

ステンレスの溶接

ステンレス協会

目 次

- (1)溶接とは
- (2)溶接の方法 ； 分類、各論
- (3)溶接部の特性 ；
溶接部の組織、耐食性、機械的性質
- (4)溶接欠陥 ； 溶接割れ、形状不良
- (5)溶接の注意点

＜付録＞ ステンレスの物理的性質

- (1)密度
- (2)熱的性質 ； 熱膨張率、比熱、熱伝導率
- (3)電気抵抗
- (4)磁性
- (5)ヤング率

溶接とは？

金属材料の接合方法の1種

- 同種・異種金属を溶解し、融合、凝固(固着)させる⇒ 融接
- 固体間の拡散により金属材料同士を接合する ⇒ 圧接
- 母材より低融点の溶加材を溶融させ、
金属材料同士を接合する ⇒ ろう接

溶接法の分類

・ 融接

- ●被覆アーク溶接(手棒)
- サブマージアーク溶接
- イナートガスアーク溶接
(●TIG溶接、●MIG溶接)
- ガス溶接
- エレクトロスラグ溶接
- テルミット溶接
- マグ・炭酸ガスアーク溶接
- 電子ビーム／レーザー／
●プラズマアーク溶接

・ 圧接

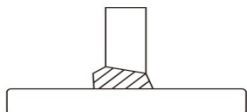
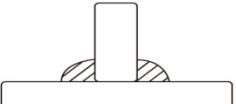
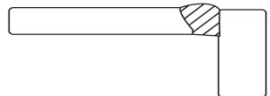
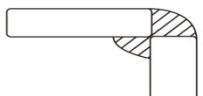
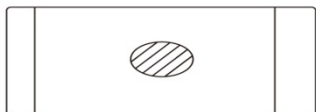
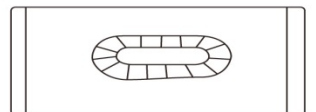
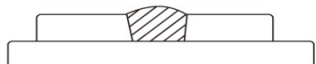
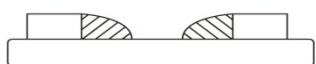
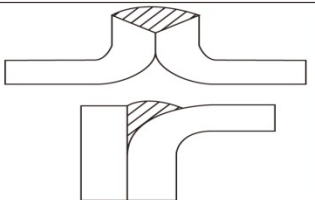
- 抵抗溶接
(●スポット溶接、●シーム溶接)
- 高周波溶接
- 鍛接
- 摩擦圧接
- 爆発圧接

・ ろう接

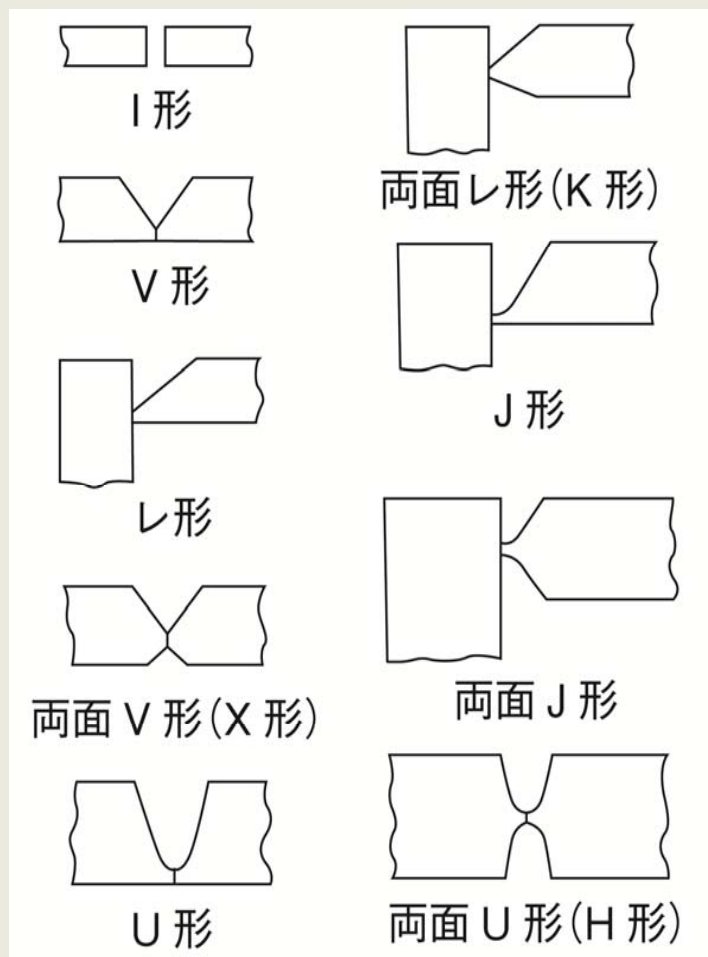
- はんだ付け
- ろう付け

(●____; 図解)

溶接継手形状による分類

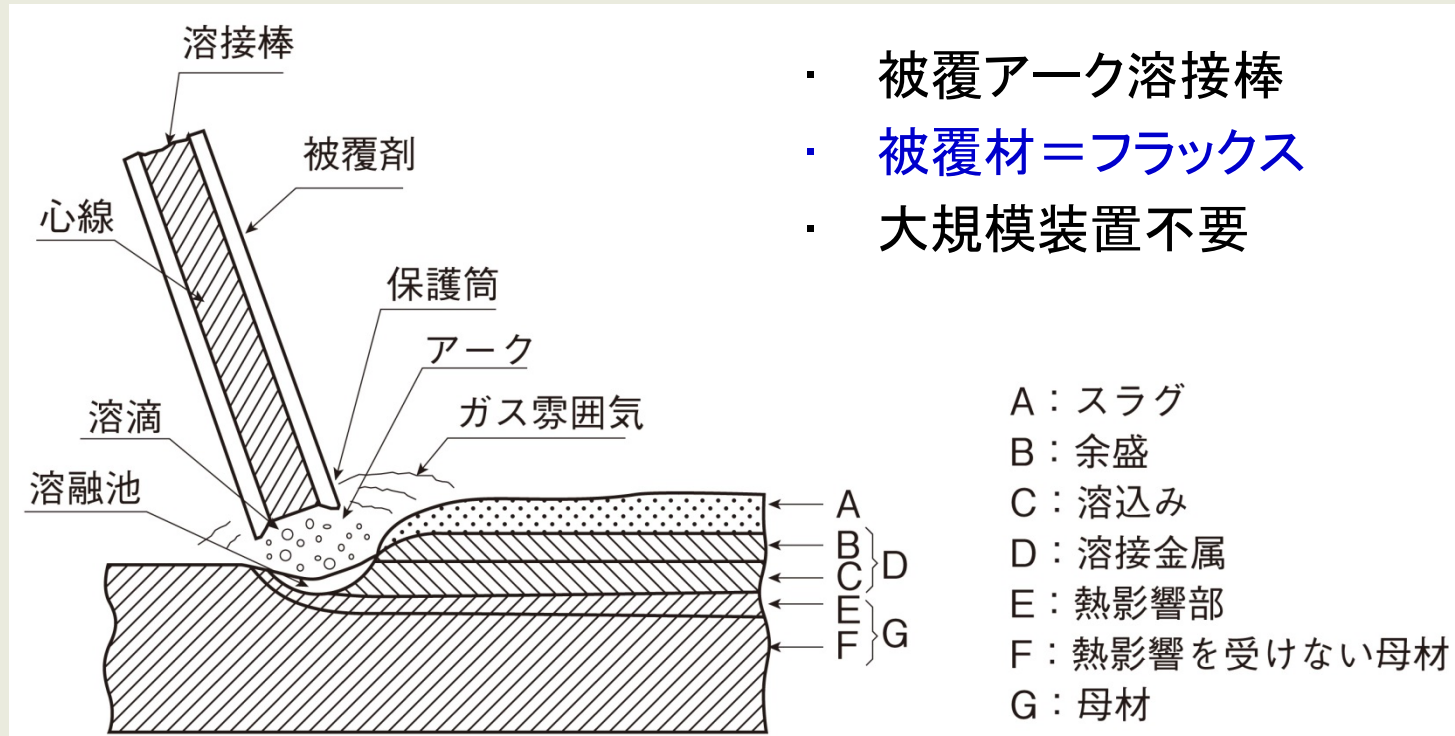
	突合せ溶接	すみ肉溶接	せん溶接	スロット溶接
突合せ継手				
T 十字継手				
角継手				
継当て金手				
重ね継手				
へり継手				

開先形状



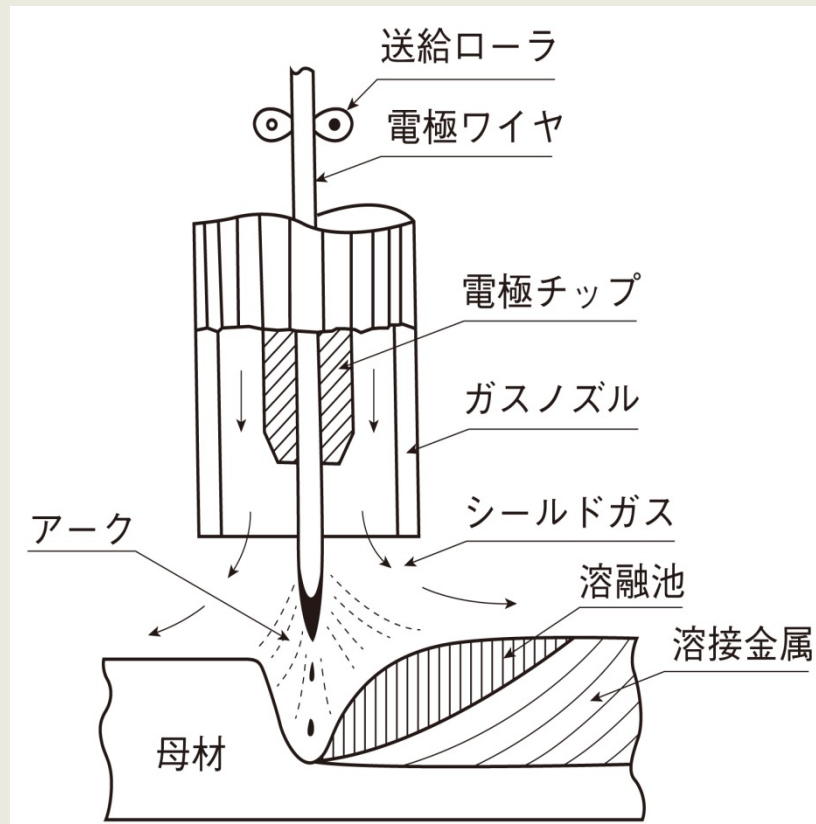
- ・ 突合せ溶接等
- ・ 接合面を完全に溶融させる
＝部材間を溶加材で満たす
- ・ 溶接方法、溶接条件で選択

被覆アーク溶接 (手棒溶接)



MIG溶接, MAG溶接

Metal Inert Gas 溶接, Metal Active Gas 溶接



MIG溶接

- ・ 電極＝溶加材；ソリッドワイヤー
- ・ 不活性ガス；

Ar+2%O₂

Ar+5%CO₂

- ・ 高能率

MAG溶接

- ・ 電極＝溶加材；
ソリッドワイヤー，フラックス入りワイヤー

- ・ 活性ガス；

CO₂，Ar+10～30%CO₂

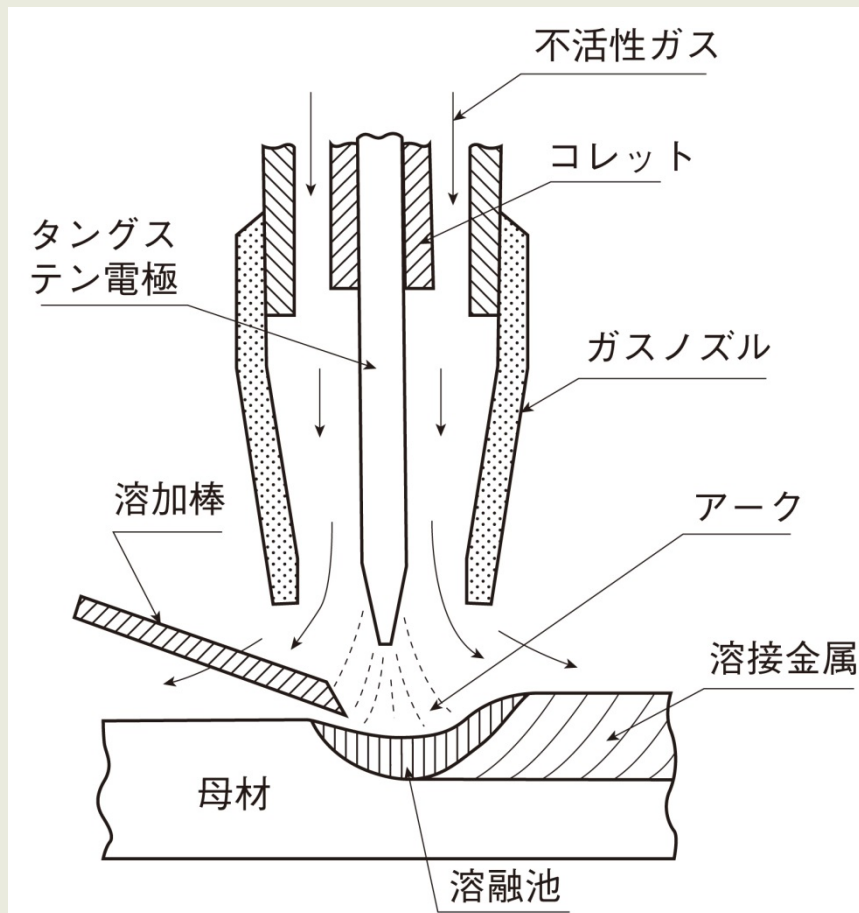
- ・ 高能率

CO₂混入ガスは溶接金属の炭素量が高くなり，耐食性に悪影響を及ぼす可能性有がある。

⇒ 特に高純度フェライト系への適用は不向き

TIG溶接

Tungsten Inert Gas 溶接



タングステン電極

不活性ガス

(Ar、He)

溶加材は電極ではない

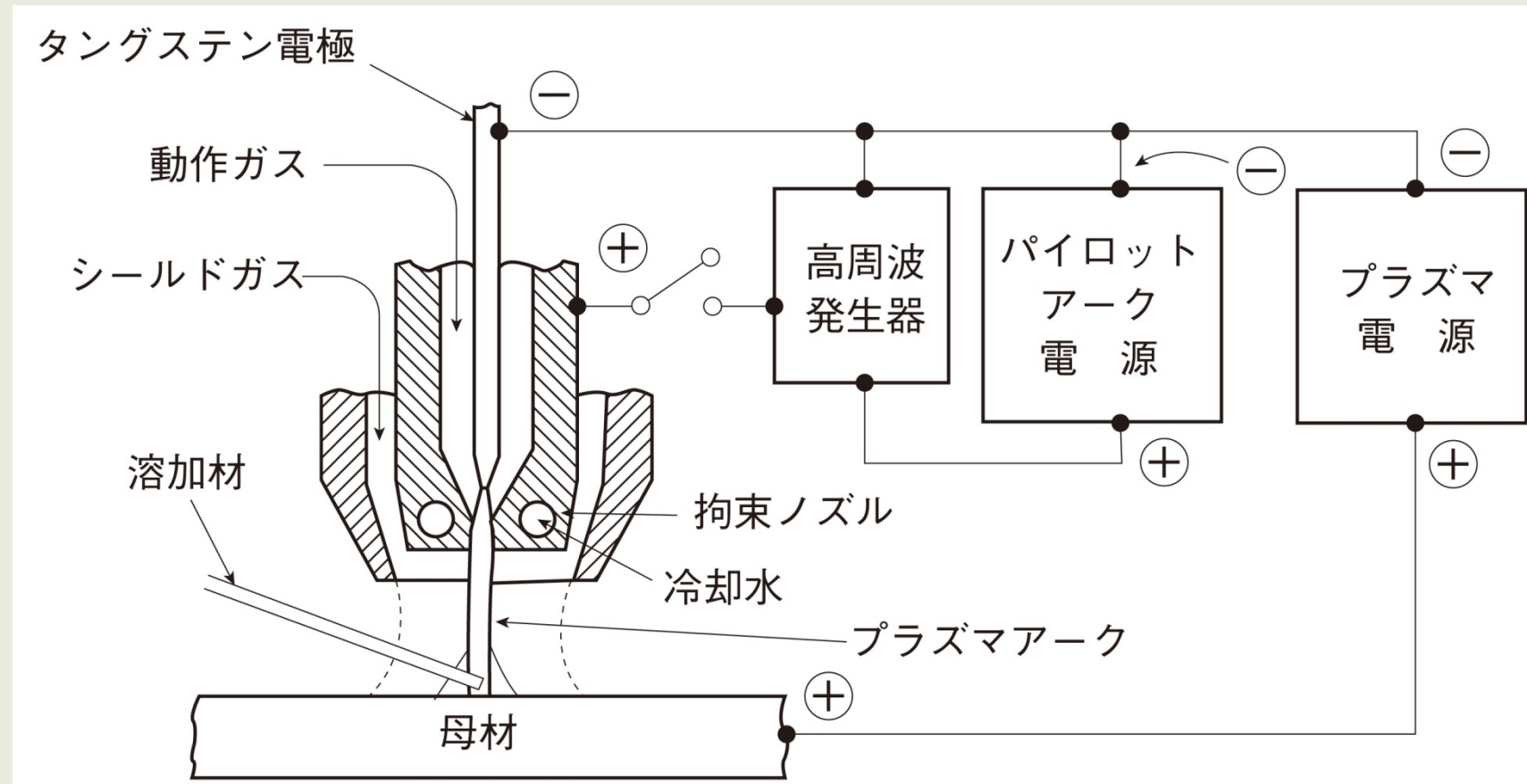
溶加材は使わない場合もある

(薄板など)

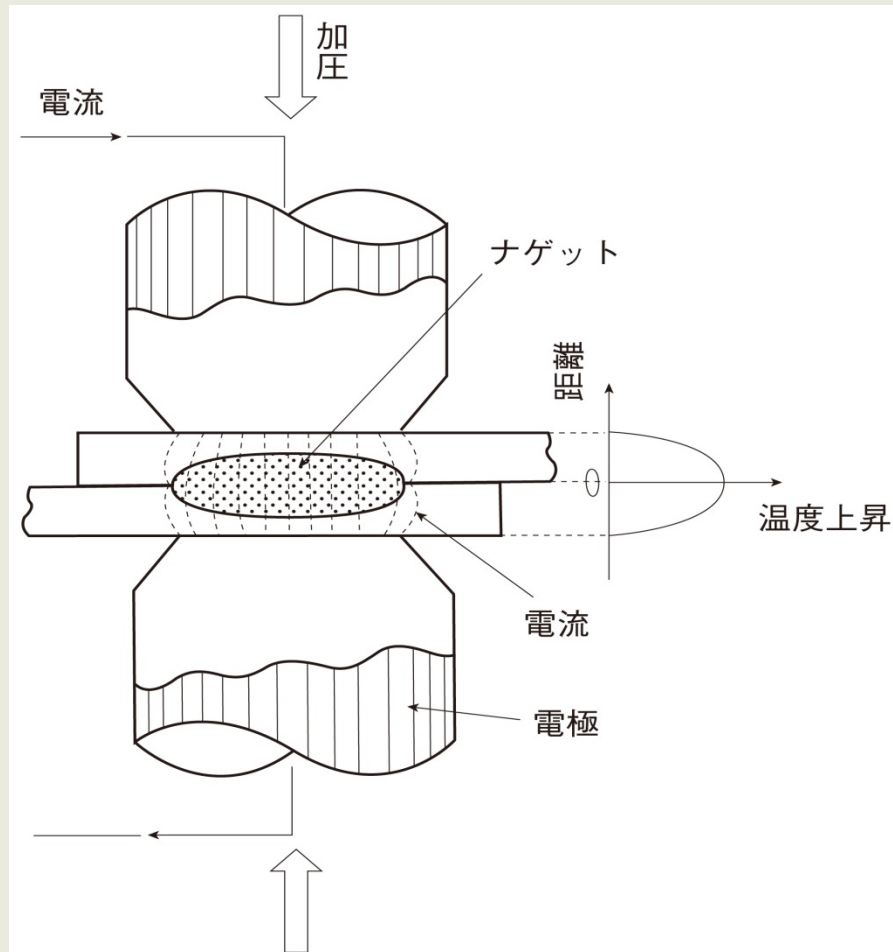
高エネルギー密度溶接

溶接法	熱源	エネルギー密度 kW/cm ²
電子ビーム溶接	電子ビーム	パルス: 10,000 以上 連続: 1,000 以上
レーザービーム溶接	レーザービーム	パルス: 10,000 以上 連続: 100 以上
プラズマ溶接 (キーホール溶接)	Ar プラズマ	10,000 以上
参考: 被覆アーク溶接	アルゴンアーク	15

高エネルギー密度溶接; プラズマ溶接

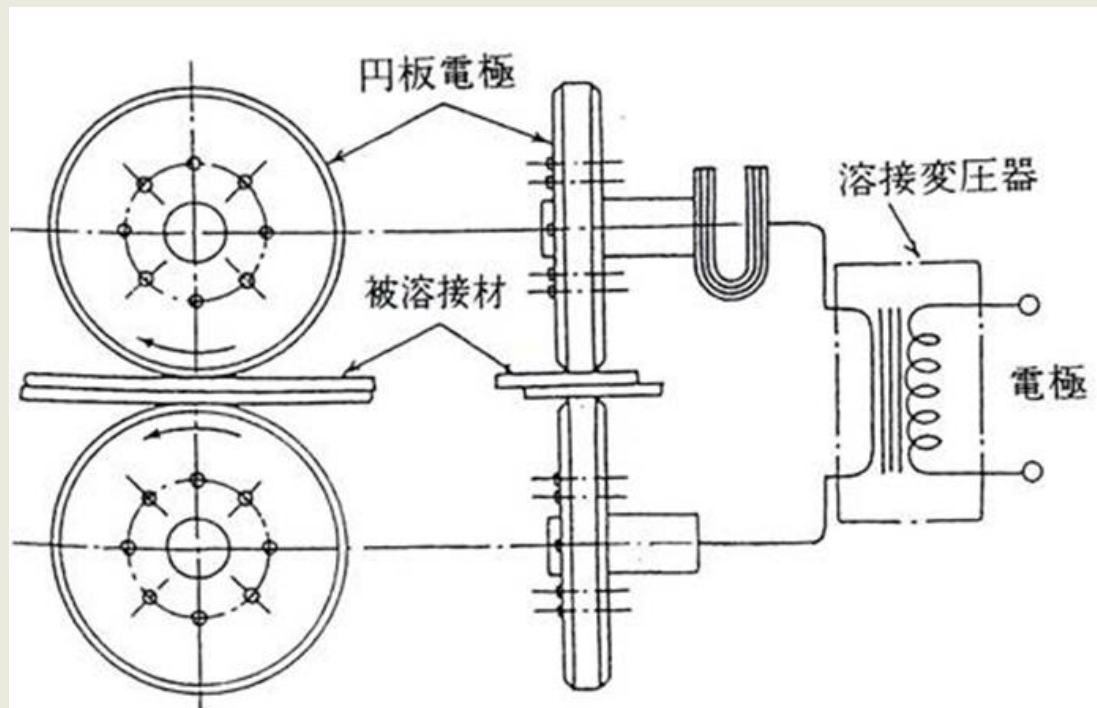


抵抗溶接① スポット溶接



- ・ 電気抵抗による発熱を利用
- ・ 電極で加圧
- ・ 短時間・大電流
- ・ 局所的な溶融であり、熱影響小
- ・ 薄板向き

抵抗溶接② シーム溶接



- ・ 円盤状電極を加圧・回転
- ・ 断続的通電
- ・ 局所的な溶接

溶接材料(溶加材)

母 材	溶 加 材
SUS304(L)	Y308(L)
SUS316(L)	Y316(L)
SUS310S	Y310S
SUS347、SUS321	Y347、Y321
SUS410	Y410、D410Nb
SUS430	Y430、D430Nb

母材と同等、またはそれ以上の合金元素を有する溶加材を用いる

代表的な鋼種と溶接材料の例

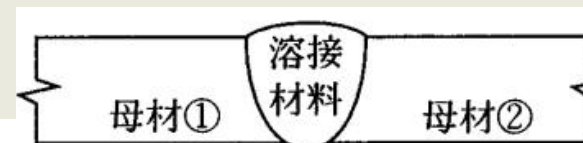
種 類	母 材	溶接材料			
		SMAW	SAW	GTAW及びGMAW	FCAW
オーステナイト系	SUS304	D308	S308	Y308	YF308
	SUS304L	D308L	S308L	Y308L	YF308L
	SUS310, 310S	D310	S310	Y310	YF310
	SUS316	D316	S316	Y316	YF316
	SUS316L	D316L	S316L	Y316L	YF316L
	SUS317	D317	S317	Y317	YF317
	SUS317L	D317L	S317L	Y317L	YF317L
	SUS321, 347	D347	S347	Y347	YF347
マルテンサイト系	SUS403, 410	D410, 410Nb	S410	Y410	YF410
フェライト系	SUS405	D410Nb	—	—	—
	SUS430	D430, 430Nb	S430	Y430	YF430
オーステナイト・フェライト二相系	SUS329J1	D329J1	—	—	—
	SUS329J3L	E2209*	—	ER2209*	E2209T*
析出硬化系	SUS630	D630	—	—	—

* AWS規格

SMAW：被覆アーク溶接， SAW：アブマージアーク溶接， GTAW：TIG溶接

GMAW：MIG溶接， FCAW：フラックス入ワイヤアーク溶接

異材溶接の適用溶接材料と 予熱・後熱処理温度の例



母材①	母材②	溶接材料	予熱パス間温度	溶接後熱処理温度
オーステナイト系	炭素鋼	309系	室温～200℃ (室温～473K)	550～600℃ (823～873K)
	Cr-Mo鋼	309系	100～200℃ (373～473K)	650～720℃ (923～993K)
		インコネル系		
	オーステナイト系	①または②の耐食性の劣る側と同成分系の溶接材料	不要	不要
	マルテンサイト系 フェライト系	309系	室温～200℃ (室温～473K)	590～620℃ (863～893K)
	オーステナイト・フェライト二相系	①と同成分系の溶接材料	不要	不要
マルテンサイト系 フェライト系	Ni合金	インコネル系	不要	不要
	炭素鋼	309系	室温～200℃ (室温～473K)	550～600℃ (823～873K)
	Cr-Mo鋼	309系	100～200℃ (373～473K)	590～620℃ (863～893K)
		インコネル系		
オーステナイト・フェライト二相系	Ni合金	インコネル系	100～200℃ (373～473K)	700～800℃ (973～1073K)
	炭素鋼	309系	不要	550～600℃ (823～873K)

代表的な溶接法の特徴

溶接方法	長所	短所
被覆アーク溶接	・全姿勢で可能 ・設備が簡便	・溶接棒の湿度管理要
サブマージ アーク溶接	・高能率 ・溶け込みが深い ・溶接欠陥が少ない	・溶接姿勢限定 ・開先精度厳しい ・フラックスの湿度管理要
TIG溶接	・全姿勢で可能 ・溶接金属が清浄 ・耐食性良好	・低能率 ・シールドガスが高価
MIG溶接	・高能率 ・全姿勢で可能	・シールドガスが高価 ・汚れに敏感
抵抗溶接	・熱影響が少ない ・設備が簡便 ・生産性が高い	・電極管理要
電子ビーム レーザービーム溶接	・溶け込みが深い ・熱歪が小さい	・大型設備要

代表的溶接方法に対する適用難易性目安

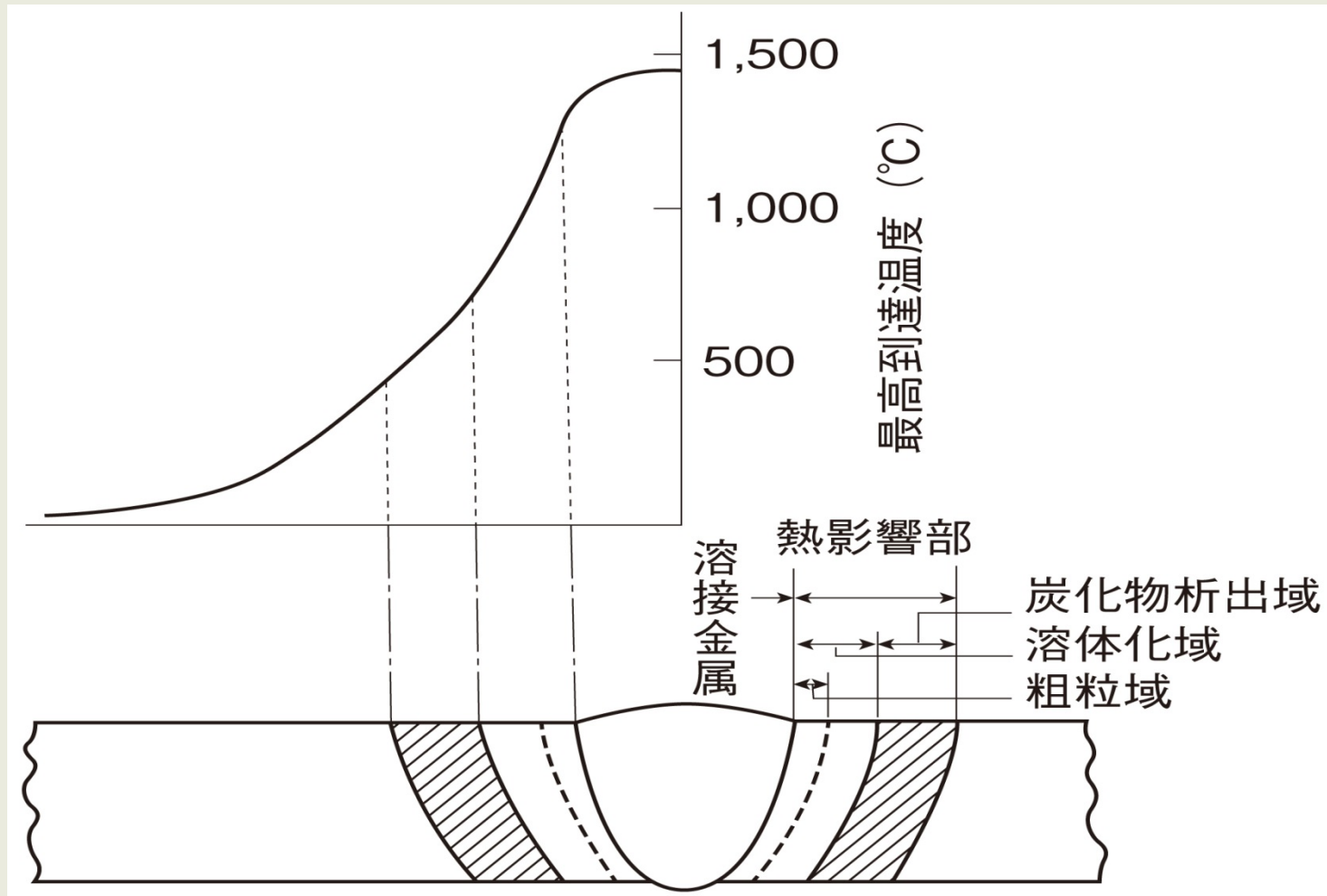
溶接方法	適用板厚 mm	鋼種			主用途
		SUS430 (18Cr)	*1: 高純度 Cr 系	SUS304 (18Cr-8Ni)	
被覆アーク溶接	0.8～	○	◎	◎	板突合せ、すみ肉溶接 大径管、肉盛溶接など
サブマージアーク 溶接	6～	△	△	◎	板突合せ、すみ肉溶接 大板の直線溶接など
TIG 溶接	0.5～3	△	◎	◎	薄板突合せ、すみ肉溶接 小径・細径管など
MIG 溶接	3～	△	○	◎	板突合せ、すみ肉溶接 大径管など
スポット溶接	0.15 ～3	△	◎	◎	薄板の気密性不要重ね溶接 車両、厨房品など
電子ビーム溶接	≥0.1	○	◎	◎	薄板～厚板の精密溶接

*1; SUS430LX, SUS430J1L など

◎; 適する ○; 一般的だが制限を受ける場合あり △; 特定の場合に適用

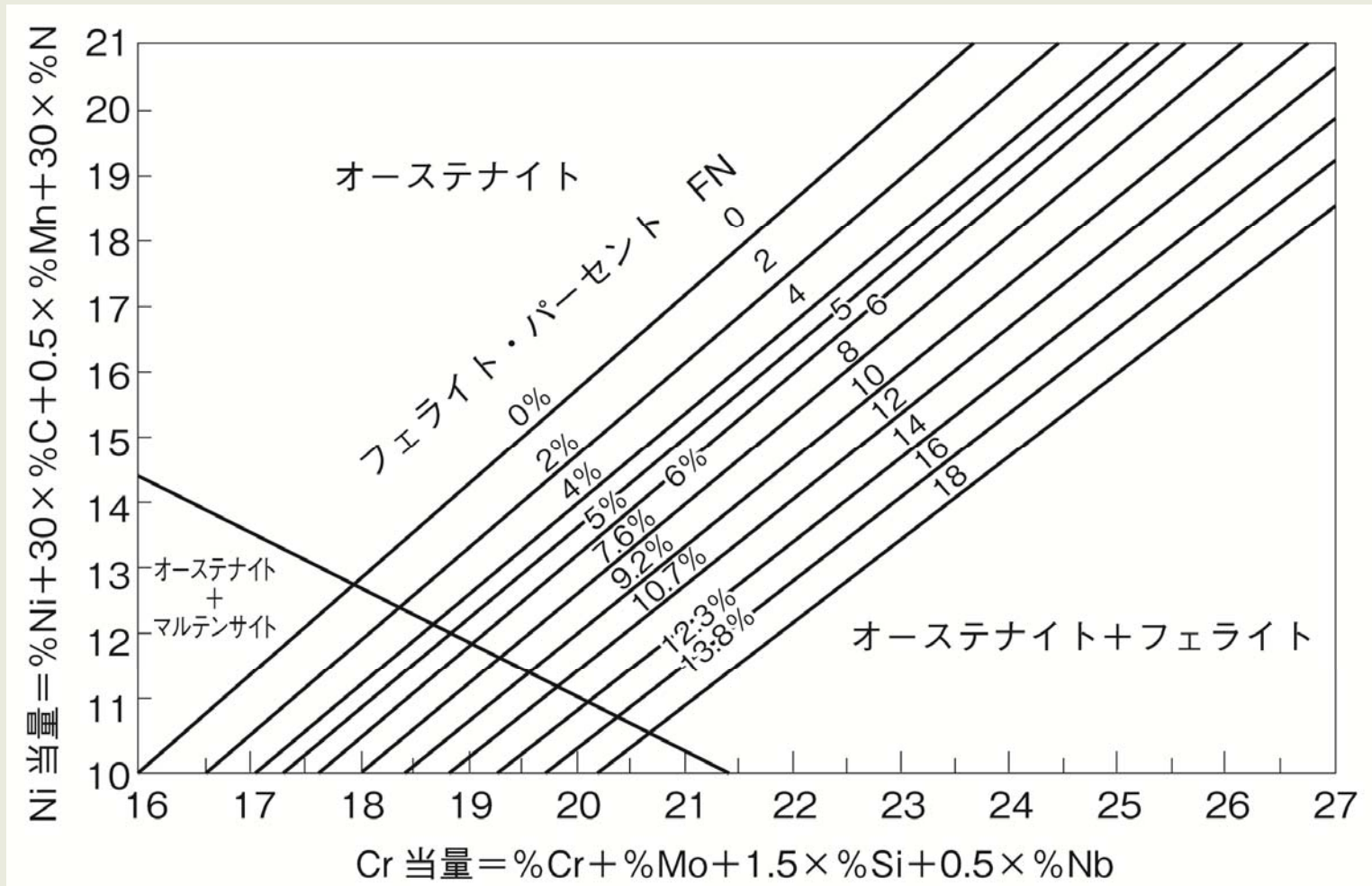
溶接部の組織 ①

オーステナイト系ステンレスの溶接部組織の模式図



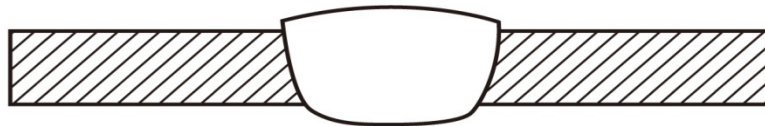
溶接部の組織 ③

Delongの状態図



溶接部の耐食性 ①

～腐食形態と主な原因～



(a) 母材腐食



(b) 溶接金属腐食



(c) HAZ 腐食 (I)



(d) HAZ 腐食 (II)



(e) HAZ 腐食 (III)

母材の耐食性が低い
“溶接金属が
オーバーマッチング”

溶接金属の耐食性劣化
・ 孔食、粒界腐食の発生
・ 酸化皮膜下の隙間腐食
・ 溶加棒のミスマッチ

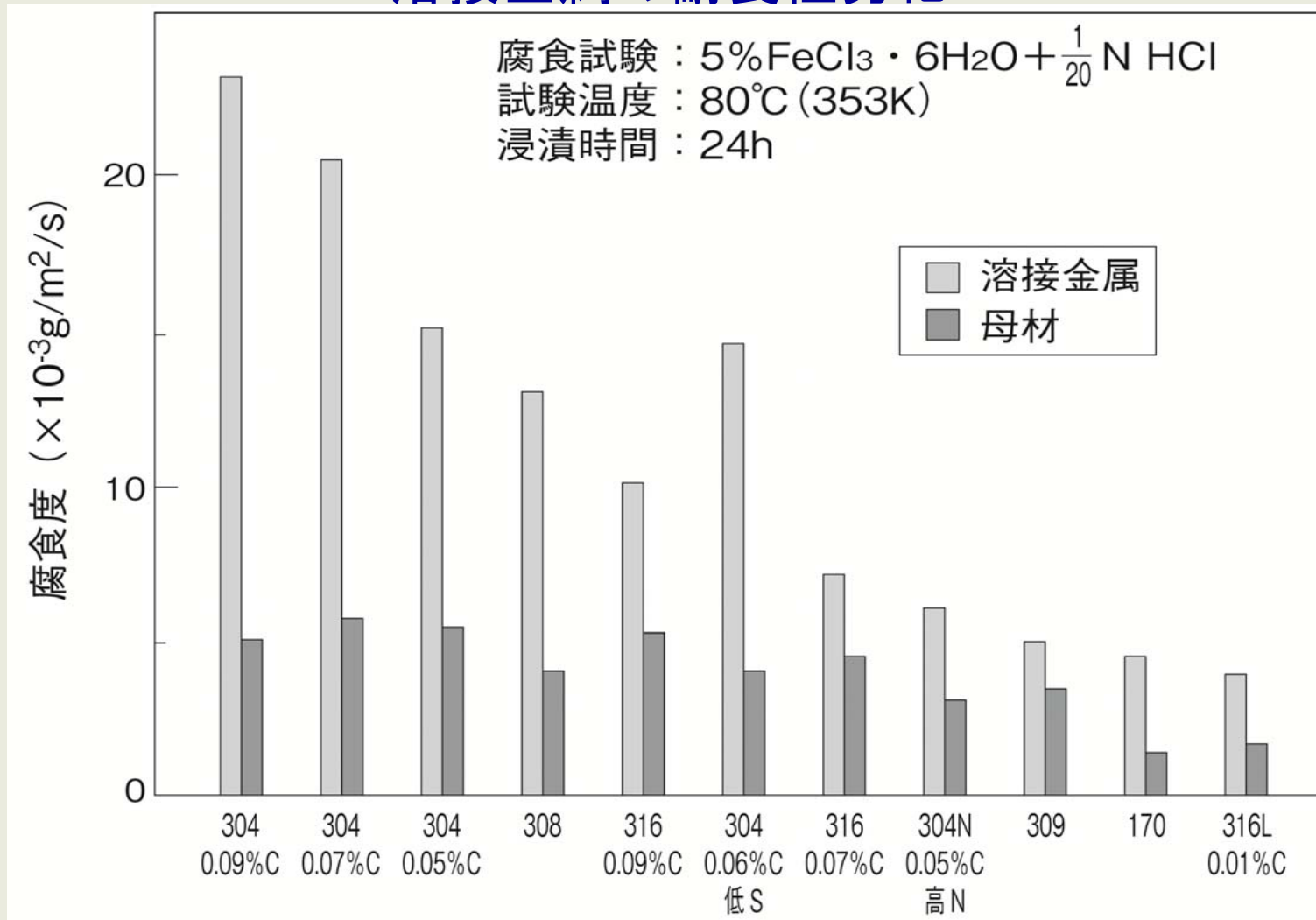
ウェルドディケイ
“クロム炭化物析出による
粒界腐食”

ナイフラインアタック
(安定型 γ 系ステンレス鋼)
・ 粒界腐食
(フェライト系ステンレス鋼)

異材継手部の腐食
“ガルバニック腐食”

溶接部の耐食性 ②

～溶接金属の耐食性劣化～



オーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属と母材の耐孔食性の比較

溶接部の耐食性 ③-1

～ オーステナイト系ステンレスのウェルドディケイ ～

溶接熱影響部は溶接時に650～850℃の温度領域に
長時間さらされる



結晶粒界にCr炭化物が析出



耐食性に有効な固溶Crが結晶粒界近傍で減少



結晶粒界の腐食(鋭敏化、ウェルドディケイ)

溶接部の耐食性 ③-2

～ ウェルドディケイの防止策 ～

- ・ 低C鋼の使用
 - SUS304→SUS304L
- ・ 安定化鋼種の使用
 - (Ti、NbによるCの固定)
 - SUS321、SUS347
- ・ 溶接入熱の制限
- Ⅰ 再溶体化処理(固溶化熱処理)

溶接部の耐食性 ④

～ 応力腐食割れ ～

応力腐食割れの原因

- ・ 腐食環境
- ・ 応力

溶接部で起こりやすい



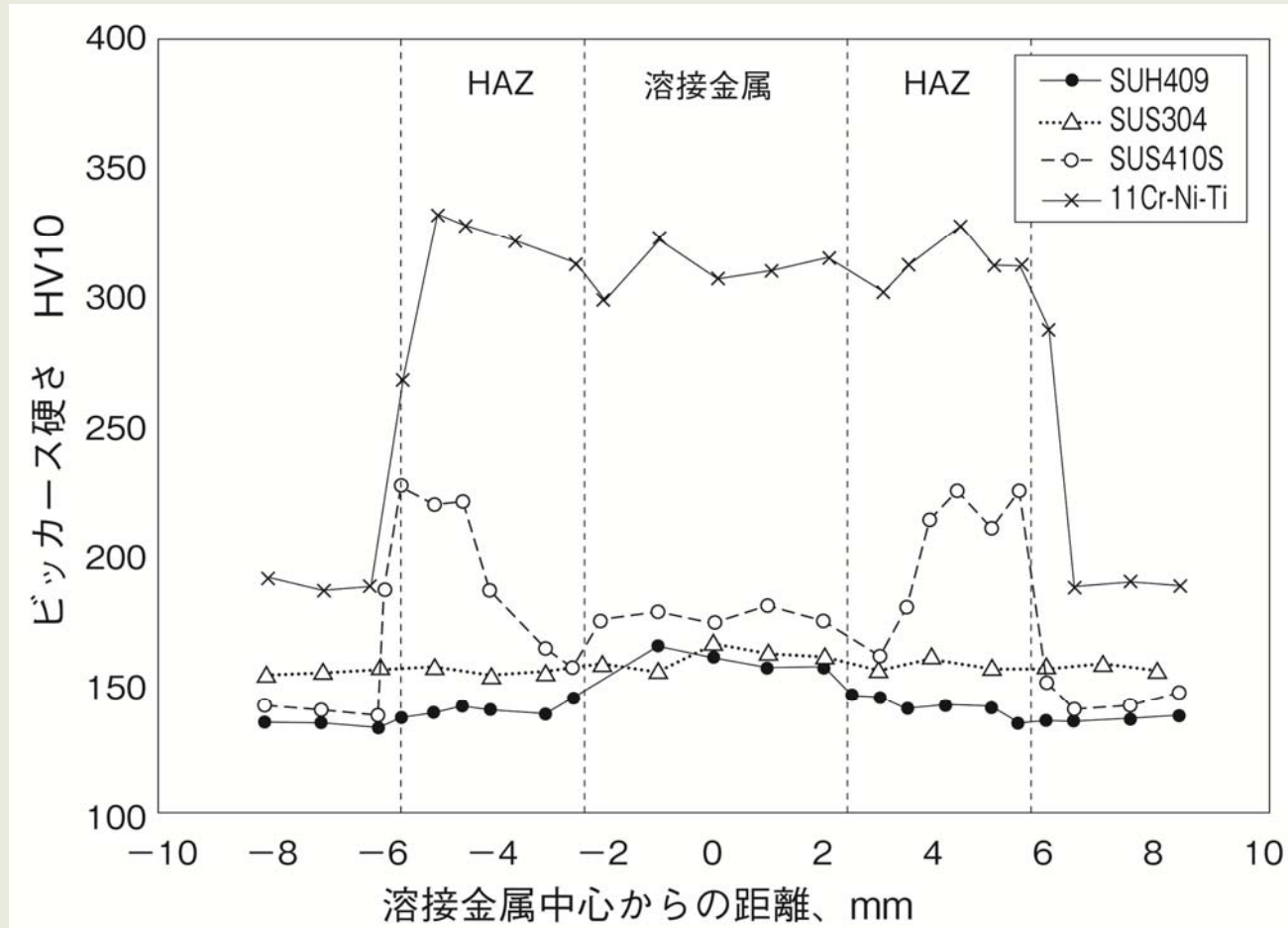
溶接残留応力

防止策

- ・ 溶接残留応力の緩和
 - － 応力緩和熱処理
 - － ショットピーニング
- ・ 腐食環境の緩和
 - － インヒビター(防食剤)の添加

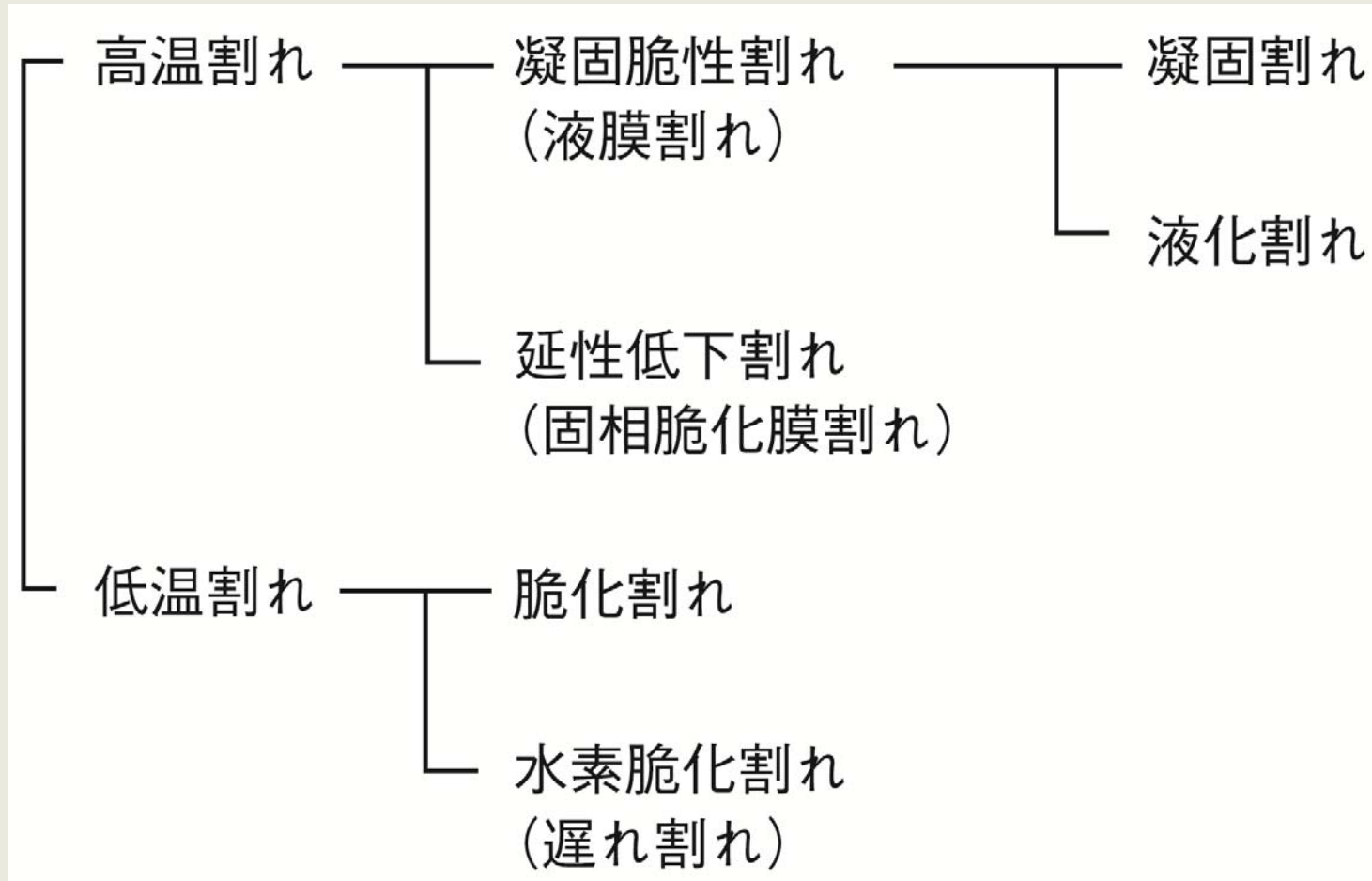
溶接部の機械的性質 ①

～ 各種ステンレスの溶接部の硬さ分布 ～



- 鋼種により
硬化挙動に
差あり

溶接部の欠陥 ①



ステンレス鋼の溶接割れの分類

溶接部の欠陥 ②

～ 高温割れ ～

- ・ 高温割れとは
 - － 溶接後900℃以上の高温で発生
 - － 最終凝固部での収縮による割れ(凝固割れ)
 - － オーステナイト系ステンレスで起こりやすい
- ・ 対策
 - － 溶接金属に少量の δ -フェライトを含有するような溶接材料を選ぶ
 - ↓
 - （耐食性劣化に注意）
 - － 鋼中のP(りん)とS(硫黄)を低減する

溶接部の欠陥 ③

～ 低温割れ ～

原因

- ・ 鋼中の水素
- ・ 硬化組織
- ・ 引張応力



遅れ破壊

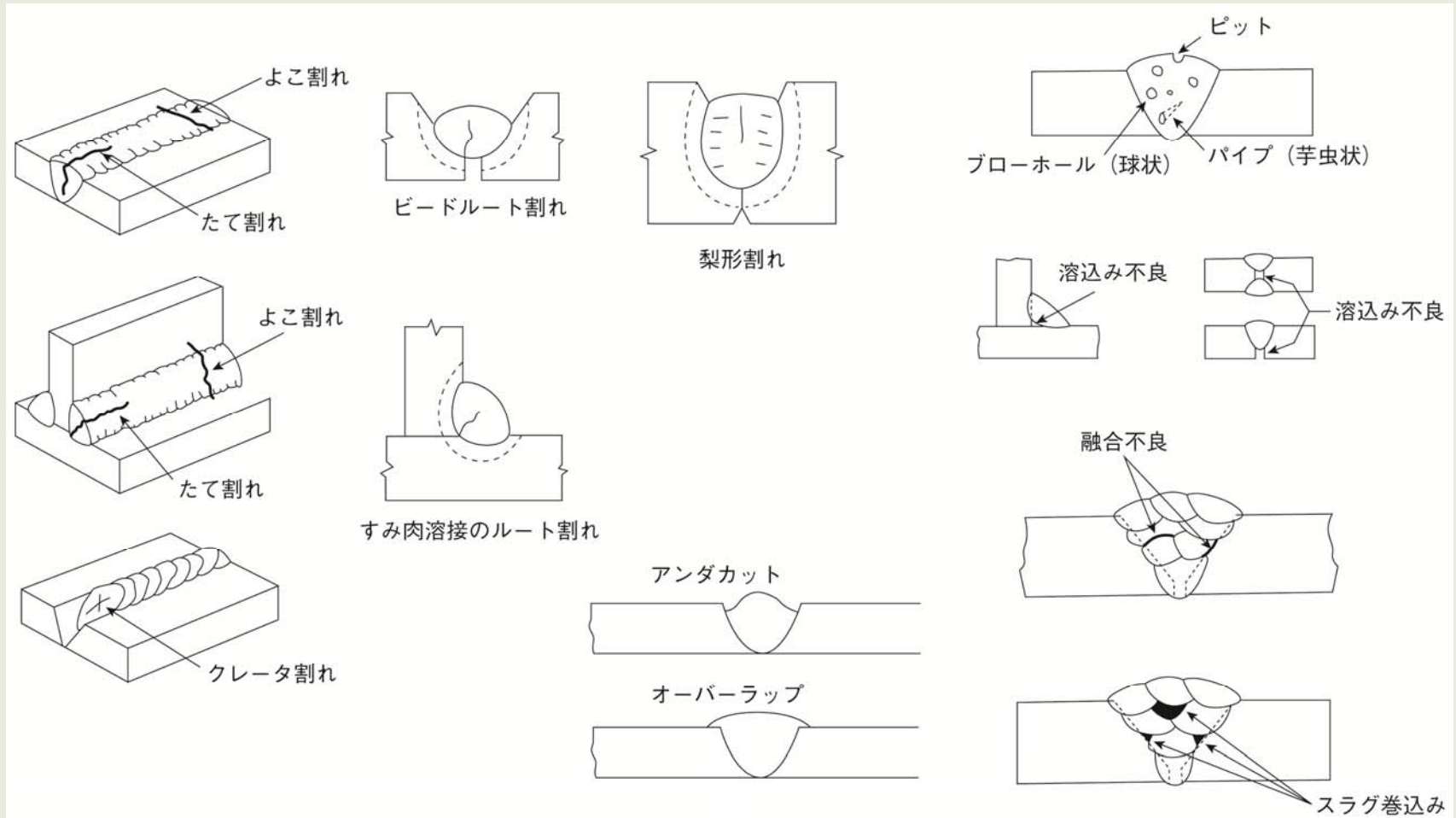
防止策

- ・ 予熱(例: 200℃)
- ・ 後熱(例: 750℃)
- ・ 低水素系溶接棒の使用
- ・ 溶接棒、フラックスの湿度管理

オーステナイト系ステンレスで
は発生しない

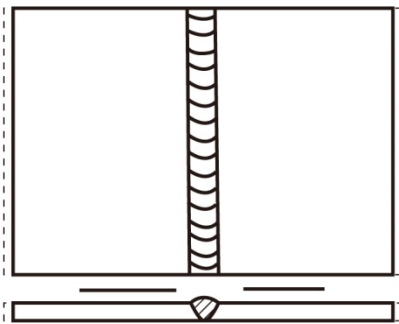
溶接部の欠陥 ④

その他の表面・内部欠陥

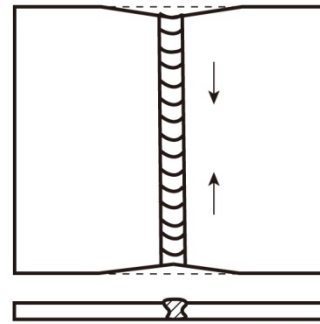


溶接部の欠陥 ⑤

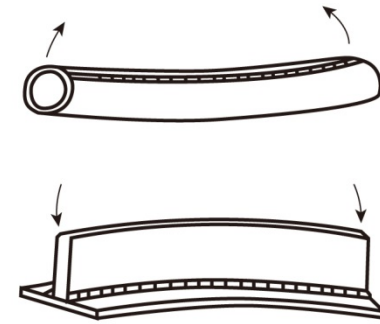
溶接部の変形



(a) 横収縮



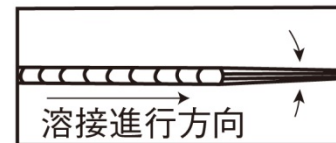
(b) 縦収縮



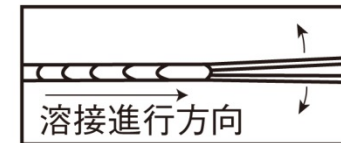
(c) 縦曲がり変形



(d) 角変形
(横曲がり変形)



(e) (面内の) 回転変形



(f) 座屈形式の変形

ステンレス鋼溶接時の注意点

- ・ 母材に適した溶接方法と溶接材料の選択
- ・ 溶接条件の適正化
 - － 溶接姿勢・継手形状・開先形状・適切な拘束
 - － 電流・電圧・速度・入熱・適切なシールド
 - － 予熱・後熱
- ・ 施工管理
 - － 施工環境(温度・湿度・風)
 - － 溶接面の清浄性

ステンレス鋼出前講座資料 <付録>

ステンレスの物理的性質

- (1) 密度
- (2) 熱的性質 ; 熱膨張率、比熱、熱伝導率
- (3) 電気抵抗
- (4) 磁性
- (5) ヤング率

各種材料の物理的性質①

密度

材料	密度 g/cm ³	備考
銀	10.49	
銅	8.93	
ニッケル	8.9	
SUS304	7.93	炭素鋼より重い
炭素鋼	7.87	
SUS430	7.70	炭素鋼より軽い
クロム	7.19	
アルミニウム	2.70	

密度: 単位体積当りの質量

各種材料の物理的性質②

熱膨張係数

材料	線膨張係数 ($\times 10^{-6}$)	備考
アルミニウム	23	
銀	19	
クロム	17	
銅	16.7	
SUS304	16.4	炭素鋼より大きい
ニッケル	12.8	
鉄	11.7	
炭素鋼	11	
SUS430	10.4	炭素鋼よりやや小さい

線膨張係数: 温度1℃当りの長さの変化割合

各種材料の物理的性質③

比熱

材料	比熱 $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	備考
銀	0.28×10^3	
銅	0.38×10^3	
鉄	0.42×10^3	
ニッケル	0.46×10^3	
SUS430	0.46×10^3	鉄よりやや大きい
SUS304	0.50×10^3	//
クロム	0.75×10^3	
アルミニウム	0.88×10^3	

温まりや
すい



温まりに
くい

比熱: 温度を 1°C 上げるのに必要な熱量

各種材料の物理的性質④

熱伝導率

材料	熱伝導率 $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}\times 10^2$	備考
銀	4.12	
銅	3.71	
アルミニウム	1.95	
クロム	0.96	
ニッケル	0.84	
鉄	0.79	
炭素鋼	0.58	
SUS430	0.26	炭素鋼の約 1/2
SUS304	0.16	炭素鋼の約 1/4
ガラス	0.008	

熱を伝え
やすい



熱を伝え
にくい

各種材料の物理的性質⑤

電気抵抗

材料	電気比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	備考
ニクロム	108×10^{-6}	
SUS310S	78×10^{-6}	電気抵抗大
SUS304	72×10^{-6}	//
SUS430	60×10^{-6}	//
クロム	13×10^{-6}	
鉄	9.7×10^{-6}	
アルミニウム	2.7×10^{-6}	
銅	1.7×10^{-6}	
銀	1.6×10^{-6}	

$$\text{電気抵抗} = \text{電気比抵抗} \times \text{長さ} / \text{断面積}$$

各種材料の物理的性質⑥

磁性

材料	焼鈍状態	冷間加工状態
鉄(Fe)	磁性あり	磁性あり
ニッケル(Ni)	磁性あり	磁性あり
SUS430	磁性あり	磁性あり
SUS301	非磁性	磁性あり(大)
SUS304	非磁性	磁性あり(小)
SUS310S	非磁性	非磁性
アルミニウム(Al)	非磁性	非磁性
チタン(Ti)	非磁性	非磁性

各種材料の物理的性質⑦

ヤング率(縦弾性係数)

材料	ヤング率 N/mm ²	備考
炭素鋼	200,900 ~215,600	
SUS430	199,920	炭素鋼より小さい
SUS304	193,060	//
銅	129,360	
銀	82,712	
アルミニウム	70,266	
木材	13,034	

弾性変形
しにくい



弾性変形
しやすい

$$\text{応力} = \text{ヤング率} \times \text{弾性歪}$$

ステンレスの物理的性質と溶接

- ・ 熱膨張 ステンレス > 炭素鋼
- ・ 熱伝導 ステンレス < 炭素鋼



ステンレスは溶接熱が局部集中



溶接による歪・変形が発生しやすい