

RPV 監視試験片の再生方法における 電子ビーム溶接の適用性評価

Evaluating the Applicability of Electron Beam Welding to Reconstitution Method of RPV Surveillance Test Specimen

株式会社 東芝	山岡 鉄史	Tetsushi YAMAOKA
株式会社 東芝	森島 康雄	Yasuo MORISHIMA
株式会社 東芝	小川 琢矢	Takuya OGAWA
日立 GE ニュークリア・エナジー 株式会社	豊田 哲也	Tetsuya TOYOTA
株式会社 日立製作所	石寄 貴大	Takahiro ISHIZAKI
日本核燃料開発 株式会社	櫻谷 誠司	Seiji SAKURAYA
東京電力ホールディングス 株式会社	神長 貴幸	Takayuki KAMINAGA
東京電力ホールディングス 株式会社	大木 俊	Suguru OOKI

Abstract

Additional RPV surveillance tests are required to extend the operation license of nuclear power plants under the new regulation. Since the number of surveillance test specimens is limited, it is important to establish a reconstitution technique of the surveillance test specimen using the remaining undeformed part of the tested specimen. To evaluate the applicability of electron beam welding, the confirmatory tests such as Charpy impact tests were conducted using unirradiated test specimens reconstituted by the electron beam welding.

Keywords: Reactor pressure vessel, Low alloy steel, Surveillance test, Charpy impact test, Reconstitution method of test specimen, Electron beam welding

1. 背景・目的

1.1 背景

原子炉圧力容器（以下、RPV という。）構造材における供用期間中の中性子照射による機械的性質の変化を確認するため、炉内には監視試験片が備えられており、監視試験片を用いた監視試験を行うに当たっては、「原子炉構造材の監視試験方法」[1]（以下、JEAC4201 という。）に基づき実施するよう定められている[2]。一方で、東日本大震災後、原子力利用に係る安全規制体制の見直しが行われ、原子力発電所の運転期間の延長認可申請を行う場合には、追加の監視試験の実施が求められている。監視試験片の数は限られているため、試験後の試験片残材を有効活用することが重要となっており、残材を用いた試験片の再生が考えられている。

JEAC4201 には監視試験片の補充等を目的として、照射履歴のある試験後試験片の未変形部分を用いた監視試験片の再生方法について定められている。図1にシャルピー衝撃試験片の再生手順の模式図を示す。（以下、建設時に製作され炉内に装荷されている再生していない監視試験片をオリジナル試験片、再生後の監視試験片を再生試験片という。）再生方法の手順としては、まず試験後のオリジナル試験片から採取した未変形部分をRPV炉内へ再装荷し追加照射を行い、炉内から取出し後に再生試験片の試験部位となるインサート材に加工する。その後、インサート材の両側に補完材であるタブ材を溶接等により接合することにより再生試験片を製作する。

試験片再生時の接合方法として電子ビーム溶接の適用が検討されているが、実際の監視試験片再生への適用にあたっては、JEAC4201 附属書CのC-2200項に記載の「接合方法の確認試験方法」に従い、予め試験により以下の(1)および(2)を満足するとともに(3)および(4)を実施する必要がある。

- (1) 接合後、目視試験および断面観察を行い、接合部に有害な割れまたは融合不良のないことを確認する。

連絡先:山岡鉄史、〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町8、(株)東芝 原子力機械システム設計部 材料・化学技術担当

E-mail: tetsushi.yamaoka@toshiba.co.jp

- (2) 接合部の強度が十分であることを確認するため、再生試験片を用いて、上部棚吸収エネルギー領域の温度で衝撃試験又は破壊じん性試験を実施し、接合部から破壊しないことを確認する。
- (3) 熱影響部幅を測定する。
- (4) インサート部の温度履歴を計測または解析により求め、熱回復幅を求める。

また、監視試験片を再生する場合において、再生方法以外の課題として JEAC4201 における溶接熱影響部（以下、HAZ という。）試験片の採取位置要求が挙げられる。監視試験片は供試材の種類で母材試験片、HAZ 試験片、溶接金属試験片に分類され、各試験片で供試材からの板厚方向採取位置が定められている。図2に監視試験片の採取位置の模式図を示す。供試材の板厚を t として、母材試験片と HAZ 試験片は $(1/4)t$ 位置、溶接金属試験片はルート部及び表面より 13mm 以上離れた位置から採取するよう定められており、各試験片に含まれる溶接金属や HAZ の位置関係から、HAZ 再生試験片のインサート材は、 $(1/4)t$ 位置以外から採取された溶接金属試験片の HAZ 部を活用する必要が生じる。

1.2 目的

本研究では、監視試験片再生の接合方法として検討している電子ビーム溶接の適用性を評価することを目的に、シャルピー衝撃試験片を対象として JEAC4201 に準拠した接合方法の確認試験を行った。さらに、試験片再生有無による衝撃特性への影響確認を行うため、再生試験片および再生していない試験片（以下、未再生試験片という）を用いた衝撃試験を行った。

また、 $(1/4)t$ 以外から採取された HAZ 部を用いた HAZ 試験片の再生を想定し、HAZ 試験片の板厚方向採取位置の違いによる衝撃特性等への影響確認試験を行った。

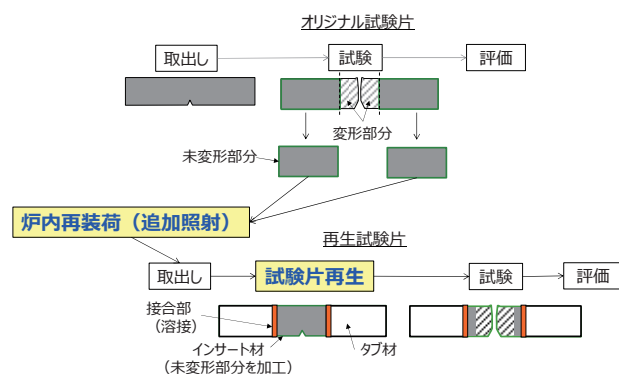


図1 シャルピー衝撃試験片の再生手順の模式図

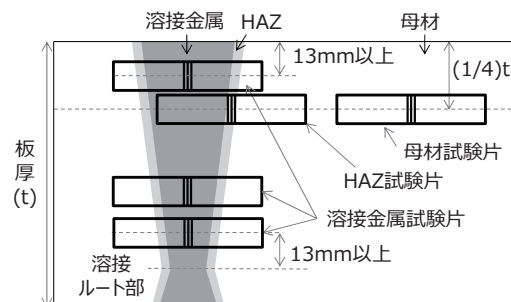


図2 監視試験片の採取位置の模式図

2. 試験片

2.1 供試材

供試材は未照射の母材（低合金鋼 SQV2A（JIS G 3120（2003））および溶接継手（母材 SQV2A、溶接材料 YS-NM1（JIS Z 3351（2012）））である。表1に母材の化学成分、表2に母材の機械的性質、表3に溶接材料の化学成分を示す。母材および溶接材料ともに JIS に規定されている化学成分および機械的性質を満足している。実際の監視試験片の供試材と同様に、溶接継手は溶接後に溶接後熱処理を実施し、母材に対しても同条件の熱処理を行った。

母材は接合技術確認および試験片再生有無の影響確認に供し、溶接継手は HAZ 試験片の板厚方向採取位置の影響確認に供した。

表1 母材の化学成分

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cu
溶鋼分析	規格値 JIS G 3120 (2003) SQV2A	0.25 以下	0.15 ~ 0.40	1.15 ~ 1.50	0.030 以下	0.030 以下	0.40 ~ 0.70	0.45 ~ 0.60	-
	実績値	0.18	0.27	1.44	0.003	0.003	0.65	0.51	0.01
製品分析	規格値 JIS G 3120 (2003) SQV2A	0.25 以下	0.13 ~ 0.42	1.10 ~ 1.55	0.030 以下	0.030 以下	0.37 ~ 0.73	0.41 ~ 0.64	-
	実績値	0.17	0.26	1.40	0.003	0.002	0.65	0.50	0.02

表2 母材の機械的性質

	引張強さ N/mm ²	耐力 N/mm ²	伸び %	シャルピー吸収エネルギー J (2mmVノッチ、4°C)			
				個別値	3個の平均		
規格値 JIS G 3120 (2003)	550~ 690	345以上	18以上	34以上	40以上		
実績値	589	449	28	256	250	227	244

表3 溶接材料の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo
規格値 JIS Z 3351(2012) YS-NM1	0.15 以下	0.60 以下	1.30~ 2.30	0.018 以下	0.018 以下	0.20 以下	0.40~ 1.75	0.30~ 0.70
実績値	0.09	0.15	2.10	0.005	0.001	0.11	0.77	0.45

2.2 試験片

図3に再生試験片の接合手順を示す。電子ビーム溶接を用いた試験片の接合時は、まず、インサート材およびタブ材の接合面を接触させ、接合面がずれないように押

さえ材で保持した後に、図3に示すようにノッチ面および裏面からそれぞれ2パスで溶接接合する手順とした。再生試験片形状はオリジナル試験片と同サイズ(10mm×10mm×55mm)のVノッチシャルピー衝撃試験片とした。再生試験片の試験部となるインサート材は(1/4)tより採取し、採取方向はJEAC4201の衝撃試験片に準拠した。接合後に押さえ材および溶接ビードの盛り上がり部を機械加工により除去し、JEAC4201の再生した衝撃試験片の寸法要求を満足するよう試験片を製作した。未再生のシャルピー衝撃試験片はJIS Z2242(2005)に準拠し製作した。

図4はHAZ試験片の板厚方向採取位置の影響確認試験における試験片採取位置を示している。板厚をt(167mm)とし、HAZ試験片の採取位置の基準ある(1/4)tの他、(1/8)t、(3/8)tならびに(1/2)tの位置から試験片を採取した。

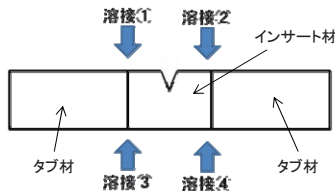


図3 再生試験片の接合手順

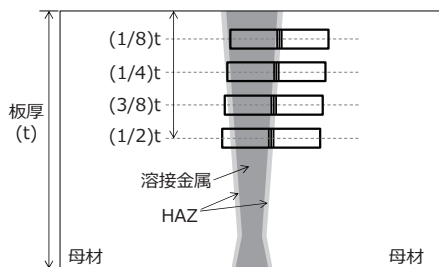


図4 HAZ試験片の板厚方向採取位置の影響確認試験における試験片採取位置

3. 試験結果

3.1 接合技術確認

JEAC4201の接合方法の確認試験方法に基づき電子ビーム溶接の接合技術確認を行った。インサート長さ(W_a)は10mmおよび14.4mmの2条件とした。

3.1.1 目視試験／断面観察

図5に接合後の外観写真、図6に接合部の断面観察写真を示す。いずれも W_a が14.4mmの例である。図6は溶接方向に直行する断面であり、硝酸ナイタールエッチングを施している。 W_a が10mmおよび14.4mmのインサート材を用いてそれぞれ3本ずつ製作した再生試験片に対し目視試験および断面観察を行った結果、すべての接合部で割れや融合不良は確認されなかった。また、上下か

らの電子ビーム溶接により試験片内部まで完全に溶込み接合されていることを確認した。

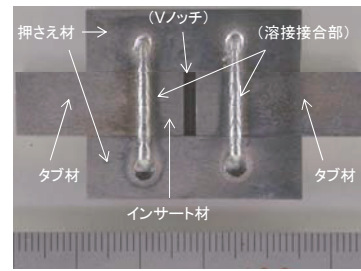


図5 接合後の外観写真

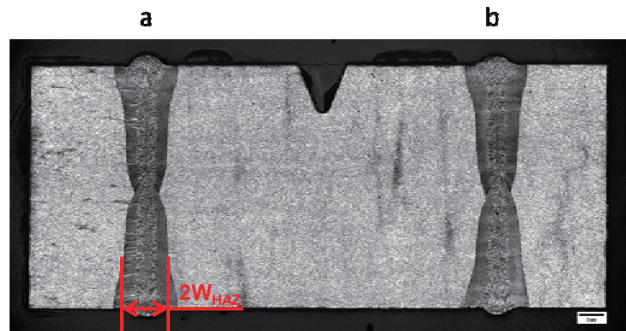


図6 接合部の断面観察写真

3.1.2 再生試験片の試験

再生試験片を用いて上部棚吸収エネルギー領域の温度でシャルピー衝撃試験を実施した。試験温度は室温、50℃、100℃とし繰返し数は3とした。表4に接合技術確認試験におけるシャルピー衝撃試験結果を示す。室温(19℃)は上部棚から遷移領域に入る境界と考えられ、延性破面が100%のものと100%未満のものがあった。一方で、温度50℃および100℃は、上部棚吸収エネルギー領域の温度と考えられ、全ての試験片で延性破面率は100%であった。図7にシャルピー衝撃試験後の試験片外観を示す。 W_a が10mmおよび14.4mmの全ての再生試験片において、接合部からの破断は無く、接合部の強度が十分であることを確認した。

表4 接合技術確認試験におけるシャルピー衝撃試験結果

W_a (mm)	試験 温度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	横膨出量 (mm)	延性 破面率 (%)
10	19(室温)	151	1.94	90
	19(室温)	141	1.84	85
	19(室温)	185	2.14	100
	50	181	2.14	100
	50	182	2.14	100
	50	191	2.04	100
	100	208	2.30	100
	100	207	2.27	100
14.4	100	206	2.28	100
	19(室温)	189	2.23	100
	19(室温)	179	2.15	100
	19(室温)	161	2.03	75
	50	199	2.28	100
	50	202	2.31	100
	50	185	2.17	100
	100	214	2.31	100
100	213	2.22	100	
100	218	2.43	100	

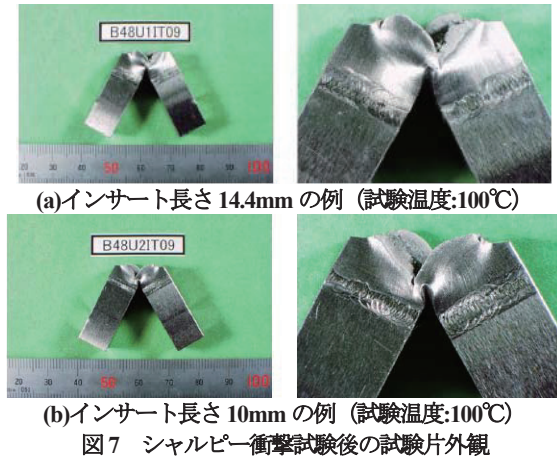


図7 シャルピー衝撃試験後の試験片外観

表5 接合部の硬化領域と W_{HAZ} の比較

試験片番号 (インサート 長さ(mm))	表面から の距離 (mm)	接合部 硬化領域 a側 (mm)	接合部 硬化領域 b側 (mm)	硬化領域 平均値 (mm)	硬化領域 想定 W_{HAZ} (mm)	計測 W_{HAZ} (mm)
B48U1MC01 (14.4)	2.5	1.6	1.6	1.5	0.75	0.8
	5.0	1.2	1.2			
	7.5	1.6	1.6			
B48U1MC02 (14.4)	2.5	1.6	1.8	1.5	0.75	0.8
	5.0	1.4	1.2			
	7.5	1.6	1.6			
B48U1MC03 (14.4)	2.5	1.6	1.6	1.4	0.7	0.8
	5.0	0.8	1			
	7.5	1.6	1.6			
B48U2MC01 (10)	2.5	1.6	1.6	1.4	0.7	0.8
	5.0	1.0	1.0			
	7.5	1.6	1.6			
B48U2MC02 (10)	2.5	1.4	1.6	1.4	0.7	0.8
	5.0	1.0	1.0			
	7.5	1.6	1.6			
B48U2MC03 (10)	2.5	1.6	1.6	1.5	0.75	0.8
	5.0	1.0	1.4			
	7.5	1.6	1.6			

3.1.3 熱影響部幅 (W_{HAZ}) 計測

断面観察を行った試験片6本に対して、熱影響部幅 (W_{HAZ}) を計測した。なお、図6に示しているように、エッチングによる着色で確認できる接合面両側の熱影響部の幅が $2W_{HAZ}$ であり、 W_{HAZ} は片側分の幅と定義される。 W_{HAZ} の計測ラインはシャルピー試験片の高さ10mmを h とした場合の $(1/4)h$ 、 $(1/2)h$ 、 $(3/4)h$ (ノッチ側表面から2.5mm、5mm、7.5mmの深さ位置) の3ラインであり、2か所の接合部に対して計測し、平均値を各試験片の W_{HAZ} とした。計測の結果、インサート長さによらず全ての試験片で W_{HAZ} は0.8mmであった。

断面観察により計測した W_{HAZ} と溶接接合による硬化領域の関係を把握するため、接合部のビッカース硬さ測定 (測定荷重: 0.98N) を実施した。硬さ測定は、 W_{HAZ} 計測ライン上に対し、接合面から±3mmの範囲を0.2mmピッチで実施した。図8に W_{HAZ} 計測ライン上の硬さ測定結果を示す。表5に接合部の硬化領域と W_{HAZ} の比較を示す。接合部近傍では溶接の熱影響により硬化する領域が確認され、硬化領域の平均値は1.4mm~1.5mmであった。硬化領域を基に想定される W_{HAZ} は0.7mm~0.75mmとなり、断面観察において計測した W_{HAZ} である0.8mmと概ね一致した。

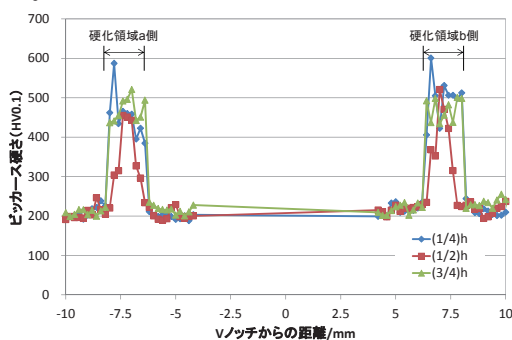


図8 W_{HAZ} 計測ライン上の硬さ測定結果

3.1.4 熱回復幅 (W_{ANL}) 計測

熱回復幅 (W_{ANL}) は、接合した際の熱履歴によりインサート材の照射脆化が熱回復する幅と定義されている。本研究では熱回復パラメータから求める W_{ANL} 算出方法に準拠し W_{ANL} を評価しており、熱回復パラメータは”Abaqus”の3次元熱伝導解析を用いた試験片内の過渡温度履歴評価を基に算出した。なお、接合時の試験片の実温度の確認および熱伝導解析の妥当性確認のため、接合中のインサート材の過渡温度履歴を測定しており、長手方向と直交する10mm角の正方形面の中央部 (試験片表面から5mmの深さ) に穴をあけ、K型シーす熱電対 (常用限度: 500°C) を設置しインサート材内部の温度を測定した。図9は溶接接合時の過渡温度履歴の測定および解析結果を示しており、凡例 () 内は接合面からの距離を表している。測定値と解析値を比較すると、接合面から1.5mmの位置において良く一致している。接合面からの距離がほぼ等しい測定値 (1.9mm) と解析値 (2mm) では、過渡温度の時間応答に違いがみられるものの、最高到達温度はほぼ等しい結果であった。以上より、解析結果は測定結果と概ね同様であり、インサート材の過渡温度履歴を解析によりよく模擬できていると考えられる。図10に熱伝導解析結果を基にした熱回復パラメータと接合面からの距離の関係を示す。ここで、熱回復が無視できるとみなされる熱回復パラメータ最大値は42とされており、その際の接合面からの距離が熱回復幅とされている。図10より、熱回復幅は0.81mmと評価された。ここで、解析における熱影響部の幅 (Ac1変態点 (700°C) 以上に到達した領域と定義) は接合面から0.5mmの範囲であった。すなわち、熱影響部の端部からさらに母材側に0.31mm離れた領域まで熱回復しているとみなされ、この領域を熱回復領域の幅とする。一方、3.1.3項で断面

観察により計測した熱影響部幅(W_{HAZ})は0.8mmであり、解析上の熱影響部の幅0.5mmより広い領域であった。そのため、本研究では計測した W_{HAZ} である0.8mmに熱回復領域の幅0.31mmを加えたものを熱回復幅(W_{ANL})とし、 W_{ANL} は1.1mmと評価した。

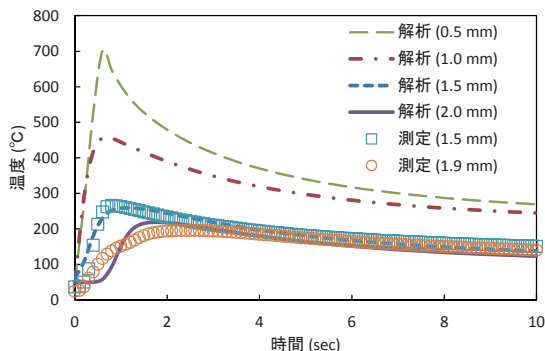


図9 溶接接合時の過渡温度履歴の測定および解析結果

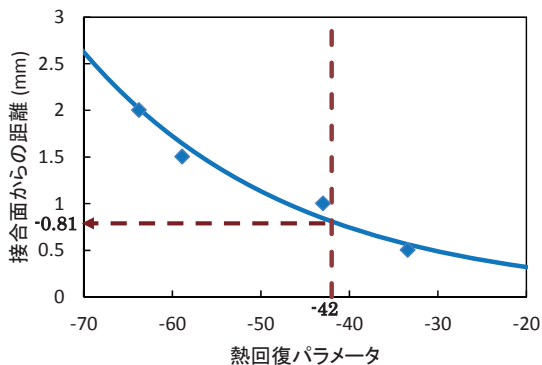


図10 熱回復パラメータと接合面からの距離の関係

3.1.5 接合技術確認まとめ

電子ビーム溶接を用いた試験片の接合部で有害な割れや融合不良は認められず、また、衝撃試験において十分な強度を有しており、JEAC4201の接合方法の確認試験の要求を満足することを確認した。また、熱影響部幅(W_{HAZ})は0.8mm、熱回復幅(W_{ANL})は1.1mmと評価した。

3.2 試験片再生有無の影響確認

再生試験片および未再生試験片を用いてシャルピー衝撃試験を実施した。再生試験片のインサート長さは14.4mmとした。表6に再生/未再生試験片のシャルピー衝撃試験結果を示す。図11に再生/未再生試験片のシャルピー衝撃試験結果の比較を示す。図中の遷移曲線は、JEAC4201にも記載されている双曲線関数により作成しており、再生試験片と未再生試験片の遷移曲線はよく一致している。図11の遷移曲線より、実機の監視試験で評価対象となる関連温度(Tr_{30} : 41Jの吸収エネルギーに対応する温度)および上部棚吸収エネルギー(E_{max} : 延性破

面率100%の吸収エネルギーの平均値)を比較評価した。 Tr_{30} は再生試験片で-72°C、未再生試験片で-67°C、 E_{max} は再生試験片で205J、未再生試験片で222Jであり、いずれも再生試験片と未再生試験片で概ね同等の値を示した。

以上より、再生試験片の衝撃特性は未再生試験片の結果と同等であり、電子ビーム溶接を用いた監視試験片再生による衝撃特性への影響はなく、監視試験片再生の接合方法として電子ビーム溶接が適用可能であることを確認した。

表6 再生/未再生試験片のシャルピー衝撃試験結果

試験片再生有無	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (J)	横膨出量 (mm)	延性破面率 (%)
再生試験片	1	-120	5	0.14	5
	2	-60	31	0.55	10
	3	-60	100	1.46	25
	4	-40	103	1.49	45
	5	-40	102	1.51	45
	6	-20	173	2.18	65
	7	-20	150	2.18	60
	8	0	186	2.38	85
	9	0	158	2.07	70
	10	40	209	2.35	100
	11	40	206	2.37	100
	12	60	200	2.28	100
未再生試験片	1	-120	11	0.23	5
	2	-60	78	1.13	20
	3	-60	72	1.03	20
	4	-40	39	0.60	15
	5	-40	106	1.53	40
	6	-20	113	1.51	45
	7	-20	131	1.75	50
	8	0	148	1.90	70
	9	0	178	1.78	80
	10	20	218	2.45	100
	11	20	208	2.41	100
	12	40	239	2.31	100

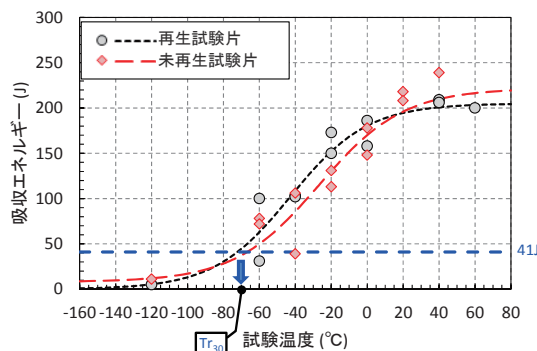


図11 再生/未再生試験片のシャルピー衝撃試験結果の比較

3.3 HAZ 試験片の板厚方向採取位置の影響確認

HAZ 試験片の板厚方向採取位置 (以下、採取位置という。)の違いによる衝撃特性への影響を確認するため、溶接試験体より板厚 t (167mm) に対して $(1/8)t$ 、 $(1/4)t$ 、 $(3/8)t$ ならびに $(1/2)t$ の位置から試験片を採取し試験を実施した。

各板厚でフルカーブ (試験数 12 本) のシャルピー衝撃特性を3シリーズ取得し、衝撃特性を評価した。表7~表10にHAZ 試験片のシャルピー衝撃試験結果を示す。図

12 および図 13 にそれぞれ HAZ 試験片の採取位置と上部棚吸収エネルギー (E_{max}) および関連温度 (Tr_{30}) の関係を示す。採取位置により E_{max} および Tr_{30} に有意な差があるかを評価するため、分散分析による統計解析を行った結果、各採取位置 ((1/8)t、(1/4)t、(3/8)t、(1/2)t) のデータ群 (E_{max} もしくは Tr_{30}) の平均値の間に統計的な有意な差は無く、いずれの値においても採取位置の依存性は認められなかった。

表 11 に HAZ の断面マイクロ組織観察結果を示す。採取位置による金属組織の違いは認められなかった。

各採取位置で溶接金属、HAZ、母材を対象にビッカース硬度測定 (測定荷重: 9.8N) を実施した。図 14 に硬度測定結果を示す。HAZ 部と推定される領域では溶融境界から母材側に離れるにつれて硬度が低下する傾向であり、採取位置による違いは認められなかった。なお、母材部の硬度についても採取位置による違いは認められなかった。

以上より(1/8)t、(1/4)t、(3/8)t および(1/2)tにおいて、HAZ 試験片の採取位置の違いが衝撃特性、金属組織および硬度に影響しないことを確認した。

表 8 HAZ 試験片のシャルピー衝撃試験結果 ((1/4)t)

シリーズ	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (J)	横膨出量 (mm)	延性破面率 (%)
シリーズ1	14HC105	-140	26	0.36	5
	14HC101	-120	48	0.64	15
	14HC112	-120	65	0.75	15
	14HC110	-80	171	2.09	70
	14HC111	-80	177	2.16	70
	14HC106	-60	243	2.32	100
	14HC107	-60	187	2.30	60
	14HC108	-20	264	2.27	100
	14HC109	-20	267	2.37	100
	14HC102	40	309	2.27	100
14HC103	40	266	2.49	100	
14HC104	60	279	2.30	100	
シリーズ2	14HC217	-140	30	0.36	10
	14HC213	-120	49	0.64	15
	14HC224	-120	42	0.52	10
	14HC222	-80	173	1.94	65
	14HC223	-80	134	1.46	50
	14HC218	-60	213	2.05	75
	14HC219	-60	214	2.28	80
	14HC220	-20	265	2.43	100
	14HC221	-20	262	2.37	100
	14HC214	40	295	2.23	100
14HC215	40	285	2.19	100	
14HC216	60	267	2.36	100	
シリーズ3	14HC329	-140	18	0.24	5
	14HC325	-120	70	1.26	15
	14HC336	-120	58	0.73	15
	14HC334	-80	173	2.06	70
	14HC335	-80	172	2.02	65
	14HC330	-60	211	2.14	80
	14HC331	-60	208	2.20	80
	14HC332	-20	270	2.31	100
	14HC333	-20	265	2.28	100
	14HC326	40	291	2.30	100
14HC327	40	276	2.23	100	
14HC328	60	274	2.28	100	

表 7 HAZ 試験片のシャルピー衝撃試験結果 ((1/8)t)

シリーズ	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (J)	横膨出量 (mm)	延性破面率 (%)
シリーズ1	18HC105	-140	23	0.34	5
	18HC101	-120	73	0.89	15
	18HC112	-120	40	0.54	10
	18HC110	-80	165	1.99	65
	18HC111	-80	177	2.13	70
	18HC106	-60	189	2.16	70
	18HC107	-60	206	2.28	75
	18HC108	-20	255	2.42	100
	18HC109	-20	254	2.35	100
	18HC102	40	282	2.42	100
18HC103	40	267	2.27	100	
18HC104	60	272	2.35	100	
シリーズ2	18HC217	-140	26	0.37	5
	18HC213	-120	64	0.74	15
	18HC224	-120	62	0.66	15
	18HC222	-80	183	1.97	70
	18HC223	-80	167	1.96	60
	18HC218	-60	190	2.00	85
	18HC219	-60	216	2.30	80
	18HC220	-20	249	2.31	100
	18HC221	-20	264	2.28	100
	18HC214	40	299	2.19	100
18HC215	40	306	2.30	100	
18HC216	60	252	2.40	100	
シリーズ3	18HC329	-140	21	0.29	5
	18HC325	-120	36	0.49	10
	18HC336	-120	56	0.57	15
	18HC334	-80	180	2.06	70
	18HC335	-80	160	1.82	65
	18HC330	-60	205	2.07	75
	18HC331	-60	246	2.29	100
	18HC332	-20	268	2.25	100
	18HC333	-20	268	2.13	100
	18HC326	40	297	2.29	100
18HC327	40	295	2.20	100	
18HC328	60	295	2.18	100	

表 9 HAZ 試験片のシャルピー衝撃試験結果 ((3/8)t)

シリーズ	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (J)	横膨出量 (mm)	延性破面率 (%)
シリーズ1	38HC105	-140	30	0.37	10
	38HC101	-120	52	0.65	15
	38HC112	-120	31	0.57	10
	38HC110	-80	144	1.73	50
	38HC111	-80	139	1.54	50
	38HC106	-60	187	2.25	65
	38HC107	-60	184	2.29	65
	38HC108	-20	247	2.38	100
	38HC109	-20	250	2.35	100
	38HC102	40	291	2.22	100
38HC103	40	293	2.30	100	
38HC104	60	239	2.37	100	
シリーズ2	38HC217	-140	30	0.40	10
	38HC213	-120	39	0.65	10
	38HC224	-120	52	0.59	15
	38HC222	-80	184	1.97	70
	38HC223	-80	185	1.99	70
	38HC218	-60	253	2.34	100
	38HC219	-60	183	2.18	65
	38HC220	-20	258	2.31	100
	38HC221	-20	303	2.28	100
	38HC214	40	280	2.28	100
38HC215	40	290	2.33	100	
38HC216	60	247	2.32	100	
シリーズ3	38HC329	-140	23	0.31	5
	38HC325	-120	61	0.89	15
	38HC336	-120	48	0.68	10
	38HC334	-80	190	2.16	75
	38HC335	-80	164	2.05	60
	38HC330	-60	261	2.31	100
	38HC331	-60	238	2.08	100
	38HC332	-20	235	2.03	85
	38HC333	-20	266	2.15	100
	38HC326	40	290	2.28	100
38HC327	40	289	2.29	100	
38HC328	60	273	2.24	100	

表10 HAZ試験片のシャルピー衝撃試験結果 (1/2)t

シリーズ	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (J)	横膨出量 (mm)	延性破面率 (%)	
シリーズ1	12HC105	-140	21	0.28	10	
	12HC101	-120	58	0.66	15	
	12HC112	-120	55	0.72	15	
	12HC110	-80	181	1.84	75	
	12HC111	-80	179	1.99	75	
	12HC106	-60	214	2.23	80	
	12HC107	-60	218	2.18	80	
	12HC108	-20	270	2.39	100	
	12HC109	-20	266	2.37	100	
	12HC102	40	306	2.19	100	
	12HC103	40	297	2.22	100	
	12HC104	60	270	2.34	100	
	シリーズ2	12HC217	-140	7	0.08	5
		12HC213	-120	29	0.42	5
12HC224		-120	28	0.32	5	
12HC222		-80	170	1.99	65	
12HC223		-80	158	1.88	60	
12HC218		-60	191	2.08	65	
12HC219		-60	202	2.01	70	
12HC220		-20	263	2.31	100	
12HC221		-20	280	2.37	100	
12HC214		40	296	2.24	100	
12HC215		40	285	2.22	100	
12HC216		60	254	2.32	100	
シリーズ3		12HC329	-140	19	0.30	5
		12HC325	-120	26	0.37	5
	12HC336	-120	26	0.40	5	
	12HC334	-80	172	2.01	65	
	12HC335	-80	136	1.53	30	
	12HC330	-60	206	2.02	80	
	12HC331	-60	170	1.87	60	
	12HC332	-20	267	2.17	100	
	12HC333	-20	254	2.26	100	
	12HC326	40	285	2.27	100	
	12HC327	40	299	1.96	100	
	12HC328	60	271	2.20	100	

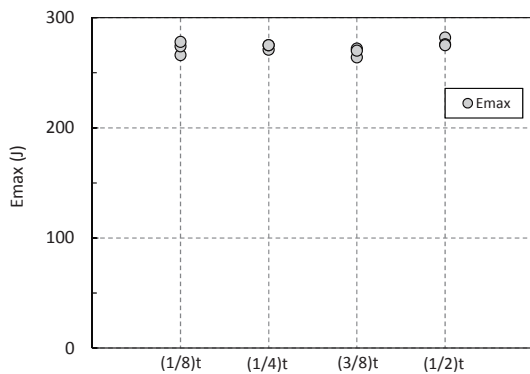


図12 HAZ試験片の採取位置と上部棚吸収エネルギー (E_{max}) の関係

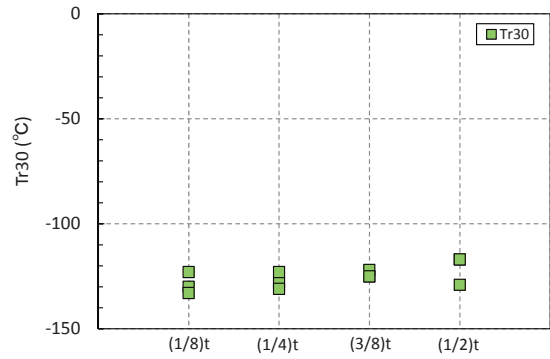
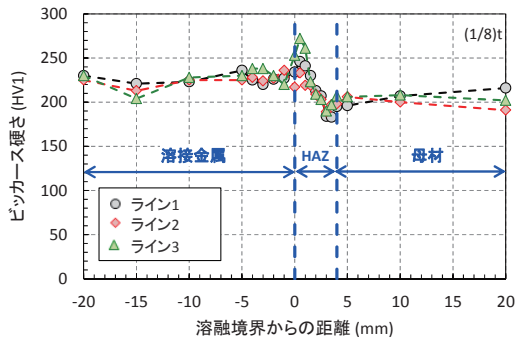


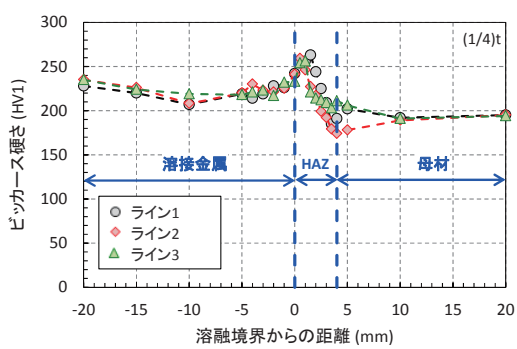
図13 HAZ試験片の採取位置と関連温度 (Tr_{30}) の関係

表11 HAZの断面マイクロ組織観察結果

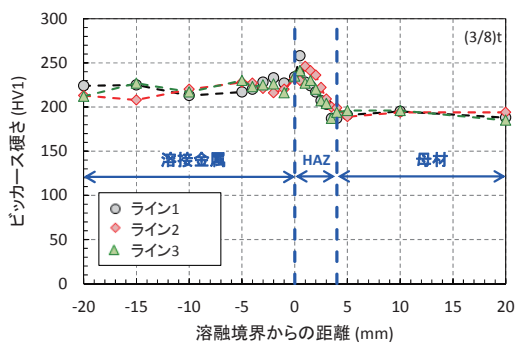
観察位置	観察倍率	
	100倍	400倍
(1/8)t		
(1/4)t		
(3/8)t		
(1/2)t		



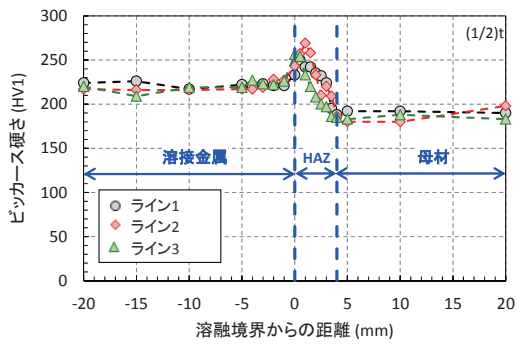
(a) (1/8)t 位置



(b) (1/4)t 位置



(c) (3/8)t 位置



(d) (1/2)t 位置

図 14 硬さ測定結果

4. 結言

RPV 構造材の監視試験片に使用されている低合金鋼を用いて、監視試験片の再生方法として検討している電子ビーム溶接の適用性を評価した。また、HAZ 試験片の再生を考慮し、HAZ 試験片の板厚方向採取位置の違いによる衝撃特性等への影響確認試験を実施した。本研究で得られた成果を以下に記す。

- 電子ビーム溶接による試験片の接合部において有害な割れや融合不良は確認されず、また、シャルピー衝撃試験において接合部は十分な強度を有しており、JEAC4201 の接合方法の確認試験の要求を満足することを確認した。また、本試験より得られた熱影響部幅 (W_{HAZ}) は 0.8mm、熱回復幅 (W_{ANL}) は 1.1mm であった。
- 電子ビーム溶接により接合した再生試験片および試験片の接合を行っていない未再生試験片のシャルピー衝撃特性を比較した結果、両者の衝撃特性は概ね同等であり、試験片再生の有無は衝撃特性に影響しないことを確認した。監視試験片再生の接合方法として電子ビーム溶接が適用可能であることを確認した。
- (1/8)t、(1/4)t、(3/8)t および (1/2)t 位置において、HAZ 試験片の板厚方向採取位置の違いが衝撃特性、金属組織および硬さに影響しないことを確認した。

本論文に記載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

謝辞

本研究は電力共通研究として実施いたしました。東北電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、中国電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、(一財)電力中央研究所、(株)IHI 及び三菱日立パワーシステムズ(株)の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] “原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC 4201-2007)”, 社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会
- [2] “実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則その解釈”, 原子力規制委員会 (平成 29 年 4 月 5 日改正)