

監視試験片再生接合技術の実機適用性評価

Applicability of Reconstituted Surveillance Test Piece for RPV Embrittlement Evaluation

東芝エネルギーシステムズ(株)	田中	重彰	Shigeaki TANAKA	Member
東芝エネルギーシステムズ(株)	森島	康雄	Yasuo MORISHIMA	
東芝エネルギーシステムズ(株)	小川	琢矢	Takuya OGAWA	
東芝エネルギーシステムズ(株)	服部	泰大	Yasuhiro HATTORI	
日本核燃料開発(株)	和田	将樹	Masaki WADA	
東京電力ホールディングス(株)	神長	貴幸	Takayuki KAMINAGA	

In the application for approval of nuclear power plant operation period extension, it is required to carry out two surveillance tests separately from the conventional plan. At this time, it is necessary to compensate for the surveillance test piece by reconstitution bonding of the used test specimen, since the shortage of the test specimen is expected. Although the used test piece of the welded part is used for the reconstitution bonding of the heat affected zone (HAZ) test piece, the test piece collection position defined in JEAC4201 is different in both sample. Therefore, we comprehended the sampling position dependency of the impact characteristics in the HAZ, and evaluated the applicability of the reconstitution bonding to the actual plant.

Keywords: operation period extension, surveillance test, reconstitution bonding, Charpy impact test, RPV material

1. 運転期間延長申請における監視試験要求

東日本大震災以降、原子力プラントの運転期間に関する要求が厳格化され、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、発電用原子炉を運転できる期間は運転開始から40年とすることが規定された。その一方で、原子力規制委員会に申請して認可を受けることにより、20年を超えない範囲で1回に限り運転期間を延長できることが定められた。

運転期間延長認可を申請するための具体的な条件については、「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」に示されている。運転期間延長認可申請のために、発電用原子炉施設の劣化状況評価及び保守管理方針に関する書類が求められる。その中で、劣化状況評価においては運転開始後40年以内のできるだけ遅い時期に取り出し監視試験片の試験結果が、保守管理方針においては運転開始後40年以降50年以内の適切な時期に実施する監視試験計画が求められている。

これに対し、現在実施されている監視試験の実施時期や回数はJEAC4201「原子炉構造材の監視試験方法」の要求に基づき、運転相当期間(EFPY)により管理されている。原子炉が80%の稼働率で運転していると想定したと

きの監視試験実施時期を表1に示す。

表1 監視試験実施時期*の比較(BWRの場合)^[1]

	1回目	2回目*2	3回目*2	4回目	5回目	6回目
従来の監視試験	加速*3	6EFPY	15EFPY	寿命	計画無	計画無
		12EFPY	24EFPY	末期	計画無	計画無
運転延長を想定	加速*3	6EFPY	15EFPY	40年目	50年目	寿命
		12EFPY	24EFPY			末期

*1: 稼働率80%を想定

*2: 脆化の程度により実施時期が異なる

*3: 事業者が任意に実施

運転開始後の暦年で実施時期を決めている運転延長認可申請のための監視試験は運転実績で実施時期を決める監視試験実施時期と整合しない場合には、追加実施となる可能性がある。表1中のハッチング部が、運転期間延長認可申請のために追加実施が求められている監視試験である。現状では震災後の長期間停止等により稼働率が低下しており、追加の監視試験は3回目、あるいは2回目に先立って実施を求められる可能性がある。発電用原子炉にはあらかじめ監視試験片が装荷されているが、従来計画による実施分しか装荷されていない場合には監視試験片の不足が見込まれる。

連絡先: 田中重彰、〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8、東芝エネルギーシステムズ(株) 原子力機械システム設計部 材料技術担当、E-mail: shigeaki.tanaka@toshiba.co.jp

2. 監視試験片の再生方法と課題

監視試験片は、評価対象となる発電用原子炉と同等の照射履歴を受けていることが求められる。そのため、運転延長認可申請における追加監視試験のための試験片を補充するためには、使用済みの監視試験片を出自の原子炉に再装荷し、所定の期間が経過した後に取り出して試験片の形に再加工して監視試験に供することが検討されている。その方法として、使用済みの監視試験片から試験の影響を受けていない部分をインサート材として切り出し、ここが試験部となるように不足分を未照射材で継ぎ足すことにより試験片の形に成形する再生接合と、同じく試験の影響を受けていない部分から加工可能な小型の試験片を用いて試験に供する小型監視試験片の2つが考えられる。このうち再生接合についてはJEAC4201で、表面活性化接合法による衝撃試験片又は3点曲げ試験片の接合法及びレーザー溶接法による破壊靭性試験片の接合法が標準接合法として規定されている。

図1に使用済み監視試験片を用いてシャルピー衝撃試験片の再生接合を行う際の手順を示す。

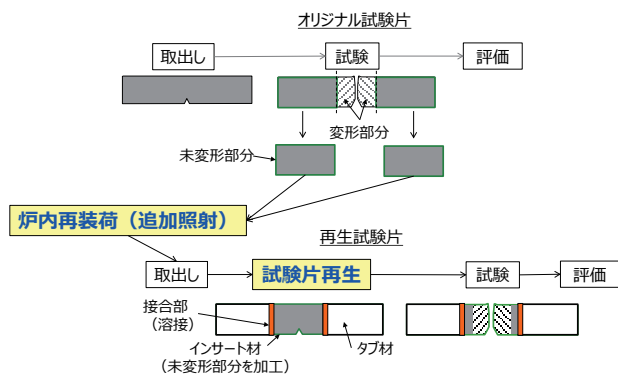


図1 シャルピー衝撃試験片の再生手順の模式図^[1]

発電用原子炉からシャルピー衝撃試験片を取り出し、試験を行ったあとで、塑性変形を受けた領域を取り除き、インサート材を製作する。これを発電用原子炉に再装荷し、所定の期間中性子照射を受けた後に取り出して、インサート材が試験部となるようにタブ材を接合してシャルピー衝撃試験片の形に成形し、試験に供する。この方法により不足する試験片を補うことができる。

JEAC4201に再生接合法として規定された表面活性化接合法やレーザー溶接法は、原子力安全基盤機構が実施において選定・評価されたものであるが^[5]、これとは異なる接合法を適用するためには、JEAC4201の要求に従い妥当性を示す必要がある。また、JEAC4201では監視試験片の採取位置を定めているが、使用済み試験片からインサート材の採取するには、再生接合後の試験片が監視

試験片採取位置要求を満たす必要がある。

2.1 電子ビーム溶接の適用性評価

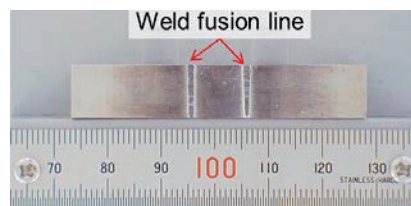
近年の溶接機の進歩により、小型かつ低入熱の溶接方法として電子ビーム溶接の適用が検討されている^[1,2]。標準接合法とは異なる再生接合を用いる際の要求事項がJEAC4201に規定されており、この方法に則り電子ビーム溶接法による再生接合の適用性について評価が行われている。JEAC4201では、標準接合法とは異なる接合法を用いる際に以下が求められる。

- ① 目視試験及び断面観察により接合部に有害な割れや融合不良がないことを確認すること。
- ② 再生試験片を用いて上部棚吸収エネルギー領域で試験を行い、接合部から破断しないことを確認すること。
- ③ 熱影響幅 (W_{HAZ}) を測定すること。
- ④ インサート部の温度履歴を測定又は解析により求め、熱回復幅 (W_{ANL}) を求めること。

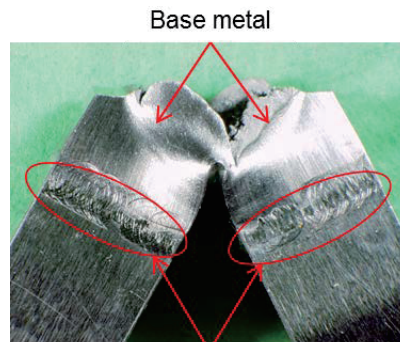
ここで W_{HAZ} とは金属組織が溶接入熱の影響を受ける範囲を指し、 W_{ANL} とは欠陥等の照射影響が溶接入熱により回復する範囲を指す。

非照射材及び照射材を用いて、これらの試験が行われており、上記の要求を満足する成果が得られている。

図2は照射材 (照射量 $2.2 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$) のインサート材を用いて再生接合した試験片の試験前後の外観を観察した結果である^[2]。試験前後において、再生接合部に欠陥は見られない。



(a) シャルピー衝撃試験前の外観



(b) シャルピー衝撃試験後の外観

図2 再生接合後のシャルピー衝撃試験片外観^[2]

この他、断面観察を行い有害な融合不良がないことを確認するとともに、硬さ測定や断面観察及び温度履歴の計測や解析により W_{HAZ} や W_{ANL} を評価している。

これらにより、電子ビーム溶接が再生接合における JEAC4201 要求を満たすことを確認した。

2.2 熱影響部インサート材採取位置要求

JEAC4201 では、監視試験片の板厚方向採取位置が規定されている。その内容を図3に示す。

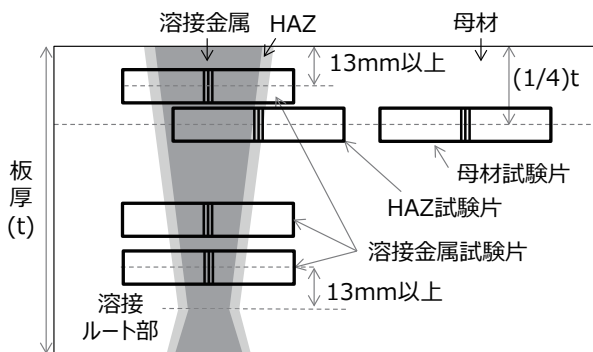


図3 監視試験片の板厚方向採取位置要求の模式図^[1]

監視試験片は母材、溶接金属及び熱影響 (HAZ) 部の3か所から採取するが、そのうち母材と HAZ 部は板厚 (t) の 1/4 の位置から採取することとなっている。これに対し、溶接金属は表面から 13mm 以上離れた任意の位置から採取してよいことになっている。再生接合においても、母材、溶接金属、HAZ 部それぞれの試験片を再生する必要があるが、シャルピー衝撃試験片における溶接金属の配置から、溶接金属試験片の再生に用いるインサート材は HAZ 部試験片から採取し、HAZ 部試験片のインサート材は溶接金属試験片から採取することになる。この時、溶接金属は表面から 13mm 以上離れた任意の位置から採取すればよいので、(1/4)t から採取された HAZ 部試験片の一部をインサート材として溶接金属試験片として再生することに問題はないが、溶接金属から採取されたインサート材は (1/4)t から採取されていないため、HAZ 部の採取位置要求を満たさないことになる。そのため、HAZ 部試験片として溶接金属から再生接合した試験片を用いるためには、HAZ 部について採取位置による影響有無の確認を行う必要がある。

一般的に、厚板材では材料特性の板厚方向分布が生じることが知られている。これは、調質のために熱処理を施した後の冷却速度について、板の表面近傍と内部で差が生じることが主要因と考えられる。一方溶接金属に関しては管理された入熱条件で短範囲に繰り返す熱履歴を受けることになり、厚板材のような板厚依存性は生じに

く。HAZ 部は母材部において溶接時の入熱により材料特性が変化した範囲を指すが、定性的には溶接金属と同等の熱履歴を受けるため、母材の製造時に受けた熱履歴の影響が消失し、溶接金属に近い板厚依存性を有する可能性が高い。そのため、HAZ 部における衝撃特性の採取位置依存性を示すためのデータ取得が行われている。次章では、既往研究の成果を含めて母材及び HAZ 部の材料特性に及ぼす採取位置依存性を評価した結果を示し、HAZ 部における再生接合の適用性を整理する。

3. 材料特性の板厚方向採取位置依存性

3.1 供試材

試験に用いた供試材の規格及び化学成分を表2に示す。

表2 供試材の規格と化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	
圧延材1	規格値 ASME SA-533 TYPEB Cl.1(1989)	0.25 以下	0.15~ 0.40	1.15~ 1.50	0.035 以下	0.40 以下	0.40~ 0.70	0.30 以下	0.45~ 0.60
	分析値	0.18	0.24	1.40	0.003	0.001	0.64	0.11	0.52
圧延材2 ^[1]	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
	分析値	0.18	0.27	1.44	0.003	0.003	0.65	-	0.51
鍛造材 ^[1]	規格値 JIS G 3204 (1998) SFVQ1A	0.25 以下	0.40 以下	1.20~ 1.50	0.025 以下	0.025 以下	0.40~ 1.00	-	0.45~ 0.60
	分析値	0.18	0.19	1.48	0.003	0.001	0.90	-	0.52

このうち、圧延材2及び鍛造材は既往研究^[1]で用いたものである。圧延材1は新たに材料データを取得したものであり、その結果を本報告に示す。

3.2 試験方法

材料特性を評価するために、シャルピー衝撃試験、金相観察及び、硬さ測定を行った。シャルピー衝撃試験片の採取位置を図4に示す。ここで板厚 t は 178mm である

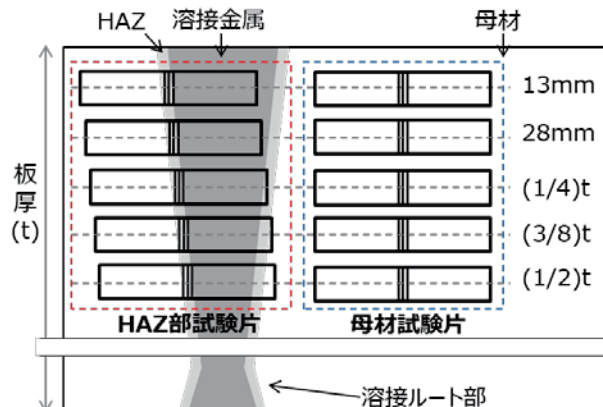


図4 シャルピー衝撃試験片採取位置

HAZ 部試験片及び母材部試験片は表面より 13mm~(1/2)t の範囲で図中に示す5か所から採取した。HAZ 部試験片については、溶融線から 1mm 離れた位置がノッチとなるように試験片を採取した。金相観察及び硬さ測定試

験片はシャルピー衝撃試験片と同等の位置から採取した。

シャルピー衝撃試験は採取位置ごとに複数の温度で12本実施し、吸収エネルギー、延性破面率及び横膨出量を測定した。また、測定結果から遷移曲線を作成し、 E_{max} 、 T_{41J} 及び T_{68J} を評価した。断面金相観察は採取位置ごとに3視野について100倍及び400倍で観察した。硬さ測定は荷重9.8Nのビッカース試験を繰り返し3回実施し、採取位置ごとに母材から溶接金属にかけて分布を測定した。

3.3 シャルピー衝撃試験

図5に、圧延材1の母材より採取した試験片のシャルピー衝撃試験結果及び遷移曲線を示す。試験は繰り返し3回実施しているが、図中ではそのうち1回分の結果をまとめて示した。

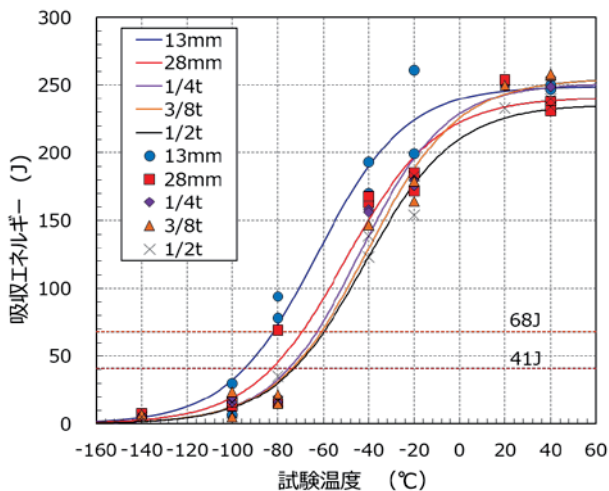


図5 圧延材1母材のシャルピー衝撃試験結果

表面より13mmの位置で採取した試験片の遷移曲線が他と比べて低温側にシフトしている傾向がある。遷移域については、28mmで採取した試験片も若干低温側にシフトしているように見える。上部棚領域では採取位置による明瞭な傾向はみられない。

図6に、圧延材1のHAZ部より採取した試験片のシャルピー衝撃試験結果及び遷移曲線を示す。試験は繰り返し3回実施しているが、図中ではそのうち1回分の結果をまとめて示した。

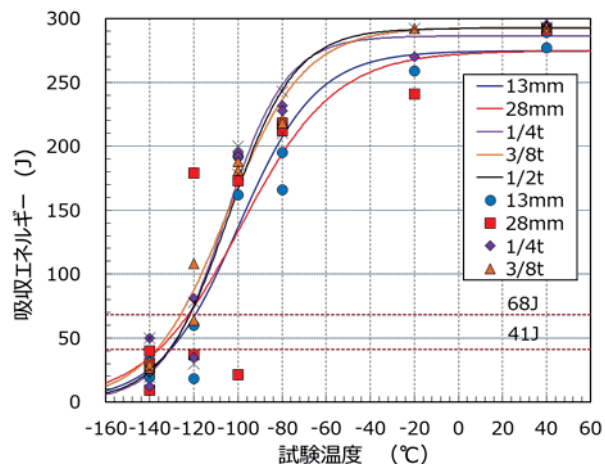
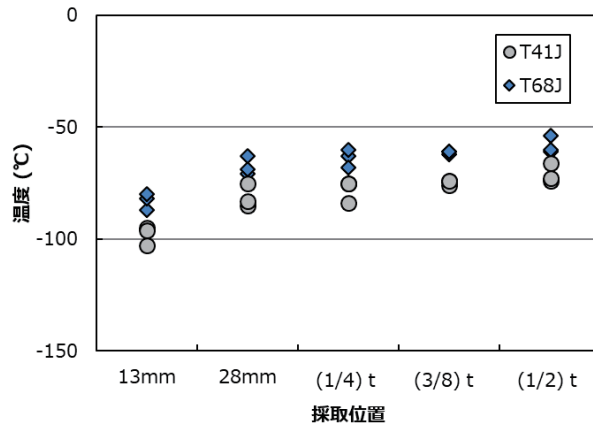


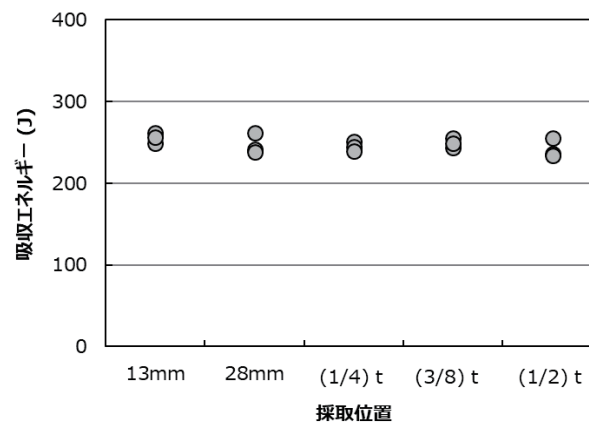
図6 圧延材1HAZ部のシャルピー衝撃試験結果

母材と比較して、 E_{max} は大きく、 T_{41J} 、 T_{68J} 等の遷移温度は低い傾向がある。また、母材とは異なり、遷移曲線に明確な採取位置依存性は見られない。

図7に母材について遷移曲線から E_{max} 及び関連温度(T_{41J} 、 T_{68J})を評価し、採取位置で整理した結果を示す。



(a) 母材部関連温度 (T_{41J} 、 T_{68J})



(b) 母材部上部棚吸収エネルギー (E_{max})

図7 母材の関連温度及び E_{max} の採取位置依存性

表面から13mmの関連温度が他の部位と比べて低い傾

向がある。 E_{max} については明瞭な採取位置依存性は見られない。

関連温度及び E_{max} の採取位置による有意差を確認するために統計的な手法としてフリードマン検定を行った。その結果を表3に示す。ここでp値が0.05以下であれば、5%水準でデータ群に有意差があることを意味する。

表3 母材関連温度及び E_{max} の有意差判定結果

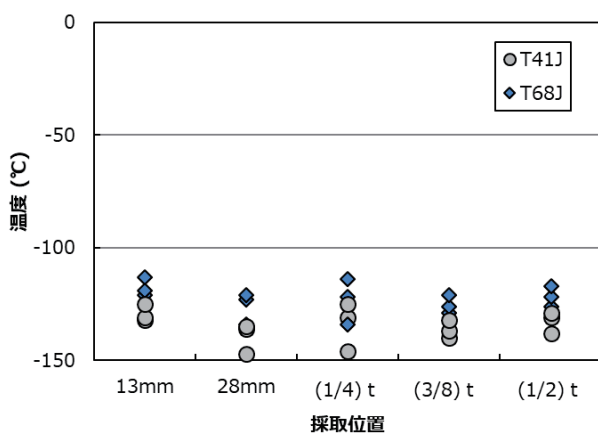
選定データ群	項目	p 値	判定結果*
13mm~(1/2)t	E_{max}	0.127	○
	T_{41J}	0.022	●
	T_{68J}	0.025	●
28mm~(1/2)t	E_{max}	0.425	○
	T_{41J}	0.043	●
	T_{68J}	0.051	○
(1/4)t~(1/2)t	E_{max}	0.441	○
	T_{41J}	0.060	○
	T_{68J}	0.148	○

●：有意差あり、○：有意差認められず

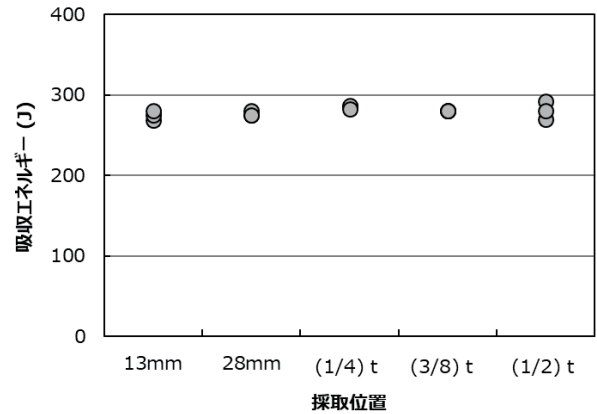
※：p 値 ≤ 0.05 で有意差ありと判定

採取位置による有意差有無を確認するために、範囲を変えて検定を行ったところ、遷移温度について13mm及び28mmは他の部位と比べて有意差がある可能性が示唆された。 E_{max} に有意差は見られない。

HAZ部についても同様の評価を行った。図8にHAZ部について遷移曲線から E_{max} 及び関連温度(T_{41J} 、 T_{68J})を評価し、採取位置で整理した結果を示す。



(a) HAZ 部関連温度 (T_{41J} 、 T_{68J})



(b) HAZ 部上部棚吸収エネルギー (E_{max})

図8 HAZ 部の関連温度及び E_{max} の採取位置依存性

母材部とは異なり、関連温度、 E_{max} ともに明瞭な採取位置依存性は見られない。

採取位置による関連温度及び E_{max} の有意差の有無を確認するために統計的な手法としてフリードマン検定を行った。その結果を表4に示す。

表4 HAZ 部関連温度及び E_{max} の有意差判定結果

選定データ群	項目	p 値	判定結果*
13mm~(1/2)t	E_{max}	0.281	○
	T_{41J}	0.162	○
	T_{68J}	0.094	○

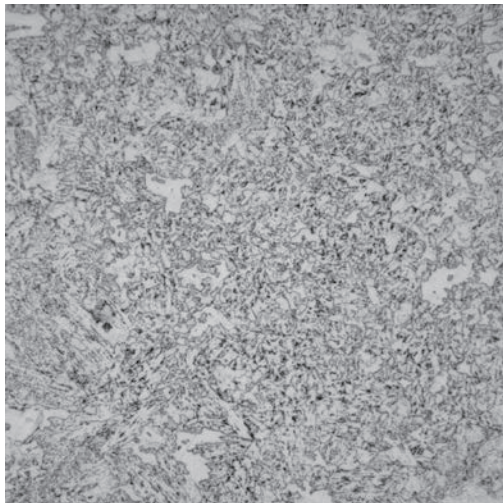
●：有意差あり、○：有意差認められず

※：p 値 ≤ 0.05 で有意差ありと判定

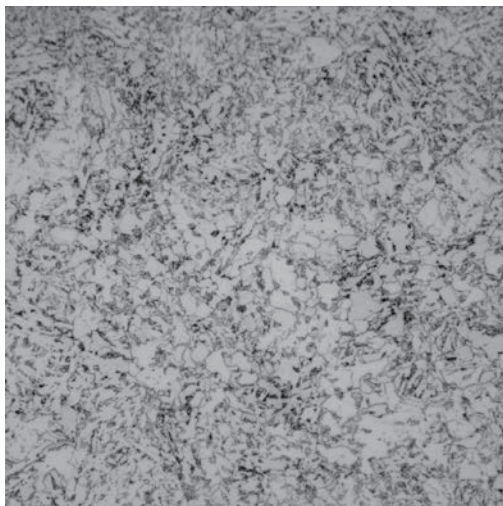
母材とは異なり、関連温度、 E_{max} ともに、全域にわたって採取位置依存性は見られないという評価結果だった。

3.4 断面金相観察

100倍及び400倍で母材及びHAZ部の金相観察を行った、そのうち、採取位置によると思われる差異が見られた母材の13mm及び(1/2)tの組織を示す。



(a) 表面より13mm



(b) (1/2)t

図9 母材の金相観察結果

表面から13mmの位置での粒径が(1/2)tと比べて細粒となる傾向が見られた。また、28mm～(3/8)tは(1/2)tに近い組織であった。これに対しHAZ部では、採取位置による明瞭な差異は見られなかった。この、組織の違いが採取位置による関連温度の有意差の一因と考えられる。

3.5 硬さ測定

図10に母材から溶接金属にかけて測定したビッカース硬さの分布を示す。

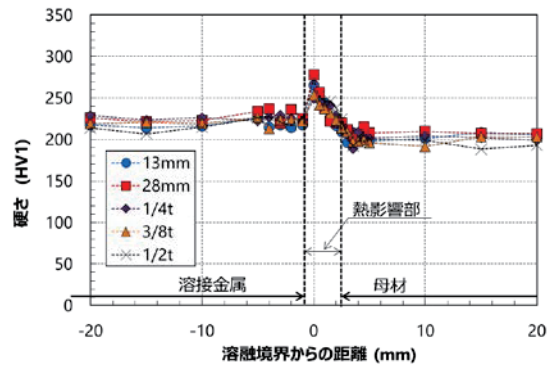


図10 母材、HAZ部及び溶接金属の硬さ分布

母材において、溶融境界から3mm程度離れた位置から硬さが増加し始め、溶融線境界近傍で最大値を取る。溶接金属で若干硬さが低下し、溶接金属内では位置依存性が見られなくなる。溶接金属の硬さは母材と比較して20HV程度高い値である。測定した全域にわたって、硬さの板厚方向採取位置による差異は見られない。

4. まとめ

低合金鋼溶接継ぎ手における材料特性の板厚方向採取位置依存性に関する既往知見^[1,2]に沿って、データを拡充するための試験を行った。既往知見の結果と共に、関連温度及び E_{max} について、採取位置による有意差有無を判定した結果を、まとめて表5及び6に示す。

表5 母材有意差判定結果

選定データ群	項目	圧延材1	圧延材2 ^[1]	鍛造材 ^[1]
13mm～(1/2)t	E_{max}	●	○	○
	T ₄₁₁	●	○	●
	T ₆₈₁	●	●	●
(1/8)t(28mm)～(1/2)t	E_{max}	●	○	○
	T ₄₁₁	●	○	●
	T ₆₈₁	●	●	○
(1/4)t～(1/2)t	E_{max}	○	○	○
	T ₄₁₁	○	○	○
	T ₆₈₁	○	○	○

● : 有意差あり、○ : 有意差認められず

表6 HAZ部有意差判定結果

選定データ群	項目	圧延材1	圧延材2 ^[1]	鍛造材 ^[1]
13mm~(1/2)t	E _{max}	○	○	○
	T _{41J}	○	○	○
	T _{68J}	○	○	○

●：有意差あり、○：有意差認められず

母材部については、製造方法により範囲に差はあるものの、いずれも表面側で関連温度に有意差ありという判定結果となった。一方 HAZ 部についてはいずれの材料においても全域にわたって有意な差は見られない。

低合金鋼において表面側の関連温度が低下する傾向を示すことが知られている。薄田は A533 TYPEB Cl.1 鋼の母材における関連温度 ($T_{30}=T_{41J}$ 、 $T_{50}=T_{68J}$) の板厚方向分布を測定し、今回の試験結果と同様、表面側で関連温度が低下する傾向が見られることを示した^[3]。

小野寺は厚肉材の中央と比べて表層の冷却速度が速いことを示し、これに対応して表層のシャルピー衝撃値が高いこと、板厚中心に対して表面近傍の組織が細粒化していることを示した^[4]。表5にまとめた母材の関連温度の採取位置依存性はこれらの知見と整合するものである。これに対し、同じ素材の熱影響部では、表6に示すように採取位置依存性が確認されないという検定結果であった。これは、冷却速度の差を一因として生じた機械特性の板厚方向分布が、溶接時に生じる比較的短範囲の繰り返し入熱により均一化されたものと推察される。

これらの結果から、再生接合により熱影響部試験片を製作するためのインサート材を溶接金属試験片の熱影響部から採取することに問題はないと考えられる。

これにより、運転期間延長申請のための追加監視試験片に再生した試験片を用いるめどがついた。

謝辞

本研究は電力共通研究の一部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)、日立GEニュークリア・エナジー(株)の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 森島ら、“電子ビーム溶接を用いて再生した衝撃試験片の監視試験への適用性評価”、日本保全学会 第15回学術講演会要旨集 (2018)、p.259.
- [2] S. Sakuraya et al., "Application of Charpy specimen Reconstituted by Electron Beam Welding for the Evaluation of Irradiation embrittlement of Reactor Pressure Vessel", Short paper of the 4th International Conference on Maintenance Science and Technology: ICMST 2018, Tohoku, Japan, October 23-26, 9-2 (2018).
- [3] 薄田、“超厚鋼の破壊靱性の評価について”、圧力技術、第14巻 第4号 (1976)、p.20.
- [4] 小野寺、“最近の軽水炉圧力容器用超圧鋼材”、圧力技術、第14巻 第6号 (1976)、p.23.
- [5] (独)原子力安全基盤機構 規格基準部、JNES-SS-0601 “原子炉圧力容器監視試験片の再生に関する調査報告書” (2006) .