

参 考 資 料 3  
(破壊靱性試験結果)

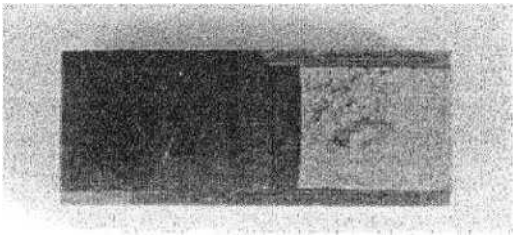
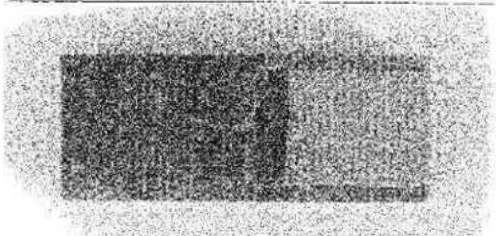
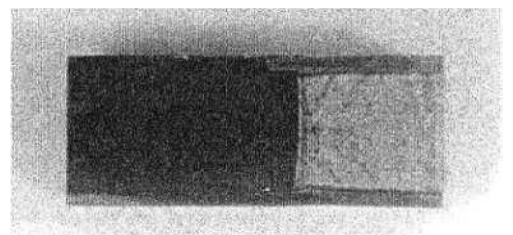
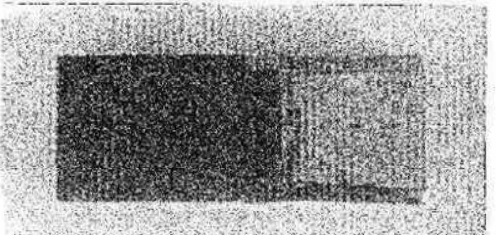
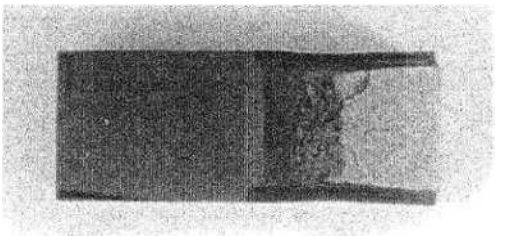
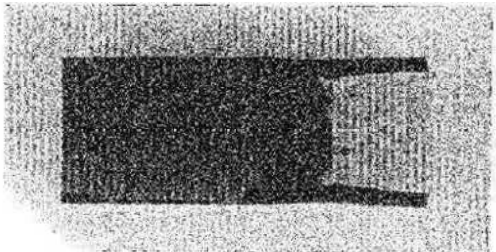
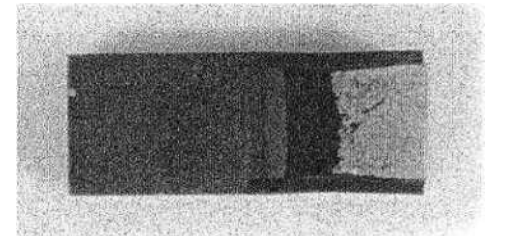
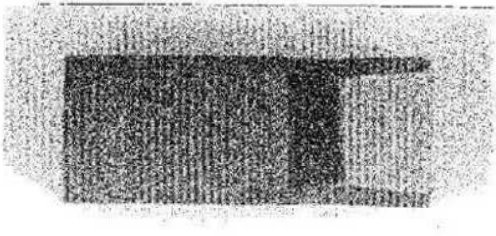
川内 1 号 監視試験による破壊靱性試験結果 ( 1 / 2 )

鋼材種類	監視試験回次	温度 (°C)	KIc (MPa√m)
母材	0	- 50	134.7
	0	- 50	215.8
	0	-100	46.8
	0	-100	103.7
	0	-150	33.1
	0	-150	63.8
	1	- 50	123.1
	1	- 50	116.3
	2	0	199.4
	2	- 40	67.3
	2	- 80	85.6
	2	0	134.0
	2	- 40	69.5
	2	- 80	88.4
	3	12	225.8
	3	- 30	106.1
	3	- 60	80.3
	3	12	141.7
	3	- 30	84.4
	3	- 60	59.5
	4	21	168.0
	4	- 15	100.0
	4	- 45	108.0
	4	21	108.0
4	- 15	124.0	
4	- 45	61.0	

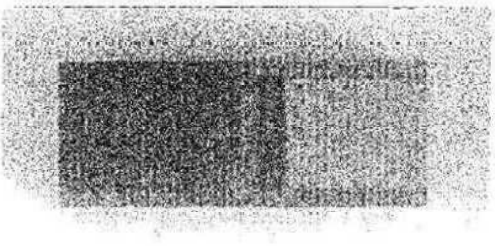
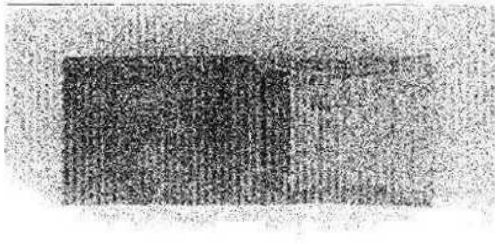
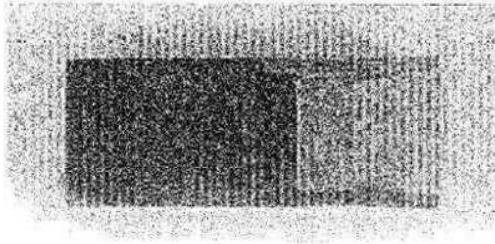
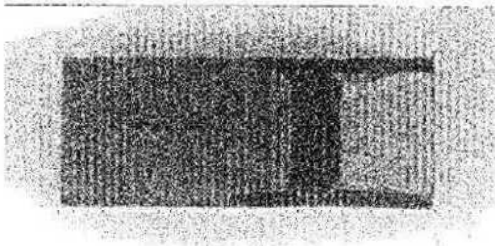
川内 1 号 監視試験による破壊靱性試験結果 ( 2 / 2 )

鋼材種類	監視試験回次	温度 (°C)	KIc (MPa√m)
母材	5	50	92.0
	5	20	80.4
	5	- 20	102.0
	5	50	103.0
	5	20	108.0
	5	- 20	68.4
溶接金属	0	- 50	121.0
	0	- 50	112.5
	0	-100	51.3
	0	-100	49.6
	0	-150	42.9
	0	-150	34.6
	1	- 50	104.5
	2	0	174.3
	2	- 40	82.5
	2	- 80	57.1
	3	9	115.1
	3	- 30	55.5
	3	- 60	50.2
	4	21	99.0
	4	- 15	61.0
	4	- 45	37.0
	5	50	92.8
	5	20	68.1
	5	- 20	40.2

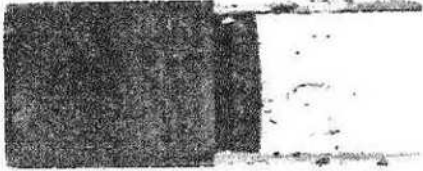
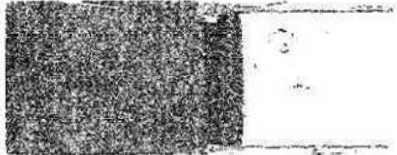
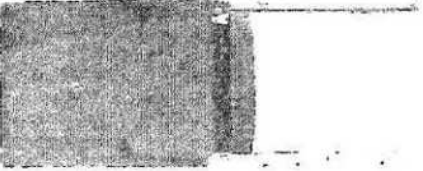
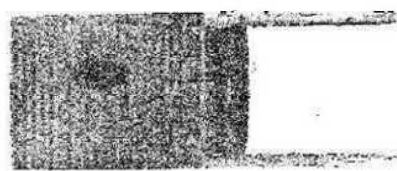
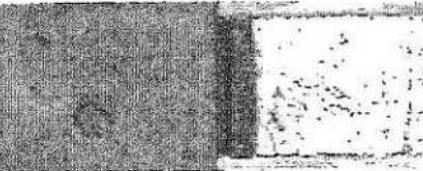
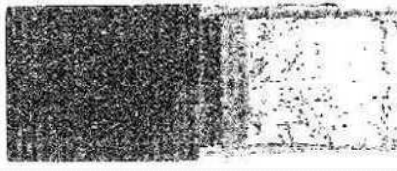
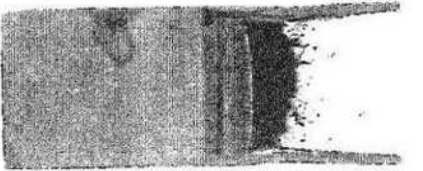
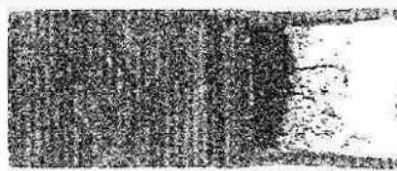
川内 1 号 第 1 回監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-50		
10		
100		
300		

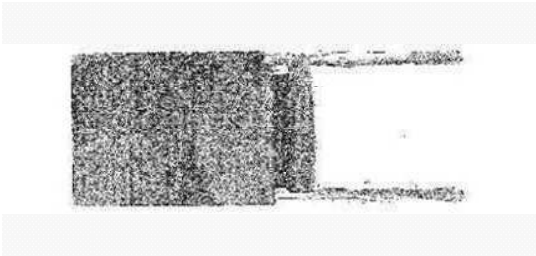
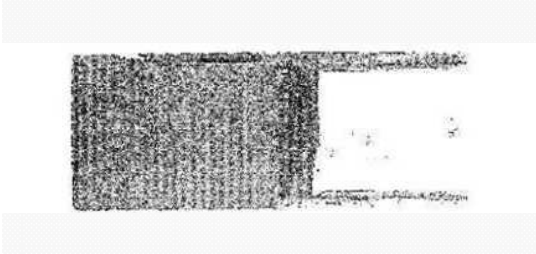
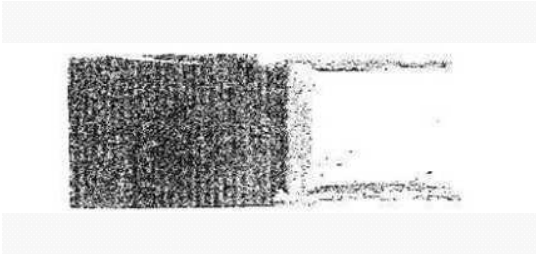
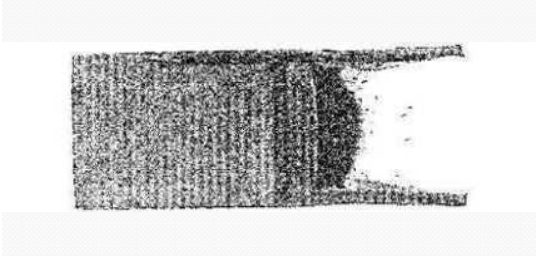
川内 1 号 第 1 回監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-50	
10	
100	
300	









川内 1 号 第 2 回 監視 試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-80		
-40		
0		
100		

川内 1 号 第 2 回監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)


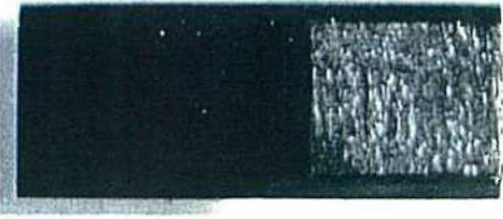
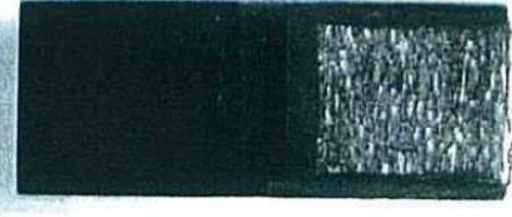

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-80	
-40	
0	
100	

川内 1 号 第 3 回 監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

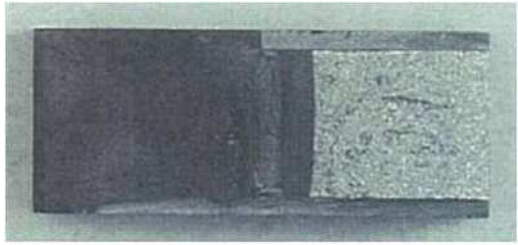
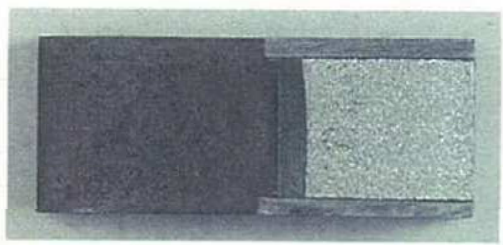
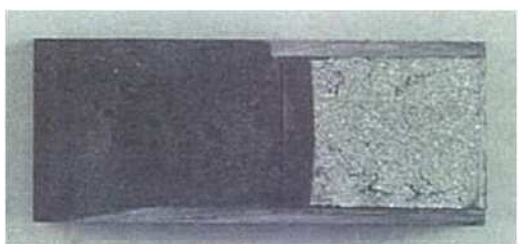
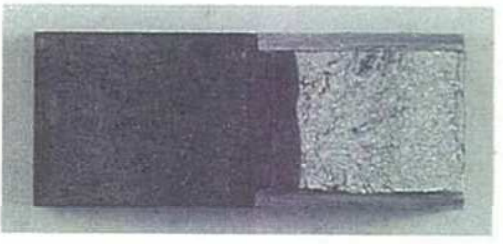
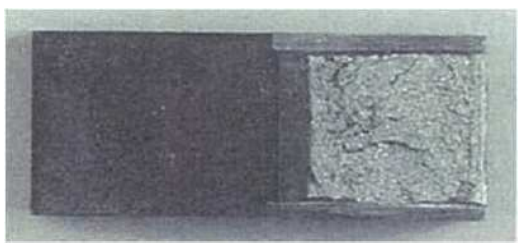
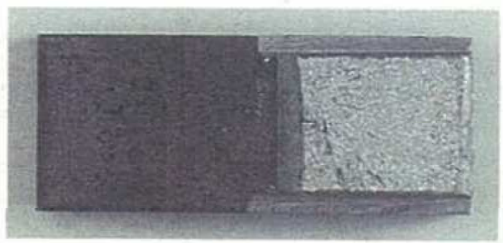
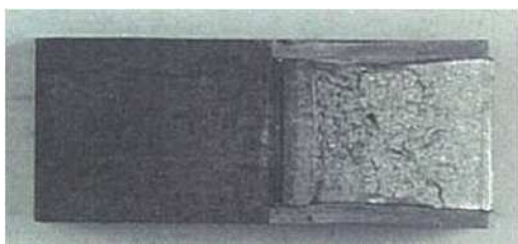
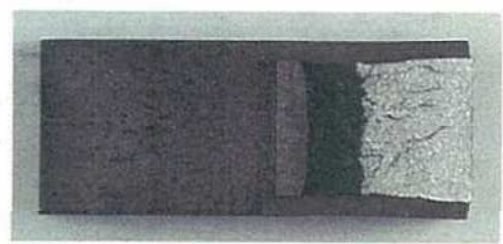
破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-60		
-30		
12		
100		



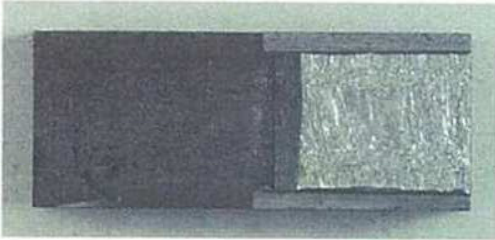
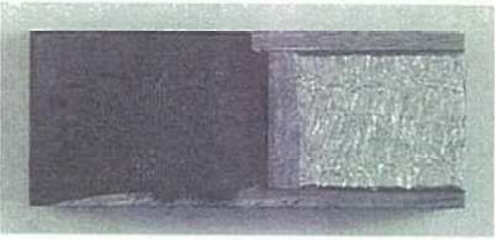
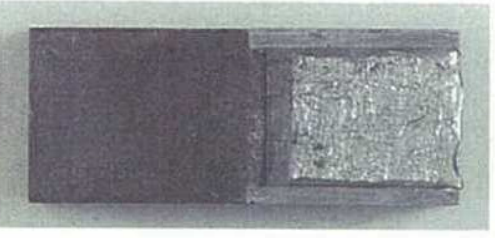
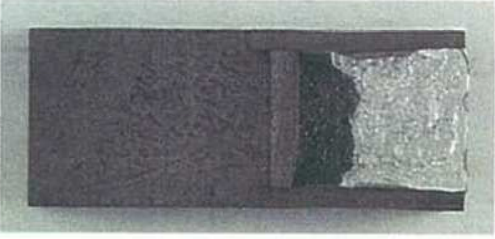
川内 1 号 第 3 回監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-60	
-30	
9	
100	


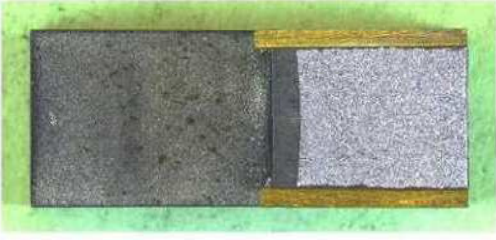
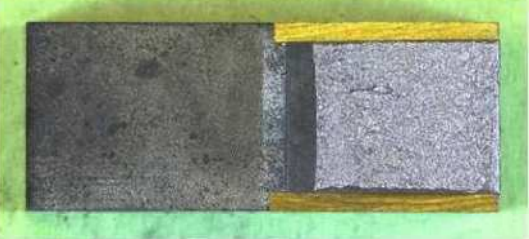
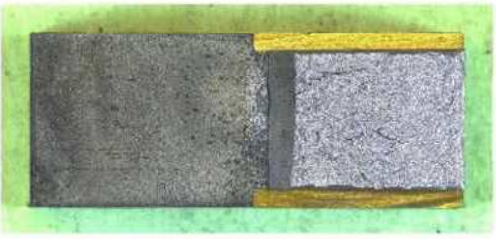
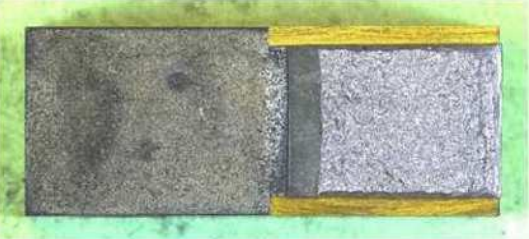
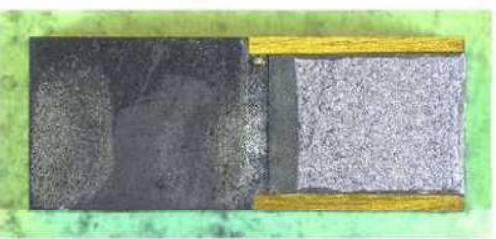
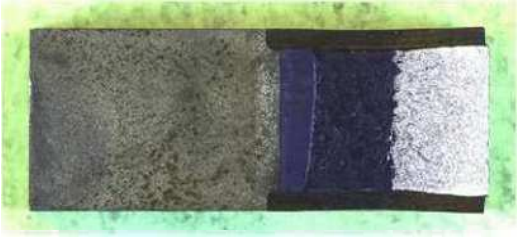
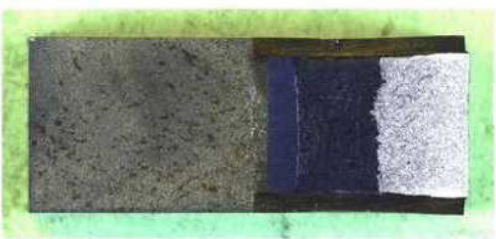
川内 1 号 第 4 回監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-45		
-15		
21		
100		

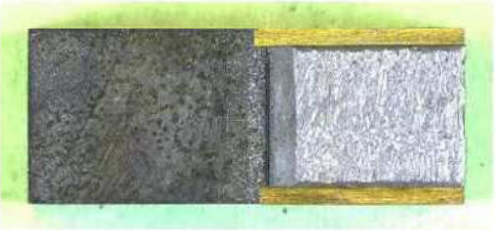
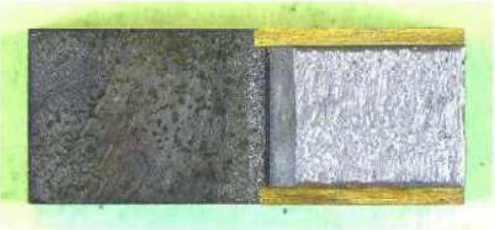
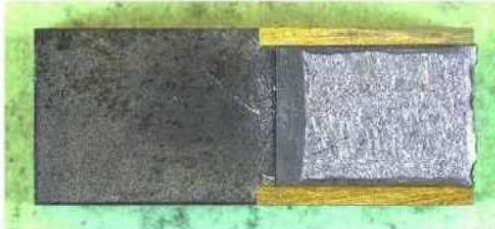
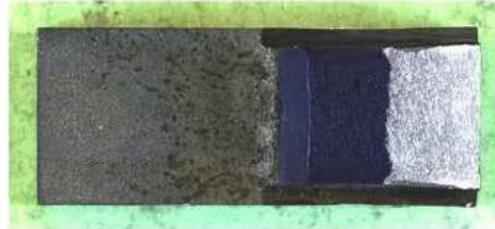
川内 1 号 第 4 回監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-45	
-15	
21	
100	

川内 1 号 第 5 回 監視 試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-20		
20		
50		
200		

川内 1 号 第 5 回 監視 試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-20	
20	
50	
200	

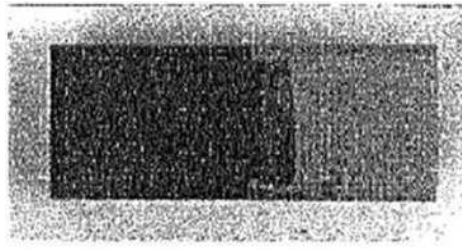
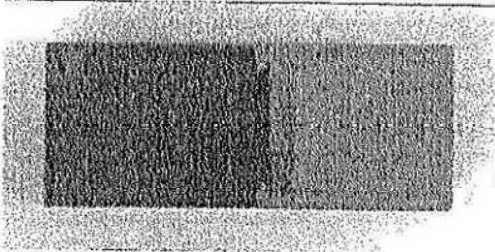
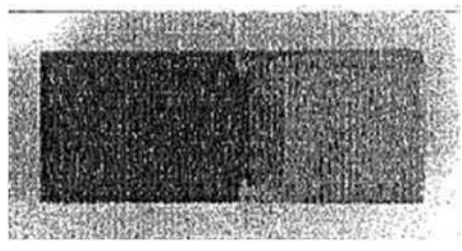
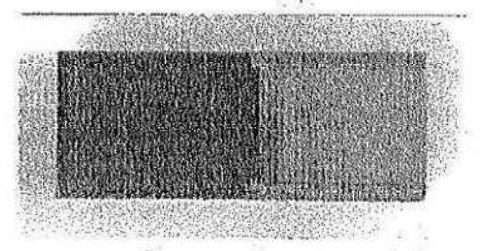
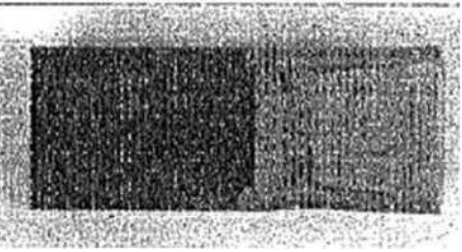
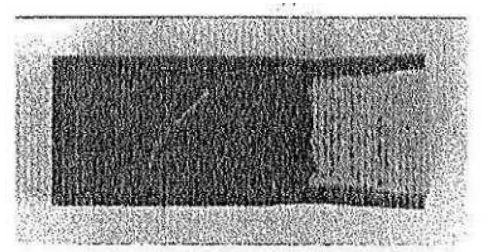
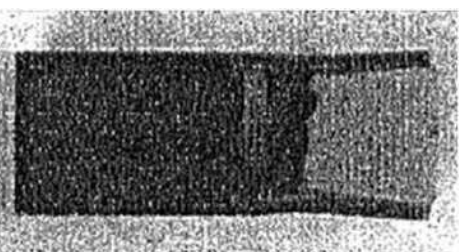
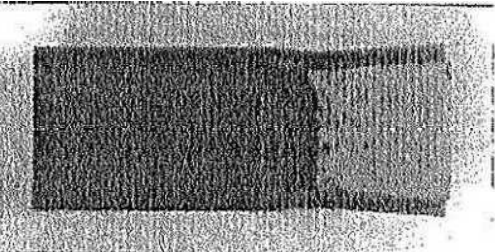
川内 2 号 監視試験による破壊靱性試験結果 ( 1 / 2 )

鋼材種類	監視試験回次	温度 (°C)	KIc (MPa√m)
母材	0	- 30	156.6
	0	- 30	227.3
	0	- 60	134.6
	0	- 60	100.2
	0	- 90	75.4
	0	- 90	51.8
	0	-120	78.8
	0	-120	81.2
	0	-150	51.2
	0	-150	45.9
	1	- 40	128.4
	1	- 80	94.3
	1	- 40	131.5
	1	- 80	66.7
	2	26	176.8
	2	- 40	58.6
	2	- 80	54.3
	2	26	241.6
	2	- 40	59.9
	2	- 80	55.8
	3	50	146.0
	3	- 20	66.9
	3	- 70	58.5
	3	50	186.0
	3	- 20	66.7
	3	- 70	41.8

川内 2 号 監視試験による破壊靱性試験結果 (2 / 2)

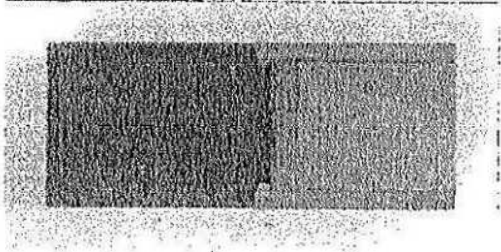
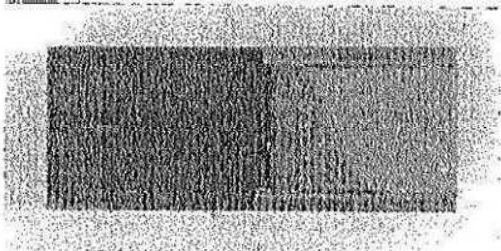
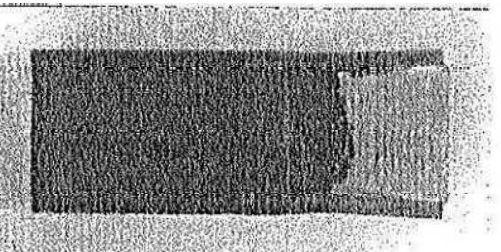
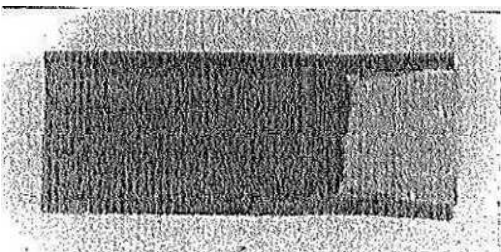
鋼材種類	監視試験回次	温度 (°C)	K <sub>Ic</sub> (MPa√m)
母材	4	50	113.0
	4	27	110.0
	4	- 20	62.1
	4	50	107.0
	4	27	112.0
	4	- 20	61.6
溶接金属	0	- 30	152.9
	0	- 30	154.4
	0	- 60	109.5
	0	- 60	122.8
	0	- 90	88.4
	0	- 90	89.0
	0	-120	68.5
	0	-120	75.0
	0	-150	44.3
	0	-150	38.1
	1	- 40	140.8
	1	- 80	58.6
	2	26	214.3
	2	- 40	74.7
	2	- 80	58.6
	3	50	100.0
	3	- 40	58.2
	3	- 90	38.6
	4	50	88.5
	4	27	111.0
4	- 20	58.7	

川内 2 号 第 1 回 監視 試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

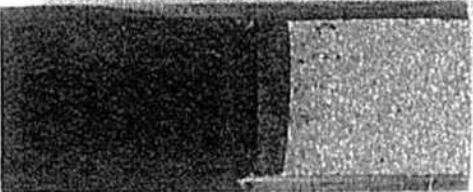
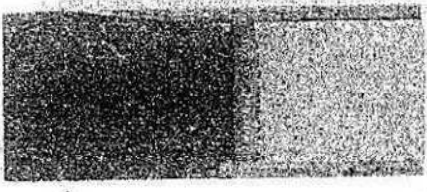
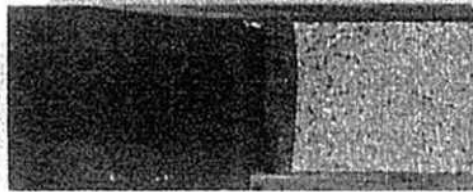
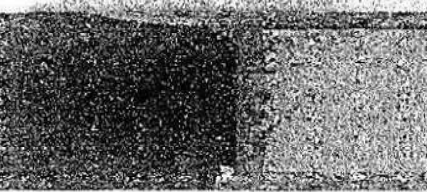
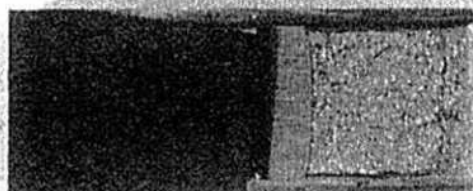
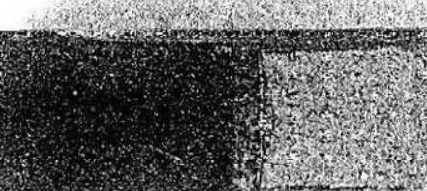


破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-80		
-40		
12		
100		



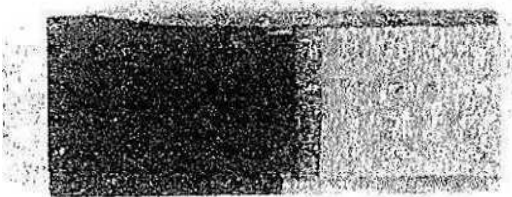
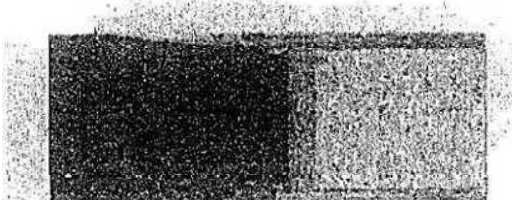
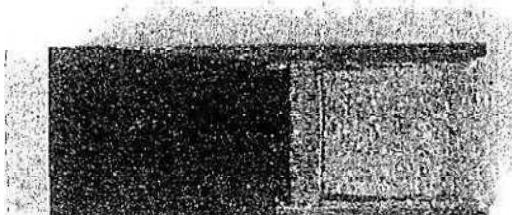
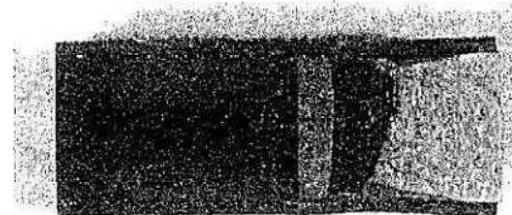
川内 2 号 第 1 回監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-80	
-40	
19	
100	

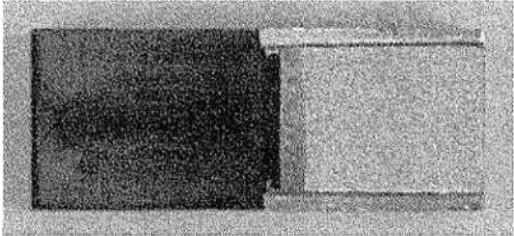
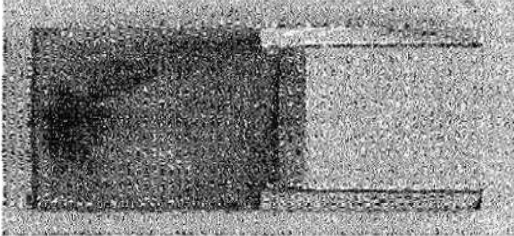
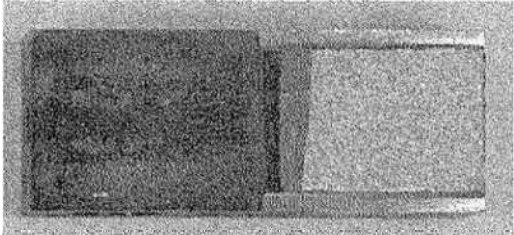
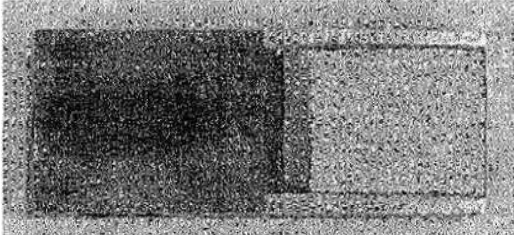
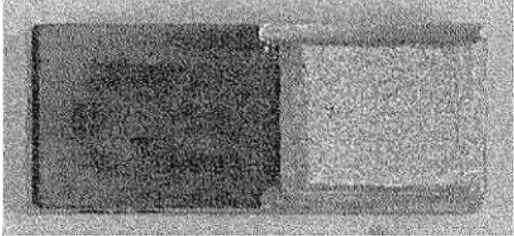
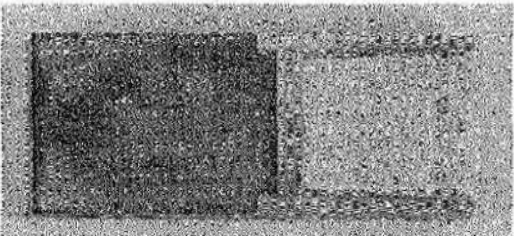
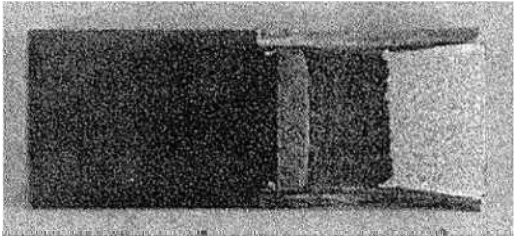
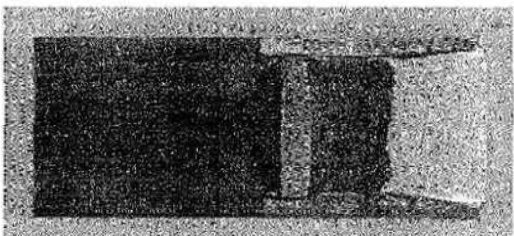
川内 2 号 第 2 回 監視 試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-80		
-40		
26		
100		

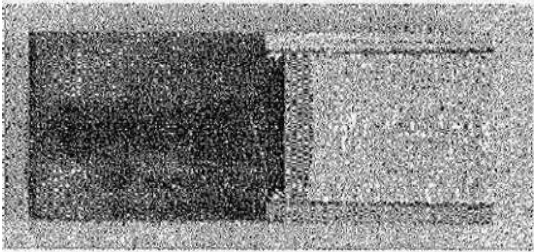
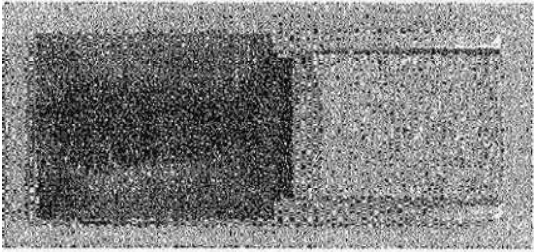
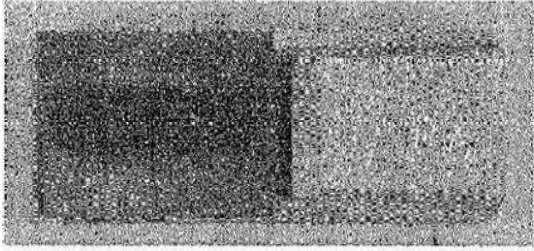
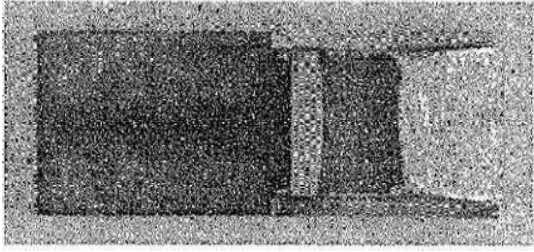
川内 2 号 第 2 回監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-80	
-40	
26	
100	

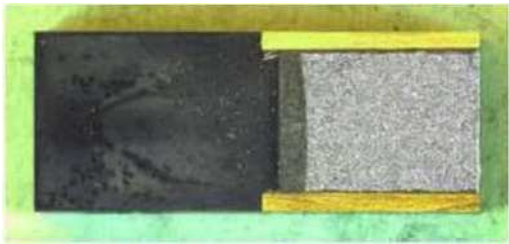
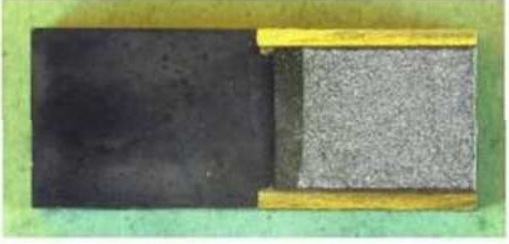
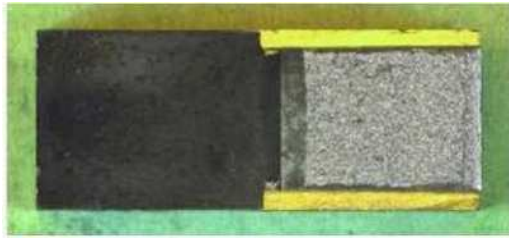
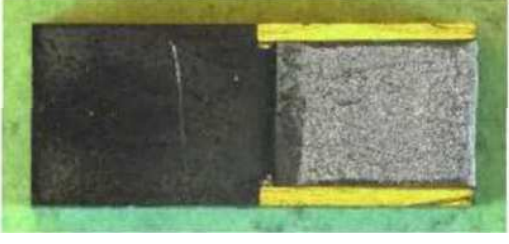
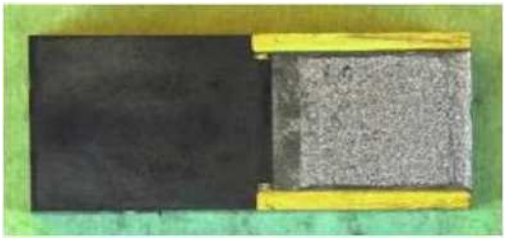
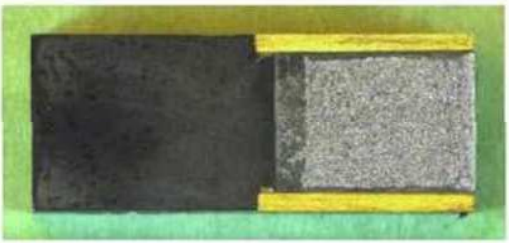
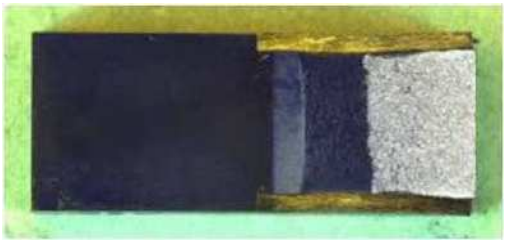

川内 2 号 第 3 回 監視 試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-70		
-20		
50		
230		

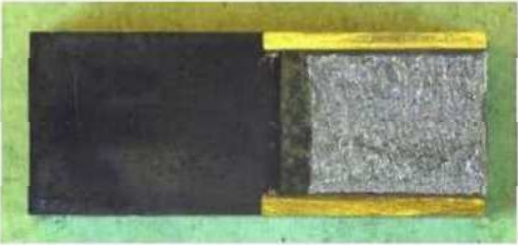
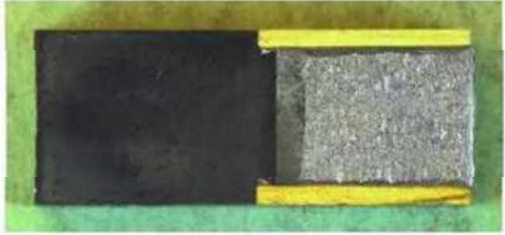
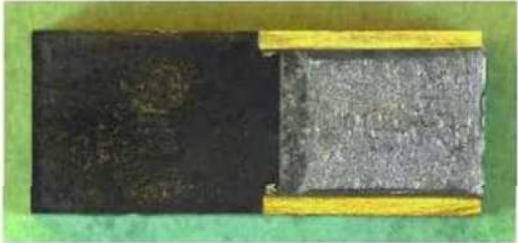
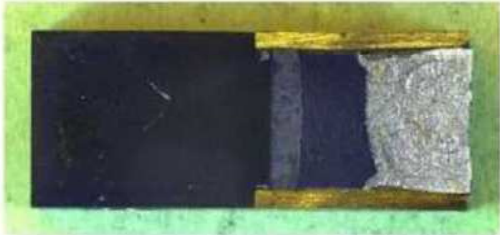
川内 2 号 第 3 回 監視 試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-90	
-40	
50	
200	

川内 2 号 第 4 回 監視 試験 破壊靱性試験片の破面状況 (母材)

破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真	
-20		
27		
50		
200		

川内 2 号 第 4 回 監視試験 破壊靱性試験片の破面状況 (溶接金属)

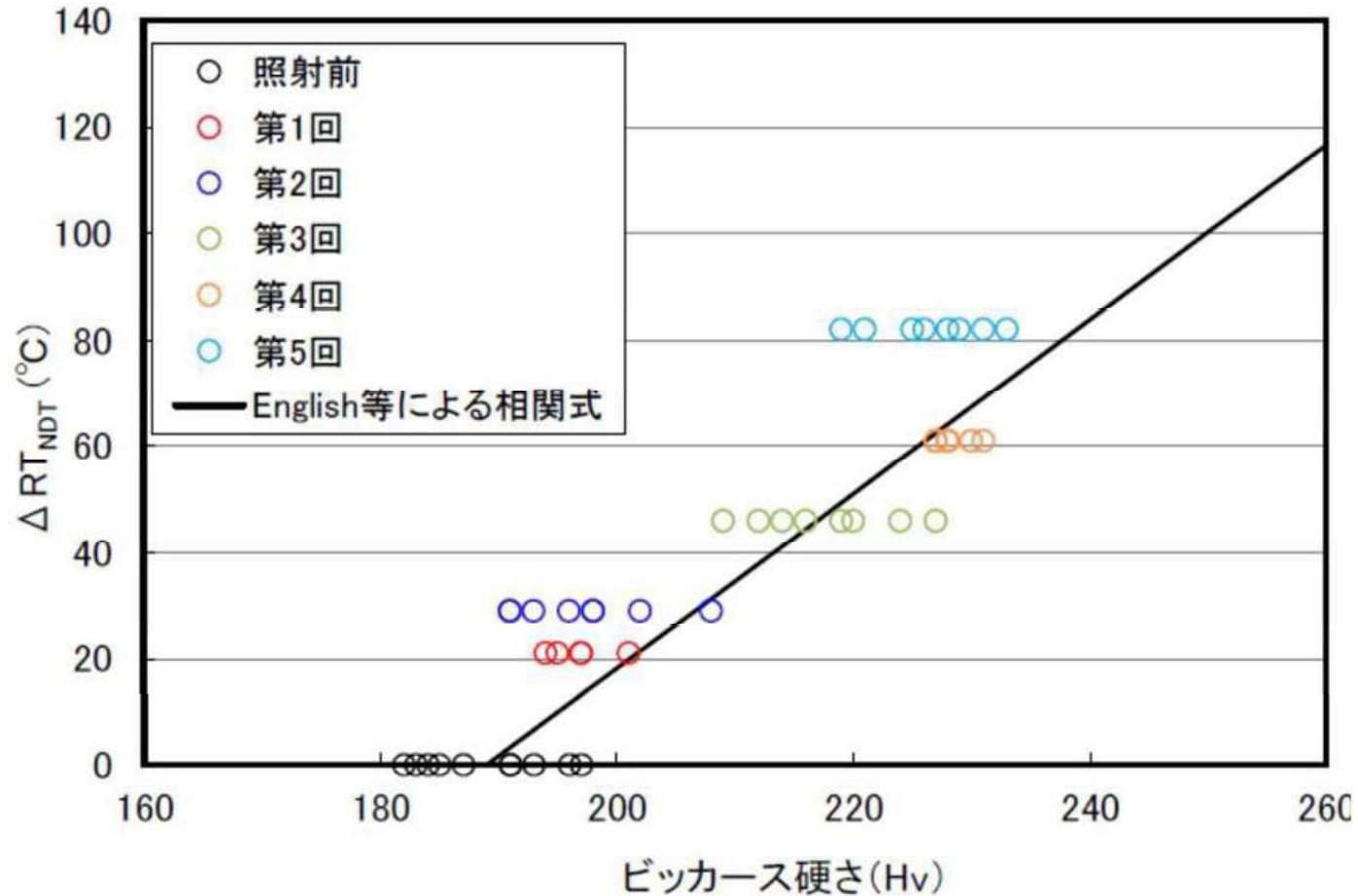
破壊靱性試験温度 (°C)	破 面 写 真
-20	
27	
50	
200	

# 参 考 資 料 4

(ビッカース硬さ試験結果)

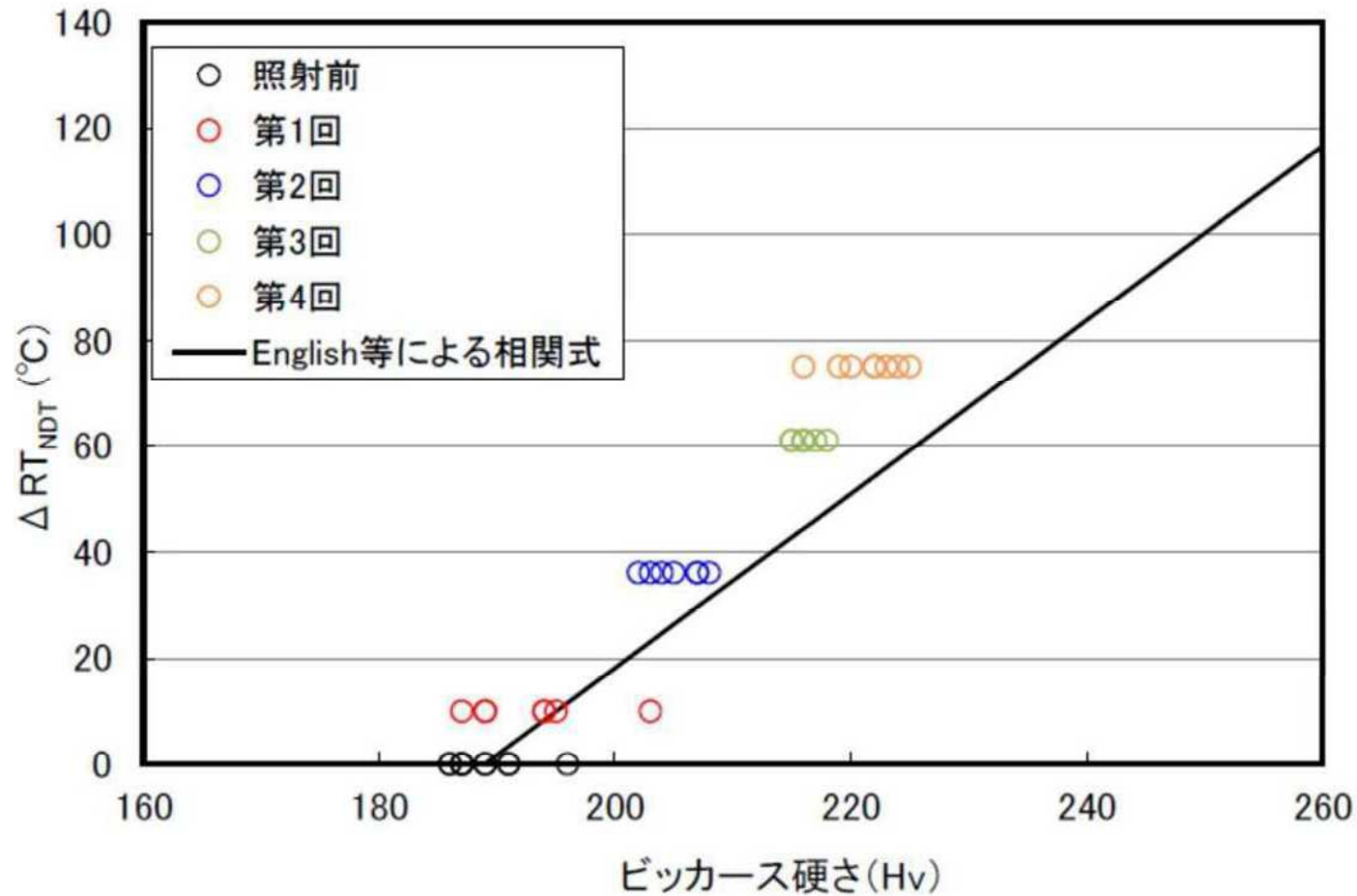


川内 1 号炉 ビッカース硬さ試験結果



		照射前	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
試験力	1kgf		○	○	○	○	○
	10kgf				○	○	○
	20kgf	○		○			

川内 2 号炉 ビッカース硬さ試験結果



		照射前	第1回	第2回	第3回	第4回
試験力	1kgf		○	○	○	○
	10kgf		○	○	○	○
	20kgf	○				

## 参 考 資 料 5

(アトムプローブ測定及びTEM観察結果)

○川内1, 2号炉の監視試験片について、試験済みの残材を用いて、電力中央研究所にてマイクロ組織観察(アトムプローブ測定、TEM観察)を行うことによって、脆化予測手法の知見拡充に取り組んでいる。

アトムプローブ測定実績(溶質原子クラスターの測定)

- ・川内1号炉: 第3回及び第4回に取出した監視試験片
- ・川内2号炉: 第3回に取出した監視試験片

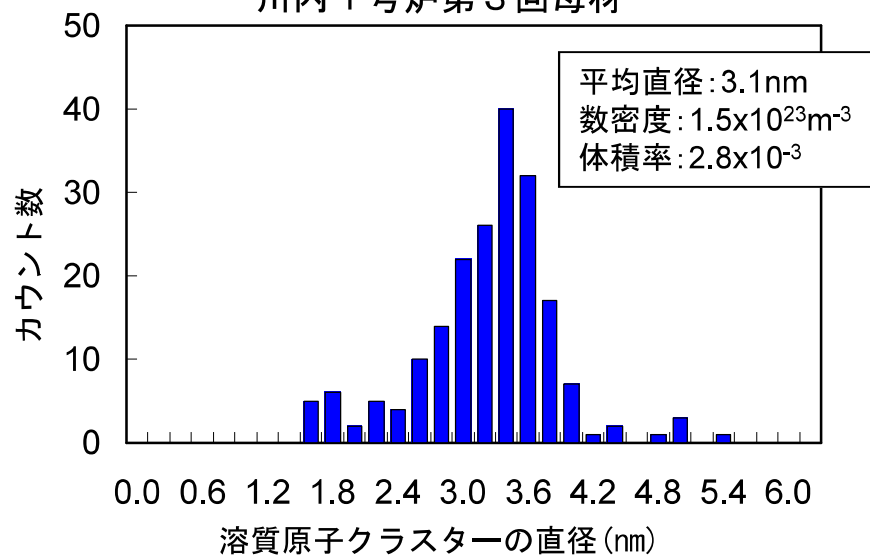
TEM観察実績(転位ループの測定)

- ・川内1号炉: 第3回及び第4回に取出した監視試験片
- ・川内2号炉: 第3回に取出した監視試験片

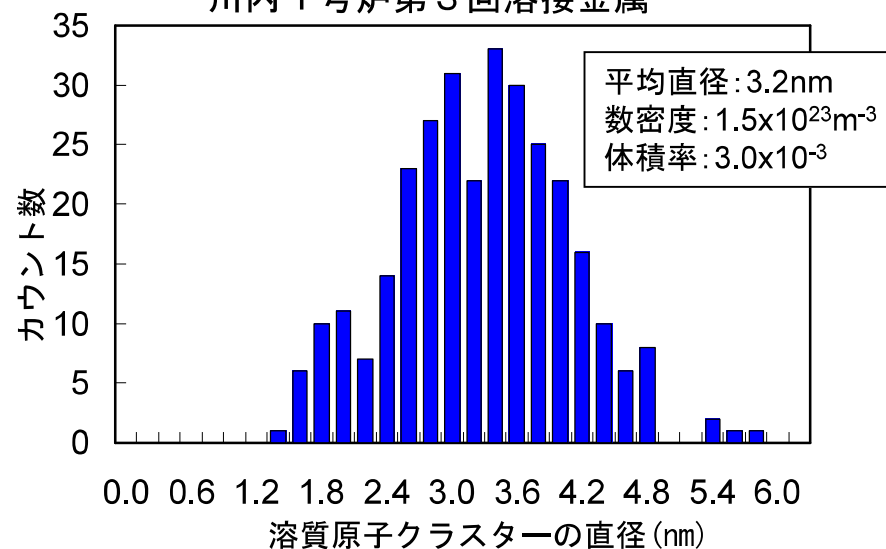
○(一社)日本電気協会の規格である「原子炉構造材の監視試験方法JEAC4201-2007 [2013年追補版]」に定められている脆化予測手法(関連温度の予測手法)の開発には川内1, 2号炉のアトムプローブ測定結果も用いられている。

○今後も、脆化予測手法に関する知見拡充に取り組んでいく。

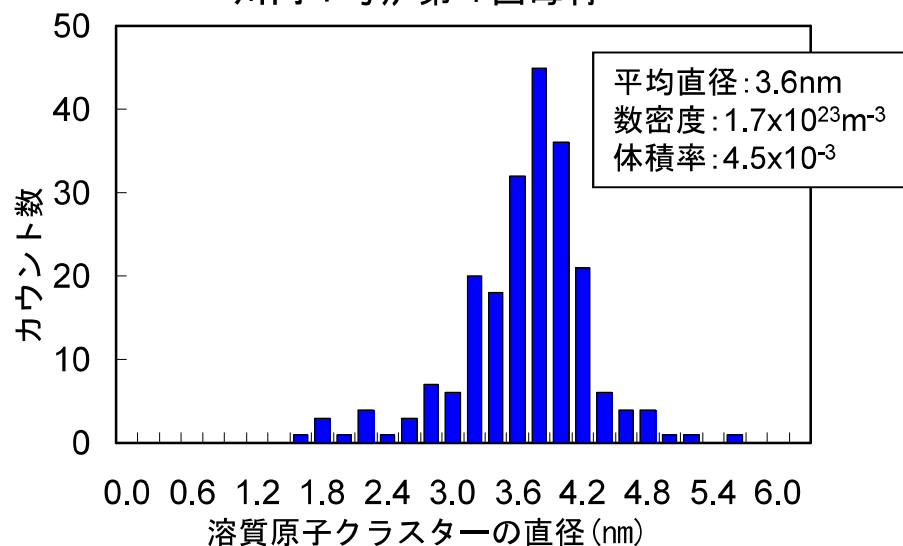
川内1号炉第3回母材



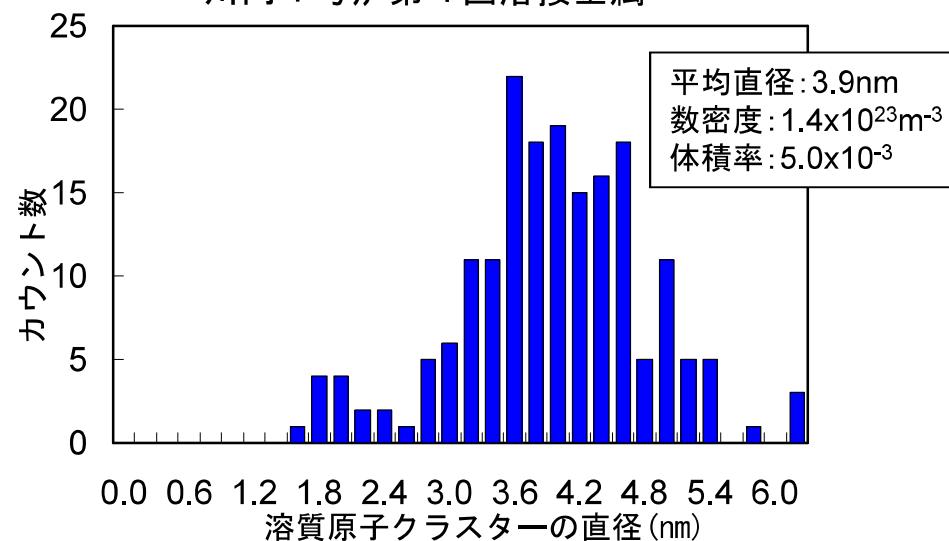
川内1号炉第3回溶接金属



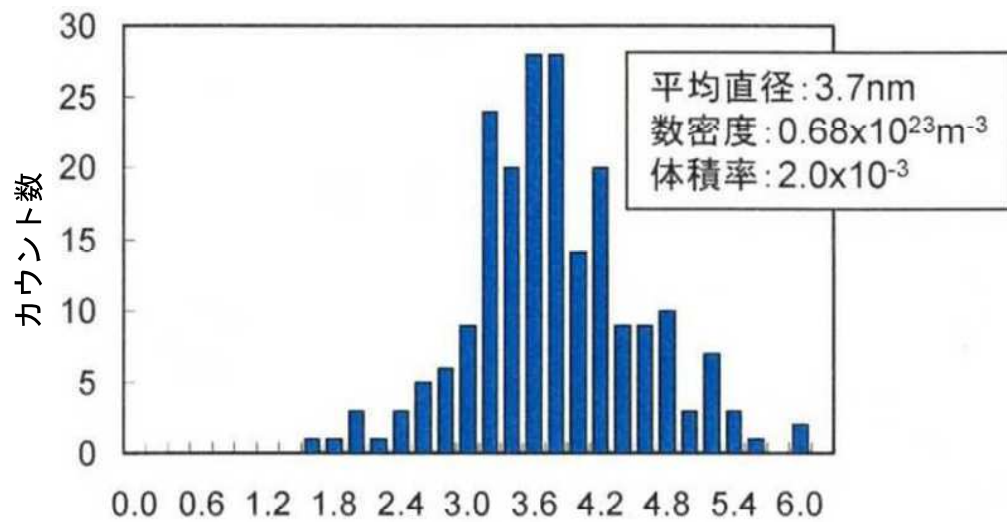
川内1号炉第4回母材



川内1号炉第4回溶接金属

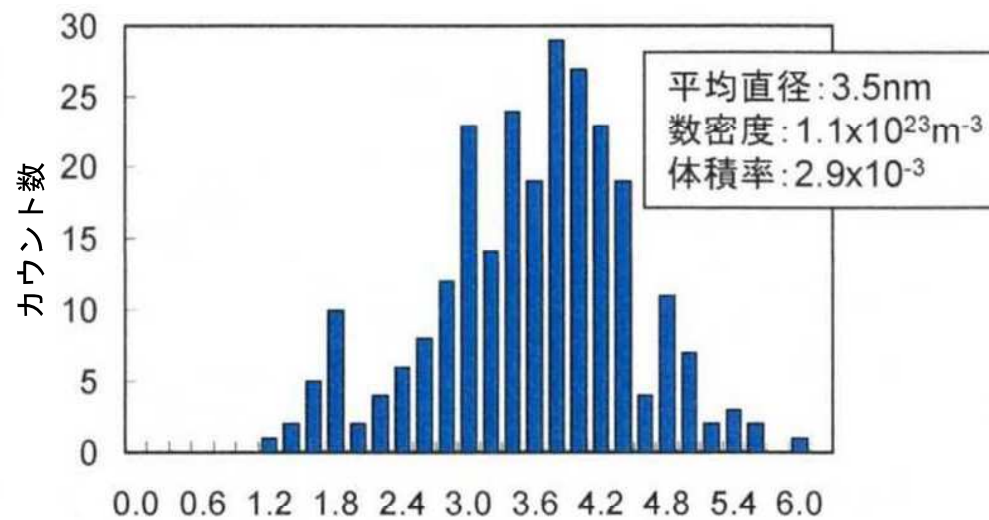


川内2号炉第3回母材



溶質原子クラスターの直径 (nm)

川内2号炉第3回溶接金属



溶質原子クラスターの直径 (nm)

アトムプローブ測定により算出された溶質原子クラスターの体積率の平方根は、関連温度の移行量と相関があるという知見が得られている。現行の関連温度の予測手法の開発には、以下の川内1, 2号炉のデータも用いられている。

号炉	鋼種	取出回	溶質原子クラスター			監視試験片の 関連温度 移行量 [°C]
			数密度 [個/m <sup>3</sup> ]	平均直径 [nm]	体積率平方根 (体積率)	
川内1号炉	母材	第3回	1.5x10 <sup>23</sup>	3.1	0.053 ( 2.8x10 <sup>-3</sup> )	46
		第4回	1.7x10 <sup>23</sup>	3.6	0.067 ( 4.5x10 <sup>-3</sup> )	61
	溶接金属	第3回	1.5x10 <sup>23</sup>	3.2	0.055 ( 3.0x10 <sup>-3</sup> )	41
		第4回	1.4x10 <sup>23</sup>	3.9	0.071 ( 5.0x10 <sup>-3</sup> )	63
川内2号炉	母材	第3回	0.69x10 <sup>23</sup>	3.7	0.045 ( 2.0x10 <sup>-3</sup> )	61
	溶接金属	第3回	1.1x10 <sup>23</sup>	3.5	0.054 ( 2.9x10 <sup>-3</sup> )	73

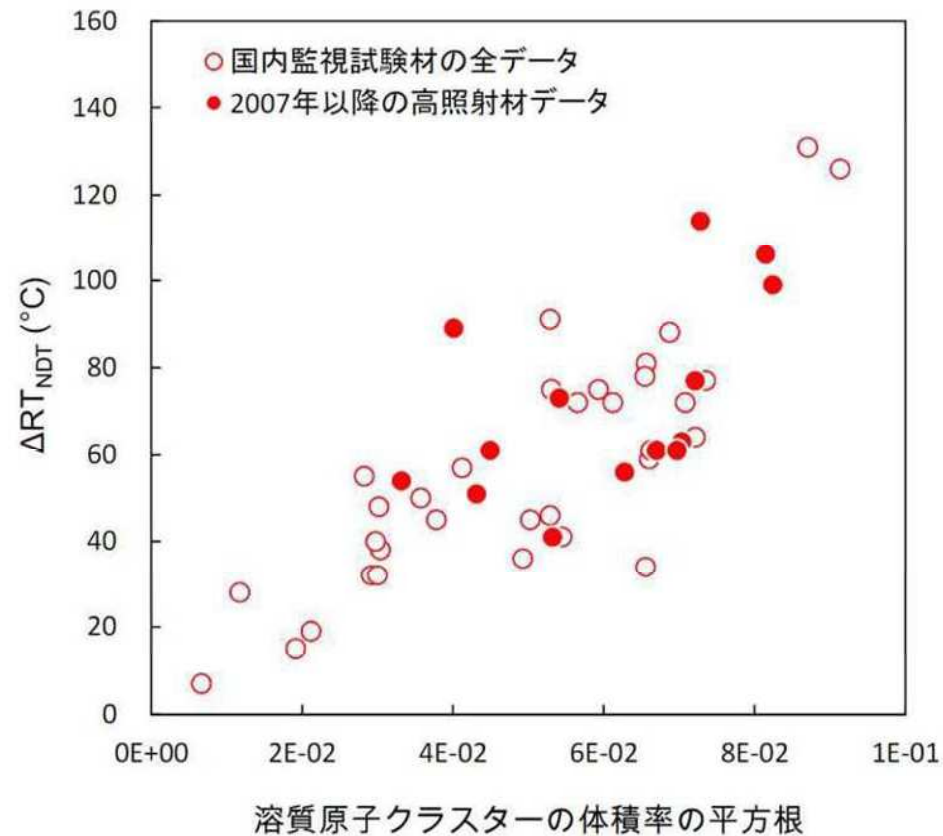
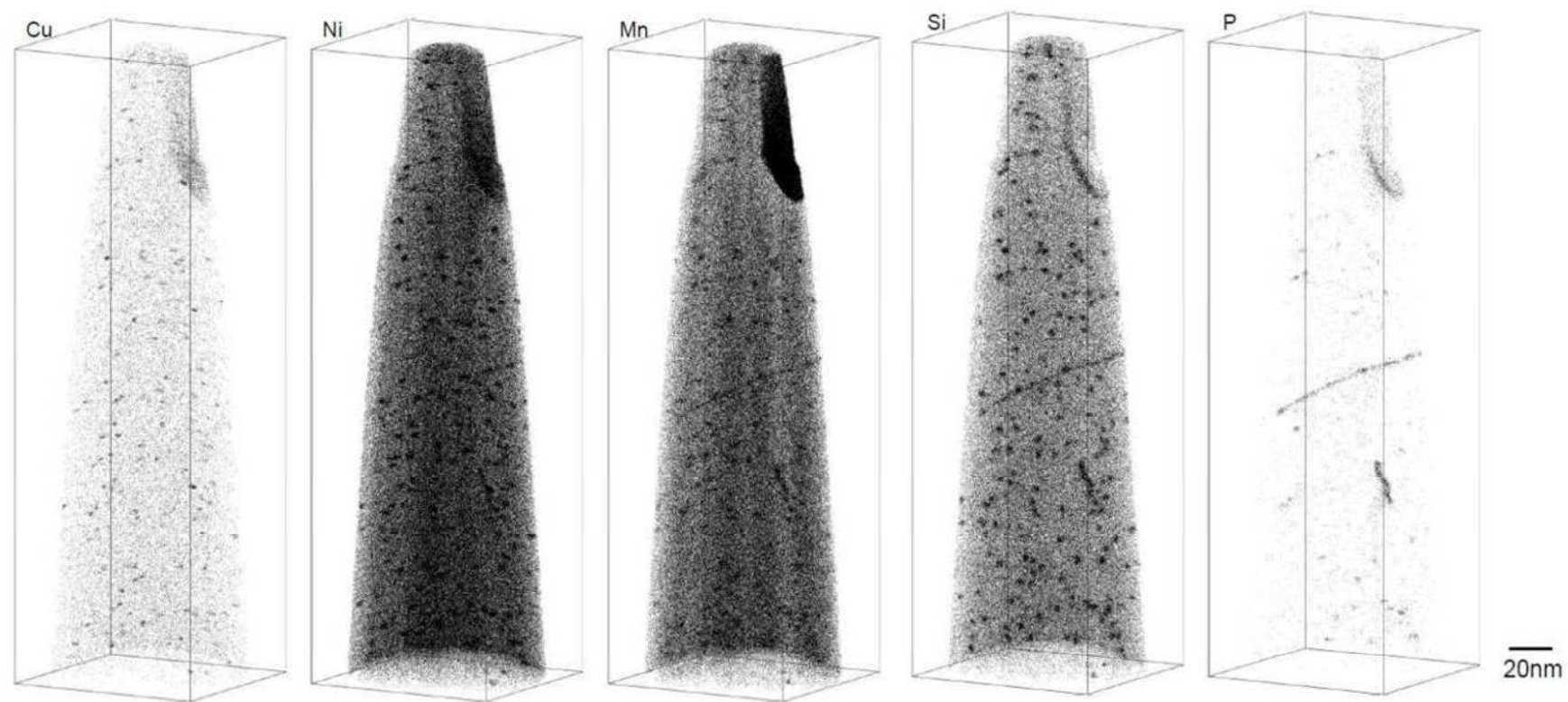


図 22 国内監視試験材における溶質原子クラスターの体積率と遷移温度上昇の相関

「電力中央研究所報告Q12007 (一財) 電力中央研究所」より引用

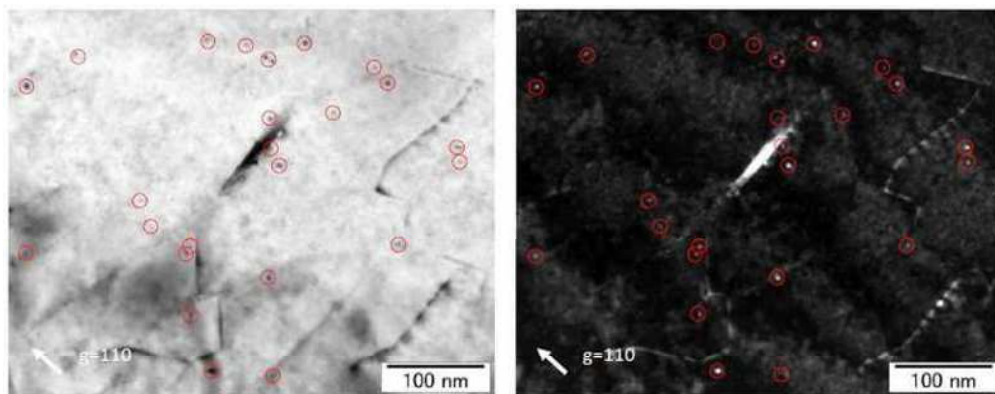
(補足)  $\Delta RT_{NDT}$  : 関連温度の移行量





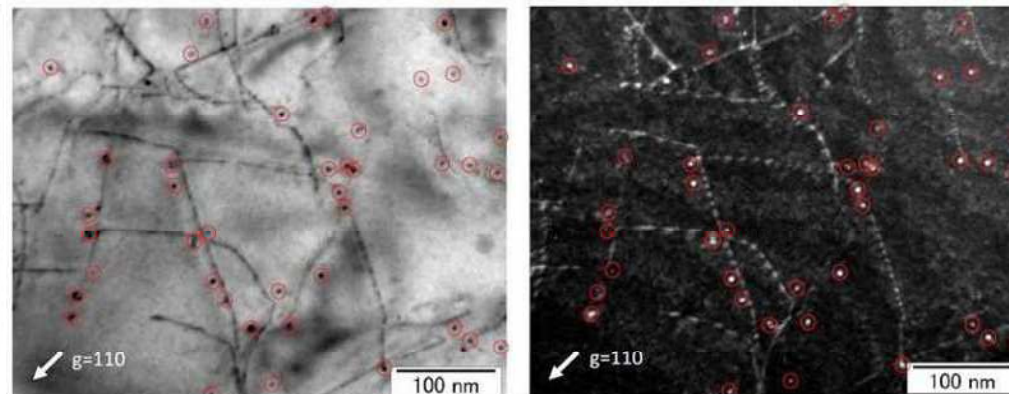
川内1号炉第4回に取出した監視試験片(母材)のアトムプローブ観察マップ(例)

- TEM（透過型電子顕微鏡）による川内1号炉の第3回及び第4回、川内2号炉の第3回の監視試験片の観察結果を示す（次ページのスライドから）。
- 転位ループの数密度の算出にあたっては、各回の監視試験片について、それぞれ2試料ずつを製作し、各試料に対して2つの視野を観察している。このため、川内1号炉の第3回と第4回でそれぞれ4つの視野（合計8つの視野）、川内2号炉の第3回で4つの視野で観察している。
- 視野によっては、観察される転位ループの数は異なるため、2つの試料に対して視野を変えて観察を行い、平均して数密度を算出している。



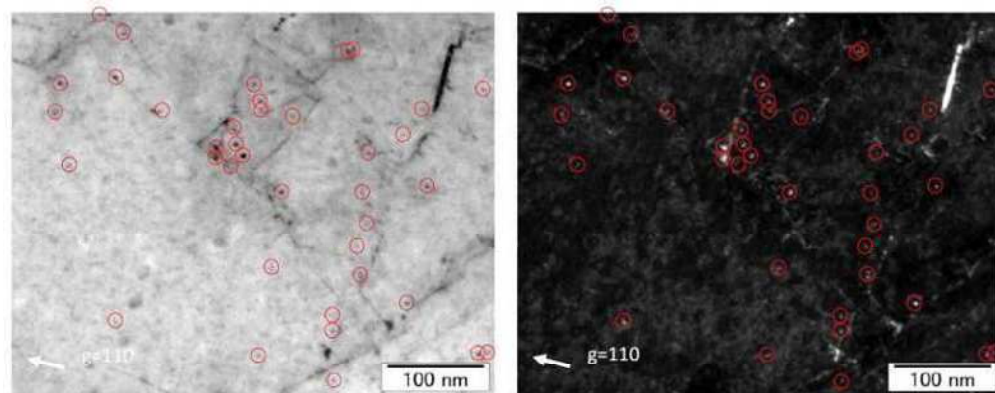
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 8 川内 1 号機、第 3 回監視試験母材 (試料 1、視野 1)、TEM 観察像



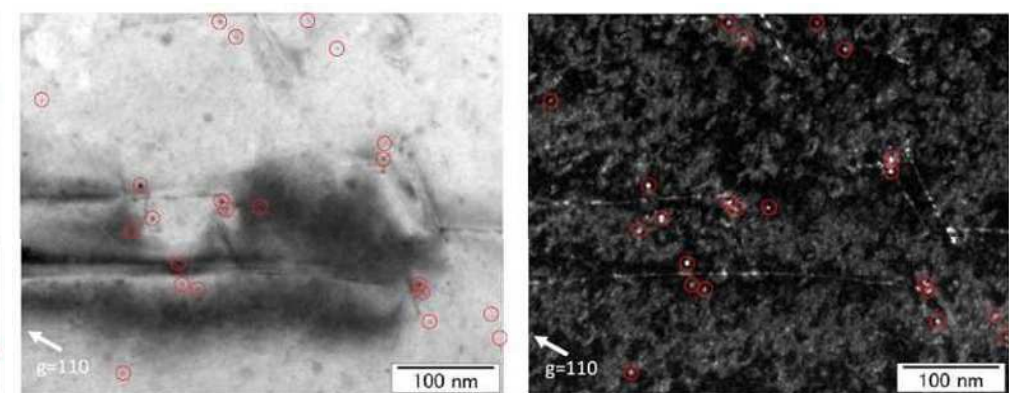
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 9 川内 1 号機、第 3 回監視試験母材 (試料 1、視野 2)、TEM 観察像



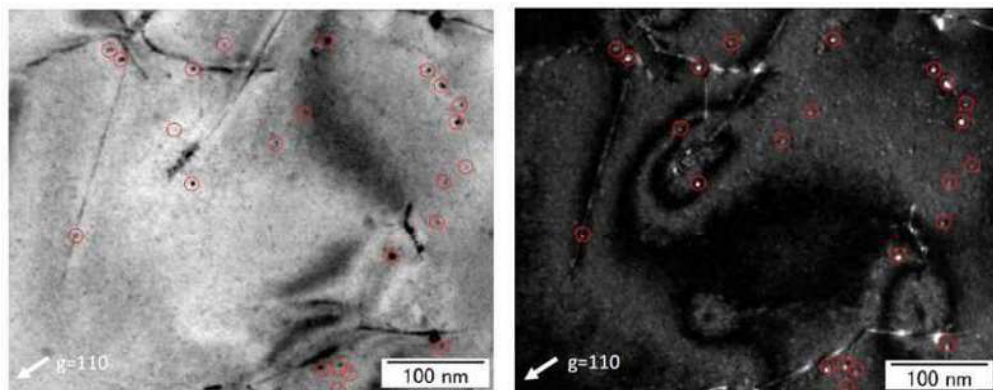
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 10 川内 1 号機、第 3 回監視試験母材 (試料 2、視野 1)、TEM 観察像



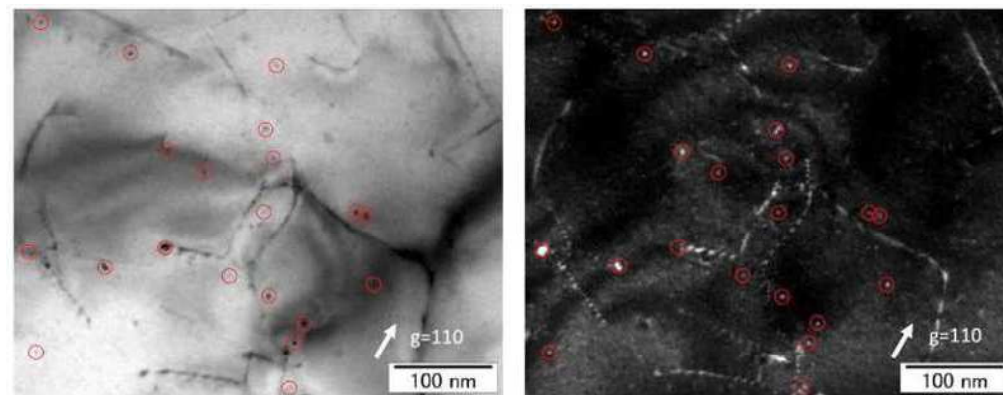
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 11 川内 1 号機、第 3 回監視試験母材 (試料 2、視野 2)、TEM 観察像



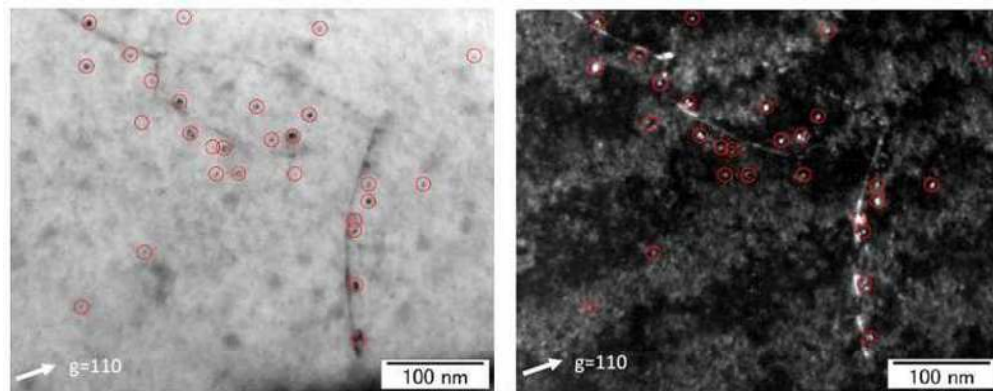
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 12 川内 1 号機、第 4 回監視試験母材 (試料 1、視野 1)、TEM 観察像



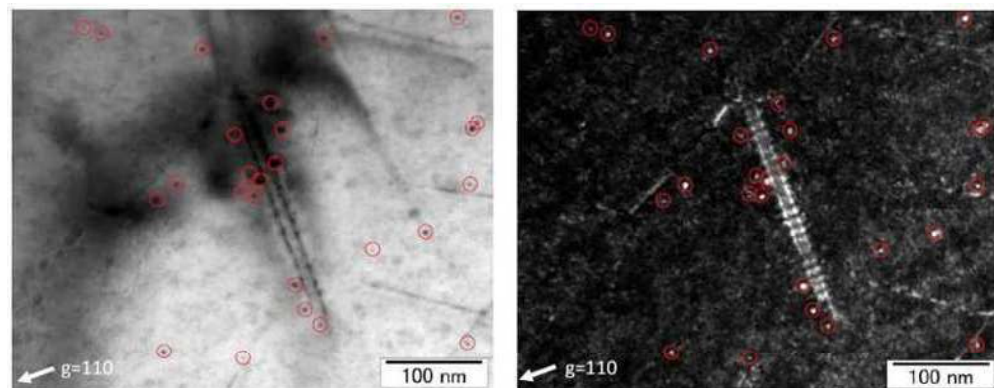
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 13 川内 1 号機、第 4 回監視試験母材 (試料 1、視野 2)、TEM 観察像



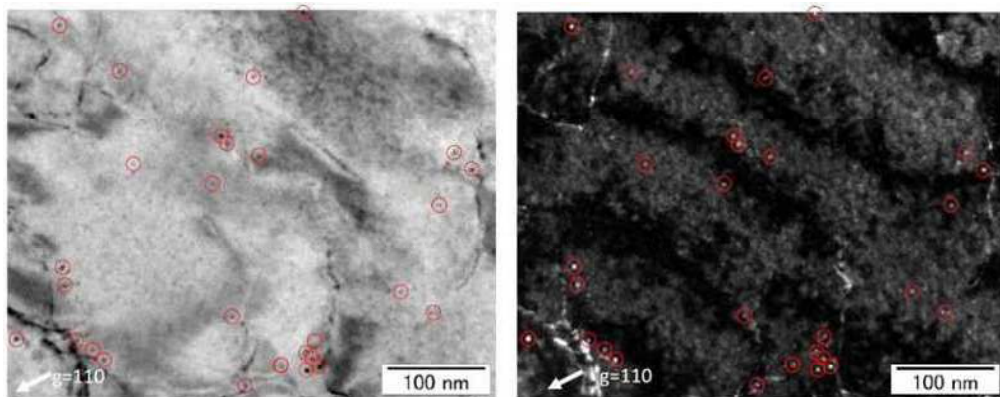
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 14 川内 1 号機、第 4 回監視試験母材 (試料 2、視野 1)、TEM 観察像



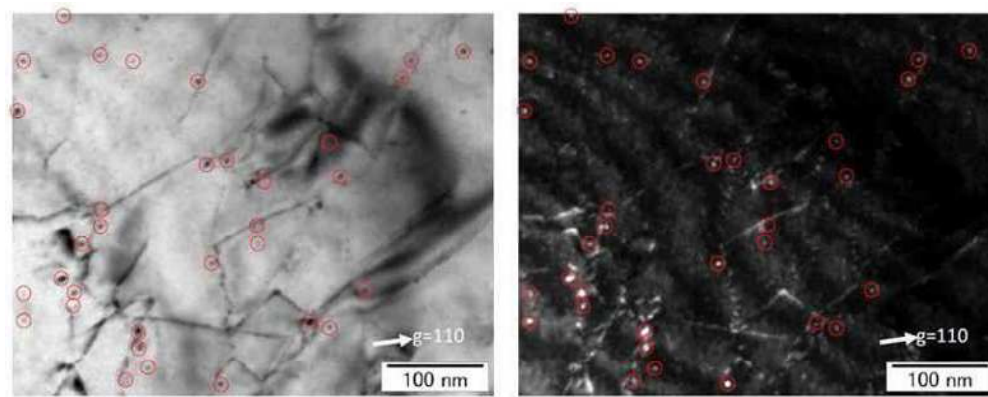
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 15 川内 1 号機、第 4 回監視試験母材 (試料 2、視野 2)、TEM 観察像



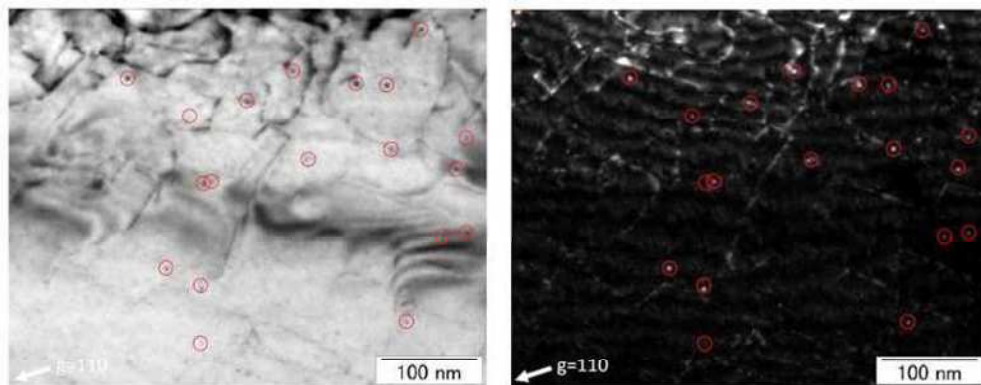
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 16 川内 1 号機、第 3 回監視試験溶接金属 (試料 1、視野 1)、TEM 観察像



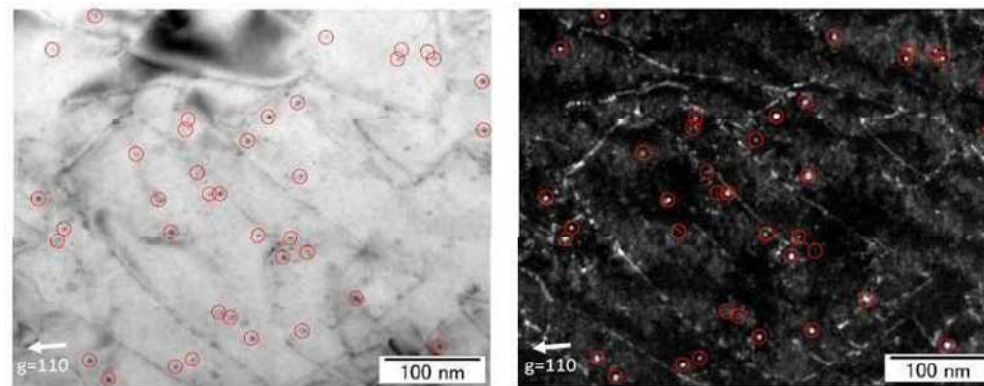
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 17 川内 1 号機、第 3 回監視試験溶接金属 (試料 1、視野 2)、TEM 観察像



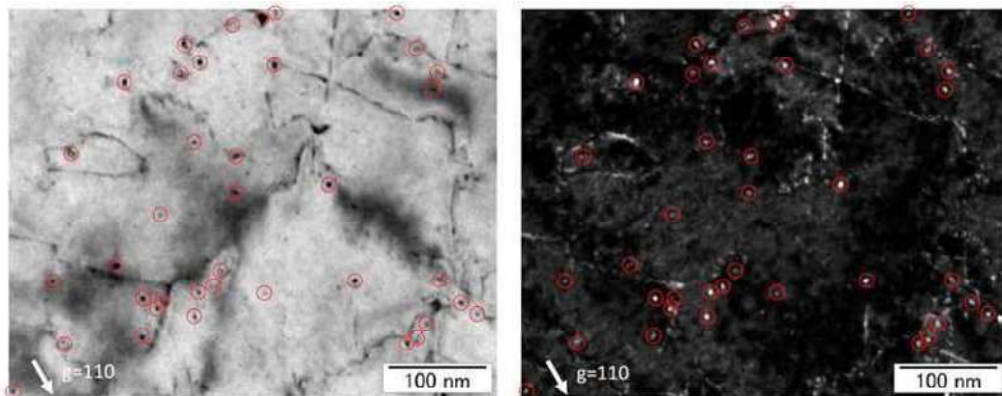
(a) 明視野像 (b) 暗視野像

図 18 川内 1 号機、第 3 回監視試験溶接金属 (試料 2、視野 1)、TEM 観察像



(a) 明視野像 (b) 暗視野像

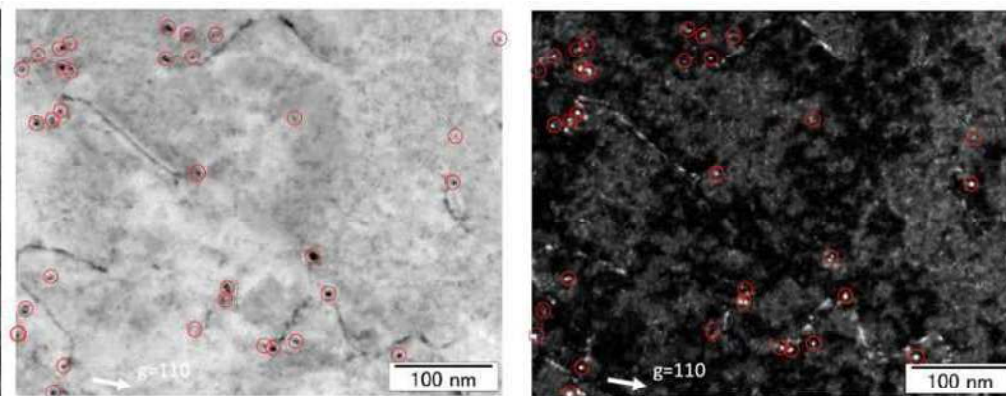
図 19 川内 1 号機、第 3 回監視試験溶接金属 (試料 2、視野 2)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

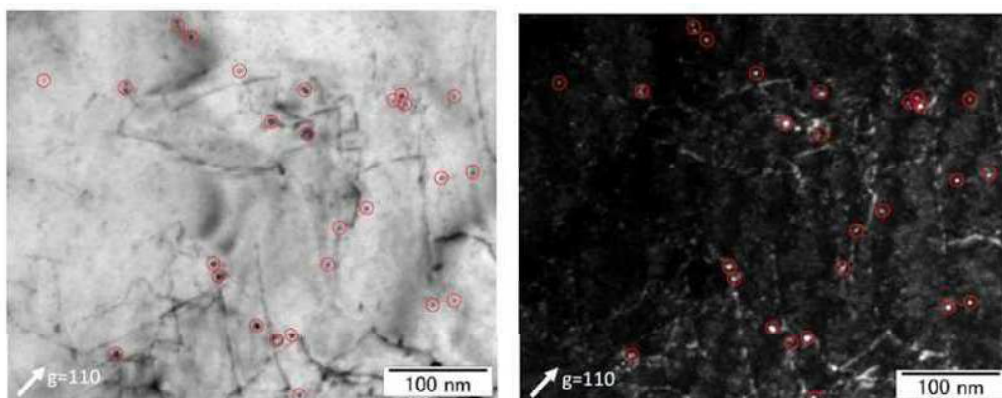
図 20 川内 1 号機、第 4 回監視試験溶接金属 (試料 1、視野 1)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

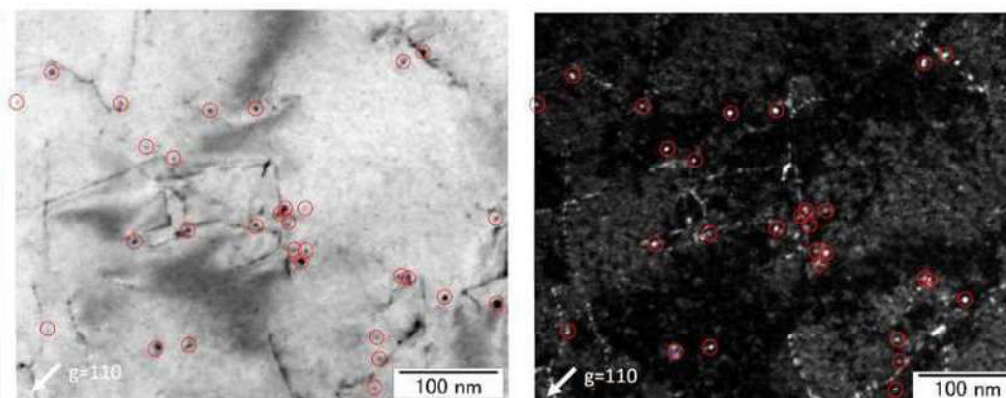
図 21 川内 1 号機、第 4 回監視試験溶接金属 (試料 1、視野 2)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

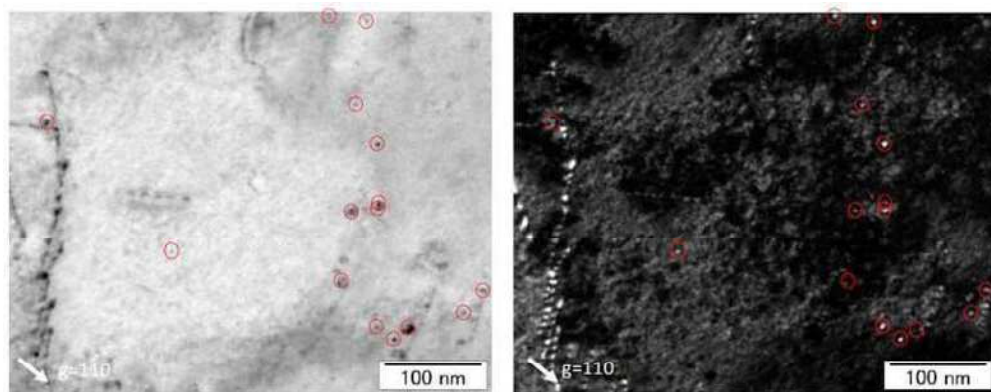
図 22 川内 1 号機、第 4 回監視試験溶接金属 (試料 2、視野 1)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

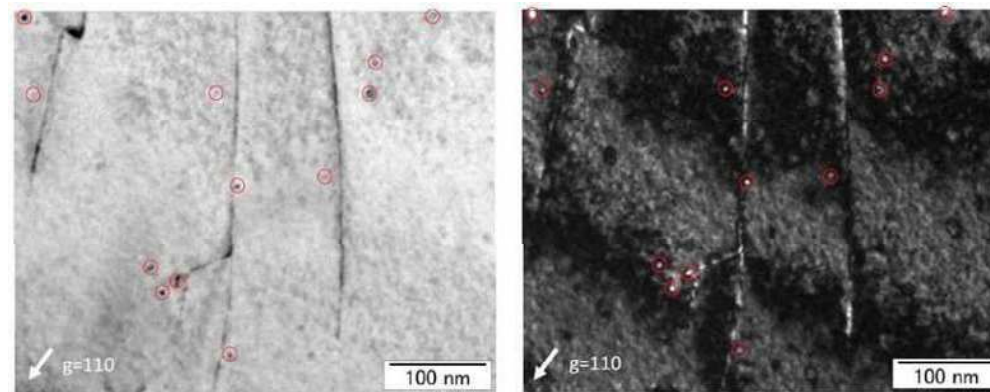
図 23 川内 1 号機、第 4 回監視試験溶接金属 (試料 2、視野 2)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

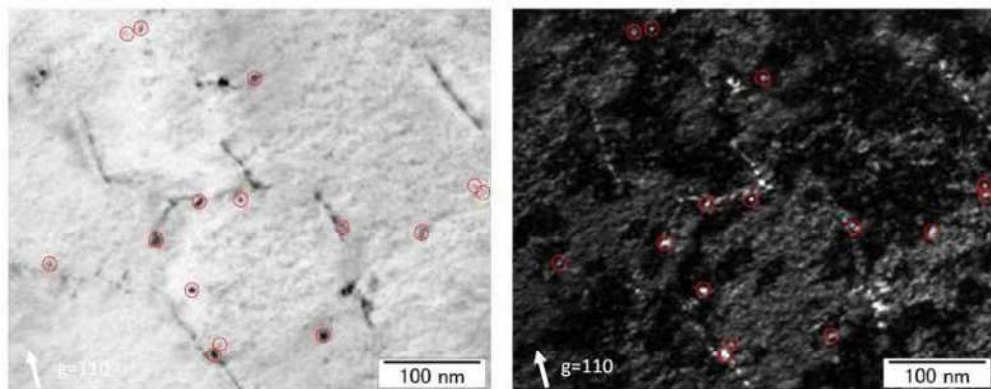
図 24 川内 2 号機、第 3 回監視試験母材 (試料 1、視野 1)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

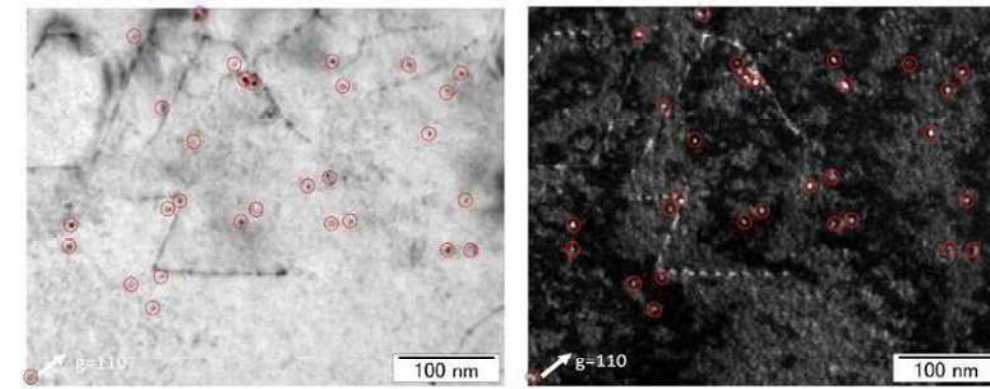
図 25 川内 2 号機、第 3 回監視試験母材 (試料 1、視野 2)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

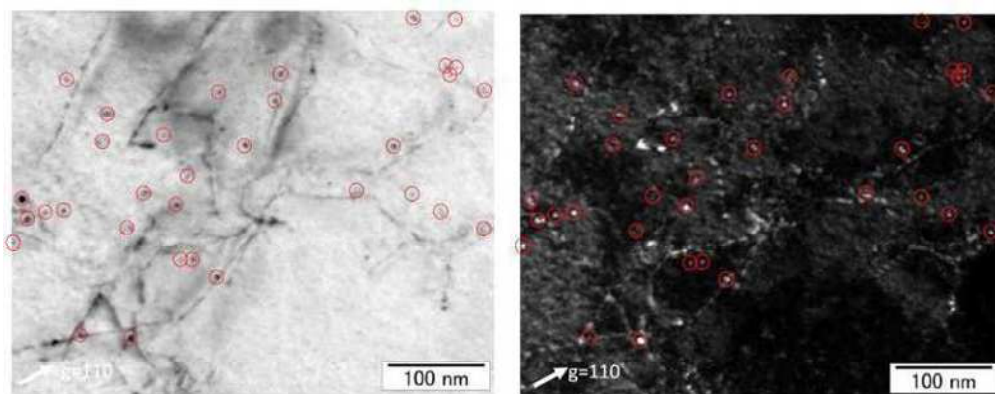
図 26 川内 2 号機、第 3 回監視試験母材 (試料 2、視野 1)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

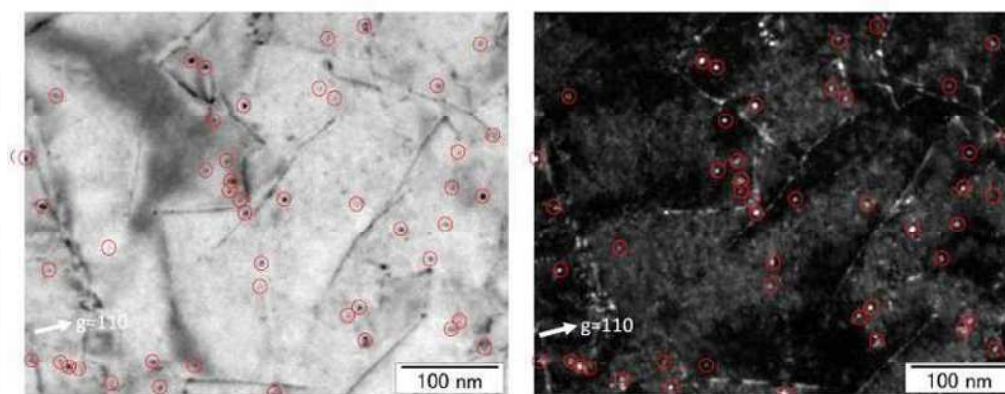
図 27 川内 2 号機、第 3 回監視試験母材 (試料 2、視野 2)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

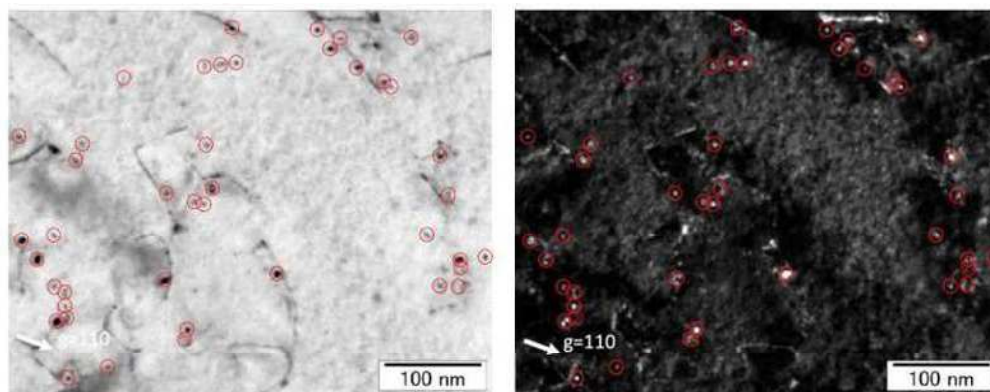
図 28 川内 2 号機、第 3 回監視試験溶接金属 (試料 1、視野 1)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

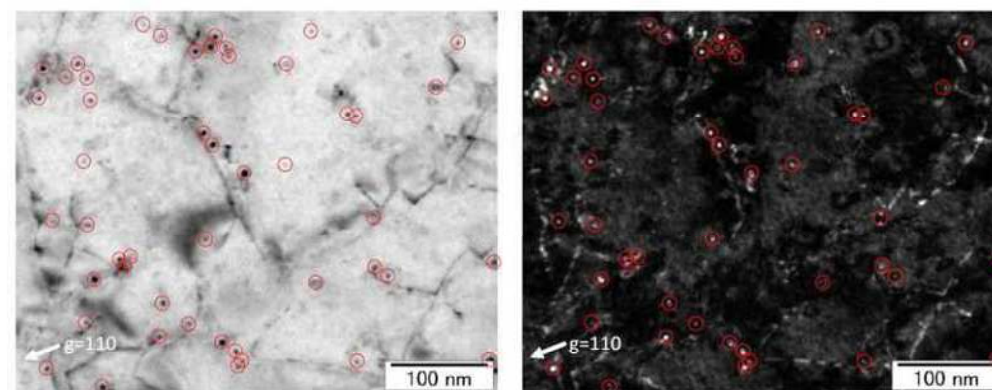
図 29 川内 2 号機、第 3 回監視試験溶接金属 (試料 1、視野 2)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

図 30 川内 2 号機、第 3 回監視試験溶接金属 (試料 2、視野 1)、TEM 観察像



(a) 明視野像

(b) 暗視野像

図 31 川内 2 号機、第 3 回監視試験溶接金属 (試料 2、視野 2)、TEM 観察像



TEM観察結果によって測定される転位ループ数密度の関連温度の移行量への寄与(推定値)は、以下のとおりとなる。

号炉	鋼種	取出回	転位ループ			関連温度 移行量の 推定値 [°C]
			全測定数	平均直径 [nm]	平均数密度 [個/m <sup>3</sup> ]	
川内1号炉	母材	第3回	126	5.2	2.1x10 <sup>21</sup>	10
		第4回	101	5.2	2.0x10 <sup>21</sup>	10
	溶接金属	第3回	119	5.3	2.6x10 <sup>21</sup>	15
		第4回	132	6.2	4.1x10 <sup>21</sup>	20
川内2号炉	母材	第3回	71	5.3	2.1x10 <sup>21</sup>	10
	溶接金属	第3回	171	5.1	4.3x10 <sup>21</sup>	18

○転位ループの数密度は、TEMを用いて撮影した観察像(明視野像・暗視野像)から、それぞれ黒及び白の明瞭なコントラストを有する粒子の数をカウントし、体積で除することで算出している。特定の回析条件で観察されない転位ループ分を少なく見積もることがないように補正係数かけて算出する。

$$N = v \cdot \frac{C}{S \cdot t}$$

N: 転位ループの数密度 (m<sup>-3</sup>)  
 v: 1.5 (観察できない転位ループに関する補正係数)  
 C: TEM写真上の転位ループのカウント数  
 S: TEM写真の観察面積 (nm<sup>2</sup>)  
 t: 試料厚さ (nm)

○転位ループの関連温度移行量(推定値)は、「高照射量領域の照射脆化予測に関する報告書(独)原子力安全基盤機構」での評価方法等を参考にOrowanの式を用いて行った。