

7. 耐熱鋼

日本冶金工業(株) ひら た しげる
技術研究所長 **平 田 茂**

◇ 概要

耐熱鋼とは熱に耐える鋼であり、電気、ガソリンといったエネルギーに依存する現代社会に不可欠な材料である。カーボンニュートラルの実現やエネルギーの効率化を達成するうえでも重要な役割を果たすことが期待されている。本稿では、JISで規定されている耐熱鋼について、特性、合金元素の役割を記し、最期に新しく開発された耐熱鋼を紹介する。

◇ 要求特性

耐熱鋼は、火力発電プラントや石油精製プラン

ト、エンジン排気系部品など様々な用途で使用されており、JISでは「高温における各種環境で耐酸化性、耐高温腐食性、または高温強度を保持する合金鋼」と規定されている。要求される特性は、いずれも部材の寿命を左右するもので、なかでも耐酸化性と高温強度は特に重要で、これらに対する合金元素の役割は後述する。

◇ 規格

JISでは、耐熱鋼棒・線材としてJIS G4311に35種、耐熱鋼板・鋼帯としてJIS G4312に28種が規定してある。表1に示す様に大きく2つに分類され、SUS (Steel Use Stainless) で始まる鋼と耐熱鋼を

表 1 JIS G4311耐熱鋼棒・線材、JIS G4312耐熱鋼板・鋼帯の分類

SUS				SUH			
分類	種類の記号	耐熱鋼棒・線	耐熱鋼板・帯	分類	種類の記号	耐熱鋼棒・線	耐熱鋼板・帯
オーステナイト系	SUS302B-HR	—	○	オーステナイト系	SUH31	○	—
	SUS304-HR	○	○		SUH35	○	—
	SUS309S-HR	○	○		SUH36	○	—
	SUS310S-HR	○	○		SUH37	○	—
	SUS316-HR	○	○		SUH38	○	—
	SUS316Ti-HR	○	○		SUH309	○	○
	SUS317-HR	○	○		SUH310	○	○
	SUS321-HR	○	○		SUH330	○	○
	SUS347-HR	○	○		SUH660	○	○
	SUSXM15J1-HR	○	○		SUH661	○	○
フェライト系	SUS405-HR	○	○	フェライト系	SUH21	—	○
	SUS410L-HR	○	○		SUH409	—	○
	SUS430-HR	○	○		SUH490L	—	○
	SUS430J1L-HR	—	○		SUH446	○	○
	SUS436J1L-HR	—	○	マルテンサイト系	SUH1	○	—
マルテンサイト系	SUS403-HR	○	○		SUH3	○	—
	SUS410-HR	○	○		SUH4	○	—
	SUS410J1-HR	○	—		SUH11	○	—
	SUS431-HR	○	—		SUH600	○	—
析出硬化系	SUS630-HR	○	○		SUH616	○	—
	SUS631-HR	○	○				

○：登録有り、—：登録無し

意味するSUH (Steel Use Heat resisting) で始まる鋼があり、それぞれ金属組織によりさらに四つに分類されている。

◇ 鋼種解説 (主な特性、組織など)

1. オーステナイト系耐熱鋼

面心立方構造であるオーステナイト系耐熱鋼は、体心立方構造のフェライト系、マルテンサイト系に比べ構成元素の拡散速度が小さいため、600℃を越える温度での強度に優れている。代表鋼はSUS304-HRであり主な鋼組成と添加元素の効果を表2に示す。18%のクロムを含有するため高温でCr₂O₃の強固なスケールが生じ、これが耐酸化性を向上させている。

2. フェライト系耐熱鋼

体心立方構造であり、総じて炭素量が少ないため高温強度は高くない。このためあまり強度を必要としない部位に適用されている。代表鋼はSUS430-HRで表2に示す様に18%のクロムを含むことで耐高温腐食性を確保している。高価なNiを含まないため安価であるが、475℃前後に保持されると脆化するため注意が必要である。

3. マルテンサイト系耐熱鋼

高温から焼き入れることでマルテンサイト組織とする耐熱鋼で、通常、焼き戻しを施し炭化物を析出させ使用される。SUS403-HRがその代表鋼である。しかしながら、クロムの含有量が13%程度と低いため耐酸化性に優れているとは言えず、焼き戻し温度以上ではマルテンサイト組織が急激に変化し軟化するため、焼き戻し温度である600℃以上では使用されない。

4. 析出硬化系耐熱鋼

析出強化元素として銅を4%程度添加してあるSUS630-HRが代表鋼である。1030~1050℃で固溶化熱処理を施し、冷却しマルテンサイト組織とする。これに400~550℃で時効熱処理を施しε相

(Cu相)を析出させることで高強度化する。しかしながら、500℃を越える温度で使用すると、ε相の粗大化、マルテンサイト相の弱化が起き強度が低下するので使用上限温度は500℃程度となる。

◇ 合金元素

耐熱鋼中の合金元素の総量は50%以下で、いずれも数%以上のクロムを含有し、ニッケル、モリブデン、その他の元素を含有する鋼もある。クロムは、常温近傍における耐食性を改善する元素として知られているが、耐酸化性も向上させる。これはクロムが優先的に酸化し、表面に密着性が良いFeO・Cr₂O₃やCr₂O₃などの緻密な酸化物を形成、これが障壁となって雰囲気からの酸素イオンの侵入を妨害するためである。この傾向はクロム含有量の増加にともない顕著となるが、クロム添加量が多くなると機械的性質が劣化する。このため、実用合金ではクロム量のある程度までに限定し、耐酸化性を向上させにアルミニウム、シリコン、希土類元素(ランタン、セリウム)などが添加される場合が多い。アルミニウムの添加は、クロムの場合とほぼ同じ機構でAl₂O₃皮膜を形成し耐酸化性を改善する。

高温強度の向上は、ニッケルやモリブデン、炭素が添加されている場合が多く、これ以外にもニオブ、窒素など効果を示す元素は多い。ニッケル、モリブデンによる強化機構は主に固溶強化である。これは大きさの違う元素が混じると、金属結晶はその混ざった金属の周辺でひずみが発生し変形が阻害され強度を向上させるというものである。

ステンレス鋼に含まれる主な元素はいずれも耐熱性も高める元素である。このため、ステンレス鋼は耐熱性にも優れており、これが表1に示す耐熱鋼の規格にSUSで始まる鋼が含まれている理由である。ただし、ステンレス鋼では耐食性を確保するために炭素量を低くする傾向があるが、耐熱

表 2 代表的な耐熱鋼の組成と主な添加元素

	種類の記号	主な組成 (wt%)	耐熱性を改善する元素
オーステナイト系	SUS304-HR	18Cr-8Ni	Cr, Ni
フェライト系	SUS430-HR	18Cr	Cr
マルテンサイト系	SUS403-HR	13Cr-0.1C	Cr, C
析出硬化系	SUS630-HR	17Cr-4Ni-4Cu-0.2Nb	Cu

鋼の場合は高温強度を確保するため高めとするものがある。さらに、ステンレス鋼以上に多種の元素を添加し耐酸化性、耐高温腐食性を向上させているものが多い。

◇ 技術動向

JISに規定のある鋼について合金元素とその役割を記載してきたが、より高い温度、より厳しい環境で使用できる新規な鋼の開発要求は強い。これとは別に、耐熱性を維持しつつ加工性、溶接性などを改善、製造歩留りを向上させる材料の要求もある。以下に、2022年新製品として紹介された新しい耐熱鋼を紹介する。

燃料電池の普及拡大は、CO₂排出量削減の有望な手段と考えられており、家庭への普及には発電効率から固体酸化物形（Solid Oxide Fuel Cell）での検討が進められている。この場合、発電を担うホットモジュール内部の温度は最高で800℃程度

と高温かつ水蒸気を含んだ環境となり、形成されたクロム酸化物の一部が飛散し、セルスタックに吸着、性能低下を招くこと知られている。このため、耐高温酸化性および耐クロム蒸発性に優れたアルミ含有フェライト系ステンレス鋼NSSC NCA-1 (18Cr-3Al-Ti) が採用されているが、この鋼は加工性、靱性に問題があり製造時の歩留りが低いという問題があった。これに対し、図1に示す様にニオブ、ボロンを添加することで耐熱性を維持しつつ靱性、成形性を大きく改善したNSSC NCA-F (18Cr-1.5Al-Nb-B) 鋼¹⁾が開発、実用化されている。ニオブの添加により少ないアルミニウム添加量でもAl₂O₃皮膜が安定的に形成されるという興味深い知見に基づき設計されたものである。

参考文献

- 1) 田井善一、藤村佳幸、濱田尊仁、奥学、今川一成：まてりあ、61 (2022)、P. 47

鋼種	C	Si	Mn	Cr	Al	Nb	Ti	B
NSSC NCA-F	0.01	0.54	0.31	18.1	1.5	0.20	-	0.0024
NSSC NCA-1	0.01	0.34	0.23	18.0	3.1	-	0.16	-
SUS445J1	0.01	0.19	0.16	22.0	0.1	0.20	0.20	-

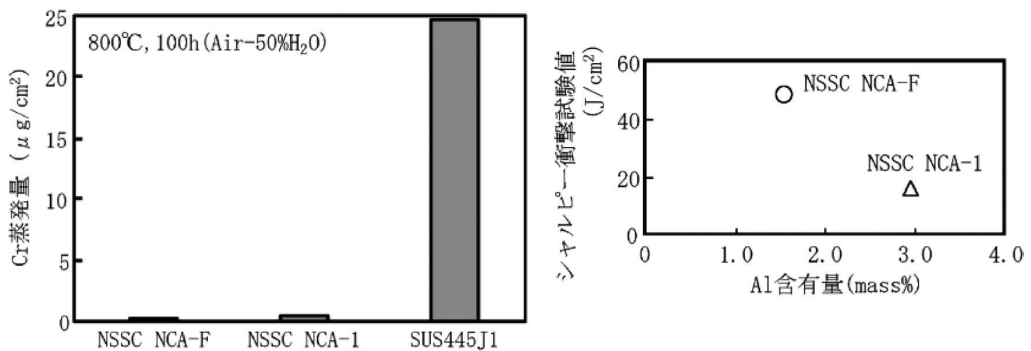


図 1 開発鋼NSSC NCA-F (18Cr-1.5Al-Nb-B) の特性
左：800℃、100時間水蒸気酸化試験におけるCr蒸発量
右：TIG溶接部のシャルピー衝撃試験結果