

# HASTELLOY® C-4 合金

## 主な特徴

HAZ (熱影響領域)の鋭敏化に対して極めて高い耐性を持った万能 Ni-Cr-Mo 合金

HASTELLOY® C-4 合金 (UNS N06455) は、多くの腐食性化学物質、特に塩酸、硫酸、および塩化物に対して耐性があることで良く知られており、広く使用されているニッケル-クロム-モリブデン材料の中でも(マイクロ組織的に)最も安定しています。この安定性は、合金が鋭敏化、すなわち溶接熱影響領域(HAZ)の粒界における有害な第2相析出物の核形成および成長、を恐れることなく溶接できることを意味しています。

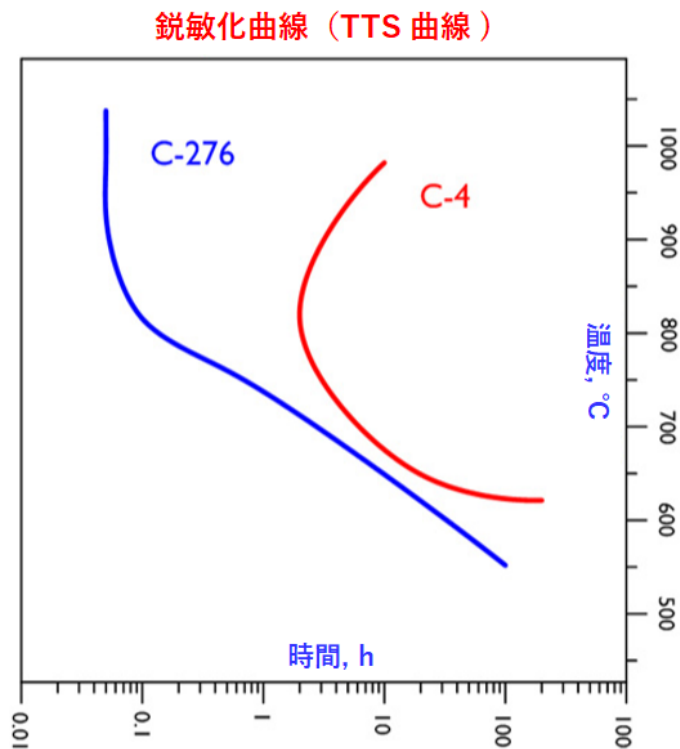
他のニッケル合金と同様に、この合金には延性があり、容易に成形および溶接することができ、塩化物含有溶液中において(オーステナイト系ステンレス鋼に起こりやすい劣化形態である)応力腐食割れに対して並外れた耐性を有しています。この合金はクロムおよびモリブデンの含有量が高いため、酸化性および非酸化性の両方の酸に耐えることができ、塩化物およびその他のハロゲン化物の存在下での孔食および隙間腐食に対して耐性があります。

## 標準組成

### 重量 %

ニッケル:Ni	65 Balance
コバルト:Co	2 max.
クロム:Cr	16
モリブデン:Mo	16
鉄:Fe	3 max.
マンガン:Mn	1 max.
チタン:Ti	0.7 max.
ケイ素:Si	0.08 max.
炭素:C	0.01 max.
銅:Cu	0.5 max.

## 熱安定性 (鋭敏化曲線: TTS 曲線)

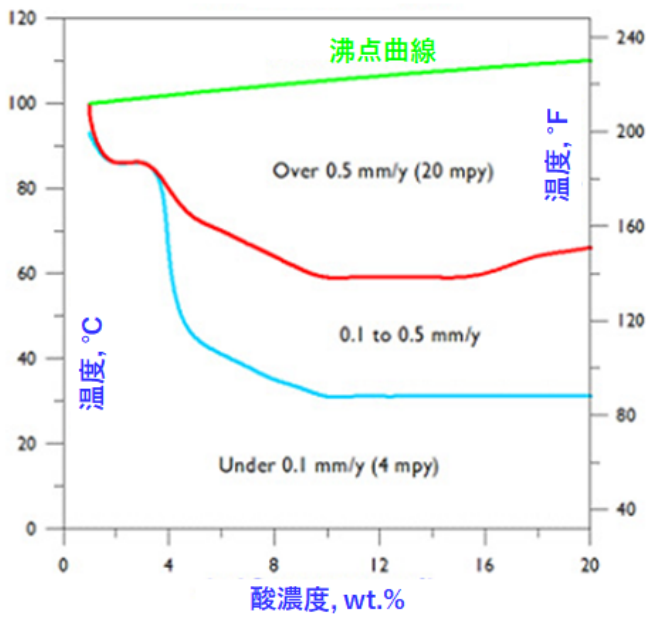


上の図は、C-4およびC-276合金の粒界析出反応速度の大きな違いを示しています。図は、粒界析出が選択的粒界腐食の有意な性質、すなわち、ASTM G 28A 試験溶液(沸騰 50%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 42g/l  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ )中で深さ 0.05 mm の腐食、を生じるには、C-4合金は最もクリティカルな温度(825°C)で2時間保持されなければならないことを示しています。一方、C-276合金は、およそ925°C~1050°Cの範囲の温度でわずか3分後に、この沸騰溶液中で著しい粒界腐食を起こすようになります。これは、溶接中の熱入力がC-276合金の場合には重要になりますが、C-4合金の場合にはほとんど影響しないことを意味しています。

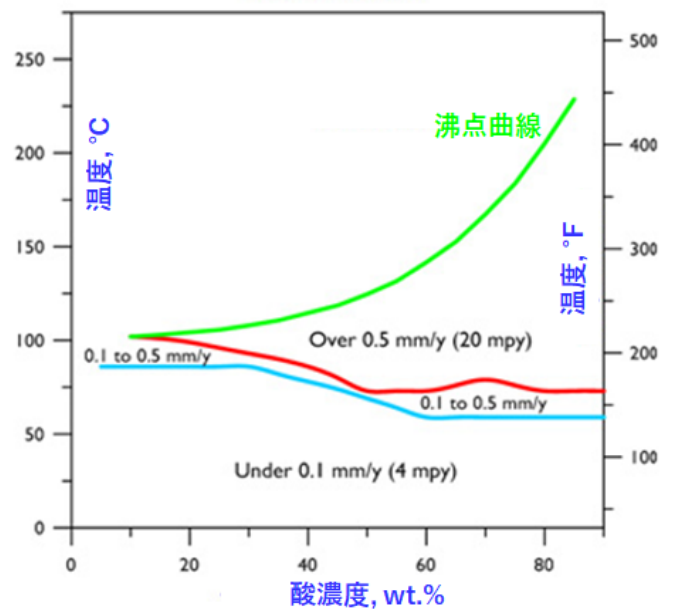
# 等腐食線図

ここに示す各々の等腐食図は、異なる酸濃度および温度で得られた多数の腐食速度値を用いて作成されたものです。青の線は、試薬グレードの酸を用いた実験室試験に基づいて、予想腐食速度が 0.1 mm/y (4 mil/年) となる酸濃度と温度の組み合わせを示しています。この線よりも下では、腐食速度は 0.1 mm/y 未満になると予想されます。同様に、赤の線は、予想腐食速度が 0.5 mm/y (20 mil/年) となる酸濃度と温度の組み合わせを示しています。線よりも上では、予想腐食速度は 0.5 mm/y を超えます。青と赤の線の間では、腐食速度は 0.1~0.5 mm/y になると予想されます。

**塩酸中での  
C-4 合金の等腐食線図**



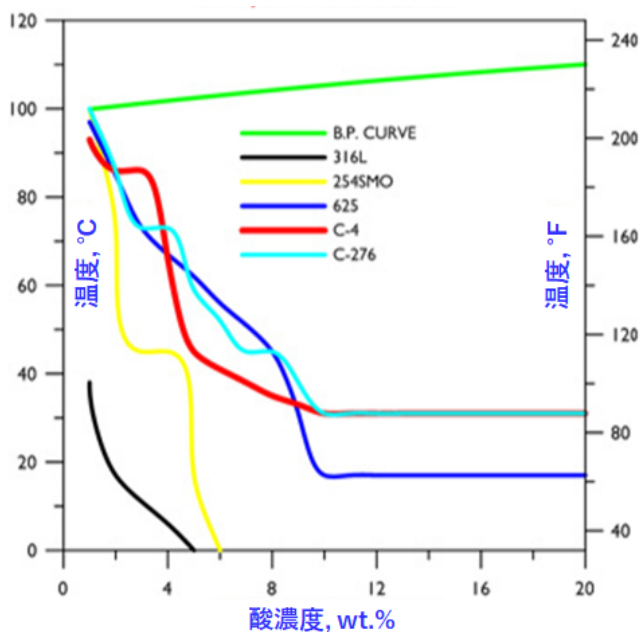
**硫酸中での  
C-4 合金の等腐食線図**



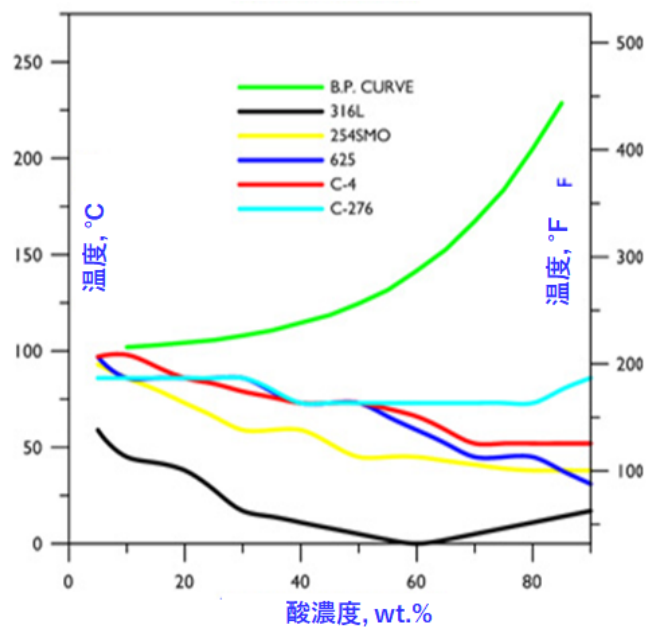
## 0.1 mm/y 腐食速度線の比較

HASTELLOY® C-4 合金の性能を他の材料の性能と比較するには、0.1 mm/y の腐食速度線をプロットすると便利です。以下のグラフにおいて、C-4 合金の線は、塩酸および硫酸中における2つの一般的なオーステナイト系ステンレス鋼(316L および254SMO)、低モリブデンニッケル合金(625合金)、およびC-276 合金の線と比較されています。約5%以上の塩酸濃度では、C-4 合金はステンレス鋼に比べて飛躍的な改善をもたらし、より高い濃度の塩酸および硫酸中においては、625合金よりも高い耐食性を示します。塩酸は濃度上限の20%で共沸混合物になり、これ以上の濃度では高温腐食試験の信頼性が低くなります。

塩酸中の  
0.1mm/y 腐食速度線の比較



硫酸中の  
0.1mm/y 腐食速度線の比較



# 選択腐食データ

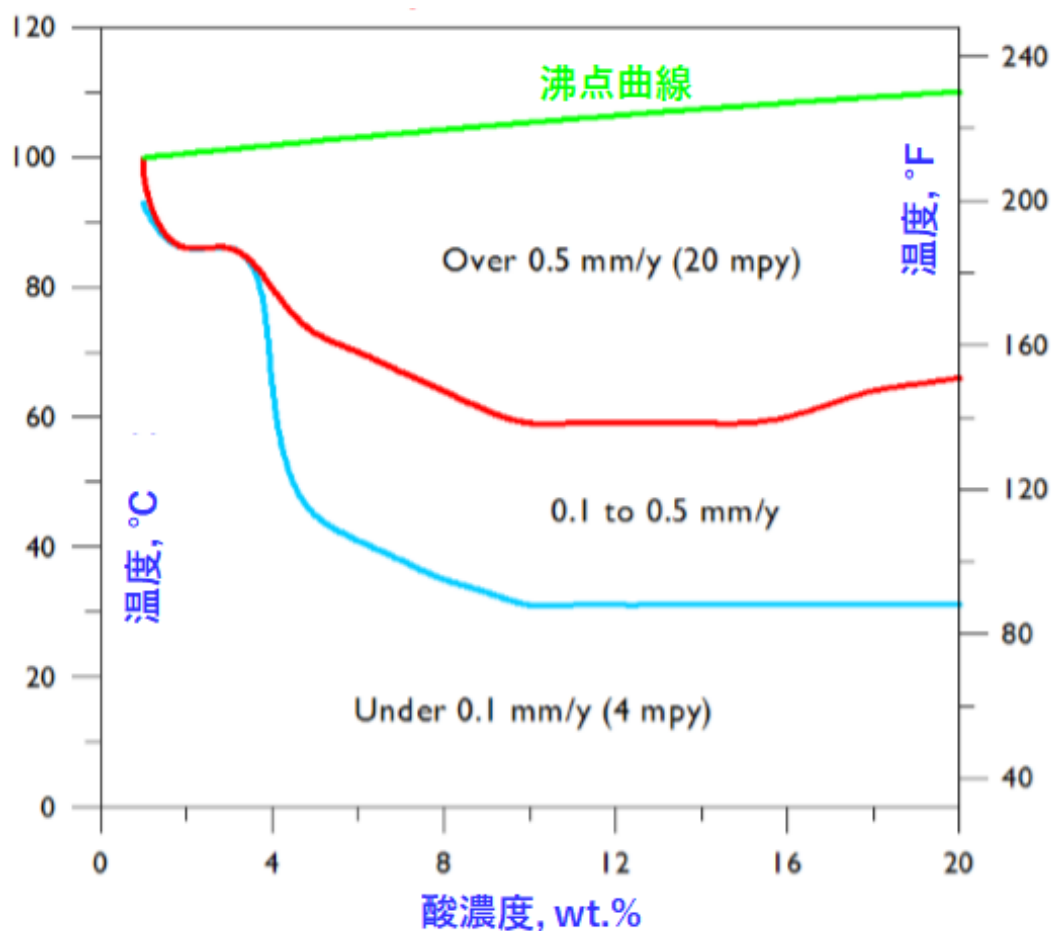
## 塩酸

濃度 Wt. %	50°F	75°F	100°F	125°F	150°F	175°F	200°F	225°F	沸騰
	10°C	24°C	38°C	52°C	66°C	79°C	93°C	107°C	
1	-	-	<0.01	-	<0.01	<0.01	0.1	-	0.48
1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	0.01	0.03	-	-	1.99
2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	0.02	0.04	-	-	-
3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	<0.01	0.27	0.42	0.98	-	-	4.37
7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	0.06	0.19	0.3	0.57	1.11	-	-	6.91
15	-	0.06	0.18	0.39	0.57	1.33	2.33	-	6.35
20	-	0.05	0.14	0.27	0.55	1.12	2.19	-	5.72

すべての腐食速度はミリメートル/年 (mm/y) で示しています; mil (ミル: 1000分の1インチ) / 年に変換するには、0.0254 で除算します。データは、腐食試験所の Job 2-74 および 73-96 からのものです。

すべての試験は、実験室条件下で試薬グレードの酸を用いて行われました; 工業的利用に先立って、フィールドテストを実施することを推奨します。

### 塩酸中での C-4 合金の等腐食線図



## 選択腐食データ(続き)

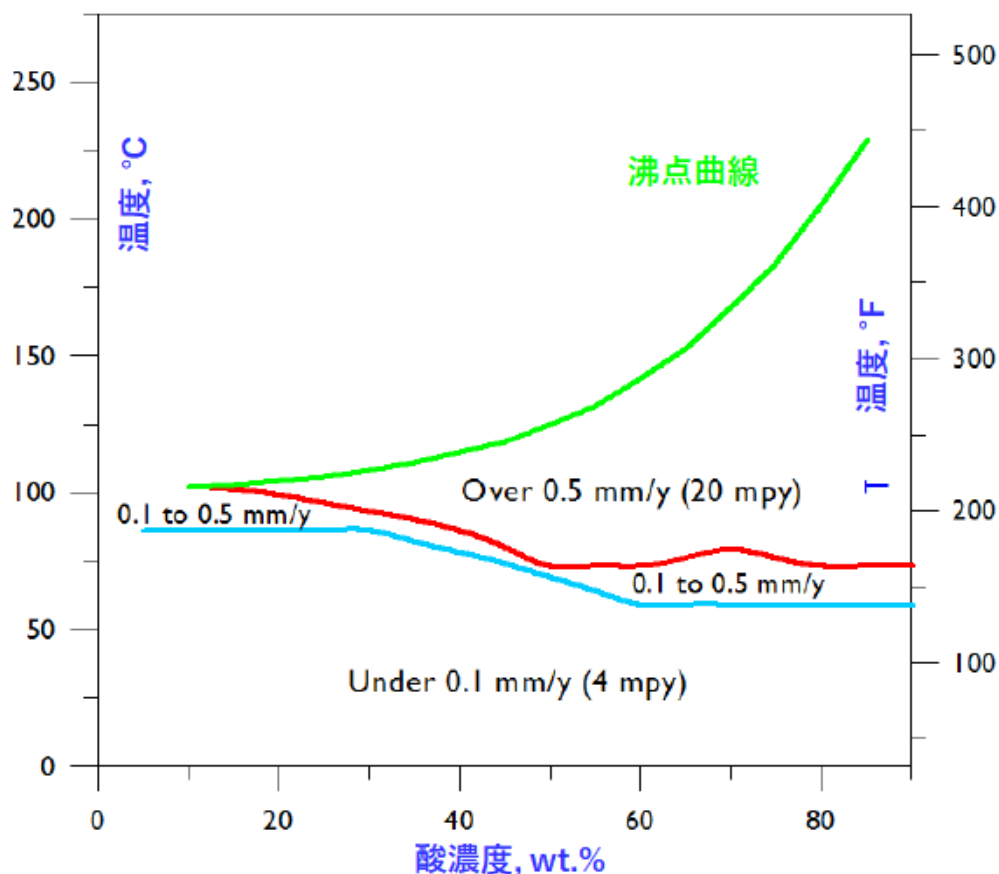
### 硫酸

濃度 Wt.%	75°F	100°F	125°F	150°F	175°F	200°F	225°F	250°F	275°F	300°F	350°F	沸騰
	24°C	38°C	52°C	66°C	79°C	93°C	107°C	121°C	135°C	149°C	177°C	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	0.01	0.02	-	-	-	-	-	-	0.41
10	-	<0.01	-	0.01	0.03	0.19	-	-	-	-	-	0.43
20	-	-	-	0.01	0.05	0.38	-	-	-	-	-	0.89
30	-	<0.01	-	0.02	0.07	0.54	-	-	-	-	-	1.85
40	-	-	<0.01	0.03	0.38	0.87	-	-	-	-	-	3.63
50	-	0.02	0.01	0.03	0.63	0.99	-	-	-	-	-	9.96
60	-	-	0.03	0.15	0.67	1.24	-	-	-	-	-	-
70	-	0.04	0.06	0.14	0.46	0.94	-	-	-	-	-	-
80	-	-	0.04	0.13	1.1	2.47	-	-	-	-	-	-
90	-	0.04	0.05	0.19	0.71	2.63	-	-	-	-	-	-
96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

すべての腐食速度はミリメートル/年 (mm/y) で示しています; mil(ミル: 1000分の1インチ)/年に変換するには、0.0254で除算します。データは、腐食試験所の Job 19-73、24-94 および 68-96 からのものです。

すべての試験は、実験室条件下で試薬グレードの酸を用いて行われました; 工業的利用に先立って、フィールドテストを実施することを推奨します。

### 硫酸中での C-4合金の等腐食線図



## 選択腐食データ (試薬グレード溶液、mm/y)

化学物質	濃度	100°F	125°F	150°F	175°F	200°F	沸騰
	wt. %	38°C	52°C	66°C	79°C	93°C	
臭化水素酸	2.5	-	-	<0.01	-	<0.01	0.08
	5	-	-	<0.01	0.01	0.76	-
	7.5	-	-	0.03	0.18	0.76	-
	10	-	<0.01	0.37	0.53	-	-
	15	<0.01	0.24	0.37	0.56	-	-
	20	0.15	0.24	0.35	0.51	-	-
	30	0.1	0.16	0.23	0.41	0.67	-
	40	-	0.11	0.17	0.28	0.44	-
塩酸	1	<0.01	-	<0.01	<0.01	0.1	0.48
	2	-	-	0.01	0.03	-	1.99
	3	-	-	0.02	0.04	-	-
	5	<0.01	0.27	0.42	0.98	-	-
	10	0.19	0.3	0.57	1.11	-	-
	15	0.18	0.39	0.57	1.33	-	-
	20	0.14	0.27	0.55	1.12	-	-
フッ化水素酸*	5	-	-	-	0.59	-	-
硫酸	10	<0.01	-	0.01	0.03	0.19	0.43
	20	-	-	0.01	0.05	0.38	0.89
	30	<0.01	-	0.02	0.07	0.54	1.85
	40	-	<0.01	0.03	0.38	0.87	-
	50	0.02	0.01	0.03	0.63	0.99	-
	60	-	0.03	0.15	0.67	1.24	-
	70	0.04	0.06	0.14	0.46	0.94	-
	80	-	0.04	0.13	1.1	2.47	-
	90	0.04	0.05	0.19	0.71	2.63	-

\*フッ化水素酸は、ニッケル合金の内部腐食も誘発します；ここに記載した値は、外部腐食のみの値です。

## 耐孔食および隙間腐食性

HASTELLOY® C-4 合金は、オーステナイト系ステンレス鋼に特に発生しやすい腐食形態である塩化物誘起孔食および隙間腐食に対して高い耐性を示します。孔食および隙間腐食に対する合金の耐性を評価するには、ASTM規格 G48で定義されている手順に従って、6 wt%塩化第二鉄酸性溶液中の臨界孔食温度および臨界隙間腐食温度を測定することが通例です。測定された温度は、この溶液中で72時間以内に孔食および隙間腐食が発生する最低温度です。比較のために、316L、254SMO、625 および C-4 合金の値を以下に示します。

合金	6% FeCl <sub>3</sub> 酸性溶液中の 臨界孔食温度		6% FeCl <sub>3</sub> 酸性溶液中の 臨界隙間腐食温度	
	°F	°C	°F	°C
-				
<b>316L</b>	59	15	32	0
<b>254SMO</b>	140	60	86	30
<b>625</b>	212	100	104	40
<b>C-4</b>	<b>212</b>	<b>100</b>	<b>122</b>	<b>50</b>

他の塩化物含有環境、とりわけ Green Death 溶液(11.5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 1.2% HCl + 1% FeCl<sub>3</sub> + 1% CuCl<sub>2</sub>) および Yellow Death 溶液(4% NaCl + 0.1% Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + 0.021mol HCl)が、(24時間保持試験によって)様々な合金の耐孔食耐性を比較するために用いられてきました。Green Death 溶液中では、C-4 合金で孔食が観察された最低温度は85°Cでした。Yellow Death 溶液では、C-4 合金は120°C(C-4 合金が曝された最高温度)まで孔食を生じませんでした。

## 耐応力腐食割れ性

ニッケル合金の主な特性の1つは、耐塩化物誘発応力腐食割れ性です。この非常に破壊的な形態の腐食に対する材料の耐性を評価するための一般的な方法は、典型的には応力をかけたU字型曲げサンプルを沸騰45%塩化マグネシウムに浸けることです(ASTM規格 G36)。以下の結果から明らかのように、2つのニッケル合金、C-4 および 625 は、比較対象のオーステナイト系ステンレス鋼よりも、この形態の腐食に対してはるかに耐性があります。試験は1,008時間(6週間)後に停止しました。

合金	割れが発生するまでの時間
<b>316L</b>	2 h
<b>254SMO</b>	24 h
<b>625</b>	1,008 hで割れなし
<b>C-4</b>	<b>1,008 hで割れなし</b>



## 物理的特性

物理的特性	英国单位		メートル単位	
密度	RT	0.312 lb/in <sup>3</sup>	RT	8.64 g/cm <sup>3</sup>
電気抵抗	RT	49.1 μohm.in	RT	1.25 μohm.m
	200°F	49.1 μohm.in	100°C	1.25 μohm.m
	400°F	49.6 μohm.in	200°C	1.26 μohm.m
	600°F	50.0 μohm.in	300°C	1.27 μohm.m
	800°F	50.5 μohm.in	400°C	1.28 μohm.m
	1000°F	51.3 μohm.in	500°C	1.29 μohm.m
	-	-	600°C	1.32 μohm.m
熱伝導率	RT	70 Btu.in/h.ft <sup>2</sup> .°F	RT	10.1 W/m.°C
	200°F	79 Btu.in/h.ft <sup>2</sup> .°F	100°C	11.4 W/m.°C
	400°F	92 Btu.in/h.ft <sup>2</sup> .°F	200°C	13.2 W/m.°C
	600°F	105 Btu.in/h.ft <sup>2</sup> .°F	300°C	15.0 W/m.°C
	800°F	119 Btu.in/h.ft <sup>2</sup> .°F	400°C	16.7 W/m.°C
	1000°F	133 Btu.in/h.ft <sup>2</sup> .°F	500°C	18.4 W/m.°C
	-	-	600°C	20.5 W/m.°C
平均熱膨張係数	68-200°F	6.0 μin/in.°F	24-100°C	10.9 μm/m.°C
	68-400°F	6.6 μin/in.°F	24-200°C	11.8 μm/m.°C
	68-600°F	7.0 μin/in.°F	24-300°C	12.5 μm/m.°C
	68-800°F	7.2 μin/in.°F	24-400°C	12.9 μm/m.°C
	68-1000°F	7.4 μin/in.°F	24-500°C	13.2 μm/m.°C
	68-1200°F	7.5 μin/in.°F	24-600°C	13.4 μm/m.°C
比熱	32°F	0.097 Btu/lb.°F	0°C	406 J/kg.°C
	200°F	0.102 Btu/lb.°F	100°C	427 J/kg.°C
	400°F	0.107 Btu/lb.°F	200°C	448 J/kg.°C
	600°F	0.111 Btu/lb.°F	300°C	465 J/kg.°C
	800°F	0.115 Btu/lb.°F	400°C	477 J/kg.°C
	1000°F	0.118 Btu/lb.°F	500°C	490 J/kg.°C
	-	-	600°C	502 J/kg.°C
動弾性係数	RT	30.8 x 10 <sup>6</sup> psi	RT	212 GPa
	200°F	30.2 x 10 <sup>6</sup> psi	100°C	208 GPa
	400°F	29.3 x 10 <sup>6</sup> psi	200°C	202 GPa
	600°F	28.3 x 10 <sup>6</sup> psi	300°C	196 GPa
	800°F	27.3 x 10 <sup>6</sup> psi	400°C	190 GPa
	1000°F	26.2 x 10 <sup>6</sup> psi	500°C	183 GPa
	1200°F	25.0 x 10 <sup>6</sup> psi	600°C	176 GPa

RT= 室温

## 衝撃強さ

試験温度		衝撃強さ	
°F	°C	ft-lbf	J
RT	RT	281	381
-320	-196	215	292

限られたデータ

衝撃強さは、ミルアニールしたプレート(厚板)を機械加工して製作したシャルピー V-ノッチ試験片を用いて取得しました。

## 引張り強さおよび伸び

形態	試験温度		板厚		0.2% 耐力		極限引張強さ		伸び
	°F	°C	in	mm	ksi	MPa	ksi	MPa	
薄板	RT	RT	0.065	1.7	60.3	416	111.4	768	52
薄板	400	204	0.065	1.7	58.5	403	102.4	706	49
薄板	600	316	0.065	1.7	53.8	371	97.9	675	52
薄板	800	427	0.065	1.7	46.4	320	95.2	656	64
薄板	RT	RT	0.125	3.2	61	421	116.2	801	54
薄板	400	204	0.125	3.2	46.4	320	98.3	678	54
薄板	600	316	0.125	3.2	43.9	303	97.5	672	59
薄板	800	427	0.125	3.2	43.9	303	93.4	644	62
薄板	1000	538	0.125	3.2	43.4	299	93.5	645	55
薄板	RT	RT	0.156	4	53	365	113.5	783	55
薄板	400	204	0.156	4	39.9	275	99.9	689	55
薄板	600	316	0.156	4	36.1	249	95.3	657	61
薄板	800	427	0.156	4	36.2	250	95.1	656	68
厚板	RT	RT	0.25	6.4	48.8	336	111.3	767	58
厚板	400	204	0.25	6.4	42.8	295	104	717	54
厚板	600	316	0.25	6.4	40.8	281	103.3	712	55
厚板	800	427	0.25	6.4	37	255	99	683	60
厚板	RT	RT	0.375	9.5	51.6	356	114.7	791	59
厚板	400	204	0.375	9.5	43.6	301	105.4	727	56
厚板	600	316	0.375	9.5	39.1	270	102.1	704	59
厚板	800	427	0.375	9.5	37.4	258	96.3	657	62
厚板	1000	538	0.375	9.5	33	228	93.3	643	52
厚板	RT	RT	0.5	12.7	48.6	335	116.8	805	63
厚板	400	204	0.5	12.7	38.3	264	105.2	725	61
厚板	600	316	0.5	12.7	35.8	247	102.5	707	65
厚板	800	427	0.5	12.7	34.2	236	99.8	688	66
厚板	1000	538	0.5	12.7	29.8	205	92.1	635	71

RT= 室温

## 硬度

形態	硬さ, HRBW	典型的な ASTM 結晶粒度
薄板	92	6 - 7.5
厚板	90	4 - 6

全ての試料は、固溶化処理した状態で試験。

HRBW = ロックウェル硬さ “B”, タングステンカーバイドボール圧子。

## 溶接および加工

HASTELLOY® C-4 合金は、ガスマタルアーク溶接 (GMA/MIG)、ガスタングステンアーク溶接 (GTA/TIG)、およびシールドメタルアーク溶接 (SMA/Stick) に非常に適しています。これらの溶接に使用する母材と同一組成の溶加金属 (すなわち、ソリッドワイヤおよび被覆アーク溶接棒) が入手可能で、溶接のガイドラインが“溶接および加工”のパンフレットに記載されています。

HASTELLOY® C-4 合金の鍛造製品は、指定のない限り、ミルアニール (MA) した状態で供給されます。この溶体化処理手順は、合金の耐食性および延性を最適化するように設定されています。熱間成形作業した後はすべて、最適な特性を回復させるために、材料を再アニールする必要があります。また、この合金は、7%以上の外面の繊維伸びを生じる冷間成形作業をした後にも再アニールしなければなりません。HASTELLOY® C-4 合金のアニリング温度は1066°C (1950°F) で、水冷を推奨します (10mm (0.375インチ) より薄い構造の場合は急速空冷が可能です)。アニリング温度での保持時間は、構造の厚さに依存しますが、10~30分を推奨します (より厚い構造の場合は、30分一杯必要です)。HASTELLOY® C-4 合金の熱処理に関するもっと詳細な情報は、“溶接および加工”のパンフレットに記載されています。

HASTELLOY® C-4 合金は熱間鍛造、熱間圧延、熱間据え込み鍛造、熱間押し出し、および熱間成形することができます。しかしながら、オーステナイト系ステンレス鋼に比べてひずみやひずみ速度に対してより敏感であり、熱間加工温度範囲が非常に狭くなっています。たとえば、熱間鍛造の推奨開始温度は1177°C (2150°F) で、推奨仕上げ温度は954°C (1750°F) です。“溶接および加工”のパンフレットに記載しているように、適度な圧下率と頻繁な再加熱が最良の結果をもたらします。また、このパンフレットでは、冷間成形、スピニング加工、ドロップハンマ、打ち抜き、およびせん断のガイドラインも提供しています。この合金は、ほとんどのオーステナイト系ステンレス鋼に比べて剛性が高く、冷間成形にはより多くのエネルギーが必要です。また、HASTELLOY® C-4 合金は、ほとんどのオーステナイト系ステンレス鋼よりも容易に加工硬化し、中間アニールを伴った数段階の冷間加工が必要になる場合があります。

冷間加工は、通常、HASTELLOY® C-4 合金の耐全面腐食性、および耐塩化物誘発孔食および隙間腐食性には影響しませんが、耐力腐食割れ性に影響する可能性があります。したがって、最適な腐食性能のためには、(7%以上の外面の繊維伸びをした) 冷間加工部品は、再アニールすることが重要です。

## 適合規格および基準

### 規格

HASTELLOY® C-4 合金 (N06455, W86445)	
薄板、厚板および帯板	SB 575/B 575 P= 43
ビレット、ロッドおよび棒	SB 574/B 574 P= 43
被覆アーク溶接棒	SFA 5.11/A 5.11 (ENiCrMo-7) DIN 2.4612 (EL-NiMo15Cr15Ti) F= 43
裸溶接棒およびワイヤ	SFA 5.14/ A 5.14 (ERNiCrMo-7) DIN 2.4611 (SG-NiMo16Cr16Ti) F= 43
継ぎ目なしパイプ およびチューブ	SB 622/B 622 P= 43
溶接パイプおよび チューブ	SB 619/B 619 SB 626/B 626 P= 43
継手類	SB 366/B 366 P= 43
鍛造材	-
DIN	17744 No. 2.4610 NiMo16Cr16Ti
TÜV	Werkstoffblatt 424 Kennblatt 2666 Kennblatt 2667 Kennblatt 2665
その他	NACE MR0175 ISO 15156

## 基準

HASTELLOY® C-4 合金 (N06455, W86445)				
<b>ASME</b>	<b>Section I</b>	-		
	<b>Section III</b>	<b>Class 1</b>	-	
		<b>Class 2</b>	-	
		<b>Class 3</b>	-	
	<b>Section VIII</b>	<b>Div. 1</b>	PSBfWs-800°F (427°C) Blt-800°F (427°C)	
		<b>Div. 2</b>	PSBWs-800°F (427°C) Blt-800°F (427°C)	
	<b>Section XII</b>	PSBfWs-650°F (343°C) Blt-800°F (427°C)		
	<b>B16.5</b>	PFf-800°F (427°C) Blt		
	<b>B16.34</b>	PBFs-800°F (427°C) Blt		
	<b>B31.1</b>	-		
<b>B31.3</b>	PSBfWs 800°F (427°C)			
<b>VdTÜV (doc #)</b>		PSBFs- 752°F (400°C), #424		

<sup>1</sup>承認された材料形態: 厚板、薄板、棒、継手類、溶接パイプ/チューブ、継ぎ目なしパイプ/チューブ、ボルト類

<sup>2</sup>承認された材料形態: 厚板、薄板、棒、溶接パイプ/チューブ、継ぎ目なしパイプ/チューブ

<sup>3</sup>承認された材料形態: ボルト類

<sup>4</sup>承認された材料形態: 厚板、棒、鍛造材、継ぎ目なしパイプ/チューブ、ボルト類

<sup>5</sup>承認された材料形態: 厚板、薄板、棒、継手類、溶接パイプ/チューブ、継ぎ目なしパイプ/チューブ

<sup>6</sup>承認された材料形態: 厚板、薄板、棒、鍛造材、継ぎ目なしパイプ/チューブ

### 免責事項:

Haynes International, Inc. は、本パンフレットに記載されているデータの精度・正確性を保証するために妥当な努力を払っておりますが、データの精度、正確性、あるいは信頼性について、いかなる表明も保証もいたしません。すべてのデータは、一般的な情報のみであり、設計上のアドバイスを提供するものではありません。ここに開示されている合金特性は、主に Haynes International, Inc. によって行われた作業に基づいており、場合によっては公開文献の情報によって補足されているため、そのような試験の結果のみを示すものであり、保証最大値または最小値と考えてはなりません。実際の使用条件で特定の合金を試験して特定の目的に対する適合性を判断するのはユーザーの責任です。

特定の製品に含まれる特定の元素濃度とその潜在的な健康への影響については、Haynes International, Inc. が提供する安全データシートを参照してください。特記のない限り、すべての商標は Haynes International, Inc. が所有しています。