

超大型コンテナ船用極厚鋼板の 必要アレスト靱性に関する研究開発

2016年9月



一般財団法人 日本海事協会
一般社団法人 日本溶接協会

内容

1. 緒言、目的

2. 板厚80mm超の要求Kca値(構造モデル試験)

2.1 シナリオ1(HSC→UD)のアレスト試験

/ 供試鋼、試験方法、試験結果

2.2 シナリオ2(UD→HSC)のアレスト試験

/ 供試鋼、試験方法、試験結果

3. 結論

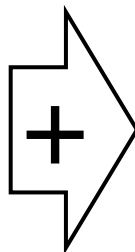
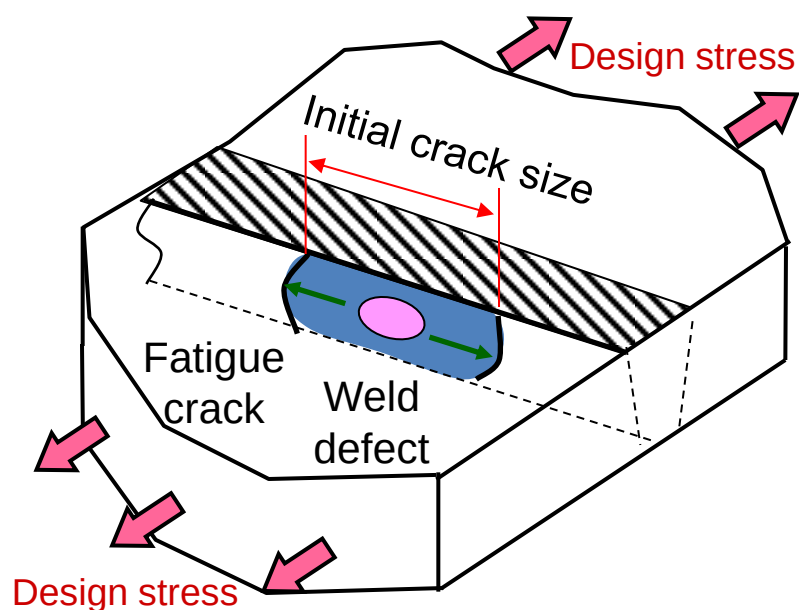
アレスト要求の位置付け

- 溶接構造物の二重の安全性

脆性亀裂発生

脆性亀裂非発生

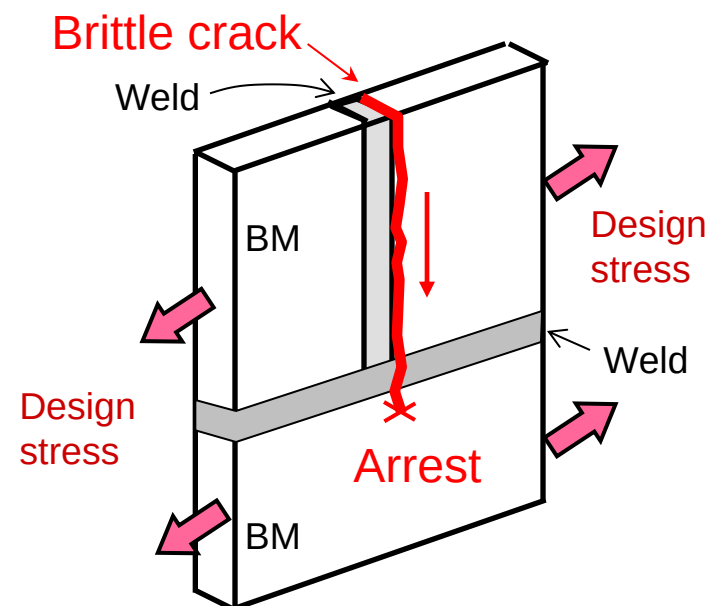
破壊靱性要求(溶接部)



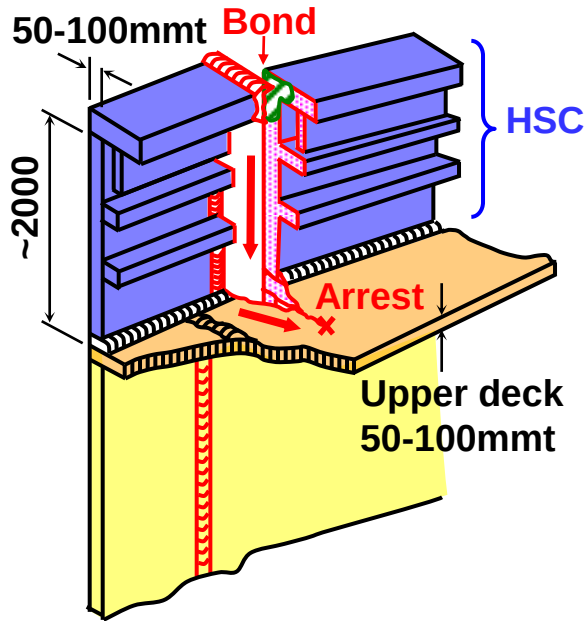
脆性亀裂アレスト

脆性亀裂非伝播

アレスト靱性要求(母材)



脆性亀裂アレスト設計/ IACS UR



IACS UR-W31

HSC用鋼板		溶接線のUT	アレスト設計
Grade	Thickness (mm)		
EH36	$85 < t \leq 100$	Required	Not applicable
EH40	$50 < t \leq 85$	Required	Not applicable
	$85 < t \leq 100$	Required	Required
EH47	$50 < t \leq 100$	Required	Required

脆性亀裂アレスト設計

- (1) ハッチサイドコーミング (HSC) およびアッパーデッキ (UD) への脆性亀裂アレスト鋼 (BCA) 適用.
- (2) HSCの溶接線とUDの溶接線のバットシフト.
- (3) 付加対策: アレストホールや挿入板の適用.

BCA鋼の定義 / IACS UR

BCA鋼は IACS UR W31 にKcaまたはCAT要求で定義.

■ Kca要求

- ・ 標準ESSO試験(温度勾配)にて測定
- ・ 試験法は標準化 (UR W31 Annex 1およびWES2815).
- ・ 板厚80mm以下要求値 $Kca \geq 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ at-10°C
- ・ 板厚80mm超は要求値未決定.

■ CAT要求

- ・ IACS UR W31には二重引張試験が記載されているが、
標準化された試験法は無い.
- ・ 板厚100mmまで適用可能だが、要求値が明示されていない.

◆ KcaとCATの整合性については未確認.

脆性亀裂アレスト(BCA)鋼の承認試験および出荷試験のスキーム

構造モデル試験 ($W > 2m$)

要求アレスト靱性の決定

要求Kca



板厚80mm超の
要求Kca

大型試験 ($W \sim 0.5m$)

アレスト靱性値の測定

製造承認試験

温度勾配ESSO
(Kca)試験

等温アレスト試験
(CAT)

BCA鋼の定義

小型試験 ($W < 0.1m$)

要求靱性値のスクリーニング

出荷試験

シャルピー衝撃値
(Vノッチ, Pノッチ)

DWTT試験
(Drop weight tear test)

PN曲げ試験
(Press-notched bend)

NRL落重試験
(Drop weight test)

correlation

目的

■ 板厚80mm超の要求Kca明確化

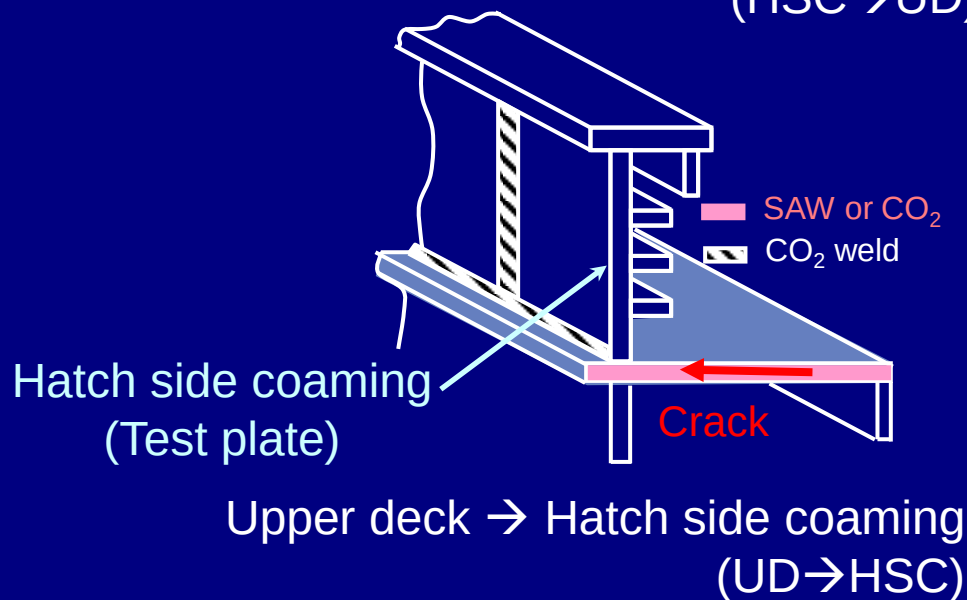
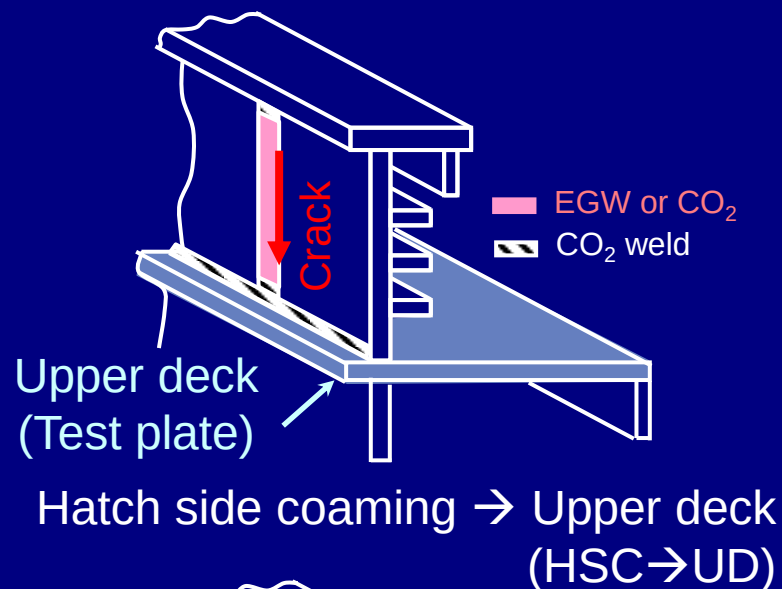
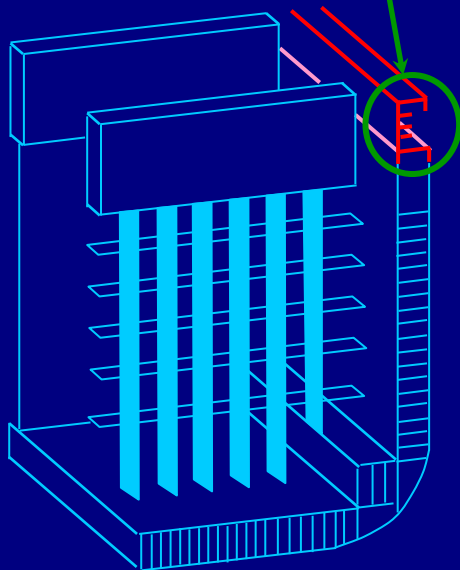
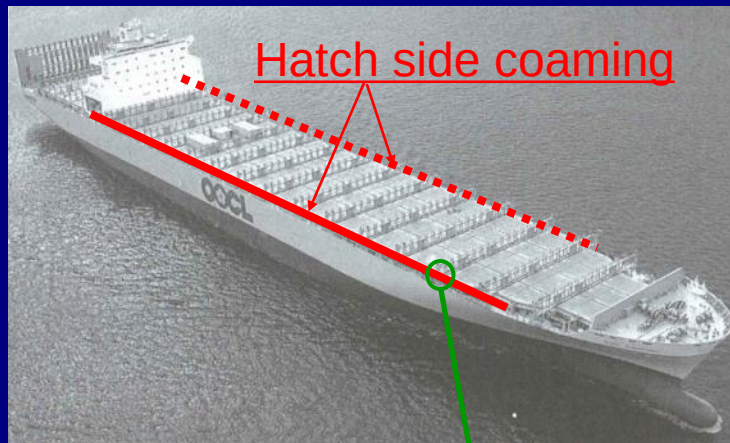
- ・BCA鋼(EH47, EH40), t=100mm
- ・2ケース: シナリオ1 (HSC→UD)
シナリオ2 (UD→HSC)

→Ref. next PPT

■ Kca要求値と整合性のあるCATを与えるCAT試験パラメータの決定.

- ・試験パラメーターの影響調査
EB脆化長さ、試験温度、...
- ・その他の試験手順: アレストの定義他

2つのシナリオの仮定



内容

1. 緒言、目的

2. 板厚80mm超の要求Kca値(構造モデル試験)

2.1 シナリオ1(HSC→UD)のアレスト試験

/ 供試鋼、試験方法、試験結果

2.2 シナリオ2(UD→HSC)のアレスト試験

/ 供試鋼、試験方法、試験結果

3. 結論

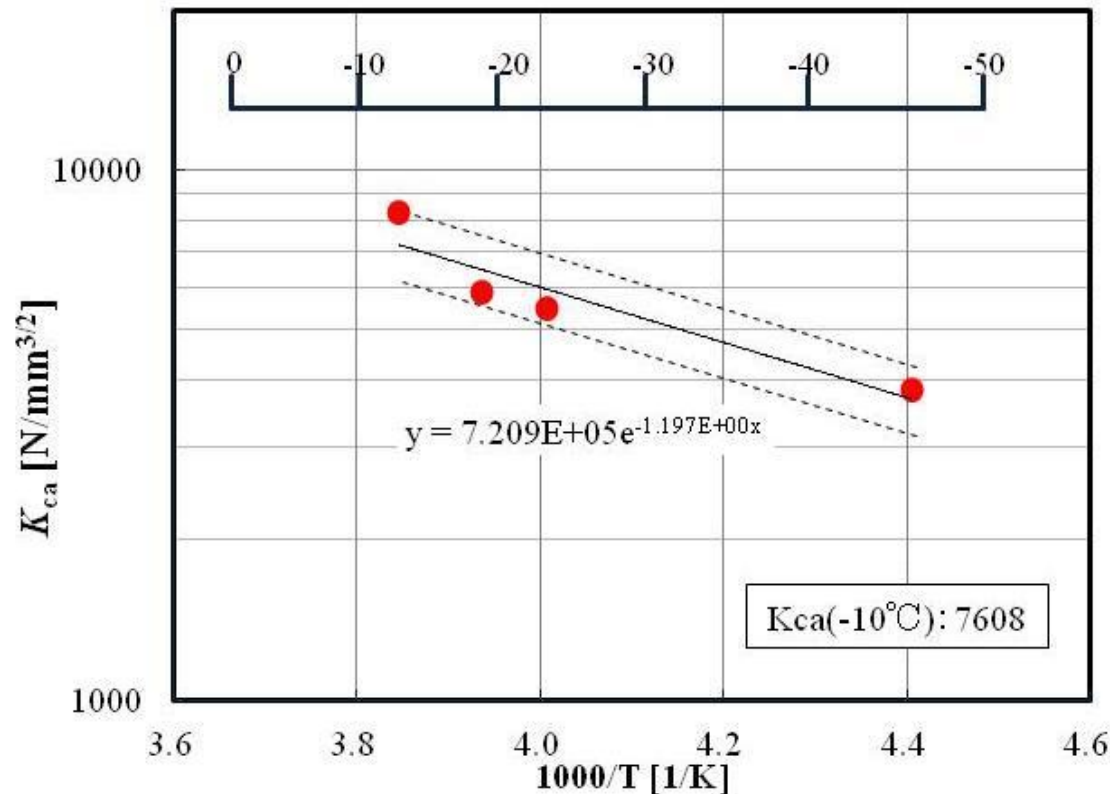
シナリオ1 (HSC → UD) 供試鋼

[Plate : 中型構造モデル試験に使用]

■ Grade: EH40 板厚100mm

■ YP=429MPa, TS=529MPa, EL=37%, vTrs ≤ -90°C

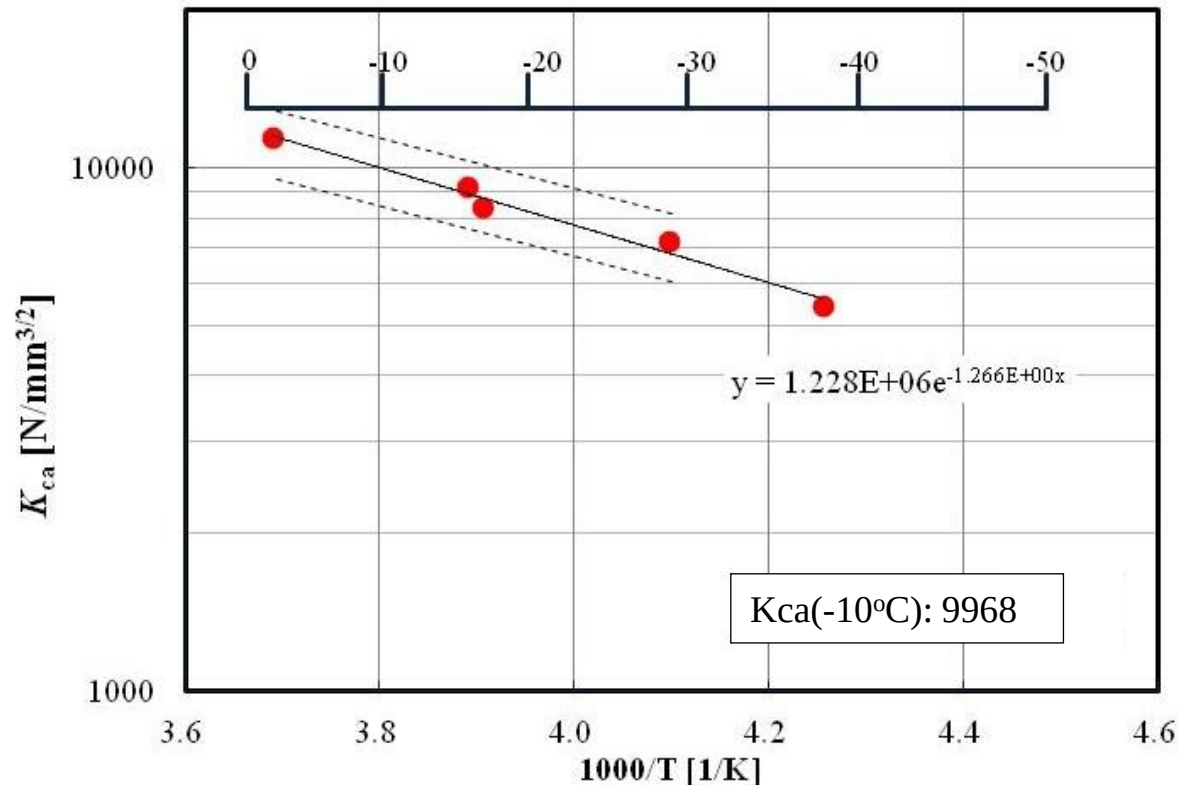
■ ESSO試験結果



シナリオ1 (HSC → UD) 供試鋼

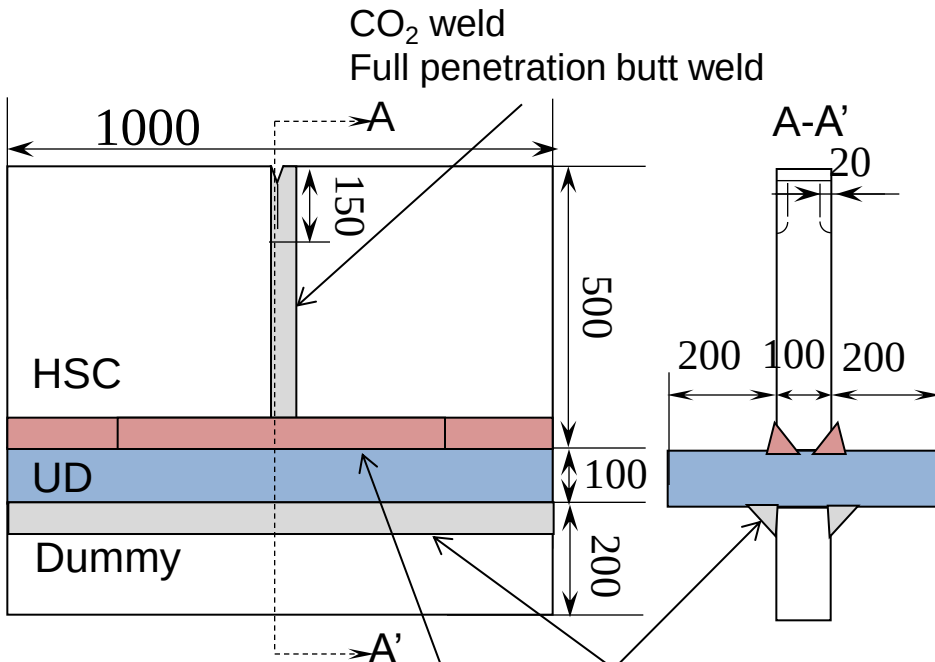
[Plate 2: 大型構造モデル試験に使用]

- Grade: EH40 板厚100mm
- YP=514MPa, TS=602MPa, EL=32%, vTrs=-86°C
- ESSO試験結果



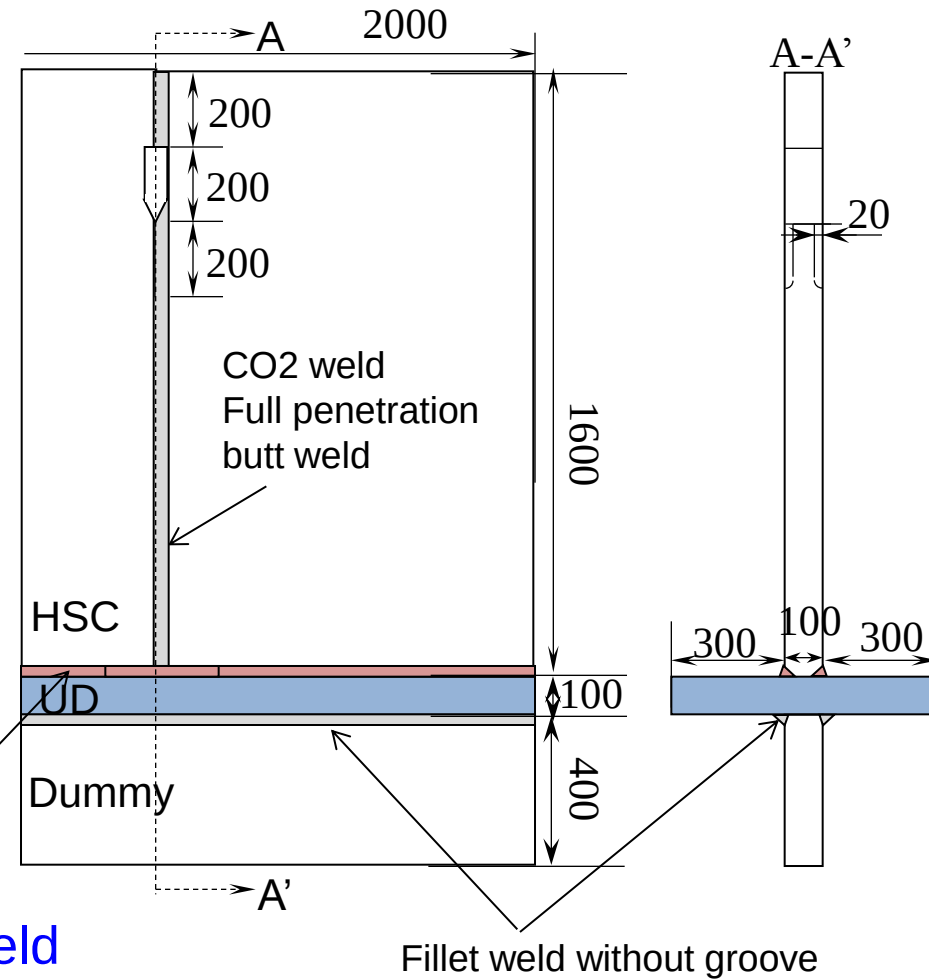
構造モデル試験(シナリオ1/ HSC → UD)

■ 中型構造モデル試験



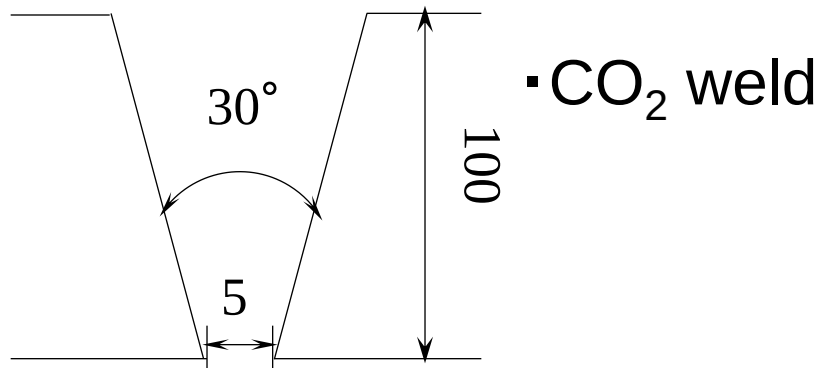
t/3 Partial penetration weld

■ 大型構造モデル試験

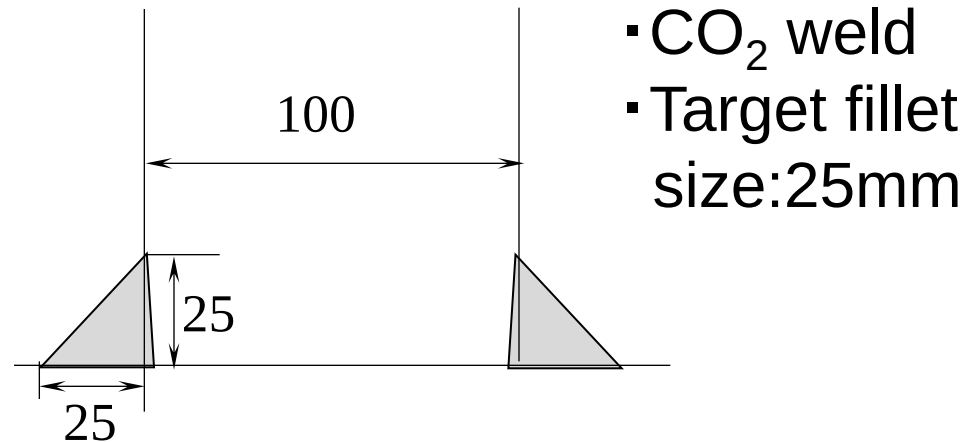


溶接施工(シナリオ1 / HSC → UD)

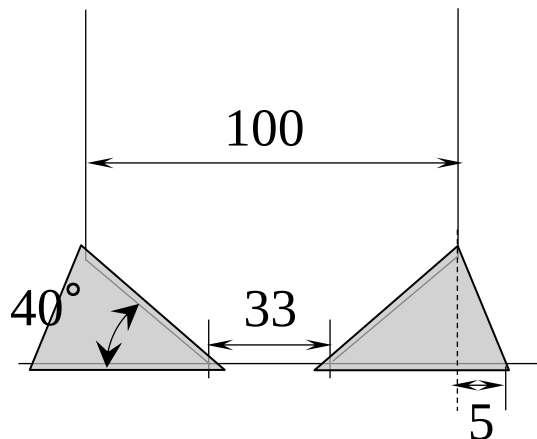
■ 完全溶込み開先溶接



■ 隅肉溶接



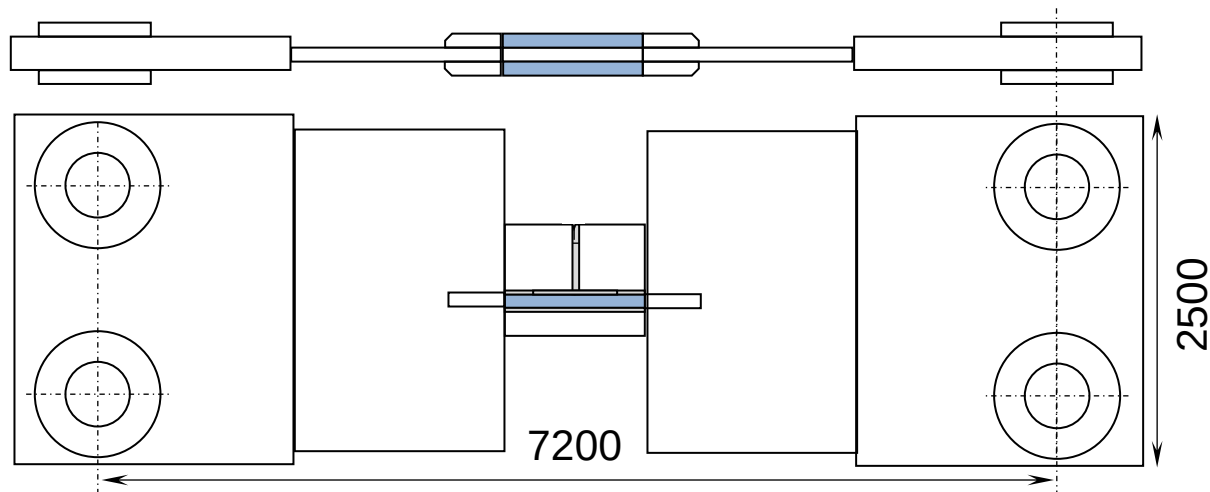
■ 部分溶込み開先溶接



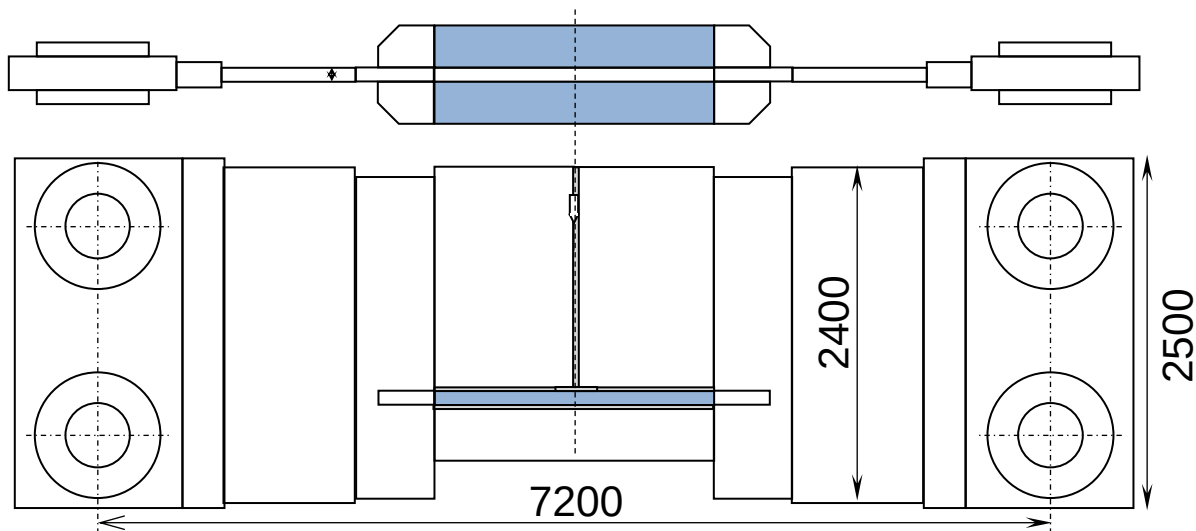
- CO₂ weld
- Groove angle: 40°
- Target size: 5mm

構造モデル試験片 (シナリオ1 / HSC → UD)

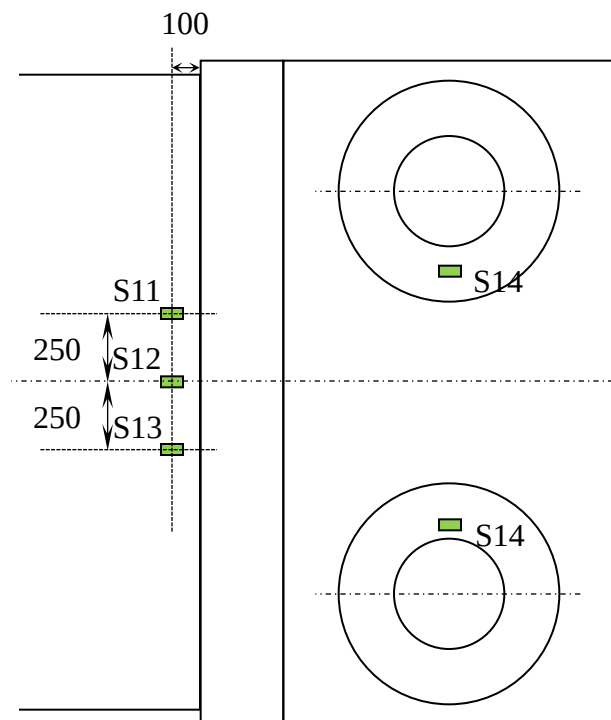
■ 中型構造モデル試験



■ 大型構造モデル試験



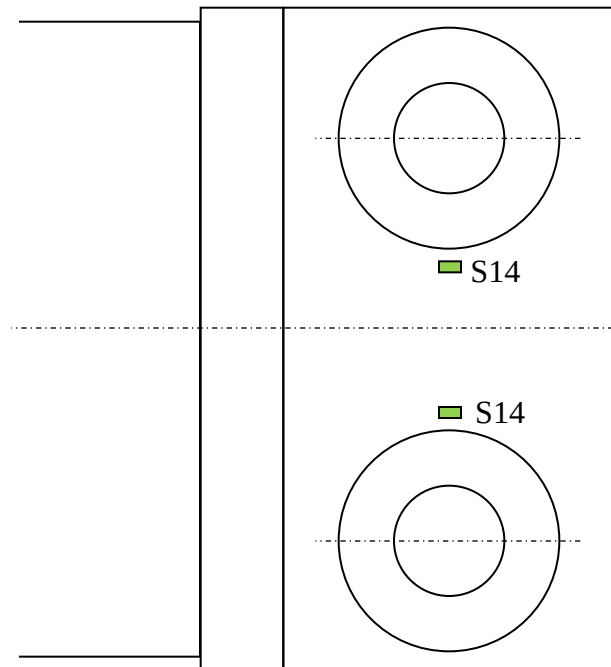
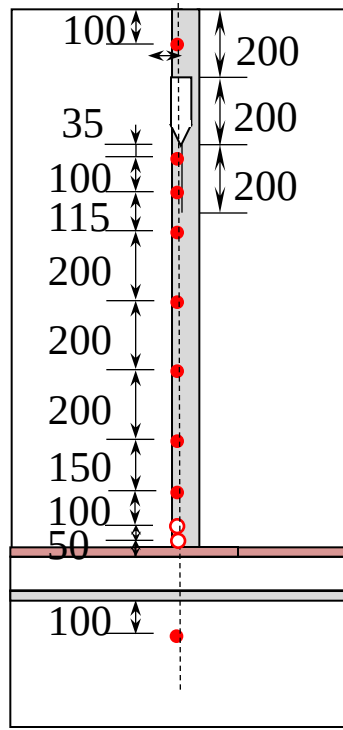
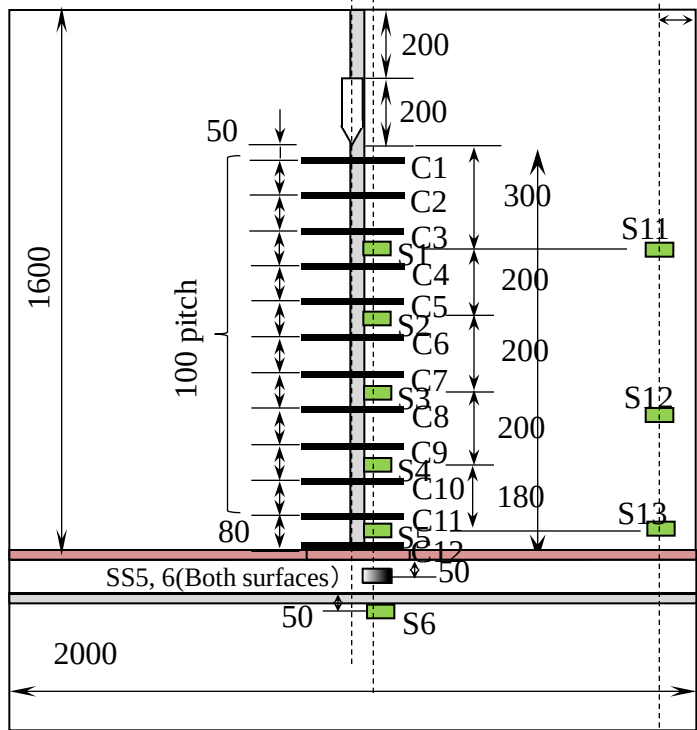
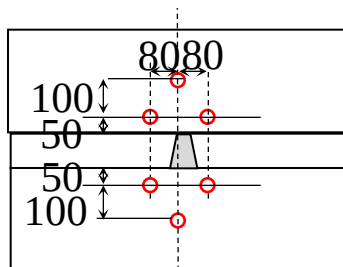
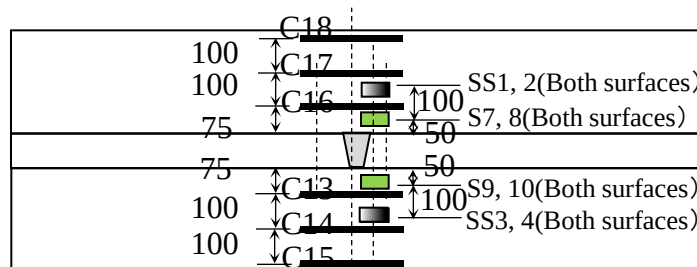
■ 中型構造モデル試験



- Timing wire: 11 points
 - Strain gauge (Dynamic): 14 points
 - Strain gauge (Static): 6 points
 - Thermocouple: 31 points
- (open mark is one surface)

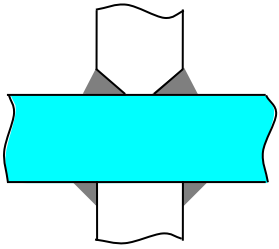
計測（シナリオ1/ HSC → UD）

■大型構造モデル試験



- Timing wire:18points
- Strain gauge (Dynamic):13points
- Strain gauge (Static):6points
- Thermocouple:25points
(open mark is one surface)

試験条件（シナリオ1 / HSC → UD）



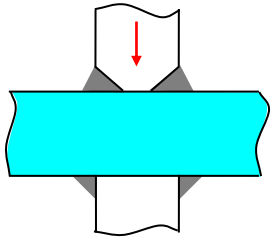
■ 試験手順

- (1) 温度設定
- (2) 試験応力負荷
- (3) 打撃による亀裂発生

試験	中型構造モデル	大型構造モデル	
Test #	Test 1-1	Test 1-2	Test 1-3
Test plate	EH40, t=100mm Plate 1	EH40, t=100mm Plate 2	
Weld details	t/3部分開先溶接		
Applied stress	257MPa (EH40設計応力)		
Target temperature	-23℃	-30℃	-35℃
Test plate Kca (N/mm ^{3/2})	6000	7000	6000

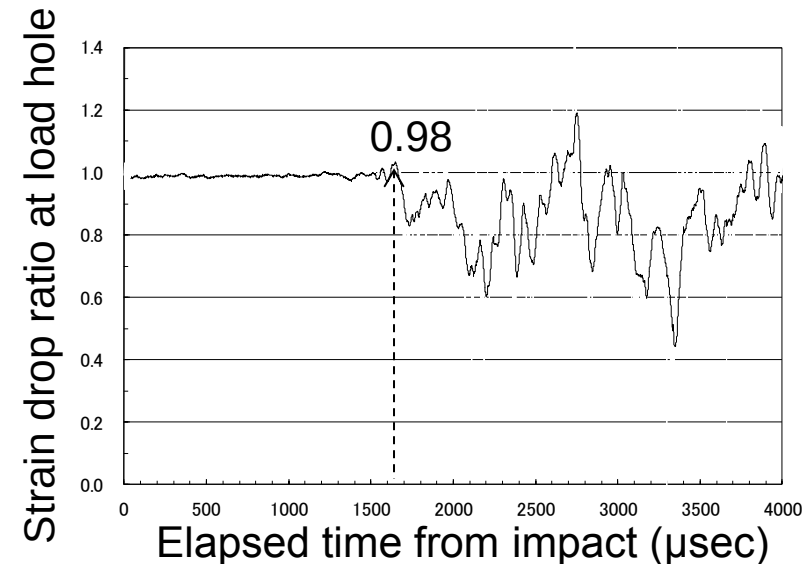
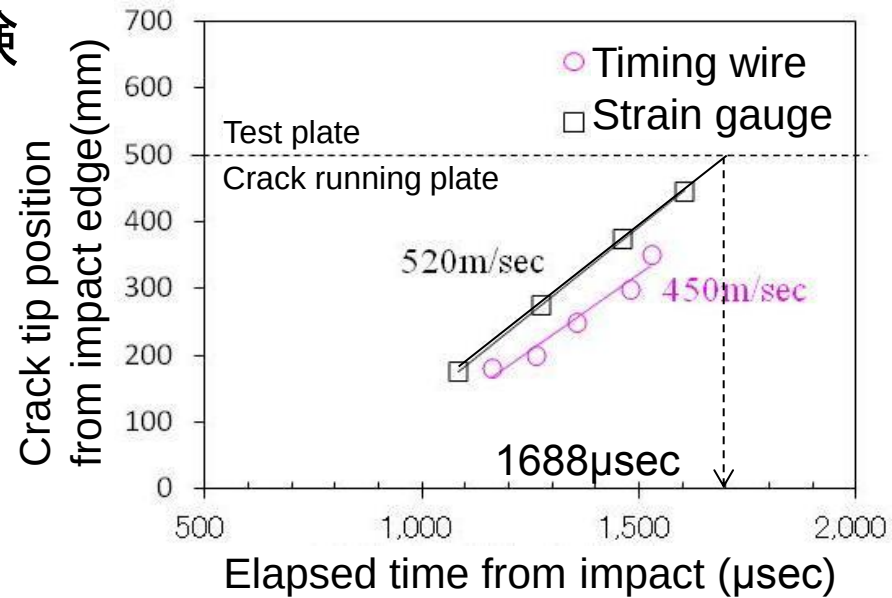
試験結果 (シナリオ1/ HSC → UD)-Test 1-1

- 試験片サイズ: 中型構造モデル試験
- 溶接開先: t/3部分開先継手



試験結果

	Test 1-1
Target temp.(°C)	-23
Test plate Kca (N/mm ^{3/2})	6000
Applied stress (MPa)	257
Result	Arrest



破面 (シナリオ1/ HSC → UD) -Test 1-1

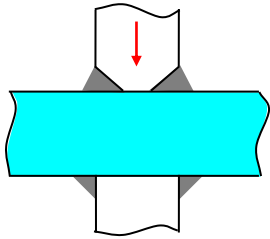
■ Test 1-1

・ $\sigma_{app}=257\text{MPa}$ ・Temp.=-23°C ・ $K_{ca}=6000\text{N/mm}^{3/2}$



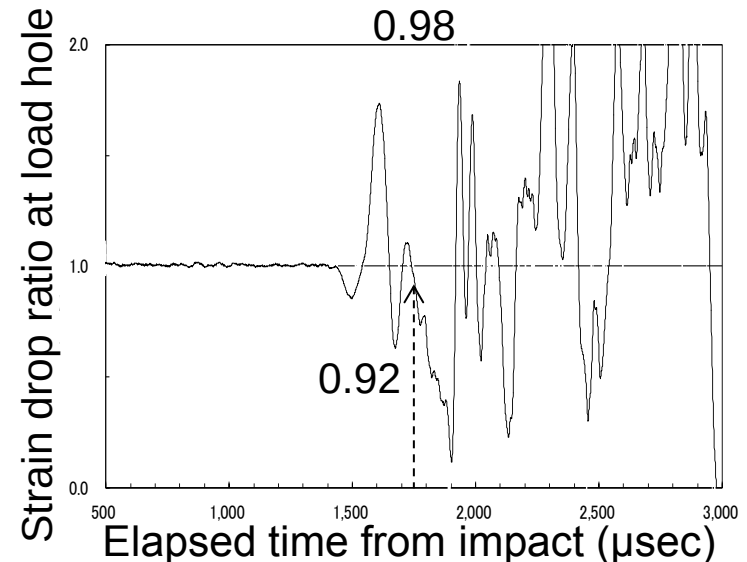
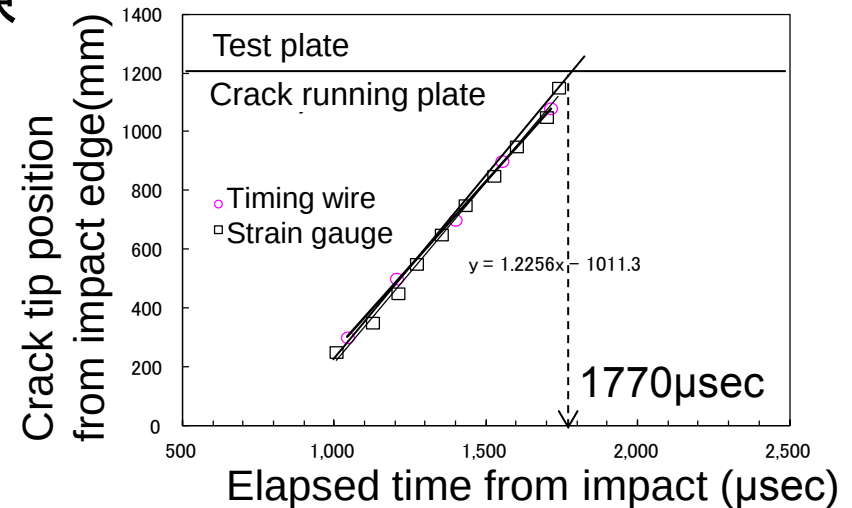
試験結果 (シナリオ1/ HSC → UD)-Test 1-2

- 試験片サイズ: 大型構造モデル試験
- 溶接開先: t/3部分開先継手



■ 試験結果

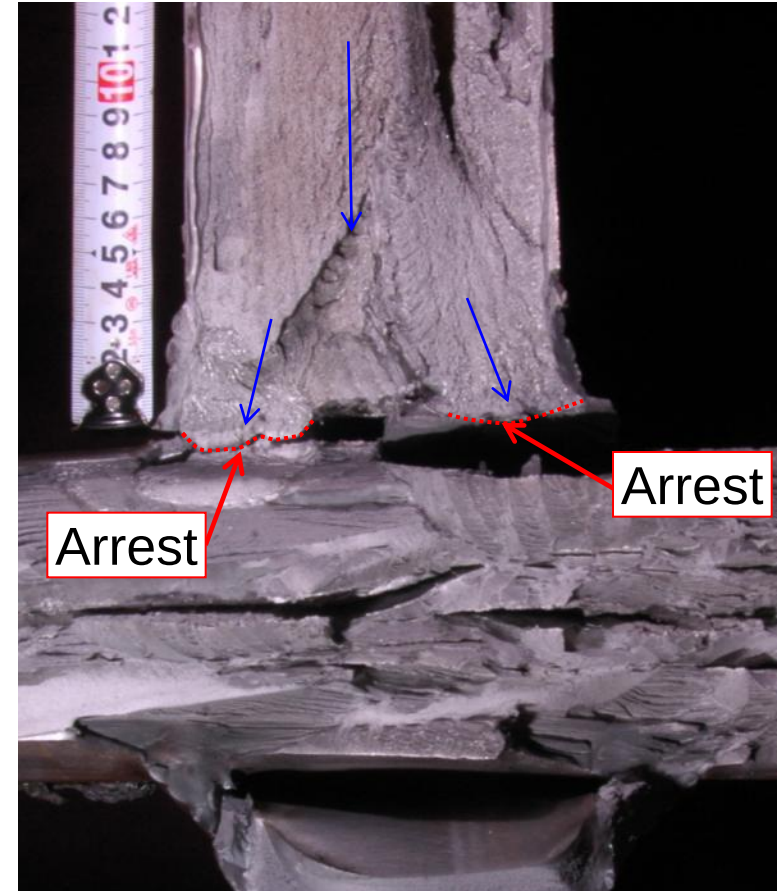
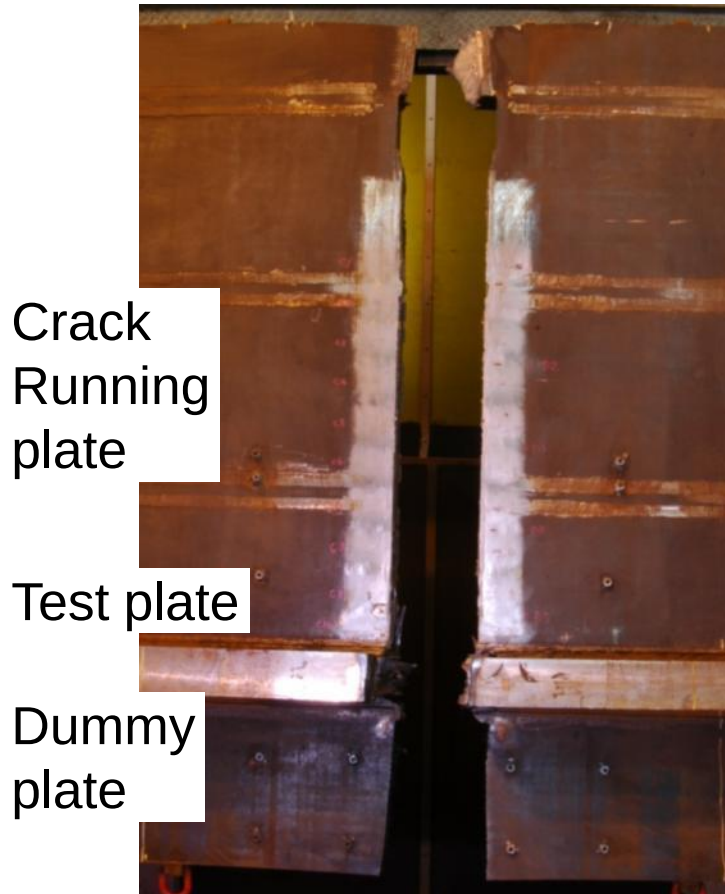
	Test 1-2
Target temp.(°C)	-30
Test plate Kca (N/mm ^{3/2})	7000
Applied stress (MPa)	257
Result	Arrest



破面 (シナリオ1/ HSC → UD) -Test 1-2

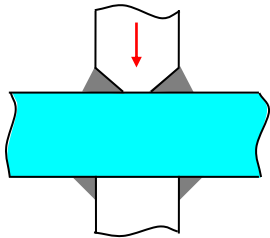
■ Test 1-2

・ $\sigma_{app}=257\text{MPa}$ ・Temp. $=-30^{\circ}\text{C}$ ・ $K_{ca}=7000\text{N/mm}^{3/2}$



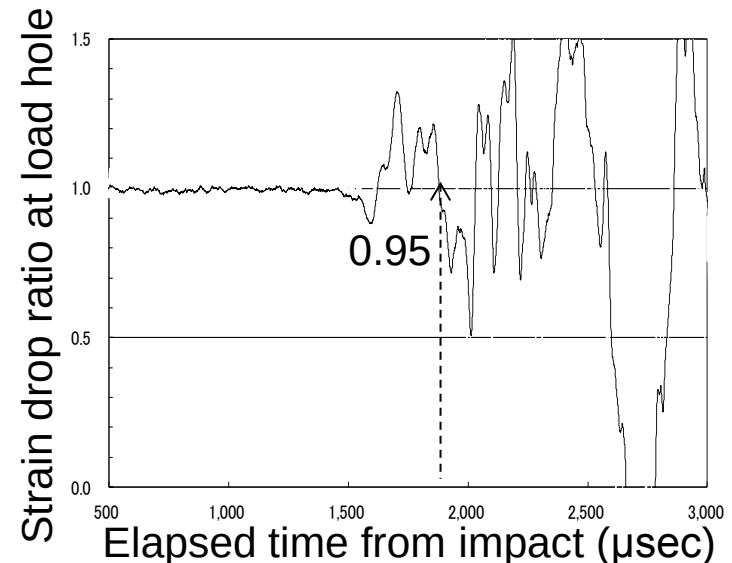
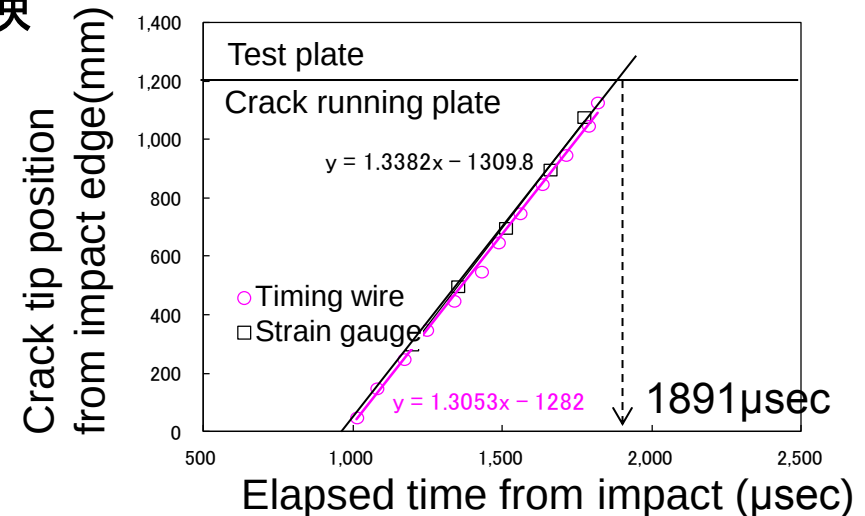
試験結果 (シナリオ1/ HSC → UD)-Test 1-3

- 試験片サイズ: 大型構造モデル試験
- 溶接開先: t/3部分開先継手



■ 試験結果

	Test 1-3
Target temp.(°C)	-35
Test plate Kca (N/mm ^{3/2})	6000
Applied stress (MPa)	257
Result	Arrest



伝播経路 (シナリオ1/ HSC → UD) -Test 1-3

■ Test 1-3

- $\sigma_{app} = 257 \text{ MPa}$
- Temp. = -35°C
- $K_{ca} = 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$

Crack
Running
plate

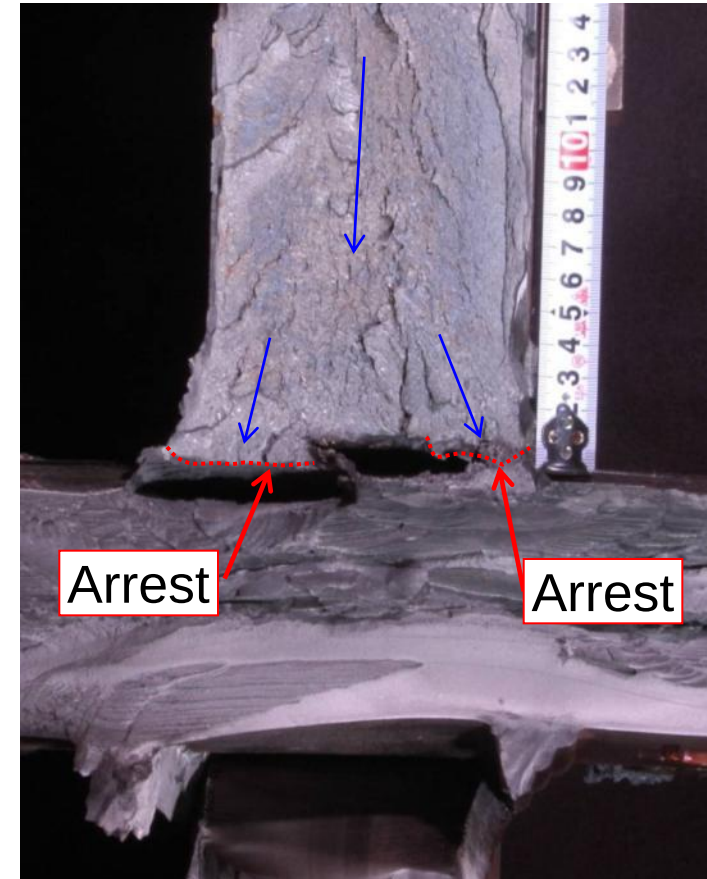
Test plate



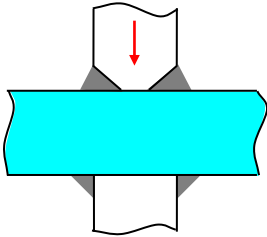
破面 (シナリオ1/ HSC → UD) -Test 1-3

■ Test 1-3

・ $\sigma_{app}=257\text{MPa}$ ・Temp. $=-35^{\circ}\text{C}$ ・ $K_{ca}=6000\text{N/mm}^{3/2}$



シナリオ1 (HSC → UD) 小括



試験	中型構造モデル	大型構造モデル	
Test #	Test 1-1	Test 1-2	Test 1-3
Test plate	EH40, t=100mm Plate 1	EH40, t=100mm Plate 2	
Weld details	t/3部分開先継手		
Applied stress	257MPa (EH40 設計応力)		
Target temperature	-23℃	-30℃	-35℃
Target Kca (N/mm ^{3/2})	6000	7000	6000
Test results	Arrest	Arrest	Arrest

内容

1. 緒言、目的

2. 板厚80mm超の要求Kca値(構造モデル試験)

2.1 シナリオ1(HSC→UD)のアレスト試験

/ 供試鋼、試験方法、試験結果

2.2 シナリオ2(UD→HSC)のアレスト試験

/ 供試鋼、試験方法、試験結果

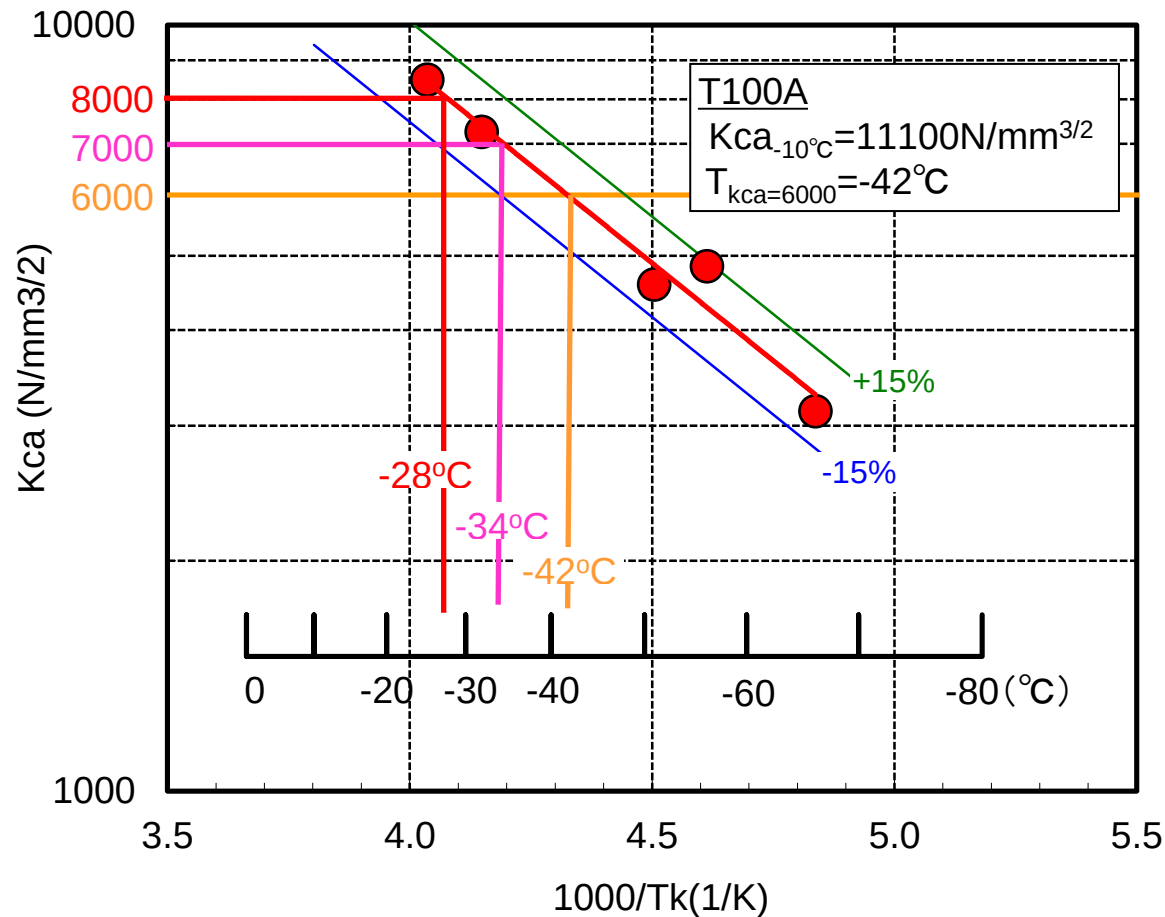
3. 結論

シナリオ2(UD → HSC)供試鋼

■ Grade: EH47 板厚100mm

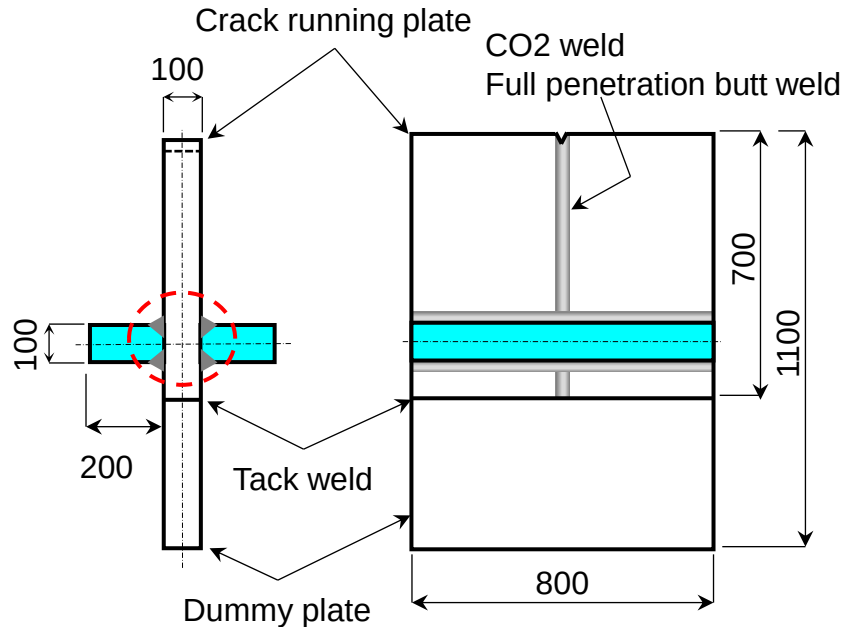
■ YP=464MPa, TS=576MPa, EL=25.4%, vTrs=-82°C

■ ESSO 試験結果



構造モデル試験(シナリオ2 / UD → HSC)

■ 中型構造モデル試験片

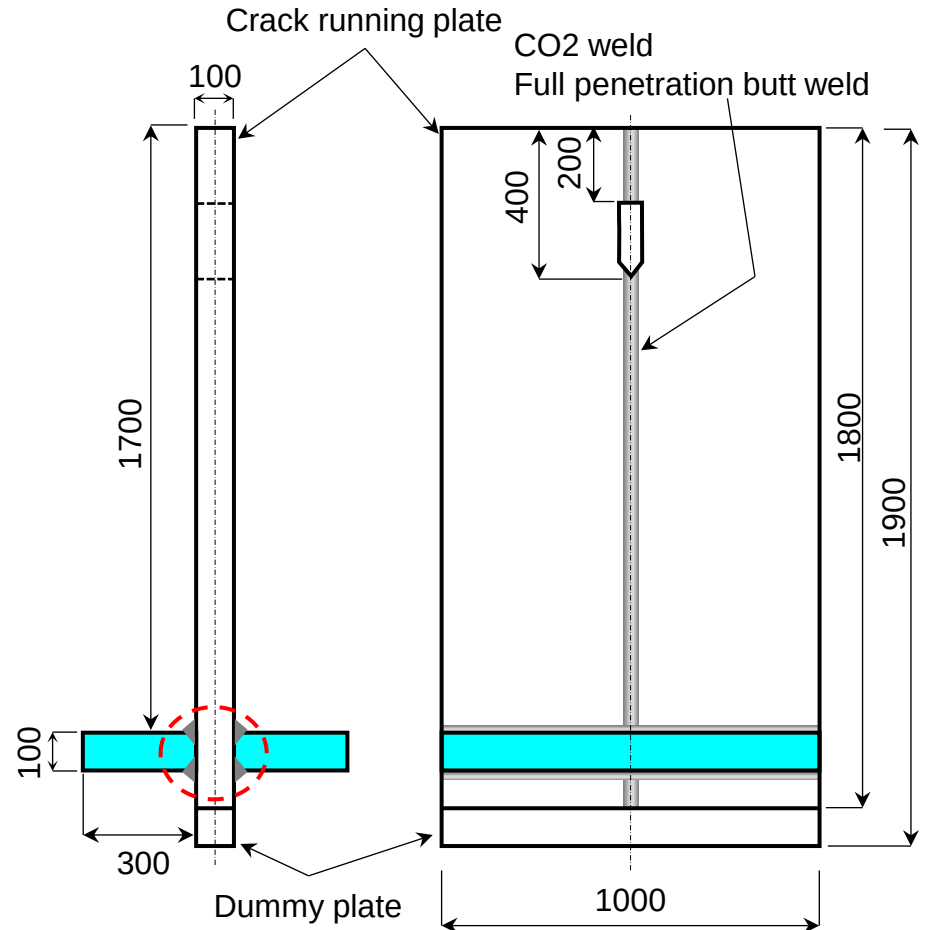


Test 2-1: 隅肉溶接(開先なし)

Test 2-2: 隅肉溶接(開先なし)

Test 2-3: $t/3$ 部分開先溶接
 $t/4$ 部分開先溶接

■ 大型構造モデル試験片

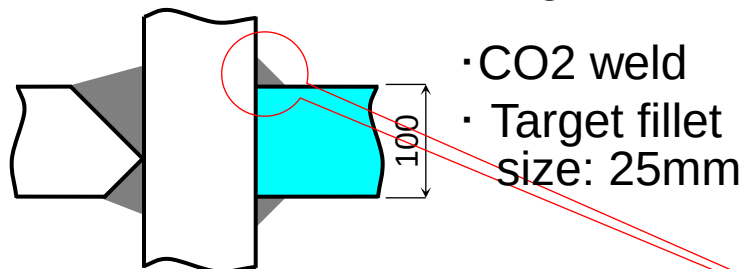


Test 2-4: $t/3$ 部分開先溶接
 $t/4$ 部分開先溶接

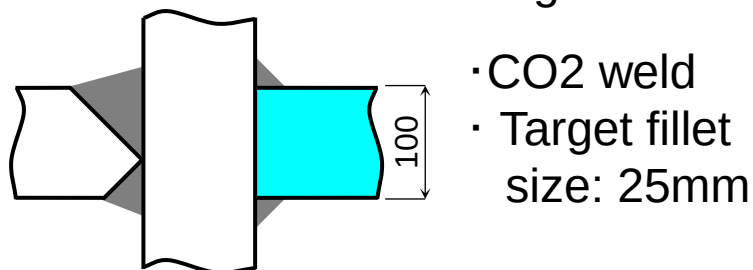
溶接施工(シナリオ2 / UD → HSC)

■ 中型構造モデル試験

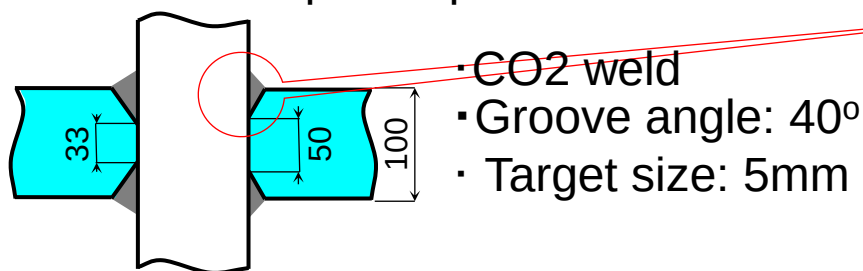
Test 2-1: Fillet weld without groove



Test 2-2: Fillet weld without groove

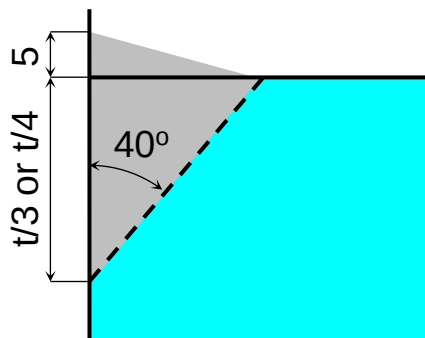
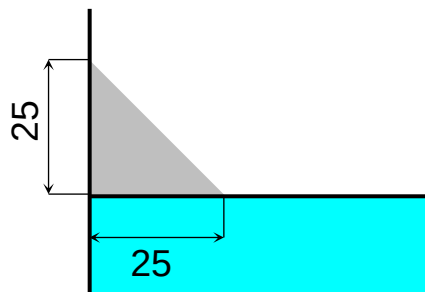
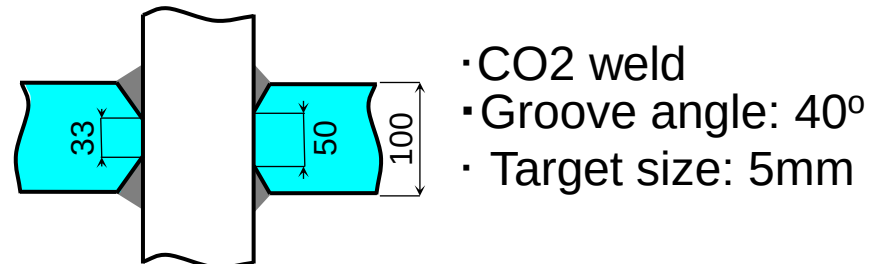


Test 2-3: t/3 & t/4 partial penetration weld



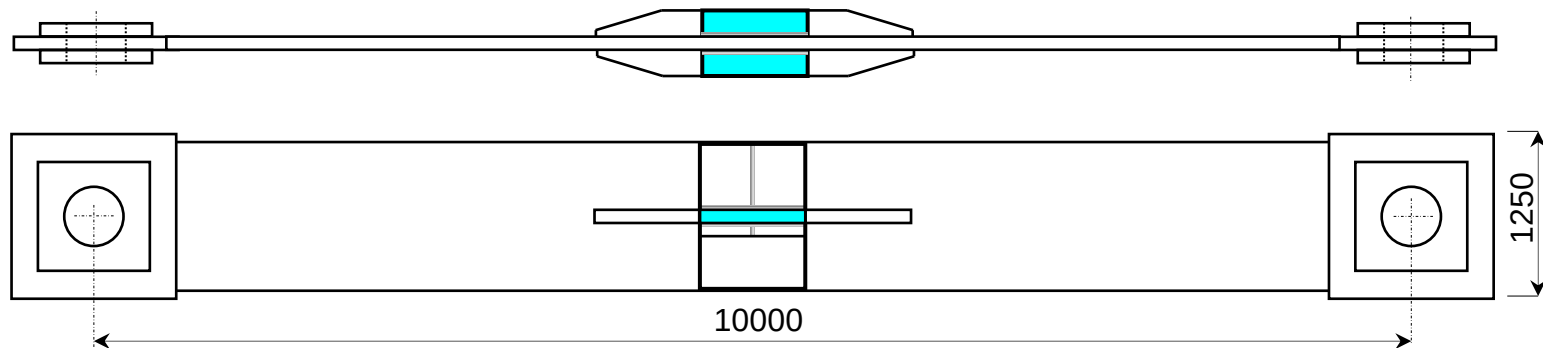
■ 大型構造モデル試験

Test 2-4: t/3 & t/4 partial penetration weld

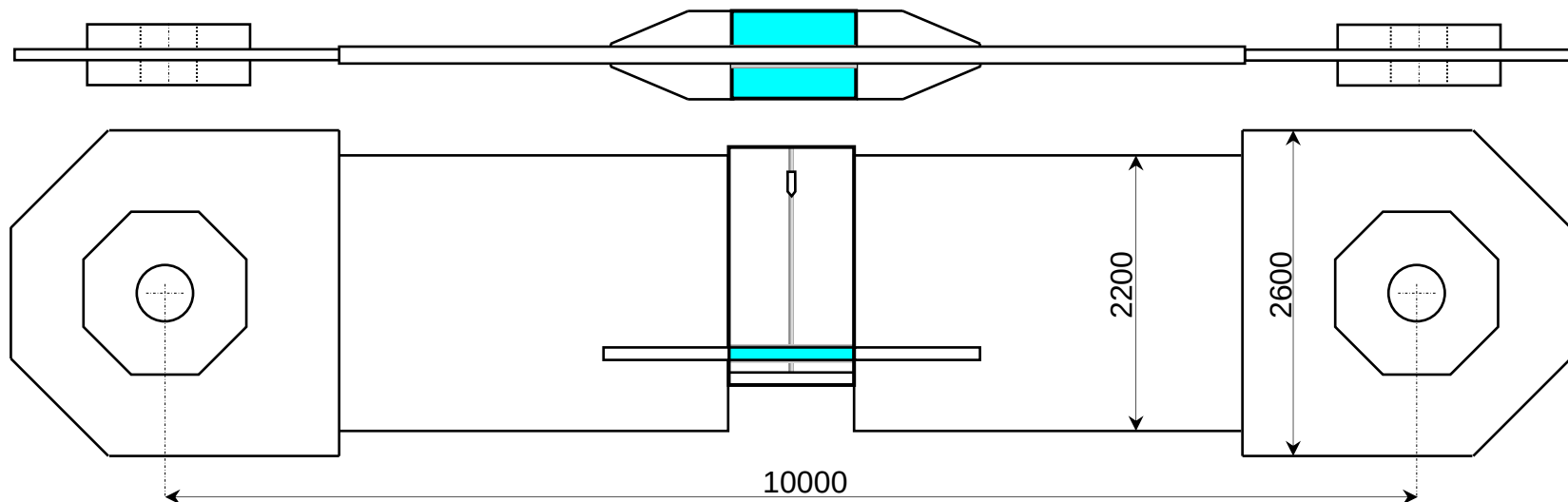


構造モデル試験片 (シナリオ2 / UD → HSC)

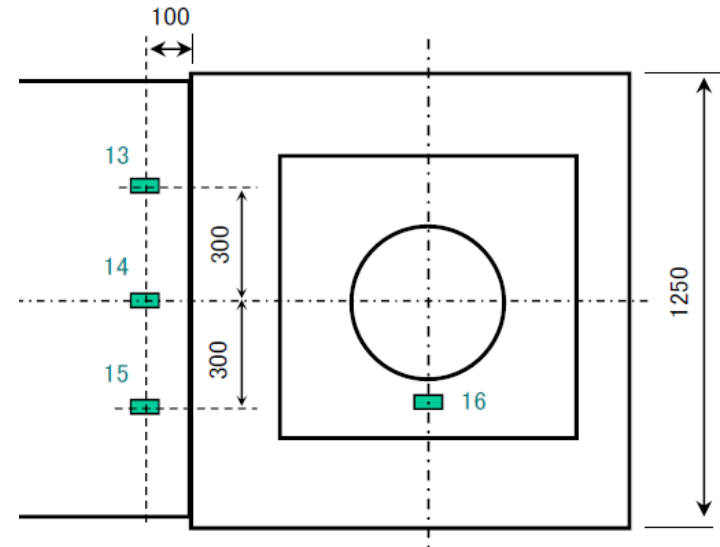
■ 中型構造モデル試験



■ 大型構造モデル試験



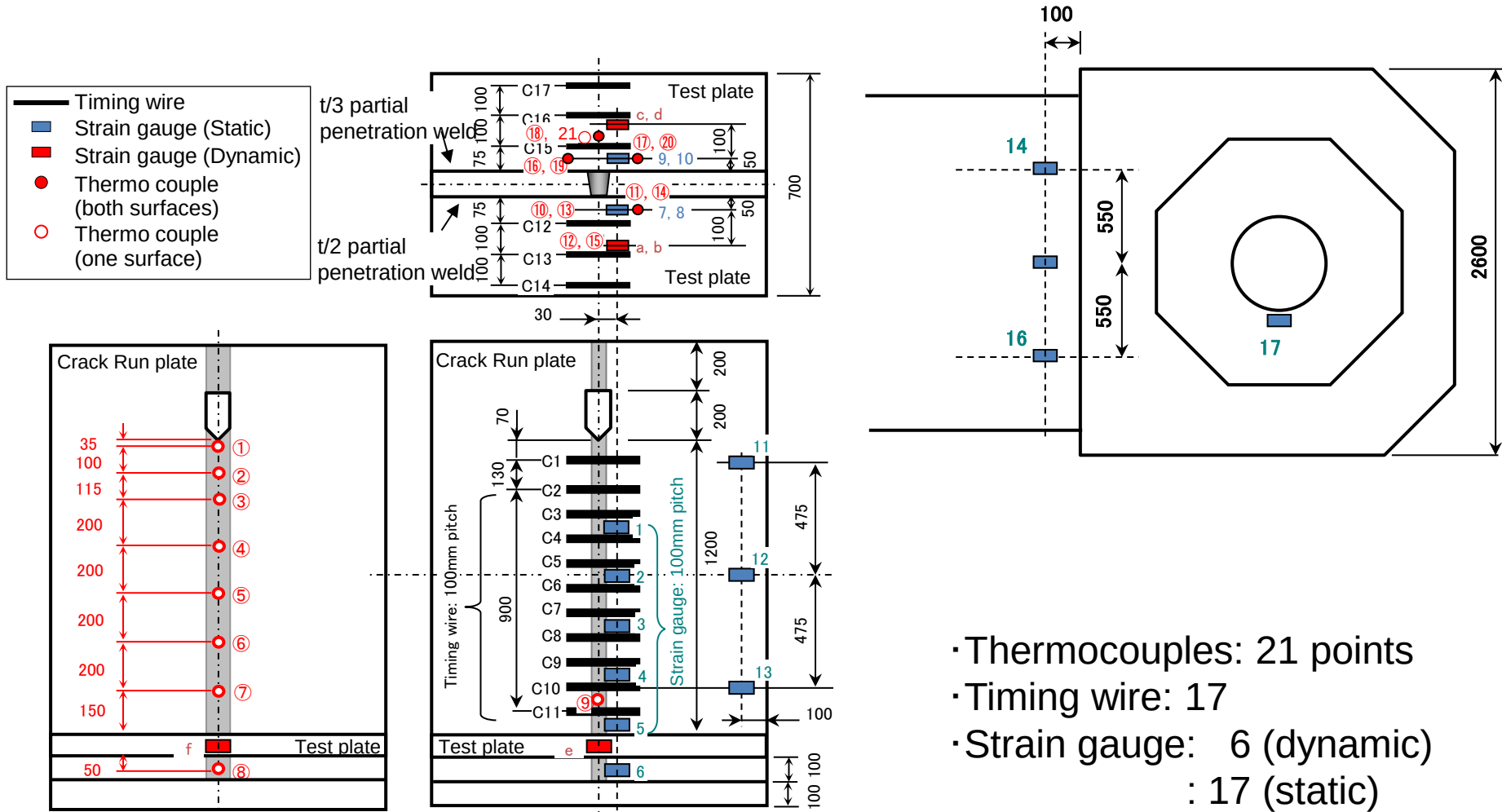
■ 中型構造モデル試験



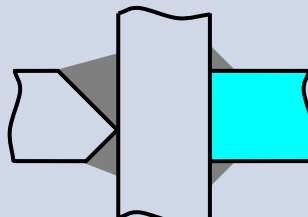
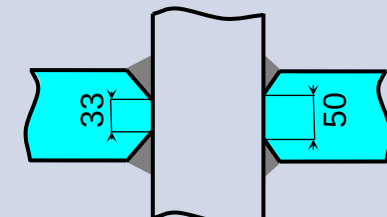
- Thermocouples: 19 points
- Timing wire: 30
- Strain gauge: 6 (dynamic)
: 16 (static)

計測 (シナリオ2 / UD → HSC)

■ 大型構造モデル試験



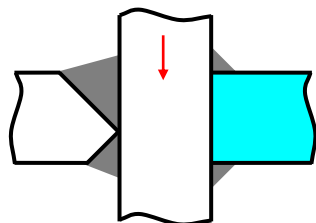
試験条件（シナリオ2 / UD → HSC）

試験	中型構造モデル			大型構造モデル
Test #	Test 2-1	Test 2-2	Test 2-3	Test 2-4
Test plate	EH47, t=100mm			
Weld details	隅肉溶接 		t/3 & t/4部分開先溶接 	
Applied stress	257MPa (EH40設計応力)			
Target temperature	-42℃	-34℃	-34℃	-28℃
Test plate Kca (N/mm ^{3/2})	6000	7000	7000	8000

試験結果(シナリオ1/HSC → UD) - Test 2-1 & 2-2

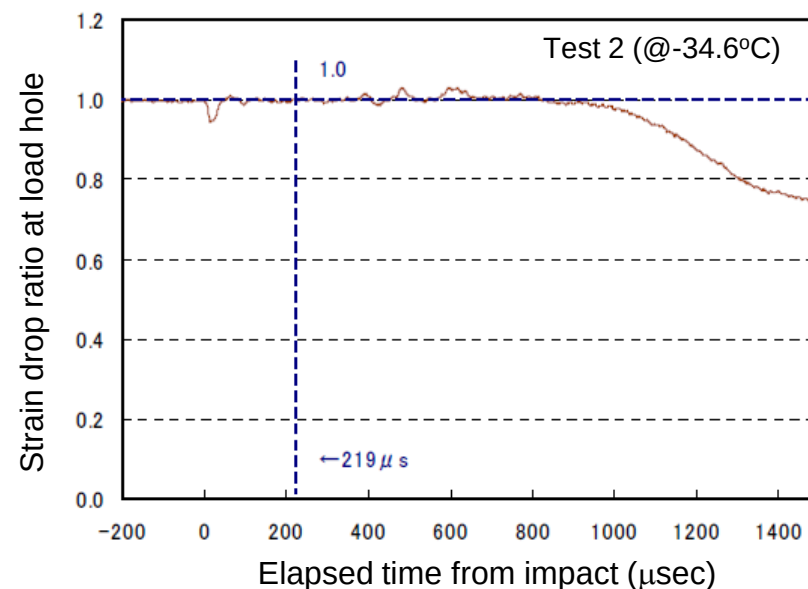
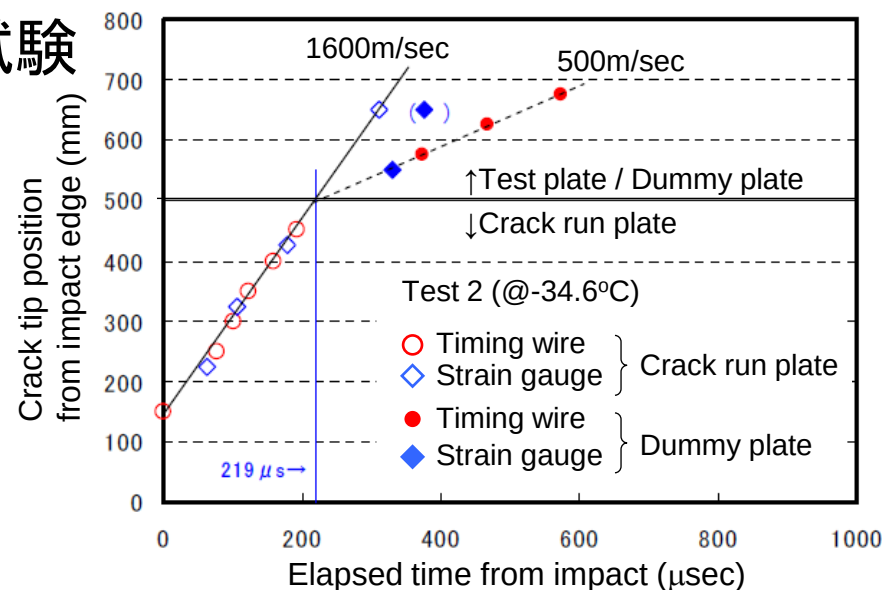
■ 試験片サイズ: 中型構造モデル試験

■ 溶接開先: 隅肉



■ 試験結果

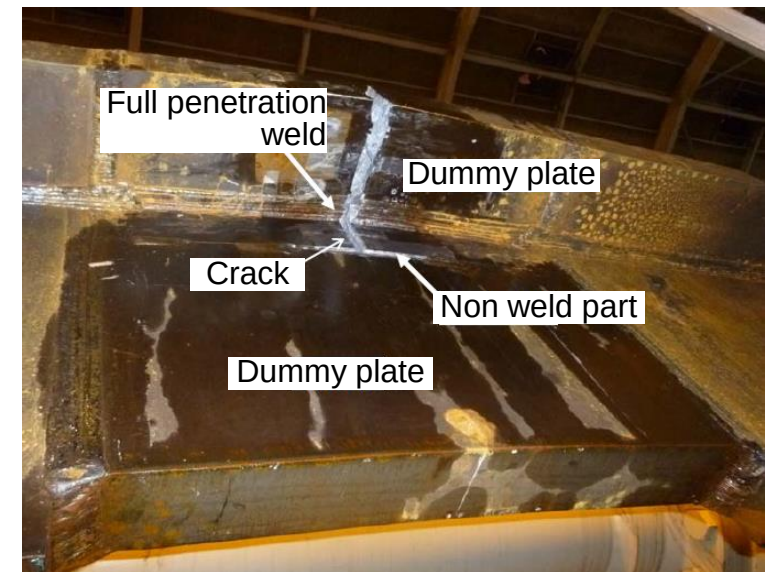
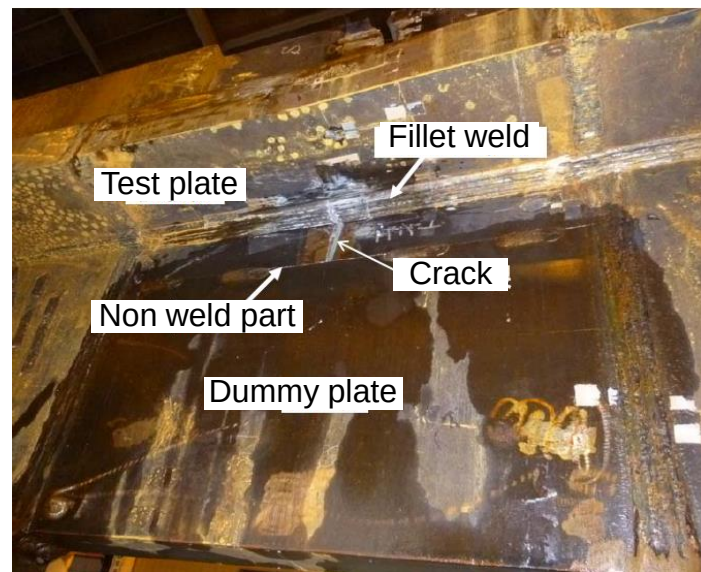
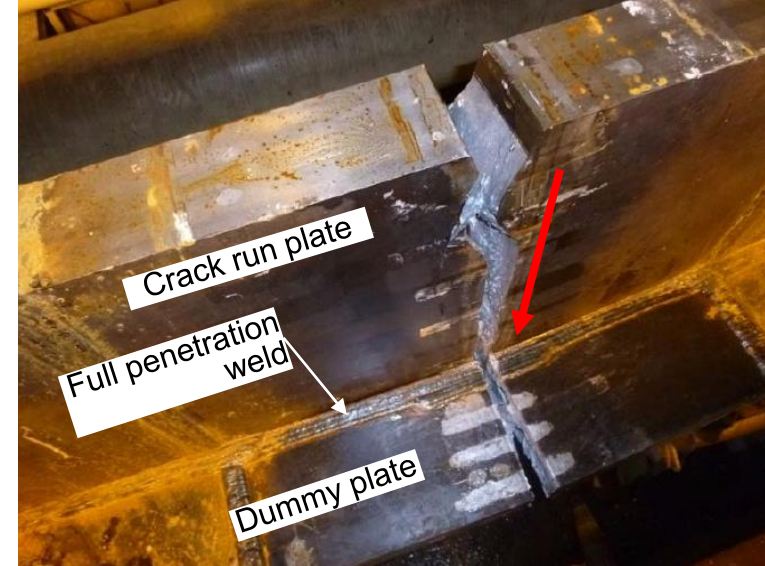
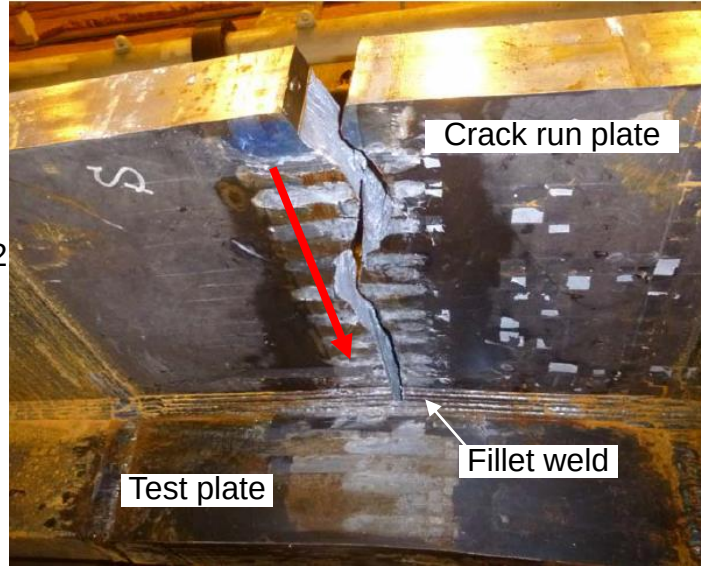
	Test 2-1	Test 2-2
Target temp. (°C)	-42	-34
Test plate Kca (N/mm ^{3/2})	6000	7000
Applied stress (MPa)	257	
Result	Arrest	Arrest



伝播経路 (シナリオ2 / UD→HSC) - Test 2-2

■ Test 2-2

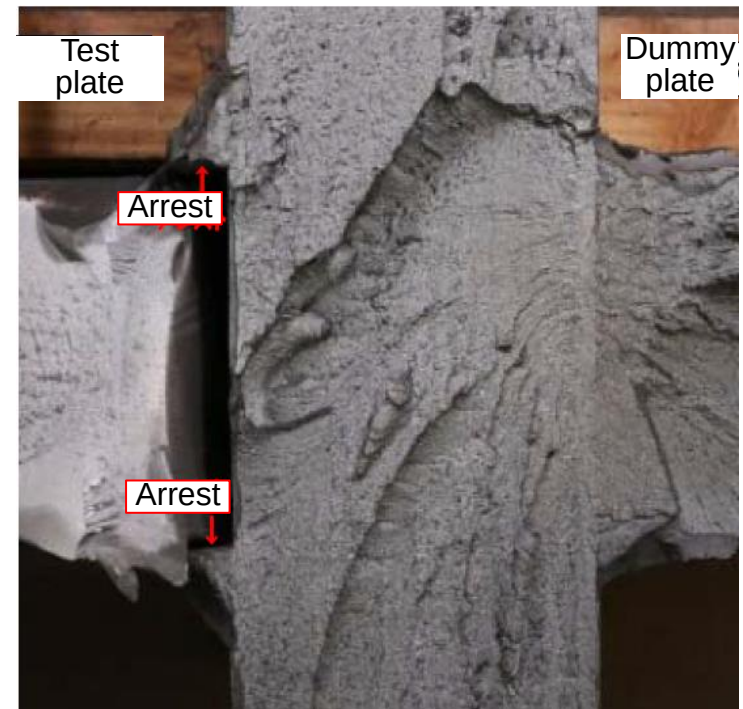
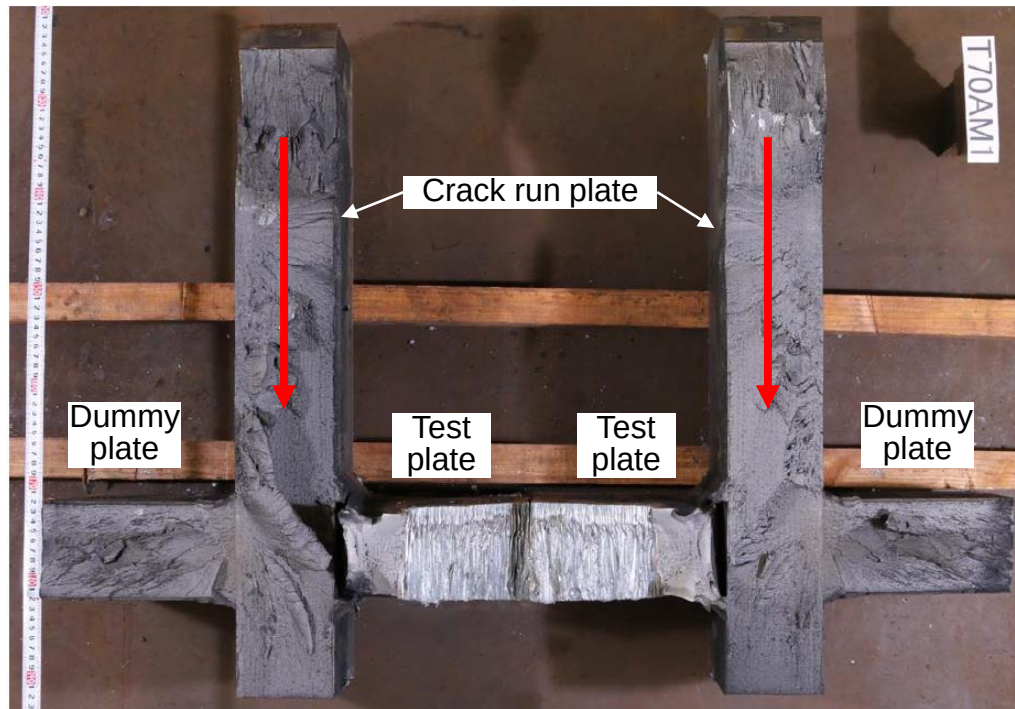
- ・ $\sigma_{app} = 257 \text{ MPa}$
- ・ Temp. = -34°C
- ・ $K_{Ica} = 7000 \text{ N/mm}^{3/2}$



破面 (シナリオ2 / UD→HSC) - Test 2-2

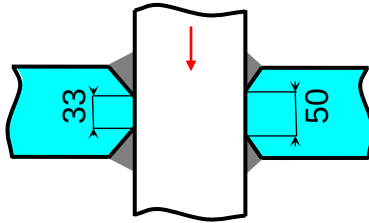
■ Test 2-2

- ・ $\sigma_{app} = 257 \text{ MPa}$
- ・ Temperature = -34°C
- ・ $K_{Ic} = 7000 \text{ N/mm}^{3/2}$



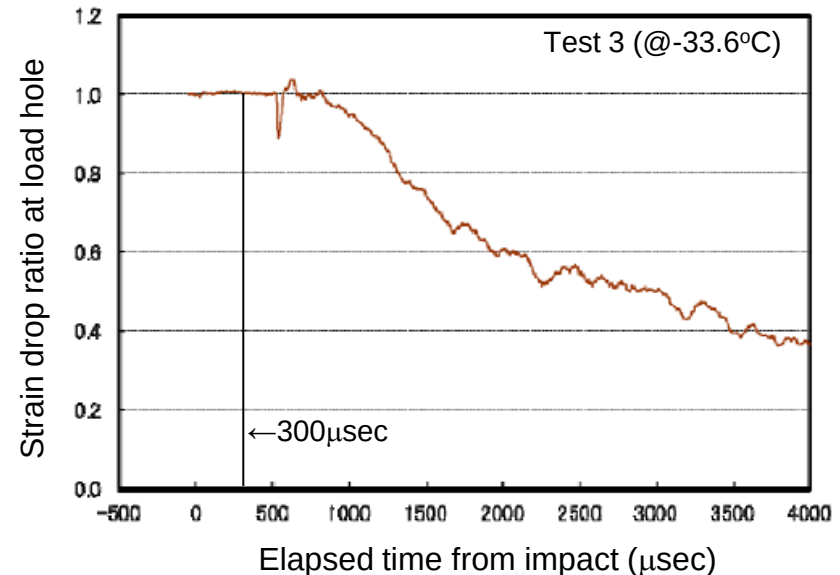
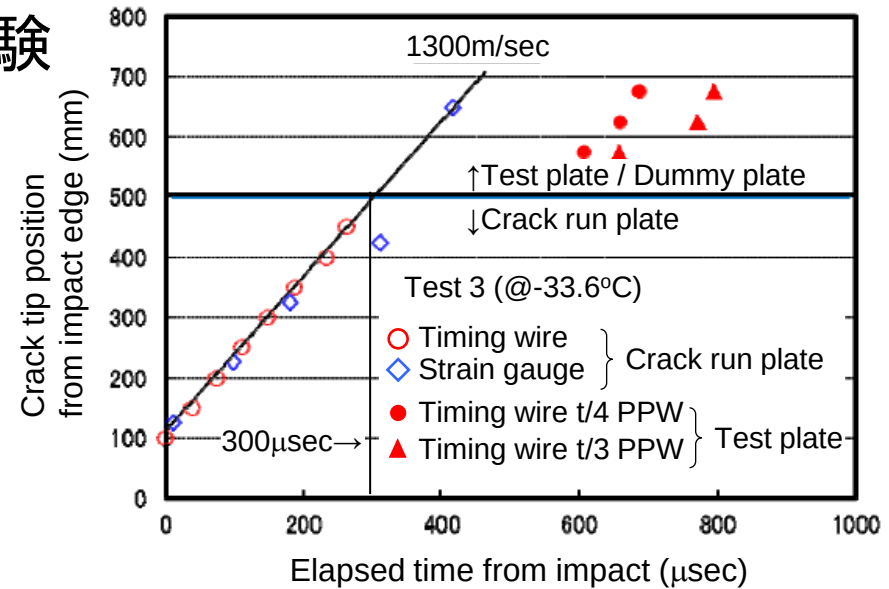
試験結果(シナリオ2 / UD→HSC9 - Test 2-3

- 試験片サイズ: 中型構造モデル試験
- 溶接開先: $t/3$, $t/4$ 部分開先継手



■ 試験結果

	Test 2-3
Target temp. (°C)	-34
Test plate Kca (N/mm ^{3/2})	7000
Applied stress (MPa)	257
Result	Propagate

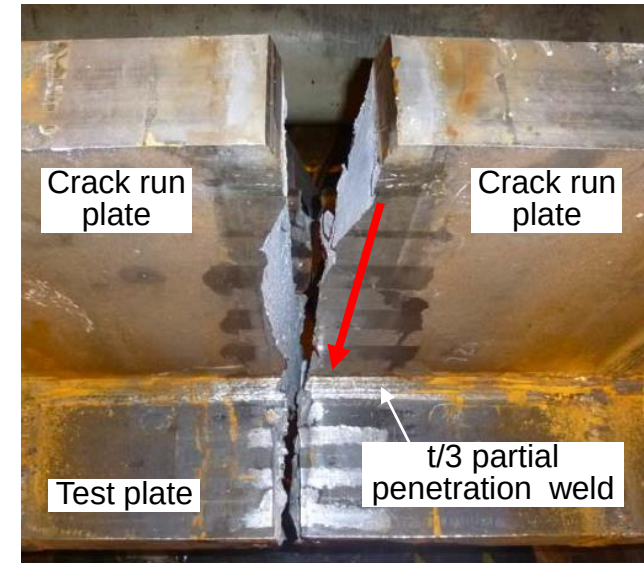
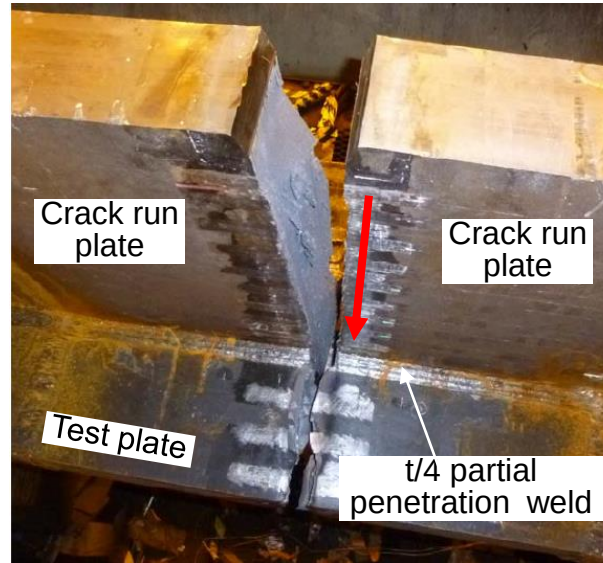


伝播経路 (シナリオ2 / UD→HSC) - Test 2-3

■ Test 2-3

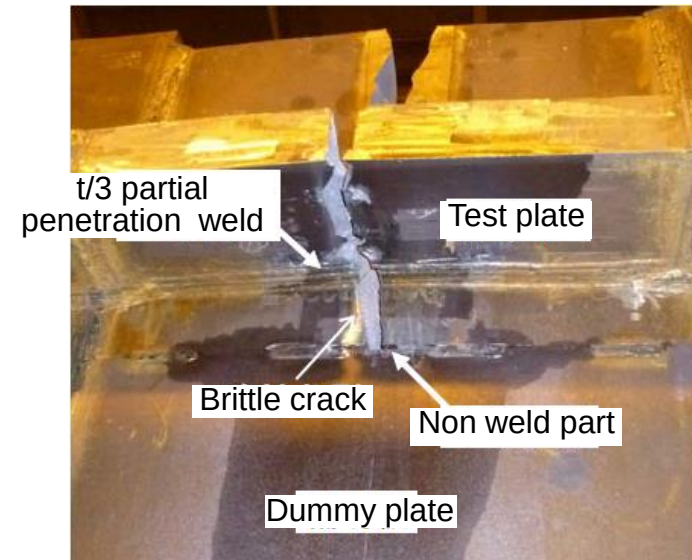
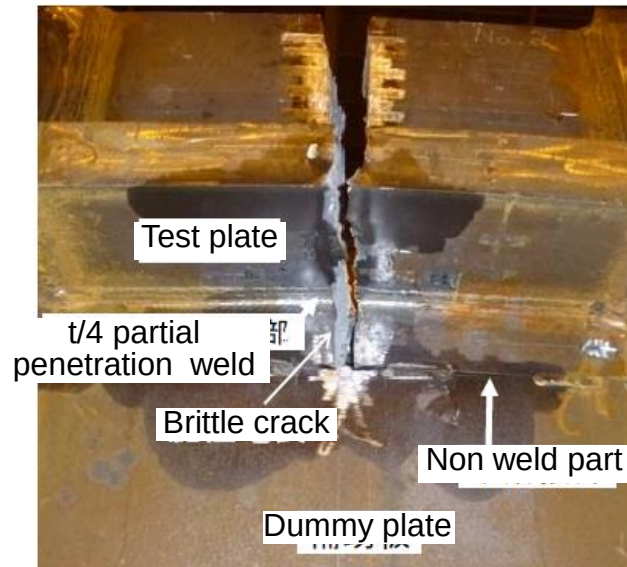
(1) t/4 partial penetration side

- $\sigma_{app} = 257 \text{ MPa}$
- Temp. = -34°C
- $K_{Ic} = 7000 \text{ N/mm}^{3/2}$
- **Propagate**



(2) t/3 partial penetration side

- $\sigma_{app} = 257 \text{ MPa}$
- Temp. = -34°C
- $K_{Ic} = 7000 \text{ N/mm}^{3/2}$
- **Propagate**



破面 (シナリオ2 / UD→HSC) - Test 2-3

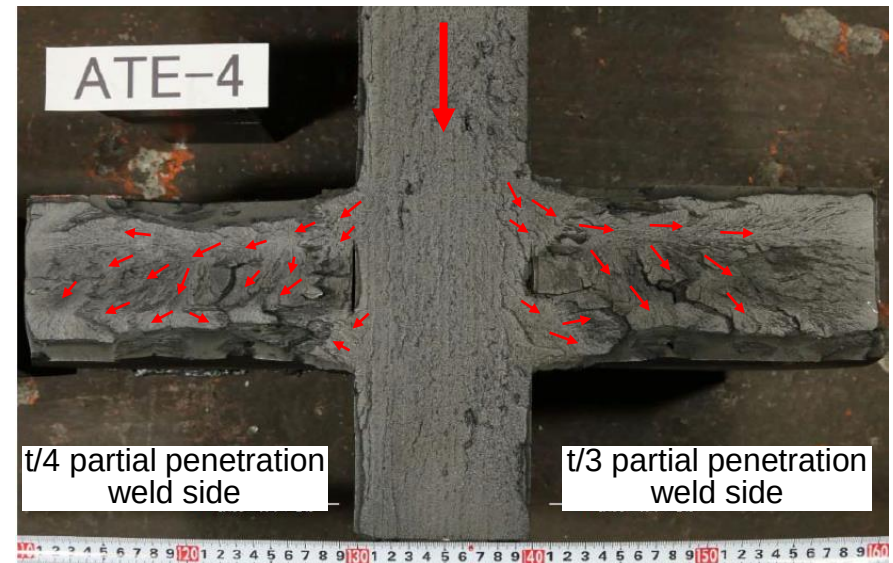
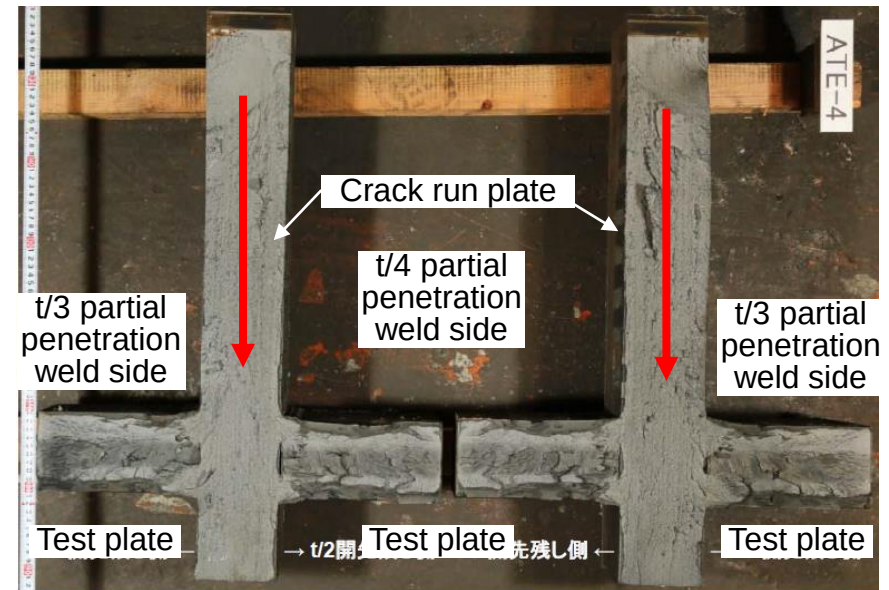
■ Test 2-3

(1) t/4 partial penetration side

- ・ $\sigma_{app} = 257 \text{ MPa}$
- ・ Temperature = -34°C
- ・ $K_{ca} = 7000 \text{ N/mm}^{3/2}$
- ・ **Propagate**

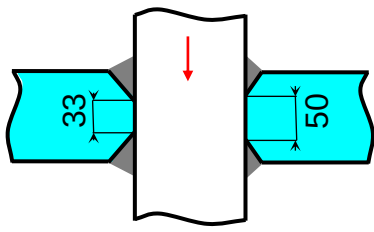
(2) t/3 partial penetration side

- ・ $\sigma_{app} = 257 \text{ MPa}$
- ・ Temperature = -34°C
- ・ $K_{ca} = 7000 \text{ N/mm}^{3/2}$
- ・ **Propagate**



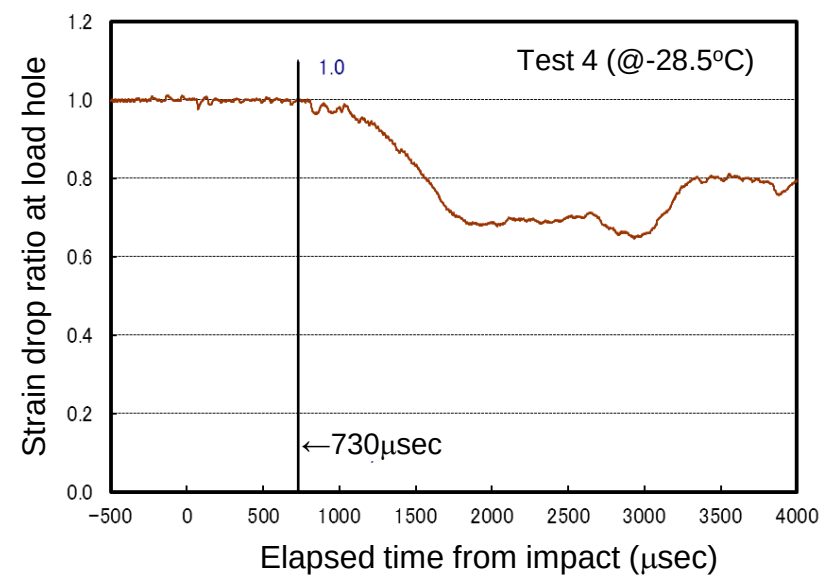
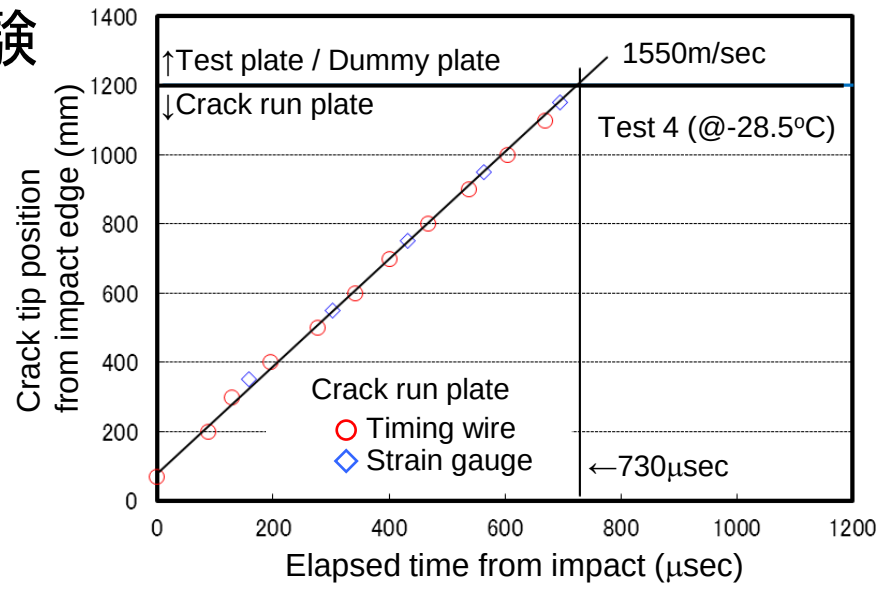
試験結果（シナリオ2 / UD→HSC） - Test 2-4

- 試験片サイズ: 大型構造モデル試験
- 溶接開先: t/3, t/4部分開先継手



■ 試験結果

	Test 2-4
Target temp. (°C)	-28
Test plate Kca (N/mm ^{3/2})	8000
Applied stress (MPa)	257
Result	Arrest / Arrest

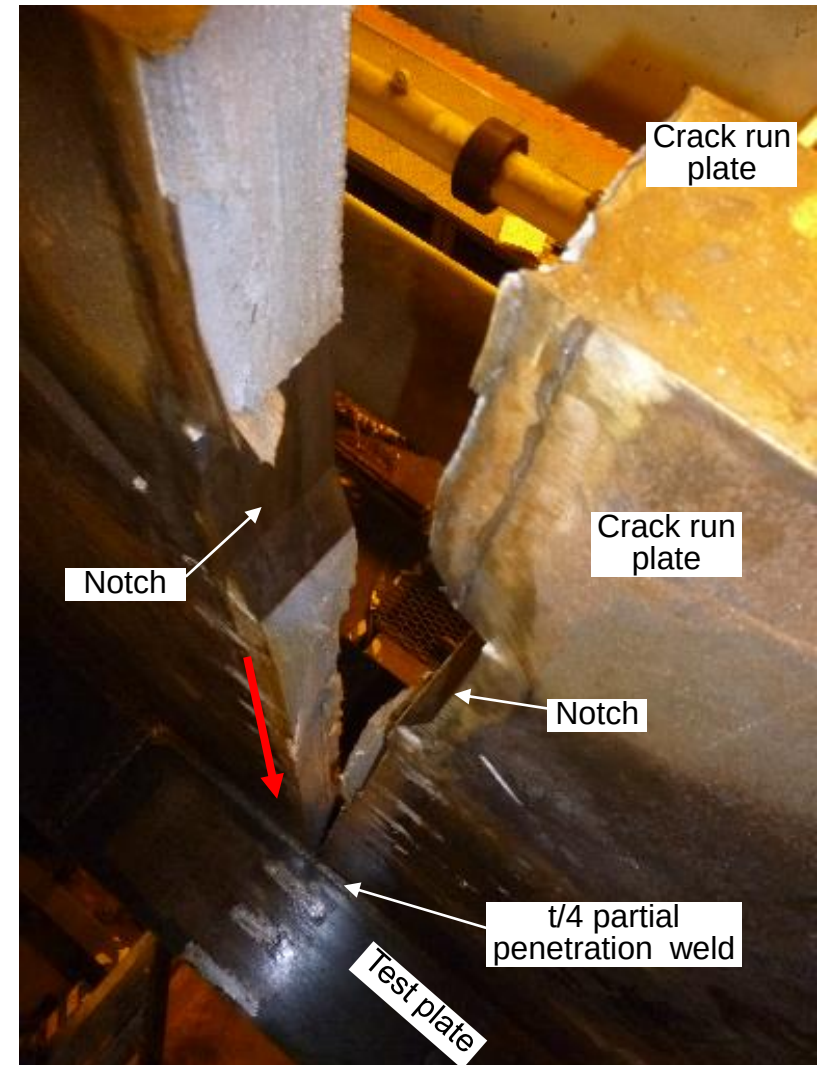
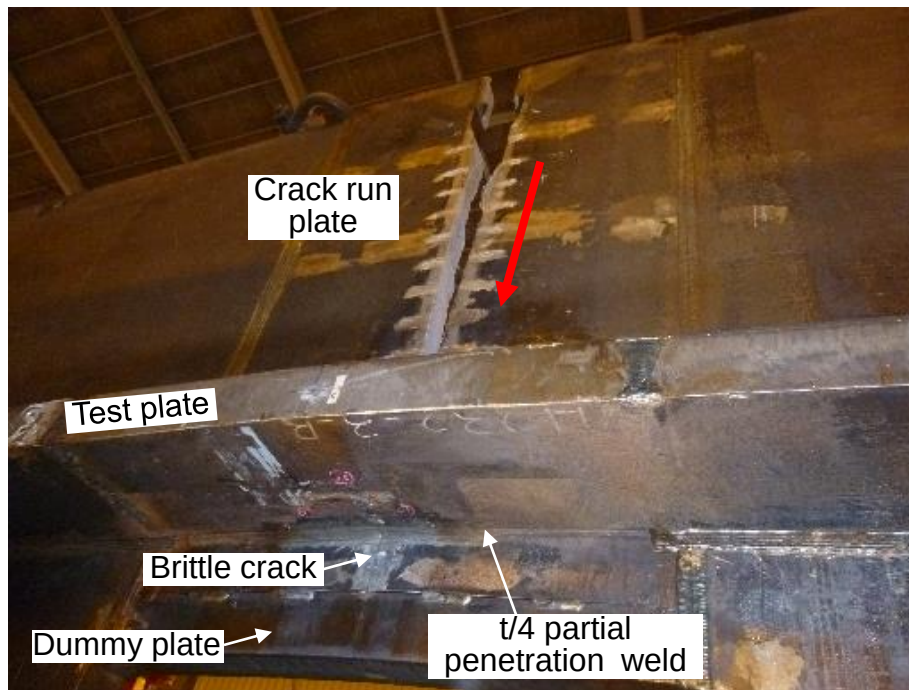


伝播経路 (シナリオ2 / UD→HSC) - Test 2-4

■ Test 2-4

(1) t/4 partial penetration weld side

- ・ $\sigma_{app} = 257\text{MPa}$
- ・ Temperature = -28°C
- ・ $K_{Ica} = 8000\text{N/mm}^{3/2}$
- ・ **Arrest**

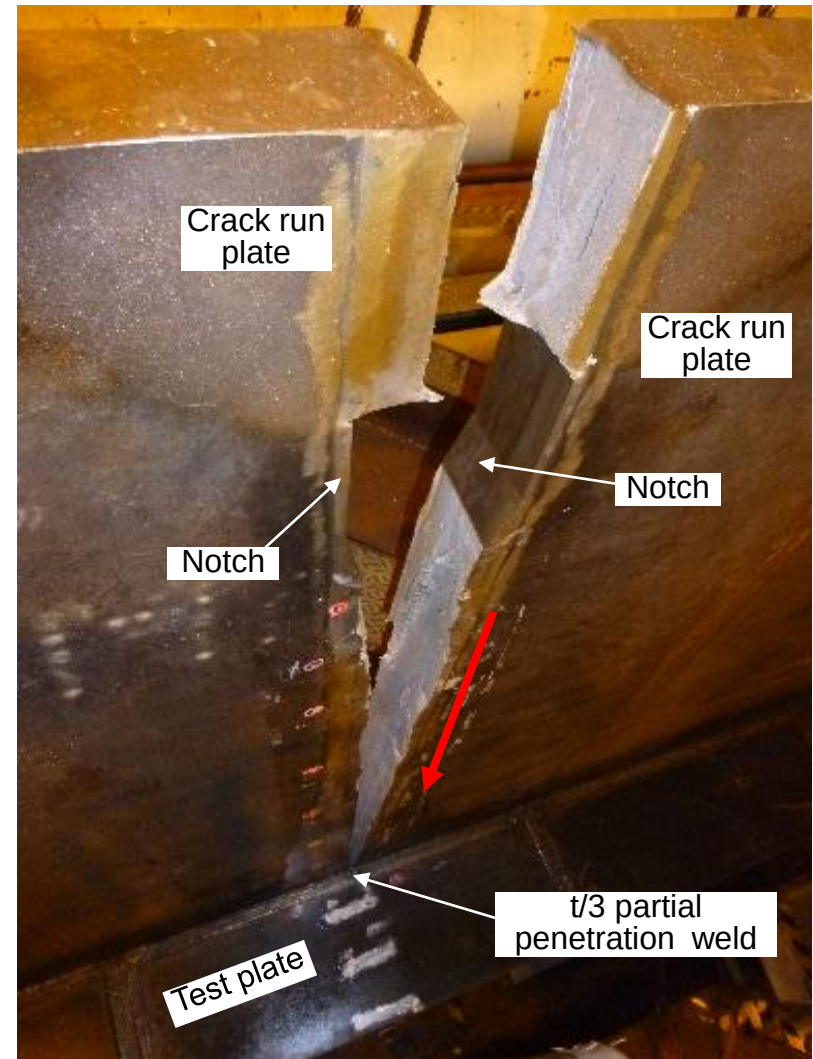
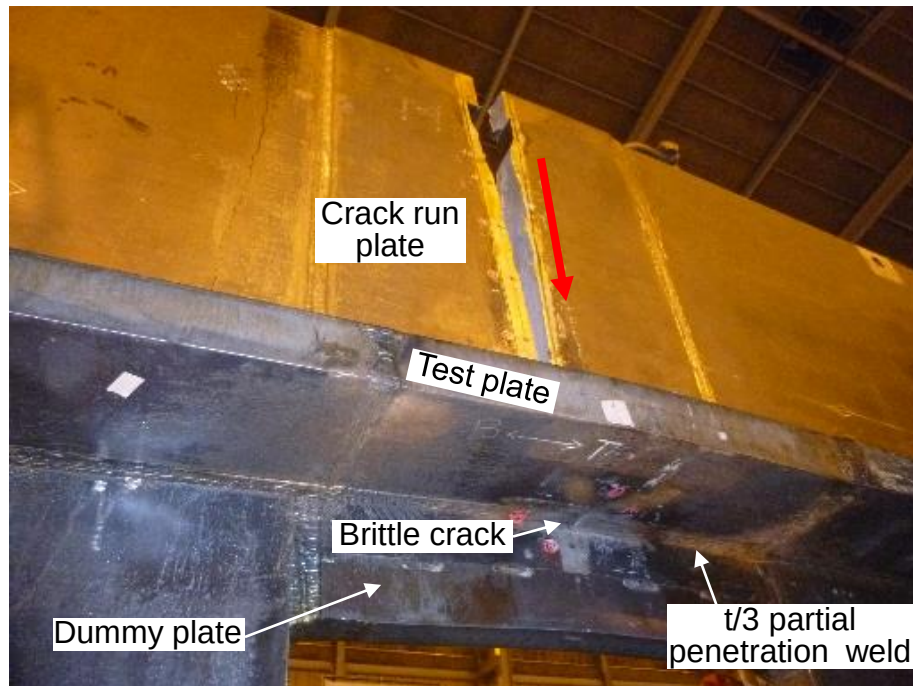


伝播経路 (シナリオ2 / UD→HSC) - Test 2-4

■ Test 2-4

(2) t/3 partial penetration weld side

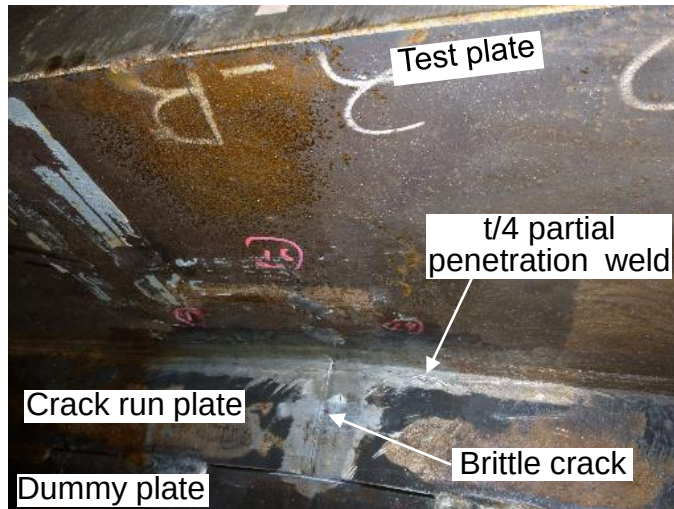
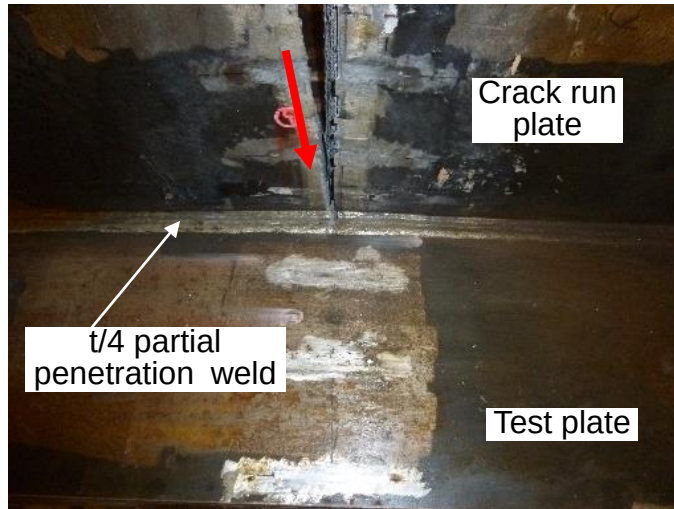
- ・257MPa
- ・Temperature=-28°C
- ・ $K_{Ic}=8000\text{N/mm}^{3/2}$
- ・**Arrest**



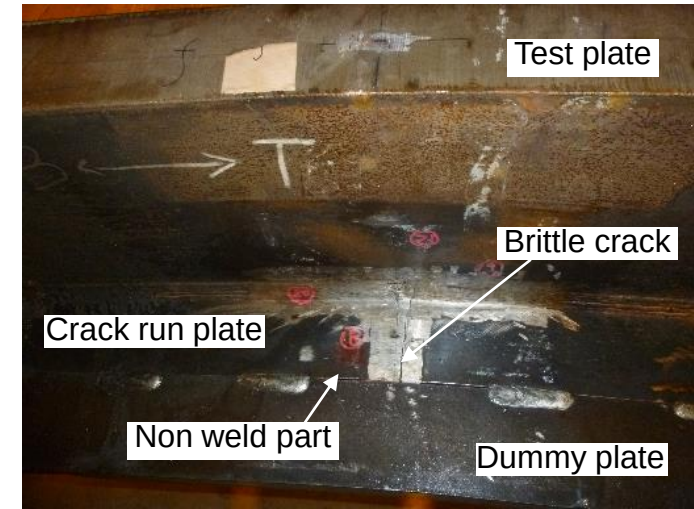
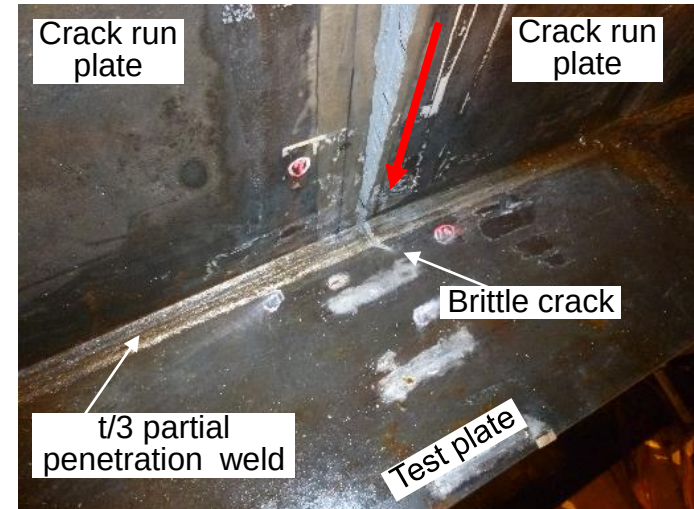
伝播経路 (シナリオ2 / UD→HSC) - Test 2-4

■ Test 2-4

(1) t/4 partial penetration weld side



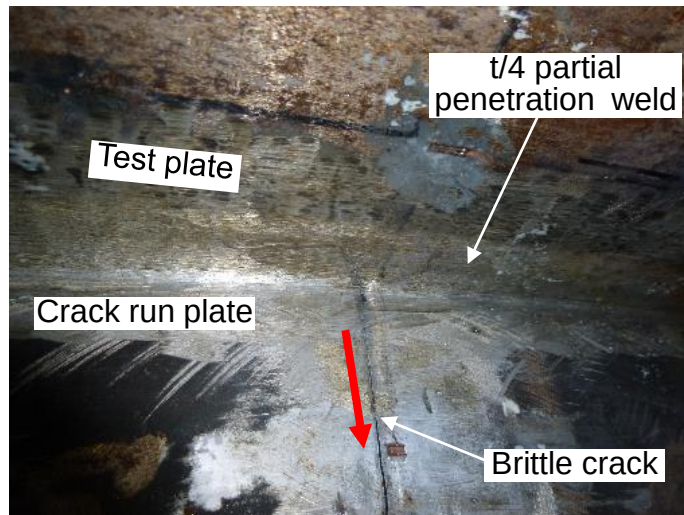
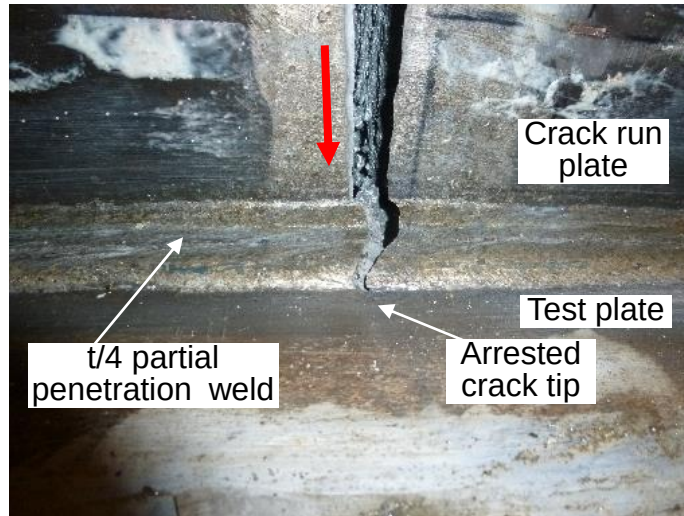
(2) t/3 partial penetration weld side



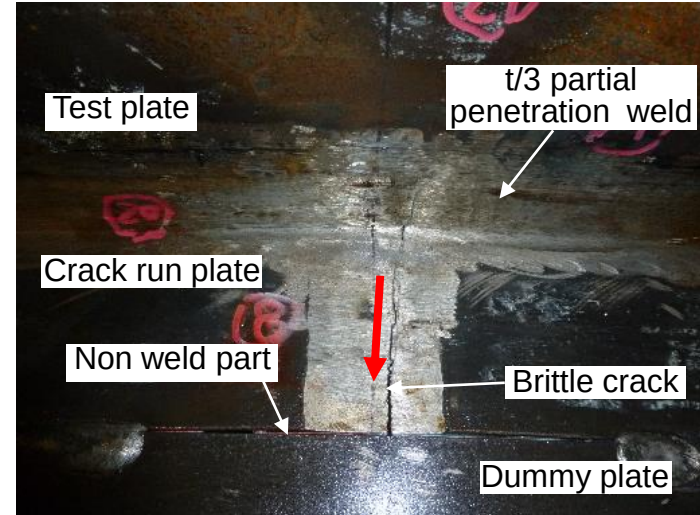
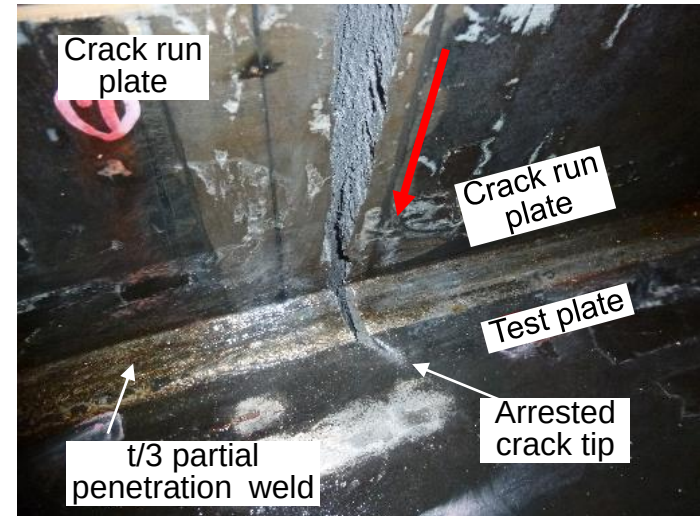
伝播経路 (シナリオ2 / UD→HSC) - Test 2-4

■ Test 2-4

(1) t/4 partial penetration weld side

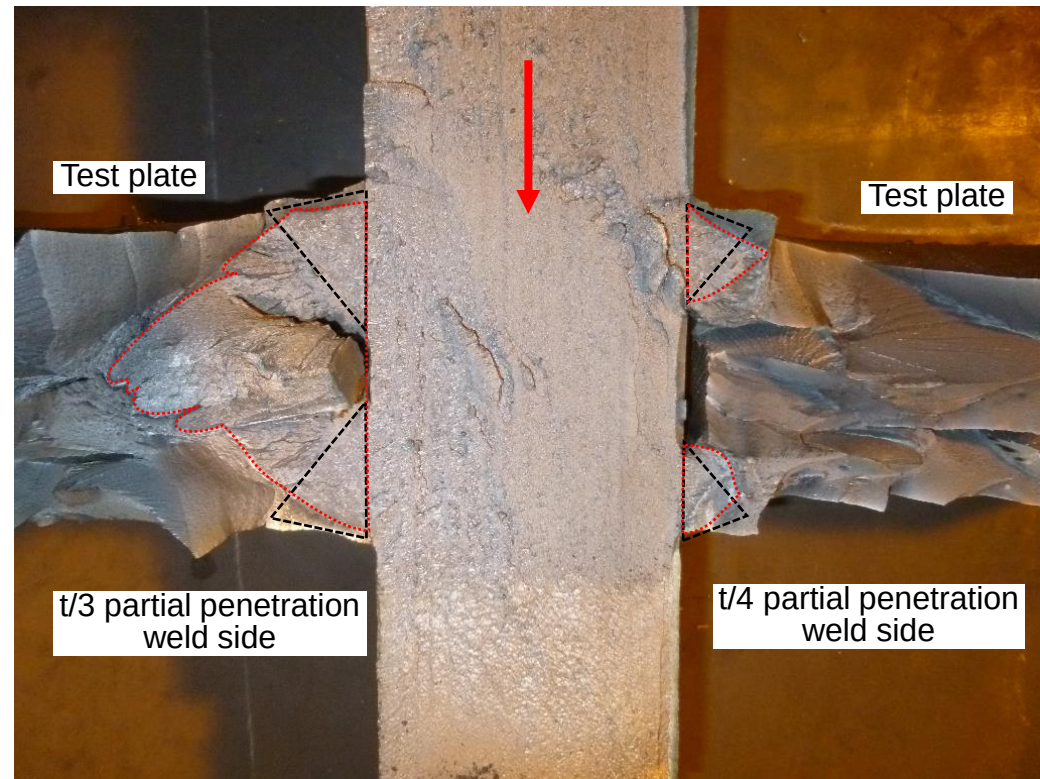
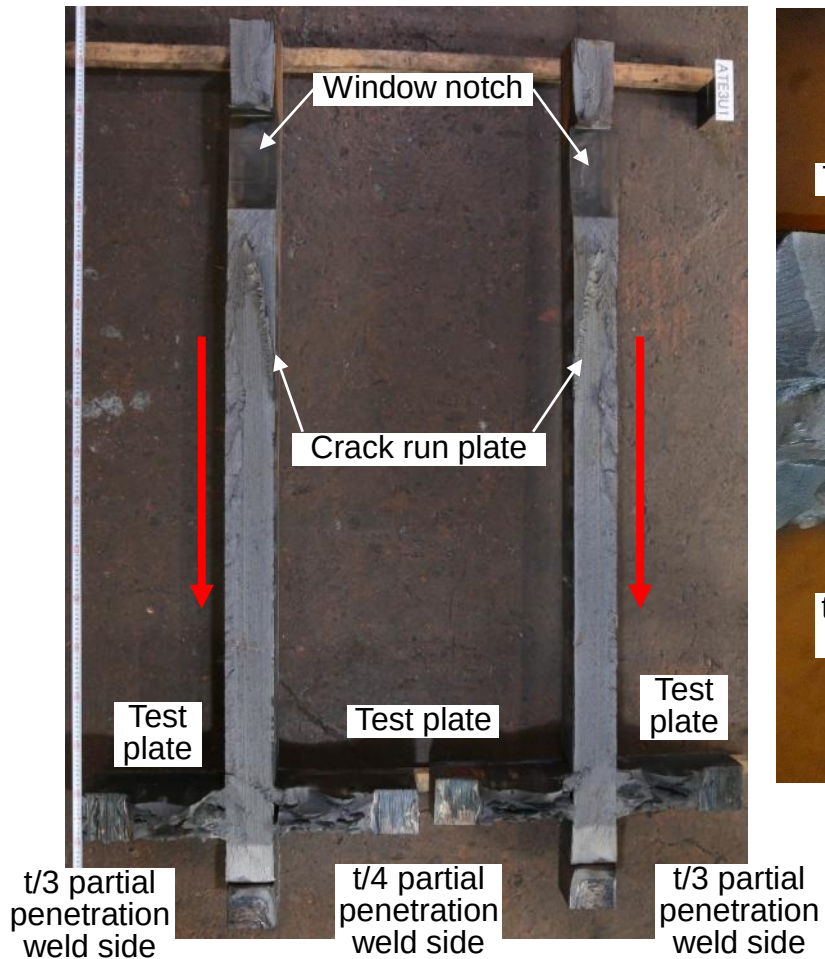


(2) t/3 partial penetration weld side

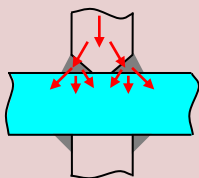
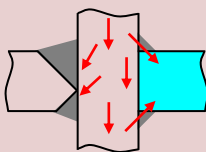
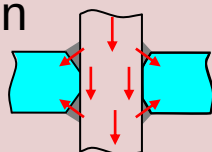


破面（シナリオ2 / UD→HSC） - Test 2-4

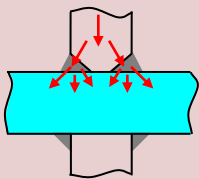
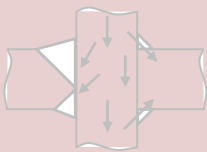
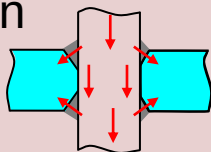
■ Test 2-4



構造モデル試験一覧

	シナリオ1(HSC → UD)			シナリオ2(UD → HSC)			
Test plate	EH40, t=100mm			EH47, t=100mm			
	Plate 1	Plate 2	Plate 2				
Test #	Test 1-1	Test 1-2	Test 1-3	Test 2-1	Test 2-2	Test 2-3	Test 2-4
Test scale	中型構造 モデル	大型構造 モデル		中型構造 モデル			大型構造 モデル
Weld detail	t/3 partial penetration weld			Fillet weld		t/3 & t/4 partial penetration Weld	
							
Test temp.	-23°C	-30°C	-35°C	-42°C	-34°C	-34°C	-28°C
Test plate Kca	6000 N/mm ^{3/2}	7000 N/mm ^{3/2}	6000 N/mm ^{3/2}	6000 N/mm ^{3/2}	7000 N/mm ^{3/2}	7000 N/mm ^{3/2}	8000 N/mm ^{3/2}
Applied stress	257 MPa			257 MPa			
Test result	Arrest	Arrest	Arrest	Arrest	Arrest	Propagate	Arrest

構造モデル試験一覧

	HSC → UD			UD → HSC			
Test plate	EH40, t=100mm			EH47, t=100mm			
	Plate 1	Plate 2	Plate 2				
Test #							Test 2-4
Test scale	1/10						1/10 型構造モデル
Weld detail	t/3 partial penetration weld 			Fillet weld 		t/3 & t/4 partial penetration Weld 	
Test temp.	-23°C	-30°C	-35°C	-42°C	-34°C	-34°C	-28°C
Test plate Kca	6000 N/mm ^{3/2}	7000 N/mm ^{3/2}	6000 N/mm ^{3/2}	6000 N/mm ^{3/2}	7000 N/mm ^{3/2}	7000 N/mm ^{3/2}	8000 N/mm ^{3/2}
Applied stress	257 MPa			257 MPa			
Test result	Arrest	Arrest	Arrest	Arrest	Arrest	Propagate	Arrest

溶接開先については、実際にHSCとUDの継手に適用される部分開先継手に限定すれば・・・

内容

1. 緒言、目的

2. 板厚80mm超の要求Kca値(構造モデル試験)

2.1 シナリオ1(HSC→UD)のアレスト試験

/ 供試鋼、試験方法、試験結果

2.2 シナリオ2(UD→HSC)のアレスト試験

/ 供試鋼、試験方法、試験結果

3. 結論

結論

板厚100mmの脆性亀裂アレスト(BCA)鋼の要求Kca値について検討し、以下の結論を得た。

- (1) シナリオ1(HSC → UD)に対しては、
Kca値 $6000\text{N/mm}^{3/2}$ で脆性亀裂はアレストした。
- (2) シナリオ2(UD → HSC)に対しては、
Kca値 $8000\text{N/mm}^{3/2}$ が脆性亀裂のアレストに必要であった。

	シナリオ1 (HSC → UD)	シナリオ2 (UD → HSC)
t=100mm	$Kca \geq 6000\text{N/mm}^{3/2}$	$Kca \geq 8000\text{N/mm}^{3/2}$