

6. ステンレス鋼

日本冶金工業(株) さとうまさあき
ソリューション・マーケティング部 次長 佐藤正昭

まえがき

ステンレス鋼とは、Cr含有率を10.5%以上、C含有率を1.2%以下とし、耐食性を向上させた合金鋼で、常温における主要な金属組織によってオーステナイト系、オーステナイト・フェライト系、フェライト系、マルテンサイト系、析出硬化系の5種類に分類されます (JIS G 0203より)。

本稿では、この5種類に分類されたステンレス鋼についてJIS G 4303に記載されている熱処理を中心に解説を行います。なお、表に記載した数値はステンレス鋼棒に関するものであり、JIS G 4304やJIS G 4305に記載されているステンレス鋼板、鋼帯に関する数値とは異なる場合があることに注意願います。また、耐熱鋼としてJIS G 4311やJIS G 4312に記載されている鋼棒、鋼線、鋼板、鋼帯に関しても一部説明を加えていきます。

◇ オーステナイト系ステンレス鋼の熱処理

1. 固溶化熱処理

固溶化熱処理は前処理で生成したマルテンサイトやひずみをなくし、また炭化物を固溶させてオーステナイト単相にして、優れた耐食性と加工性を確保する熱処理です。表1にJIS G 4303に記載されている熱処理条件の例を示します。熱処理温度は、おおむね1010~1150℃の範囲のもの、下限温度が900℃台のもの、1030~1180℃の範囲のものに分けられます。

主なオーステナイト系ステンレス鋼の炭化物はCr炭化物であり、これを固溶化熱処理により分解させる必要があります。高温ほど鋼中の固溶C量が多くなり、炭化物が分解しやすくなるので、高Cの鋼ほど熱処理温度を高めにする必要があります。ここで、TiやNbはCとの親和力が強く、安定

表 1 オーステナイト系ステンレス鋼の熱処理条件の例

種類の記号	固溶化熱処理	種類の記号	固溶化熱処理
SUS201	1010~1120℃急冷	SUS316L	1010~1150℃急冷
SUS202	1010~1120℃急冷	SUS316N	1010~1150℃急冷
SUS301	1010~1150℃急冷	SUS316LN	1010~1150℃急冷
SUS302	1010~1150℃急冷	SUS316Ti	920~1150℃急冷
SUS303	1010~1150℃急冷	SUS316J1	1010~1150℃急冷
SUS303Se	1010~1150℃急冷	SUS316J1L	1010~1150℃急冷
SUS303Cu	1010~1150℃急冷	SUS316F	1010~1150℃急冷
SUS304	1010~1150℃急冷	SUS317	1010~1150℃急冷
SUS304L	1010~1150℃急冷	SUS317L	1010~1150℃急冷
SUS304N1	1010~1150℃急冷	SUS317LN	1010~1150℃急冷
SUS304N2	1010~1150℃急冷	SUS317J1	1030~1180℃急冷
SUS304LN	1010~1150℃急冷	SUS836L	1030~1180℃急冷
SUS304J3	1010~1150℃急冷	SUS890L	1030~1180℃急冷
SUS305	1010~1150℃急冷	SUS321	920~1150℃急冷
SUS309S	1030~1150℃急冷	SUS347	980~1150℃急冷
SUS310S	1030~1180℃急冷	SUSXM7	1010~1150℃急冷
SUS312L	1030~1180℃急冷	SUSXM15J1	1010~1150℃急冷
SUS316	1010~1150℃急冷		

な炭化物を作るので、固溶C量はC含有量に比べて著しく低くなります。そのため、安定化元素であるTi、Nbを添加したSUS316Ti、SUS321やSUS347については、850℃～930℃での安定化熱処理も可能となります。(詳細は2. 安定化熱処理に示す。)一方、CrやNiを多く含有する鋼では固溶C量が低くなっているため、より高温での熱処理が必要となります。そのため、SUS310S、SUS312L、SUS836LやSUS890Lなどでは高温の固溶化熱処理が必要となります。

冷却は全ての鋼種で急冷とします。その理由としては550～800℃近傍の温度域で冷却速度が遅いと、Cr炭化物が主に結晶粒界に析出します。この際、Cr炭化物の周囲にCr濃度の著しく低いCr欠乏層が生成し、そこを起点に腐食が進行して、耐食性を著しく低下させます。よって、熱処理でCを固溶化した後は、Cr炭化物が析出しないように急冷することが必要です。

2. 安定化熱処理

安定化元素のTi、Nbを添加したSUS316Ti、SUS321、SUS347では安定化熱処理を施す場合があります。安定化熱処理はCrよりもCとの親和力の大きいTiやNbと固溶Cを反応させて析出物とし、固溶C量を低減し、Cr炭化物の粒界析出を防いで、耐粒界腐食性を向上させる熱処理です。

熱処理温度は、Cr炭化物が析出し難い温度域(850℃以上)で、かつTiCやNbCが十分に析出し固溶C量を低下させる温度(930℃以下)とし、冷却は、固溶C量が十分に低減しているため、急冷とする必要はありません。

3. 時効処理

表1には示されていませんが、オーステナイト系の耐熱鋼は、概ね固溶化熱処理のままで使用するものが多いですが、一部には固溶化熱処理後に時効処理を行う耐熱鋼があります。まず、弱析出型合金はMo、W、Nb、Tiなどの炭化物形成元素やNなどの窒化物形成元素を添加することで炭化物、窒化物などの金属間化合物を時効処理で析出させる。次に強析出型合金はNiとAl及びTi等の硬化性元素を添加することで金属間化合物 γ' 相(Ni₃(Al、Ti))を時効処理で析出させる。この析出強化を利用して600～700℃の高温強度を向上させる熱処理です。

◇ オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼の熱処理

1. 固溶化熱処理

オーステナイト・フェライト系ステンレスでは、オーステナイト相とフェライト相の比率(相比)が耐食性、機械的性質等に影響を及ぼすことが知られており、この相比は熱処理温度によって変化します。そのため、固溶化熱処理は前工程で生成したひずみや析出物をなくすだけでなく、適切な相比を得ることも考えた温度範囲で実施されます。表2にJIS G 4303に記載されている熱処理条件の例を示します。冷却は、耐食性や機械的性質を劣化させる σ 相の析出などを防止するために急冷が必要となります。

◇ フェライト系ステンレス鋼の熱処理

1. 焼なまし

焼なましは前工程で発生したひずみや応力を除去して、優れた耐食性と加工性を確保する熱処理です。表3にJIS G 4303に記載されている熱処理条件の例を示します。

熱処理温度は2種類に分けられます。一つは、SUS430などの上限が850℃以下のものです。これらの鋼種では高温でオーステナイト相が生成するので、フェライト相領域での熱処理を行います。熱処理温度域ではCの固溶限が低いので、Cr炭化物を多く含んだフェライト相となります。そのため、熱処理後は徐冷が可能です。また徐冷を実施すると、冷却途中で炭化物が析出しCr欠乏層が生成しても、フェライト中のCrの拡散が早いために回復(Cr欠乏層がなくなる現象)が生じて耐食性は劣化しません。もう一つはSUS447J1、SUSXM27

表2 オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼の熱処理条件の例

種類の記号	固溶化熱処理
SUS821L1	940～1100℃急冷
SUS323L	950～1100℃急冷
SUS329J1	950～1100℃急冷
SUS329J3L	950～1100℃急冷
SUS329J4L	950～1100℃急冷
SUS327L1	1025～1125℃急冷

の900～1050℃の範囲のものです。これらの鋼種は高温でもオーステナイト相が生成しない鋼種です。高Cr量のため再結晶温度が高くなるので熱処理温度も高くしますが、結晶粒の粗大化の弊害を受けないように上限温度があります。冷却は両鋼種ともに、 σ 相析出、475℃脆性による脆化や耐食性劣化を防止するために急冷とします。

表3には示されていませんが、JIS G 4304やJIS G 4305では、SUS444やSUS430J1Lのように安定化元素のTiやNbを含む鋼種の鋼板、鋼帯の熱処理条件も記載されています。熱処理温度が高温になるとTiCやNbCが分解しはじめ、結晶粒の粗大化や固溶C量の増加が生じて脆化や耐食性劣化の原因となるので、上限温度が1050℃とされています。冷却はTiCやNbCの析出により固溶Cが十分低いことから急冷が可能です。

表3 フェライト系ステンレス鋼の熱処理条件の例

種類の記号	焼なまし
SUS405	780～830℃空冷又は徐冷
SUS410L	700～820℃空冷又は徐冷
SUS430	780～850℃空冷又は徐冷
SUS430F	680～820℃空冷又は徐冷
SUS434	780～850℃空冷又は徐冷
SUS447J1	900～1050℃急冷
SUSXM27	900～1050℃急冷

表4 マルテンサイト系ステンレス鋼の熱処理条件の例

種類の記号	熱処理		
	焼なまし	焼入れ	焼戻し
SUS403	800～900℃徐冷又は約750℃急冷	950～1000℃油冷	700～750℃急冷
SUS410	800～900℃徐冷又は約750℃急冷	950～1000℃油冷	700～750℃急冷
SUS410J1	830～900℃徐冷又は約750℃急冷	970～1020℃油冷	650～750℃急冷
SUS410F2	800～900℃徐冷又は約750℃急冷	950～1000℃油冷	700～750℃急冷
SUS416	800～900℃徐冷又は約750℃急冷	950～1000℃油冷	700～750℃急冷
SUS420J1	800～900℃徐冷又は約750℃急冷	920～980℃油冷	600～750℃急冷
SUS420J2	800～900℃徐冷又は約750℃急冷	920～980℃油冷	600～750℃急冷
SUS420F	800～900℃徐冷又は約750℃急冷	920～980℃油冷	600～750℃急冷
SUS420F2	800～900℃徐冷又は約750℃急冷	920～980℃油冷	600～700℃急冷
SUS431	一次約750℃急冷、二次約650℃急冷	1000～1050℃油冷	630～700℃急冷
SUS440A	800～920℃徐冷	1010～1070℃油冷	100～180℃急冷
SUS440B	800～920℃徐冷	1010～1070℃油冷	100～180℃急冷
SUS440C	800～920℃徐冷	1010～1070℃油冷	100～180℃急冷
SUS440F	800～920℃徐冷	1010～1070℃油冷	100～180℃急冷

◇ マルテンサイト系ステンレス鋼の熱処理

1. 焼なまし

焼なましは前工程で生じたひずみや組織不均質性を除去して、軟質で冷間加工や機械加工に適する状態にする熱処理です。表4にJIS G 4303に記載されている熱処理条件の例を示します。

SUS403からSUS420F2までは2種類の熱処理条件が示されています。上段が完全焼なましで下段が低温焼なましです。完全焼なましではオーステナイト変態開始温度(A1)より50℃から100℃高い温度に加熱し、オーステナイト化させて、拡散による凝固偏析の低減などで組織の均質化を行います。熱間加工後などに用いられます。低温焼なましはA1点直下のフェライト+炭化物領域で再結晶させ、加工性を回復させますので、冷間加工の途中で軟化に適した方法です。Niを含有するSUS431では完全焼なましは有効でなく、いったん焼入れをして、さらに変態点直下に加熱する2段焼なまし法が示されています。

2. 焼入れ

焼入れはオーステナイト化した後にマルテンサイト変態させ、必要とする高強度を得るための熱処理です。

変態開始温度以上に加熱してオーステナイト化し、成分の均質化を図り、その後、油冷でマルテ

ンサイト化します。熱処理時には多くのCr炭化物が分解しますので、拡散の遅いCrが移動して均質化が図れるように保持時間は十分にとる必要があります。また、熱処理温度を高くすると炭化物が多く分解し、オーステナイト中の固溶C量が増して、焼入れ後の硬さが増加します。しかし、さらに高温にしますと固溶C量のさらなる増加によりマルテンサイト変態開始温度が低くなり、その結果残留オーステナイトが増加して硬さが低下するようになります。残留オーステナイトは不安定であり、室温でも徐々にマルテンサイトに変態し、置割れや靱性低下の原因になります。よって、残留オーステナイトを減らすためにサブゼロ処理（通常-73℃で実施）を施すことがあります。

3. 焼戻し

焼入れ状態では硬さが高いものの脆いので、焼戻しにより硬さを幾分犠牲にして用途上必要な靱性を得ます。低温焼戻しは主に100~250℃で行われ、内部応力を緩和し、もろさを軽減する熱処理で、硬さが重要視される刃物等に適用されます。高温焼戻しは主に600~750℃で行われ、衝撃値や

絞りを向上するので、靱性を重要視する構造用部品などに適用されます。なお、中間の400~550℃では靱性の低下、耐食性の劣化が生じるので、原則この付近の温度での焼戻しは行いません。

◇ 析出硬化系ステンレス鋼の熱処理

析出硬化系ステンレス鋼では、固溶化熱処理後に析出硬化処理を行い、基地に微細な第2相を均一に析出させて、強度を得ます。表5にJIS G 4303に記載されている熱処理条件の例を示します。

SUS630は固溶化熱処理により低Cの軟質マルテンサイトとなり、析出硬化処理でCu-rich相を析出させます。析出硬化処理は熱処理温度が最も低いH900処理で最大の強度が得られ、熱処理温度が高くなると強度は低下し靱性が改善されます。SUS631は固溶化熱処理により準安定オーステナイトとなり、析出硬化処理ではオーステナイト相のMs点調整とマルテンサイト化を行い、510℃あるいは565℃の最終熱処理段階でNi-Alの金属間化合物を析出させて硬化させます。

表 5 析出硬化系ステンレス鋼の熱処理条件の例

種類の記号	熱処理		
	種類	記号	条件
SUS630	固溶化熱処理	S	1020~1060℃急冷
	析出硬化処理	H900	470~490℃空冷
		H1025	540~560℃空冷
		H1075	570~590℃空冷
		H1150	610~630℃空冷
SUS631	固溶化熱処理	S	1000~1100℃急冷
	析出硬化処理	RH950	955±10℃に10分間保持、室温まで空冷、24時間以内に-73±6℃に冷却し8時間保持、510±10℃に60分間保持後空冷
		TH1050	760±15℃に90分間保持、1時間以内に15℃以下に冷却し30分間保持、565±10℃に90分間保持後空冷