

3.耐食材料

多くの金属は、空気中ではもとより、各種のガス、酸、アルカリ、塩類などの水溶液中で化学反応によって消耗していく。この現象を総称して、腐食(Corrosion)といい、水分を伴う場合を湿食(Wet Corrosion)、ガスによる腐食を乾食(Dry Corrosion)と分類している。

したがって、湿食に耐える合金を耐食合金(Corrosion Resisting Alloy)、乾食に耐える合金を耐酸化合金(Oxidation Resisting Alloy)、酸化に耐えるとともに高温クリープ抵抗の大きな合金を耐熱合金(Heat Resisting Alloy)と呼んでいる。

ここでは、耐食合金と耐酸化合金を主体に述べる。

3.1鉄鋼系

3.1.1 炭素鋼および低合金鋼

(1)耐食上の特徴

鉄は微量の炭素を含有することにより、強度を上昇させ、構造物用材料として必要な強度と靱性を備えている。また、加工性、溶接性などに優れ、かつ、安価なことから工業的に最も多用されている金属材料である。しかし、鉄鋼の欠点の一つはさびやすいことである。さびは構造物に減肉をもたらし、寿命を短縮したり、錆汁などを飛散させて、周囲の美観を損ねたりすることもある。したがって、鉄鋼材料は、一般には、塗装やめっきなどの防食表面処理を施して使用するのが普通である。裸のまま使用可能な分野は、ボイラであり、ここではボイラ水は、特殊な水処理を行って溶存酸素を極力少なくして、鉄の不動態化域で使用しているのである。

(2)耐候性鋼

工業地帯における炭素鋼の腐食速度は、せいぜい0.04mm/y前後であるが、耐候性に有効な元素であるCu、Cr、Pを添加すると炭素鋼の1/3から1/6に腐食速度が減少する。鉄鋼メーカーでは、各種の耐候性鋼を開発、上市しており、車両構体等には以前から使用されている。

JIS規格としては、JIS G 3125に高耐候性圧延鋼材が規定されている。

(3)耐海水鋼

海水環境では、炭素鋼の腐食速度は、飛沫部の最も多いところで0.5mm/yにも達するので、耐海水性を向上させるCu、P、Crなどを添加した耐海水性鋼が開発されているが、腐食の絶対量が大きいため、裸での使用は少なく、塗装により重防食するか、電気防食の併用等により使用されている。

JIS規格には規定がなく、鉄鋼各社が独自の銘柄を販売している。

(4)耐硫酸露点腐食鋼

硫黄を含む燃料の燃焼による硫酸露点腐食は、鋼を使う上で厄介な問題の一つであるが、これに有効な合金元素としては、CuとCrがあり、これを適当に添加した、耐硫酸露点腐食鋼が開発されている。これは、炭素鋼の数倍から10倍の性能を有するが、腐食の絶対値が大きいため、さらに、優れたものを要求するととなるとステンレス鋼系になる。

(5)水素損傷対策

高温高圧水素中で鋼材を使用すると、水素損傷といわれる障害を生じる。したがって、圧力容器の設計者は、材料選定にかなりの注意を払わなければならない。これに役立つのが、Nelson Curveとして知られている図がある。(テキストP5-8,図5.7参照)これによると、圧力と温度をパラメータとして、使用材料としてどのような鋼種を選定すればよいかの目安を与えることになる。ここでの候補材料は、炭素鋼、Mo鋼、一連のCr-Mo鋼である。

(6)高温酸化対策

高温酸化に対する抵抗は、鋼の場合、ほとんど、Cr含有量に依存しているといえる。AlおよびSiの添加も効果があるが、鋼への多量の添加は問題があり、Crは多量添加しても問題が少ないので、耐熱鋼はCrが添加されている。図3-1は、Cr、Al、Siの添加による耐酸化増量の変化を示したもので、これらの元素は、優先的に酸化され、表面に形成された酸化物が酸化雰囲気から金属を遮断する保護膜となるのである。ここでの材料選定には、テキストP5-2,5-3における表5.2や表5.3が参考になる。

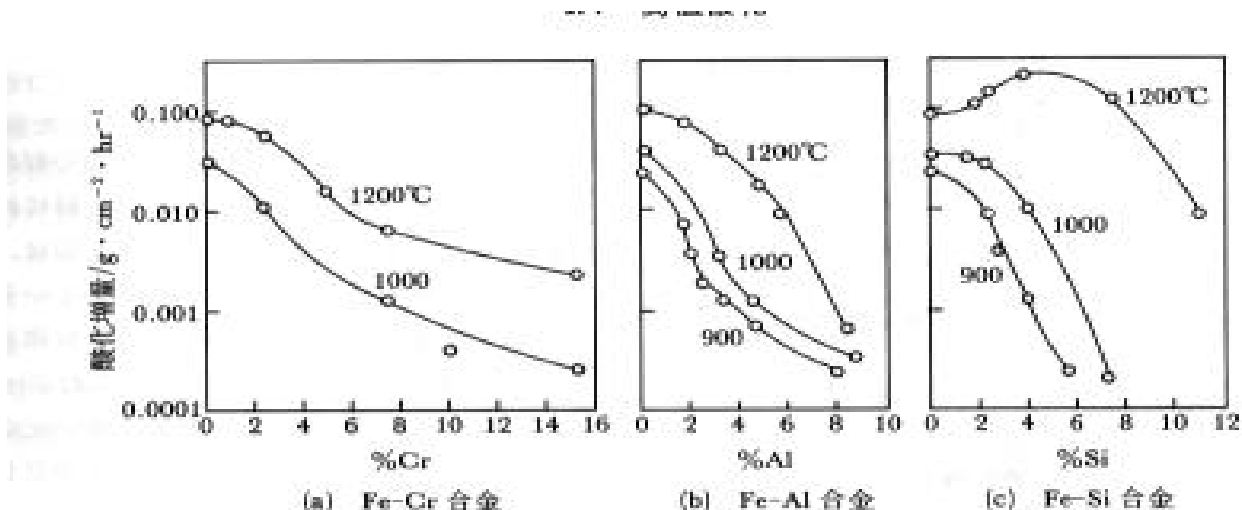


図3-1 鉄の耐酸化性に及ぼす合金元素の影響

3.1.2 鋳鉄系

(1)耐食上の特徴

鋳鉄は、水道用鋳鉄管として古くから使用されており、腐食は主として外側の土壌側であり、その腐食速度は、0.13mm/yから0.08mm/y程度である。鋳鉄の腐食の特徴は、組織中のフェライト、パーライトが優先的に浸食され、黒鉛のみが残留する腐食現象があり、これを黒鉛化腐食と称している。ダクタイル鋳鉄は、ねずみ鋳鉄に比べて強度的に優れているが、耐食性はあまり変わらない。

大気腐食に対しては、鋳鉄は鋼系に比較してやや腐食速度が小さいといわれている。

(2)低合金鋳鉄

数%までのNi,Cu,Mo,Siなどの合金元素の添加は、耐食性の向上効果は小さい。しかし、0.85%以上のCrの添加は、多少の改善効果があるとされている。とくに、高温酸化に対してはCr添加はかなりの効果があることが知られている。図3-2は鋳鉄の耐高温酸化性に及ぼすCrの効果を示す。

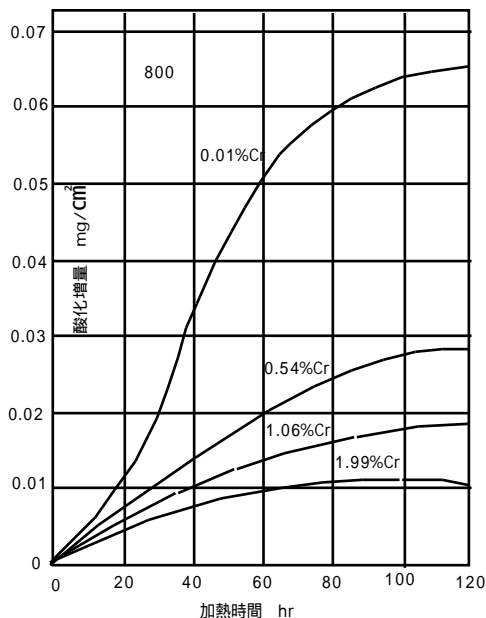


図3-2 鋳鉄の耐酸化性に及ぼすCrの影響

(3)高合金鋳鉄

高合金鋳鉄は、耐食性の観点からは優れており、それぞれ特徴ある使い方がされている。それらは、Niを多量に添加したオーステナイト鋳鉄、Crを多量に添加した高クロム鋳鉄、Siを多量に添加した高珪素鋳鉄である。ニレジスト鋳鉄を代表とするオーステナイト鋳鉄は、耐食性、特に、耐海水性に優れ、アメリカでは、海水ポンプやバルブのケーシングに多用されているようである。高クロム鋳鉄は、耐食

性よりは耐摩耗性の方が注目され、破碎機やゴミ処理プラントなどに使用される。しかし、高クロム鉄は延性、靱性に乏しく、熱衝撃に対して弱いので使用に対して注意を要する。高珪素鉄は、硫酸、硝酸、有機酸に対して、広い濃度範囲で、広い温度範囲で耐えるので、硫酸工業用のポンプ、バルブ、冷却管、容器などに用いられているが、機械的性質が優れていないので、使用上制約がある。

3.1.3 ステンレス鋼

(1)耐食上の特徴

ステンレス鋼はさびにくく、金属光沢を保っているので、建築用素材として好まれるとともに、各種の工業で使用されているが、その特徴は、表面に形成される不動態皮膜によるところが大きい。使用される環境側に塩素イオンのような不動態皮膜を局部的に破壊するイオンがある一定以上に存在するとき、孔食、すき間腐食、応力腐食割れを生じるようになり、加熱により鋭敏化していると、粒界腐食を生じる。金属組織的には、マルテンサイト、フェライト、オーステナイト、二相(オーステナイト+フェライト)などがあり、そのタイプによって耐食性に差が見られる。

(2)オーステナイト系ステンレス鋼

オーステナイト系ステンレス鋼は、ステンレス鋼の中では、他の系に比べて溶接性が良好なこともあって、最も多く使用されている鋼種である。その中でも、304,304L,316,316L があらゆる分野においてよく知られており、その他に、化学プラント用として321,347、さらには、耐熱用途として、309S,310Sがよく使用される。また、301は車両用として使用されている。

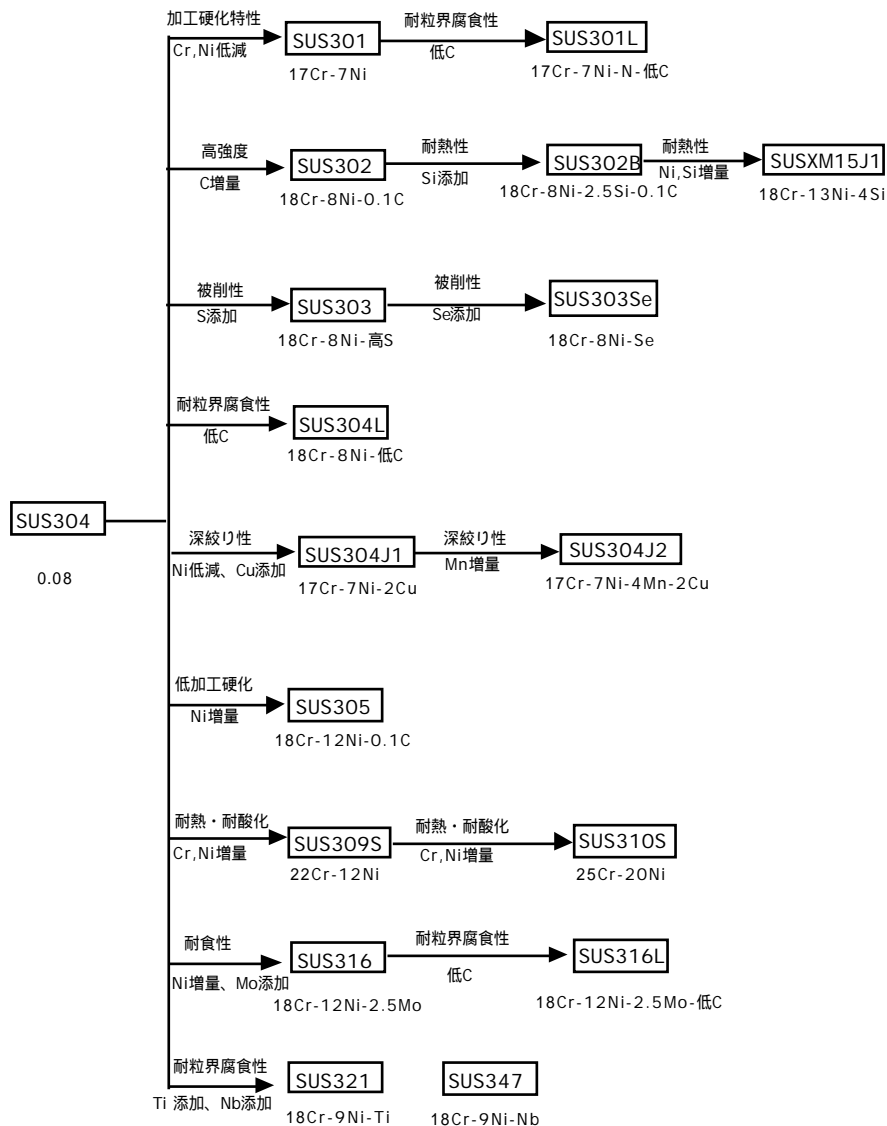


図3-1 オーステナイト系ステンレス鋼の鋼種

近年、オーステナイトステンレス鋼も耐孔食性の改善がなされ、いくつかのスーパーオーステナイトステンレス鋼が開発されているが、JIS規格等にはまだ採用されていない。表3-1に6%Moを含むスーパーオーステナイトステンレス鋼を、表3-2に高ニッケルスーパーオーステナイト合金を示す。

表3-1 6Moスーパーオーステナイト・ステンレス鋼

名称	主要組成	メーカー
AL-6XN	21.0Cr-24.5Ni-6.5Mo-0.8Cu-0.22N-低C	Allegheny
25-6Mo	20.0Cr-25.0Ni-6.5Mo-1.0Cu-0.20N-低C	
1925hMo	20.0Cr-25.0Ni-6.5Mo-1.0Cu-0.20N-低C	V.D.M.
UR SB8	25.0Cr-25.0Ni-5.5Mo-1.5Cu-0.20N-低C	
254SMO	20.0Cr-18.0Ni-6.6Mo-0.8Cu-0.20N-低C	Avesta
654SMO	25.0Cr-22.0Ni-7.5Mo-0.5Cu-0.50N-低C	

表3-2 高ニッケル・スーパーオーステナイト・ステンレス鋼

名称	主要組成
20	20.0Cr-35.0Ni-2.5Mo-3.5Cu-Nb
20Cb-3	20.0Cr-34.0Ni-2.5Mo-3.5Cu
20Mo-4	23.8Cr-37.5Ni-4.3Mo-1.0Cu-0.3Nb-低C
20Mo-6	24Cr-35.1Ni-5.9Mo-3.0Cu-低C
Sanicro 28	27.0Cr-31.0Ni-3.5Mo-1.0Cu-低C
31	27.0Cr-31.0Ni-6.5Mo-1.2Cu-0.02N-低C
Incoloy 825	21.5Cr-42.0Ni-3.0Mo-2.3Cu-0.9Ti

(3)フェライト系ステンレス鋼

フェライト系ステンレス鋼は、オーステナイト系よりも応力腐食割れ感受性は低い、微量のNi,Mo,Cuは感受性を増大するといわれる。一般的な耐食性はオーステナイト系より劣るので、以前はその用途が限られていたが、溶接技術の進歩と極低炭素/窒素鋼の開発によってその用途が広がっている。用途の広がっている分野としては、自動車の排気系、ガス給湯設備、魔法瓶、冷温水機用熱交換器管、海水熱交換器管などがある。

表3-3は、スーパーフェライトステンレス鋼の代表的なものを示す。

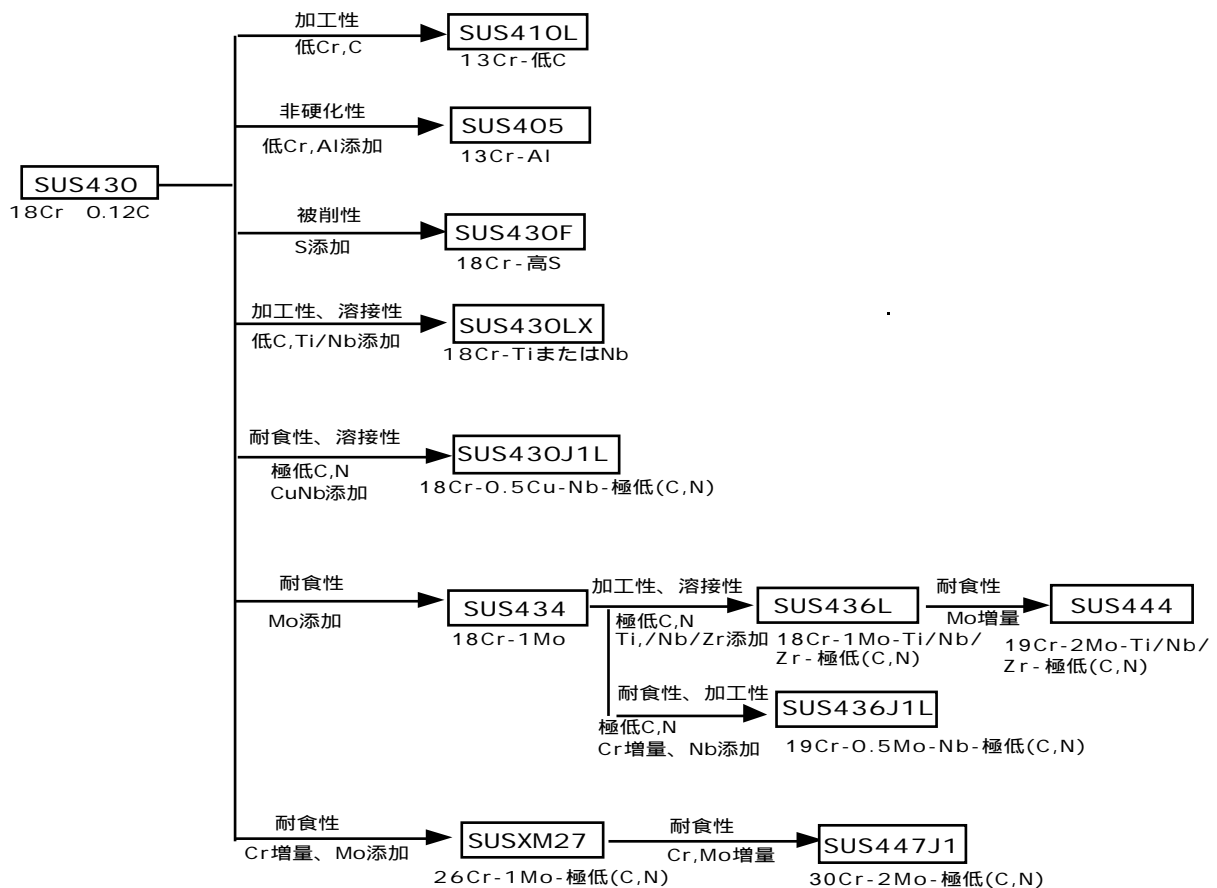


図3-2 フェライト系ステンレス鋼

表3-3 スーパーフェライト・ステンレス鋼

名称	主要組成	
SEA CURE	27.5Cr-1.2Ni-3.5Mo-0.5Ti	Trent Tube
MONIT	25.5Cr-4.0Ni-4.0Mo-0.5Ti	Nyby Uddeholm
26-1S	25.0Cr-1.0Mo-1.1Ti	
AL29-4	29.6Cr-4.0Mo	Allegheny
AL29-4C	28.8Cr-3.8Mo-0.6Ti	Allegheny
E-Brite 26-1	25.9Cr-1.0Mo-0.1Nb-Cu	Allegheny
290Mo	29Cr-4Mo	Vallourec
SHOMAC30-2	30Cr-2Mo-低C	昭和電工

(4) マルテンサイト系ステンレス鋼

オーステナイト系ステンレス鋼は耐食性は優れているが、耐力や硬さが低いため、ボルトや軸のような部品に適していない。ここで、耐食性と強度を兼ね備えた材料が必要となる。マルテンサイト系ステンレス鋼はこれらの用途に利用される。

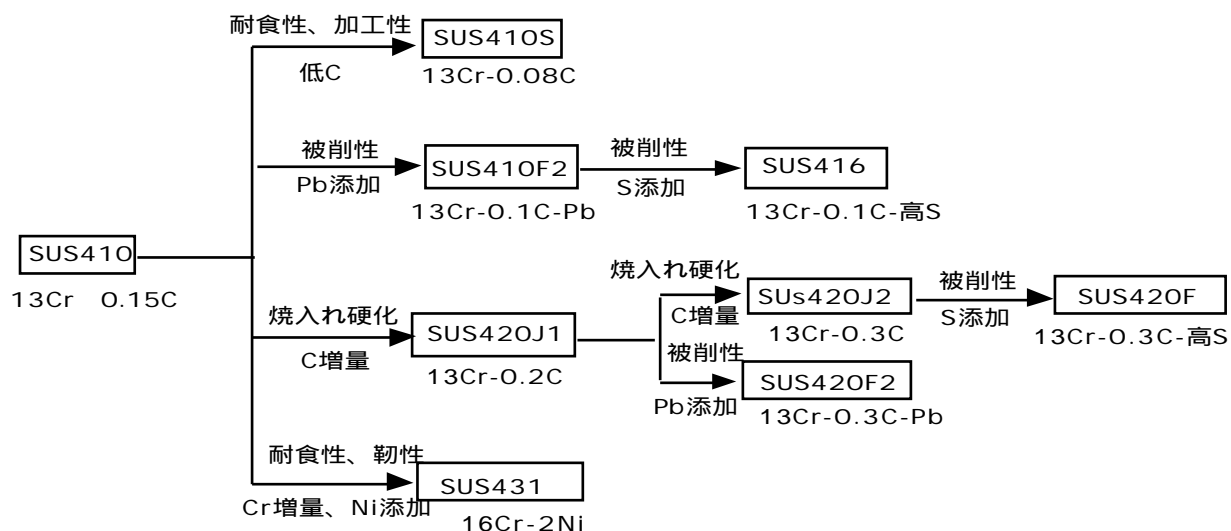


図3-3 マルテンサイト系ステンレス鋼

(5)二相系ステンレス鋼

二相ステンレス鋼は、オーステナイトとフェライトを50/50含むステンレス鋼で、オーステナイト系よりも耐力や硬さが大であり、かつ、応力腐食割れ感受性も低いので、開発当初は、耐海水用等によく使用されていた。最近では、スーパーフェライト系ステンレス鋼と競合している。

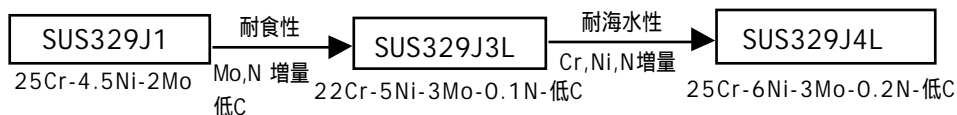


図3-4 二相系ステンレス鋼

また、JIS以外の二相ステンレス鋼を表3-4に示す。

表3-4 JIS規格以外の二相ステンレス鋼

名称	主要組成	メーカー
SAF 2205	22Cr-5.5Ni-3Mo-1.6Mn	Sandovik
DP3	25Cr-7Ni-3Mo-0.5Cu-0.3W	住友金属
Ferralium 255	26Cr-5Ni-3Mo-2Cu	Bonar Langley Alloys
3RE60	18.5Cr-5Ni-3Mo-1.7Si-1.5Mn	Sandovik
AF 22	22Cr-5.5Ni-3Mo-1.6Mn	Mannesmann
Zeron 100	24Cr-7.3Ni-4.0Mo-0.70Cu-0.7W	Mather and Platt

(6)析出硬化系ステンレス鋼

析出硬化型系ステンレス鋼は、耐食性と強度の両方を必要とするときに適した材料で、図3-5に示すように、JIS には3種類しか規定がないが、規定されていない鋼種も現実には使用されている。ジェットフォイルに使用している15-5PH鋼は、その代表的な例である。表3-5にJIS規格外の析出硬化型ステンレス鋼の主要組成を示す。

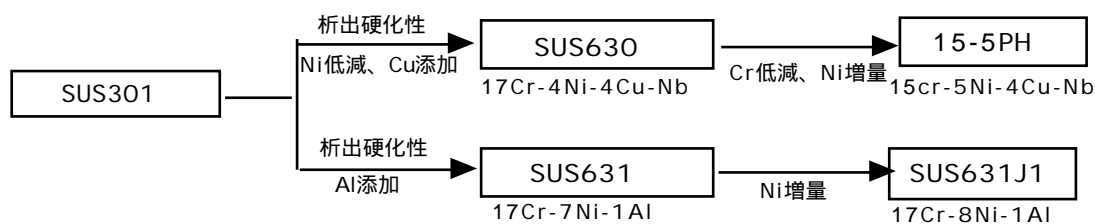


図3-5 析出硬化型ステンレス鋼

表3-5 JIS規格以外の析出硬化型ステンレス鋼

名称	主要組成	
15-5PH	15Cr-5Ni-3.3Cu-Nb	
PH13-8Mo	13Cr-8Ni-2.2Mo-1.1Al	
12-6PHX	12Cr-6Ni-3Mo	
Custom450	15Cr-6.5Ni-0.8Mo-1.5Cu-0.75Nb	
Custom455	12Cr-8.5Ni-2.25Cu-1.2Ti	
FV520	14Cr-5.5Ni-1.8Mo-1.5Cu-0.3Nb	
CROLOY16-6PH	16Cr-7.5Ni-0.8Ti-0.2Al	
Pyromet X-15	15Cr-20Co-2.9Mo	
Stainless W	17Cr-7Ni-0.7Ti-0.2Al	
15-7 Mo	15Cr-7Ni-2.3Mo-1.2Al	
AM 350	17Cr-4Ni-2.8Mo	
AM 355	15Cr-4Ni-2.75Mo-0.95Mn	
AM 362	15Cr-6.5Ni-0.9Ti-0.06Al	
AM 364	11Cr-11Ni-0.2Ti-0.6Al	

3.2 アルミニウム合金系

アルミニウム合金の耐食性は、イオン化傾向の大きい材料であるにもかかわらず、優れており、とくに、大気中や海水に対して耐食性があることが知られている。これは主として表面に形成される酸化被膜の寄与によるところが大きい。

製造形態としては、一般鋳造品、ダイキャスト品、展伸材に分けられ、規格もそれらの形態に応じて作成されている。最も一般的な展伸材については、熱処理により強化できない非熱処理型合金と熱処理型に大別され、前者には、1000系、3000系、4000系、5000系が、後者には、2000系、6000系、7000系、8000系が属する。一般に、耐食アルミニウム合金とは、3000系、5000系、6000系を指している。

鋳造品は、これとは別の規格で、AC1A,1B(Al-Cu系)、2A,2B(Al-Cu-Si系)、3A,4A,4B,4C,4CH,4D(Al-Si系)、5A(Y合金)、7A,7B(Al-Cu-Mg系)、8A,8B,8C(Al-Cu-Mg-Ni系)、9A,9Bがある。ダイキャスト品には、ADC1(Al-Si系)、ADC3(Al-Si-Mg系)、ADC5,ADC6(Al-Mg系)、ADC10,ADC12(Al-Si-Cu系)となっている。

3.2.1 純アルミニウム(1000系)

純アルミニウムは、他のすべての種類のアルミニウム合金よりも耐食性に優れている。その耐食性は、Cu、Fe、Siなどの不純物含有量の減少とともに向上するが、純度99.0～99.5%の間ではあまり差がなく、99.7～99.8%の純度になるとかなりよくなる。純度99.99%以上で、最も耐食性がよくなる。

この系の腐食形態は、孔食が多い。

3.2.2 Al-Cu系(2000系)

添加されているCuのために耐食性が劣るので、腐食性の強い環境での使用は避けた方がよい。腐食現象としては、粒界腐食が生じやすいし、応力腐食割れも生じる。

3.2.3 Al-Mn系(3000系)

Mnの添加は、不純部Feの害を低減するので、耐食性は良好である。1.3%Mnを含有する3003合金は、代表的合金で、成形性、耐食性は純アルミニウムと同等であるが、強度は若干高く、溶接性も良好である。孔食が生じる場合もあるが、Mn含有量が多くなると孔食は発生しにくくなる。

3.2.4 Al-Si系(4000系)

Si含有量の増加とともに耐食性は低下する。実用材料の耐食性はよくない。この合金は、溶加材、ろう材等に利用される。展伸材は陽極酸化処理して使用される場合が多い。

3.2.5 Al-Mg系(5000系)

Mgが固溶する比較的低含有量の合金では、耐食性がよい。Mg量の増加とともに引張強さ、耐力は増加するが、3.5%以上のMgを含有する合金では、熱処理によっては粒界腐食や剥離腐食、応力腐食割れが生じやすくなる。Mn、Crの添加は、これの防止に効果がある。Mgの多い場合の晶出物は Al_3Mg_2 (相)で、選択溶解しやすい。

5083合金は、非熱処理合金としては優れた強度、良好な溶接性、耐食性、加工性などの特性を示すため、船舶、車両、LNGタンクなどに使用される。

3.2.6 Al-Mg-Si系(6000系)

MgとSiを添加した熱処理型の合金であり、全般的に耐食性は良好であるが、Al-Mn系およびAl-Mg系合金よりはやや劣る。 Mg_2Si が形成されるが、Siが過剰になると耐食性は劣ってくる。強度を上げるためにCuを添加すると粒界腐食を発生しやすくなる。

3.2.7 Al-Mg-Zn系(7000系)

熱処理型の合金で、高い強度が得られるが、Znはアルミニウムの耐食性を低下させるので、この系の合金は耐食性がやや劣り、粒界腐食も生じやすい。ZnおよびMg量が多くなると強度は高くなるが、耐応力腐食割れ性は低下する。SCC防止のために、Mn、Cr、Zr、Cu、Agなどの微量添加が有効であるとされている。しかし、Cuを含む合金(7075, 7178など)は、耐食性が劣る。Cuを含まない合金(7N01など)は6061合金と同程度の耐食性を有する。

この系の合金は、自然時効性があり、溶接部は室温で時間とともに強度が上昇する。

3.2.8 その他の合金

この系の合金は、Al-Ni(8001)、Al-Fe(8014)、Al-Li(8090, 8091)などいろいろあるが、耐食性についてのデータは十分でない。しかし、Niは微量でも耐食性を損ねるようである。

3.3 銅合金系

銅の耐食性は、第一に、イオン化傾向が水素よりも小さいので、強い酸化剤が作用しないと腐食しないことである。従って、淡水、海水あるいは非酸化性の酸に腐食されにくいのである。第二は、鉄やニッケルのように不動態にならないことである。第三には、不純物が局部電池をつくったり、電位を下げて腐食を促進する影響が少ないことである。酸素の供給を多くしても電位は上昇せず、かえって、アノードとなる。第四には、HCl、 NH_3 、CNなどは錯イオンをつくって溶解を促進することである。

このことは、水溶液にさらされた場合、金属表面に保護被膜は2800 (Cu)ないし4400 (Cu-Ni)と比較的薄く、あまり強固でないので、流速が早いと腐食が促進されることを意味している。腐食速度を下げるには、腐食生成物が表面を覆うようにしてやればよいことになる。

銅の腐食がひどくなる場合は、 Cu^{2+} イオンがCuを酸化することによって、 Cu^+ を生じ、これが酸素により Cu^{2+} になることを繰り返して腐食が進む場合がある。このような場合は腐食生成物の中に Cu^{2+} イオンが害を及ぼす。

他方、Cuは硫化水素に侵されやすい。これは硫化銅の形成が容易で、腐食性生物が保護作用がないためである。

3.3.1 純銅

比較的軟らかく、熱伝導度も大きいので、給湯システムや熱交換器管としてよく使用される。種類としては、無酸素銅(C1020)、りん脱酸銅(C1201,C1220,C1221)、タフピッチ銅(C1100)がある。

無酸素銅は、純度が高く特に含有ガス量が少ないので、電気材料としての用途が多い。脱酸銅は、P,Si,Mg,Liなどを少量添加して脱酸して製造するものであるが、りん脱酸銅は、Pを0.01～0.05%程度含有している。従って電気伝導度はよくない。タフピッチ銅は、電気分解銅を融解して形銅としたもので、0.03～0.04%の酸素が含まれており、この酸素は亜酸化銅として結晶粒間に存在している。これが高温水素によって脆化を起こす場合がある。

純銅管の腐食は、水質とくに、pHと全炭酸成分の影響が顕著で、孔食の形を取り、主として二つのタイプに分類されている。Type Ⅰの孔食は、硬水を扱う給水用配管に生じており、銅管内面の炭素質付着物が孔食の発生を助長するとされている。一方、Type Ⅱの孔食は、軟水系の水質の多い我が国で多く事例が見られる。

3.3.2 黄銅(Cu-Zn)系

この系には、丹銅(C2100,C2200,C2300,C2400)、70/30黄銅(C2600)、60/40黄銅(C2801)、ネーバル黄銅(C4621,C4640)、アドミラリティ黄銅(C4430)、アルミニウム黄銅(C6870～C6872)があり、鋳物としては、黄銅鋳物CAC201～203(YBsC 1～3)、高力黄銅鋳物CAC301～304(HBsC 1～4)がある。

この系の合金は、Zn量とともに強度は上昇するが、いろいろな形態の腐食現象が生じる。例えば、脱Zn現象という合金成分の一部が選択的に腐食によって抜け出す現象である。この現象は、Znが15%以上の合金で起こりやすく、これを防止するために、As、Sb、Snなどの添加が有効であり、それらが添加された合金が規格化されている。また、時季割れと称する応力腐食割れが、アンモニアや水銀塩の雰囲気で残留応力が大きいと生じる。この現象もZnの多い合金ほど起こりやすい。さらに、流水の衝撃作用により、エロージョン・コロージョンが生じやすく、Alの添加は、この抵抗を少しく向上させる。

さらに、注意しなければならないのは、Znを含む合金ではあるが、黄銅と呼ばないものに、Mn青銅とシルジン青銅(CAC801～803)がある。Mn青銅は、Mnを含む高力黄銅の鍛造物を指すものと、1890年代より船舶用推進器材料として使用され、現在では高力黄銅鋳物に属するものとがある。前者は、軸、ボルト、ナットなどに使用され、後者は船用プロペラに使用されていたが、腐食疲労強度が、Ni-Al青銅に劣るので、最近はそれらへの使用範囲が縮小している。

シルジン青銅も錫青銅の代用合金として国内で開発されたもので、鋳造品が主体である。

3.3.3 青銅(Cu-Sn)系

この系には、鋳造品が多く、砲金(CAC401～407)、りん青銅(C5191,CAC502A,B,CAC503A,B)、鉛青銅(CAC602～605)などがある。

砲金は、古い時代に砲身として使用されたことに由来する名称で、銅にSnとZnが添加され、さらにPbが添加されているものもある。JISでは青銅鋳物として扱われている。耐食性、なかなしく、耐海水性に優れ、船用のプッシュヤンプ、バルブ等用途は広い。

りん青銅は、Pを0.03～0.35%添加された合金で、加工して用いるものは、パネ材や耐摩耗性材料として使用される。りん青銅鋳物は、Pを0.1～1.0%含むもので、耐食性、耐摩耗性にすぐれ、歯車などに用いられる。

鉛青銅鋳物は、鉛含有量の比較的少ないものと(CAC602,603)、多いものがあり(CAC604,605)、いずれも軸受としての用途がある。

この系の合金は、脱亜鉛型の腐食は起こらない。耐食性はCuよりよくなるが、これはSnの被膜生成がよい作用を及ぼすことによる。

3.3.4 アルミニウム青銅(Cu-Al)系

この系の合金は、伸銅品と鑄造品と両方がある。前者には、C6161,C6280,C6301などがあり、後者としては、CAC701～704が規定されている。Al添加は、機械的性質の向上が大きい。耐食性は、Sn青銅よりもよく、Al添加による酸化被膜が寄与している。しかし、使用条件によっては、脱Al現象が起こることがある。耐食性、強度、特に、腐食疲労強度が大きく、耐キャビテーション性もよいので、船用のプロペラ材料としての用途を確立している。

3.3.5 白銅(Cu-Ni)系

この系の合金は、キュプロニッケルとも呼ばれ、伸銅品が主体であるが、JISには、C7060,C7150が規定されている。Ni含有量は、2.5%～30%の広い範囲の組成があるが、Feがわずかに添加される場合が多い。この合金は、耐海水性、耐キャビテーション・エロージョン性などがよく、復水器管や化学工業の耐食性容器などに使用されている。

この系にさらにZnを添加した、Cu-Ni-Zn合金は、洋白または洋銀といわれる合金があるが、食器や装飾品、バネなどがその用途の主なものである。

3.3.6 珪素青銅(Cu-Si)系

この系の合金は、通常の規格にはないが、耐食性がよいので、化学工業用の容器などには使用されている。ハーキュロイ(Cu-Si-Sn-Zn)、Everdur(Cu-Si-Mn)、AR合金(Cu-Si-Sn-Cd)、P.M.G.メタル、C合金(Cu-Si-Ni)、CA合金(Cu-Si-Ni-Al)、CAZ合金(Cu-Si-Ni-Al-Zn)などが知られているが、その用途は限られている。

3.3.7 ベリリウム銅系

この系の合金は、熱処理によって強度を著しく向上させることができるし、耐疲労性、耐摩耗性、耐食性が優れているので、バネ材料としてダイヤフラム、ペロー、時計の部品、ヘアリングなどに用途がある。耐食性は、銅と同程度であるが、腐食疲労性も優れている。この材料の欠点は、Beに毒性があることで、この合金を使用する場合は、その添加量は少ないので問題ないが、製造の際の管理に注意が必要で、その分コストがアップする。

3.4 ニッケル合金系

Niは、電位的には、CuとFeの中間挙動を示すが、かなり容易に不動態化する金属であるため、Cuよりも耐食性が優れているのである。ただし、保護被膜を生じない環境では、Cuよりも腐食が著しくなる場合も起こる。合金化することで、強度と耐食性および耐熱性の改良がはかられている。代表的合金として、Ni-Cu合金(モネル)、Ni-Cr-Fe合金(インコネル、ナイモニック)、Ni-Mo合金(ハステロイB)、Ni-Mo-Cr合金(ハステロイC)などがある。

3.4.1 純ニッケル

強度はあまり高くないが、淡水、海水、さらには、塩酸、硫酸などに耐食性がある。硝酸、亜硝酸、酢酸、ギ酸、しゅう酸には侵される。苛性ソーダには耐える。

3.4.1 Ni-Cr系

この系の合金は、ニクロムとして知られ、電熱抵抗体や熱電対としての用途はよく知られている。耐食合金は、後述するように、第三、第四の添加元素が添加されて開発された、インコネル合金やハステロイ合金がある。

3.4.2 Ni-Mo系

ハステロイBとして、Moが28%程度添加された合金が塩酸によく耐えることがよく知られている。しかし、強い酸化性の酸や塩類に対しては耐えないので、材料選定には注意が必要である。ハステロイ合金については後述する。

3.4.3 Ni-Cu系

モネルメタルとして古くから知られている合金であるが、鑄造品でも加工品でも用いられ、Cuの貴金属性とNiの不動態化性を兼ね備えた、NiおよびCuのいずれよりも耐食性が優れている。

表3-6にこの種類を示す。

表3-6 モネルメタルの種類

名称	主要組成	説明
モネル	Ni-30Cu-1.4Fe-1Mn-0.1Si-0.15C-0.01S	標準モネル
モネル403	Ni-30Cu-0.8Fe-2Mn-0.5Si-0.15C-0.01S	
R-モネル	Ni-30Cu-1.4Fe-1Mn-0.05Si-0.15C-0.035S	快削性モネル
K-モネル	Ni-29Cu-0.9Fe-0.75Mn-0.5Si-0.15C-0.005S-2.75Al	熱処理強化
KR-モネル	Ni-29Cu-0.9Fe-0.75Mn-0.5Si-0.28C-0.005S-2.75Al	熱処理強化
Castモネル	Ni-31Cu-2Fe-0.75Mn-1.6Si-0.2C-0.015S	鑄造品
H-モネル	Ni-31Cu-2Fe-0.75Mn-3Si-0.1C-0.015S	鑄造品
S-モネル	Ni-30Cu-2Fe-0.75Mn-4Si-0.1C-0.015S	鑄造品

3.4.4 Ni-Cr-Fe系

この合金系は、耐熱合金としても耐食合金としても実用合金が多くある。インコネル合金と呼ばれるもので、耐熱性と耐食性を兼ね備えている。表3-7にその一部を示す。

表3-7 インコネル合金中主に耐食目的の代表的なもの

名称	主要組成	説明
Inconel 600	16Cr-8Fe	耐SCC性
Inconel 601	23Cr-14Fe-1.35Al	
Inconel 604	16Cr-8Fe-2Nb	
Inconel 617	22Cr-12.5Co-9.0Mo-1.0Al	
Inconel 625	23Cr-3Fe-9Mo-4.0Nb-0.2Ti-0.2Al	耐塩化物性
Inconel 690	3Cr-9.5Fe	耐SCC性
Inconel 700	15.0Cr-28.5Co-3.7Mo-3.0Al-2.2Ti	耐熱用
Inconel 702	15.6Cr-3.4Al-0.7Ti	耐熱用
Inconel 713C,713LC	13Cr-4.2Mo-6.1Al-0.8Ti-Zr-B	耐熱用
Inconel 718	19Cr-18Fe-3Mo-5Nb-0.9Ti-0.4Al	耐熱性 / 溶接性
Inconel X-750	15Cr-7Fe-0.9Nb-2.5Ti-0.8Al	Ti,Al添加による強化

3.4.5 ハステロイ合金

前述のように、ハステロイ合金には、Ni-Mo系とNi-Cr-Mo系があり、種類によってかなり化学組成が異なるので注意を要する。主なものは、ハステロイB系とハステロイC系であり、これらは次々と改良されたものが出現している。表3-8に一部の例を示す。

表3-8 耐食用ハステロイ合金の組成と特徴

Hastelloy	主要組成	特 徴
B	28Mo-5Fe-V	非酸化性酸に強い
B-2	28Mo-低C	非酸化性酸に強い
B-10	24Mo-6Fe-8Cr-低C	Cの性質を兼ね持つ
C	16Cr-16Mo-5Fe-4W-Co	耐塩化物性
C-276	16Cr-16Mo-5Fe-4W-低C,Si	耐塩化物性、Cの改良
C-22	22Cr-13Mo-3Fe-W	耐塩化物性
C-4	16Cr-16Mo-2Fe-Ti-低C	耐塩化物性
C-2000	23Cr-16Mo-2Fe-1.6Cu	Cの耐孔食性が向上
F	22Cr-7Mo-21Fe	耐孔食性合金
G	22Cr-6.5Mo-19.5Fe-2Cu-2.5Co	耐塩化物性
G-3	23Cr-7Mo-20Fe-Cu-Cb	耐塩化物性
X	22Cr-9Mo-19Fe-W	高温強度、耐酸化性優れ、主として耐熱用

3.5 チタン合金系

チタンは、表面に強固な不動態被膜を形成し、本来のイオン化傾向に関係なく優れた耐食性を示す。とくに、塩素イオンを含む水溶液や酸化性酸には強い性質がある。合金系は、主として耐食目的のみに用いる純Ti系と腐食性雰囲気で強度を必要とする部位に使用されるチタン合金に大別される。

3.5.1 純チタン系

この系は、工業用純チタンとして規定されているが、純Ti中に含まれるC,N,Oは機械的性質に大きく影響するので、JIS やASTMにおいて、いくつかのグレードに分類されている。海水中の腐食、特に、インピンジメント・アタックやエロージョンに強いため、海水熱交換器の配管に採用されるようになったが、他の金属と併用する場合が多いので、電気防食を併用するような場合、水素脆化に対する配慮が必要である。

3.5.2 チタン合金

チタン合金は、純チタンに比べ、機械的性質が著しく優れているので、潜水艇、や航空機エンジン部品に早くから使用され、最近では、一般工業界や、スポーツ用品にまで使用されるようになってきた。その種類は、非常に多くなってきたが、金属組織によって分類されている。すなわち、 相、 + 相、 相に分けられている。表3-9に主な合金を示す。

相型チタン合金は、熱処理により機械的性質の強化の出来ない合金である。しかし、溶接性、高温での耐酸化性は優れている。 相には、針状組織と等軸晶組織があり、後者が機械的性質が優れている。TiにV,Cr,Mn,Fe,Nb,Mo,Ag,Taなどを加えると 相が安定になってくる。 相型合金は、加工と熱処理によって機械的性質を大幅に変えられることである。 + 相型合金は、機械的性質が、 相の形態に大きく影響される。この系の合金の代表が、Ti-6Al-4V合金である。

表3-9 チタン合金の種類

型式	合金名	略称	用 途
	工業用純Ti	Ti	主として耐食目的
	Ti-0.15 ~ 0.2Pd	Ti-Pd	化学工業容器等
	Ti-0.3Mo-0.8Ni	Grade12	化学工業
	Ti-5Al-2.5Sn	Ti-5-2.5	航空機部品
	Ti-5Al-2.5SnELI	Ti-5-2.5	低温用圧力容器
Near-	Ti-5Ta	Ti-5Ta	耐食用
Near-	Ti-6Al-2Cb-1Ta-0.8Mo	Ti-6-2-1-.8	潜水艦、圧力容器
Near-	Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.23Si		ジェットエンジン部品
Near-	Ti-8Al-1Mo-1V	Ti-8-1-1	ジェットエンジン部品
Near-	Ti-3Al-2.5V	Ti-3-2.5	油圧配管
Near-	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Ti-6-2-4-2	ジェットエンジン部品
+	Ti-6Al-4V	Ti-6-4	翼、胴体などの構造部材、脚部材
+	Ti-6Al-4V cast	Ti-6-4	ジェットエンジン部材
+	Ti-6Al-4V ELI	Ti-6-4	深海艇構造材
+	Ti-4Al-3Mo-1V	Ti-4-3-1	
+	Ti-4Al-2Sn-4Mo-0.5Si	Ti-550	
+	Ti-7Al-4Mo	Ti-7-4	
+	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	Ti-6-2-4-6	ジェットエンジン部品
+	Ti-6Al-6V-2Sn	Ti-6-6-2	翼外皮、ロケットモーターケース
+	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-0.25Si		航空機外皮
+	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	Ti-5-2-2-4-4	ジェットエンジン部品
Near-	Ti-10V-2Fe-3Al	Ti-10-2-3	
Near-	Ti-2Al-11.5V-2Sn-10Zr	Transage129	
Near-	Ti-2.5Al-2Sn-9Zr-8Mo	Transage207	
	Ti-8Mn	Ti-8Mn	翼外皮
	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	Ti-8-8-2-3	ファスナー類
	Ti-13V-11Cr-3Al	Ti-13-11-3	強度、ファスナー類
	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	Beta	強度、加工性良、ファスナー類
	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo	Ti-3-8-6-4-4	
	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	Ti-15-3-3-3	
	Ti-15Mo-5Zr	T-15-5	強度、耐食性
	Ti-15Mo-5Zr-3Al	Ti-15-5-3	強度、耐食性

3.6 コバルト合金

コバルト合金は、耐食性、耐熱性、耐摩耗性がよいので、重要な部品に使用されているが、工業用途としては、ガスタービンの静翼などの耐熱合金が著名である。これは高温耐酸化性が金属材料中では最も優れているからである。一方、耐食、耐摩耗の必要とする部品に対しては、ステライト合金がよく知られている。ステライト合金は、Co50～60%,Cr25～35%,W0～20%,C0.1～2.5%を主成分とする合金で、単品としてだけでなく、肉盛合金としても利用される。表3-10にこの組成を示す。

表3-10 ステライト合金

名称	主要組成	使い方
ステライトNo.1	30Cr-12.5W-3Ni-3Fe-1Mo-1Mn-1Si-2.5C	溶着
ステライトNo.3	31Cr-9W-1.6C	鑄造
ステライトNo.6	28Cr-4W-3Ni-3Fe-1Mo-1Mn-1Si-1.1C	鑄造/溶着
ステライトNo.12	29Cr-8W-3Ni-3Fe-1Mo-1Mn-1.4Si-1.4C	溶着
ステライトNo.20	33Cr-18W-2.5C	溶着
ステライトNo.21	27Cr-5.5Mo-2.8Ni-2Fe-1Mn-2Si-0.25C	溶着
ステライトNo.25	20Cr-15W-10Ni-1.5Mn-0.1C	溶着
ステライトNo.32	26Cr-12W-22Ni-1.8C	溶着
ステライト F	25Cr-12W-22Ni-3Fe-0.6Mo-0.5Mn-1.1Si-1.75C	溶着