

溶接・非破壊検査技術センター

技術レビュー

Vol.14 2018

研究報告

欠陥検出評価技術に関する研究
技術基準・規格化関連調査

研究トピックス

超音波探傷試験のシミュレーション解析技術の紹介

研修・講習事業紹介

研修センターが提供する溶接・非破壊検査技術研修の紹介

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	検査設計	2
	徳島大学教授 西野 秀郎	
ご挨拶	4
	理事長 藤富 正晴	
トピックス	次世代火力発電の実用化に向け、NEDOの新規公募研究を受託	5
	非破壊試験技術者の資格取得および技量向上支援研修	5
研究報告	欠陥検出評価技術に関する研究	
	周波数掃引渦電流試験法を用いた金属板 およびコーティングの厚さ測定・評価	6
	溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英	
	技術基準・規格化関連調査	
	耐圧試験	11
	規格基準室 佐藤 長光	
	ASME Section Iの異材継手に関する設計ガイドライン	25
	規格基準室 大石 勇一	
	JIS材とEN材の違いに関する降伏比を指標とした一考察	30
	規格基準室 長谷川 忠之	
研究トピックス	超音波探傷試験のシミュレーション解析技術の紹介 ～仮想空間での訓練シミュレータ開発に向けて～	36
	溶接・非破壊検査技術センター 古川 敬	
研修・講習 事業紹介	研修センターが提供する溶接・非破壊検査技術研修の紹介	39
	研修センター 牧原 善次、松田 誠司、平澤 泰治、小林 輝男	
成 果	出願特許一覧	46
	学協会誌等への論文発表	47
	学協会等への口頭発表	50
	論文等表彰	55
編集後記		

検査設計

1992(平成4)年3月に四国地方非破壊検査研究会の30周年記念会が開催されている。唐突に何を言っているのかと思われるだろう。まあ30周年記念会はどうでも良い。実は手元にその際に発行された記念誌がある。年代を経てくたびれたその冊子の中には、発電設備技術検査協会・鶴見試験研究センターの三好滋初代所長の講演内容が結構詳細に紹介されている。本人の書かれた前刷り原稿などではなく、講演内容が口述筆記されたものであろう内容は、三好所長の思いが息づかいと共に身近に感じられるものである。たまたま手に入れたその冊子にある三好所長の思いに、私の中にある不明確なものが明確になる思いを抱いた。すなわち表題にした「検査設計」である。この言葉だけで察しのつく方もいるかもしれないが、少し書き記してみたい。

以下抜粋である。

非破壊試験が十分に適用できる構造設計になっているか、(中略)出来上がってしまってからこれを検査してくれとか、やれこういうことを超音波やってくれ(ママ)という問題が起こってくるわけですが、それでは非破壊試験の能力を本当に発揮するわけにはいかないわけです。ここにやはり検査設計という問題を是非考えていただきたいわけです。(中略)本当にそれが完全に能力を発揮できるような構造になっているかどうか、はなはだ疑問なわけです、(中略)しかし、こういうような形である以上は非破壊試験をいくら名人がやってもやはりその形状というものからの影響でもって不可能な部分が非常に多いわけです。(中略)検査が簡単にできるような構造になっていれば(事故は)事前に防げるわけです。

そして、従来からの構造設計・強度設計・溶接設計に加えて検査のしやすさを考慮した検査設計を導入せよ、と説いておられる。また、別の部分では、

ドイツあたりでは規定された検査ができない場合には設計変更が要求されてまいります。

といった安全を担う検査技術や検査技術者の重要性や地位向上に関する記載もあった。検査設計がないために、個々では有能な検査技術のはずが、その信頼性は全く低いと説く三好所長に、全く同感である。



徳島大学教授

西野 秀郎

さて大学人の仕事は、種々の現象の共通事項や普遍事項を見つけ体系化することだと、若かりし頃にある恩師に教えを受けた。もっと具体的には、そうしないと論文は書けないと言われた。個々から体系へ、である。一方、体系化された原理原則を利用して、

個々の問題を解いて行くのは工学の重要な使命である。共に重要な両輪であるが、最近は大学人であっても後者ばかりのような気がする。言い過ぎかもしれないが、ごく狭い個別の事例に対し、それにしか役に立たない特別解を求めているようにしか見えないことが多い。その条件が少しでも合わなくなれば、ポイ捨てされる普遍性のない技術開発に時間をかけているようにしかみえない。とても空虚である。無論それらの中から本質と普遍性を探するのが学者の役目とはいえ、何か違うような気がしてならない。体系的な方法を、現場環境に最適化して適用することは、技術の演繹として重要であるし、大学人に限らず開発技術者のすべき重要な仕事であることは間違いない。しかし、誤解を恐れずに言うが、この工場の、この建屋の、この配管の、この入り組んだ場所の、この溶接部の、検査にまで各開発技術者が対応することが本当に必要であろうか。

最後は、少し愚痴になったかもしれない。このことに気が向いたのは、各大学の優秀な先生方が、各々の持つ有能な技術を向上させることに努力しているのではなく、枝葉末節な部分に高いコストを払っているようにしか見えないと思ったことが大きい。ひいては国益の損失だ。検査設計によるコストアップは避けられないが、それに見合う以上の恩恵が得られると確信する。枯れた技術であっても全く新しい技術であっても、各検査技術が有する最大限の能力を発揮できる環境を全体の設計の中で確定して行くことが必要である。時間のかかることかもしれないが、そうすることで検査の信頼性は格段に向上し、工場の信頼性も格段に向上するはずである。

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



2017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.14として取りまとめましたのでご覧いただきたいと思います。

当協会は、1970年の創立以来、火力原子力等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・的確に業務を遂行してゆく所存です。

「技術が支える安全と信頼」を基本理念とし、エネルギーを取り巻く環境が、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及び非破壊試験データの信頼性評価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、火力原子力等発電分野や船舶など、社会インフラ全般における非破壊評価技術の提案など、新しい分野にも積極的に取り組んでいく所存です。

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

当協会は、発電分野におけるベストエネルギーミックスの実現に向けて、一層の研さんを積み、技術力に基づく高品質の業務を皆様に提供してまいります。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。

トピックス①

次世代火力発電の実用化に向け、NEDOの新規公募研究を受託

当協会は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が公募した「次世代火力発電等技術開発」のうち「次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」で、プラントメーカー、材料メーカーなどとともに応募し、採択されました。

当協会を含め、東芝、IH、新日鐵住金、電力中央研究所、富士電機、三菱日立パワーシステムズの7者で共同研究を行います。

現在、次世代の石炭火力発電技術として蒸気温度が700℃を超える「先進超々臨界圧火力発電（A-USC）」の技術開発が進められています。

これまでに実用化されている石炭火力発電の最高効率率は「超々臨界圧火力発電（USC）」で、その蒸気温度の最高温度は630℃程度が上限でした。しかし、A-USCの700℃以上の高温蒸気へ適用されるボイラ・タービン適用材料開発については、長期高温環境下での使用を想定したクリープ試験を実施するなど、さらなる信頼性の向上が必要となります。

本事業では2020年以降に増大する経年石炭火力のリプレースおよび熱効率向上需要に対応するた

め、高温材料信頼性向上および保守技術開発を行います。

具体的には、「高温材料信頼性向上試験」として、信頼性向上のためのクリープ疲労試験、異種材料溶接部健全性評価、材料データベースの拡充、表面処理技術開発等を実施します。また、「保守技術開発」として、タービンロータ超音波探傷試験（UT検査）等の精度向上、高効率化、適用箇所拡大を目的とした非破壊検査技術開発を実施します。

当センターでは、ボイラ用Ni基合金大径管などの非破壊検査技術の一つとして検討されているUT（超音波探傷検査）の最適条件や実施要領を検討するためのUTシミュレーション技術の開発を行っています。

最終的には事業終了時において送電端熱効率46%（高位発熱量基準）達成可能な商用プラントへ適用する長時間クリープ疲労試験、材料データベースの拡充、表面処理技術開発等の高温材料信頼性向上およびタービンロータ超音波探傷試験（UT検査）精度向上等の保守技術の確立を目指しています。

トピックス②

非破壊試験技術者の資格取得および技量向上支援研修

当協会ではJIS Z 2305:2013（非破壊試験技術者の資格及び認証）に沿った資格取得（新規、再認証）支援として、平成30年に放射線透過試験（RT）のレベル2受験者向け実技試験対策研修を新たに開設しました。また、浸透探傷試験（PT）、磁気探傷試験（MT）、超音波探傷試験（UT）の実技試験対策研修を平成27年から開設しています。研修は、実際の実技試験をほぼ再現する形で行っています。

技量向上支援として、特に超音波探傷試験技術の技量向上に適した設備（装置、試験体）、知識、情報があり、これらを活かした研修を定期的に開催しています。

詳しい内容、最新の開催状況などは本誌「研修・講習事業紹介」または当協会ホームページ（<http://www.japeic.or.jp/>）の「溶接・非破壊検査技術研修」コーナーをご覧ください。



RT用試験体



配管試験体

周波数掃引渦電流試験法を用いた金属板およびコーティングの厚さ測定・評価

Thickness Measurement of Metal Plate and Coating by Swept-Frequency Eddy Current Testing

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英

In the characterization of the thickness of a conductive plate or non-conductive coating on it by eddy current testing method, the plate's electrical conductivity is required but practically unavailable. This study investigated the application of swept-frequency eddy current testing (SFECT) to the measurement of the thicknesses of the plate and the nonconductive coating of the plate, even without knowing the plate's conductivity. Hinted by the known analytical expressions available for the calculation of the impedance of an air-cored coil above a plate, we found that the maximum phase angle of the normalized SFECT signal is relevant to the thickness of a conductive plate and the liftoff, regardless of the conductivity, and can be applied to thickness measurement. This finding is verified by analytical and experimental studies.

Keywords

Swept-frequency eddy current testing, conductive plate, non-conductive coating, thickness, numerical simulation

1 はじめに

電磁誘導に基づいた渦電流検査 (ECT: Eddy Current Testing) の検出信号が、被験体の幾何寸法、電磁気特性、検査用プローブと試験片の位置関係などによって変化するため、渦電流試験法は導電性試験体の肉厚測定やプローブと試験体の間隔に相当する絶縁性コーティングの厚さ測定に適用可能と考えられる。ところで、ECT 信号はプローブの構造、励磁周波数などの探傷条件、被験体の電磁気特性や寸法、被験体とプローブの相対位置関係などの諸要素の関数であり、その中の一つの要素、例えば被験体の厚さを特定するために、ほかの要素を既知とせざるを得ない。試験条件であるプローブの寸法、試験周波数、励磁強度などは把握可能だが、現場にある被験体の材質、あるいはその電磁気特性の把握は困難である。また、鉄鋼材料の電磁気特性はメーカー、製造プロセスなどによってばらつきがあり、長期の稼働や経年劣化等によって変化することもあり得る。要するに、現場にある被験体の電気伝導率および透

磁率を正確に把握するのは容易ではない。被験体の電磁気特性を把握しないと、渦電流測定信号から試験体の肉厚やコーティングの厚さの定量化も困難である。更に、マスターカーブによる評価法において、検査対象毎のマスターカーブの作成はほぼ不可能である。以上の状況において、被験体の電磁気特性に依存せず、導電率および透磁率が知られなくても定量化可能な方法が望まれる。本研究は周波数掃引渦電流試験 (SFECT: Swept-Frequency Eddy Current Testing) および周波数応答特性解析を用いて、被験体の電磁気特性に依存しない金属板またその上にある絶縁性コーティングの厚さ評価法を構築する。

2 周波数掃引渦電流試験および板厚、コーティングの厚さ測定・評価の基本原

Fig.1 に示すように、厚さ d の平板試験体 (導電率 σ 、透磁率 μ) の上に空心リング状コイル (内、外半径 r_1 , r_2 、高さ H) が配置され、渦電流測定試験を行う。試験体はエッジ効果を見捨てるほど大きい、また表面を $z=0$ として、コイルと試験体の間

隔（リフトオフ）は l である。

理想的な状況における空心コイルの抵抗は十分小さいため、コイルが空気中に置かれたときのインピーダンス Z_0 は

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \approx j\omega L_0$$

である。ここで、 ω は角周波数である ($\omega = 2\pi f, f$: 周波数)。コイルが試験片上に置かれたときのインピーダンス変化量は $\Delta Z = \Delta R + j\omega \Delta L$ であり、コイルの総インピーダンスは

$$Z = Z_0 + \Delta Z = j\omega L_0 + \Delta R + j\omega \Delta L \quad (1)$$

である。

以上の式にはインピーダンスが周波数とともに変化するを示した。ここでは、インピーダンス正規化を行う。正規化されたインピーダンス Z_{nor} は

$$Z_{nor} = \frac{Z}{Z_0} = \frac{\Delta Z}{\omega L_0} + j = R_{nor} + jX_{nor} \quad (2)$$

である。また、[1,2] により、

$$\frac{\Delta Z}{\omega L_0} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{\lambda_0^2 (\lambda_0 r_1 \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} (e^{-\lambda_0 l} - e^{-\lambda_0 (l+H)})^2 R(\lambda_0) d\lambda_0}{\int_0^{\infty} \frac{\lambda_0^2 (\lambda_0 r_1 \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} [\lambda_0 H + e^{-\lambda_0 H} - 1] d\lambda_0} \quad (3)$$

ここで、 $R(\lambda_0)$ は試験体の形態（電磁気特性や幾何形状）を反映する反射係数である。

$$R(\lambda_0) = \frac{(\lambda_0)^2 - \lambda_1^2 + e^{-2\lambda_1 d} [\lambda_1^2 - (\lambda_0)^2]}{(\lambda_1 + \lambda_0)^2 - e^{-2\lambda_1 d} (\lambda_1 - \lambda_0)^2} \quad (4)$$

また、非磁性である場合、 $\mu = \mu_0$,

$$\lambda_1 = \sqrt{\lambda_0^2 + j\omega\mu\sigma} = \sqrt{\lambda_0^2 + j\omega\mu_0\sigma} = \sqrt{\lambda_0^2 + j(2\pi\mu_0\sigma f)} \quad (5)$$

よって、

$$R(\lambda_0) = R(\lambda_0, \sigma f) \quad (6)$$

である。式(2)～(6)は、非磁性導電性金属板において $\frac{\Delta Z}{\omega L_0}$ 、あるいは正規化インピーダンス Z_{nor} は周波数と導電率の積である σf の関数であることを示した。同じリフトオフで同じ厚さの試験体を測定する場合、同じ σf 値が同じ正規化インピーダンスを対応する。周波数掃引によって、異なる導電率 σ のものにおいても同じ σf が得られる。 σf の一致性を利用

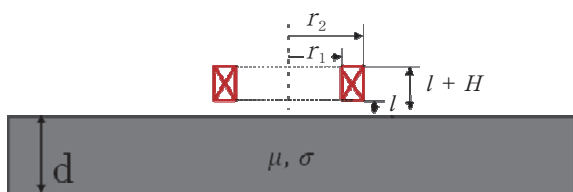


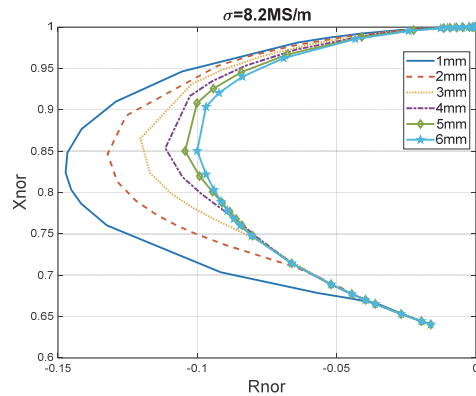
Fig.1 Configuration of Eddy Current Testing

することによって、板厚 d 、また、試験体とコイルの間隔 l を同定可能と考えられる。

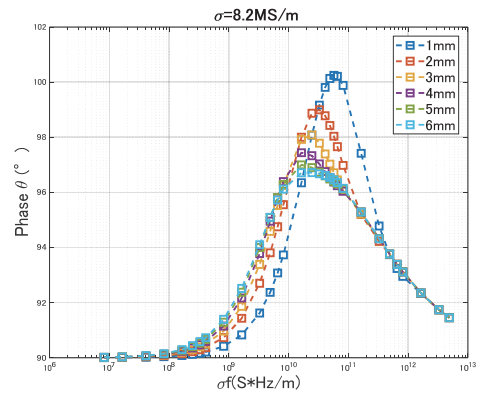
3 理論解析による検証

2章に示した理論分析に基づいて、掃引渦電流試験法による非磁性金属の板厚およびその上にある非導電性コーティングの厚さ測定・評価を行う。

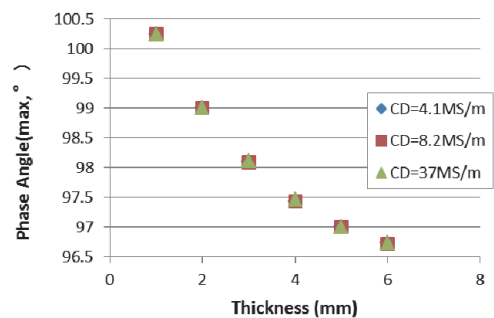
厚さ 1～6 mm、導電率それぞれ 4.1MS/m、8.2MS/m および 37MS/m の板の上に、内外半径 8



(a) Normalized SFECT impedance



(b) The phase of normalized impedance



(c) the minimum phase and the thickness of a plate

Fig. 2 Simulation of SFECT on conductive plates

mm, 10 mm, 厚さ 3 mm, リフトオフ 1 mm の 300 ターン巻きのパンケーキプローブによる渦電流試験の正規化インピーダンスおよびその位相を計算した。なお、解析用周波数は 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 1k, 2k, 3k, 4k, 6k, 8k, 10k, 20k, 40k, 60k, 80k, 100k, 200k, 400k, 600kHz である。

Figs. 2 (a), (b) に導電率 8.2MS/m の各板厚試験体の正規化インピーダンスおよび正規化インピーダンスの位相を示す。一定の板厚において、ある σf の値に最大位相が現れる。各試験体の正規化 SFECT インピーダンスの最大位相を抽出して、最大位相と板厚の関係を Fig. 2(c) にまとめた。導電率

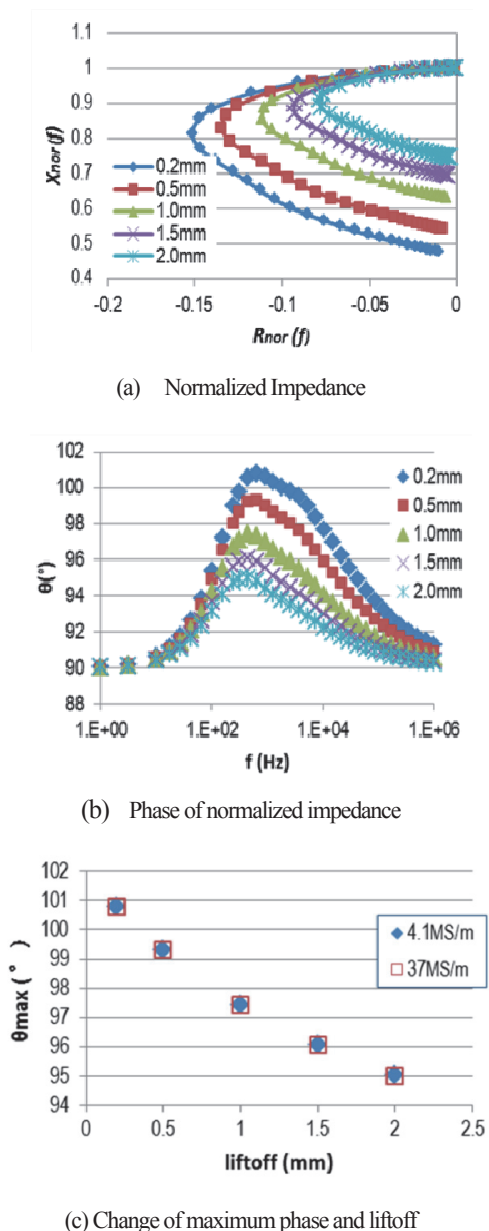


Fig.3 Simulation of SFECT for liftoff characterization

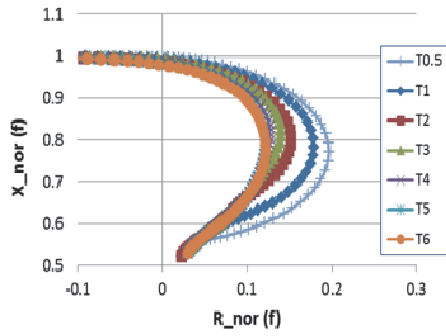
の違いにも関わらず、同じ最大位相角は同じ板厚に対応している。SFECT 測定の正規化インピーダンスの最大位相は導電率に依存せず、板厚と特定の間隔がある。以上の解析では、正規化インピーダンスの最大位相が非磁性導電性板の板厚評価に適する物理量であることを示した。

導電性金属試験片上の絶縁性コーティング層の厚さは式 (3) 中の l に相当する。4 mm 厚の非磁性板の上に置かれたコイルのリフトオフを 0.2mm, 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm に変更した場合の正規化インピーダンスおよび正規化インピーダンスから算出した位相角を Figs.3 (a), (b) に示す。各リフトオフに設定された場合のインピーダンスにおける最大位相角とリフトオフの関係が Fig.3(c) にまとめた。下地の金属板の導電率は異なるが (それぞれ 4.1MS/m と 37MS/m である), SFECT の正規化インピーダンスの最大位相角とリフトオフの関係はほぼ同じである。すなわち、正規化インピーダンスの最大位相はリフトオフ、あるいは、絶縁性コーティング層の厚さ評価に適するパラメータである。

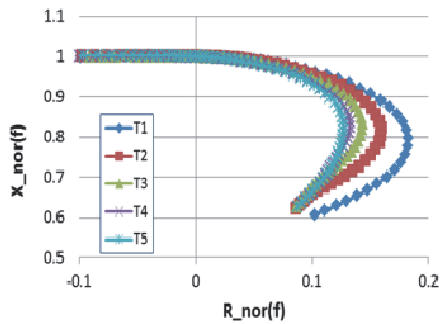
4 基礎試験による検証

LCR メーター (HIOKI, IM 3533-01) を用いて、導電性板の厚さおよびその上にある絶縁性コーティング層の厚さ測定を行った。LCR メーターの周波数を 4Hz ~ 200kHz 対数スケールで 100 ポイント等間隔掃引と設定した。励磁は 5mA の正弦波定電流である。実験に使われたパンケーキコイルの内外半径は 5mm と 8mm であり、コイルの高さは 2mm である。試験体は 150 mmX150mmX d (d=0.5mm, 1mm, 2mm) の アルミニウム板 (Al と表記), 150mmX150mmXd (d=3mm, 4mm, 5mm, 6mm) の アルミニウム合金板 (AL5052), 150mm X150mm X d (d=1,2,3,4,5,6mm) の SUS304 板および 100mm X100mmX d (d=3,4,6mm) の SUS304 板である。全ての試験体の導電率は未知である。

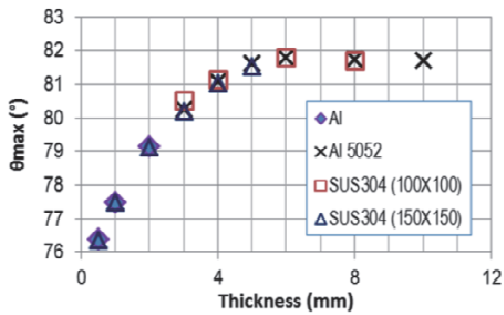
まず、空気中に置かれているコイル自身の SFECT インピーダンスを測定した。その後、コイルを各試験体上に置いて SFECT インピーダンスを測定した。コイルと試験体表面の間隔は 0.5mm である。空気中および試験体上に置かれたコイルの SFECT インピーダンスから正規化インピーダンス



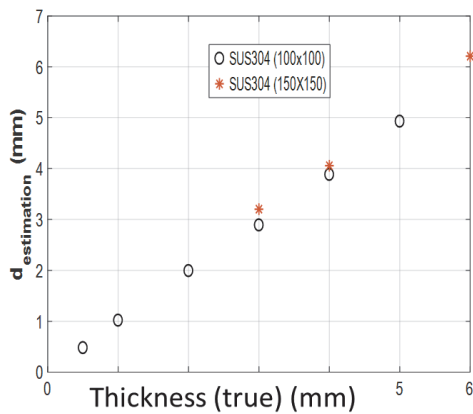
(a) Normalized impedance



(b) Phase of normalized impedance

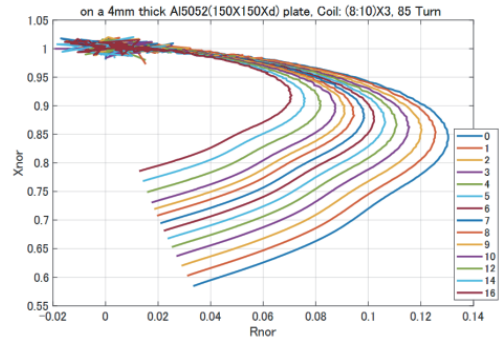


(c) Maximum phase and plate thickness

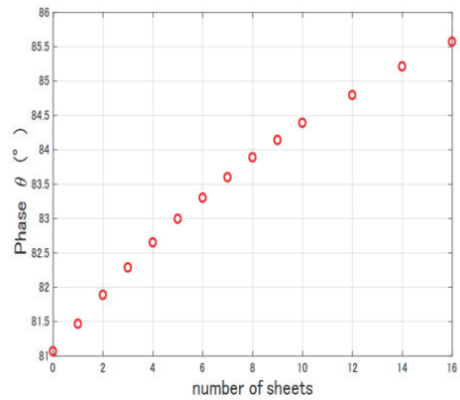


(d) The estimated and true thicknesses of SUS304 plates

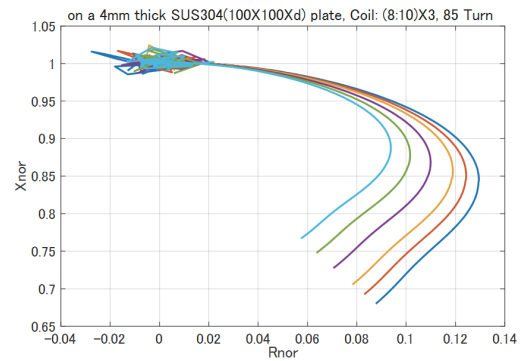
Fig.4 Measurement of a conductive plate's thickness by SFECT



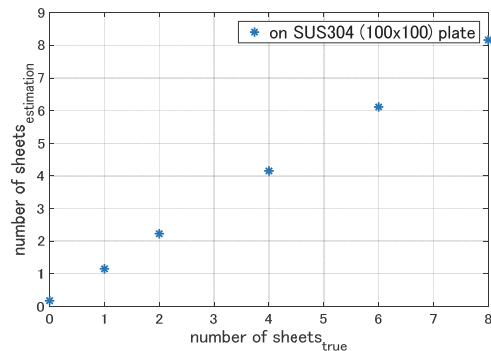
(a) Normalized impedance of SFECT on Al plate covered with OHP sheets



(b) Maximum phase and the number of sheets on Al.



(c) Normalized impedance of SFECT on OHP sheet covered SUS plate



(d) Estimated and true number of OHP sheets on SUS plate

Fig.5 SFECT measurement of 'coating' on conductive slab.

を計算した。Figs. 4 (a), (b)はコイルがそれぞれ Al および Al5052 板上, また SUS304 板上置かれたときの正規化インピーダンスである。更に, 正規化インピーダンスから位相角を計算し, 各試験体における最大位相角を抽出した。それぞれの材質および厚さの試験体の正規化インピーダンスの最大位相角をまとめて, Fig. 4(c)にプロットした。理論分析と同じように, 導電率と関係なく, 同じ最大位相角は同じ板厚に対応する。

ここでは, Al および Al5052 板の板厚を既知として, それらの板厚と最大位相角からマスターカーブを作成する。SUS304 の板厚を未知とし, マスターカーブと SUS304 板の測定信号から SUS304 の板厚を求める。Fig.4(d)の横軸と縦軸にそれぞれ実際の板厚と推定の板厚を示す。推定値と実際値はほぼ一致しており, 板厚既知の試験体より作成したマスターカーブは導電率が異なるほかの非磁性導電板の厚さ評価に適用可能であることを示した。

金属板上にある絶縁性コーティング層の厚さ測定において, OHP シートを用いて絶縁性コーティングを模擬した。4mm 厚の Al5052 板上に 0 ~ 16 枚の OHP シートを敷き, パンケーキコイルを用いて掃引渦電流試験を行った。Fig.5(a) は OHP シートを 0 ~ 16 枚に変化させたときの正規化インピーダンスである。この正規化インピーダンスの位相角を計算し, それぞれの最小位相角を抽出して OHP シートの枚数と最小インピーダンスの関係を Fig.5 (b) にプロットした。Fig.5 (b) に示す Al5052 板を下地とした場合の OHP シート枚数と最小位相の関係をマスターカーブとしている。

下地を 4mm 厚の SUS304 板に変えて同じ SFECT 試験を実施した。Fig.5 (c) は SUS304 を下地にした場合の正規化インピーダンスである。Fig.5 (b) に示すマスターカーブと Fig.5 (c) に示す測定信号より, SUS304 板上に敷かれた OHP シー

トの枚数を推定した。Fig.5 (d) の横軸に実際の枚数, 縦軸に推定の枚数を示す。推定値と実際値がほぼ一致している。Al5052 と SUS304 の導電率が異なりまた把握されていないにもかかわらず, Al5052 を下地にして作成したマスターカーブより SUS304 板上の絶縁被膜厚推定可能である。従って, 掃引渦電流試験法を用いて下地の金属板の電磁気特性に依存しない絶縁被膜厚測定・推定可能である。

5 まとめ

本研究では, 理論分析, シミュレーション解析および基礎試験を用いて, 周波数掃引渦電流試験法で得られた正規化インピーダンスの周波数応答解析によって, 試験体の電磁気特性に依存しない導電性金属板およびその上にある絶縁性コーティング層を測定・評価する方法を構築した。

非磁性導電性板の正規化 SFECT インピーダンスは導電率と周波数の積の関数であり, その位相の極値は板厚, またその上にある絶縁性コーティング層の厚さと特有の関係がある。この関係は被検体の導電率に依存しない。マスターカーブを構築した試験体, または被検体の導電率を知らなくても, マスターカーブ上の位相と比較することによって非磁性導電板の板厚およびその上にある絶縁性コーティング層の厚さは評価可能である。

参考文献

- [1] T. P. Theodoulidis, E. E. Kriezis, Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation), USA: Tech Science Press, 1st Ed. 2006.
- [2] Weiyang Cheng, Thickness Measurement of Metal Plates Using Swept-Frequency Eddy Current Testing and Impedance Normalization, IEEE SENSORS JOURNAL, 17, 14 (2017), 4558-4569.



程 衛英

耐圧試験

Pressure Test

規格基準室 佐藤 長光

Construction Code of the boiler and pressure vessel demands the pressure test as the final test without the exception. The origin of the pressure test is not certain, the pressure test is demanded to ASME B&PV Code Section I (1914) which is the reference of a national code. The pressure test is defined by Japan Industrial Standards. However, the test method has been described as a definition. The purpose of the pressure test is not described. Therefore, I arrange a pressure test method and a basic. And, I arrange the outline of the pressure test and leakage test. Afterwards, I consider the problem based on the purpose by thinking about a safety margin degree of the pressure test, and the purpose of the pressure test based on this idea.

Keywords *construction code, pressure test, leakage test, safety margin, purpose of the pressure test*

1 はじめに

ボイラー及び圧力容器（以下、圧力機器という）の製造時における規格基準等では、完成時に必ず耐圧試験が要求されているが、試験方法と判定基準のみが規定されている。国内の圧力機器の規格基準等がリファレンスとしている米国機械学会の圧力機器規格のオリジナルであるボイラー規格^[1]も同様である。この様に耐圧試験の起源や目的等は定かでない。

耐圧試験及び水圧試験について、日本工業規格（以下、JIS規格という）では、表1のように定義されている。JIS B 0126^[2]ではボイラーのJIS規格^[3]において水圧試験と、JIS B 0190^[4]では圧力容器のJIS規格^[5-7]において耐圧試験として規定されているため異なった用語が用いられているが、内容としては同じものである。何れも、定義として試験方法が記載されている。ここでも耐圧試験の目的等は記載されていない。

そのため、規格基準等での耐圧試験の方法及び基本的な考え方について整理し、耐圧試験及びその直

後漏えい試験の概要について整理した後、耐圧試験での安全裕度について考察する。その後耐圧試験の目的及び効果について既往の知見を調査・整理する。これらに基づいた耐圧試験及びその直後漏えい試験の課題を提案する。

なお、ここでの直後漏えい試験は、従来耐圧試験直後に実施してきた又は同時に実施している漏えい試験を示しており、気密性が要求される圧力機器に耐圧試験とは別に要求されている漏えい試験や気密試験は含まない。

表1 定義

JIS規格	用語	定義
JIS B 0126 ^[2]	水圧試験	ボイラー及びその附帯設備の耐圧部分に、水圧をかけて行う試験。
JIS B 0190 ^[4]	耐圧試験	圧力容器の内圧（外圧）を受ける部分に、圧力をかけて所定の圧力で安全に耐え得るか、否かを確認する試験。水圧で加圧する水圧試験、気圧で加圧する気圧試験がある。

2 耐圧試験の方法

耐圧試験の方法は、使用される媒体の種類により次の4つに分類される^[8]。

① 水圧試験

安全性の観点から、水を媒体とした耐圧試験を原則としている。

② 液圧試験

水圧試験後に残留水が抜けにくく、残留水が圧力機器の使用に障害を発生させる場合は、水以外の液体が用いられることがある。この場合は、用いられる液体の沸点や引火点等の制約がある。

③ 気圧試験

水の残存による圧力機器の不具合が予想される場合、又は、試験状態での水の重量（水頭圧）が圧力機器の強度に影響を与える恐れのある時は、空気又は窒素等による気体を媒体とした耐圧試験が行われる。

④ 気水併用試験

部分的に水頭圧等がかかる圧力機器で水圧のみで所定の圧力まで加圧すると強度に影響を与える恐れのある場合及び耐圧試験の安全性から気圧試験のみでは気体の圧縮性の観点から蓄積されたエネルギーが大きすぎる場合は、試験時の安全性を低下させる要因の減少をはかるために水と気体を併用した耐圧試験が行われる。

3 耐圧試験の基本的な考え方

耐圧試験の基本的な考え方は、次に基づいている^[8,9]。

- ① 耐圧試験圧力は、圧力機器の構造設計上の基になっている最高使用圧力より高く、できるだけ高い圧力とする。
- ② 耐圧試験により圧力機器に変形を残さないようにする。
- ③ ②のため、水圧試験圧力により圧力機器に発生する一次一般膜応力 (P_m) は、耐力 (S_y) の0.9倍以下とする。又、解析を用いて設計される圧力機器については、軸力と曲げモーメントの組み合わせに対する矩形はりを用いた降伏の限界である崩壊限界^[10]にならないように発生応力の上限を設ける。崩壊限界と発生応力の上限については、

「耐圧試験での安全裕度」で詳細を記載する。

- ④ ②のため、気圧試験圧力により圧力機器に発生する一次一般膜応力 (P_m) は、耐力 (S_y) の0.8倍以下とする。又、解析を用いて設計される圧力機器については、水圧試験と同様に発生応力の上限を設ける。崩壊限界と発生応力の上限については、「耐圧試験での安全裕度」で詳細を記載する。気圧試験は、温度の影響を受けやすいので過渡的にも圧力機器に発生する応力が耐力を超えないようにし、又、気体の圧縮性から蓄積されたエネルギーが大きいため万が一耐圧試験中に圧力機器が破損した場合でも周囲への被害を小さくするため、気圧試験圧力は水圧試験圧力より低くする。気圧試験時には、広範囲な立入制限区域を設ける等の安全対策が講じられるが、耐圧試験圧力の面からも極めて慎重な対応をとる。

4 耐圧試験及びその直後漏えい試験の概要

耐圧試験及びその直後漏えい試験については、「耐圧試験の方法」と「耐圧試験の基本的な考え方」に基づいて、規格基準等^[3, 5-7, 11-17]で試験方法が規定されている。各規格基準等^[3, 5-7, 11-17]での試験方法の概要を表2に、判定基準の概要を表3に示す。耐圧試験圧力は、設計マージン（以下、DMという）に関係しているため、DMとの関係についてまとめて表4に示す。DM3での水圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の1.25倍となっている。気圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の1.1倍又は1.15倍であるが本質的な差異はない。DMが3.5/1.1となっているのは、クラスMC容器に対して最初の告示^[18]では最高使用圧力 (P) の0.9倍を設計圧力として要求していたものを次の告示^[19]では最高使用圧力 (P) として要求しなおしたため1.1で除している^[20]。これが現在まで継承されている。DMが3.5/1.1での水圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の1.15倍、気圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の1.1倍となっている。DM3.5での水圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の1.25倍又は1.3倍であるが本質的な差異はない。気圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の1.1倍となっている。DM4での水圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の1.5倍、気圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の1.25倍となっ

表2 規格基準等における耐圧試験及びその直後漏えい試験方法の概要

規格基準等	機器等【DM】	耐圧試験		直後漏えい試験
		試験圧力 (P_p)	保持時間	試験圧力 (P)
JIS B 8201 ^[3]	ボイラー【DM4】	水圧：1.5P ≪1.06 P_p 未満≫	検査終了	—
JIS B 8265 ^[5]	圧力容器【DM4】	水圧：1.5 PS_n/S_d (気圧：1.25 PS_n/S_d)	—	—
JIS B 8266 ^[6]	圧力容器【DM3】	水圧：1.25 PS_{mm}/S_{md} (気圧：1.15 PS_{mm}/S_{md}) ≪1.06 P_p 未満≫≪応力制限がある≫	10 分間	—
JIS B 8267 ^[7]	圧力容器【DM3.5】	水圧：1.3 PS_n/S_d (気圧：1.1 PS_n/S_d)	—	—
火技解釈 ^[11]	ボイラー【DM3.5】	水圧：1.3P (気圧：1.1P)	適切な時間	水圧：P (気圧：P)
	燃料電池設備【DM3.5】	水圧：1.3P 又は 気圧：1.1P	10 分間	P
	液化ガス設備（一般）【DM3.5】	燃料電池設備の規定を準用		
	液化ガス設備（低温貯槽）【DM3.5】	水張+気圧：1.1P (地下式貯槽は水張を省略できる)	10 分間	P
	液化ガス設備（埋設した導管）【DM3.5】	埋設前：RT, UT, MT 又は PT 及び 水圧：1.3P 又は 気圧：1.1P	10 分間	—
	ガス化炉設備（水又は蒸気を通ずるもの）【DM3.5】	ボイラーの規定を準用		
ガス化炉設備（ガスを通ずるもの）【DM3.5】	液化ガス設備（一般、低温貯槽及び埋設した導管）の規定を準用			
ボイラー規格 ^[12]	ボイラー【DM4】	水圧：1.5P	—	—
圧力容器規格 ^[13]	圧力容器【DM4】	水圧：1.5 PS_n/S_d (気圧：1.25 PS_n/S_d)	—	—
ガス解釈例 ^[14]	ガス工作物（一般）【DM4】	1.5P	—	—
	容器【DM4】	水圧：1.5 PS_n/S_d (気圧：1.25 PS_n/S_d)	—	—
	ガスホルダー【DM4】	水圧：1.5 PS_n/S_d (気圧：1.25 PS_n/S_d)	—	—
	地上式貯槽【DM4】	水張+気圧：1.25P	—	—
	地下式貯槽【DM4】	気圧：1.25P	—	—
	配管【DM4】	水圧：1.5P (気圧：1.25P)	—	—
	海底導管【DM4】	1.25P	24 時間	—
ガス解釈例 ^[14] 別添	製造設備等【DM3.5】	水圧：1.3 PS_n/S_d (気圧：1.1 PS_n/S_d)	—	—
	地上式貯槽【DM3.5】	水張+気圧：1.1P	—	—
	地下式貯槽【DM3.5】	気圧：1.1P	—	—
	真空断熱式貯槽【DM3.5】	気圧：1.1P	—	—
特定設備 ^[15] 別添 1	圧力容器【DM4】	水圧：1.5P (気圧：1.25P) 又は 水圧：1.5 PS_n/S_d	一定時間	—
特定設備 ^[15] 別添 2	平底円筒形貯槽【DM4】	水張+気圧：1.5P	一定時間	—
特定設備 ^[15] 別添 3	バルク貯槽【DM4】	水圧：1.5P	—	—
特定設備 ^[15] 別添 7	圧力容器【DM3.5】	水圧：1.3 PS_n/S_d (気圧：1.1 PS_n/S_d)	一定時間	—
設計・建設規格 ^[16]	クラス 1 機器【DM3】	水圧：1.25 P_o *, 水圧：1.1 P_o ** (気圧：1.1 P_o *) ≪1.06 P_p 未満≫≪応力制限がある≫	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧：P)
	クラス 2 機器【DM3.5】	水圧：1.25P (気圧：1.1P) ≪1.06 P_p 未満≫	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧：P)
	クラス 3 機器【DM3.5】	水圧：1.25P (気圧：1.1P) ≪1.06 P_p 未満≫	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧：P)
	クラス 4 配管【DM3.5】	気圧：1.1P	10 分間	—
	クラス MC 容器【DM3.5/1.1】	水圧：1.15P (気圧：1.1P) ≪1.06 P_p 未満≫≪応力制限がある≫	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧：0.9P)

溶接規格 ^[17]	クラス 1 容器【DM3】	水圧：1.25 P_n^* 、水圧：1.1 P_o^{**} (気圧：1.1 P^*) 《1.06 P_o 未満》《応力制限がある》	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧： P)
	クラス MC 容器【DM3.5/1.1】	水圧：1.15 P 又は 気圧：1.1 P 《1.06 P_o 未満》《応力制限がある》	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧：0.9 P)
	クラス 2 容器【DM3.5】 クラス 3 容器【DM3.5】	水圧：1.25 P 又は 気圧：1.1 P 《1.06 P_o 未満》	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧： P)
	クラス 3 相当容器【DM4】 クラス 3 相当管【DM4】	水圧：1.5 P (気圧：1.25 P) 《1.06 P_o 未満》	10 分間	水圧： P (気圧： P)
	クラス 1 配管【DM3】	水圧：1.25 P_n^* 、水圧：1.1 P_o^{**} (気圧：1.1 P^*) 《1.06 P_o 未満》《応力制限がある》	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧： P)
	クラス 2 配管【DM3.5】 クラス 3 配管【DM3.5】	水圧：1.25 P 又は 気圧：1.1 P 《1.06 P_o 未満》	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧： P)
	クラス 4 配管【DM3.5】	気圧：1.1 P	10 分間	水圧：($P, 0.75P_{ht}$) _{max} (気圧： P)

注 P ：最高使用圧力

S_n ：水圧試験又は気圧試験の温度での許容引張応力

S_d ：最高使用温度での許容引張応力

S_{m} ：水圧試験又は気圧試験の温度での設計応力強さ

S_{md} ：最高使用温度での設計応力強さ

RT：放射線透過試験

UT：超音波探傷試験

MT：磁粉探傷試験

PT：浸透探傷試験

*：燃料装荷前

**：燃料装荷後

P_o ：運転圧力

P_{ht} ：水圧による耐圧試験圧力

表3 規格基準等における耐圧試験の判定基準の概要

規格基準等	耐圧試験の判定基準
JIS B 8201 ^[3]	異状がないこと。
JIS B 8265 ^[5]	局所的な膨張，変形などの異常が生じないこと。
JIS B 8266 ^[6]	局所的な膨らみ，伸びなどの異常が生じないこと。
JIS B 8267 ^[7]	局所的な膨張，変形などの異常が生じないこと。
火技解釈 ^[11]	耐え，漏えいのないもの。
ボイラー規格 ^[12]	異状のないもの。
圧力容器規格 ^[13]	異状のないもの。
ガス解釈例 ^[14]	耐えるもの。
ガス解釈例 ^[14] 別添	耐えるもの。
特定設備 ^[15] 別添1	局所的なふくらみ又は伸び，漏れ等の異常が生じないとき。
特定設備 ^[15] 別添2	局所的なふくらみ又は伸び，漏れ等の異常が生じないとき。
特定設備 ^[15] 別添3	局所的なふくらみ又は伸び，漏れ等の異常が生じないとき。
特定設備 ^[15] 別添7	局所的なふくらみ又は伸び，漏れ等の異常が生じないとき。
設計・建設規格 ^[16]	耐え，かつ，著しい漏えいがないもの。
溶接規格 ^[17]	耐え，かつ，漏えいがないもの。

表4 耐圧試験圧力のまとめ

設計マージン (DM)	試験圧力 (P_p)	
	水圧試験	気圧試験
DM3	$1.25P$	$1.1P$
	$1.25PS_{mm}/S_{md}$	$1.15PS_{mm}/S_{md}$
DM3.5/1.1	$1.15P$	$1.1P$
DM3.5	$1.25P$	$1.1P$
	$1.3P$	$1.1P$
	$1.3PS_n/S_d$	$1.1PS_n/S_d$
DM4	$1.5P$	$1.25P$
	$1.5PS_n/S_d$	$1.25PS_n/S_d$

注 P ：最高使用圧力

S_{mm} ：水圧試験又は気圧試験の温度での設計応力強さ

S_{md} ：最高使用温度での設計応力強さ

S_n ：水圧試験又は気圧試験の温度での許容引張応力

S_d ：最高使用温度での許容引張応力

ている。各 DM では、水圧試験圧力及び気圧試験圧力に温度補正の有無の相違がある。保持時間は規定していないものもあるが、10分間が多く対象とする機器等によっている。直後漏えい試験を規定していないものも多いが、直後漏えい試験圧力は最高使用圧力 (P) としているのが一般的である。判定基準は、記載方法に相違はあるが、「局部的な膨張、変形などの異常が生じず、漏えいのないもの」である。

5 耐圧試験での安全裕度

JIS B 8266, クラス 1 機器及びクラス MC 容器は、耐圧試験圧力の上下限を与えると共に発生応力の上限を与えている。その他の機器では、耐圧試験圧力の下限を与え、一部では上限を与えているものもある。以下では、まず発生応力の上限を与えている機器での安全裕度について考察し、次にその他の機器での安全裕度について考察する。

(1) 発生応力の上限を与えている機器での安全裕度

① JIS B 8266 での安全裕度

軸力と曲げモーメントの組み合わせに対する矩形はりを用いた降伏の限界である崩壊限界^[10]から発生応力の上限が規格基準等^[6]で定められている。崩壊限界と発生応力の上限を図1に示す。実線は崩壊限界で式(1)又は式(2)により与えられる。破線は、水圧試験での発生応力の上限で式(3)、式(4)又は式

(5)により与えられる。一点鎖線は、気圧試験での発生応力の上限で式(6)、式(7)又は式(8)により与えられる。

$$P_m < S_y \text{ の場合, } (P_m + P_b) / S_y = 3/2 + P_m / S_y - 3(P_m / S_y)^2 / 2 \quad (1)$$

$$P_m \geq S_y \text{ の場合, } P_m = S_y \quad (2)$$

$$P_m \leq 2S_y/3 \text{ の場合, } P_m + P_b \leq 1.35S_y \quad (3)$$

$$9S_y/10 > P_m > 2S_y/3 \text{ の場合, } P_m + P_b \leq 2.35S_y - 1.5P_m \quad (4)$$

$$P_m \geq 9S_y/10 \text{ の場合, } P_m \leq 0.9S_y \quad (5)$$

$$P_m \leq 2S_y/3 \text{ の場合, } P_m + P_b \leq 1.2S_y \quad (6)$$

$$8S_y/10 > P_m > 2S_y/3 \text{ の場合, } P_m + P_b \leq 2.2S_y - 1.5P_m \quad (7)$$

$$P_m \geq 8S_y/10 \text{ の場合, } P_m \leq 0.8S_y \quad (8)$$

ここで、 P_m は、一次一般膜応力

P_b は、一次曲げ応力

S_y は、耐力

図1から、水圧試験では、一次一般膜応力 (P_m) のみの場合は、崩壊限界までには10% ($0.90S_y$) の安全裕度を持っている。同様に、一次曲げ応力 (P_b) のみの場合も、崩壊限界までには10% ($1.35S_y$) の安全裕度を持っている。気圧試験では、一次一般膜応力 (P_m) のみの場合は、崩壊限界までには20% ($0.80S_y$) の安全裕度を持っている。同様に、一次曲げ応力 (P_b) のみの場合も、崩壊限界までには20% ($1.20S_y$) の安全裕度を持っている。

一次一般膜応力 (P_m) と一次曲げ応力 (P_b) の合成応力について、崩壊限界までの安全裕度を図2に示す。水圧試験では崩壊限界までに10～19%の安

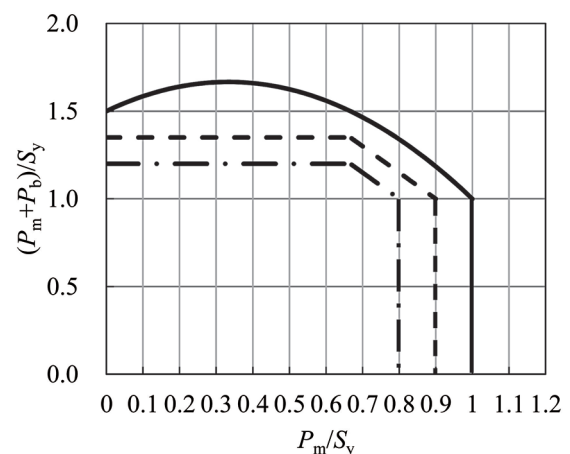


図1 JIS B 8266の崩壊限界と発生応力の上限

全裕度を、気圧試験では崩壊限界までに20～28%の安全裕度を持っている。

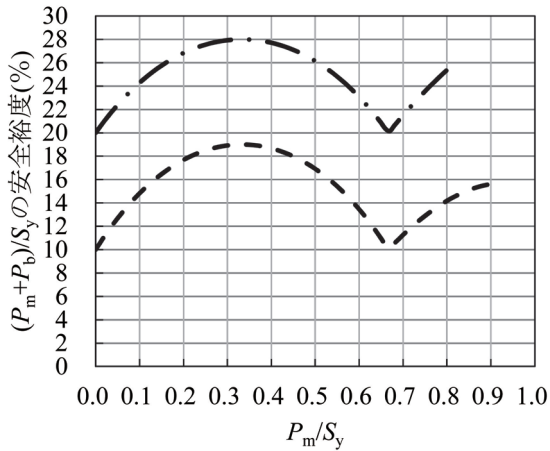


図2 JIS B 8266の $(P_m+P_b)/S_y$ の安全裕度

なお、参考のため、SFVQ2A で設計した最高使用温度で、腐食代については考慮せず、計算上の必要厚さでの薄肉円筒をモデルとして、耐圧試験圧力で発生する応力の塑性崩壊までの安全裕度を考える。この場合、設計した最高使用温度で最高使用圧力 (P) を加えたときにモデルに発生する応力は、設計応力強さ (S_m) に達している。これに基づいて、水圧試験圧力 ($1.25P$)、気圧試験圧力 ($1.15P$)、水圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) 及び気圧試験の上限圧力 ($1.15 \times 1.06P$) で発生する応力の塑性崩壊までの安全裕度を図3に示す。水圧試験圧力 ($1.25P$) では50% ($0.50S_y$)、気圧試験圧力 ($1.15P$) では54% ($0.46S_y$)、水圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) では47% ($0.53S_y$) 及び気圧試験の上限圧力 ($1.15 \times 1.06P$) では51% ($0.49S_y$) の安全裕度

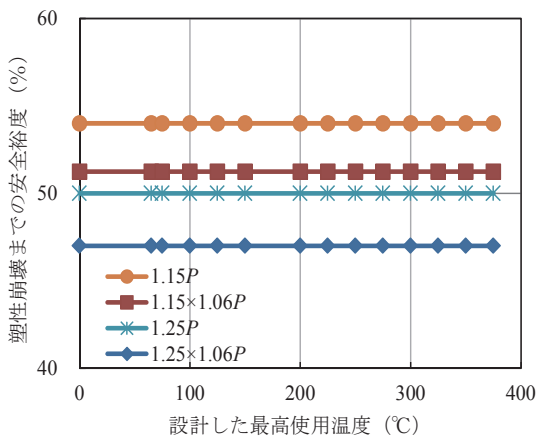


図3 JIS B 8266の塑性崩壊までの安全裕度

がある。なお、温度による設計応力強さ (S_m) の値に変化はないことから、温度補正しても上述の安全裕度は変わらない。

② クラス1機器での安全裕度

JIS B 8266 での安全裕度と同様に軸力と曲げモーメントの組み合わせに対する矩形はりを用いた降伏の限界である崩壊限界^[10]から発生応力の上限が規格基準等^[16]で定められている。崩壊限界と発生応力の上限を図4に示す。実線は崩壊限界で式(1)又は式(2)により与えられる。破線は、水圧試験での発生応力の上限で式(3)、式(5)又は式(9)により与えられる。規格基準等^[16]では、式(4)の代わりに式(9)が与えられている。気圧試験での発生応力の上限である式(6)、式(7)又は式(8)は、規格基準等^[16]では与えられていない。なお、規格基準等^[16]では式(10)についても与えられている。

$$9S_y/10 > P_m > 2S_y/3 \text{ の場合, } P_m + P_b \leq 2.15S_y - 1.2P_m \quad (9)$$

$$P_L \leq 1.35S_y \quad (10)$$

ここで、 P_m は、一次一般膜応力

P_b は、一次曲げ応力

P_L は、一次局部膜応力

S_y は、耐力

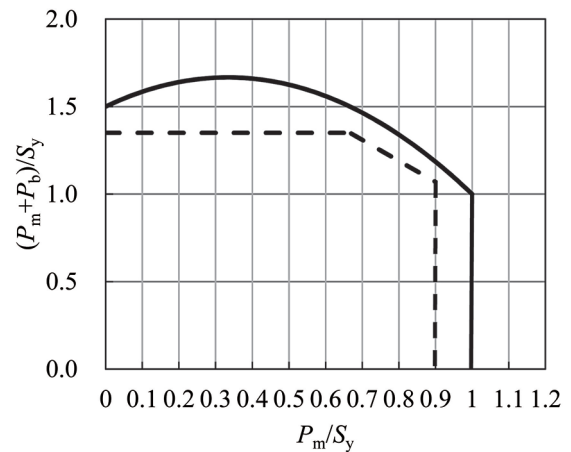


図4 クラス1機器の崩壊限界と発生応力の上限

一次一般膜応力 (P_m) と一次曲げ応力 (P_b) の合成応力について、崩壊限界までの安全裕度を図5に示す。水圧試験では崩壊限界までに10～19%の安全裕度を持っている。

JIS B 8266 での安全裕度は、ASME Section VIII-2 に基づいているのに対し、クラス1機器での

安全裕度は ASME Section III に基づいている。初期の ASME Section VIII-2 は、ASME Section III と同一であったが、改正が行われてきたため、崩壊限界までの安全裕度では数値的には差異が生じているが、本質的には同様のものである。

なお、参考のため、SFVQ2A で設計した最高使

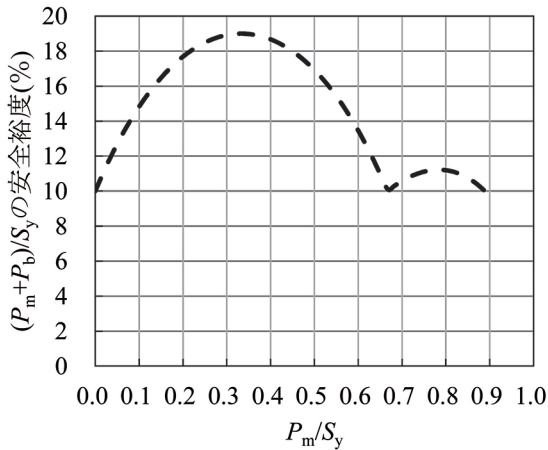


図5 クラス1機器の $(P_m+P_b)/S_y$ の安全裕度

用温度で、腐食代については考慮せず、計算上の必要厚さでの薄肉円筒をモデルとして、耐圧試験圧力で発生する応力の塑性崩壊までの安全裕度を考える。この場合、設計した最高使用温度で最高使用圧力 (P) を加えたときにモデルに発生する応力は、設計応力強さ (S_m) に達している。これに基づいて、水圧試験圧力 ($1.25P$)、気圧試験圧力 ($1.1P$)、水圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) 及び気圧試験の上限圧力 ($1.1 \times 1.06P$) で発生する応力の塑性崩壊までの安全裕度を図6に示す。水圧試験圧力 ($1.25P$) では 50% ($0.50S_y$)、気圧試験圧力 ($1.1P$)

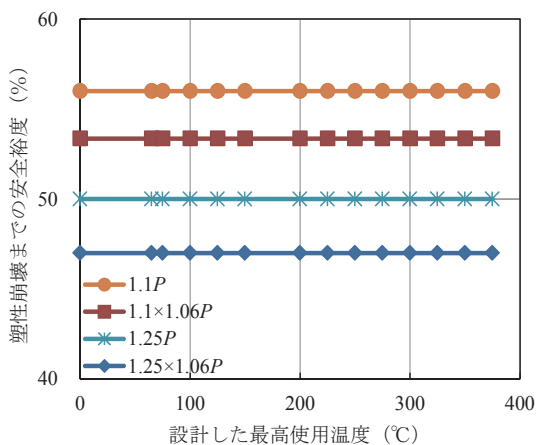


図6 クラス1機器の塑性崩壊までの安全裕度

では 56% ($0.44S_y$)、水圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) では 47% ($0.53S_y$) 及び気圧試験の上限圧力 ($1.1 \times 1.06P$) では 53% ($0.47S_y$) の安全裕度がある。なお、温度による設計応力強さ (S_m) の値に変化はないことから、温度補正しても上述の安全裕度は変わらない。

③ クラス MC 容器での安全裕度

発生応力の上限が規格基準等^[16]で定められている。一次応力強さは、式(11)から式(13)の値を超えないことが要求されている。

$$P_m \leq 3S_y/4 \text{ (気圧)}, 9S_y/10 \text{ (水圧)} \quad (11)$$

$$P_L \leq 3/2 \times 3S_y/4 \text{ (気圧)}, 3/2 \times 9S_y/10 \text{ (水圧)} \quad (12)$$

$$P_L + P_b \leq \alpha \times 3S_y/4 \text{ (気圧)}, \alpha \times 9S_y/10 \text{ (水圧)} \quad (13)$$

ここで、 P_m は、一次一般膜応力

P_L は、一次局部膜応力

P_b は、一次曲げ応力

S_y は、耐力

α は、形状係数又は 1.5 の何れか小さい値

α を 1.5 とすれば、式(11)から式(13)により、気圧試験では、一次一般膜応力 (P_m) のみの場合は塑性崩壊までには 25% ($0.75S_y$) の安全裕度を、一次局部膜応力 (P_L) のみの場合は塑性崩壊までには 25% ($1.125S_y$) の安全裕度を、一次局部膜応力 (P_L) と一次曲げ応力 (P_b) の合成応力の場合は塑性崩壊までには 25% ($1.125S_y$) の安全裕度を持っている。水圧試験では、一次一般膜応力 (P_m) のみの場合は塑性崩壊までには 10% ($0.9S_y$) の安全裕度を、一次局部膜応力 (P_L) のみの場合は塑性崩壊までには 10% ($1.35S_y$) の安全裕度を、一次局部膜応力 (P_L) と一次曲げ応力 (P_b) の合成応力の場合は塑性崩壊までには 10% ($1.35S_y$) の安全裕度を持っている。

なお、参考のため、SGV480 で設計した最高使用温度で、腐食代については考慮せず、計算上の必要厚さでの薄肉円筒をモデルとして、耐圧試験圧力で発生する応力の塑性崩壊までの安全裕度を考える。この場合、設計した最高使用温度で最高使用圧力 (P) を加えたときにモデルに発生する応力は、許容引張応力 (S) に達している。これに基づいて、水圧試験圧力 ($1.15P$)、気圧試験圧力 ($1.1P$)、水圧試験の上限圧力 ($1.15 \times 1.06P$) 及び気圧試験の上限圧力 ($1.1 \times 1.06P$) で発生する応力の塑性崩壊まで

の安全裕度を図 7 に示す。水圧試験圧力 (1.15P) では 35 ~ 41% ($0.59 \sim 0.65S_y$), 気圧試験圧力 (1.1P) では 37 ~ 44% ($0.56 \sim 0.63S_y$), 水圧試験圧力の上限圧力 ($1.15 \times 1.06P$) では 31 ~ 38% ($0.62 \sim 0.69S_y$) 及び気圧試験の上限圧力 ($1.1 \times 1.06P$) では 34 ~ 41% ($0.59 \sim 0.66S_y$) の安全裕度がある。

又、水圧試験圧力を最高使用圧力 (P) の 1.25 倍と仮定し、このときと上限圧力で発生する応力の塑性崩壊までの安全裕度を図 8 に示す。水圧試験圧力 (1.25P) では 29 ~ 36% ($0.64 \sim 0.71S_y$), 水圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) では 25 ~ 32% ($0.68 \sim 0.75S_y$) の安全裕度がある。

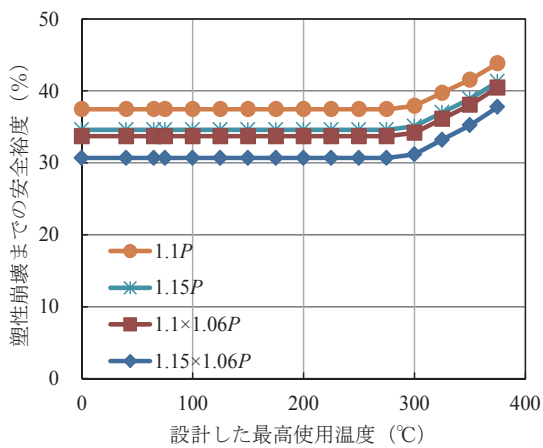


図 7 クラスMC容器の安全裕度

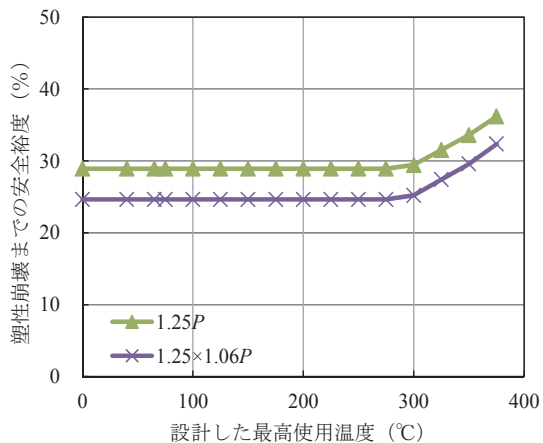


図 8 クラスMC容器の安全裕度 (最高使用圧力の1.25倍)

(2) その他の機器での安全裕度

その他の機器では、耐圧試験圧力で発生する応力の上限を規定していないため、設計した最高使用温度で、腐食代については考慮せず、計算上の必要厚さでの薄肉円筒をモデルとして、耐圧試験圧力で発

生する応力の塑性崩壊までの安全裕度を考える。この場合、最高使用圧力 (P) を加えたときにモデルに発生する応力は、許容引張応力 (S) に達している。

常温での許容引張応力 (S) は、引張強さ (S_u) 又は耐力 (S_y) に基づいて与えられているため、耐力 (S_y) を引張強さ (S_u) で除した降伏比 ($\gamma = S_y/S_u$) で整理すると分かりやすい。降伏比 (γ) が 0.429 以下では、常温から耐力 (S_y) に基づいて許容引張応力 (S) が与えられ、降伏比が 0.430 以上では常温では引張強さ (S_u) に基づいて許容引張応力 (S) が与えられている。

降伏比 (γ) が 0.429 以下の場合が、安全裕度に厳しいため、その代表として降伏比 (γ) が 0.394 である SUS304 を例としたモデルに発生する応力の安全裕度を図 9 から図 12 に示す。

図 9 では DM3.5 での許容引張応力により水圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の 1.25 倍、気圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の 1.1 倍での安全裕度と温度補正をした場合の安全裕度を示している。水圧試験圧力 (1.25P) では 17 ~ 93% ($0.07 \sim 0.83S_y$), 気圧試験圧力 (1.1P) では 27 ~ 94% ($0.06 \sim 0.73S_y$), 温度補正した水圧試験圧力 ($1.25PS_u/S_d$) では 17% ($0.83S_y$), 温度補正した気圧試験圧力 ($1.1PS_u/S_d$) では 27% ($0.73S_y$) の安全裕度がある。図 10 では DM3.5 での許容引張応力 (S) により水圧試験圧力 (1.25P), 気圧試験圧力 (1.1P), 水圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) 及び気圧試験の上限圧力 ($1.1 \times 1.06P$) による安全裕度を示している。水圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) では 12 ~ 93% ($0.07 \sim 0.88S_y$), 気圧試験の上限圧力 ($1.1 \times 1.06P$) では 22 ~ 94% ($0.06 \sim 0.78S_y$) の安全裕度がある。

図 11 では DM4 での許容引張応力 (S) により水圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の 1.5 倍、気圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の 1.25 倍での安全裕度と温度補正をした場合の安全裕度を示している。水圧試験圧力 (1.5P) では 6 ~ 92% ($0.08 \sim 0.94S_y$), 気圧試験圧力 (1.25P) では 21 ~ 93% ($0.07 \sim 0.79S_y$), 温度補正した水圧試験圧力 ($1.5PS_u/S_d$) では 6% ($0.94S_y$), 温度補正した気圧試験圧力 ($1.25PS_u/S_d$) では 21% ($0.79S_y$) の安全裕度がある。図 12 では DM4 での許容引張応力 (S) により水圧試験圧力 (1.5P), 気圧試験圧力 (1.25P), 水圧試験の上

限圧力 ($1.5 \times 1.06P$) 及び気圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) による安全裕度を示している。水圧試験の上限圧力 ($1.5 \times 1.06P$) では $0 \sim 92\%$ ($0.08 \sim 1.00S_y$)、気圧試験の上限圧力 ($1.25 \times 1.06P$) では $17 \sim 93\%$ ($0.07 \sim 0.83S_y$) の安全裕度がある。

なお、参考として、降伏比 (γ) が 0.695 である高温用材料の火 SCM V28 を例としたモデルに発生する応力の安全裕度を図 13 に示す。DM3.5 での許容引張応力 (S) により水圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の 1.3 倍、気圧試験圧力は最高使用圧力 (P) の 1.1 倍での安全裕度を示している。水圧試験圧力 ($1.3P$) では $47 \sim 93\%$ ($0.07 \sim 0.53S_y$)、気圧試験圧力 ($1.1P$) では $55 \sim 94\%$ ($0.06 \sim 0.45S_y$) の安全裕度がある。この様な高降伏比かつ高温用の材料を用いた場合は、耐圧試験により発生する応力は小さい。耐圧試験で発生する応力と規定最小耐力である 410 MPa の割合を図 14 に示す。例えば、 650°C

での許容引張応力 (21MPa) を用いて設計された場合は、水圧試験でモデルに発生する応力は 27 MPa となり、規定最小耐力の 7% しか生じない。同様に気圧試験でモデルに発生する応力は 23MPa となり、規定最小耐力の 6% しか生じない。この様に高温で設計される圧力機器では水圧試験と気圧試験で発生する応力に大きな差は生じない。

6 耐圧試験の目的及び効果

耐圧試験の目的及び効果について文献等^[21-31]で述べられていることを表 5 に整理して示す。文献等^[21-31]により目的と効果について異なっているのは、耐圧試験の規定が古いため、その目的について失われたか、最初から明確な目的がなかったのではないかと考える。文献等^[21-31]では、耐圧試験の目的は、設計の検証と製造の検査に分類され、暗に期待される

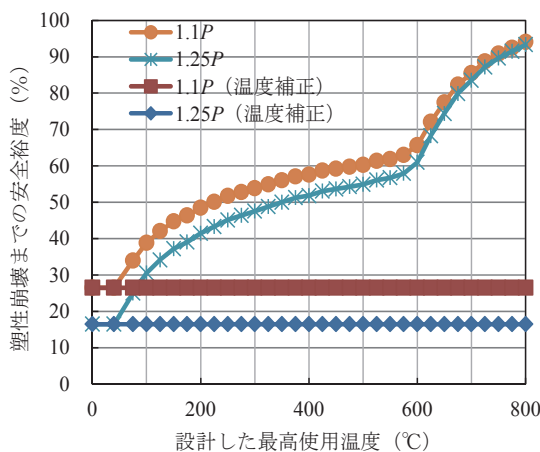


図9 DM3.5での耐圧試験圧力と温度補正圧力での安全裕度

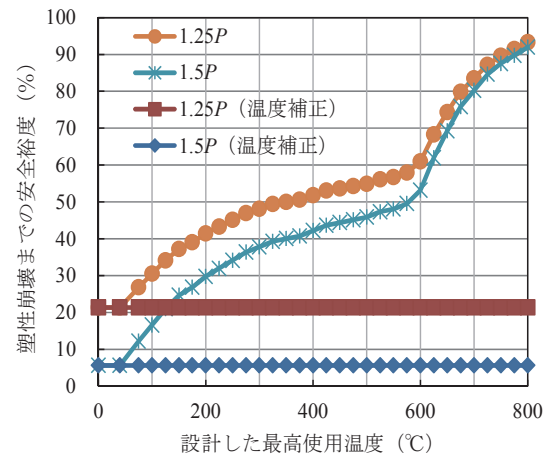


図11 DM4での耐圧試験圧力と温度補正圧力での安全裕度

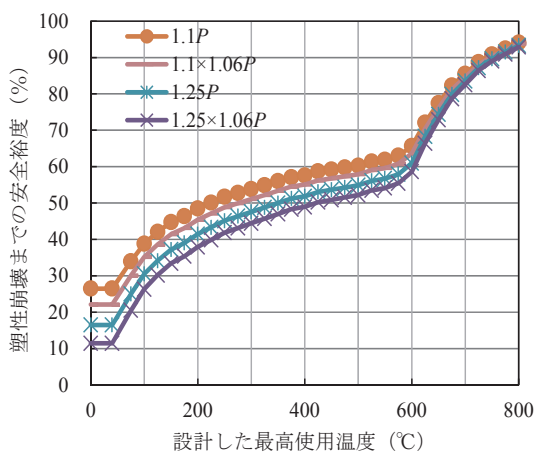


図10 DM3.5での耐圧試験圧力と上限圧力での安全裕度

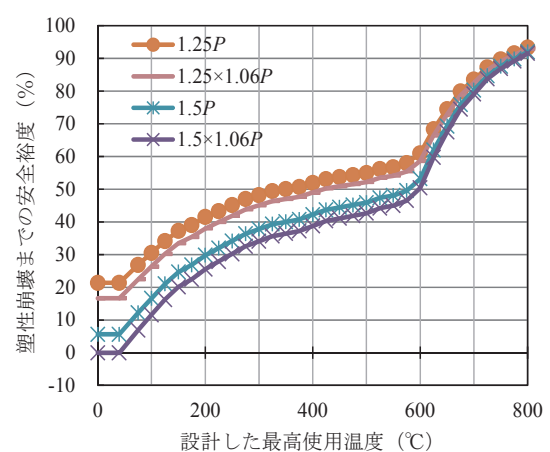


図12 DM4での耐圧試験圧力と上限圧力での安全裕度

効果についても述べられている。耐圧試験での安全裕度でのその他の機器での安全裕度で考えたように、安全裕度が大きく、発生応力の小さいものがあることを考えると、耐圧試験及びその直後漏えい試験の目的は、文献等^[23-25]で述べられているように、漏れの有無を調べることによって工作の良否、特に接合部（溶接部を含む）が緊密にできているかどうかを判断することにあると考える。

加えて、近年の圧力機器は、解析を用いて設計されることや最高使用温度はより高温となっていることを考慮すると、耐圧試験も非破壊試験等の試験と同様に品質管理上の要求であるものとする。

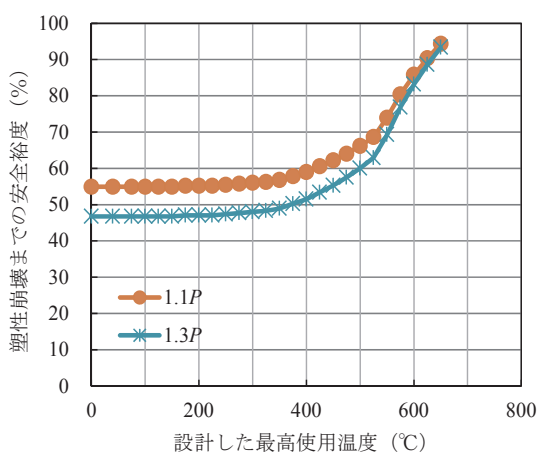


図13 DM3.5の火SCMV28を例とした安全裕度

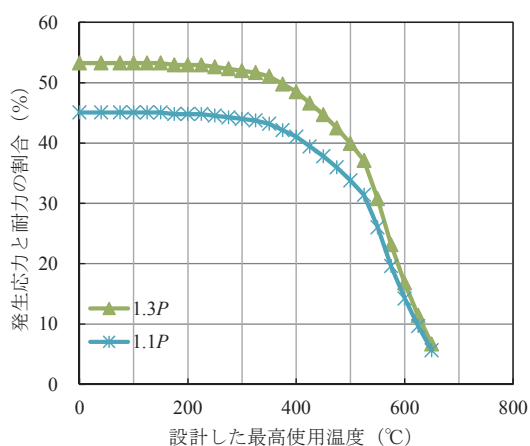


図14 耐圧試験で発生する応力と規定最小耐力の割合

7 課題

規格規準等においても、耐圧試験については、作業員の安全を確保するため、耐圧試験とその直後漏えい試験に分けて規定する必要があると考える。

低降伏比のものも考慮するため、耐圧試験圧力は、現行の規定が上限と考えるが、高温用圧力機器では、水圧試験と気圧試験で発生する応力に殆ど差はなく、発生応力の値も小さいことから、気圧試験の圧力（例えば、 $1.1P$ ）で統一しても耐圧試験の目的を満足でき、かつ、最高使用圧力（ P ）を超え、暗に期待している効果を考慮することができるため問題ないものとする。耐圧試験圧力での温度補正については、高温用圧力機器の例として火SCMV28の許容引張応力（ S ）と温度補正倍率を図15に示す。引張応力又は耐力で許容引張応力（ S ）が決められている非クリープベースの場合の温度補正倍率は1.0～1.4倍であるが、クリープ破断で許容引張応力（ S ）が決められているクリープベースの場合の温度補正倍率は1.7～8.0倍となる。この様に、クリープベースの場合の温度補正した耐圧試験は現実的ではない。この温度補正倍率を乗じた耐圧試験を実施しても、延性破壊を起こさないことでクリープ破断を起こさないことは確認できないため、意義のない試験となる。加えて、脆性破壊や疲労破壊を起こさないことも確認できない。これらのことから、耐圧試験圧力への温度補正の必要性はないものとする。

直後漏えい試験圧力は、漏えいの有無を確認するだけのものとするれば、現行の最高使用圧力（ P ）よ

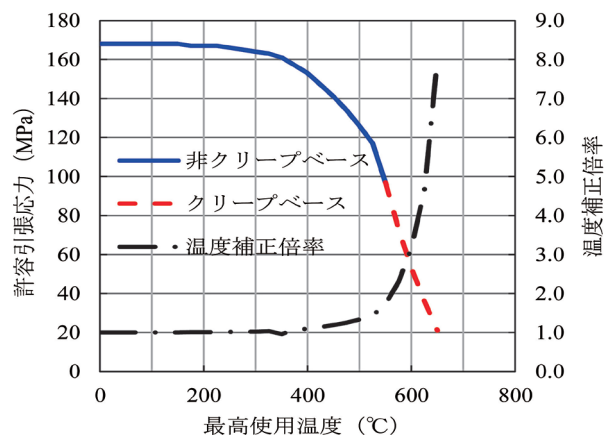


図15 火SCMV28の許容引張応力と温度補正倍率

表5 耐圧試験の目的及び効果

文献等	耐圧試験の目的及び効果
[21]	① 使用中に爆発することが好ましくない容器の近辺で働いている人に保証を与える。 ② 容器に、内容物がもれ出すような欠陥がないことを示す。 ③ 設計された運転圧力に耐えうること、又はその代わりとして、容器が変形を起こさないような安全係数をもった運転圧力を決めていることについての要求よりもさらに計画した強度には余裕があることを確認する。 ④ 塑性変形を起こさせることによって局部領域での応力集中を低減するための方法を準備する。
[22]	容器の強さを確認するために行う。
[23]	<p>水圧試験の目的は之を端的に言えば漏えい又は加圧による変形の有無を調べるにある。尚詳かに云えば接合部に於けるコーキング又はエキスパンダーが充分利いて居るかどうか、板に隠れたる裂疵其の他の欠陥があるかどうか、ステー補強の方法が適当かどうか、又は罐體に圧力を加えた場合如何様な変形が起るかを調べるにある。</p> <p>若し水圧試験は汽罐の強力を試すものだと考える人があるとすれば、それは根本的な誤謬である。この汽罐は20気圧で水圧してあるんだから15気圧位で使用圧力は平気だと考えられてはたまったものではない。注文主に依るとよく必要以上の水圧力を指定して来られる向きもある様であるが（特に汽罐以外のタンク其の他の圧力容器に於いて）若し水圧は強さを測る為であるとの観念に立脚して居るとすれば、それは甚だ遺憾である。汽罐の強力は設計上から割出し且判断されるべきもので、水圧試験は汽罐を検査するための有力なる一方法であるに過ぎないものである。</p> <p>従って或状態の下にこれから使用に供しようとする汽罐に対して、その適否を検べる為に行う水圧試験にはこれが爲罐體に少しでも損傷を與える如きことがあってはいけない。容器に水圧を加えれば、目には見えなくても、板は伸びて変形を起こす、その変形は仮に弾性限度以内であっても材料はそれだけ疲労する。若し不當なる水圧力の為接合部に些かでも「滑り」を生じたならば、それが主因となって使用中破裂を招くことがないとは断言できない。</p>
[24]	<p>水圧試験の主目的は、漏れの有無を調べることによって工作の良否、特に接合部（溶接部を含む）が緊密にできているかどうかを判断するにある。すなわちリベット継手や管板の管取付部などにおけるコーキング又はエキスパンダが、必要で十分な程度にきいているかどうかを調べるのが主な目的であるが、板に隠れた傷やその他の欠陥がある場合に水圧によってこれを発見できることもある。水圧によってボイラ本体各部の弾性変形の程度、特に平板部の張出し量を調べることもできるが、このためにはマイクロメータ、ダイヤルゲージ、ケガキ針などを用いて、変形に影響されない固定面又は固定点を基準として各部の変形量を計る必要がある。</p> <p>一般水圧試験は最高使用圧力を決定するために行うものでもなく、ボイラの強さを試すためのものでもない。ボイラの強さは設計上から割り出され、その計算書と図面から判断されるべきもの、水圧試験はボイラ本体の検査に付随して工作の良否を判断する補助的手段に過ぎない。したがって水圧を不当に高くすることは避けなければならない。</p>
[25]	<p>水圧試験は工作上の欠陥を調べるために行う試験であり、ボイラの強度を確認するためのものではないから、あまり大きな水圧力を加える必要はない。大きな圧力を加えると、材料の一部が降伏点に達する恐れがある。</p>
[26]	<p>耐圧試験は設備が操業上、静的圧力に安全に耐えうる強度を有することを確認するために行う試験である。</p> <p>すなわち、その設備が主として設計上あるいは製作工程上にミスがあったか否かを最終的に検査する試験である。又操業の途中においても必要が認められた場合、あるいは定期的に設備を開放し補修した場合などに検査するための試験である。</p> <p>したがって、耐圧試験は微小の漏えいの有無を確認する試験とは全く別の目的で行う試験であるから安全面を考慮して検査員が設備に近接しないことを原則とする。すなわち漏れの有無は別途に漏れ試験で行う。</p>
[27]	<p>耐圧試験は圧力容器にとって過酷な取扱いであって劣化を招くので、新製作時又はかなりの補修を行ったときなど、耐圧性能を確認する必要がある場合以外は、むやみに行うべきではない。しかし、耐圧試験には次に示すような利点がある。</p> <p>① 直接的に耐圧性能の確認ができる。 ② 機械的応力除去の役目をする。 ③ 形状を修正し、応力の配分を是正する。 ④ 伸び、膨張量、応力などの測定を併せて行えば、設計及び工作の正しさを立証することができる。</p>

耐圧試験の目的は、設備の耐圧性能・構造強度を確認し、併せて著しい漏れがないことをチェックすることである。したがって、微小漏れいの検出は含まれず、漏れ試験の対象とされる。

耐圧試験は、圧力容器・配管等の受圧構造の圧力に耐える性能を確認するものであるが、通常受ける圧力（常用圧力、設計圧力）よりも高い圧力で試験されるもので、耐圧性能の余裕も確認される。その代り、設計、施工が不適当なときは、耐圧試験の際に破壊や著しい漏れを生ずることがあり、人命に関する事故も古来多く起っている。

耐圧試験の利点及び欠点をまとめて表に示す。特に利点3の機械的応力除去の効果は、その後の脆性破壊の発生防止に役立ち、気体を入れての運転や漏れ試験の安全性を高めている。しかし、この効果も、疲れや腐食等に応力腐食割れ等が設備の使用中に進行するとこれに相殺されるので、無条件に頼りにしてはならない。

安全な流体である水を用いる耐圧試験（水圧試験）は、表に示す効果によって広く用いられており、水圧試験の適用できない受圧設備では、材料選定・設計・施工及び試験検査に特別の注意が必要である。利点6のように、proof testとして、強度設計の困難な形状のものの耐圧性能を確認することもできる。この場合には歪ゲージや塗料による応力（歪）の調査が行われる。

[28]

表 耐圧試験の利害

利 点	欠 点
1. 耐圧強度の実証ができる。 2. 著しい漏れ、変形のないことが確認できる。 3. 機械的応力除去の効果がある。 4. 形状を改善する。 5. 局部的に加工硬化の効果を発生して、全体の強度のバランスを改善する。 6. 複雑な形状のものに対して最高許容応力の決定をすることができる。	1. 割れを発生させる。 ⁽¹⁾ 2. 割れを進展させる。 ⁽²⁾ 3. 歪時効により材質を悪化させる。 4. 比例限界を超えた部分は板厚が薄くなる。 5. 1・2 から破裂する危険性がある。 6. 耐圧試験により発生した欠陥を見逃す恐れがある。 ⁽³⁾

注 (1) 溶接作業直後に耐圧試験を行ったり、後熱処理が不十分であった場合等に遅れ破壊を助長する恐れがある。

(2) 溶接後熱処理（応力除去焼鈍）をしていないものは、この傾向が強い。

(3) この提案では、この欠点をなくすような検査を課してある。現在は、まだ試験研究の段階におろが、アコースティックエミッションによる検査技術が普及すれば耐圧試験、漏れ試験中あるいは使用中に割れを検出することができるので、保安の向上が期待される。

[29]

耐圧試験は、水又は他の流体により圧力容器に設計以上の高い圧力を静的に負荷して、容器の強度耐圧性能を確認し、局部的には、材料の一部を降伏させ、ピーク応力をなじませ残留応力や歪を全体に平均化して稼働中の破壊の危険から容器の安全を守るために行うものである。

[30]

R. W. Nichols氏は、耐圧試験の目的を文献[21]のように述べている。これはもっともなことであり、特に否定するつもりはないが、正しく理解しておく必要がある。

①及び②は最も基本的なことであり、目的はこれらだけで十分であるように思われる。圧力設備で最も重要であり、設計の基本となる荷重が圧力であることは疑いの余地がない。その意味では、耐圧試験に合格したものは安心して使うことができるように思われる。事実、そうであろう。しかし、ここで理解しておかなければならないのは、圧力設備の運転中の破壊には多くのモードがあり、耐圧試験はこれらの破壊モードすべてに対して保証を与えているわけではないということである。例えば、高温で運転される設備ではクリープが支配的な破壊モードになるであろう。又、熱応力が重要な荷重となる場合もあるであろう。繰返し応力が作用する場合は、疲労破壊の可能性が大きくなる。実際、耐圧試験に合格したものが運転開始後わずかな期間で破損するという例は決して珍しいことではない。我々は、耐圧試験で保証できないものがあることを理解しておくべきである。機会があれば、この点についてもっと詳しく解説したい。

③は設計裕度の問題であるが、耐圧試験によって設計裕度が確保されているかどうか、定量的に評価することは困難であろう。余裕があるかどうかは不明であるが、少なくとも設計圧力の1.3～1.5倍の圧力をかけても目に見えた問題が生じないことが確認できたという程度のことと考えるべきである。気圧試験のように、設計圧力の1.2倍程度しかかけない場合は、設計余裕の確認はできないことになる。

④は、目的というよりは、副次的効果と考えておいた方がよいように思われる。決して応力集中や溶接残留応力を緩和する目的で耐圧試験を行っているわけではない。

[31]

木原らの脆性破壊発生に対する予荷重効果の実験データは、圧力容器の安全性に関連してこれまでしばしば引用されてきた。耐圧試験に合格した圧力容器は、試験温度より低温側で使用しても試験圧力より低圧で脆性破壊を起こすことはなからう、という期待がここから出てくる。

り低いものにでき、作業員の安全をより確保できる可能性があるが、適切な圧力について別途詳細に検討する必要がある。とりあえずは現行の規定である最高使用圧力 (P) しかないと考える。

耐圧試験とその直後漏えい試験に分けて規定する必要があることから、各試験の判定基準も分けて考える必要がある。加えて、従来の規格基準等は、現物を扱い現場に出て判断する者を対象としていたが、近年では審査や監査のみを行い、文書のみで判断する者にも理解できるように観察方法や観察時期について記載する等の親切、かつ、丁寧に判定基準を記載する必要があると考える。

耐圧試験の判定基準は、「直後漏えい試験時の目視観察において、フランジ等の機械接合部、母材及び溶接部等に局所的な膨張、変形などの異常が生じていないこと」が適切と考える。

直後漏えい試験の判定基準は、「目視観察で、フランジ等の機械接合部にあっては著しい漏えいのないもの、溶接部にあっては漏えいのないもの」が適切と考える。なお、この段階では、母材については、耐圧試験の判定基準で判断可能と考える。

8 まとめ

規格基準等での耐圧試験の方法及び基本的な考え方について整理し、耐圧試験及びその直後漏えい試験の概要について整理した後、耐圧試験での安全裕度について考察した。その後耐圧試験の目的及び効果について既往の知見を調査・整理した。これらに基づいた耐圧試験及びその直後漏えい試験の課題を提案した。提案を下記にまとめて示す。日頃からあたり前に実施している耐圧試験の目的と必要性等について、考える機会になれば幸いである。

(1) 耐圧試験圧力と判定基準の提案

耐圧試験圧力は、気圧試験の圧力（例えば、1.1 P ）で統一しても耐圧試験の目的を満足でき、かつ、最高使用圧力 (P) を超え、暗に期待している効果を考慮することができるため問題ないものとする。耐圧試験圧力への温度補正は現実的ではないため必要性ないと考える。

耐圧試験の判定基準は、「直後漏えい試験時の目

視観察において、フランジ等の機械接合部、母材及び溶接部等に局所的な膨張、変形などの異常が生じていないこと」が適切と考える。

(2) 直後漏えい試験圧力と判定基準の提案

直後漏えい試験圧力は、漏えいの有無を確認するだけのものとするれば、現行の最高使用圧力 (P) より低いものにでき、作業員の安全をより確保できる可能性があるが、適切な圧力について別途詳細に検討する必要がある。とりあえずは現行の規定である最高使用圧力 (P) しかないと考える。

直後漏えい試験の判定基準は、「目視観察で、フランジ等の機械接合部にあっては著しい漏えいのないもの、溶接部にあっては漏えいのないもの」が適切と考える。なお、この段階では、母材については、耐圧試験の判定基準で判断可能と考える。

参考文献

- [1] Rules for Construction of Stationary Boilers and for Allowable Working Pressures, 1914, The American Society of Mechanical Engineers
- [2] JIS B 0126-2005, 火力発電用語—ボイラ及び附属装置, 財団法人日本規格協会
- [3] JIS B 8201-2013, 陸用鋼製ボイラー構造, 一般財団法人日本規格協会
- [4] JIS B 0190-2010, 圧力容器の構造に関する共通用語, 財団法人日本規格協会
- [5] JIS B 8265-2017, 圧力容器の構造—一般事項, 一般財団法人日本規格協会
- [6] JIS B 8266-2003, 圧力容器の構造—特定規格, 一般財団法人日本規格協会
- [7] JIS B 8267-2015, 圧力容器の設計, 一般財団法人日本規格協会
- [8] 小林英男編, JIS使い方シリーズ 圧力容器 3 製作, 1995年10月25日, 財団法人日本規格協会
- [9] JSME S NC1-2016, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 解説, 一般社団法人日本機械学会
- [10] 安藤良夫, 岡林邦夫, 原子力プラントの構造設計, 1997年7月1日, 財団法人東京大学出版会
- [11] 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
- [12] ボイラー構造規格, 平成元年労働省告示第65



- 号
- [13] 圧力容器構造規格，平成元年労働省告示第 66 号
- [14] ガス工作物技術基準の解釈例，平成 26 年 3 月 19 日，20140313 商局第 6 号
- [15] 特定設備検査規則の機能性基準の運用について，平成 28 年 10 月 3 日，20160920 商局第 4 号
- [16] JSME S NC1-2016，発電用原子力設備規格 設計・建設規格<第 I 編 軽水炉規格>，一般社団法人日本機械学会
- [17] JSME S NB1-2016，発電用原子力設備規格 溶接規格，一般社団法人日本機械学会
- [18] 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準を定める告示，昭和 45 年通商産業省告示第 501 号
- [19] 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準を定める告示，昭和 55 年通商産業省告示第 501 号
- [20] 解説 原子力設備の技術基準，昭和 56 年 2 月 20 日，株式会社電力新報社
- [21] R. W. Nichols 編著，木原博・安藤良夫監訳，圧力容器工学，1972 年 10 月 5 日，株式会社産報
- [22] 落合安太郎，圧力容器，昭和 51 年 10 月 25 日，株式会社日刊工業新聞社
- [23] 山中秀男，最新標準汽罐の設計，昭和 12 年 12 月 10 日，工業圖書株式會社
- [24] 山中秀男，ボイラの設計，昭和 44 年 8 月 10 日，産業図書株式会社
- [25] ボイラー構造規格の解説，平成 19 年 7 月 31 日，社団法人ボイラ協会
- [26] 渡辺正紀，野村純一，圧力容器の耐圧・漏れ試験に関する提案，圧力技術，Vol. 11，No. 6，1973，pp. 53-55，社団法人日本高圧力技術協会
- [27] JIS B 8243-1981，圧力容器の構造 解説，財団法人日本規格協会
- [28] 成田圀郎，6. 耐圧試験・漏れ試験など，溶接学会誌，第 50 卷 (1981)，第 9 号，pp. 33-35，社団法人溶接学会
- [29] 富田真己，圧力容器の試験・検査 (その 2)，圧力技術，Vol. 25，No. 6，1987，pp. 36-48，社団法人日本高圧力技術協会
- [30] 佐藤拓哉，木曾朋顕，圧力容器及び配管の耐圧試験の危険性と試験要領の改善について，圧力技術，Vol. 48，No. 6，2010，pp. 34-45，社団法人日本高圧力技術協会
- [31] 金沢武，越賀房夫，脆性破壊 2，昭和 53 年 9 月 30 日，株式会社培風館



佐藤長光

ASME Section I の 異材継手に関する設計ガイドライン

Design Guidelines for Dissimilar Metal Welds of ASME Section I

規格基準室 大石 勇一

9%Cr type Creep Strength Enhanced Ferritic (CSEF) Steels and austenitic stainless steels are widely used in power plant systems. However, a number of failures occurred in dissimilar metal welds (DMWs) between those materials have been documented. Considering this situation, it was decided to provide the guideline for DMWs to provide information of design, fabrication and operation. This paper introduces summary of the guideline which will published in 2019 Edition of ASME Section I.

Keywords

Dissimilar Metal Welds (DMWs), Creep Strength Enhanced Ferritic (CSEF) Steels, ASME Section I

1 はじめに

発電用ボイラーシステムの場合、550℃以上の高温では、Grade 91 (SA-213 T91, SA-335 P91 など)、Grade 92 (Code Case 2179) 等、主に 9% 程度の Cr を含むクリープ強度を高めたフェライト鋼(以下、「CSEF 鋼」と略す)が使用されているが、許容される最高使用温度は 650℃である。計画が進められている高効率ボイラー(最高使用温度 700℃超級)の場合、650℃を超える温度域の部材には、より高温強度特性に優れたオーステナイト系の材料を用いる必要がある。このため、ボイラーシステムのどこかに CSEF 鋼とオーステナイト系材料を接続する異材継手(Dissimilar Metal Weld, 以下「DMW」と略す)を設ける必要がある。しかし、これまでそのような DMW に発生した損傷事例が数多く報告されている。

現在、ASME (American Society of Mechanical Engineers) 規格委員会では、最新の技術的知見を反映し、Section I (Rules for Construction of Power Boilers) の規定内容を近代化する検討

(「modernization」と呼ぶ)が行われており、その一環として、DMW に関する設計ガイドラインの検討が行われた。ガイドラインは EPRI の技術レポート^[1]に基づいて作成されたものであり、設計だけでなく製造及び運転に関する推奨事項も含まれている。このガイドラインを設ける提案は既に承認されており、2019 Edition に Nonmandatory Appendix として与えられる予定である。

以下に、Nonmandatory Appendix に与えられるガイドラインのポイントを紹介する。

2 DMWにおける問題点

DMW には、一般に CSEF 鋼とオーステナイト系ステンレス鋼(以下、「AS 鋼」という)を Ni 基の溶接材料で接続する方法が用いられている。これは、在来の Cr-Mo 系低合金鋼と AS 鋼を接続する DMW の経験に基づいている。DMW の設計において最も考慮しなければならないことは、CSEF 鋼と AS 鋼の間の熱膨張率の差である(図 1 参照)。熱膨張の不一致または熱変位により、機器には二次システム

荷重（または応力）が発生するが、その大きさは、母材と溶接金属の間の熱膨張率の差によって決まる。このため、溶接材料には、熱膨張率がフェライト系とオーステナイト系ステンレス鋼の間であるNi基の合金が用いられている。

溶接部は、溶接欠陥の存在や冶金学的な劣化が問題となるが、DMWでは、これら溶接部固有の問題に加えて、上述の二次システム荷重との相乗作用によって損傷に至る可能性が高い。このため、550℃以下の非クリープ領域で運転される構造物のDMWにおいても損傷する例が数多く報告されている。報告されている主な損傷箇所と考察された損傷原因（【】括弧内に記載）を以下に掲げる。

- ① CSEF 鋼製チューブとステンレス鋼製スライディングスペーサとの溶接部【シーム溶接効果、または溶接施工不良】
- ② CSEF 鋼製チューブとステンレス鋼製アタッチメントの溶接部【HAZの損傷、酸化ノッチ、融合線近傍の損傷】
- ③ CSEF 鋼製チューブとステンレス鋼製チューブの溶接部【CSEF 鋼側の酸化ノッチ】
- ④ CSEF 鋼製パイプとステンレス鋼製部品の厚肉周継手【融合線近傍の損傷、HAZの損傷、またはそれらの複合モード損傷】
- ⑤ CSEF 鋼製パイプに617合金製トランジションピースを介してHR3C製チューブを接続する溶接部【HR3C側に生じた応力解放割れ(stress relaxation cracking)】

なお、ここでいう厚肉とは、0.50 in. (13 mm) 以上の厚さである。

3 DMWを設ける位置

DMWを設ける位置については、二次システム荷重の影響を必要最小限にする必要があるため、次の点に留意する必要がある。

- (a) DMWは、部品が十分な可撓性を有する位置に設け、拘束度の高い位置に設けてはならない。
- (b) DMWは、局部の熱サイクル源から離れた位置に設ける。

(a)は、レストレイントやアタッチメントを取り付ける箇所、天井貫通部近傍等、機器が固定される位置の近傍にDMWを設けることを禁止しており、EPRIの技術レポートによれば、それら拘束される位置から4 ft. (1220 mm) 以上離れた位置に設けることを推奨している。また、二次応力の増大を防ぐ目的で、管寄せなどの大型構造物の近傍にDMWを設けることは不適切であり、たとえば管寄せとスタブの溶接、スタブとチューブの溶接、出口管寄せとパイプの溶接、パイプとタービン止め弁の溶接などにDMWを適用してはならないとしている。

(b)は、スートブロー、過熱低減器などの急激な熱変動を起こし得る機器の近傍を避けることを推奨している。熱疲労による影響を低減する目的で、これらから十分に離れた位置にDMWを設ける必要がある。

以上の他、水平方向に配置されたチューブやパイプのDMWは、曲げまたはラチェットの影響を受けるため、鉛直方向に配置されたチューブやパイプにDMWを設けることが推奨される。

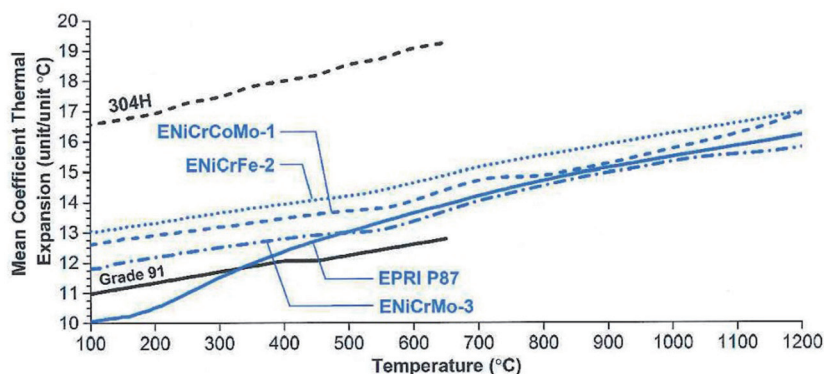


図1 Grade 91と一般的なNi基の溶接材料の平均熱膨張率の差 (出典：EPRIの技術レポート^[1])

4 溶接材料

9%Cr タイプの CSEF 鋼とオーステナイト系ステンレス鋼を接続する DMW の溶接材料については、2 で述べたとおり Ni 基の合金が望ましい。溶加材の場合、AWS の区分では ERNiCr-3 (JIS Z 3334 Ni6082 相当) 及び ERNiFeCr-4 (ASME Code Case 2733) 等が推奨される。また、溶接棒としては、ENiCrFe-3 (JIS Z 3224 Ni6182 相当)、ENiCrFe-2、そして ENiFeCr-4 (ASME Code Case 2734) が推奨される。

一方、ERNiCrMo-3 (JIS Z 3334 Ni6625 相当)、ENiCrMo-3、ERNiCrCoMo-1 (JIS Z 3334 Ni6617 相当)、ENiCrCoMo-1 (JIS Z 3224 Ni6117 相当) については、図 2 に示すように、CSEF 鋼または低合金鋼の溶接後熱処理 (PWHT) に加えて、600°C 前後の運転温度 (5 万時間相当) に曝された時、融合線近傍に炭化物、ラーベス相、 σ 相、 μ 相、 δ 相等の脆化組織が生成される可能性が高く、急速に割れが成長するリスクを増大させるため、これらを使用すべきでないとしている。

なお、図 2 に示す EPRI P87 は、EPRI が開発した溶接材料であり、AWS における溶接棒の区分は ENiFeCr-4 である。

5 トランジションピース

CSEF 鋼と AS 鋼は、熱膨張率が異なるだけでなく、高温強度特性が異なるため、同じ設計温度でも厚さが異なる (一般に AS 鋼の部品の方が薄い)。このため、CSEF 鋼製の部品と AS 鋼製の部品を接続

する場合には、両者の間に熱膨張率の移行部、または厚さの移行部を設ける目的で、トランジションピースが用いられる。

トランジションピースには、一般に、Ni 基の合金または AS 鋼が用いられるが、CSEF 鋼に対する PWHT の温度範囲において鋭敏化が生じにくい材料を選定する必要がある。800 合金、800H 合金及び 617 合金は、CSEF 鋼の PWHT 温度での鋭敏化の問題はないが、使用するべきではないとしている。800 合金及び 800H 合金は、供用中に炭化物の粒界析出により粒界脆化を起こす傾向があり、617 合金も、時効硬化の問題があるためである。同様に、625 合金も約 600°C 以上の温度に長時間曝されると、著しく脆化する傾向があるため、使用するべきでないとしている。

6 溶接部の寸法形状

EPRI の技術レポートが推奨する継手の寸法形状を図 3 に示す。図からもわかるように、基本的に次の①または②を満足する開先形状を適用することが推奨されている。

- ① CSEF 鋼側に大きなベベル角度を設けるか、または幅広の溶接キャップを設ける。(薄肉の場合)
- ② 幅広の溶接キャップを有するステップ状の開先を適用する。ステップは、厚さの 1/2 の位置に設ける。(厚肉の場合)

供用中の機器の損傷がクリープ支配の場合、損傷は HAZ に集中する。一方、溶接部の融合線近傍は、酸化ノッチが発生する傾向がある。推奨例は、酸化ノッチとクリープ損傷の相乗効果を避ける目的で、

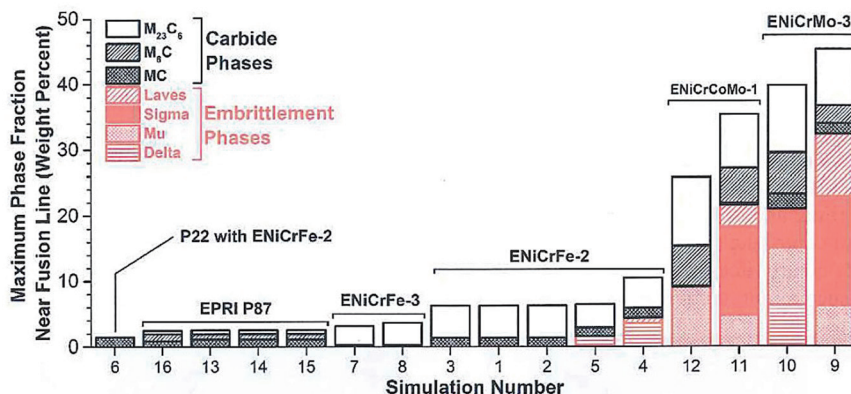


図2 フェライト鋼と一般的なニッケル基の溶接金属の間の融合線における炭化物及び脆化相の生成に対する成分の影響 (出典: EPRIの技術レポート^[1])

両者を遠ざけることを意図したものであり、EPRIの技術レポートによると、ウェルドキャップの幅は、当初の融合線の幅より 0.50 in. (13 mm) 以上広くすることを推奨している。また、ステップ状の開先形状は、融合線近傍に発生する割れが HAZ に沿って厚さ方向へ進展するのを抑制する効果が期待できるとしている。

裏あて金に関しては、特に使用することを禁止していない。しかし、熱疲労のリスクがある運転モードに対しては、内径面に現れる局部応力集中を避けるために、裏あて金を使用しない方が望ましい。また、継手部の内径面を合わせるためにシンニング加工 (counterboring) を行う場合は、融合線での応力の増大を防ぐ目的で、形状変化部を融合線より 0.50 in. (13 mm) 以上ずらすことを推奨している。

7 溶接テクニック

溶接テクニックについては、CSEF 鋼の HAZ における過度のフェライト生成を防ぐために、入熱制限、または最低ビード数 (または層数) を設けて溶着量を制限する方法が推奨される。これらは、溶接部の冷却速度が過度に遅くなるのを防ぐことが目的であり、パス間温度による管理では十分でないとしている。

各溶接パスについては、ストリンガービードを適用する。また、溶接キャップの最終層については、溶接幅の外側から溶接を行い、最終ビードが Ni 基

の溶接部中央になる (最終ビードを融合線上に置かない) シーケンスを適用することが推奨される。

8 溶接部の仕上げ

溶接後、余盛部を除去すると共に、可能な場合は、ルート部の過度な溶込み (過剰な裏波) を除去することが推奨される。

これは、供用中の熱疲労損傷の原因となる応力集中部を排除するだけでなく、酸化ノッチの発生を遅らせる効果を期待したものである。さらに、供用中の超音波探傷試験による検査を容易にする利点もある。

9 アタッチメントの溶接

EPRI の技術レポートは、耐圧部分に取り付けられたアタッチメントの溶接部の損傷事例を考慮して、ステンレス製のラグまたはハンガーを CSEF 鋼製の配管または管寄せに溶接で取り付けることを禁止している。

アタッチメントは高温のガスに触れるが、接続される配管または管寄せとの熱伝導により冷却される傾向にあり、アタッチメントを十分に厚くし、完全溶込み溶接で十分な寸法のすみ肉溶接を行えば、ステンレス鋼を用いなくても酸化は問題にならないとしている。

チューブに取り付けるアタッチメントについては、従来の低合金鋼チューブの場合、母材と同様の化学成分で強度の劣る溶接材料 (アンダーマッチング) を用いる方法が適用されてきた。これは、損傷箇所を圧力バウンダリーから離れた位置に移すと共に、補修を容易にするという点で CSEF 鋼チューブの場合にも有効である。ただし、溶接部の寿命における改善は望めない。

アタッチメントを溶接でチューブに取り付ける場合には、入熱制限を行う必要がある。しかし、チューブが薄肉の場合は、HAZ のチューブの厚さ方向への広がりを抑制するのに十分ではない。このため、アタッチメントを溶接する箇所には厚い部材を用いるか、または機械接合を用いることが推奨される。また、運転

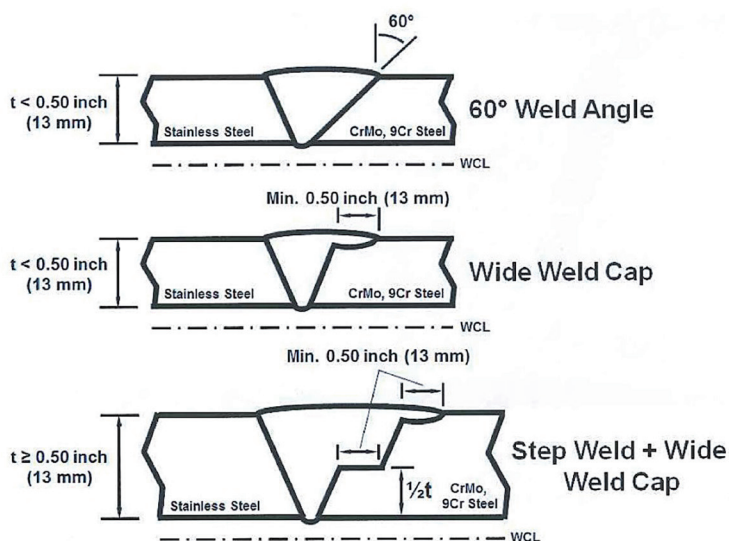


図3 ステンレス鋼とCr-Mo鋼またはCSEF鋼のDMWの継手設計に関する推奨例 (出典: EPRIの技術レポート^[5])

中のアタッチメントはチューブよりも高温になり、熱がアタッチメントからチューブに伝導するが、溶接部に溶接欠陥または不十分な溶け込み箇所が存在すると、当該箇所温度が上昇し、局部的に大きな熱応力が発生して早期損傷のリスクを増大させるという問題がある。このため、アタッチメントの溶接についても、完全溶け込み溶接を行うことが推奨される。

10 その他の推奨事項

ボイラーシステムに設けられる機器の取り付けに対する推奨事項を以下に記す。

- (a) CSEF 鋼の配管に取り付けるサーモウェルの溶接部の場合、Ni 基の溶接金属と CSEF 鋼の融合線に沿って割れが生じやすい。このため、CSEF 鋼の配管に取り付けるサーモウェルについては、AS 鋼製のものを禁止し、配管と同一の材料にすることが推奨される。
- (b) CSEF 鋼製配管に AS 鋼製フローエレメントを取付ける DMW において、損傷が繰り返し発生している。このため、CSEF 鋼製配管に取り付けるフローエレメントについては、ステンレス鋼製のものを禁止し、配管と同一の材料にすることが推奨される。
- (c) CSEF 鋼製配管に AS 鋼製ドレンラインを設けた場合、ドレンラインの厚肉部分またはその近傍に損傷が発生することが報告されている。このため、主配管部品から十分に離れており、十分に可撓性を有する位置に DMW を設けることが推奨される。損傷が発生した場合は、AS 鋼製ドレンラインを撤去し、DMW を設けてはならない。

11 ガイドライン

参考として、ASME Section I 2019 Edition に Nonmandatory Appendix として与えられる DMW の設計ガイドラインは、次のような構成であり、上述の 2 で述べた問題点、及び 3 から 10 に掲げた推奨事項が簡潔に記載される予定である。

- 1 項 序論
- 2 項 設計及び製造に関する推奨事項
- 3 項 製造

- 4 項 DMW に関する代替の溶接寸法
- 5 項 溶接テクニック
- 6 項 溶接後熱処理
- 7 項 溶接部の仕上げ
- 8 項 チューブとチューブの突合せ溶接
- 9 項 厚い部分の溶接部
- 10 項 パイプ及び管寄せの付着物
- 11 項 チューブの付着物
- 12 項 サーモウェル
- 13 項 蒸気フローエレメント
- 14 項 ドレンライン
- 15 項 製造後の管理・モニタリング

12 おわりに

ASME がリードして行われた DMW の調査研究は、1970 年代から行われており、ここで紹介した DMW に関する設計ガイドラインも在来の Cr-Mo 系低合金鋼と AS 鋼の DMW に関する調査研究がベースになっている。

ASME Section I 2019 Edition に与えられる予定の DMW に関する設計ガイドラインは、CSEF 鋼と AS 鋼を溶接する DMW のために与えられる予定であるが、在来の Cr-Mo 系低合金鋼と AS 鋼の DMW にも適用できる内容であるため、700°C 超級の高効率ボイラーシステムだけでなく、在来のボイラーシステムの補修や改造においても参考にして頂ければ幸いである。

参考文献

- [1] EPRI Project Manager: J. Siefert, J. Parker
 “Program on Technology Innovation: Guidelines and Specifications for High Reliability Fossil Power Plants - Best Practice Guideline for Manufacturing and Construction of Grade 91 Steel to Austenitic Stainless Steels Dissimilar Metal Welds, Final Report, Dec. 2017 (EPRI Technical Report No. 3002007221)”



大石 勇一

JIS 材とEN 材の違いに関する降伏比を指標とした一考察

A consideration from the perspective of yield ratio on the difference in material properties specified in JIS and EN standards.

規格基準室 長谷川 忠之

In Japan, there are some engineers recognizing that the strength of EN standard materials may be higher than that of JIS materials. However, there are few persons who examine the differences between the material properties specified in JIS and EN Standards. The differences between two standards from the perspective of yield ratio are examined in this review. As a result, it is suggested that one of the reason on above recognizing is clearly to define the material with high strength by detail and strict specifications of materials.

Keywords JIS, EN standards, Yield ratio

1 はじめに

構造物は、いわゆる安全率や安全係数といった破壊に対する裕度（以下、ISO の例に倣い、設計マージンまたは DM という）を考慮して設計されることが通常である。どのような指標に対して DM を考慮するかは構造物がクリープ温度領域で使用されるか否かによって異なるが、非クリープ温度領域では引張強さや降伏点または耐力（以下、降伏強さという）といった引張特性がその指標となる。

引張特性を DM の指標とする考え方は、国内外の規格基準でも一般的に採用されているが、その値は規格や基準ごとに異なっている。例えば、『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、非クリープ温度領域の許容引張応力（以下、S 値という）は引張強さの $1/3.5$ または降伏強さの $1/1.5$ のうちのいずれか小さい値とすることを基本としている。この時の 3.5 あるいは 1.5 が DM の値である。一方、ASME Section VIII-2 や EN12952-3 は、引張強さの DM を 2.4 として定めた S 値を用い

る設計が可能となっている。

弾性設計において DM2.4 を可能とする 1 つの要件として、降伏強さを高めた材料を適用することが挙げられる。この点に関連していえば、EN 規格で規定されている材料（以下、EN 材という）は降伏強さが他の規格材に比べて相対的に高いものも散見されるため、「一般的に EN 材は高強度である」という認識も存在する。しかし、このような観点から材料の強度比較を行った検討例はほとんどない。また、我が国では、国内で製造される機器・設備を製造する際には基本的に JIS で規定されている材料（以下、JIS 材という）が用いられており、輸入品を除き、EN 規格で設計された発電用火力設備の設計事例はほぼ皆無であるため、EN 規格で設計された機器に用いられている材料に関する実用的情報は必ずしも十分ではない。

このような背景の下、EN 規格材と JIS 材の違いについて降伏比の観点から簡易的な検討を行った。

なお、本稿では両規格材の比較として例示する材料については、いわゆる“Equivalent”ではなく、

特性が似ているまたは近い“Comparable”な材料(以下、類似材という)として取り扱うこととした。

2 降伏比について

材料強度を検討する上での1つの指標として、降伏比という考え方がある。降伏比とは、材料の降伏強さと引張強さの比を表すものであり、次式で定義される。

$$R = \frac{S_y}{S_u} \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

R: 降伏比 S_u : 引張強さ S_y : 降伏強さ

先に述べたように、火技解釈では非クリープ温度領域におけるS値は引張強さの1/3.5または降伏強さの1/1.5のうちのいずれか小さい値とすることを基本としているが、これを一般化すると次のように表される。

$$S = \text{Min.} \left[\frac{S_u}{\alpha}, \frac{S_y}{\beta} \right] \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

S: 許容引張応力 S_u : 引張強さ S_y : 降伏強さ
 α, β : 設計マージン

ここで、式(1)と式(2)よりRを次のように整理し直す。

$$R = \frac{S_y}{S_u} = \frac{\beta}{\alpha} \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

これにより、降伏比がDMの比と等価と見なすことで、S値が引張強さまたは降伏強さのいずれによって決まるのかが分かる。すなわち、式(3)を

$$R \leq \frac{\beta}{\alpha} \dots\dots\dots \text{式(4)}$$

と置き替えると、Rが式(4)を満たす場合、許容引張応力は降伏強さによって決まる。

ここで、国内外の諸規格・基準では、降伏強さに対するDMは1.5という値を設定している。これは、いわゆるDesign by Ruleにおいては弾性設計を基本としていることによる。そこで、降伏強さのDMを1.5とし、引張強さで決まるS値と降伏強さで決

まるS値が等しいと仮定すると式(2)及び式(3)より式(5)が得られ、Rが式(5)を満たす場合にはS値は降伏強さによって決まる。

$$R \leq \frac{1.5}{DM_u} \dots\dots\dots \text{式(5)}$$

DM_u : 引張強さのDM

表1に式(5)に基づく DM_u とRの関係の一例を示す。例えば、火技解釈のようにDM3.5であれば $R \leq 0.43$ 、EN規格のようにDM2.4の場合には $R \leq 0.63$ の場合に、それぞれS値が降伏強さによって決まる。

表1 DM_u とRの関係

DM_u	R
2.0	0.75
2.4	0.63
3.0	0.50
3.5	0.43
4.0	0.38
5.0	0.30

このような考え方は、降伏比と安全裕度との関係において物理的現象を説明するものではないが、例えば、設計上の裕度を検討する際の目安とするなど、使い方によっては実務で有効となり得る。

火技解釈で適用可能であるJIS材料に関する降伏比の一例を図1に示す。図中の点線は、引張特性の値に応じた降伏比の値を示している。図中の材料の中には材料記号ごとにいくつかの強度区分に分類されているものもあるが、この点は区別せずにまとめて図示している。ただし、SM材については板厚区分に応じた分類も規格で定められているため、材料記号ごとに図示している。

また、ステンレス鋼は、金属組織ごと(A:Austenite, F:Ferrite, AF:Austenite-Ferrite, M:Martensite)にいくつかの代表的な鋼種の降伏比を図示している。

図を見ると、機械構造用合金鋼の一部ではRが0.9を超える材料もあるが、フェライト系の材料は概ね $R=0.4\sim 0.8$ となる。このような傾向は、図以外のフェライト系JIS材も同じである。一方、オーステナイト系の材料については、例えばSUS304では規定の

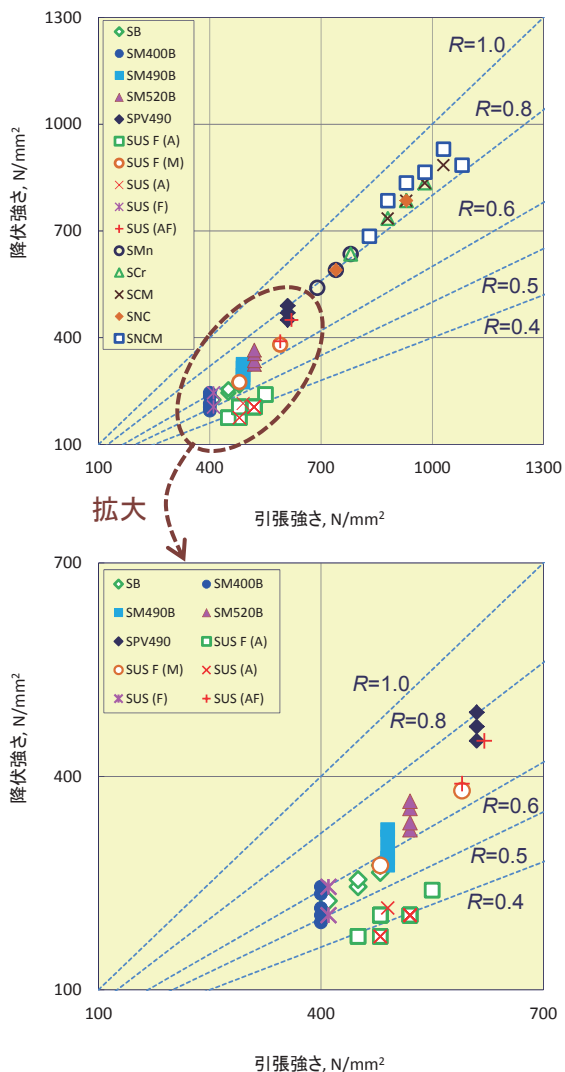


図1 JIS材の降伏比の一例

引張強さが 520N/mm^2 であるのに対して、0.2% 耐力が 205N/mm^2 と低いため、 R が 0.4 以下の値となっている。これは、SUS304 の結晶構造が FCC であるため、フェライト系の BCC と比べて転位が移動しやすい構造であることから理解される。

3 材料の比較検討と考察^[1-3]

いくつかの材料の降伏比に関する比較を例に、JIS 材と EN 材の違いを検討した。両材料規格では引張強さ S_u は上限値及び下限値によって規定されているが、降伏比 R を算出する際は下限値を用いた（上限値を用いて算出した場合は降伏比の値自体は変わるが傾向は変わらない）。

(1) SB480 と P355GH の降伏比

材料比較の一例として、JIS G 3103 SB480 と

EN 10028-2 P355GH の降伏比を図 2 に示す。規格上、SB480 は添加元素量が板厚区分に応じてわずかに異なるが、引張強さや降伏強さの規定値については違いがない。一方、P355GH は SB480 とは逆に、板厚区分に応じて添加元素量に違いはないが、引張強さや降伏強さの規定値は異なっている。そのため、大まかな比較であるが、 R の値は SB480 の 0.55 に対して P355GH は板厚に応じて 0.59~0.69 の範囲にある。仮に引張強さの規定範囲を考慮して R を計算しても、SB480 は $R=0.41\sim0.55$ 、P355GH は $R=0.44\sim0.69$ となり、相対的に R の値は SB480 に比べて P355GH の方がやや大きくなる。弾性設計の範囲では降伏比の大きい材料の方が高強度材と考えれば、この場合の例では P355GH の方が高強度材といえる。

(2) 化学成分の影響について

表 2 に SB480 と P355GH の化学成分を示す。SB480 の参照材である ASTM A515 Grade70 も参考に併記している。SB480 と P355GH の特徴的な違いは、C と Mn の量であり、両材料で添加量がオーバーラップする範囲にはない。C 量を比較すると P355GH の 0.10~0.22wt% に対して SB480 は板厚区分に応じた上限値として 0.31~0.35% の範囲で規定されており、一方で Mn 量は P355GH の 1.10~1.70wt% に対して SB480 は上限が 0.98wt% と規定されている。

C 及び Mn 量の違いが降伏強さへ与える影響について、例えば次のように考えることができる。C は

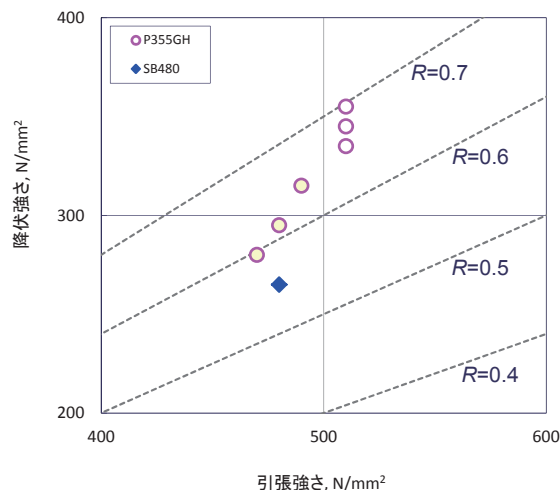


図2 SB480とP355GHの降伏比の比較

表2 化学成分の比較 (SB480は各板厚区分を包含して表示)

Elements	SB480	P355GH	ASTM A515 Grade 70
C	0.31 to 0.35	0.10 to 0.22	0.31 to 0.35
Si ^{*1}	0.15 to 0.40 (HA) 0.13 to 0.45 (PA)	Max. 0.60	0.15 to 0.40 (HA) 0.13 to 0.45 (PA)
Mn ^{*1}	Max. 0.90 (HA) Max. 0.98 (PA)	1.10 to 1.70	Max. 1.20 (HA) Max. 1.30 (PA)
P,max	0.020	0.025	0.025
S,max	0.020	0.010	0.025
Al _{total}	—	Min. 0.02	—
N	—	Max. 0.012 ^{*2}	—
Cr	—	Max. 0.30	—
Cu	—	Max. 0.30	—
Mo	—	Max. 0.08	—
Nb	—	Max. 0.040	—
Ni	—	Max. 0.30	—
Ti,max	—	0.03	—
V	—	Max. 0.32	—
Note		Cr+Cu+Mo+Ni < 0.70	

^{*1} HA : 溶鋼分析値 PA : 製品分析値 ^{*2} Al/N ≥ 2

Fe の結晶構造において侵入型元素となるが、添加量が増えるとパーライト形成に寄与する割合が多くなるため、転位運動の妨げとなる母相中のCの固溶量が減少するとともに、炭化物が粗大化することによって結果的に降伏強さが低くなる。一方、Mnは置換型の固溶元素であり、母相中にあまり金属間化合物を作らない。若松によれば^[4]、いくつかの炭素鋼及び低合金鋼について母相中のMnの固溶量とMn化合物の量を比較すると、図3に示すように、添加されたMnのおよそ80~90%は母相中に固溶し、残りは化合物の形成に費やされるとする結果が示さ

れている。そのため、Mn添加量の増加に伴って転位移動の妨げとしての効果が高まり、結果として降伏強さが上昇すると考えられる。このように、添加元素と転位運動の関係で考えると、SB480とP355GHの降伏強さが異なる理由に対する一定の理解が得られる。

また、P355GHはC、Si、Mn、P及びSの、いわゆる主要5元素以外の添加元素についても厳密に添加量を規定しており、主要5元素以外の添加元素の量が降伏強さを始めとする引張特性に影響を与えていることも考えられる。

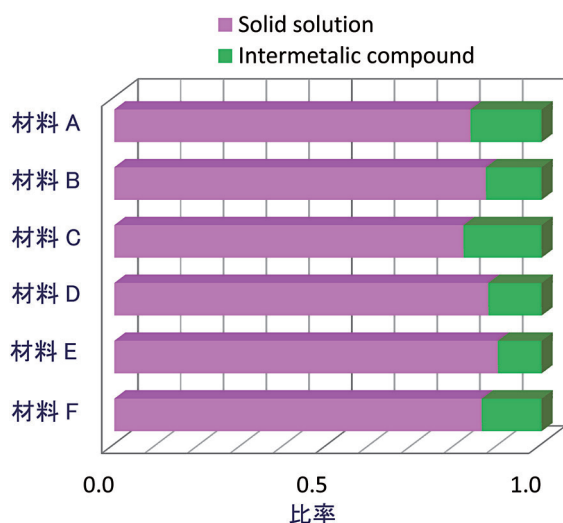


図3 炭素鋼及び低合金鋼中における Mn の母相固溶量と化合物形成量の割合

(3) 板厚区分の有無の違いについて

ここまでの考察の中で板厚区分について何度か言及したが、ここでは板厚区分の有無の違いについて検討する。

一例として、JIS G 4109 SCM V2-2 と EN 10028-2 13CrMo4-5 の降伏比を図4に示す。図から明らかのように、SCM V2-2は引張特性に基づく板厚区分はない。一方、13CrMo4-5は板厚に応じて5つに区分され、各区分で熱処理と引張特性の条件が与えられている。この場合、Rの値が小さいほど板厚が厚い区分となる。

先に述べたSB480の場合はRの値がP355GHに比べて低い値であったが、SCM V2-2のRの値は

13CrMo4-5 の中間の厚さ区分とほぼ同じ 0.61 である。この厚さ区分の熱処理条件は NT (焼ならし (N) 焼戻し (T)) であるが、SCMV2-2 も NT を熱処理条件としており、いわゆる受け入れ材としての熱処理条件は同じである。ただし、規格上は SCMV2-2 の方が N の温度範囲がやや広く、T については 13CrMo4-5 が温度範囲を指定しているのに対して、SCMV2-2 は下限温度のみ規定している。

同様の検討例として、SCMV4-2 と 10CrMo9-10、11CrMo9-10 及び 12CrMo9-10 の降伏比の比較を図 5 に示す。

SCMV4-2 は SCMV2-2 と同様に板厚区分はない。一方、13CrMo4-5 は板厚区分に応じて 5 つに区分され、また 11CrMo9-10 は熱処理が NT の場合が 2 つに区分されているが、QT (焼入れ (Q) 焼戻し (T)) 及び QL (液体 (L) 焼入れ焼戻し (Q)) の場合は板厚区分の規定はない。

10CrMo9-10 と比較した場合、SCMV4-2 の R の値は SCMV2-2 と同様、中間の厚さ区分とほぼ同じ値となる。この場合の熱処理条件は SCMV4-2 が NT、10CrMo9-10 が NT 又は QT となっている。

11CrMo9-10 との R の値の比較では、NT 材及び QL 材とでほぼ同じ値となっており、QT 材はやや大きな値となっている。

また、12CrMo9-10 との R の値の比較では、熱処理条件はいずれも NT であるが、12CrMo9-10 の方がやや大きな値となっている。

このように見ていくと、特徴的な点があること

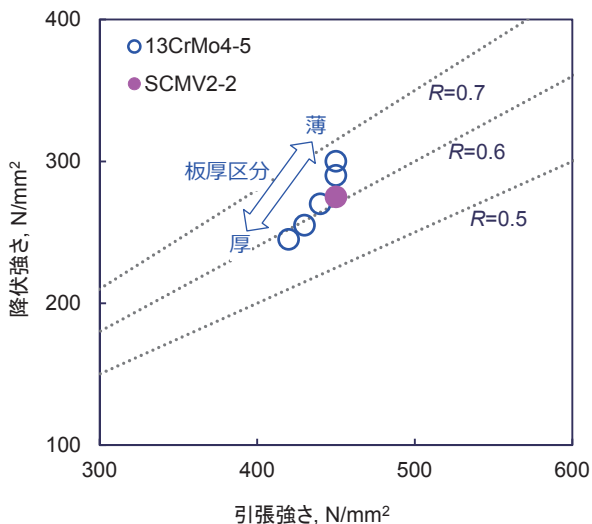


図4 SCMV2-2と13CrMo4-5の降伏比の比較

が分かる。先の SB480 と P355GH の比較についても同様であるが、EN 規格は同一の材料の中で板厚区分に応じて引張特性の要件を変えている場合が多い。JIS でも板厚区分に応じて引張特性の要件を変えている材料もあるが、相対的には EN 規格の方がより多くの材料に対して詳細に規定しているといえる。本検討で例示した材料の場合、JIS 材の降伏比の値は中間の板厚区分の EN 材と概ね一致する結果となったが、このような結果となる傾向は他の材料を比較した場合でも同様であると思われる。また、SCMV4-2 に対して EN 規格では 3 つの類似材が存在するように、JIS の「種類の記号」で識別されている材料に対する類似材が EN 規格では複数存在する。これは、EN 規格が DM2.4 の設計や Design by Analysis に対応させるために材料仕様を詳細に区分したことに加え、EU 各国で元々存在していた国内規格との整合性の観点から、同程度の仕様・性能を有する各国の材料を等しく適用できるようにするため、1 つの規格の中に類似の仕様・性能の材料をまとめたためではないかと考えられる。

以上の点から、EN 材が一般的に高強度材であるというよりも、規定の厳密化によって高強度の材料が明確化されていることが、「一般的に EN 材は高強度である」という認識に影響を与えているのではないかと推察される。

4 終わりに

本稿では、降伏比に着眼した JIS 材と EN 材の比較・

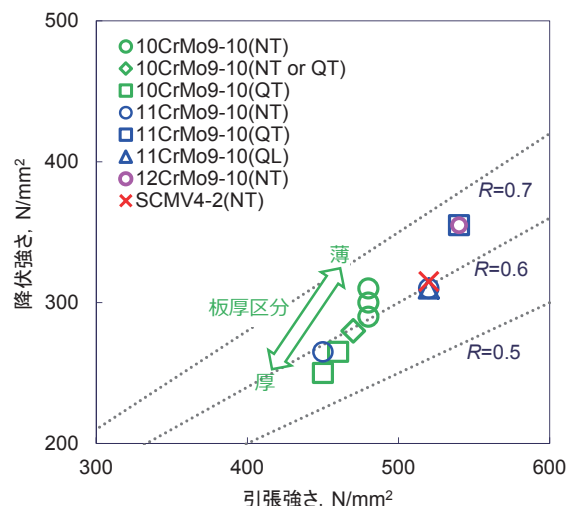


図5 SCMV4-2と10CrMo9-10、11CrMo9-10及び12CrMo9-10との降伏比の比較

検討の例を紹介した。異なる規格の材料同士の同等性については、古くから議論されている課題である。国内規格で製造された材料を国内で使用する場合にはさほど問題とはならないが、輸入材を国内で使用するあるいは国内材を海外で使用する場合、材料の同等性は常に懸念事項となりうる。

材料のユーザーは、目的の材料の特性や特徴が規格に合致していることを把握することはもちろんのことであるが、材料の基本的な特性に関する知見を深めることはグローバル化の時代において競争力を保つ1つの手段となる。

参考文献

- [1] Handbook of Comparative World Steel Standards, 4th Edition, ASTM
- [2] JISハンドブック 2017, ②鉄鋼Ⅱ (棒・形・板・帯 / 鋼管 / 線・二次製品) .
- [3] 金属材料データブック, 改訂 5 版, 日本規格協会 .
- [4] 若松茂雄, “炭素鋼および低合金鋼中のマンガンの状態分析”, 鉄と鋼, 第 58 年 (1972), 第 10 号, 1485-1494.



長谷川忠之

超音波探傷試験のシミュレーション解析技術の紹介 ～仮想空間での訓練シミュレータ開発に向けて～

溶接・非破壊検査技術センター 古川 敬

1 はじめに

溶接・接合等で組み立てられた構造物の構造健全性の評価では、非破壊試験・検査の担う役割が重要なことは言うまでもない。超音波を用いる非破壊試験・検査手法である超音波探傷試験では、超音波すなわち弾性波動の発生、伝搬（反射や屈折）、受信といった物理現象を利用しており、超音波探傷試験にも計算力学に基づくシミュレーション手法が活用されている。

超音波探傷試験のシミュレーション技術には、解析精度と解析速度の兼ね合いで複数の種類が存在するが、当センターでは、解析時間はかかるものの超音波の伝搬を弾性波動問題として扱い高精度で解析する有限要素法による手法と、超音波を光線とみなす近似解法でリアルタイムな高速計算をする手法を目的に応じて使い分けている¹⁾。

具体的には、超音波探傷試験条件の事前検討（例えば超音波の屈折角や探触子の走査範囲の検討、フェーズドアレイ法の場合は超音波ビームの振り角や入射位置等の検討）では、種々の項目を速く把握することが重要となるため、リアルタイムな解析法を用いることが多い。一方、欠陥の検出性を事前に予測・評価する場合や探傷試験条件の妥当性を評価する場合には、厳密な高精度解析手法を用いることが多い。

2 シミュレーション解析技術

高精度な解析手法の一つである有限要素法（FEM）によるシミュレーションでは、超音波探触子と試験部の形状のモデルを計算機のメモリ空間内に構築し、超音波の入射波形や材料の弾性定数および密度

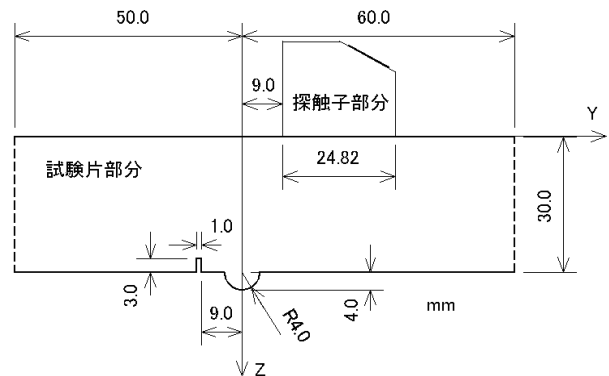
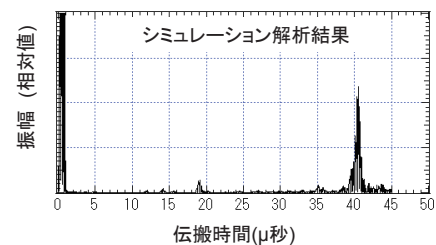
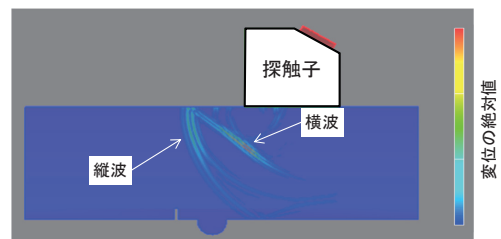


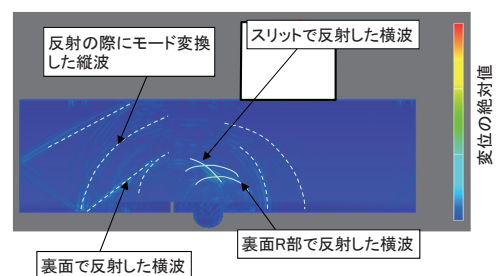
図1 解析モデルの寸法及び探触子位置



(a) 探傷波形のシミュレーション解析結果



(b)送信後約12μ秒の波面



(c)送信後約25μ秒の波面

図2 シミュレーション解析による探傷波形及び波面の観察結果

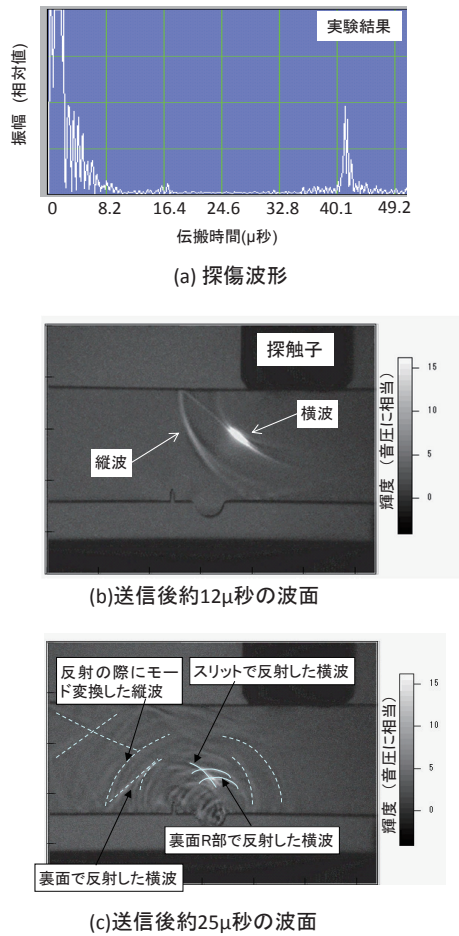


図3 検証実験による探傷波形及び波面の観察結果

を設定して計算することで、探傷試験の主要な物理現象を計算機内で再現し探傷波形等を出力することができる。図1はシミュレーション解析精度を検証するために用いた解析モデルの形状・寸法の例である。検証実験には、図1と同形状・寸法の耐熱ガラス製の試験片を使用した。耐熱ガラス製の試験片を用いた理由は、試験片内を伝搬する超音波の様子についても光弾性可視化法²⁾で観察し、シミュレーション解析結果と比較検証するためである。

図2にはシミュレーション解析結果を、図3には検証実験の結果を示す。各々図(a)は探傷波形、図(b)および(c)は超音波の伝搬状況の波面であり、探傷波形および超音波の波面ともに実験結果と同様のシミュレーション解析結果が得られていることが確認できる³⁾。

3 UT訓練シミュレータ開発に向けた取り組み

前述のシミュレーション解析では、探触子の位置は1ヵ所での結果である。現状ではこの解析におい

ても数分程度の時間がかかってしまう。一方、実際の探傷試験では探触子を前後左右に走査している。また、フェーズドアレイ法のセクター走査では超音波ビームの角度を変えた走査をしている。現時点ではこれらの大量の計算を瞬時に行うことは不可能であるため、ここではあらかじめ各探触子位置あるいは超音波ビームの角度における探傷波形の解析結果を蓄積しておき、解析済みのデータを再生するシミュレータとする。

試験体のモデルは、図面やCADデータを基に入力することもできるが実際の溶接ビードの形状をモデル化する方法の一つとして3Dスキャナを用いて溶接部継手の外面形状を取り込んだ例を図4に示す。

金属組織のモデルは、一般的なフェライト系鋼であれば母材も溶接金属部も等方均質体としてモデル化できるが、圧延鋼板やオーステナイト系溶接金属部のような集合組織の場合は、金属組織に応じたモデル化を行うことが重要となる。図5には、オーステナイト系の突合せ溶接金属の組織をモデル化した例を示す⁴⁾。このような不均一な柱状晶組織を設定することで柱状晶に起因する“ノイズ”を再現することができ、ノイズと欠陥との識別の訓練に活用できると考える。

欠陥のモデルについては、欠陥の発生が想定される任意の位置に任意の形状・寸法で設定することができる。ただし、欠陥の性状により図6⁵⁾に示す様に欠陥寸法とエコー高さの関係は変動するため、欠陥部のモデル化については反射率を変えるなどの工夫が重要である。

最後に訓練用のツールを紹介する。シミュレー

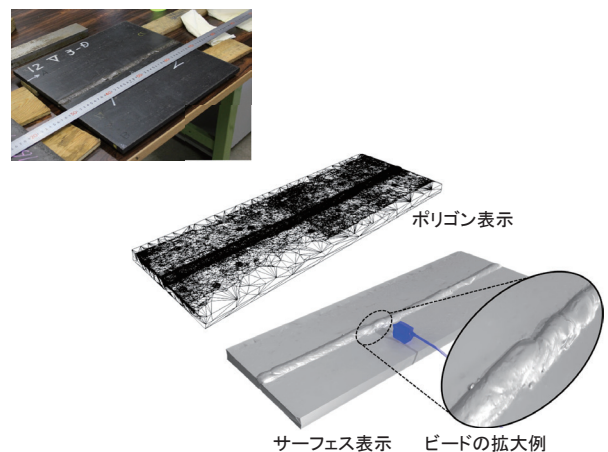


図4 平板突合せ溶接試験体と3Dモデルの例

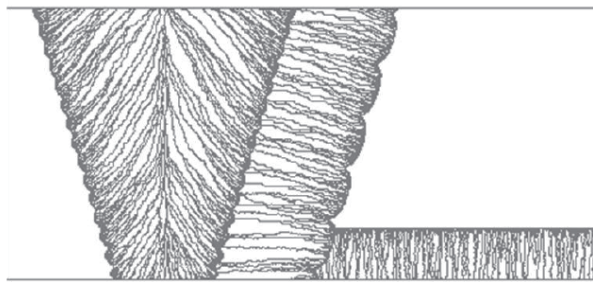
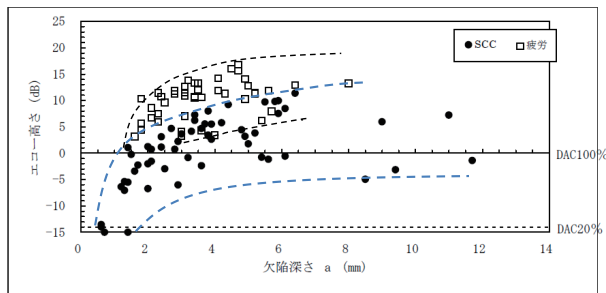


図5 オーステナイト系溶接金属組織モデルの例



注) エコー高さは最大エコー高さの平均値で示す。

図6 横波45°斜角法による疲労き裂とSCCに対するきず高さエコー高さの関係⁵⁾

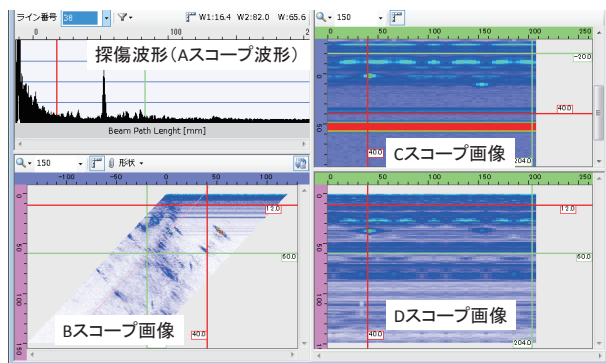


図7 自動UT訓練を想定した表示例

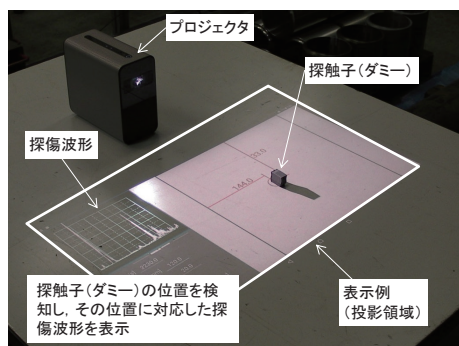


図8 手動UT訓練を想定した表示例

レータが成立すると考えられる。図7は自動探傷をイメージして表示した例であり、B、C、Dスコープ表示とともにカーソルで探触子位置を変えて探傷波形を表示する。図8は手動探傷をイメージした表示例であり、タッチ操作センサが組み込まれたプロジェクタを用い、タッチ操作センサで検知した位置に対応して探触子位置の座標と再生した波形を同時にプロジェクタで表示した例である。また、タブレット上に表示することも検討している。今後は、訓練の狙いに応じて探触子の押し付け方や探傷の姿勢の再現なども検討する予定である。

4 おわりに

超音波探傷試験のシミュレーション解析技術の活用例の一つとして、超音波探傷試験の訓練に活用する取り組みを紹介した。シミュレーション解析で作成したデータは、欠陥の位置および寸法（真の値すなわち“正解”）がわかっており、今後のシミュレーション解析技術の進歩によっては、訓練だけでなく技量確認にも活用できる可能性が期待できると考える。本検討をさらに進め、超音波探傷技術者の技量向上に貢献できるようにしていきたい。

参考文献

- 1) 上山, 古川: フェーズドアレイ探傷計画検討におけるシミュレーションツールの活用, 非破壊検査, 67(2), 2018, p.64
- 2) 伊達一博, 島田平八, 固体内超音波の光弾性可視化法による定量評価, 非破壊検査, 36(9), 1987, p.605
- 3) 古村, 古川, 関野: 光弾性可視化法による超音波探傷シミュレーションソフトウェアの検証, 発電技検技術レビュー Vol.3, 2007, p.9
- 4) R. Mizuno et al.: Modeling of columnar crystal structure in austenitic weld metal for UT wave propagation simulation, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.8, No.2, NT79
- 5) 独立行政法人原子力安全基盤機構 平成16年度原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書 (超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの) 総括版 平成17年4月, p.704

シミュレーション解析で得られた前後・左右走査の探傷波形（あるいはセクター走査の探傷波形）を探触子位置に対応させて表示・再生すれば、仮想空間での訓練シミュ

研修センターが提供する 溶接・非破壊検査技術研修の紹介

研修センター 牧原 善次、松田 誠司、平澤 泰治、小林 輝男

1 はじめに

当協会の溶接・非破壊検査技術センター（NDEセンター）では、前身の鶴見試験研究センターの時代を含めて発電設備の安全運転への貢献を方針として材料、溶接、非破壊検査技術に関する調査研究及び成果の発信を行ってきた。このうち、非破壊検査技術に係わる主な活動実績を以下に列記する。

- ①国際研究調査への参画及び窓口業務
- ②超音波探傷試験規程（JEAC 4207）への情報発信
- ③改良型超音波探傷試験（超音波による欠陥深さ測定方法）確立への情報発信及び支援
- ④超音波探傷試験の性能実証制度（NDIS 0603）制改訂に向けた情報発信及び支援
- ⑤実機（BWR 再循環系配管）超音波探傷試験結果の評価支援（第三者評価）
- ⑥新非破壊検査技術の確性試験，検査システムの性能確認
- ⑦原子力規制委員会検討チーム外部専門家（維持規格等）

このように長年培った経験，実績を活かして，平成16（2004）年から発電設備に係わる溶接・非破壊検査技術研修の提供を始めた。現在は，NDEセンターを構成する管理グループ，研究グループ及び研修セ

ンターの3つのグループの連携によって，表1に示すように従来の業務に発電設備以外へ業務を加えて活動範囲を広げつつある。

ここでは，研修センターを中心にして取り組んでいる溶接・非破壊検査技術研修について紹介する。

2 溶接・非破壊検査技術研修の取り組み

2.1 技術研修の目的

電気を供給する発電設備を適切に管理することは，日々安心して生活を送る上で，また，経済基盤を支える上で極めて重要である。適切に管理する一手法として非破壊検査があげられ，信頼性の高い非破壊検査の実行が求められる。信頼性の高い非破壊検査とは，“有害なきず（欠陥）を確実に検出・判定すること”及び“健全であるものを欠陥として判定（誤検出）しないこと”の両立をいう。非破壊検査の信頼性は手順（文書），検査装置（もの），技術者（人）に左右され，この中で特に技術者の影響が大きい。したがって，技術者の技量（知識，経験など）の均一安定化，世代交代時期での円滑な技術伝承によって，技量差で生じる信頼性の低下を防ぐ必要がある。企業（製造メーカー，検査会社）では高い技量を持つ技術者によるOJT（on-the-job training）をはじめとする教育・訓練を通じて技量の維持・向上

表1 NDEセンターの主な業務内容

NDEセンターの業務		内容
1	発電設備の安全運転への貢献	溶接管理技術，非破壊検査技術，材料評価技術を基盤技術として，発電設備の安全性を維持・向上させるための調査研究及びこれらから得た成果の発信
2	発電設備の検査に係わる人材育成支援	溶接，非破壊検査技術に係わる技術研修，学術講習などを通じた発電設備の検査業務に係わる人材の育成支援
3	発電設備以外への業務展開	①，②で得た経験・ノウハウなどを活かした発電設備以外の分野への展開（材料，溶接，非破壊検査技術の調査研究，企業様の困り事の相談など）

に努めている。しかし、訓練を担う訓練講師は、一般に所属会社における日常の業務との兼務になるため、相当な労力を要している。研修センターでは、教育・訓練に係わる負担軽減と次世代技術者の育成支援を目的に各企業様の要望にあった技術研修を提供している。

2.2 技術研修の実施体制

溶接・非破壊検査技術研修は、非破壊検査技術の理論と実務の両方に精通した者で実施する必要がある。また、非破壊検査技術に密接に関係する材料、溶接、きず、規格・基準及び過去の検査事例などに精通した者による支援が欠かせない。当協会は、質の高い技術研修を提供するために、表2で示す協会一体型の実施体制を構築している。

2.3 技術研修の提供方針

(1) 基本

非破壊検査技術は実践して初めて生きる技術である。したがって、知識習得（座学）と力量習得（実習、演習）を組合せた研修を基本として提供する。座学と実習の内容、配合は受講者の業務、役割に応じて柔軟に対応する。

(2) 受講者の役割に適した技術研修の提供

受講者の目的、要望をしっかりと聞くとともに業務内容、役割などを把握して、受講者に適した研修の提供に心掛ける。表3に受講者の業務内容、役割に応じて提供する技術研修の方針を示す。最初に、受講対象者を非破壊検査実行者と管理者に分類する。前者の非破壊検査実行者を試験員と評価員に分類し、後者の管理者は工事監理員と検査官に分類する。

①非破壊検査実行者－試験員

試験員は、正しいデータを評価員に渡すことが使命であるため、正しいデータを取るための実技能力の習得に重点を置いた研修を提供する。

②非破壊検査実行者－評価員

検査員は、データを分析して合否判定を下すことが使命であるため、正しい判定へ導くために必要な知識（材料、溶接、対象きず、検査手法の原理、特徴及び適用限界など）及び判定手順（演習）の習得に重点を置いた研修を提供する。

③管理者－工事監理員（設置者に所属する管理者）

工事監理員は、設備の健全性（公共の安全と高い稼働率）維持のために、検査のプロセスチェックと検査の成立性を確認する役割を担う。このため、プロセスチェックに必要な知識（検査手法の

表2 溶接・非破壊技術研修の実施体制

実施及び支援体制		特記（スキル他）
溶接・非破壊検査技術研修の実施	研修センター	熟練非破壊検査員 (1) 発電設備の非破壊検査経験：25年以上 (2) 非破壊検査の資格：各種目レベル3, 博士 (3) NDT関連規格（JSME, JEA, JIS他）委員 (4) NDT実証事業に携わった経験者
	研究グループ	構成：材料、溶接、非破壊検査技術専門家（博士、NDT技術者各種目レベル2, 3, 溶接管理技術者）
溶接・非破壊検査技術研修の支援	規格・基準室	発電設備関連規格・基準専門家で構成 (1) 国内外規格・基準制改訂に従事 (2) 国内規格・基準調査（動向、根拠調査）
	検査業務室 法定業務室 認証センター	(1) 溶接事業者検査、定期事業者検査の立会・確認など発電設備の検査業務従事者 (2) 電気事業法に基づく安全管理審査業務従事者 (3) 火力設備の製品認証業務従事者、他

表3 技術研修の提供方針

受講対象者	役割	重点実施項目
非破壊検査実行者	試験員（データ採取）	正しいデータを取る技量（実技能力）の習得
	評価員（判定）	データを分析して正しい判定（評価）に導く技量（知識、判定能力）の習得
管理者	工事監理員（設置者）	検査プロセスチェック及び検査の成立性に必要な技量（不適合の抽出、防止のための知識）習得
	検査官（規制）	

基礎、検査手順、過去の不適合事例、不適合を抽出する要点など）及び検査の成立性確認に必要な知識（工事仕様書、規格・基準の解釈など）の習得に重点を置き、検査実習を交えた。研修を提供する。

④管理者－検査官（規制機関に所属する管理者）

検査官は、工事監理員の役割に近い同様の研修内容となるが、特に公共の安全を意識して最終的には技術基準適合の判断能力の習得が目的となる。このため、過去の検査事例、不適合の抽出要点などに重点を置いた研修を提供する。

3 溶接、非破壊検査技術研修の実施方式と計画

3.1 技術研修の実施方式

定期研修と個別・講師派遣研修の2つの形式で実施している。

(1) 定期研修

研修内容、日程を協会ホームページ上で公開し、受講者を募集する。主に検査実行者を対象として、各種非破壊手法の資格取得支援、非破壊検査技術の技量向上支援のための研修を提供する。

(2) 個別・講師派遣研修

各企業様が指定又は希望する内容、日程及び場所で実施する。多くは、火力設備又は原子力設備に係わる工事監理員育成支援が目的であるが、近年、非破壊検査技術に関する技量向上を目指す要望も増加

している。

3.2 研修コース及び研修内容の策定

(1) 定期研修

企業様（又は受講者）から寄せられる意見、申込み状況などを参考にして年度ごとにコースの開設、中止及び研修内容の変更を行う。また、研修の充実化に努め、非破壊検査技術の進歩（新技術、調査研究成果など）、検査事例（実機検出事例など）、規格・基準の動向など最新技術動向を把握して速やかに反映するように注意を払う。

(2) 個別・講師派遣研修

各企業様の要望に柔軟に対応するように心掛ける。例えば、工事監理員向け基礎（初級）研修、応用（中・上級）研修の要望に応じる場合、表4で示すような流れで研修カリキュラムを提案して協議の上、決定する。

4 定期研修の紹介

4.1非破壊検査技術者育成支援研修

現在、非破壊検査技術者の育成支援として、図1で示す各種非破壊手法の資格取得及び技量向上の研修を行っている。

(1) 定期研修－非破壊試験技術者の資格取得（新規、再認証）支援

JIS Z 2305:2013 “非破壊試験－技術者の資格及び認証”に沿った資格取得（新規、再認証）支援と

表4 工事監理員向け研修コースの例

コース	研修の流れ	研修内容	
基礎編	① 基礎知識（座学）	きず検出原理、用途、特徴（長所／探傷）及び適用限界などの知識習得	
	② 基礎実習（きず検出）	研修講師のデモ、手ほどきによる探傷（きず検出）の体験	
	③ 理解度	基礎知識の理解度確認（ペーパーテスト）	
応用編	① 基礎知識のおさらい（座学）	基礎編で学んだきず検出原理、用途、特徴（長所／探傷）及び適用限界などの知識のおさらい	
	② 規格・基準の解説他（座学）	引用する規格・基準の解説と解釈、判定手順、最新の技術動向などの知識習得	
	③ 検査手順（指示）書作成	与えられた課題に対する検査指示書の作成演習	
	④ 実習	(1) 探傷	作成した指示書に従った探傷の実行
		(2) 記録作成	探傷記録の作成（きずのスケッチなどを含む）
		(3) 合否判定	きずの分類及び引用規格・基準に基づく合否判定
	⑤ 理解度	記録審査	記録審査演習（間違い探し）を通じた①～④の理解度確認
⑥ 不適合		過去の不適合事例、不適合防止の要点解説	
⑦ 安全管理		災害防止の要点解説など	

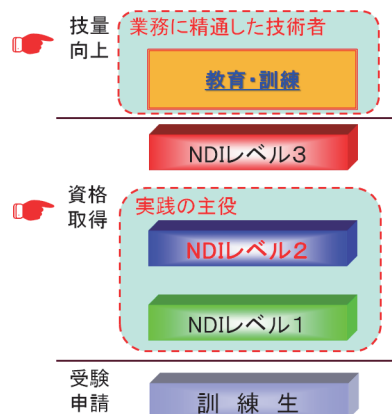
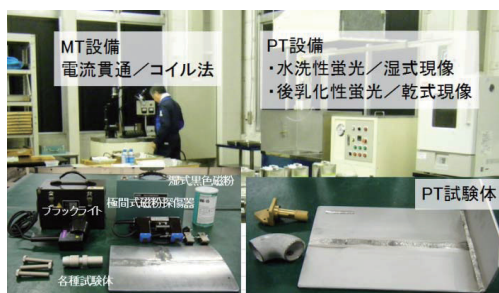


図1 非破壊検査技術者育成支援研修

して、浸透探傷試験 (PT), 磁気探傷試験 (MT), 超音波探傷試験 (UT) のレベル2 受験者向け実技試験対策研修を平成 27 (2015) 年に開設, また, 平成 30 (2018) 年に放射線透過試験 (RT) を新たに開設した。研修は, 実際の実技試験をほぼ再現する形で行っている。図2 に研修設備の例, 表5 に現在行っている資格取得研修について紹介する。なお, UT に関しては一次試験 (筆記) 対策研修も開催している。



(a) PT, MT 研修設備



(b) UT 研修設備



(c) RT 研修設備

図2 非破壊試験資格取得研修設備の例

表5 定期研修—非破壊試験技術者の資格取得 (新規, 再認証) 支援

レベル2 支援	開催	研修内容
UT (筆記)	開催: 2回/年 日程: 2日	一次試験対策 (集中講義)
UT (実技)	開催: 2回/年 日程: 3日	探傷器: Gタイプ, Rタイプに対応 指示書作成: 例題 実技 垂直探傷 (板材) 斜角探傷 (T継手, 曲面材)
PT (実技)	開催: 2回/年 日程: 2日	・ NDT 指示書作成演習 ・ 実技 ・ 溶剤除去性染色浸透探傷試験・速乾式現像法 ・ 水洗性蛍光浸透探傷試験・湿式現像法 ・ 後乳化性蛍光浸透探傷試験・乾式現像法
MT (実技)	開催: 2回/年 日程: 2日	・ NDT 指示書作成演習 ・ 実技 ・ 極間法, ・ 電流貫通法, ・ コイル法
RT (実技)	2018 / 秋期開設 日程: 2日	・ NDT 指示書作成演習 ・ 撮影, 写真処理: アルミニウム管, 合金鋳物 ・ きずの像の分類演習 ・ きず像の解釈解説

4.2 定期研修－非破壊検査技術者の技量向上支援

当協会では、特に超音波探傷試験技術の技量向上に適した設備（装置、試験体）、知識、情報があり、これらを活かした研修を定期的に提供している。図3に研修試験体、研修風景の例、表6に定期的に開

催している研修コースを紹介する。

4.3 今後の定期研修の展開

平成 31（2019）年の定期研修は、非破壊試験技術者の資格支援研修の拡大、充実化させる。詳細については、随時、協会ホームページに掲載する。技量向上支援研修コースについては、現状を継続する



図3 技量向上の研修風景及び訓練用試験体の例

表6 定期研修－非破壊検査技術者の技量向上支援

1. 超音波による厚さ測定実技コース	対象：製品厚さ、減肉測定技術者 開催：2回（1日／回） 内容：JIS Z 2355 による厚さ測定の実践 教材：減肉模擬、塗膜付、小口径試験体
2. 超音波探傷試験（きず検出コース）	
2-1 鋼溶接部の超音波斜角探傷試験実技コース	対象：鋼溶接部の斜角探傷試験技術者 開催：4回（2日／回） 内容：JIS Z 3060 による斜角探傷試験 教材：平板、管溶接部（疲労亀裂、EDM）
2-2 原子力機器の超音波探傷試験（基礎）	対象：原子力ISIに従事するUT技術者 開催：2回（2日／回） 内容：JEAC 4207 による斜角探傷試験 教材：平板、管溶接部（疲労亀裂、EDM）
2-3 オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷試験	対象：ステンレス鋼溶接部の斜角探傷試験技術者 開催：2回（2日／回） 内容：JEAC 4207 による斜角探傷試験 教材：平板溶接部（疲労亀裂、EDM） 管溶接部（応力腐食割れ）
3. 超音波探傷（欠陥寸法測定）	
3-1 超音波による亀裂高さ測定（基礎）	対象：亀裂寸法測定技術者 開催：2回（2日／回） 内容：JEAC 4207, NDIS2418, 2423 他 手法：横波端部エコー、フェーズドアレイ 教材：炭素鋼平板（疲労亀裂、EDM）
3-2 超音波による亀裂高さ測定（応用）	対象：ステンレス鋼 SCC 寸法測定技術者 開催：2回（2日／回） 内容：JEAC 4207, NDIS2418, 2423 他 手法：モード変換波法、横波／縦波端部エコー法フェーズドアレイ 教材：ステンレス鋼平板（疲労亀裂、EDM） ステンレス鋼管（応力腐食割れ）

計画でいるが、教材（試験体）の充実化（溶接きずの追加など）を目指す。

(1) フレキシブルな資格支援研修の提供

現在行っている資格支援コースについて現状の標準開催（開催日と日程固定）の他に随時開催（開催日と日程を希望に応じて設定）を加え、要望に応じて柔軟に対応する。また、標準開催は新規（春、秋）、再認証（春、秋）の計4回に増加する。

(2) 新規資格取得支援コースの開設

レベル2向け研修以外にレベル1資格取得研修、受験申請に必要な訓練（特に実習訓練）の問合せが研修センターへ寄せられており、これらに対応する研修コースの計画を進める。表7に現在計画している研修コースを示す。

5 個別・講師派遣研修の現状と今後の取り組み

5.1 提供可能な研修

非破壊検査技術者の技量向上支援及び管理者（工

表7 非破壊試験技術者の資格取得研修の新設計画

コース名	計画（平成31年～）
UM（実技）	開催：随時（標準日程：1日）
UTレベル1（実技）	開催：4回／年及び随時（標準日程：2日）
PTレベル1（実技）	開催：4回／年及び随時（標準日程：1日）
MTレベル1（実技）	開催：4回／年及び随時（標準日程：1日）
NDT訓練	目的：JSNDI講習会不足時間分の支援（実習を主とする） コース：RT, UT（要望に応じてPT, MT） 開催：随時、日程：不足分（最大5日40時間） 訓練記録の発行
レベル3再認証支援	対象：レベル2を所有しないレベル3技術者 目的：レベル2実技能力の証明支援 コース：UT, RT 開催：随時、日程：1日（必要に応じて追加） 実技能力証明欄への署名

表8 研修センターにて提供可能な技術研修

項目	主な内容	
材料・溶接	材料溶接	(1) 金属材料の基礎、加工、熱処理 (2) 溶接施工の基礎、種類 (3) 劣化、破壊、溶接きずの発生メカニズムと防止策 (4) 実機損傷事例 (5) 金相実習（SEM観察、硬度測定など）
非破壊試験技術 PT, MT, ET UT, RT	概論	用途、役割、手法の比較、手法の選択
	各論（基礎）	基礎理論：原理、特徴、各種技法 探傷：探傷操作の基礎、操作上の注意点
	各論（応用）	プロセスチェック：不適合事例と防止の要点 検査成立性確認：規格・基準解釈、 判定手順（きず分類、規格基準照合）
	UT技量向上	(1) ステンレス鋼溶接部の超音波斜角探傷実習 (2) 異材継手の超音波斜角探傷実習 (3) 自動超音波探傷試験実習 (4) 超音波によるきず寸法測定実習
非破壊試験関連 規格・基準		(1) 各種“日本工業規格”，“非破壊検査協会規格”の解説 (2) “発電用火力設備の技術基準の解釈”の解説 (3) 原子力設備規格（設計・建設、溶接、維持）の解説 (4) JEAC 4207, JEAG 4208, JEAG 4217の解説 (5) 米国 ASME 規格（Sec. III, V, XI他）
非破壊関連 調査研究成果		(1) 国内外の各種実証事業成果, (2) 各種確性試験成果, (3) 協会自主研究成果
その他		原子力関連の検査技術変遷（損傷への取り組み、規格類への反映）

事監理員，検査官）育成支援に向けて研修センターが提供できる技術研修を表8に示す。現在，個別・講師派遣研修は，企業様の希望に応じて表中から抽出，研修カリキュラムを構築して提供している。

5.2 個別・講師派遣研修の現状と今後の取り組み

現在，表8を基にBWR電力会社殿，火力設備を所有する企業様，検査会社様及び原子力規制庁様などの要望に沿って研修を提供している。そのほとんどにおいて継続しており，また，基礎から応用に拡大した研修の要請を受けて対応している。今後も各企業様の期待に応えるように常に意見交換を行い，研修の改善に努め，お役に立てる研修を目指す。

6 今後の研修センターの取り組み

研修センターでは，現在実施している研修コースの継続，充実化及び拡大を目指し，以下の3点に力を注ぐ。

(1) 非破壊試験資格取得支援の充実化

表7で示す研修コースの早期立上げ，定着を目指す。また，円滑遂行のための体制作り（熟練講師の確保，講師の育成）に取り組む。

(2) 原子力に従事するUT技術者の訓練支援

現在，NDIS 0603に従ったPD研修を通じて亀裂寸法測定技術者の技量維持を支援している。今後は，さらに電力会社が進めている原子力プラントの供用期間中検査（ISI）におけるUT技術者の欠陥検出技量の維持・向上を目的としたしくみ作りを支援していく。訓練指針の制定（草案作り），訓練機関に必要な設備，プログラムの構築，訓練の試運用などのしくみ作りに協力しており，早期のしくみ作りと訓練の提供を目指していく。

(3) 発電設備以外への業務展開

NDEセンターの研究グループは，調査研究の対象を複合材料あるいは造船分野などに展開を始め，発電分野以外へ業務範囲を広げている。研修センターにおいても研究グループの知見を吸収して，研修業務の範囲拡大に努めていく。



牧原善次



松田誠司



平澤泰治



小林輝男

出願特許一覧

1	特許件名	漏洩磁束法における評価方法		発明者	程 衛英 上山芳教 他
	出願番号-出願日	特願2015-246074	2015/12/17	登録番号-登録日	特許第6146828号 2017/5/26
	概要	低磁化漏洩磁束法により強磁性体(鉄鋼材料)の減肉や材質変化を非破壊で評価する方法			
2	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			
3	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			
4	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			
5	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			
6	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			
7	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および方法		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
Proceedings of the 12th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	4-6 October, 2016, Dubrovnik, CROATIA	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 内一哲哉 古村一朗 高木敏行	Validation of FEM simulation of EMATs for versatile EMAT configurations
火力原子力発電	第69巻6号(2018)	西川 聡 古川 敬 他	ショットピーニングで付与した圧縮残留応力の長期持続性を予測するためのFEM解析手法の開発
非破壊検査	第67巻2号(2018) p.6	上山芳教 古川 敬	フェーズドアレイ法探傷計画検討におけるシミュレーションツールの活用
超音波テクノ	2018年1-2月号,p.19	平澤泰治 小林輝男 牧原善次 南康雄	UT技術者の探傷技量に及ぼす訓練の有効性
検査技術	2017.11. Vol.22,- No.11,p.9	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	ガイド波試験による配管検査におけるエルボでの欠陥検出感度の特性分析
非破壊検査	第66巻11号(2017) p.538	程 衛英	低磁化強度漏洩磁束法による強磁性体板厚評価
IEEE Sensors Journal	Vol.17, No.14, July 2017, pp.4558- 4569	程 衛英	Thickness Measurement of Metal Plates Using Swept-Frequency Eddy Current Testing and Impedance Normalization
超音波テクノ	2017年5-6月号	山本敏弘	有限要素法シミュレーションによるEMATが発生する超音波の伝搬の可視化
超音波テクノ	2017年5-6月号	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
日本金属学会誌	Vol.81(2017) No.6,p.301-307	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	配管エルボ部の欠陥検出におけるガイド波試験の欠陥検出感度の周波数依存性
非破壊検査	Vol.66, No.4	平澤泰治	フェーズドアレイUT技術による水中超音波検査
非破壊検査	Vol.66, No.2	平澤泰治 小林輝男 牧原善次 南 康雄	超音波探傷技術者の探傷技量に及ぼす教育・訓練の効果
火力原子力発電大会論文集	平成 28 年度火力 原子力発電大会論 文集 CD-ROM	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	ガイド波試験による配管エルボ探傷での欠陥位置と欠陥検出感度の関係
保全学	Vol.15, No.3	古村一朗	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
Proceeding of the 43rd ANNUAL REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION	VOLUME 36, Feb., 2017	程 衛英	Electromagnetic Nondestructive Evaluation of Defects in Ferromagnetic Structures
Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX)	Vol.41, pp.126- 133, IOS Press 2016	程 衛英 上山芳教 塚田啓二	Magnetic Flux Leakage Testing for Defect Characterization
IEEE Sensors Journal	Vol. 16, No. 14, July 2016, pp. 5548-5556	程 衛英	Non-destructive Testing of Back-side Local Wall-thinning by Means of Low Strength Magnetization and Highly Sensitive Magneto-Impedance Sensors

Journal of Nondestructive Evaluation	Vol.35, Issue 2, June 2016	程 衛英	Magnetic Flux Leakage Testing of Reverse Side Wall-Thinning by Using Very Low Strength Magnetization
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 P61-64	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ビ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

学協会等への口頭発表

平成29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	日本非破壊検査協会東北支部 支部会・講演会	2017/4/21 PARM CITY131	古川 敬	超音波及び電磁気探傷試験におけるシミュレーション技術の活用
	日本保全学会第 14 回学術講演会	2017/8/2-4 ひめぎんホール	程 衛英	周波数掃引渦電流試験および周波数応答特性解析による金属板厚評価
	日本保全学会第 14 回学術講演会	2017/8/2-4 ひめぎんホール	直本 保 上山芳教 古川 敬	SUS 配管溶接部における柱状晶組織からの UT 信号シミュレーション
	The 20th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM-2017)	Chamonix Mont-Blanc, France	程 衛英	Swept-frequency Eddy Current Testing to Measure a Metal Plate's Thickness and Conductivity
	Fourteenth International Conference on Flow Dynamics	2017/10/5-6 仙台	山本敏弘 浦山良一 内一哲哉 高木敏行	FEM simulation method for electromagnetic ultrasonic testing and its application
	日本非破壊検査平成 29 年度秋季講演大会	2017/10/5-6 福岡国際会議場	山本敏弘 浦山良一 内一哲哉 高木敏行	電磁超音波探触子の最適化に活用するための FEM シミュレーション方法の妥当性確認
	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	2018/1/25-26 東京都立産業技術研究センター	上山芳教 古川 敬	フェーズドアレイ法探傷計画検討におけるシミュレーションツールの活用
	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	2018/1/25-26 東京都立産業技術研究センター	山本敏弘 古川 敬 他	配管エルボにおけるガイド波試験の欠陥検出感度の周波数および寸法依存性
	電気学会 磁気センサ調査専門委員会	2018/3/6 東京	程 衛英	高感度磁気センサを用いた非破壊検査について
	日本非破壊検査協会 第 21 回 表面探傷シンポジウム	2018/3/26 メルパルク京都	程 衛英	周波数掃引渦電流試験による金属板およびコーティングの厚さ測定・評価
溶接	日本保全学会第 14 回学術講演会	2017/8/2-4 ひめぎんホール	西川 聡 古川 敬 他	熱サイクル及び応力不可による残留応力変化 - 応力改善工法で付与した圧縮残留応力の持続性評価 (第 2 報) -
	溶接学会平成 29 年度秋季全国大会	2017/9/11-13 九州工業大学	西川 聡 他	再現 HAZ 材を用いた改良 9Cr-1Mo 鋼溶接部のクリープ特性に関する基礎的検討
	平成 29 年度火力原子力発電大会	2017/10/12 仙台国際センター	西川 聡 古川 敬 他	ショットピーニングで付与した圧縮残留応力の長期持続性を予測するための FEM 解析手法の開発
	日本溶接協会平成 29 年度第 1 回特殊材料溶接研究委員会	2017/6/7 日本溶接協会溶接会館	西川 聡	異材溶接継手の力学的特性
	溶接冶金研究委員会	2018/1/29 大阪大学 東京ランチ	西川 聡 高橋 誠	改良 9Cr-1Mo 鋼溶接部の PWHT 条件がクリープ破断強度に及ぼす影響
	日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会	2018/1/26 大阪市立大学 梅田サテライト	西川 聡	ニッケル基 600 号館溶接金属の高温純水中における耐応力腐食割れ性の向上について

平成28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	JSNDI 超音波部門講演会	2016/5/12 松江テルサ	水野亮二 西川 聡 古川 敬	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欠陥モデルの検討
	43th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	2016/7/16-22 アトランタ、米国	程 衛英	Electromagnetic Nondestructive Evaluation of Defects in Ferromagnetic Samples
	保全学会第 13 回学術講演会	2016/7/25-27 神奈川県立 かながわ労働プラザ	程 衛英	交流励起プローブによる強磁性体の欠陥検出
			古川 敬 上山芳教	フェーズドアレイ UT による溶接部探傷試験条件の最適化
			水野亮二 西川 聡 古川 敬	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欠陥モデルの検討
			平澤泰治 小林輝男 牧原善次 南 康雄	超音波探傷試験技術者に対する教育・訓練の有効性検討
	7th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications	2016/9/18-20 西安、中国	程 衛英 塚田啓二	Electromagnetic Testing of Wall-thinning in Ferromagnetic Structures
	11th International Conference on Non Destructive Evaluation	2016/10/4-6 ドゥブロヴニク、 クロアチア	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 内一哲哉 古村一朗 高木敏行	Validation of FEM simulation of EMATs for versatile EMAT configurations
	平成 28 年度 JSNDI 秋季講演大会	2016/10/6-7 ハーネル仙台	上山芳教 古川 敬	炭素鋼溶接部における超音波フェーズドアレイ法の欠陥検出性
	平成 28 年度火力原子力発電大会	2016/10/27 サンポートホール高松	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	ガイド波試験による配管エルボ探傷での欠陥位置と欠陥検出感度の関係
超音波ソリューションセミナー「IoT を生かす高機能・高精度な超音波シミュレータへの挑戦」	2017/1/25 CTC 霞が関オフィス	古川 敬	超音波探傷試験の条件検討・検証、結果の解釈へのシミュレーション技術の活用	
溶接	Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016	2016/9/19-22 富山国際会議場	水野亮二 西川 聡 古川 敬 他	X-ray residual stress measurement of weld heat-affected zone in austenitic stainless steel weld by cos α method
	Visual-JW 2016	2016/10/17-18 ホテル阪急万博公園	西川 聡 大井浩一 高橋 誠	Influence of shot peening and thermal aging treatment on resistance to intergranular corrosion in shielded metal arc weld metal for type 600 nickel base alloy
	International Conference on Maintenance Science and Technology 2016	2016/11/1-4 深セン、中国	西川 聡 大井浩一 高橋 誠	Influence of stress improvement process and thermal aging treatment on resistance to intergranular corrosion in shielded metal arc weld metal for type 600 nickel base alloy
	第 54 回高温強度シンポジウム	2016/12/8-9 愛媛大学 皆南加記念ホール	西川 聡 齊藤直樹 高橋 誠	改良 9Cr-1 Mo 鋼溶接継手のクリープ強度に及ぼす PWHT 条件の影響

溶接	原子力構造物の高経年化に関わる維持技術の高度化に関する調査委員会	2017/2/8 大阪科学技術センター	西川 聡	異材溶接継手の力学的特性について（溶接、PWHT、応力改善について）
----	----------------------------------	------------------------	------	------------------------------------

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 ロッテホテル	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

非破壊	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
	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	古村一朗	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 International 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	

成 果 学協会等への口頭発表

非破壊	Ni基合金異材継手のISIとメンテナンスに関するワークショップ (International Workshop on In-service Inspection and Maintenance of Aged Ni-based Dissimilar Metal Weld(DMW)Components in NPPs)	2014/6/2 KINS(韓国 太田市)	古村一朗 古川 敬	Data Base for NDT-related National Project(Outcome of APN/Accumulation & Preparation of Nondestructive Inspection Data for Nuclear Power Plants)
	日本保全学会 第11回 学術講演会	2014/7/24-25 八戸工業大学	古川 敬 水野亮二 上山芳教	超音波探傷訓練へのシミュレーション解析技術の適用
	平成26年度 火力原子力発電大会	2014/10/23 名古屋国際会議場	程 衛英 比翼 賢 古川 敬 加古晃弘 池堂和仁	パルス渦電流試験法による保温材上からの配管減肉計測
	日本原子力学会 第13回 材料部会夏期セミナー	2014/8/5 山形県山形市蔵王温泉 ホテル樹林	古川 敬 程 衛英	超音波・電磁気による非破壊検査技術
	59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference	2014/11/5-9 Hawaii, USA	程 衛英 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

論文等表彰

氏名	受賞名等	機関等・受賞日	受賞内容
水野亮二 上山芳教	平成27年度 学術奨励賞	(一社)日本非破壊検査協会 平成28年6月7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：「超音波探傷訓練用シミュレーター」
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」

成 果 論文等表彰

糸 亮一 志波光晴	優秀論文賞	(社)火力原子力発電技術協会 平成17年10月12日	優秀論文表彰は、平成17年度に会誌「火力原子力発電」に掲載された論文の中から、優秀であった論文に対して授与されるもので「高Cr鋼の交流磁化法によるクリープ損傷評価技術の開発」が対象となった。
水野亮二	平成15年度 木原奨励賞	(財)溶接接合工学振興会 平成16年5月13日	本賞は、毎年1回、溶接接合工学の分野における新進気鋭の原則として35歳以下の研究者、技術者に授与されるもので、(財)溶接接合工学振興会会員、関連団体及び理事会の推薦によるものである。回原子炉圧力容器等原子力プラント溶接部の品質保証溶接施工法に係る研究開発に関する論文、学会発表等に対して受賞したものである。
青野健二郎	「火力原子力発電」掲載論文賞	(社)火力原子力発電技術協会 平成14年9月25日	論文「斜角探触子の距離振幅特性曲線と欠陥検出能力の評価」に対して受賞したものである。
志波光晴 西川 聡 米山弘志 山口篤憲	技術賞 開発奨励賞	(社)日本溶接協会 平成14年5月29日	研究成果報告「交流磁化法による施工後の溶接熱処理温度評価」に対して受賞したものである。
西川 聡	平成14年度 科学技術 奨励賞	(社)日本高圧力技術協会 平成14年5月24日	若手研究者に対する賞で、発表論文「鍛造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

時期が遅くなりましたが、今年も「技術レビュー」を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、非破壊検査技術に関する研究、規格基準に関する調査、また、溶接・非破壊検査技術研修の紹介もしております。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。

間もなく平成も終わり、新しい元号に変わります。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、今後も変わらぬ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.14 2018 (非売品)

発行日 2019年3月28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.14 2018



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