

一次系実機配管に対する残留応力の現場測定法の提案

Development of an On-Site Measurement Method for Residual Stress in Primary System Piping of Nuclear Power Plants

前川 晃 (Akira Maekawa) *¹高橋 茂 (Shigeru Takahashi) *²藤原昌晴 (Masaharu Fujiwara) *³

要約 原子力プラントの高放射線および高汚染区域で大型の配管・容器の残留応力測定を想定した場合、放射化した配管等をそのまま持ち出すことは難しく、持ち出せたとしても測定に至るまでの取り扱いが難しい。迅速な測定かつ必要な測定精度を確保した残留応力の現場測定法の開発が望まれる。本研究では、原子力プラントの高放射線および高汚染区域に設置された配管の残留応力現場測定を実現するために、放電スキムカット法と歪み量直接測定法の組合せによる新しい測定法を提案する。放電スキムカット法は、配管内外表面を放電加工にてボートサンプルをすき取ることにより応力解放を行いサンプル表面で解放されたひずみ量から応力値を測定する方法である。小型で可搬式の放電サンプリング装置を用いれば現場での測定が可能である。歪み量直接測定法は刻印マーキングにより応力解放後の刻印間距離を測定することで残留応力値を測定する方法である。この2つの方法の組合せにより、高放射線および高汚染区域内での測定作業が簡素化および迅速化されるため、測定時の大幅な被ばく低減を達成しつつ、従来法と同等の測定精度で残留応力を評価することができる。歪み量直接測定法の適用性は既に確認されていることから、本研究では、放電スキムカット法の適用性を調べた。実験結果から従来法と同等の精度で測定するための適用条件を明らかにした。さらに、加工液に純水を使用できる放電加工条件を決定し、放射性廃棄物対策も万全とした。

キーワード 残留応力, 一次系配管, 現場測定, 放電加工, 放電スキムカット法, 歪み量直接測定法, 被ばく低減, 適用性, 測定精度

Abstract In residual stress measurement for large-scale pipes and vessels in high radiation areas and highly contaminated areas of nuclear plants, it is difficult to bring the radioactivated pipes and vessels out of the areas as they are. If they can be brought out, it is very burdensome to handle them for the measurement. Development of an on-site measurement method of residual stress which can be quickly applied and has sufficient measurement accuracy is desirable. In this study, a new method combining an electric discharge skim-cut method with a microscopic strain measurement method using markers was proposed to realize the on-site residual stress measurement on pipes in high radiation areas and highly contaminated areas. In the electric discharge skim-cut method, a boat-type sample is skimmed out of a pipe outer/inner surface using electric discharge machining and released residual stress is measured. The on-site measurement of residual stress by the method can be done using a small, portable electric discharge machine. In the microscopic strain measurement method using markers, the residual stress is estimated by microscopic measurement of the distance between markers after the stress release. The combination of both methods can evaluate the residual stress with the same accuracy as conventional methods offer and it can achieve reduction of radiation exposure in the measurement because the work is done simply and rapidly. In this study, the applicability of the electric discharge skim-cut method was investigated because the applicability of the microscopic strain measurement method using markers was confirmed previously. The experimental examination clarified the applicable conditions for the residual stress measurement with the same accuracy as the conventional methods. Furthermore, the electric discharge machining conditions using pure water as the machining liquid was found to eliminate the amount of liquid radioactive waste completely.

Keywords Residual stress, Primary system piping, On-site measurement, Electric discharge machining, Electric discharge skim-cut method, Microscopic strain measurement using markers, Radiation exposure reduction, Applicability, Measurement accuracy

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
*2 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
*3 (株)神戸工業試験場

1. はじめに

原子力発電プラントでは、供用期間中に配管・容器の構造物にき裂が発見された場合、維持規格⁽¹⁾に基づいて構造健全性評価を行うことができる。無欠陥構造を想定する設計時の構造評価と異なり、維持規格では発見されたき裂が進展することを想定するため、その進展に影響を及ぼす残留応力分布も評価に反映させる必要^{(2),(3)}があるなど、数段高い技術レベルの構造評価が必要となる。

このようなき裂を考慮した評価を実機構造物の評価に適用する上で懸案となっているのが残留応力の取り扱いである。他の荷重（自重、内圧、熱過渡荷重、地震、事故時の衝撃）については、設計・建設規格に基づいた評価を行う時にも想定する必要がある。維持規格に準拠した評価を行う時にも基本的に同じ荷重を想定すれば良いので、既存の知見が活用できる。一般に、き裂の発生が懸念される部位は、ほとんどが配管や容器の溶接部ないしその近傍であり、き裂を考慮した評価を行う上で残留応力分布の推定は不可欠である。残留応力は溶接施工や塑性加工のように塑性を受ける部位に必ず発生し内在する応力であり、機械構造物の構造健全性に大きな影響を与える。

加圧水型原子炉（PWR）の一次系で問題となる一次冷却水応力腐食割れ（PWSCC）⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾は溶接部内に発生するき裂であることから、き裂進展挙動は溶接部の残留応力分布の大きさや形状に依存する。溶接時の熱サイクルにより溶接部には塑性ひずみが発生し母材部による拘束条件と相まって発生する引張力の残留応力はき裂を開口させる駆動力となる。したがって、き裂進展解析によるSCCき裂の進展と停留の評価は溶接残留応力評価に大きく依存⁽⁸⁾する。

PWR配管において熱疲労による疲労き裂が報告されている例⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾では、Crystal River-3号機⁽¹²⁾やFarley-2号機⁽¹³⁾、Civaux-1号機⁽¹⁴⁾の報告に見られるように溶接部に熱疲労き裂が発生した。溶接部には降伏応力に近い引張力の残留応力が内在するため、高サイクル熱疲労き裂の進展挙動は、内在するこの引張応力により加速する。なお、日本では美浜2号機⁽¹⁵⁾や玄海2号機⁽¹⁶⁾で熱疲労によるき裂が報告されているが、これも高残留応力部位の配管曲り部で発生している。このように高残留応力場の熱疲労き裂による漏えい事象は熱疲労単独の事象

ではなく、残留応力が絡んだ複合要因事象⁽¹⁷⁾とみなす方が現象を理解しやすい。

残留応力の大きさや分布は溶接施工条件や加工条件に大きく影響を受けるため、個別の評価が必要となる。解析により残留応力を推定する方法⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾を確立すれば、現状のように、き裂進展評価に大きな保守性を持った残留応力分布値を入力データとして設定する必要はなく、合理的な健全性評価が可能になると考えられる。また、解析では塑性ひずみ量が算出でき、これはSCCき裂の発生要因として重要な役割⁽²¹⁾を担っていることが近年明らかになりつつあることから、き裂発生後の健全性評価だけでなく、き裂の発生可能性の有無も評価することが可能になるという副次的な効果も期待できる。しかしながら、既存の研究成果をみると解析結果のみで残留応力が推定できると判断するほど解析技術は完成・成熟の域に達しているとは言えないと考へざるを得ない⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾。また、高経年化プラントの実機配管はかなりの年月が経過していることから当時の詳細な溶接過程の調査は難しく、したがって、何らかの測定方法による実機配管の検証は不可欠である。

本研究では、当社が開発した歪み量直接測定法⁽²⁵⁾と放電スキムカット法を組み合わせた残留応力測定法を提案する。これは、応力解放時のひずみ測定のためにひずみゲージを貼り付ける作業が必要ないので、大幅な被ばく低減が見込めることから実用測定法として優れている。

表1に、既存の残留応力測定技術と本研究で提案する測定方法について分類した。実機配管の残留応力測定は、配管の使用継続性の観点から、非破壊的な測定が望まれる。しかし、回折法などの非破壊法は、測定精度がマイクロ組織の影響を受けやすいなど測定精度の信頼性に課題⁽⁴⁷⁾⁻⁽⁴⁹⁾が残っている。測定精度の信頼性では応力弛緩法が有利である。現状では、この応力弛緩法のうち補修により原状回復が期待できる部分破壊法が実用的であると考えられる。表1に示す部分破壊法のうち、穿孔法^{(35),(36)}やRing Core法⁽³⁷⁾はひずみ解放操作に高度な技術を要する。DHD法^{(38),(39)}は表面の残留応力を測定することは得意ではない。

放電スキムカット法は表面残留応力に対する測定法の一つであり、部分破壊法に属し、配管表面の残留応力を応力弛緩法の原理に基づいて測定することができる。この方法は、配管内外表面を放電加工にてボートサンプルをすき取ることにより応力解放を

表1 残留応力の測定技術

完 全 破 壊 法	応力弛緩 法 ^{(26),(27)}	歪み量直接測定法 ⁽²⁵⁾	
		Slitting/Contour法 ^{(28),(29)}	
部 分 破 壊 法	ひ ず み ゲージ法	ブロック切断法 ^{(30),(31)} (ワイヤーカット法)	DHD法 ^{(38),(39)}
		固有ひずみ法 ⁽³²⁾⁻⁽³⁴⁾	
		放電スキムカット法	
		穿孔法 ^{(35),(36)}	
非破壊法	回折法 ^{(40),(41)}	X線回折法 ^{(27),(42),(43)}	Ring Core法 ⁽³⁷⁾
		シンクロトロン X線回折法 ⁽²⁸⁾	
		中性子回折法 ⁽⁴³⁾⁻⁽⁴⁵⁾	
	磁歪法 ^{(28),(40),(42),(43)}		
	超音波法 ^{(40),(42),(43),(46)}		

行いサンプル表面に貼り付けたひずみゲージまたはその他の方法で解放されたひずみ量つまり応力値を測定する方法である。放電加工機を配管内外表面に設置して表皮を薄くはぎ取るだけなので、測定対象物への負担が小さく、従来法と比較して測定装置の精度良い設置が要求されない。原子力プラントの高放射線および高汚染区域で残留応力測定を想定した場合、被ばく低減のために簡便さと迅速性を優先するので、放電スキムカット法は有利である。

表1上段に記載の歪み量直接測定法⁽²⁵⁾は、マーキングと測定顕微鏡により歪み量を直接測定する方法である。残留応力の生じている部位の表面にマーカーにより打刻し、応力解放した後の標点間距離の変化を測定顕微鏡により測定することで、ひずみゲージと同等の精度で残留応力を測定することができる。測定前処理がほとんど不要であることから、ひずみゲージによる測定作業よりも高放射線区域における迅速な作業が可能であり、被ばく低減可能である。

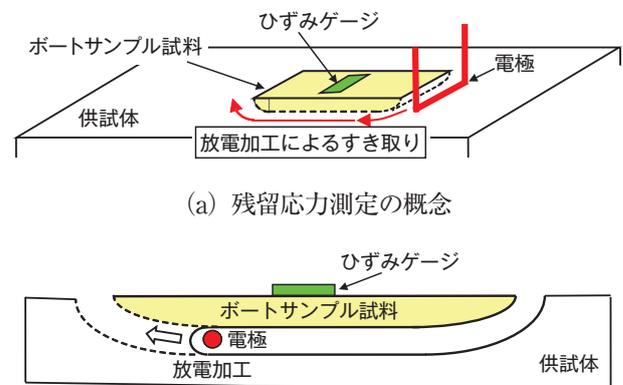
歪み量直接測定法は既に適用性が確認されていることから、本研究では、放電スキムカット法の適用性について調べた。ブロック切断法の一つである従来法のワイヤーカット法と同等の測定精度を得るためには、放電スキムカット法の放電加工条件を最適化する必要があることがわかり、その条件を明らかにした。さらに、高汚染区域での使用を想定して、加工液に純水を使用できる放電加工条件を示した。

2. 放電スキムカット法

原子力発電プラントのサイト内において大型で放射化した部材の残留応力を測定する必要が生じた場合、現状では、当該部位に影響を与えない大きな範囲で切り出して非放射線区域で測定する方法や工場にてモックアップによる測定をする方法しかなく、これらは大掛かりで時間のかかる方法となる。測定箇所にはひずみゲージを貼り付け、残留応力の測定に必要な最小限の小型サンプルを現場で切り出して応力解放を行えば、小型なことから取り扱いが比較的容易でありサイト内の実験室で迅速に残留応力を測定することが期待できる。

近年、大型プラントの配管や容器の材料劣化などを調べる目的で実機材の材料試験用ミニチュアサンプルを採取する装置が提案⁽⁵⁰⁾⁻⁽⁵²⁾されている。この中で放電加工を利用したサンプル採取用放電加工装置も提案されており、小型化も進んでいる。

図1に示すように、残留応力を測定しようとする箇所にひずみゲージを貼付し、その箇所をサンプル採取用放電加工によりサンプル採取し、採取前後のひずみゲージの値の変化が読み取れば、従来のワイヤーカット法を適用したひずみゲージ法による残留応力測定と同じ原理で残留応力を測定できることになる。また、この方法は測定対象の表面外皮をすくい取るように切断するので、測定対象物の表面を若干傷つけるだけで測定できる。ワイヤーカット法のように測定対象物を完全破壊することもなく、必要があれば測定対象物に補修を行えばよい。この方法を本研究では、放電スキムカット法と呼ぶことにする。



(a) 残留応力測定
(b) 試料のすき取り加工

図1 放電スキムカット法

放電スキムカット法による残留応力測定用の装置として(株)神戸工業試験場の放電サンプリング装置(図2)^{(52),(53)}を選択した。この装置は管外表面を放電加工にてポートサンプルをすくい取って供用化における金属物性の変化などを把握するサンプルを採取することを目的として開発された。しかも、加工装置のサイズが十分に小型のため配管内に挿入して管内表面のポートサンプルも採取できそうなこと、加工に伴う塑性変形が少ないこと、表面を薄く(0.5mm～)平らに切り出せる。これらの特徴は放電スキムカット法を用いた実機配管の残留応力測定に都合がよい。図2(a)は装置を配管に設置した状況を示す。この状態で配管表面部をすくい取る。図2(a)右下には、放電加工に用いる電極を示す。図2(b)は装置によるポートサンプル採取状況の例を示す。加工液で冷却しながらサンプル採取を行なう。図2(c)は装置によりサンプル採取した結果を示す。金属表面を薄く剥ぎ取ることができる。

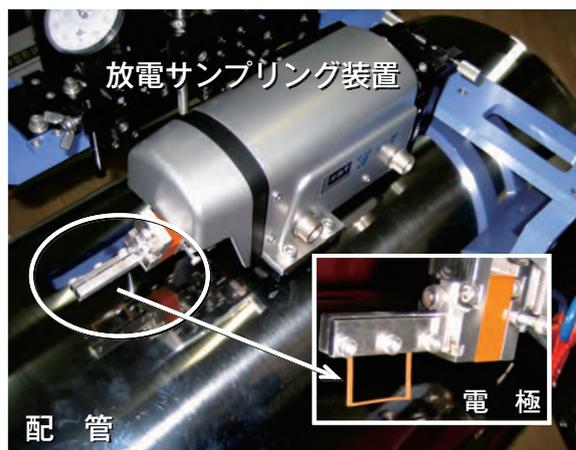
提案した方法による実際の現場測定手順は以下のように考えている。まず、現場にて切り出し前の表面に刻印マーキングを行ない、歪み直接測定法の準備を行なう。次に、放電サンプリング装置にてポートサンプルを切り出す。最後に、切り出しにより解放されたひずみ量を別室にて、歪み量直接測定法に従い測定顕微鏡でひずみ変化量を測定する。

放電スキムカット法は、上記に示すように測定装置や測定手順は存在する。しかし、適用性実証や実績がないことから原理確認ができておらず測定条件も明確ではない。したがって、本研究にて放電スキムカット法の適用性検討を行った。

3. 歪み量直接測定法⁽²⁵⁾

歪み量直接測定法は、高放射線および高汚染区域における残留応力測定法として開発された。まず、ダイヤモンド圧子を有するマーカーにより測定対象物の表面に打刻する。破壊法にて残留応力解放後、打刻された標点間距離を測定顕微鏡で測定することにより基準値からの距離変化量をひずみ変化量に変換して解放ひずみを求め、ヤング率を用いて応力値へ変換する。

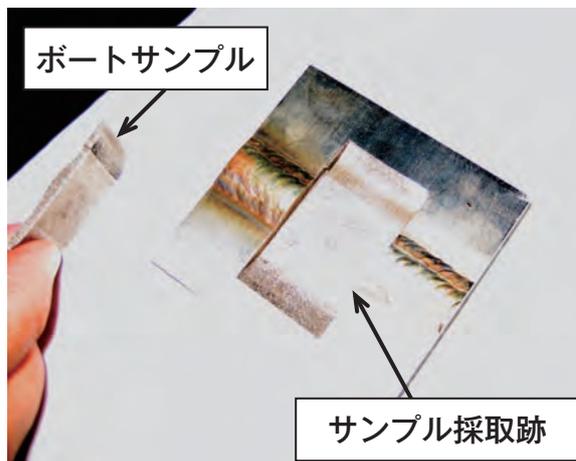
この方法は、表面の汚れに鈍感な方法であることから、測定部位の脱脂や洗浄等の前処理が不要である。さらに、測定前処理は、標点間距離が既知のマーカー用ポンチで打刻するだけである。このため、



(a) 放電サンプリング装置



(b) サンプル採取状況の例



(c) 採取したサンプルと採取跡

図2 放電サンプリング装置

被ばく線量が大きな部位での残留応力測定に有利である。欠点は、応力解放後の標点間距離を測定顕微鏡で測定する作業に時間を要することである。しかし、この測定作業は非放射線区域で行なえば良いので、測定作業全体で大幅な被ばく低減が行なえる。

歪み量直接測定法による残留応力測定技術の精度確認は文献 (25) で既の実施されており、実機での使用実績もあることから、本研究ではその適用性の議論を行わない。

なお、本研究で実施した放電スキムカット法の適用性検討では、歪み量直接測定法によるひずみ測定は行わず、従来から使用されるひずみゲージ法を使った。測定顕微鏡によるひずみ測定は、測定作業を煩雑とするためである。

4. 適用性実証試験

残留応力状態を、静荷重を荷した梁で模擬して、予め貼り付けて初期ひずみを測定した値と、放電サンプリング装置にてすき取った試料から測定した値との差を測定した。そしてこの差を換算することで得られた残留応力値と荷した静荷重の大きさを比較して、放電サンプリング装置にて得られた値の妥当性を検討した。また、この試験と併せて従来法との比較を行うため、ブロック切断法の一つであるワイヤーカット法にて矩形の試料を採取して、ひずみゲージによる解放された応力量の測定を行った。

4.1 試験方法

供試材はオーステナイト系ステンレス鋼SUS304の厚板（長さ1,100mm、幅150mm、厚さ75mm）を容体化処理して用いた。供試体に3点曲げ試験装置を用いて曲げ荷重を荷した。荷重荷点はローラー状の形状を用いた。供試体の長手方向中央部の引張応力発生側の表面にひずみゲージを3箇所貼り付け、曲げ荷重を荷した状態でひずみゲージをすき取り、表面に発生していた残留ひずみを測定し残留応力に換算する。ひずみゲージ貼り付け位置を図3に示す。

試験は以下の手順で実施した。

- (1) 供試体中にひずみゲージA、B、Cを図3に示す3箇所に貼り付ける。
- (2) ひずみのゼロバランスをとり、3点曲げ試験機にセットする。
- (3) ひずみゲージBが所定のひずみ値に達するまで荷し、3箇所のひずみ計測をする。
- (4) ひずみゲージBを放電サンプリング装置ですき取り、解放ひずみを測定する。
- (5) 曲げ荷重を除荷後、ひずみゲージAとCのひ

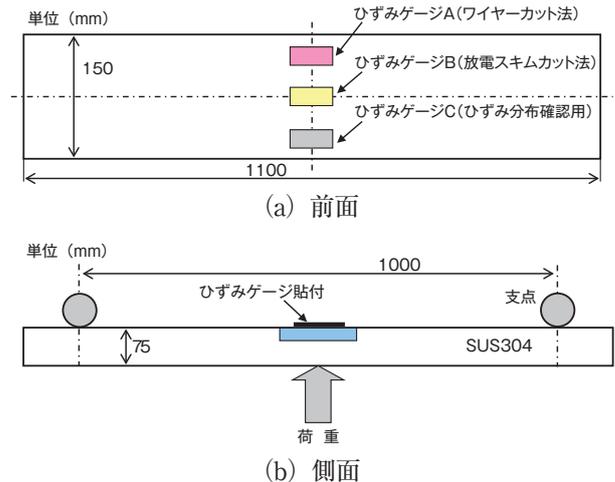


図3 適用性実証試験に使用した供試体

ずみを測定する。

- (6) 供試体2のひずみゲージAをワイヤーカット放電加工によりブロック状に切断し、解放ひずみを測定する。

試験条件を表2にまとめる。荷重荷重（ひずみ）の大きさを2種類にして実施した。供試体1は弾性範囲内の荷重を荷した。供試体2は塑性域までの荷重を荷した。表2に示すように板厚は1.5mmを目標にした。測定値の妥当性を評価するために、応力-ひずみ線図をもとにした予測値を求め基準値とした（算出方法は後述）。予測値を生じたひずみから応力をできるだけ正確に推定するために、ミルシートで同ロットとなる素材から試験片を1本切り出し、引張試験により応力-ひずみ線図を得た。試験片は外径6mmのつば付き引張試験片の形状に加工し、軸方向を供試体の長手方向と一致させた。引張試験は室温・大気中にてJIS2241に準拠して実施した。

表2 試験条件

測定条件	供試体1	供試体2
荷重目標とする最大ひずみ	500×10^{-6}	$1,500 \times 10^{-6}$
ゲージA切り出し目標寸法 (mm) (ワイヤーカット法)	-	$1.5 \times 10w \times 10L$
ゲージB切り出し目標寸法 (mm) (放電スキムカット法)	$1.5 \times 20w \times 20L$	$1.5 \times 20w \times 20L$

4.2 試験結果

残留応力測定状況を図4に示す。図5に供試体の試験前後の概観と採取したポートサンプルの写真を示す。図5(b)に示すように、真ん中のひずみゲージBの貼り付け領域が供試体の外表面から薄くすき取られていることがわかる。このように供試体への損傷は小さいことがわかる。一方、右側にはワイヤーカット法によりサンプルを採取した跡が残っているが、ひずみゲージAの貼り付け領域が全て切り取られており、完全破壊の形態になることがわかる。

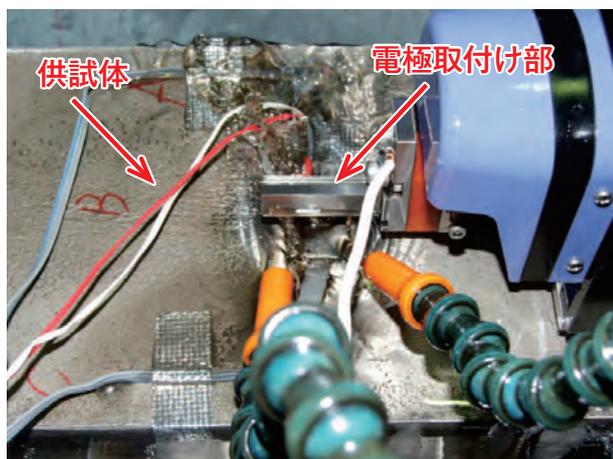
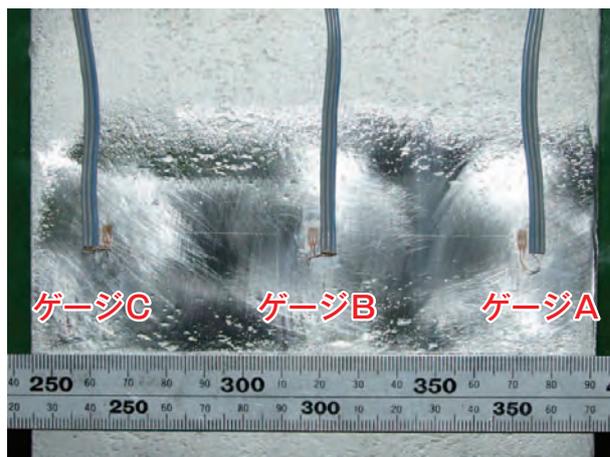


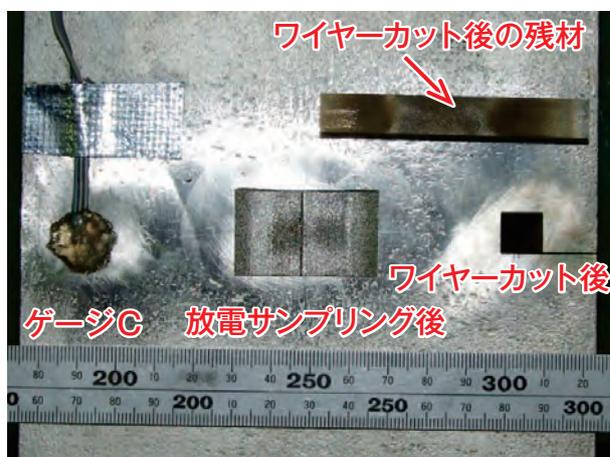
図4 残留応力測定状況

放電スキムカット法およびワイヤーカット法による残留応力測定結果を表3と4に示す。表3の測定値は前節の試験方法の手順(4)にて得られた値である。表3ではすき取った試料のひずみゲージ測定値から求めた測定値と予測値を比較している。表4では切り出した試料のひずみゲージ測定値から得られた測定値と予測値を比較している。なお、予測値とは、供試体の表面に取り付けたひずみゲージCの読み取り値から材料試験で得た応力-ひずみ線図を用いて負荷応力を求めて、その応力から弾性域の直線の傾きに平行に直線を下ろして応力がゼロになった時のひずみ量との差から理論的な解放ひずみ(解放応力)を求めた。以上に述べた方法の概要を図6に示す。

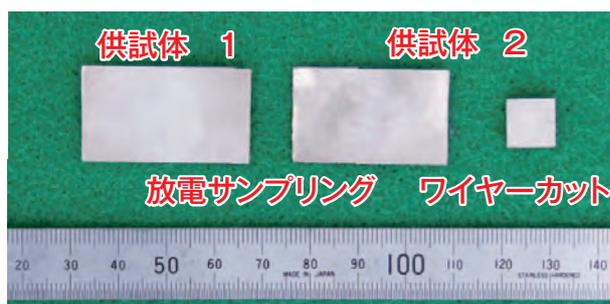
表3より、放電スキムカット法による測定値は、予測値と比較して20~40MPa低めの残留応力を見積った。負荷した応力200MPaのレベルに対して10~20%の測定誤差を含むこととなる。適用性を評価するためには、このような誤差が生じた原因を明らかにしておく必要がある。一方、表4よりワイヤー



(a) 試験実施前



(b) 試験実施後



(c) 採取したサンプル

図5 供試体の試験前後の外観と採取したサンプル

カット法による測定値は予測値に対して16MPaと大きめの値となった。ワイヤーカット法の測定誤差は供試体を塑性曲げした時に表面に発生した塑性ひずみの影響と思われる。放電スキムカット法の測定値はワイヤーカット法と比較すると幾分差が大きい。実用に供するにはワイヤーカット法と同程度に提案方法の測定精度を向上させる必要がある。そこ

表3 放電スキムカット法による残留応力測定結果と予測値

	負荷方法	負荷ひずみ (負荷応力)	解放ひずみ (残留応力)		測定値と 予測値の差	試料の寸法 (mm)
			測定値	予測値		
供試体1	弾性曲げ	503×10^{-6} (100MPa)	401×10^{-6} (65MPa)	503×10^{-6} (100MPa)	-22MPa	1.66t × 20w × 30L
供試体2	弾塑性曲げ	$1,526 \times 10^{-6}$ (197MPa)	813×10^{-6} (159MPa)	$1,004 \times 10^{-6}$ (195MPa)	-38MPa	1.36t × 20w × 30L

表4 ワイヤークット法による残留応力測定結果と予測値

	負荷方法	負荷ひずみ (負荷応力)	解放ひずみ (残留応力)		測定値と 予測値の差	試料の寸法 (mm)
			測定値	予測値		
供試体2	弾塑性曲げ	$1,718 \times 10^{-6}$ (208MPa)	$1,115 \times 10^{-6}$ (224MPa)	$1,067 \times 10^{-6}$ (208MPa)	+16MPa	1.5t × 10w × 10L

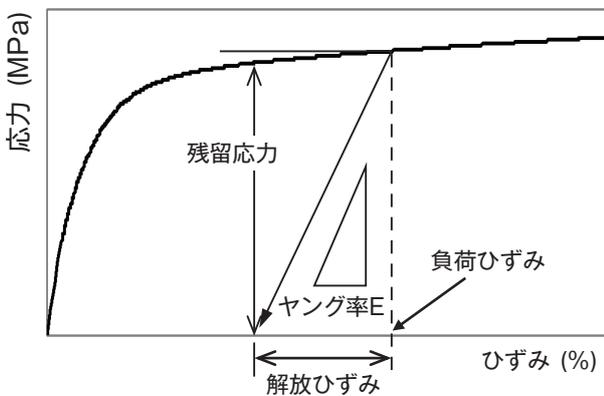
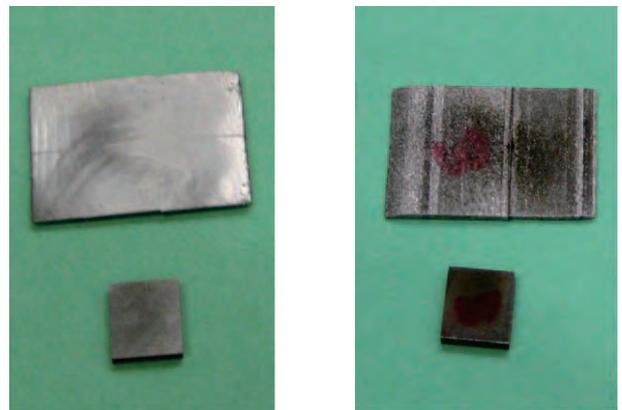


図6 残留応力の予測値の算定方法



(a) サンプルの表面 (b) サンプルの切断面

図7 供試体2から切り出したサンプルの外観
上, 放電サンプリング装置を使用
下, ワイヤークット法を使用

で、放電スキムカット法による測定値が低めであったこととワイヤークット法と比べて幾分大きい差が生じたことに対して検討した結果、放電加工による外乱（塑性ひずみの発生）の影響ではないかと推定した。陳ら⁽⁵⁴⁾は放電加工による昇温過程で圧縮の塑性ひずみが加工表面に生じる可能性を指摘している。このような放電加工による加工表面への影響の大きさは、放電加工条件に依存するので、陳らの指摘が一概に適用できるとは思われないが、図7に示すように本提案方法で得たサンプルについて調べると、未加工の外表面に比べて放電加工による切断面は明らかに粗い状態で、放電加工ラインの段差なども見られる。また、サンプルは放電加工側へ反り返るように鞍反りに変形していた。放電加工によりすき取るという工程は、ワイヤークット法に比べ大電流にて実施することは明らかなので、放電加工により発生する塑性ひずみの影響について評価しておく必要がある。なお、図7に示すように、ワイヤークット法によるサンプルの加工面は滑らかであった。

5. 放電加工による塑性ひずみの発生の影響評価

図8(a)に示すように供試体からポートサンプルをすき取る時に、陳ら⁽⁵⁴⁾が指摘するように、放電加工によってサンプルの切断側表面のごく薄い部分に、切削加工時に見られるような加工ひずみ（塑性ひずみ）が生じたとする。この時の塑性ひずみが測定される残留応力値へ及ぼす影響について検討した。

検討では図8(b)に示すようにポートサンプルを矩形断面の板にモデル化し、切断面に存在する圧縮塑性ひずみによる曲げ応力の大きさを評価した。

放電加工による圧縮塑性ひずみ⁽⁵⁴⁾はサンプルの加工面とは反対側表面に引張ひずみを生じさせる。これは残留応力測定の外乱となる。つまり、図9の点線のように評価されて算定応力に誤差が生じるこ

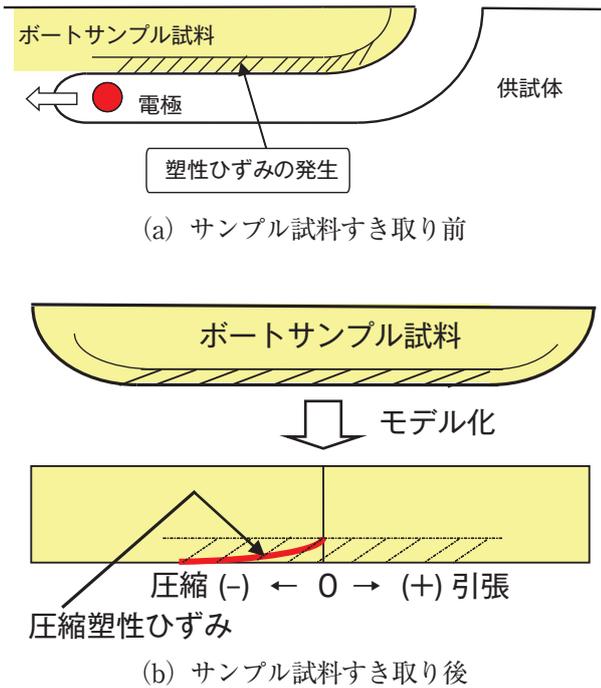


図8 放電加工による外乱（塑性ひずみ）のモデル化

とになる。

- ・ サンプル表面が引張応力の場合：過小評価
- ・ サンプル表面が圧縮応力の場合：過大評価

これらの検討結果から、放電加工により生じる塑性ひずみの大きさが残留応力へ及ぼす影響について感度解析を行なった。圧縮塑性ひずみがサンプルの切断側表面からある厚さまで均一に分布すると仮定して、このひずみによる反対側表面への曲げ応力を計算した。この計算では圧縮塑性ひずみの大きさとひずみが存在する厚さの二つのパラメータを変化させた。塑性ひずみの大きさは、文献 (54) と (55) を参考にして放電加工により発生する可能性のある塑性ひずみは0.2~5.0%程度と考えて、塑性ひずみの大きさを0.1から10.0%まで変化させた。サンプルの板厚を1, 2, 4, 6mmとした。図10にパラメータサーベイした結果を示す。試験で得たサンプルの全厚さは1.5mm前後であったので、図10の板厚1mmのケースにおいて、表3の残留応力の予測

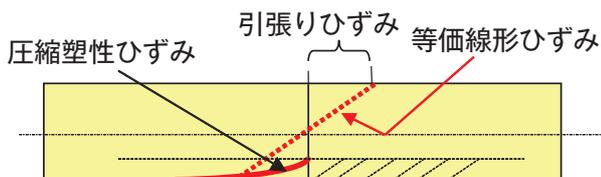


図9 放電加工により生じる塑性ひずみが残留応力に及ぼす影響の概念（表面残留応力を過小評価する場合）

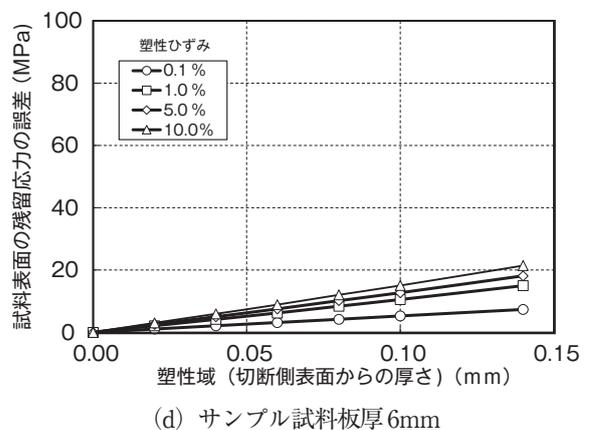
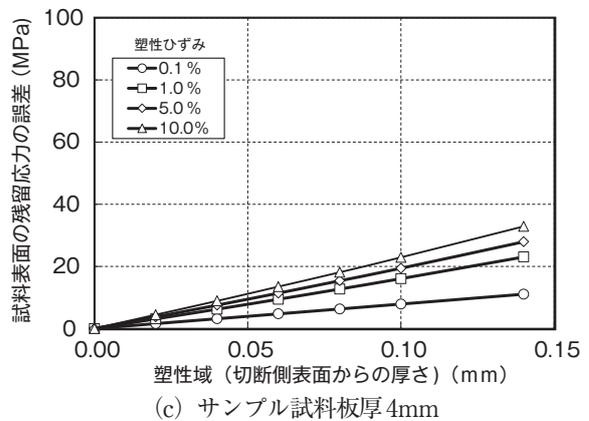
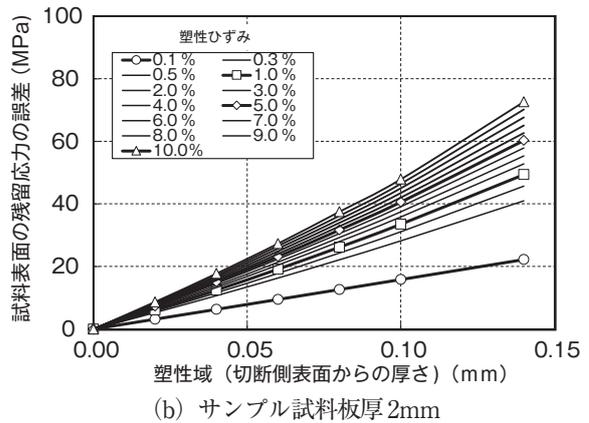
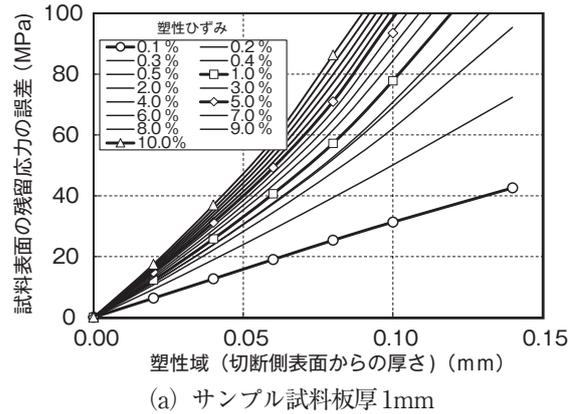


図10 放電加工による塑性ひずみの大きさが残留応力に及ぼす影響評価結果

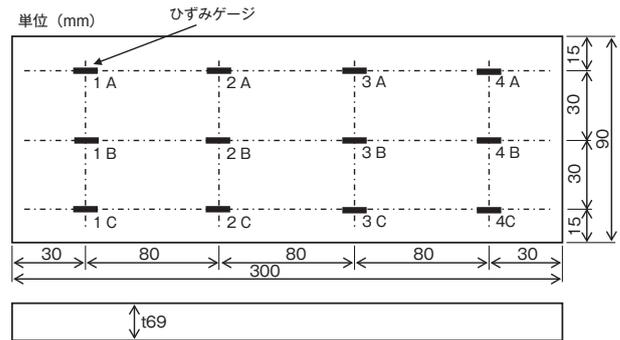
値に対する差から塑性域の厚みは0.05mmの厚さ程度の加工による影響が生じたと考えられた。また、サンプル厚さを変えた結果から、サンプルの厚さが大きいほど放電加工の影響は小さくなることが分かる。4mmの厚さであれば十分に影響が小さく、誤差が10MPa以下になる。このことから、提案する放電スキムカット法による残留応力測定をする場合にサンプルの厚さを4mm以上にすれば十分な測定精度が得られるものと推測された。

6. 最適測定条件の調査

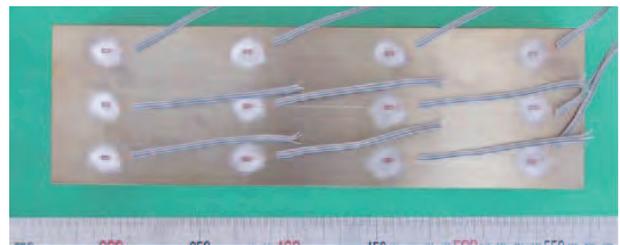
上記の検討から放電スキムカット法による残留応力測定では、ワイヤーカット法に比べ放電加工の影響が無視できないことがわかり、採取サンプル厚さを4mm以上にすれば従来のワイヤーカット法による残留応力測定と同程度の測定精度が確保されるものと推測された。この推定を確認するために、サンプル厚さを主パラメータにしてひずみゲージを貼り付けた測定表面へ放電加工の影響が及ばない厚さを実験的に調べた。

6.1 調査方法

放電スキムカット法による残留応力測定の精度向上のため、均一な低応力状態の供試体を用いて様々な板厚のサンプルを切り出し、放電サンプリング装置による放電加工の影響の生じない板厚条件を調べることとした。オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)平板を容体化処理(1,050℃×2hr)し、加工後無酸化応力除去焼なまし処理(550℃×3hr、炉冷)を行なったものを供試体として使用した。このような処理をすることで供試体製造時の残留応力を低く均一にした。図11に示すように供試体にA、B、Cの3箇所、ひずみゲージを各4列貼り付け、提案する放電スキムカット法と従来法であるワイヤーカット法の2つの方法で切り出し、切り出し時のひずみ変化を調べ、残留応力を測定した。放電スキムカット法では、長さ30mm、幅10mm、厚さ3～6mmのサンプルをすき取った。ワイヤーカット法では、サンプルを10×10mm角に切り出した後に、ワイヤーカット放電加工により厚さを変化させ、69、7、3、2、1mmの厚さにおいてひずみ変化量を測定した。



(a) 供試体の形状と寸法



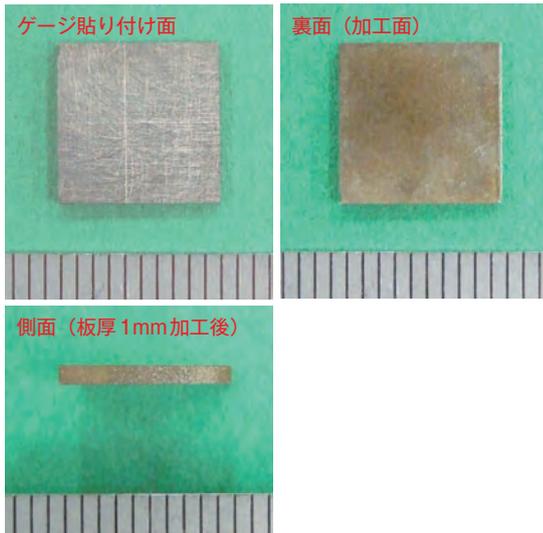
(b) 供試体の外観

図11 最適測定条件調査で使した供試体

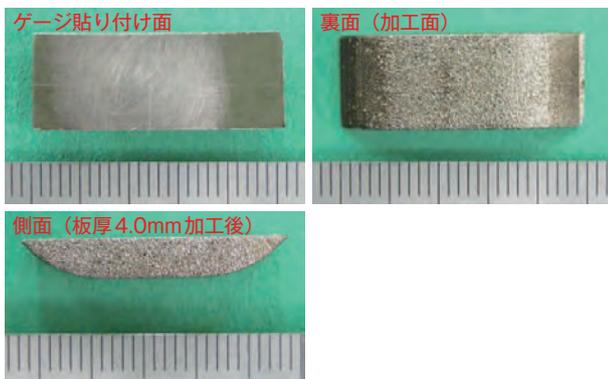
6.2 調査結果

放電サンプリング装置を用いた放電スキムカット法とワイヤーカット法による残留応力測定結果を図12と13に示す。図12は2つの方法で採取したサンプルの写真例を示す。放電スキムカット法では、放電サンプリング装置による切り出し板厚を3～5mmの範囲で試験を実施した。図13は2つの方法の測定値を比較する。図13に示すように、切り出し板厚が4mm前後まではワイヤーカット法と同等の残留応力値を示したが、4mmより薄くなり3mmとしたサンプルでは応力の急増が確認された。このことから、ワイヤーカット法と同等の測定精度を得るには、放電サンプリング装置による切り出し板厚を4mm以上にすればよいことがわかった。

図13にはワイヤーカット法による残留応力測定値と切り出し板厚との関係も示しているが、切り出しサンプルのサイズが10×10mmで板厚が7mm以上ではほとんど切断の影響を受けないことがわかる。その後、2～3mm程度までスライスしていくと応力はわずかに上下に変化するが、10MPa程度の範囲内である。さらに、スライスを進めて板厚を薄くすると応力が急増する。この限界は板厚1～2mmの間であった。この応力急増は局所的な放電切断熱により発生した塑性ひずみの影響と考えられる。放



(a) ワイヤークット法によるサンプル試料の外観



(b) 放電スキムカット法 (放電サンプリング装置使用) によるサンプル試料の外観

図12 採取したサンプル試料の例

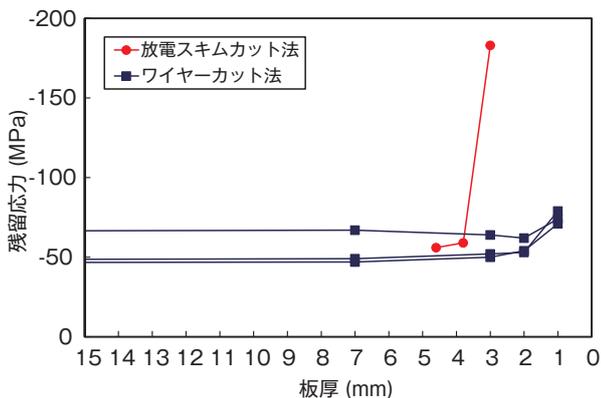


図13 残留応力測定結果の比較

電サンプリング装置とワイヤークットの2つの切断方法で急変する限界板厚が異なるのは、放電エネルギーの差によると考えられる。

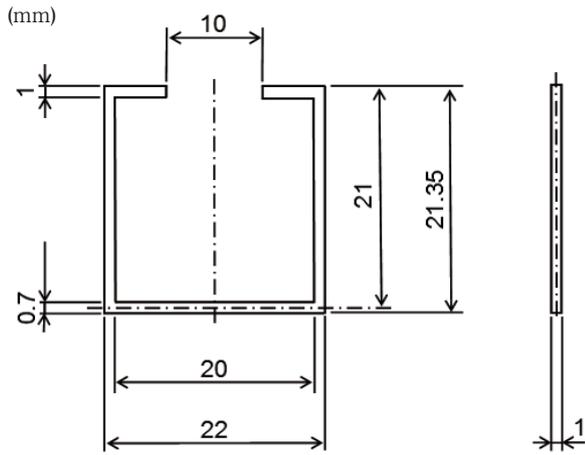
7. 実機適用のための改良

7.1 放電加工用電極の改良

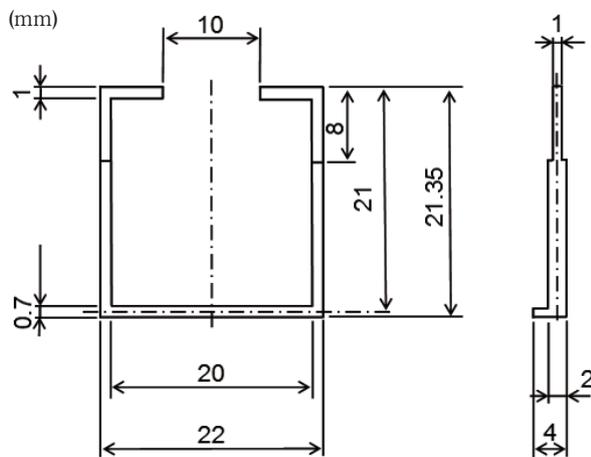
実機適用を考えた場合、ポートサンプルを確実に切り出すことが必要となる。6章の試験ではサンプルを確実にワンス・スルーで切り出せた収率は100%ではなかった。これは、高放射線および高汚染区域内での作業では大きな課題となる。6章の試験でサンプルをワンス・スルーにて切り出せなかった原因を調べると、放電加工の最終工程で、母材からの切り離されたサンプル部分が長くなり、サンプルと母材の未切断部つまりリガメントの長さが短くなった時に、切り離された部分が母材側へ落ち込み、電極との接触により短絡を起こして放電加工工程が中断していることがわかった。そこで、図14に示すように放電加工用の電極形状を改良した。図14(a)に示すように、改良前の電極形状は厚さ1mmのコの字形状である。図14(b)が改良形状であり、電極にテールを付けるとともに板厚を厚くした。この形状に改良することで、放電加工時の切断代は大きくなるが、放電加工時のサンプルの落ち込みによる短絡を回避することができた。

7.2 加工液への純水の適用

上記で述べた試験では、放電加工時の冷却や削り屑排出のために、加工液として油類を使用した。しかし、提案した方法の使用想定場所は、原子力プラントの高汚染区域であることから放射性廃棄物の低減が課題となる。放射性油類は処理に手間がかかることから、加工液として水が使用できることが望ましい。そこで、加工液に純水を使用できるように、放電加工条件を検討した。検討の結果から決定した純水を使う場合の加工条件を表5示す。さらに、油類を加工液に用いた場合との比較を示す。電極材料や放電時の極性を変更することで、純水の使用を可能とした。油類加工と比較しても加工時間はほとんど差がない。図15に純水加工と油類加工による放電加工処理後のサンプル切断面の写真を比較する。写真から加工による表面性状の違いはほとんど見られないことがわかる。したがって、放電加工条件を適切に設定すれば、加工液に純水を使用することが可能であり、加工時の切断表面性状への影響もないことがわかった。



(a) 基本形状



(b) 改良形状

図14 改良前後の放電加工用電極形状

表5 純水加工と油類加工の比較

	純水加工	油類加工
成分	純水：電気伝導率 1 μ S/cm以下	石油系炭化水素 (鉱油) 100質量%
加工条件	サンプル材質：炭素鋼 (SS400) 採取サンプル寸法 (mm)： 2.5t × 20w × 40L	
電極材料	銀タングステン	銅
極性	正極性	逆極性
電流設定値 (A)	6	5
加工時間 (min)	60	75

8. まとめ

本研究では、原子力プラントの高放射線および高汚染区域内の配管の残留応力を現場にて測定するために、放電スキムカット法と歪み量直接測定法の組



(a) 純水加工

(b) 油類加工

図15 純水加工と油類加工のサンプル切断面の比較

合せによる新しい測定法を提案した。この2つの方法の組合せにより、高放射線および高汚染区域内での測定作業が簡素化および迅速化されるため、測定時の大幅な被ばく低減を達成しつつ、従来法と同等の測定精度で残留応力を評価することができる。歪み量直接測定法の適用性は既報⁽²⁵⁾にて実施していることから、ここでは、放電スキムカット法の適用性を調べた。その結果、以下に示すように適用が原理的に可能であることを確認でき、提案する方法の実用可能の見通しが得られた。

- (1) 残留応力状態として静荷重を負荷した梁で模擬して、放電スキムカット法で残留応力測定を実施した。材料試験より得た応力-ひずみ線図をもとにした予測値と比較して、残留応力200MPaのレベルで10~20%の測定誤差を含むが、残留応力測定技術として原理的に成立することを明らかにした。
- (2) 放電サンプリング装置ですき取るサンプルの形状を工夫し、板厚4mm以上を確保して切り出すことで従来法のワイヤーカット法と同等の測定精度を確保できることを示した。
- (3) 高放射線区域内での測定を想定すると、確実にワンス・スルー切断にてポートサンプルを得る必要がある。ワンス・スルー切断のための放電加工用電極の形状改良を行った。
- (4) 高汚染区域内での放射性廃棄物低減を目的として、加工液として純水を使用できるように加工条件の最適化を行った。また、この条件による切断加工表面へ影響がないことを確認した。

9. 今後の課題

原子力プラントの高放射線区域や高汚染区域における残留応力の現場測定法として、放電スキムカッ

ト法と歪み量直接測定法の組合せを提案した。本研究により放電スキムカット法の適用可能性が示されたことから、提案する組合せの方法により現場測定は可能と結論される。実機適用にあたっては、2つの方法を組合せての総合的な測定精度の確認や測定作業の操作性の検証を実施する必要がある。

謝辞

放電スキムカット法の適用性試験の実施にあたり、野田満靖研究員と大厩徹研究員（いずれも現関西電力株）、釜谷昌幸主任研究員の協力があった。ここに記して謝意を表する。

文献

- (1) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 維持規格 (2012年度版), JSME S NA1 - 2012, 日本機械学会, (2012).
- (2) Dong, P. and Brust, F.W., "Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: A Millennium Review and Beyond," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.122, (2000), pp.329-338.
- (3) Ghosh, S. Rana, V.P.S., Kain, V., Mittal, V. and Baveja, S.K., "Role of Residual Stresses Induced by Industrial Fabrication on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steel," *Materials and Design*, Vol.32, (2011), pp.3823-3831.
- (4) Bamford, W. and Hall, J., "A Review of Alloy 600 Cracking in Operating Nuclear Plants Including Alloy 82 and 182 Weld Behavior," *Proceedings of 12th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE12-49520, (2004).
- (5) Rao, G., Moffatt, G. and McIlree, A., "Metallurgical Investigation of Cracking in the Reactor Vessel Alpha Loop Hot Leg Nozzle to Pipe Weld at the V.C. Summer Station," *Fontevraud 5*, 2002.
- (6) 高原省五, 渡辺憲夫, "米国の加圧水型原子力発電所における Alloy600 製圧力バウンダリー構成機器の 1 次冷却水応力腐食割れ事例の傾向分析," *日本原子力学会和文論文集*, Vol.5, No.4 (2006), pp.282-291.
- (7) Nakamura, T., Taniguchi, K., Hirano, S., Narita, M. Sato, T., "Stress Corrosion Cracking in Welds of Reactor Vessel Nozzle at OHI-3 and of Other Vessel's Nozzle at Japan's PWR Plants," *Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference (PVP2009)*, PVP2009-77344, (2009).
- (8) Benson, M., Rudland, D. and Csontos, A., "Weld Residual Stress Finite Element Analysis Validation: Part 1 - Data Development Effort," *U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC)*, NUREG-2162, (2014).
- (9) 奥田恭令, "軽水炉の熱疲労による不具合事象の分析," *INSS JOURNAL*, Vol.7, (2000), pp.88-99.
- (10) Shibamoto, H., Kasahara, N., Morishita, M., Inoue, K. and Jimbo, M., "Research and Development of Guidelines for Thermal Load Modeling," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.238, (2008), pp.299-309.
- (11) Shah, V.N., Sattison, M.B., Atwood, C.L., Ware, A.G., Grant, G.M. and Hartley, R.S., "Assessment of Pressurized Water Reactor Primary System Leaks," *U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC)*, NUREG/CR-6582, (1998).
- (12) U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Cracking in Piping of Makeup Coolant Lines at B&W Plants," *Information Notice No. 82-09*, (1982).
- (13) U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Safety Injection Pipe Failure," *Information Notice No. 88-01*, (1988).
- (14) Duff, J.A.L., Tacchini, B., Stephan, J.M., Tampigny, R., Fissolo, A. and Vincent, L., "High Cycle Thermal Fatigue Issues in RHRS Mixing Tees and Thermal Fatigue Test on a Representative 304 L Mixing Zone," *Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference (PVP2011)*, PVP2011-57951,

- (2011).
- (15) 関西電力株式会社, “美浜発電所 2 号機の点検結果について (余剰抽出水系統配管からの漏えいの原因と対策),” プレスリリース 1999 年分, <http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/1999/0525-lj.html>, (1999).
- (16) 九州電力株式会社, “玄海原子力発電所 2 号機第 20 回定期検査の状況について (余剰抽出配管ひび割れの原因と対策),” プレスリリース 2007 年分, http://www.kyuden.co.jp/press_070216b-1.html, (2007).
- (17) 笠原直人, 林眞琴, “原子炉構造物の熱疲労に関する研究の現状と課題,” 日本機械学会論文集 A 編, 78 巻, 789 号 (2012), pp.583-598.
- (18) Ueda, Y., Murakawa, H., Nakacho, K. and Ma, N.X., “Establishment of Computational Welding Mechanics,” Transactions of JWRI, Vol.24, No.2 (1995), pp.73-86.
- (19) 芹澤久, “溶接変形および残留応力評価,” 溶接学会誌, 第 76 巻, 第 5 号 (2007), pp.103-105.
- (20) Ueda, Y., Murakawa, H. and Ma, N., Welding Deformation and Residual Stress Prevention, Elsevier, (2012).
- (21) Ford, F.P., “Mechanism of Environmentally-Assisted Cracking,” International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.40, (1989), pp.343-362.
- (22) Lindgren, L.E., “Numerical Modelling of Welding,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.195, (2006), pp.6710-6736.
- (23) Goldak, J. and Asadi, M., “Challenges in Validation of Computational Weld Mechanics Code to Compute Residual Stress and Distortion in Welds,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.136, (2014), 011201-1-011201-8.
- (24) 前川晃, 芹澤久, 村川英一, “溶接残留応力解析の米国 NRC 国際ラウンドロビンへの参加 - PWSCC 防止プログラムにおける応力解析と検証 -,” INSS JOURNAL, Vol.19, (2012), pp.50-64.
- (25) 戸塚信夫, 酒井俊治, 中島宣雄, 光田弘道, “歪み量直接測定による残留応力測定技術の開発,” INSS JOURNAL, Vol.4, (1997), pp.89-96.
- (26) 日本非破壊検査協会, 非破壊検査シリーズ ひずみ測定 III, 日本非破壊検査協会, (1989), pp.71-72.
- (27) 岩田光正, 小川潤一郎, “新しい残留応力測定技術 (I),” 溶接学会誌, 第 64 巻, 第 6 号 (1995), pp.432-436.
- (28) Withers, P.J., Turski, M., Edwards, L., Bouchard, P.J. and Buttle, D.J., “Recent Advances in Residual Stress Measurement,” International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.85, (2008), pp.118-127.
- (29) Naveed, N., Hosseinzadeh, F. and Kowal, J., “Residual Stress Measurement in a Stainless Steel Clad Ferritic Plate Using the Contour Method,” Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2013), PVP2013-97101, (2013).
- (30) Takahashi, E., Iwai, K. and Satoh, K., “A Method of Measuring Triaxial Residual Stress in Heavy Section Butt Weldments,” Transactions of the Japan Welding Society, Vol.10, No.1 (1979), pp.36-45.
- (31) 岩井健治, 高橋英司, 佐藤邦彦, “厚板の新しい軸対称残留応力測定法,” 溶接学会論文集, 第 3 巻, 第 1 号 (1985), pp.196-203.
- (32) 上田幸雄, 福田敬二, 中長啓治, 円道節夫, “残留応力の有限要素法に基づく測定原理と推定値の信頼性,” 日本造船学会論文集, 第 138 号 (1975), pp.499-507.
- (33) 前川晃, 中長啓治, 麻寧緒, 佐藤玲子, “固有ひずみ法を用いた大口径ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の残留応力測定,” 日本機械学会論文集 A 編, 77 巻, 777 号 (2011), pp.713-717.
- (34) 中長啓治, 前川晃, 佐藤玲子, 笠原憲文, 青木恵介, “原子炉厚板冷却材配管溶接継手の 3 次元残留応力分布の固有ひずみ法による測定,” 溶接学会論文集, 第 29 巻, 第 4 号 (2013), pp.335-345.
- (35) 日本非破壊検査協会, 非破壊検査シリーズ ひずみ測定 III, 日本非破壊検査協会, (1989), pp.72-75.
- (36) 三上隆男, “穿孔法による構造部材の内部残

- 留応力測定技術,” 日本機械学会誌, Vol.117, No.1143 (2014), p.45.
- (37) Huang, X., Liu, Z. and Xie, H., “Recent Progress in Residual Stress Measurement Techniques,” *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol.26, No.6 (2013), 570-583.
- (38) Leggatt, R.H., Smith, D.J., Smith, S.D. Faure, F., “Development and Experimental Validation of the Deep Hole Method for Residual Stress measurement,” *Journal of Strain Analysis*, Vol.31, No.3 (1996), pp.177-186.
- (39) Kingston, Ed., Smith, D. and Watson, C., “Measurement of Residual Stress in Tube Penetration Welds for Ferritic Steel Hemispherical Pressure Vessel Heads,” *Transactions of SMiRT 19*, Paper#D04/3.
- (40) Withers, P.J. and Bhadeshia, H.K.D.H., “Residual Stress Part 1 – Measurement Techniques,” *Materials Science and Technology*, Vol.17, (2001), pp.355-365.
- (41) 秋庭義明, “回折を利用した応力・ひずみ測定,” 日本機械学会誌, Vo.117, No.1145 (2014), pp.225-227.
- (42) Rund, C.O., “A Review of Selected Non-Destructive Method for Residual Stress Measurement,” *NDT International*, (1982), pp.15-22.
- (43) Matzkanin, G.A. and Yolken, H.T., “A Review of Techniques for Nondestructively Characterizing Residual Stress in Metals,” *Proceedings of the ASME 2001 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2011)*, PVP-Vol.429, pp.1-8.
- (44) 林真琴, “中性子回折法による構造物内部の残留応力測定,” 日本機械学会論文集A編, 67巻, 655号 (2001), pp.363-369.
- (45) 鈴木裕士, 秋田貢一, “回折法による材料評価の新しい展開 3. 中性子応力測定の新展開,” 材料, Vol.58, No.12 (2009), pp.1051-1057.
- (46) Kudryavtsev, Y., “Ultrasonic Measurement of Residual Stresses in Welded Specimens and Structures,” *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2013)*, PVP2013-97184, (2013).
- (47) 鈴木裕士, T.M. Holden, 盛合敦, 皆川宣明, 森井幸生, “中性子回折法による高張力鋼突合せ溶接材の残留応力評価,” 材料, Vol.54, No.7 (2005), pp.685-691.
- (48) 前川晃, 大厩徹, 野田満靖, 高橋茂, “X線回折法による集合組織を有する曲がり配管の残留応力測定,” 日本機械学会2009年度年次大会講演論文集, S0304-1-4, (2009), pp.213-214.
- (49) Maekawa, A., Takahashi, T., Tsuji, T., Suzuki, H. and Moriai, A., “Stress-Free Reference for Neutron Diffraction Measurement of Residual Stress in Butt-Welded Joints of Austenitic Stainless Steel Pipes,” *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.6, No.9 (2012), pp.950-964.
- (50) 三菱重工株式会社, 構造物からのサンプル採取方法, 特開平9-150318, 1997-6-10.
- (51) 石川島検査計測株式会社, サンプル採取用放電加工装置, 特開平9-210882, 1997-8-15.
- (52) 株式会社湊川金属テストピース製作所, 材料掬取装置, 特許第3996182号, 2007-8-10.
- (53) 株式会社神戸工業試験場, “放電サンプリング装置,” 日本機械学会誌, Vo.111, No.1076 (2008), p.48.
- (54) 陳俊, 寺崎俊夫, 秋山哲也, 岸部勝彦, “固有ひずみ法による残留応力推定値に及ぼす切削加工ひずみの影響,” 溶接学会論文集, 第14巻, 第4号 (1996), pp.762-767.
- (55) 名古屋産業科学研究所, 航空エンジン部品等大型部品・複雑形状部品のワイヤ放電加工技術高度化の研究開発 平成22年度 研究開発研究成果等報告書, (2011).