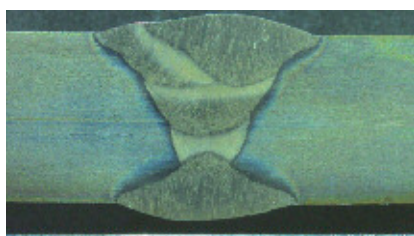
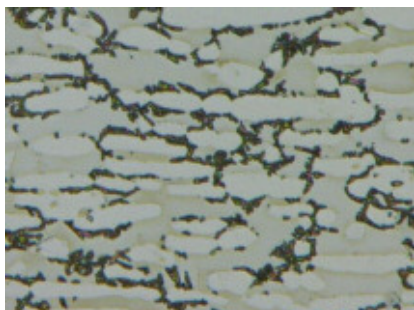
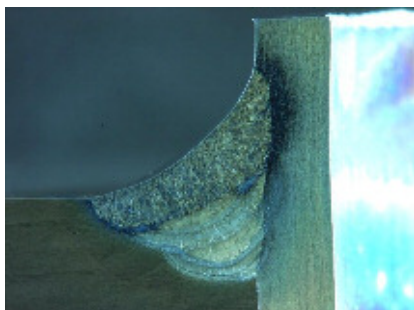


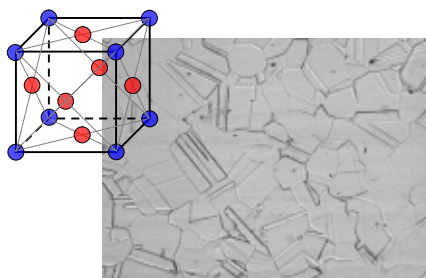
二相ステンレス鋼技術資料

材料の特性と溶接技術



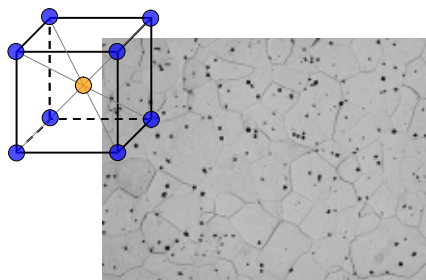
二相ステンレス鋼とは

二相ステンレス鋼は、オーステナイト相とフェライト相という 2 つの相を同程度含む材料で、オーステナイト系ステンレス鋼とフェライト系ステンレス鋼のそれぞれの長所を併せ持つ優れた材料です。二相ステンレス鋼は化学機器で使用されるオーステナイト系ステンレス鋼と比べて低ニッケルのため、高い性能のわりに材料コストが低いという利点もあります。



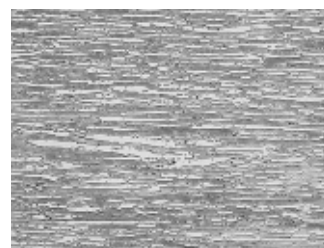
オーステナイト系(SUS304, 316 など)

- ☑ 溶接性に優れる
- ☑ 加工性がよい
- ☑ 溶接部のじん性がよい



フェライト系(SUS430, 444 など)

- ☑ 応力腐食割れに強い
- ☑ 材料コストが安い



二相系(SUS329J4L など)

オーステナイト系とフェライト系の
長所をいっしょに取り出した材料

オーステナイト系ステンレス鋼と二相ステンレス鋼の組成の比較

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Fe	Ni	Cr	Mo	N	wt%
SUS304 (オーステナイト系)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	Bal.	8.0~ 10.5	18~20	—	—	
SUS329J4L (二相系)	≤0.03	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	Bal.	5.5~ 7.5	24~26	2.5~ 3.5	0.08~ 0.30	

オーステナイト系ステンレス鋼と二相ステンレス鋼の機械的性質の比較

鋼種	0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
SUS304	規格値	≥205	≥40
	代表値	284	670
SUS329J4L	規格値	≥450	≥18
	代表値	589	782

二相ステンレス鋼は結晶粒が小さいためオーステナイト系と比べて強度が大きい

二相ステンレス鋼の種類と用途

◆ 二相ステンレス鋼の種類

二相ステンレス鋼には多くの種類がありますが、国内で JIS 鋼種として登録されているのは 6 種類です。このうち 3 種類は、2015 年 9 月に 24 年ぶりに新たに登録されたものです。これは最近の二相ステンレス鋼の需給増加を反映したものと考えられ、このような動きは今後のさらなる利用拡大を促すものとなります。

二相ステンレス鋼の JIS 鋼種と概略組成

JIS 登録年	鋼種名	Cr	Ni	Mo	N	その他	備考
1972 年	SUS329J1	25	4.5	2	-	-	鋳物用途
1991 年	SUS329J3L	22	5.5	3	0.14	-	海外で主流
	SUS329J4L	25	6.5	3	0.19	-	国内で主流
2015 年	SUS821L	21	2	≤0.6	0.18	1Cu	特許鋼種(リーン二相 ^{※1})
	SUS323L	23	4.5	2	0.1	0.4Cu	UNS S32304(リーン二相)
	SUS327L1	25	7	4	0.28	-	UNS S32750(スーパー二相 ^{※2})

※1 合金成分を低減した経済性の高い省合金型材料

※2 高合金化によって強度や耐食性を強化した材料

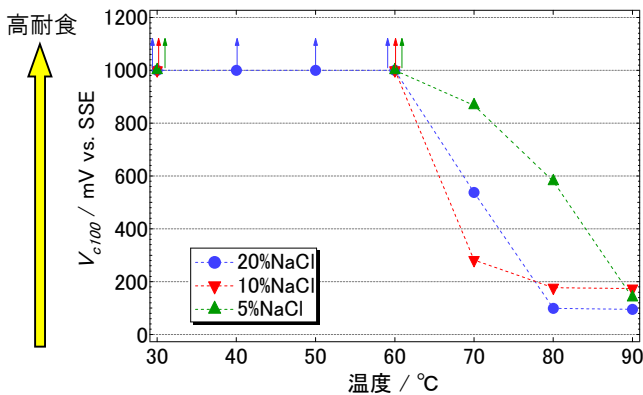
◆ SUS329J4L の耐食用材料としての位置づけと耐食的特徴

国内で主流の SUS329J4L の耐食性は、汎用材料(SUS304, 316)と、高耐食材料(スーパーオーステナイト系ステンレス鋼, 非鉄合金)の中間に位置します。この中間グレードの材料は、市場性に乏しいものが多いため、中間グレードの材料が必要な場合でも、高価な高耐食材料しか選べないことが多くあります。SUS329J4L は中間材料としては入手が容易な材料であるため、その特性を上手に利用すれば、設備の低コスト化を図ることが可能となります。

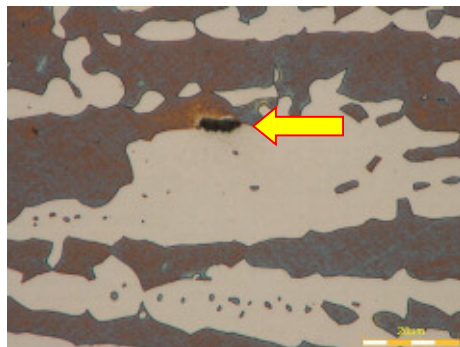


一方で SUS329J4L のような中間的な材料は、腐食環境に対する適用範囲がわかりにくい側面があります。二相ステンレス鋼は高クロム・低ニッケルの材料であるため、不働態皮膜は強固であるものの、耐食範囲を外れて皮膜が破壊されると激しい腐食を起こします。例えば、次のページの左下の図に示すように、NaCl 水溶液に対しては、60°Cを超えると急速に耐食性が低下してしまいます。また、二相ステンレス鋼は、フェライト相とオーステナイト相との間に合金組成の偏り

があるため、相境界の耐食性が低下しやすく腐食の起点となることが知られています(右下の写真)。このような腐食挙動は、耐食試験で得られるデータに大きなばらつきをもたらすことから、二相ステンレス鋼の選定や使用においては、耐食性における材料の特性を理解することが重要です。



SUS329J4L の NaCl 水溶液における孔食電位

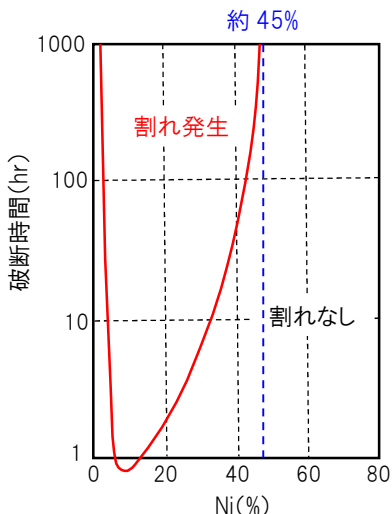


二相ステンレス鋼の相境界に発生した孔食

◆ 優れた耐応力腐食割れ性

オーステナイト系ステンレス鋼は、塩化物環境で応力腐食割れを起こしやすく、SUS304 や SUS316 はそのリスクが高いことで知られています。応力腐食割れは防食管理が難しいため、材料の高グレード化が主な防止策であることが実情です。完全に防止するには、左下の図のように合金中のニッケル量を 45%以上とする必要があるため、SUS304 から一気にニッケル基合金にまでグレードを上げるケースもあります。

二相ステンレス鋼は、組成の面から応力腐食割れには弱そうに思われますが、材料中のフェライト相の効果で、実際は応力腐食割れに非常に強く、50°C 付近から割れが発生する SUS304 や 316 と比べて、SUS329J4L では 200°C 以下でほとんど割れは発生しません(右下の表)。そのため、二相ステンレス鋼は耐応力腐食割れ用途の安価な材料として優れたパフォーマンスを発揮します。



沸騰 42%MgCl₂ 溶液における応力腐食割れとニッケル量の関係

ステンレス鋼の Cl⁻による応力腐食割れの発生温度(目安)^{*}

鋼種	応力腐食割れ発生温度
二相ステンレス鋼(22Cr 系)	> 150°C
二相ステンレス鋼(25Cr 系)	> 200°C
SUS304, 316	> 50°C

^{*}Cl⁻濃度 0.1~1%における耐応力腐食割れ性

H.R.Copson, Physical Metallurgy of Stress Corrosion Fracture, Interscience, N.Y., (1959), 247

二相ステンレス鋼の溶接性

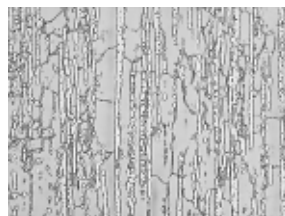
二相ステンレス鋼は、オーステナイト相とフェライト相が共存する材料であるため、冶金的に不安定な面があり、溶接や熱処理によって性能の低下をもたらす恐れがあります。二相ステンレス鋼の利用には、溶接部の特性などについても理解しておく必要があります。

◆ 二相ステンレス鋼の相比バランスとその影響

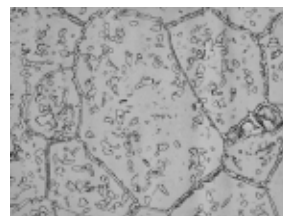
二相ステンレス鋼は、1100℃以上の温度になるとフェライト相の割合が増え始め、1400℃（凝固温度付近）では100%フェライト組織になります。つまり、溶接時の凝固直後の金属は100%フェライト組織となっており、そこからの冷却過程でオーステナイト組織が生成して二相の溶接金属組織を形成します。このように二相ステンレス鋼の金属組織の相比は、溶接後の冷却速度の影響を受けやすい特徴があります。溶接施工上は、薄板に対しては熱影響部、入熱の小さいティグ溶接では溶接金属が、それぞれフェライト過剰組織となる傾向があります。



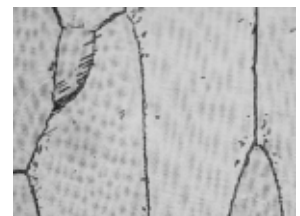
フェライト約 53%



フェライト約 67%

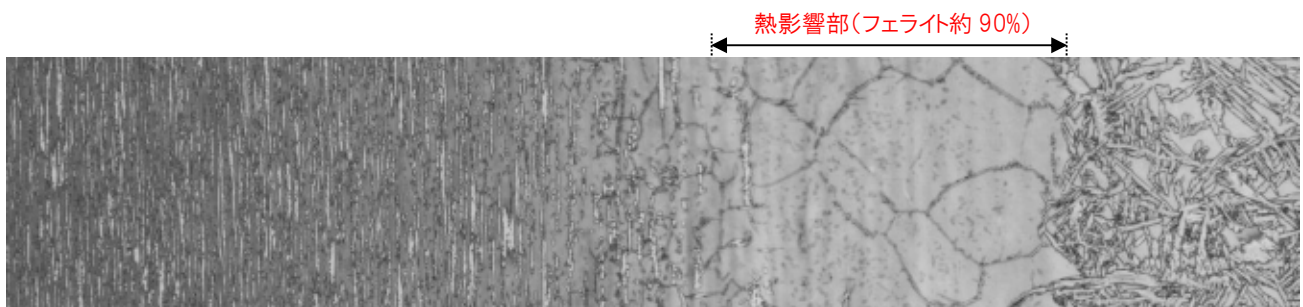


フェライト約 79%

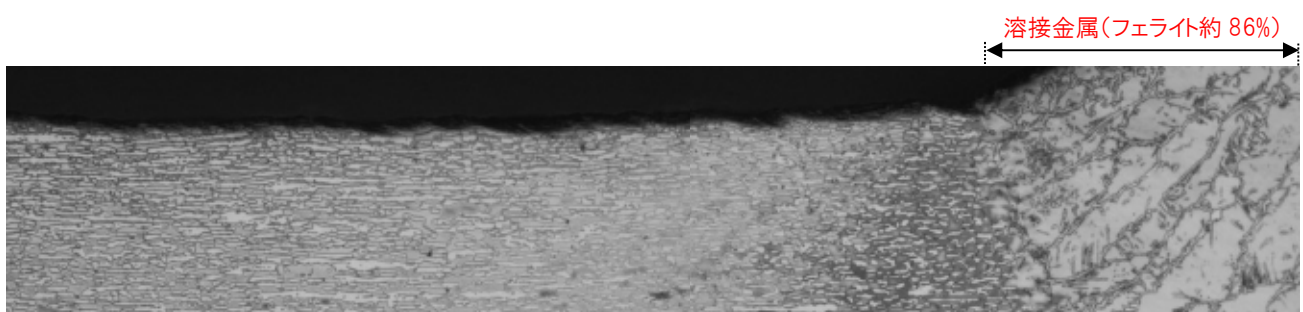


フェライト約 95%

熱影響によって相比変化が生じた SUS329J4L の金属組織

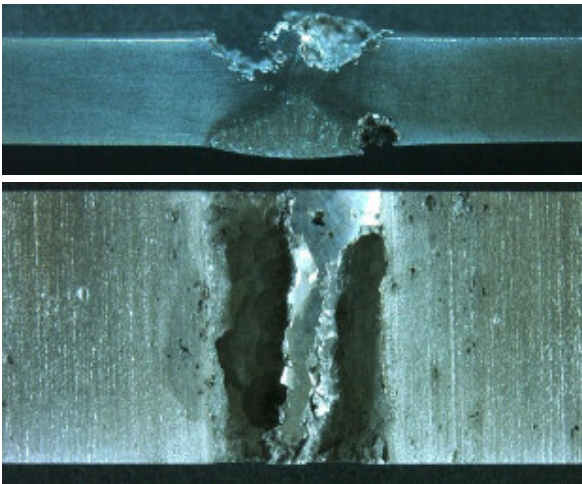


薄板 (t2mm) の溶接部組織 (ティグ溶接)

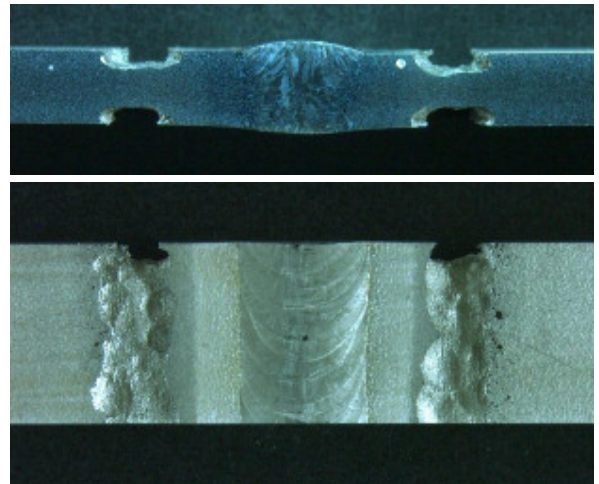


厚板 (t5mm) の溶接部組織 (ティグ溶接)

二相ステンレス鋼の溶接部に生じるフェライト過剰組織は、目視による確認ができず、引張試験や曲げ試験の結果にもその影響が反映されにくい。二相ステンレス鋼の冶金的特徴を理解していなければ、問題を認識することができません。実用上は、フェライト量が多少増えても、過酷な使用環境でない限りほとんど問題は生じることはありません。しかし、フェライトが過剰となった組織は、結晶粒が粗く、重要な合金成分である N(窒素)が窒化物となって脱合金化するため、じん性、耐水素性、耐食性等が要求される場合に、その影響が無視できなくなります。腐食は溶接金属で優先的に生じることが多いため、印象が非常に悪く、施工ミスや溶接材料取り違えなどの誤解を招く恐れもあります。



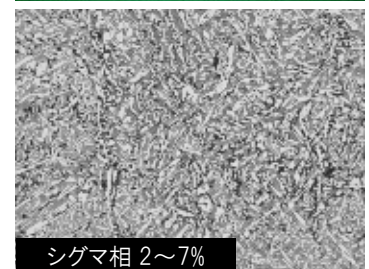
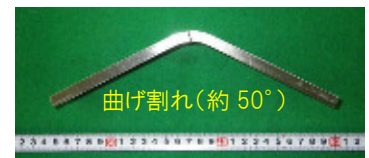
SUS329J4L 溶接部の腐食(塩化鉄試験)
溶接金属が腐食しやすい



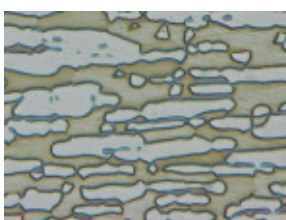
SUS304 溶接部の腐食(塩化鉄試験)
溶接熱影響部が腐食しやすい

◆ 二相ステンレス鋼のシグマぜい化とその影響

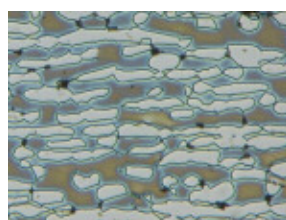
二相ステンレス鋼は、高 Cr 材料であるため、700~900°Cに加熱されると、硬くて脆いシグマ相を生成します。シグマ相は数%程度の生成量でも著しいぜい化をもたらす、耐食性も低下させるため、わずかでも生成させないことが重要です。二相ステンレス鋼は積極的に熱処理を行う材料ではありませんが、熱処理が必要となる場合は、必ず溶体化温度(1050~1100°C)で保持し、冷却はぜい化温度を速やかに通過させるために、水冷で行うことが必須です。溶接施工においては、入熱が小さいため、シグマぜい化のリスクはあまり大きくありませんが、合金成分の多い二相ステンレス鋼ほどリスクが大きくなるため、スーパー二相ステンレス鋼では、溶接入熱に対する配慮が求められます。



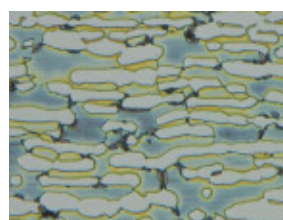
熱処理不良によるシグマぜい化例
(溶体化熱処理後炉冷)



加熱前



加熱 1 分



加熱 5 分



加熱 10 分

850°Cに保持した SUS329J4L のシグマ相生成組織

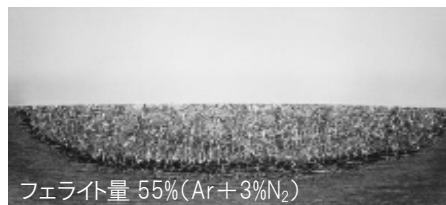
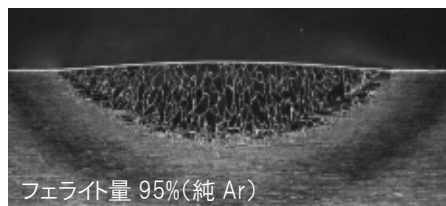
木村化工機の溶接技術

二相ステンレス鋼は、SUS304 などのオーステナイト系ステンレス鋼と同等の溶接性を有するため、溶接が簡単な材料と思われがちです。しかし、目に見えない冶金的な変化のため、使用環境によっては思わぬトラブルとなることもあります。木村化工機では、溶接部の性能改善のための技術開発に取り組んでおり、お客様の使用環境やご要求に応じた高品質の製品をご提供いたします。

◆ 溶接金属の相比改善技術

ティグ溶接は入熱が小さく冷却が速いため、溶接金属が凝固してからオーステナイトの生成が完了するまでの時間を確保することが難しく、フェライト過剰組織となってしまうことが問題となります。これを解決するために、当社ではオーステナイト化を促進する N_2 (窒素)をシールドガス中に混合して溶接する技術を確立しております。これにより溶接金属の相比を適正に保つことができ、品質の向上が可能となります。

本技術は、お客様から相比に対するご要求がある場合や、溶接部の耐食性の懸念から、相比の改善を図る必要性が見込まれる場合などに、ご提案しております。

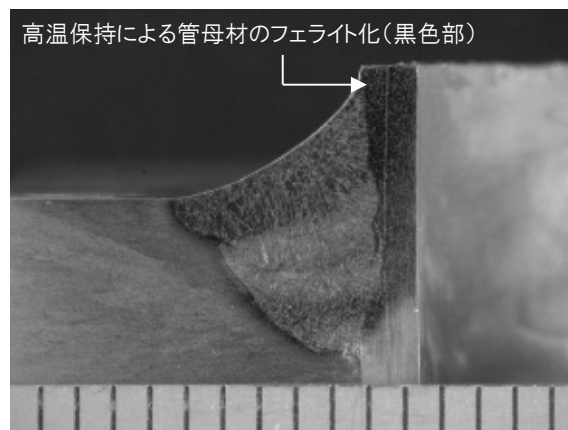


ティグ溶接のシールドガス中の窒素の効果

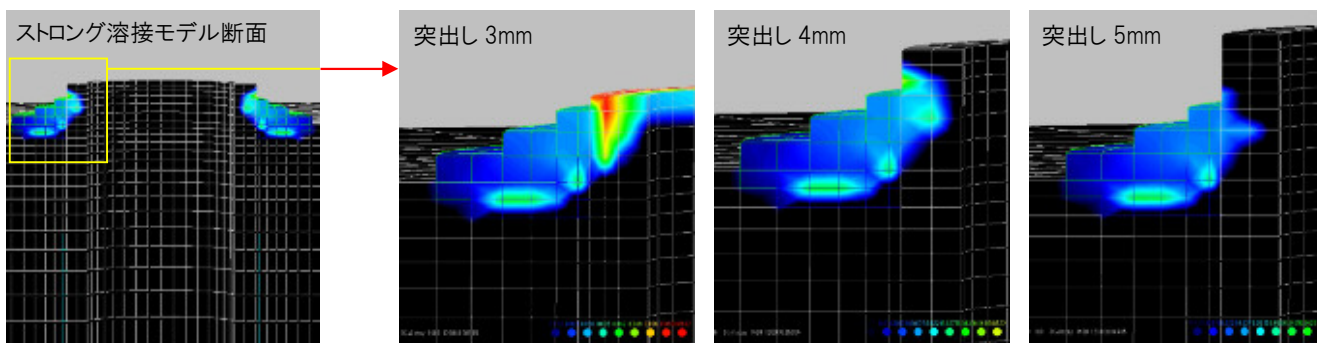
◆ 熱影響部の相比改善技術

二相ステンレス鋼の相比維持において、熱影響部は N_2 ガスの効果が及ばないため、入熱への配慮が求められます。特に、熱交換器の管と管板の溶接部は、部材の熱容量差から相対的に管が高温に長時間保持されやすく、管のフェライト化が生じやすくなります。

当社では、継手の条件ごとに有限要素法による熱解析を行い、適切な継手形状や溶接条件を決定することで適切な溶接継手の実現を可能としています。また、解析によって得られた結果を、実際の溶接サンプルとして形で示すことで、当社の技術と品質についてお客様から信頼をいただいております。



熱交換器のストロング溶接部の熱劣化



管と管板のストロング溶接における熱影響の解析例

開 発 部

TEL 06-6488-2504 FAX 06-6401-1143

URL: <http://www.kcpc.co.jp>



木村化工機株式会社

KIMURA CHEMICAL PLANTS CO., LTD.

エンジニアリング事業部

■ 大阪営業部 〒660-8567 兵庫県尼崎市杭瀬寺島2丁目1番2号

TEL 06-6488-2509 FAX 06-6488-5023

■ 東京営業部 〒110-0015 東京都台東区東上野1丁目2番13号 カーニープレイス新御徒町4階

TEL 03-3837-1831 FAX 03-3837-1970