準として用いられ，等級分類結果を溶接継手における有害度として直接位置づけていたこれまでの考え方を，単に内在程度に応じて分類する考えに修正されている。しかし，分類方法は概ね旧JIS規格の基準を踏襲している。旧JIS規格制定時の各分類に対応する構造物としては，次のように考えられていた。

- ① 1類（旧1級）は，繰返し荷重を受けて疲れ強さを特に考慮しなければならないもの，又は，破壊によって重大な災害が起こるもので，余盛を削除するようなもの。
- ② 2類（旧2級）は，余盛は削除しないが，繰返し荷重を受けてるか，又は強さが重要と考えられるもの。
- ③ 3類（旧3級）は，疲れ強さを考慮しなくてもよいようなもの。

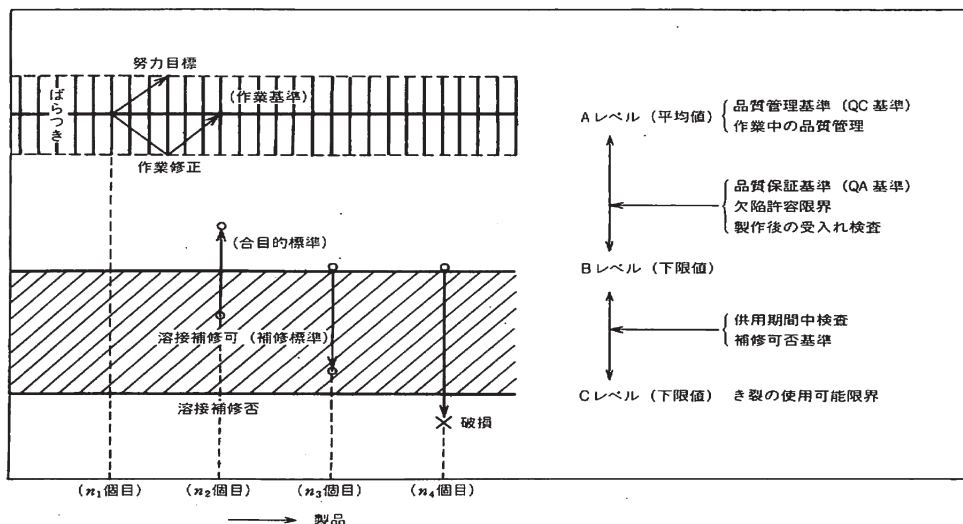


図1 製作時及び供用期間中の溶接継手の品質水準のイメージ

また、旧 JIS 規格では溶込み不良及び融合不良の長さに 2 を乗じて、スラグ巻込みと区別していたが、3 者の先端の尖鋭度は明瞭に区別できず力学的にも 2 を乗じて区別する根拠が不明確であるとの理由で JIS 規格においては 3 者を同等として扱っている。

加えて、RT の結果をいたずらに処理しすぎると、実際のきずの内在状況を分かりにくくしてしまい、適切な要求品質を指定しにくくしてしまう恐れがあるとの理由で、JIS 規格においては 3 者を同等として扱っている。

ただし、第 2 種の 2 類の等級分類の長さは、ASME 規格のスラグ巻込みの判定基準の長さを基にしている。ASME 規格では、割れ、溶込み不良又は融合不良があってはならないとされている。

4.3 JIS規格での判定基準についての一考察^[9]

判定基準については、安全性と経済性を考慮し、溶接継手の品質管理上、適切な品質レベルとすべきであり、不必要に小さい分類番号を要求することは意味が無い。例えば、最も品質レベルが上位の理由だけで 1 類だけを判定基準とすることは意味が無い。余盛を削除しない溶接継手は、使用条件によっては、余盛の存在により疲れ強さが低下することがあり、余盛の存在を許容しつつ 1 類だけを判定基準とすることは不合理な場合もある。また、手直し溶接の増加をまねき、溶接継手の品質を手直し前よりむしろ低下する場合もある。

4.4 判定基準の検討

4.4.1 1 類又は 2 類での妥当性の検討

溶接継手の内在するきずの主な種類は、ブローホール、スラグ巻込み、溶込み不良、融合不良、割れ及びタングステン巻込みがある。

この内、ブローホール、スラグ巻込み及びタングステン巻込みについては、発生を完全に抑制することができない反面、形状が体積状となり応力集中が溶接継手の強度を低下させる度合いは少ないため、1 類又は 2 類での判定基準は妥当なものと判断した。

一方、溶込み不良、融合不良及び割れについては、適切な管理や技量で発生を抑制することができる反面、形状は面状となり応力集中が溶接継手の強度を極端に低下させる。このため、ボイラー等、熱交換器等及び液化ガス設備の溶接施工を管理する上で平成 26 年 12 月 10 日改正施行の火技解釈でも基本的

には許容されていない。この平成 26 年 12 月 10 日改正施行の火技解釈の基本的な考え方は踏襲すべきものと判断した。

一方、JIS Z 3104 及び JIS Z 3106 の第 2 種のきずについては、スラグ巻込み、溶込み不良及び融合不良が含まれる。JIS 規格では、第 2 種のきずとして、スラグ巻込みの発生は融合不良を併発する場合が多く、RT フィルム上で両者を区別する判断基準が曖昧であるとの理由で両者を同等として扱っている^[9]。しかし、RT フィルムの判定においては、溶接施工の品質管理上、きずの種類（例：溶込み不良）の判別は重要であり、フィードバックして溶接条件の良否の判断に用いられる場合もある。従って、通常はきずの種別（例：第 2 種）と分類（例：2 類）を行うだけでなく、きずの種類を判別している。

また、平成 26 年 12 月 10 日改正施行の火技解釈の熱交換器等では、試験視野を 3 倍に拡大して、きず点数を 1/3 にできる規定がある。2 類のきず点数は、1 類の 3 倍になっており、実質的には 2 類が許容されていた。

4.4.2 近接する第 1 種のきずの寸法制限の検討

JIS 規格では、母材の厚さに応じて試験視野を 10 × 10 mm, 10 × 20 mm, 10 × 30 mm の 3 段階に区分し、判定はこの試験視野内で行うように規定されている。平成 26 年 12 月 10 日改正施行の火技解釈での近接する第 1 種のきずの寸法制限については、この試験視野の概念と同等と判断した。

4.4.3 連続する第 2 種のきずの寸法制限の検討

JIS 規格では、きずときずとの間隔が大きい方のきずの長さ以下の場合、きずときずとの間隔を含めて測定した寸法をそのきず群のきず長さとする。この長さの判定基準は、1 類で母材の厚さの 1/4 以下、2 類で母材の厚さの 1/3 以下となっている。

一方、平成 26 年 12 月 10 日改正施行の火技解釈では、母材の厚さの 12 倍の長さの範囲内で、隣接する第 2 種のきずの間の距離が長い方の第 2 種のきずの長さの 6 倍未満であり、かつ、これらが連続して直線上に並んでいるときにおけるこれらの長さの合計が母材の厚さを超えないこととなっていた。

このように、平成 26 年 12 月 10 日改正施行の火技解釈と比較して、JIS 規格においては、近接したきずが連続している場合により厳しく判定すること

になる。このため、JIS規格での1類又は2類は妥当なものと判断した。

以上の検討結果及び下記の「4.5 参考」を基に総合的に判断して、ボイラー等、熱交換器等及び液化ガス設備（導管の周継手を除く）を区別せず、1類又は2類とすることは妥当と判断した。ただし、溶込み不良又は融合不良があってはならないものとした。

また、導管の周継手については、平成26年12月10日改正施行の火技解釈の判定基準及びガス事業法での判定基準を尊重し、1類、2類又は3類のままとした。ただし、溶込み不良又は融合不良があってはならないものとした。

なお、割れ及びこれに類するきず（第3種）は、4類に分類される。

平成28年2月25日改正施行された火技解釈の主な改正概要を表6に示す。

表6 火技解釈の主な改正概要

No.	主な改正概要
1	対象とする溶接部により、次のJIS規格を引用する。ただし、溶込み不良又は融合不良については引用せず、あってはならないものとした。 ① 鋼の溶接部については、JIS Z 3104による。 ② アルミニウム及びアルミニウム合金の溶接部については、JIS Z 3105による。 ③ ステンレス鋼、耐熱鋼、耐食耐熱超合金並びにニッケル及びニッケル合金の溶接部については、JIS Z 3106による。 ④ チタンの溶接部については、JIS Z 3107による。
2	ボイラー等で要求されていた1類を1類又は2類とした。
3	導管の周継手、アルミニウム及びアルミニウム合金の溶接部で許容されていた溶込み不良又は融合不良については、あってはならないものとした。

4.5 参考

4.5.1 他法規での規定

他法規でのRTの判定基準を参考として表3に示す。材料の種類毎に対応するJIS規格を引用し、1類又は2類の場合に合格としている。ただし、ガス事業法の導管の周継手については、1類、2類又は3類の場合に合格としている

4.5.2 国内規格での規定

国内の関連規格のRTの判定基準を参考として表4に示す。材料の種類毎に対応するJIS規格を引用し、1類又は2類の場合に合格としている。しかし、JIS B 8266「圧力容器の構造 - 特定規格」は、1類の場合のみを合格としている。これは、他の規格と相違して、応力解析及び疲労解析による設計をベースとしており、他の規格の設計マージン（安全率：4又は3.5）と比較して設計マージン（安全率）が3と小さいためと考えられる。

4.5.3 溶接継手の各種強度に影響を及ぼす要因

溶接継手の強度は種々の要因の影響を受け、母材のみの場合に比べてかなり複雑になる。また、因子が強度に及ぼす影響は、考える強度の種類によって異なる。各種強度に及ぼす因子の影響の程度を整理して表7に示す^[10]。体積状の溶接欠陥は、その寸法が小さい場合、他の影響因子より各種強度に影響を及ぼさないことが分かる。

体積状の欠陥は状況により疲労強度に影響すると考えられるが、ボイラー等で特に配慮が必要となる高温強度については影響が少ない。加えて、延性破壊についての影響は少ない。

他方、面状の欠陥については、延性破壊についての影響は少ないが、脆性破壊強度と疲労強度に与える影響が大きい。高温強度及び腐食強度については

表7 各種強度に及ぼす因子の影響の程度

影響因子 強度の種類	材料強度	合金成分	熱履歴/ 組織	応力集中	溶接欠陥 1)		工作誤差	残留応力	備考
					体積状	面状			
静的強度 2)	○	○	△	-	-	-	△	-	
脆性破壊強度	△	○	○	△	-	○	△	○	
疲労強度	△	△	△	○	△	○	△	△	
高温強度	-	○	△	△	-	△	△	-	
座屈強度	△	○ 3)	-	-	-	-	○	○	
腐食強度	△	○	○	△	-	△	-	○	

1) 小さいサイズを想定 2) 延性破壊 3) ヤング率に関係
影響の程度 ○: 大きい △: 状況による -: 少ない

状況により影響すると考えられる。

4.5.4 溶接欠陥の静的強度に及ぼす影響^[11]

溶接継手部に生じる溶接欠陥には、ブローホール、スラグ巻込み、割れ、アンダカット、溶込み不良がある。

溶接欠陥が溶接継手の静的強度に及ぼす影響は、一般に小さい。

図2には、ブローホール、スラグ巻込み、溶込み不良、割れ、アンダカットなどを含んだ原子炉用A302鋼の突合せ溶接継手（板厚50mm）の引張試験結果を示す。図の横軸は、面積欠陥率 α_x （X線透過写真のフィルム濃度から推定した平均深さと平均長さの積の総和と破断面積との比）、縦軸は引張強さ及び伸びを示している。

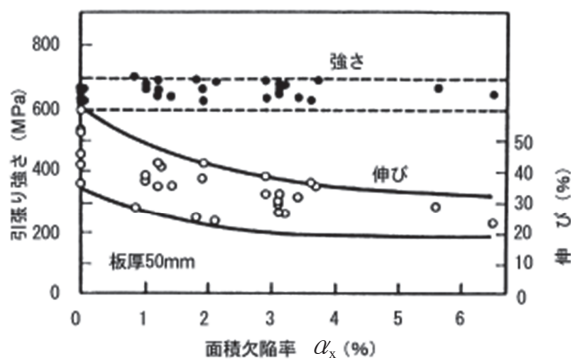


図2 溶接継手の静的引張特性に及ぼす溶接欠陥の影響

参考

材 料	ASTM 規格		相当 JIS 規格材料
	引張強さ (MPa)	伸び (%)	
A302 Gr. A	515 ~ 655	min. 19	JIS G 3119 SBV1A
A302 Gr. B	550 ~ 690	min. 18	JIS G 3119 SBV1B
A302 Gr. C	550 ~ 690	min. 20	JIS G 3119 SBV2
A302 Gr. D	550 ~ 690	min. 20	JIS G 3119 SBV3

図2から分かるように、 α_x が7%以下では引張強さは α_x に影響されない。 α_x が小さいときに引張強

さが低下しない理由は、次のように考えられている。すなわち、一般に溶接金属の強度 σ_w は母材の強度 σ_B よりも高いので、式(1)の条件を満たす限り、 α_x が増加しても継手強度は低下しない。

$$\sigma_w (1 - \alpha_x) > \sigma_B \quad (1)$$

ここで、 σ_w は溶接金属の引張強度

α_x は面積欠陥率（X線透過写真のフィルム濃度から推定した平均深さと平均長さの積の総和と破断面積との比）

σ_B は母材の引張強度

一般には、 σ_w は $1.1 \sigma_B \sim 1.3 \sigma_B$ であるので、式(1)の条件を満たす限り、この範囲の α_x は、溶接継手の静的強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

母材の厚さ50mmにおけるJIS Z 3104での1類又は2類の第1種（丸いブローホール及びこれに類するきず）のきずの点数の上限から求めた α_x を表8に示す。1類又は2類の欠陥率は、0.79%又は3.14%であり、いずれも、7%以下のため静的強度には影響がないと考えられる。ここでは、最大長径を直径とした円の面積和が最大となるきずの点数の上限に相当するブローホールの最大長径とその組合せを求め、これを欠陥面積として算出し、母材面積で除して α_x を計算した。ここでの欠陥は、試験片軸方向と垂直にあるものとし、重ならないものとした。母材面積の算出では、試験片の幅（25mm）を用いず、保守的に試験視野（10×20mm）の長辺である20mmを用いて算出（50×20=1,000mm²）した。 α_x の算出のフィルムイメージを図3に、試験板、試験片、欠陥及びフィルムの位置関係のイメージを図4に示す。

表8 JIS Z 3104でのきずの点数の上限から求めた面積欠陥率

類	きずの点数の上限(点)	最大長径を直径とした円の面積和が最大となるきずの点数の上限に相当するブローホールの最大長径とその組合せ(mm)	個々の欠陥面積 A1 A2 (mm ²)	欠陥面積和 A1 + A2 (mm ²)	母材面積 50 × 20 B (mm ²)	面積欠陥率 (A1 + A2)/B (%)
1類	4	3.0 (3点) 1.0 (1点)	7.07 0.79	7.86	1,000	0.79
2類	12	6.0 (10点) 2.0 (2点)	28.26 3.14	31.40	1,000	3.14

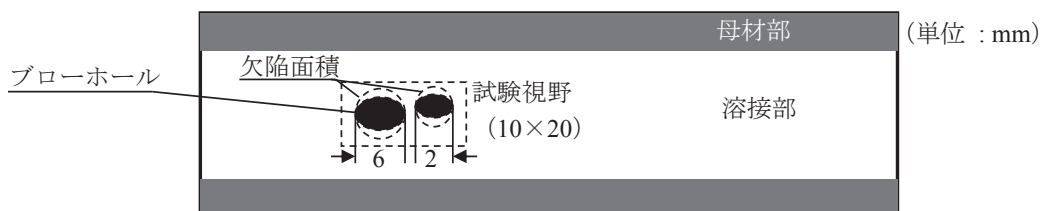


図3 母材の厚さ50 mmにおけるJIS Z 3104での2類の第1種を例とした欠陥率の算出のフィルムイメージ

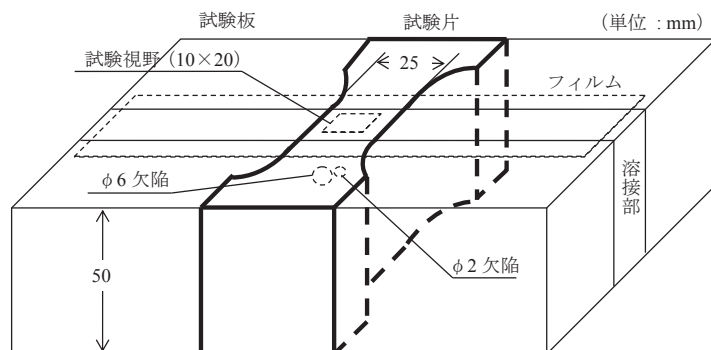


図4 試験板、試験片、欠陥及びフィルムの位置関係のイメージ

一方、図2では、 α_x が大きくなると、継手の伸びは減少する傾向がある。継手の延性が失われて脆性的破壊が生じやすくなるとの意見もある。

傾向的には上記のことが言われるが、 α_x が0%でも伸びは約60～35%の間で分布し、 α_x が3%で伸びは約35～20%となりそれ以降での減少率は小さい。 α_x が7%においても、曲げ試験で要求される20%の伸びは満足しているため、必要な延性は確保されるものと考えられる。

しかし、図5に示すように、厚板の溶接継手において割れを対象とした α_x が大きくなると、 α_x による断面積減少以上に継手強度が低下する結果がある。図5はSM490A(板厚32mm)のノンガスアーク半自動溶接継手の引張試験で得られたものである。図中の一点鎖線は、式(1)左辺による計算結果である。実線で示す実験結果の回帰直線は、計算結果よりも低下していることがわかる。すなわち、割れを有する溶接継手で α_x が大きくなると、断面積減少以上に継手強度が低下することが分かる。

溶込み不良又は融合不良についても、割れを有する溶接継手と同様な結果を示すと考えられるため、判定基準としては3者を同一のものとして考えることが必要となる。

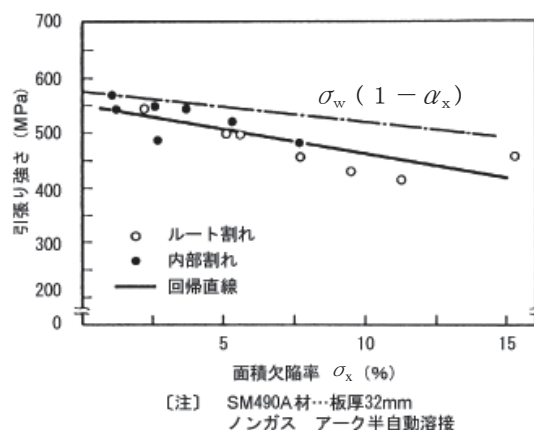


図5 厚板溶接継手の静的引張強度に及ぼす割れ欠陥の影響

5 おわりに

火技解釈では、RTを行う者は、JIS Z 2305に基づく有資格者を要求している。JIS Z 2305の資格取得及び教育については、JIS規格を基にしている。JIS規格では、材厚を基にした規定から母材の厚さを基にした規定に改正されており、材厚等に基づいた旧JIS規格に関する知識が薄れつつある。

一方、火技解釈のRTは、ASME規格、旧JIS規格及びJIS規格を適宜用いて独自に規定していた。

このため、資格要求思想とRT思想の整合が取れていない面があった。これを是正するため、平成28

年2月25日改正施行された火技解釈では、JIS規格が引用された。

本報では、過去の規定概要、平成28年2月25日改正施行されたRTの方法と判定基準の技術的根拠等について概説した。

なお、平成28年2月25日改正施行されたRTの方法と判定基準については、試験検査検討グループ、溶接専門部会及び日本電気技術規格委員会（以下、JESCという）の審議を経て経済産業省 商務流通保安グループ 電力安全課に改正要請されたものである。審議頂いた委員及び改正作業を担当された担当官に深甚の謝意を表す。また、本改正根拠の詳細は、第68回JESCの資料No. 2-1である。

参考文献

- [1] 発電用ボイラ技術基準（暫定）、昭和28年12月、通商産業省公益事業局
- [2] 発電用ボイラ技術基準、昭和33年8月30日、社団法人火力発電技術協会
- [3] 電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令、昭和40年8月20日、社団法人火力発電技術協会
- [4] 電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令、昭和45年10月30日、社団法人火力発電技術協会
- [5] 電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令、昭和55年3月25日、社団法人火力発電技術協会
- [6] 電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令、昭和60年11月20日、社団法人火力原子力発電技術協会
- [7] 発電用火力設備の技術基準の解釈、平成17年12月27日、平成17・12・21 原院第1号改正施行
- [8] 発電用火力設備の技術基準の解釈、平成25年5月17日、20130507 商局第2号（20141208 商局第1号、平成26年12月10日改正施行）
- [9] JIS Z 3104（1995）「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」解説、財団法人日本規格協会
- [10] http://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0040020010
- [11] http://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0040020090



佐藤長光

非破壊試験の判定基準の安全裕度に関する考察

Investigation of the Safety Factor for the Criteria of Nondestructive Examinations

規格基準室 大石 勇一, 長谷川 邦夫

On February 2016, design margin is changed from 4 to 3.5, and the margin is applied to determine the allowable stresses used in the standard for fossil-fired power plants. According to this revision, the design stresses less than creep regime can be increased about 14%, whereas the criteria of nondestructive examinations are not changed. In addition, radiographic examination requirements are also changed to fulfill the latest version of JIS 3104. Accordingly, the investigation of the safety factor for the criteria of nondestructive examination was performed.

Keywords

design margin, criteria, nondestructive examination, standard for fossil-fired power plants

1 はじめに

発電用火力設備の技術基準の解釈（20130507 商局第2号。以下「火技解釈」という。）は、性能規定化された発電用火力設備の技術基準（平成9年通商産業省令第51号）を満足するための具体的な技術要件を例示したものである。平成28年2月25日付けで改正されたが、特筆すべき変更点は、別表第1に与えられている許容引張応力の改正である。従来は、クリープ領域未満の温度領域における許容応力として、当該温度における引張強さの1/4の値が与えられていたが、一部の鋼種を除き1/3.5の値に改正された。すなわち、設計マージン（許容応力の引張強さに対する裕度を表す係数）が4から3.5に変更された。これは、国際的に広く使用されているASME Codeと整合を図ったものであるが、この改正により、クリープ領域未満の温度領域における設計応力が、従来よりも14%程度高くなる。このため、溶接部について非破壊試験を行った場合の判定基準、言い換えれば許容される欠陥の最大寸法につい

ても見直す必要があるかどうか検討が行われた。その結果、判定基準を見直す必要はないことが、国の報告書や論文等により報告されている（以下「報告書等」という。）^{[1], [2], [3]}。すなわち、従来の経験に基づく非破壊試験の判定基準について、設計マージンを4から3.5に変更しても、破壊力学的評価により十分に裕度のあることが確認されている。

上述の報告書等において検討された溶接部の母材は、主にJIS G 3103 SB 410（以下「SB 410」と略す。）である。しかし、発電用火力設備には様々な種類の鋼材が使用されており、それらを接合する溶接部については、「母材と同等以上」とする性質が要求されている。また、非破壊試験の判定基準は、鉄鋼材料と非鉄材料（Al, Ti等）で異なるものの、鋼種ごとに区別して与えられてはいない。このため、上述の報告書等と同じ手法を用いて、判定基準の安全裕度に対し鋼種の相違が与える影響について検討を行った。

2 対象鋼種の選定及び材料定数

前出の報告書等は、試験により求められた弾塑性破壊靱性 J_{Ic} に基づいて破壊靱性値 K_{Ic} を決定し、許容される欠陥の応力拡大係数に対してどの程度の余裕があるのか評価を行っている。このため、同じ引用文献に掲げられている J_{Ic} を用いて、複数の鋼種について裕度の比較を行うことにした。また、対象鋼種については、JIS G 3103（ボイラ及び圧力容器用炭素鋼及びモリブデン鋼鋼板）の SB 410 を基本とし、発電用火力設備で使用が認められている次の①～④の炭素鋼及び合金鋼を選定した。

- ① JIS G 4051 S25C（以下、「S25C」と略す。）
- ② JIS G 3120 SQV2A 相当材（ASTM A 533 Type B Class 1（以下、「Type B」と略す。））
- ③ JIS G 4109 SCMV4 強度区分 2 相当材（ASTM A 387 Grade 22 Class 2（以下、「Gr. 22」と略す。））
- ④ JIS G 5151 SCPH32 相当材（ASTM A 217 WC9（以下、「WC9」と略す。））

なお、弾塑性破壊試験に用いられた材料は大半が ASTM 材であるため、相当 JIS 材が存在する②～④

を選定した。さらに、鋳鋼に関する試験結果がほとんど見当たらなかったことから、④については同じ試験方法を用いて確認された他の文献^[4]の値を参考として用いることにした。

対象材料の化学成分を表 1 に掲げるが、厚さ区分が設けられている材料については、放射線透過試験の判定基準において厚さの境界となっている 48 mm が該当する値を掲げている（後述の 4 項参照）。また、対象材料の材料定数を表 2 に掲げる。

3 対象材料の破壊靱性

次に、対象材料の破壊靱性値を求める。 J 積分と応力拡大係数との関係は、次式で表わされる。

$$J = \frac{(1-\nu^2)K^2}{E} \quad (1)$$

この式を変形すると、次のようになる。

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic}E}{1-\nu^2}} \quad (2)$$

したがって、 J_{Ic} 、ポアソン比 ν 及びヤング率 E が既知であれば、式 (2) により破壊靱性値 K_{Ic} を求め

表 1 対象材料の化学成分（溶鋼分析値） 単位 wt %

鋼種	化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
SB 410		≦ 0.27	0.15 ~ 0.40	≦ 0.90	≦ 0.030	≦ 0.030	—	—	—
S25C		0.22 ~ 0.28	0.15 ~ 0.35	0.30 ~ 0.60	≦ 0.030	≦ 0.035	—	—	—
Type B Cl. 1		≦ 0.25	0.15 ~ 0.40	1.15 ~ 1.50	≦ 0.035	≦ 0.040	—	0.40 ~ 0.70	0.45 ~ 0.60
Gr. 22 Cl. 2		0.05 ~ 0.15	≦ 0.50	0.30 ~ 0.60	≦ 0.035	≦ 0.035	2.00 ~ 2.50	—	0.90 ~ 1.10
WC9		0.05 ~ 0.18	≦ 0.60	0.40 ~ 0.70	≦ 0.04	≦ 0.045	2.00 ~ 2.75	—	0.90 ~ 1.20

表 2 対象材料の材料定数

鋼種	材料定数	引張強さ ⁽¹⁾	設計応力 ⁽²⁾ (Su/4)	設計応力 ⁽³⁾ (Su/3.5)	ポアソン比 ν ⁽⁴⁾	ヤング率 E ⁽⁵⁾
SB 410		410 MPa	103 (103) MPa	117 (118) MPa	0.30	202 GPa
S25C		440 MPa	110 (110) MPa	126 (110) MPa	0.30	202 GPa
Type B		550 MPa	138 (138) MPa	157 (158) MPa	0.30	200 GPa
Gr. 22		515 MPa	129 (130) MPa	147 (148) MPa	0.30	210 GPa
WC9		485 MPa	121 (97) MPa	139 (110) MPa	0.30	210 GPa

(注) 1. 材料規格に規定された値（最小値）

2. 引張強さの 1/4 の値。（ ）内は、火技解釈に与えられている許容応力値（ASTM 材の場合は、相当 JIS 材の値であり、WC9 には品質係数 0.8 が適用されている）を示す。

3. 引張強さの 1/3.5 の値。（ ）内は、火技解釈に与えられている許容応力値（ASTM 材の場合は、相当 JIS 材の値あり、WC9 には品質係数 0.8 が適用されている）を示す。

4. ASME Section II Part D Table PRD の値

5. ASME Section II Part D Table TM-1 の 25° C における値

ることができる。ここで、対象鋼種の R 曲線法により求められた J_{Ic} は、表 3 の上段に掲げるとおりである^[4]。それら J_{Ic} 及び式(2)を用いて K_{Ic} を求めると、表 3 の下段に掲げる値となる。

$$K_I = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (3)$$

なお、上述の報告書等で用いられた SB 410 の J_{Ic} は 3.1 kgf/mm (0.0304 MPa \sqrt{m})、求められた K_{Ic} は 83.1 MPa \sqrt{m} であり、表 3 に掲げるものよりかなり小さく保守的な値である。これは、同じ材料であっても異なる試験方法 (R 曲線法ではなくてストレッチ・ゾーン法) を用いたことが主な要因と考えられる。

$K_I \geq K_{Ic}$ となる条件で破壊が生じることから、表 2 に掲げる許容応力 (表中の () 内の値) を用いて、各鋼種について K_I を求めると共に、破壊に対する裕度 (K_{Ic}/K_I) を計算した。設計マージン 4 の場合が表 4、設計マージン 3.5 の場合が表 5 である。

表 3 対象鋼種の J_{Ic} と K_{Ic}

鋼種	SB 410	S25C	Type B	Gr. 22	WC9
J_{Ic} (MPa \sqrt{m})	0.123	0.0604	0.166	0.202	0.151
K_{Ic} (MPa \sqrt{m})	165	116	191	216	186

4 最大許容欠陥寸法の安全裕度の比較

火技解釈において要求される非破壊試験 (体積試験) は、基本的に放射線透過試験である。火技解釈の 2016 年 2 月に行われた改正では、鋼材溶接部の試験方法について完全に JIS Z 3104:1995 に従って行う内容に変更されると共に、判定基準については、従来、第 1 類しか許容されなかった「ボイラー等」について、「熱交換器等」と同じ第 2 類を許容する内容に改正された。このため、第 2 類で許容される最大寸法の 16 mm (母材の厚さ 48 mm 以上に対する許容寸法) の円形内部欠陥を想定して安全裕度の比較を行った。また、比較を容易にするため、単一の欠陥が存在する場合について計算を行った。

無限板に半径 a の円形内部欠陥が存在する場合、応力拡大係数 K_I は次式で与えられる。

表 4 及び表 5 からは、設計マージン 4 から 3.5 への変更に伴って安全裕度が若干下がるものの、どの鋼種についても、依然、十分な裕度が確保されていることがわかる。選定したフェライト系鋼材の範囲内では、鋼種の相違による安全裕度の有意な差は見られず、現行の判定基準を鋼種に関係なく適用しても問題ないを考える。さらに S25C の場合、設計マージンの変更に伴った許容応力値の変更が行われなかったが、このことにより、安全裕度が他の鋼種と同様のレベルになり、鋼種の相違による差が小さくなったといえる。

5 まとめ

火技解釈の設計マージン 4 から 3.5 への変更に伴い、クリープ領域未満の温度範囲における設計応力が約 14% 増大するが、非破壊試験の判定基準は変更されなかった。このため、種々の鋼種についてどの程度の裕度を有するのか破壊力学的評価を行ったが、その結果をまとめると次のとおりとなる。

- ・ 現行の非破壊試験の判定基準は、選定した全ての鋼種について十分に裕度がある。
- ・ 安全裕度は、選定したフェライト鋼材の間で有

表 4 設計マージン 4 の場合の安全裕度

鋼種	SB 410	S25C	Type B	Gr. 22	WC9
K_{Ic} (MPa \sqrt{m})	165	116	191	216	186
K_I (MPa \sqrt{m})	10.4	11.1	13.9	13.1	9.79
安全裕度 K_{Ic}/K_I	15.9	10.5	13.7	16.5	19.0

表 5 設計マージン 3.5 の場合の安全裕度

鋼種	SB 410	S25C	Type B	Gr. 22	WC9
K_{Ic} (MPa \sqrt{m})	165	116	191	216	186
K_I (MPa \sqrt{m})	11.9	11.1	15.9	14.9	11.1
安全裕度 K_{Ic}/K_I	13.9	10.5	12.0	14.5	16.8

意な差は見られず、同じ判定基準を適用しても問題ないとする。

- ・許容応力値が設計マージン4と同じ値に据え置かれたS25Cの場合、改正により他鋼種との安全裕度の差が小さくなった。S25Cのような溶接性が保証されていない材料は、RTの対象となる部材として使用されることはないが、破壊力学的評価の観点からは適切な処置であったと考える。

なお、今回行った検討は、溶接部が母材と同等以上であることを前提としたものである。したがって、溶接部について規定どおりの溶接後熱処理を行わなかった場合は、溶接部の破壊靱性 (J_{Ic} , K_{Ic}) が母材と同等のレベルに回復せず、十分な安全裕度が得られない可能性がある。また、評価は室温における材料定数に基づいて行ったものであり、低温の状態を

保証するものではない。このため、耐圧試験のように低温で許容応力に近い応力が作用する場合は危険であり、試験温度が低くなり過ぎないように注意する必要がある。

参考文献

- [1] 平成26年度発電用火力設備技術基準等国際化調査報告書
- [2] 平成27年度発電用火力設備技術基準等国際化調査報告書
- [3] K. Hasegawa, Y. Oishi, T. Hasegawa, and T. Sato, Effect of Conversion of Margin for Allowable Stress on NDE Flaw Detectability, ASME PVP2015-45265
- [4] 矢川元基編, 破壊力学, 培風館
- [5] 日本機械学会基準 弾塑性破壊力学 JIC 試験方法, JSME S 001, (社) 日本機械学会 1992



大石 勇一



長谷川 邦夫

出願特許一覧

1	特許件名	高Cr系鋼構造物のじん性評価方法		発明者	西川 聡 他
	出願番号-出願日	特願2008-198193	2008/7/31	登録番号-登録日	特許第4664399号 2011/1/14
	概要	Cr含有量が8～14wt%のラーベス相が析出する高Cr系鋼構造物で、アノード分極曲線を利用してじん性を評価する方法			
2	特許件名	渦電流探傷信号処理方法		発明者	兼本 茂 他
	出願番号-出願日	特願2006-027648	2006/1/6	登録番号-登録日	特許第4235648号 2008/12/19
	概要	検査対象物表面の金属組織内部の自然欠陥を非破壊で外部から計測するための渦電流探傷信号処理方法			
3	特許件名	クリープボイドの非破壊検出方法		発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2002-308129	2002/10/23	登録番号-登録日	特許第3803314号 2006/5/12
	概要	供用中のボイラなどの高温機器において、交流磁化測定により、簡便かつ非破壊的に現地においてクリープボイドを検出する方法			
4	特許件名	非破壊高温クリープ損傷評価方法		発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2002-308126	2002/10/23	登録番号-登録日	特許第3728286号 2005/12/21
	概要	供用中のボイラなどの高温機器において、非破壊的に測定された物理量を用いて、クリープ損傷率を評価し、余寿命時間を求める方法			
5	特許件名	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			
6	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			

学協会誌等への論文発表

学協会誌名	掲載誌発行年月	著 者	論文名称
火力原子力発電大会論文集	平成27年度 火力原子力発電 大会論文集 CD-ROM	上山芳教 古川 敬	圧電フィルムによる超音波可視化技術の改良
Proceedings of the 11th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	19-21 May 2015, Jeju, KOREA	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	Influence of the dimensions of an elbow on defect sensitivity of guided wave testing at elbow part
		上山芳教 古川 敬	Experimental Visualization of Ultrasonic Pulse Waves Using Piezoelectric Films
超音波テクノ	2016.3-4, Vol.28, No.2, p.1-4	平澤泰治 東海林一	フェーズドアレイUTによる異種金属溶接部の欠陥深さ測定
超音波テクノ	2016.3-4, Vol.28, No.2, p.25-28	古川 敬	超音波探傷試験の訓練用シミュレーター
非破壊検査	第65巻 (2016) 2号 P.61-64	古川 敬	超音波伝搬の可視化
Material transactions	Vol. 57(2016) No. 3 p.397-403	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	Frequency Dependence of the Defect Sensitivity of Guided Wave Testing for Efficient Defect Detection at Pipe Elbows
保全学	Vol.15, No.1, 2016, p.77-91	平澤泰治 小林輝男 牧原善次 南 康雄	ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の超音波探傷試験員に対する教育・訓練の有効性に関する検討
E-Journal of Advanced Maintenance	Vol.7 No.2 (August, 2015) pp.179-188	程 衛英	Equivalent current models and the analysis of directional ECT signals
E-Journal of Advanced Maintenance	Vol.7 No.2 (August, 2015) pp.189-198	西川 聡	Sustainability of compressive residual stress by stress improvement processes
検査技術	2015.7, p.54-60	程 衛英	パルス渦電流試験法による局部減肉の検査・評価
非破壊検査	第64巻 (2015) 7号 P.153-159	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
Journal of Applied physics	117,17D143(2015)	程 衛英	Modeling and analysis by harmonic balance method
溶接学会論文集	第33巻 (2015) 第2号 p.153-159	西川 聡 大井浩一 高橋 誠 古川 敬	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の耐粒界腐食性に及ぼすショットピーニングと熱時効処理の影響
平成26年度 火力原子力発電大会論文集 CD-ROM	pp.40-45, 2015年3月	程 衛英 比翼 賢 古川 敬 加古晃弘 池堂和仁	パルス渦電流試験法による保温材上からの配管減肉評価
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	Vol.34, Mar,2015	西野秀郎 石井誠吾 古川 敬	Resonant Phenomena of Circumferential SH Waves Converted from T(0,1) Mode Guided Waves at Non-Axisymmetric Defects
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	Vol.45, No.1-4, pp. 179-184, 2014	程 衛英	Pulse eddy current characterization of local wall-thinning
Proceedings of the 10th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	pp. 902-909, European Union (2014)	山本敏弘 古川 敬 浦山良一 内一哲哉 高木敏行	Property study on EMATs with visualization of ultrasonic propagation

Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVII)	pp.304-311, IOS Press(2014)	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 内一哲哉 古村一朗 高木敏行	Visualization of ultrasonic propagation for EMATs by scanning the side surface of the specimen with a piezoelectric transducer
40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	Vol. 33A	山本敏弘 古川 敬 西野 郎	Efficient defect detections of elbow pipes using propagation characteristics of guided waves
Journal of Nuclear Science and Technology	Volume 51, pages 832-844 Apr 2014	青木孝行 高木敏行 古村一朗 古川 敬 遊佐訓孝 浦山良一	Study of a methodology of identifying important research problems by the PIRT process
平成25年度 火力原子力発電大会論文集	平成25年度 火力原子力発電 大会論文集 (CD-ROM)	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
月刊 検査技術	2013年7月号	西川 聡	ショットピーニングを施した異材溶接継手における圧縮残留応力の持続性
超音波テクノ誌	2013年5-6月誌 Vol.25, No.3, P.45-48	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
火力原子力発電大会論文集	火力原子力発電 大会論文集 (CD-ROM)	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
非破壊検査	第61巻 (2012) 9号 P.468-474	程 衛英	高性能磁気センサによる損傷検出・評価
Proceedings of the 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	EUR 25752EN- 2012 P.336-342	程 衛英 古村一朗	Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes'Wall-thinning
日本保全学会誌	保全学 Vol.11, No.4, P.69-76	西川 聡 大北 茂 山口篤憲	応力改善法で付与される圧縮残留応力の持続性
Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIV)	pp.241-248, IOS Press(2011)	山本敏弘 内一哲哉 高木敏行	An ECT probe with widely spaced coils for local wall thinning in nuclear power plants
Journal of Nondestructive Evaluation	Vol.31, No.3 p215-224 2012	程 衛英	Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes'Wall-thinning Through Insulation and Cladding
E-Journal of Advanced Maintenance	Vol. 3, No. 3,AA36 November,2011	古川 敬 古村一朗	Simulation and visualization of guided wave propagation by large scale 3D FEM
火力原子力発電大会論文集	福岡大会CD-ROM 2011年10月	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
非破壊検査	Vol.60, No.10, pp579-584, 2011	程 衛英	渦電流試験法による減肉評価における電磁気解析技術の活用
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	Vol.30A(2011) p.372-379	程 衛英	Simulation for the assessment of Wall thinning Using Eddy Current Method

E-Journal of Advanced Maintenance	Vol. 2, No. 2, NT25 August, 2010	古村一朗 古川 敬	Visualization Method of UT Wave Propagation Phenomena for assisting The Better Understanding of Inspection Results
火力原子力発電大会論文集	大阪大会CD-ROM 3-4 2009年10月	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
Proceeding of the 7th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear Pressurized Components.	EUR 24115EN- 2009 p.252-259	古川 敬 古村一朗	Numerical simulation of guided wave propagation using large scale FEM code
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	33(2010) p.377-385	程 衛英 古村一朗	Optimum Inducement of Eddy Current for NDE of Deep Lying Defects : an Analytical Approach
圧力技術	Vol.48, No.1 p.26-39 2010	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
溶接学会論文集	第27巻(2009) 第4号 p.287-296	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
非破壊検査	第59巻(2010) 第3号 p.138-144	関野晃一 他	ガラス板に挿入した表面楕円き裂の光干渉法による破壊挙動の解析
E-Journal of Advanced Maintenance	Vol. 1, No. 1, NT1 May, 2009	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
溶接学会論文集	第27巻(2009) 第3号 p.274-260	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
溶接学会論文集	第27巻(2009) 第4号 p.278-286	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
Electromagnetic Nondestructive Evaluation(XII)	32.IOS Press 2009 p.215-223	程 衛英 古村一朗	'Ac Magnetization and Barkhausen Noise Measurement for the Characterization of Degradation of Ferromagnetic Steels'
IEEE Trans. Magnetics	Vol.44, No.11, November, 2008, p.3281-3284	程 衛英 古村一朗	'Simulation of Transient Eddy-Current Measurement for the Characterization of Depth and Conductivity of a Conductive Plate'
保全学	Vol.8, No.3, p.69-75, 2009	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
Advanced Materials Research	Vo1.26-28(2007) p.1287-1290	中東重雄 他	EFFECT OF COLD-ROLLING ON PRECIPITATION PHENOMENA IN 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL
平成20年度 火力原子力発電大会論文集	仙台大会CD-ROM 3-5 2008年10月	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
平成20年度 火力原子力発電大会論文集	仙台大会CD-ROM 3-3 2008年10月	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
溶接学会論文集	第27巻(2009) 第1号 p.67-72	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

溶接学会論文集	第26巻(2008) 第3号 p.220-226	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
保全学	Vol.7, No.3, p.47-55,2008	中東重雄 程 衛英 古村一朗 山口篤憲 他	原子炉压力容器鋼の照射による組織変化と磁気構造変化
Int. J. Nuclear Knowledge Management	Vol.2, No.4, 2007, .396-408	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
IEEE, Transaction on Magnetics	Vol. 44, No.6, June, (2008), p.1030-1033.	程 衛英 兼本 茂 古村一朗	Numerical Evaluation of the Depth of Branched-off Cracks using Eddy Current Testing Signals
日本実験力学学会	p.59-64 2008年	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
SPring-8 Research Frontiers 2007	p.158-159 2008年7月	中東重雄 他	Detection of Cracks due to SCC in Ni-base Alloys by Synchrotron Radiation CT Imaging
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)	p.191-194 2008年3月	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
平成19年度 火力原子力発電大会論文集	高松大会CD-ROM 3-4 2007年10月	米山弘志 杉林卓也	PD研修とその実績
平成18年度 火力原子力発電大会論文集	名古屋大会 CD-ROM 3-4 2006年10月	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
溶接学会論文集	第25巻(2007) 第1号 p.179-186	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
平成18年度 火力原子力発電大会論文集	名古屋大会 CD-ROM 8-1 2006年10月	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)
Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics 28 Electromagnetic Nondestructive Evaluation(X)	No.28 p.251-258 2007	程 衛英 古村一朗 兼本 茂	Identification of Defects from ECT Signals using Linear Discriminant Function
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	Vol.125,p.145-149, 2007	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
保全学	Vol.5 No.4p.51-58 2007年1月号	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
Science & Technology of Welding and Joining	Vol.11, No.3, p.255-264 May 2006	堀井行彦 他	Recent Development of Repair Welding Technologies in Japan

学協会等への口頭発表

平成27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	11th International Conference on Non Destructive Evaluation	2015/5/19-21 韓国 済州島 ロッセホテル	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	Influence of the dimensions of an elbow on defect sensitivity of guided wave testing at elbow part
			上山芳教 古川 敬	Experimental Visualization of Ultrasonic Pulse Waves Using Piezoelectric Films
	日本非破壊検査協会 平成27年度 第1回 超音波部門講演会	2015/5/26-27 かごしま空港ホテル	古川 敬 上山芳教 水野亮二	超音波探傷訓練ツールへ向けたシミュレーション解析における異材継手組織のモデル化
	日本非破壊検査協会 平成27年度非破壊検査総合シンポジウム	2015/6/2 JSNDI 亀戸センター	古川 敬	超音波伝播の映像化
	CAE POWER 2015	2015/6/23 東京カンファレンス センター・品川	水野亮二 上山芳教 古川 敬	柱状晶組織を有する溶接部の超音波探傷シミュレーションとその活用
	日本保全学会 第12回 学術講演会	2015/7/14-15 日立シビックセンター	古川 敬 上山芳教 水野亮二	凝固シミュレーション技術を活用した異材継手部の超音波探傷シミュレーション
	第48回 X線材料強度に関するシンポジウム	2015/7/16-17 エル・おおさか(大阪府 立労働センター)	水野亮二 西川 聡 古川 敬 佐々木敏彦 三原 毅	X線回折による塑性ひずみ測定技術の開発-第2報-
	第7回 非破壊評価総合展 非破壊評価技術セミナー	2015/7/23 東京ビッグサイト	牧原善次	発電設備に適用される非破壊検査とその役割
	The 20th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2015)	2015/9/21-23 東北大学	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 内一哲哉 古村一朗 高木敏行	Numerical simulation of wave generation by differently-configured EMATs
			程 衛英 上山芳教 塚田啓二	Magnetic Flux Leakage Testing of Backside Wall-Thinning
	平成27年度 火力原子力発電大会	2015/10/8-9 東京国際フォーラム	上山芳教 古川 敬	圧電フィルムによる超音波可視化技術の改良
	日本非破壊検査協会 秋季講演大会	2015/10/15-16 北海道立道民活動センター	上山芳教 古川 敬	フェーズドアレイ法と従来法による溶接部の超音波探傷試験結果の比較
			程 衛英 上山芳教 塚田啓二	低励磁強度漏洩磁束法による裏面減肉評価
	28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015)	2015/11/16-18 Tower Hall Funabori	古川 敬 程 衛英 他	Outline of JST-SIP Project
第14回 評価・診断に関するシンポジウム	2015/11/24-25 福井県国際交流会館	古川 敬 山本敏弘 他	ハイパワーガイド波を活用した埋設配管探傷技術の開発	

成 果 学協会等への口頭発表

非破壊	日本非破壊検査協会 第23回 超音波による非破壊評価 シンポジウム	2016/1/2-29 JSNDI亀戸センター	古川 敬 上山芳教	フェーズドアレイUTを用いた溶接部探傷における試験条件の最適化
			山本敏弘 古川 敬 他	ガイド波によるノッチ状減肉の長さや深さと角度による検出感度
	日本保全学会国際活動推進小委員会	2015/2/13 保全学会	古村 一郎	非破壊検査に関する国際協カプロジェクト PINC及びPARENTの概要
溶接	The 23rd Internaitonal Conference on Nuclear Engineering (ICONE23)	2015/5/17-21 幕張メッセ	水野亮二	Evaluation of cold cracking and mechanical properties of temper bead weld using welding material of Ni-based alloy for low alloy steel
	平成27年度 溶接学会秋季全国大会	2015/9/2-4 北海道科学大学	西川 聡 高橋 誠 伊藤和博	高温純水中に発生するSUS316L系溶接金属の応力腐食割れ形態
			齊藤直樹 西川 聡 野田和彦	改良9Cr-1Mo鋼溶接部のクリープ強度に及ぼす溶接後熱処理の影響

平成26年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	日本AEM学会 「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム	2014/5/21-23 アイーナ岩手県民情報 交流センター	程 衛英 上山芳教 古川 敬 三原 毅	パルス渦電流試験法による鋳鉄配管の減肉評価
	(一社)日本非破壊検査協会 H26春季講演大会	2014/6/3-4 アルカディア市ヶ谷	水野亮二 古川 敬	UTシミュレーションにおけるオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織のモデル化及びその妥当性検証
	第48回 X線材料強度に関するシンポジウム	2014/7/24-25 エル・おおさか(大阪府 立労働センター)	水野亮二 佐々木敏彦	X線回折による塑性ひずみ測定技術の開発
			佐々木敏彦 宮崎利行 古川 敬 三原 毅	MnK α 線および二次元検出器によるオーステナイト系材料のX線応力測定
	神奈川県非破壊試験技術交流会 研究発表会	2014/6/9 関東学院大学(関内)	水野亮二 古川 敬	UTシミュレーションにおけるオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織のモデル化及びその適用性検討
	平成26年度 保守検査ミニシンポジウム	2014/7/4 大田区産業プラザ(Pio)	水野亮二 西川 聡 古川 敬 佐々木敏彦 三原 毅	X線回折による塑性ひずみ測定技術の開発
	八光オートメーション(株)	2014/5/30 八光オートメーション (株)(福岡)	程 衛英	パルス渦電流試験法および減肉評価
	Ni基合金異材継手のISIとメンテナンスに関するワークショップ (International Workshop on In-service Inspection and Maintenance of Aged Ni-based Dissimilar Metal Weld(DMW)Components in NPPs)	2014/6/2 KINS(韓国 太田市)	古村 一郎 古川 敬	Data Base for NDT-related National Project(Outcome of APN/Accumulation & Preparation of Nondestructive Inspection Data for Nuclear Power Plants)

非破壊	日本保全学会 第11回 学術講演会	2014/7/24-25 八戸工業大学	古川 敬 水野亮二 上山芳教	超音波探傷訓練へのシミュレーション解析技術の適用
	平成26年度 火力原子力発電大会	2014/10/23 名古屋国際会議場	程 衛英 比翼 賢 古川 敬 加古晃弘 池堂和仁	パルス渦電流試験法による保温材上からの配管減肉計測
	日本原子力学会 第13回 材料部会夏期セミナー	2014/8/5 山形県山形市蔵王温泉 ホテル樹林	古川 敬 程 衛英	超音波・電磁気による非破壊検査技術
	59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference	2014/11/5-9 Hawaii, USA	程 衛英 齋藤兆古	Modeling and Analysis of Hysteresis by Harmonic Balance Method
	ICMST-KOBE 2014	2014/11/2-5 神戸大学	山本敏弘 上山芳教 古川 敬 古村一朗	Evaluation of the Capability to Estimate a Crack Profile by 3D SAFT UT
	(一社)日本非破壊検査協会 秋季講演大会	2014/10/28-29 名古屋国際会議場	三原 毅 古川 敬 長 秀雄	疑似SCC探傷研究委員会活動報告1および疑似SCC探傷研究委員会活動報告2
	(一社)日本非破壊検査協会 平成26年度 第2回 超音波部門講演会	2014/10/2-3 茨城空港	上山芳教 水野亮二 古川 敬	超音波探傷訓練へのシミュレーション解析技術の適用
溶接	溶接冶金研究委員会	2014/5/23 鐵鋼会館(大阪)	西川 聡 大井浩一 高橋 誠 古川 敬	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の耐粒界腐食性に及ぼすショットピーニングと熱時効処理の影響
	日本保全学会第 11回 学術講演会	2014/7/24-25 八戸工業大学	西川 聡 生島 一樹 柴原正和	理想化陽解法FEMを用いた実機多パス溶接継手の残留応力解析

平成25年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	システム情報学会	2013/5/15 ~ 5/17 兵庫県民会館	古川 敬	ガイド波試験による配管非破壊評価シミュレーション
	(一社)日本非破壊検査協会 H25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
	ENDE 2013	2013/06/25 ~ 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	2013/06/25 ~ 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
	QNDE 2013	2013/07/21 ~ 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

成 果 学協会等への口頭発表

非破壊	日本保全学会 第10回 学術講演会	2013/07/24～26 ホテル 阪急エキスポ パーク(大阪)	程 衛英 古川 敬	多次元の渦電流信号の活用によるき裂評価
			古川 敬 山本敏弘 他	ねじりモードガイド波を用いた複数のエルボ超え探傷の 数値解析
	16th International Symposium on Applied Electromagnetics and Me- chanics (ISEM'2013)	2013/07/31～08/03 Quebec city, Canada	程 衛英	Pulsed Eddy Current Characterization of Local Wall Thinning
	電気学会 H25年基礎・材料・共通部門大会	2013/09/12～13 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
	USE 2013	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 -
	(一社)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 ～
	(一社)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	2014/01/20～21 東京都立産業技術研修 センター	上山芳教 他 古川 敬 他	数値シミュレーションを用いた横波斜角アレイ探触子の 特性検討 T(0,1) モードガイド波の非軸対称減肉における伝搬挙動
溶接	平成25年溶接学会秋季全国大会	2013/09/2～4 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
	(一社)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	2014/01/20～21 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

論文等表彰

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

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

技術レビュー・編集後記

「技術レビュー」の発行に初めて携わり四苦八苦いたしましたが、無事発行することができました。これもひとえに、ご協力をいただいた皆様のお陰です。この場を借りて御礼申し上げます。

本技術レビューには8件の研究報告を掲載し、非破壊検査技術や教育・訓練、経年劣化評価、規格基準調査と充実した内容と自負しております。皆様のお役に少しでも立ちますよう切に願っております。

当センターでは、溶接・非破壊検査技術及び非破壊検査研修をより一層向上・充実させて参りますので、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。

技術レビューのバックナンバーは、当協会のホームページ (<http://www.japeic.or.jp/>) で公開しております。ご高覧いただければ幸いです。

溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.12 2016 (非売品)

発行日	2016年11月1日
発行編集人	水野 亮二 (溶接・非破壊検査技術センター管理グループ)
発行所	一般財団法人発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター 〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町14-1 TEL(045)511-2751 FAX(045)511-2750
編集・協力	電気新聞メディア事業局

印刷 日本印刷株式会社

《無断転載を禁じます》

本誌は古紙再生紙を使用しています。

技術レビュー

Vol.12 2016



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