



入門講座

鉄鋼の日本工業規格－7

耐熱鋼 (SUH)

Heat-resisting Steel

高林宏之

Hiroyuki Takabayashi

大同特殊鋼 (株)
研究開発本部

1 はじめに

現在、耐熱鋼は自動車、航空機、火力発電、石油工業などの高温環境に曝される用途の部品に用いられ、基幹産業の発展を支える材料として利用されている。この耐熱鋼の基盤は20世紀初頭に築かれ、Brenlyによって13Cr鋼 (1913年) が開発されたのが始まりと言われている。さらに、StraussとMaurerによって18Cr-8Ni系鋼 (1914年)、続いて (15-20) Cr- (20-40) Ni系鋼 (1917年) が開発され、その後も産業の細分化、製品設計の多様化、要求耐熱温度の高温化に伴い、種々の耐熱鋼が考案されてきた^{1,3)}。耐熱鋼は、高温における各種環境下において耐酸化性、耐高温腐食性および高温強度を有する合金鋼を指す。構成成分は数mass%以上のCrの他、Ni、Co、Wその他の合金元素を含んでおり、母相組織上の分類として、オーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系の3種があり、さらに析出強化を利用した析出硬化系に分類される^{4,5)}。なお、合金元素の総量が約50 mass%を超える場合には、一般に超耐熱合金、耐熱合金もしくは超合金となる。

一般的な専門書では、母相分類毎に個々の材料について紹介されることが多いため、ここでは、JISで規格化されているSUH鋼を中心に上記4系統の相互比較を中心に紹介することとした。

2 耐熱鋼に要求される特性

耐熱鋼が用いられる環境では、室温環境に比較して多種の損傷形態が複合的に発生するため、律則条件となる損傷形態を見極め、それに応じた材料選定あるいは冶金学的対策を講じる必要がある。耐熱鋼の高性能化を図る上で、引張・圧縮強度や延性、靱性、硬さなどの機械的特性や、所定の形状に成形するための加工性の確保だけでなく、下記の時間依存型の損傷や高温腐食に対する耐性をいかに持たせるかが重要となる⁶⁾。

1) 時間依存型損傷

- ・ 耐力以下の負荷応力で時間と共に変形し、破損に至るクリープ現象
- ・ 伸び一定の状態では縮付け応力が時間と共に低下するリラクセーション現象
- ・ 振動に伴う繰返し応力により変形し、破損に至る疲労現象
- ・ 温度の上下変動に伴う熱膨張、熱収縮により発生する繰返し応力に起因した熱疲労現象

2) 高温腐食

- ・ 酸化、硫化、窒化、浸炭、低融点酸化物腐食、熔融塩腐食、活性ガス腐食などの腐食環境下で材料の質量低下や変質による上記特性の劣化

3 耐熱鋼の定義とJIS分類

表1にJIS G 3411耐熱棒鋼、JIS G 4312耐熱鋼板に耐熱鋼として規定されている耐熱鋼およびステンレス鋼を示す^{4,6)}。耐熱用途に利用される鋼には、JIS規格においてステンレス鋼 (SUS)、耐熱鋼 (SUH) の2種がある。ここで、SUSはJIS規格上、Steel Use Stainlessの頭文字から構成される鋼種記号であり、同様にSUHはSteel Use Heat-Resistingの頭文字からなる鋼種記号である。本質的には双方ともに利用している合金元素は類似しており、材料学上の区分は明確ではなく、要求特性によってはステンレス鋼 (SUS) でも耐熱用途で利用が可能である。これは、耐熱鋼、ステンレス鋼の双方に含まれる主要な合金成分であるCrが、湿環境では不動態被膜を形成し耐食性を高め、高温環境では緻密な酸化被膜を形成し耐酸化性を高める効果があるからでもある。

表2にJIS G 3411耐熱棒鋼、JIS G 4312耐熱鋼板にて、耐熱鋼として規定されている耐熱鋼およびステンレス鋼の成

表1 JIS G 3411 耐熱棒鋼、JIS G 4312 耐熱鋼板に採用されている耐熱鋼とステンレス鋼の種類

分類	SUH系		SUS系	
	種類の記号	棒 板	種類の記号	棒 板
オーステナイト系	SUH31	○ —	SUS302B	— ○
	SUH35	○ —	SUS304	○ ○
	SUH36	○ —	SUS309S	○ ○
	SUH37	○ —	SUS310S	○ ○
	SUH38	○ —	SUS316	○ ○
	SUH309	○ ○	SUS316Ti	○ ○
	SUH310	○ ○	SUS317	○ ○
	SUH330	○ ○	SUS321	○ ○
	SUH660	○ ○	SUS347	○ ○
	SUH661	○ ○	SUSXM15J1	○ ○
	SUH21	— ○	SUS405	○ ○
フェライト系	SUH409	— ○	SUS405	○ ○
	SUH409L	— ○	SUS430	○ ○
	SUH446	○ ○	SUS430J1L	— ○
			SUS436J1L	— ○
マルテンサイト系	SUH1	○ —	SUS403	○ ○
	SUH3	○ —	SUS410	○ ○
	SUH4	○ —	SUS410J1	○ —
	SUH11	○ —	SUS431	○ —
	SUH600	○ —		
	SUH616	○ —		
析出硬化系			SUS630	○ ○
			SUS631	○ ○

分、性質と特徴を示す⁶⁾。表2より、耐熱鋼とステンレス鋼に明確な区分はないが、ステンレス鋼 (SUS) は耐食性、成形性、溶接性を重視される用途に用いられることが多いため、比較的Cが少ないものが多く、耐熱鋼 (SUH) の場合は、Cを積極添加し高温強度を高めた設計のものが多くといった特徴があり、炭化物以外でも金属間化合物形成のため固溶強化成分を余剰に添加したり、その他元素を利用する傾向があるため添加元素の量および種類が多くなっている。

このように実用上、ステンレス鋼 (SUS) と耐熱鋼 (SUH) を分けて考えることは難しく、母相組織の差異、合金元素に応じた固溶成分、析出相およびその量などの差異による特性変化を理解することが重要となる。

表2 JIS G 3411 耐熱棒鋼、JIS G 4312 耐熱鋼板に採用されている耐熱鋼とステンレス鋼の成分、性質と特徴

分類	JIS鋼種名	概略組成(mass%) Fe balance	性質と特徴
SUH			
オーステナイト系	SUH 31	15Cr-14Ni-2Si-2.5W-0.4C	1150℃以下の耐酸化用。ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁弁
	SUH 35	21Cr-4Ni-9Mn-N-0.5C	高温強度を目的としたガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH 36	21Cr-4Ni-9Mn-N-高S-0.5C	高温強度を目的としたガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH 37	21Cr-11Ni-N-0.2C	耐酸化性を主としたガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH 38	20Cr-11Ni-2Mo-高P-B-0.3C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁。耐熱ボルト
	SUH 309	22Cr-12Ni-0.2C	980℃までの繰り返し加熱に耐える耐酸化鋼。加熱炉部品、重油バーナー
	SUH 310	25Cr-20Ni-0.2C	1035℃までの繰り返し加熱に耐える耐酸化鋼。炉部品、ノズル、燃焼室
	SUH 330	15Cr-35Ni-0.1C	耐浸炭酸化性が大きく、1035℃までの繰り返し加熱に耐える。炉材、石油分解装置
	SUH 660	15Cr-25Ni-1.5Mo-V-2Ti-Al-B-0.06C	700℃までのタービンローター、ボルト、ブレード、シャフト
フェライト系	SUH 661	22Cr-20Ni-20Co-3Mo-2.5W-1Nb-N-0.1C	750℃までのタービンローター、ボルト、ブレード、シャフト
	SUH 21	19Cr-3Al-0.8C	耐酸化性が優れた発熱材料。自動車排ガス浄化装置用材料に使用
	SUH 409	11Cr-Ti-0.06C	自動車排ガス浄化装置材料、マフラーなど
マルテンサイト系	SUH 446	25Cr-N-0.2C	高温腐食に強く1082℃まで剥離しやすいスケールの発生がない。燃焼室
	SUH 1	9Cr-3Si-0.4C	750℃までの耐酸化用。ガソリン及びディーゼルエンジン吸気弁
	SUH 3	11Cr-2Si-1Mo-0.4C	高級吸気弁、低級排気弁、魚雷、ロケット部品、予燃焼室
	SUH 4	20Cr-1.5Ni-2Si-0.8C	耐摩耗性を主とした吸気・排気弁、弁座
	SUH 11	9Cr-1.5Si-0.5C	750℃までの耐酸化用。ガソリン及びディーゼルエンジン吸気弁、バーナーノズル
	SUH 600	12Cr-Mo-V-Nb-N-0.15C	蒸気タービンブレード、ディスク、ロータシャフト、ボルト
	SUH 616	12Cr-Ni-1Mo-1W-V-0.25C	高温構造部品、蒸気タービンブレード、ディスク、ロータシャフト、ボルト
SUS			
オーステナイト系	SUS 302B	18Cr-8Ni-2.5Si-0.1C	900℃以下ではSUS310Sと同等の耐酸化性と強度を有する。自動車排ガス浄化装置、工業炉など
	SUS 304	18Cr-8Ni-0.06C	汎用耐酸化鋼。870℃までの繰り返し加熱に耐える
	SUS 309S	22Cr-12Ni-0.06C	SUS304より耐酸化性に優れ、980℃までの繰り返し加熱に耐える。炉材
	SUS 310S	25Cr-20Ni-0.06C	SUS309より耐酸化性に優れ、1035℃までの繰り返し加熱に耐える。炉材、自動車排ガス浄化装置用材料
	SUS 316	18Cr-12Ni-2.5Mo-0.06C	高温において優れたクリープ強度を有する。熱交部品、高温耐食用ボルト類
	SUS 317	18Cr-12Ni-3.5Mo-0.06C	高温において優れたクリープ強度を有する。熱交部品
	SUS 321	18Cr-9Ni-Ti-0.06C	400～900℃の腐食条件で使われる部品。高温用溶接構造品
	SUS 347	18Cr-9Ni-Nb-0.06C	400～900℃の腐食条件で使われる部品。高温用溶接構造品
	SUS XM15J1	18Cr-13Ni-4Si-0.06C	SUS310Siに匹敵する耐酸化性を有する。自動車排ガス浄化装置用材料
	SUS 405	13Cr-Al-0.06C	焼入硬化が少ない。ガスタービンコンプレッサーブレード、焼きなまし箱、焼入れ用ラック
	SUS 410L	13Cr-低C	耐高温酸化性を要求される溶接用部材。自動車排ガス浄化装置、ボイラー燃焼室、バーナなど
フェライト系	SUS 430	18Cr-0.1C	850℃以下の耐酸化用部品。放熱器、炉部品、オイルバーナ
	SUS 430J1L	18Cr-0.5Cu-Nb-極低C,N	SUS430より耐食性良、放熱器、炉部品
	SUS 436J1L	19Cr-0.5Mo-Nb-極低C,N	SUS430より溶接性、耐食性良、放熱器、バーナー
	SUS 403	13Cr-低Si-0.1C	高温高応力に耐える。タービンブレード、蒸気タービンノズル
マルテンサイト系	SUS 410	13Cr-0.1C	800℃以下の耐酸化用
	SUS 410J1	13Cr-Mo-0.15C	タービンブレード、高温高圧蒸気用機械部品
	SUS 431	16Cr-2Ni-0.15C	シャフト、ボルト、ナット、バネ
析出硬化系	SUS 630	17Cr-4Ni-4Cu-Nb-0.05C	ガスタービンコンプレッサーブレード、ガスタービンエンジン周り材料
	SUS 631	17Cr-7Ni-Al-0.07C	高温バネ、ペローズ、ダイヤフラム、ファスナー

4 耐熱鋼の種類と特性

前述の耐熱鋼には、先に述べた通りオーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系があり、強化手法の違いから析出硬化系がある。母相組織の違いにより高温特性が大きく異なるため、その点について解説する。各鋼種の代表的なミクロ組織を図1に示す。図1は光学顕微鏡にて撮影した代表的なエッチング後のミクロ組織であるが、析出硬化系はさらに高倍率のSEMやTEMを用いないと観察できない微細な析出物を内包した組織構造となっている。これら材料の特性は、析出物の影響も受けるが、母相の結晶構造による特徴が現れる。そこで、系統別に耐熱鋼の高温特性および化学組成上の特徴を整理すると表3のようになる。また、系統別代表鋼種数種の高温強度と耐熱温度位置づけを図2に示す。一般的に高温強度、クリープ強度を必要とする用途には、中温域ではマルテンサイト系、高温域ではオーステナイト系のステンレス鋼が使用されている。現在は、マルテンサイト系ステンレス鋼の高温強度の向上があり、600℃程度まではオーステナイト系の材料よりクリープ強度が優れた材料が開発されている。マルテンサイト系は、フェライト系と同じ結晶構造が体心立方構造をとり、熱膨張係数が小さい上、600℃

よりも低い温度域では非常に高い強度が得られるため、構造用材料として優れた特性を持っている。但し、マルテンサイト系は高温側の使用限界があり、その限界値は概ねマルテンサイトからオーステナイトへの逆変態温度 (As点) により決定される。オーステナイト逆変態により、体心立方晶 (Body centered cubic: BCC) から最密充填構造の面心立方晶 (Face centered cubic: FCC) に変化するため、体積変化が生じる。この体積変化は内部応力の発生に寄与し、条件によっては塑性変形や破壊の発生につながる。また、逆変態温度に達していなくても析出物の粗大化による組織の軟化が生じる温度域では、長時間の利用に耐えられない。基本的には析出硬化系も同様な特徴を呈する。但し、金属間化合物を利用する鋼種では、二次硬化があり時効軟化抵抗は高くなる。しかしながらこの場合も、さらに長時間加熱保持されることで析出物の粗大化は進むため、結局のところ使用時間次第では利用を断念せざる負えないことがある。このようにマルテンサイト系は、一部例外はあるものの500℃以上の高温域での利用は難しく、さらに高温域で利用する場合は、オーステナイト系、フェライト系の2種からの選択となる。

高温域におけるフェライト系とオーステナイト系の使い分けは、損傷寿命により決定されるケースが多い。外部の負荷が小さい環境下では、素材の熱膨張・収縮に起因した内部応力に対して、素材強度が不足した場合に塑性変形あるいは破壊の発生につながる。また耐力以下の発生応力であってもクリープ変形により塑性変形が進行することで負荷部の断面積減少が生じ、塑性変形および破壊につながることもある。一般に、このような環境下においてフェライト系はオーステナイト系に比較して熱膨張係数が小さいため、加熱冷却により生じる熱応力が小さく、熱疲労特性が優れている。但し、さらに高温の環境になる場合は、フェライト系では強度が不足するため、高温強度の高いオーステナイト系が利用される。図3、4には耐熱鋼の短時間引張強度⁷⁻¹⁰⁾とクリープラ

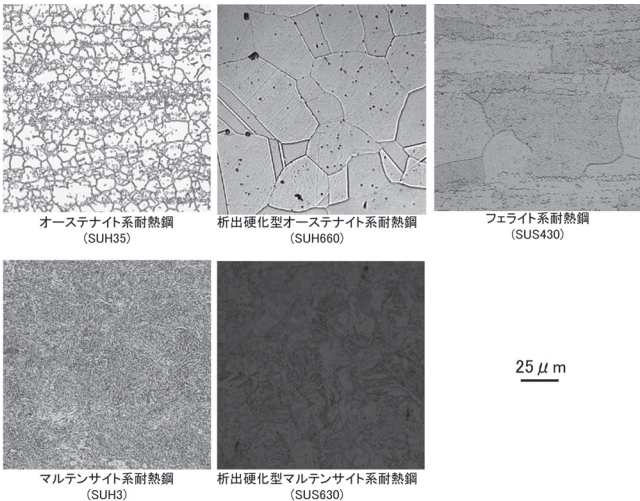


図1 耐熱鋼の系統別代表ミクロ組織

表3 耐熱鋼における系統別の高温特性と成分特徴

	オーステナイト系		フェライト系	マルテンサイト系	
	オーステナイト (FCC)	オーステナイト (FCC) +析出物		マルテンサイト (BCC)	マルテンサイト (BCC) +析出物
母相	オーステナイト (FCC)	オーステナイト (FCC) +析出物	フェライト (BCC)	マルテンサイト (BCC)	マルテンサイト (BCC) +析出物
熱膨張率	大	大	小	小	小
熱伝導率	小	小	大	大	大
高温強度	○	◎	×	<600℃:○ >600℃:×	<600℃:◎ >600℃:×
熱疲労	×	○	◎	○	◎
加工性	×	×	◎	○	○
化学成分	18~25Cr-10~20NiをベースにMo,W,Nb,Ti,Cなどを添加		12~20CrをベースにNb,Tiなどを添加	0.1~0.5C-9~12CrをベースにMo,W,V,Nb,Siなどを添加	17Cr-4~7NiをベースにCu,Nb,Alなどを添加

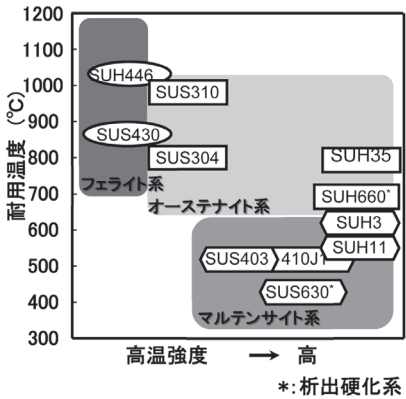


図2 耐熱鋼の高温強度と耐用温度の位置付け

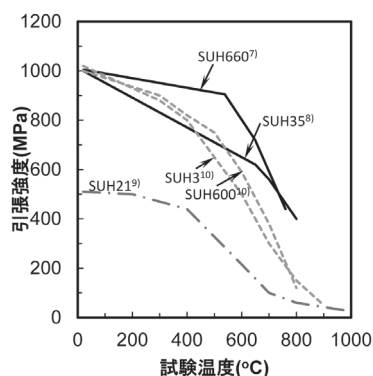


図3 耐熱鋼の高温引張強度

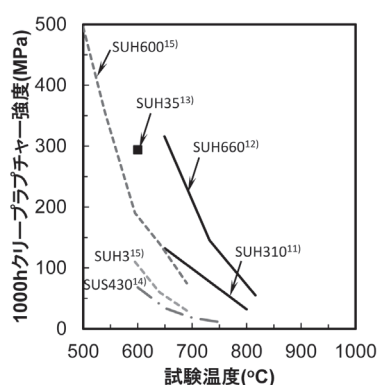


図4 耐熱鋼のクリープ破断強度

プチャー強度を示す¹¹⁻¹⁵⁾。また、以上の特性差を系統別に模式的に整理したものを図5に示す。固溶成分、析出相の種類、析出相の量などにより特性値は上下するため模式図通りとはいかないものの、概ねこのような特徴の差異がある。

以上は、単体部品で考えた場合の要求特性であるが、実際の使用では、各部品を同様な環境下で組み合わせて利用することが多い。このため周囲の部品材質あるいは締結、接合方法の組み合わせも含めて素材の熱膨張特性、強度特性などを考慮する必要がある。使用環境に応じて高温強度だけでなく、熱物性や高温組織安定性などを考慮した材料選択がなされている。以下では、各系統別の特徴に触れつつ実際の耐熱合金について紹介する。

4.1 オーステナイト系耐熱鋼

表1、2から、オーステナイト系耐熱鋼は最も数が多いことが分かる。棒鋼、鋼板双方の形状が可能であるため、様々な用途で利用されている。オーステナイト系是最密充填構造の面心立方晶 (FCC) であるため、マルテンサイト系、フェライト系に比較して熱膨張係数は大きく、原子イオンの拡散速度は小さい。しかし、高温域の強度が比較的高く、約18 mass%Crを含んでいるので耐酸化性にも優れているといった特徴がある。

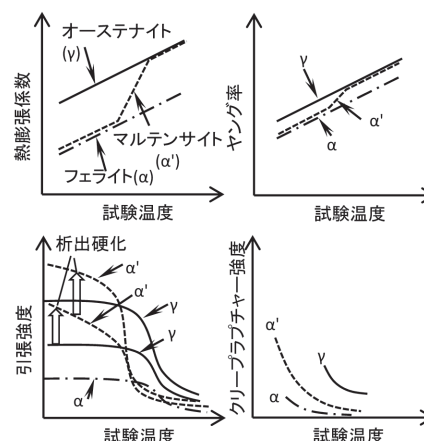


図5 耐熱鋼における高温特性の系統別特徴

SUH30番台のSUH31～38は、排気バルブ用鋼として実用されているものである。特にSUH35はC、Nを多量に含む析出硬化型の高強度鋼で、通常21-4Nと呼ばれ、自動車の排気バルブ用として多用されている。写真1に自動車エンジンの排気用バルブの例を示す。SUH36はSUH35のS量を0.040～0.090 mass%に増やして被削性を改善したものである。

SUH300番代のSUH309、310、330は、耐高温腐食性と高温強度が要求される焼却炉、加熱炉、燃焼室などの炉用品に使用されている耐熱鋼である。図6、7に前述のSUH30番代も含めた耐酸化性を示す^{16,17)}。優れた耐酸化性を有していることが分かる。SUH309は1000℃以下での耐酸化性と高温強度に優れ、SUH310は1150℃までの耐酸化性および高温強度がさらに優れている。SUH330は耐浸炭性、耐窒化性を向上させたものである。

SUH660はA286として知られ、析出硬化元素としてのTi、Alの他、Mo、VおよびBを添加して高温強度を高めたもので、航空機エンジンやガスタービン部品、排ガス浄化装置の耐熱ボルトなどに使用されている。写真2に耐熱ボルトの例を示す。SUH661は約20 mass%のCoを含み、W、Nbを添加することによって耐熱性をさらに向上させたものである。JIS規格鋼以外にもボイラ用、バルブ用、ガスタービン用、その他の用途に対して多数の鋼種が開発されている。

4.2 フェライト系耐熱鋼

フェライト系耐熱鋼にはCr量から12Cr、17Cr、26Cr系鋼の3種があり、その他耐酸化性、高温強度、靱性などの改善にAl、Mo、Tiなどを添加した鋼種がある。図3、4に見られるようにフェライト系は室温高温ともに強度が低いため、構造体よりも筐体として耐酸化性面で利用される場合が多い。主な現用フェライト系ステンレス鋼の大気中での耐酸化性判断による最高使用温度の推奨値を表4に示す^{18,19)}。12Cr系、17Cr

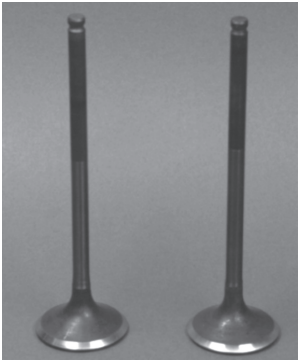


写真1 排気バルブ

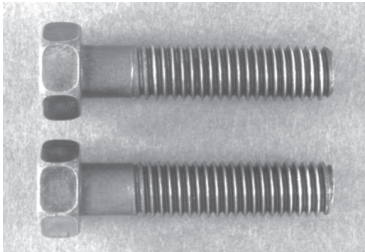


写真2 耐熱ボルト

表4 各種フェライト系ステンレス鋼の大気中における最高使用温度の推奨値

AISI規格	断続使用(°C)	連続使用(°C)
410	817	707
416	762	677
420	737	622
440	817	762
405	817	707
430	872	817
442	1037	982
446	1177	1097

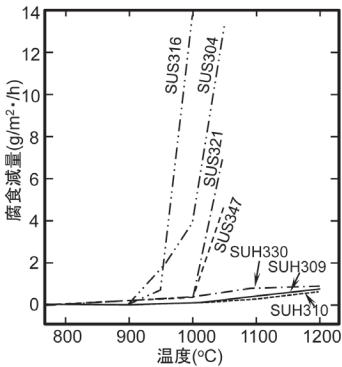


図6 耐酸化性 (連続酸化)

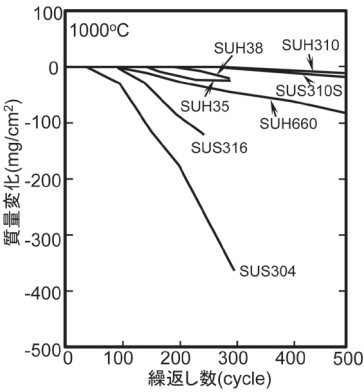


図7 耐酸化性 (繰返し酸化)

0.5Nb、1Ti、2Alを添加した合金ではLaves相の析出によりかなりクリープ強さを改善できるとする報告もある¹⁴⁾。また25Cr (SUH446) では、粒内に一様に分布するCr₂₃C₆がクリープ強さを高めるとする報告もある²⁴⁾。

一方、自動車における排気系部材には、熱膨張係数や耐酸化性が有利なことからフェライト系耐熱鋼が使用されることが多いが、高温強度に注目した例として、触媒コンバータのメタルハニカム材として使用される20Cr-5Al系鋼にLa、Yを添加すると1100℃におけるクリープ伸びの低減に有効であるとの報告、あるいはエキゾーストマニホールド材に要求される熱疲労強度を高めるには19Cr鋼に0.8Nbを添加して固溶Nb量を増加させることが効果的であるとの報告がある²⁵⁾。

4.3 マルテンサイト系耐熱鋼

マルテンサイト系耐熱鋼には8Cr系のSUH1、11の2種、13Cr系のSUH3、600、616の3種、20Cr系のSUH4があり、使用されている合金元素としてC、Si、Ni、Cr、Mo、V、Nb、W、Nがある。SUH1、3、4、11は600℃までの高温強さ、耐酸化性、耐食性の要求されるエンジン用吸気排気弁、予燃焼室などのエンジン部品などに使用される。SUH600、616はタービン部品などに使用されている。なお、SUS403、410、410J1、431などSUS表記のマルテンサイト系ステンレスも耐熱鋼として利用される。

4.4 析出硬化系耐熱鋼

SUS630が代表的な鋼種であり、500℃程度の時効処理により低Cのマルテンサイト母相中にε-Cu相を形成し、強化

系は使用限界温度が800℃前後で分かれるが、26Cr系になると、1100℃近くまで限界温度が上昇する。

耐酸化性の改善に有効な合金元素としては、Crの他、Si、Al、希土類元素、安定化元素が有効であり^{20,21)}、またC、Nは悪影響を及ぼすため鋼種を問わず低減が望ましいこと²²⁾などが知られている。これらの調査結果は大気中の試験が多いが、湿分を含んだ環境では12Cr、17Cr系は600～800℃付近で赤錆が発生し、急激に耐酸化性が劣化する²³⁾。この場合、Siは有効な元素として知られている。

高温強度の低いフェライト系ではあるが、14Crに3Mo、

表5 耐熱鋼に用いられる合金元素の役割

元素名	相安定性	強化手段	合金元素の役割	備考
C	オーステナイト	析出強化(炭化物)	耐高温腐食性低下	
Mn		-	被蝕性向上(硫化物) 固溶N量を増加	
Cu		析出硬化(Cu相)	500℃以上では強度低下	
Ni		固溶強化	オーステナイト系耐熱鋼の基本元素	
N		固溶強化		
Co	フェライト	固溶強化	高価	
Si		-	耐酸化性向上(緻密な酸化被膜形成) 塑性低下(固溶Si増加)	
Cr		析出強化(炭化物)	耐酸化性向上(緻密な酸化被膜形成) 耐高温腐食性向上(緻密な酸化被膜形成)	
Mo		析出強化(炭化物)	焼き戻し温度での軟化抵抗を増加して高温強度を維持 但し、800℃以上では耐酸化性低下	
V		析出強化(炭化物)	焼き戻し温度での軟化抵抗を増加して高温強度を維持	
W		固溶強化	焼き戻し温度での軟化抵抗を増加して高温強度を維持	
		析出強化(炭化物)		
Ti		析出強化(γ' -Ni ₃ (Al,Ti)) 析出強化(炭化物) 結晶粒微細化		
Al		析出強化(γ' -Ni ₃ (Al,Ti))	耐酸化性向上(緻密な酸化被膜形成)	
Nb		析出強化(γ' -Ni ₃ Nb) 析出強化(炭化物) 結晶粒微細化		
B	-	結晶粒界強化(粒界偏析)	熱間加工性向上	

している。しかし前述のマルテンサイト系同様に500℃を超えるとε相の粗大化および相変態により、強度が急激に低下する。そのため500℃以下のタービン部品など耐酸化性よりも強度が重視される用途に適用される。なお、SUH660はJIS規格上はオーステナイト鋼に分類されているが、一般にはγ'-Ni₃Al析出強化を利用したオーステナイト系の析出硬化系耐熱鋼として分類される²⁶⁾。

5 高性能化のための合金元素の役割

JISに記載される耐熱鋼の内、SUH鋼を中心に特徴と合金元素の役割を述べたが、上記で述べた以外の合金元素も含めて、耐熱鋼の特性に及ぼす合金元素の影響を表5にまとめた。基本的に高温強度を向上させる元素はC、Ni、Co、Al、Ti、Nb、Mo、W、V、Cu、N、Bであり、耐酸化性、耐高温腐食性を向上させる元素はCr、Al、Siである。また、熱膨張係数に及ぼす成分影響を調査された例もあり²⁷⁾、耐熱用途では、高温強度、高温腐食性だけでなく物性値の制御も有効な手段として取り入れられている。本件では、主に合金元素単独の効果に触れているが、他の元素との複合的な効果もあるため、その組み合わせは無限に広がっている。

6 おわりに

過酷かつ複雑な損傷形態の関与する高温環境下で利用される耐熱鋼は、優れた材料となっているが、必ずしも万能ではない。適用環境に合わせた材料選定が必要であり、またその適用環境における損傷形態の正しい理解が必要となる。今後時代の変化に伴い、過酷な適用環境に合わせた耐熱鋼が開発され規格化されていくものと考えます。本小文は、耐熱鋼の大まかな構成組織毎の特徴と利用方法を中心に解説させて

いただいた。耐熱鋼利用者側の判断材料としても役立てれば幸いである。

参考文献

1) L.Colombier and J.Hochman : Stainless and Heat Resisting Steels, (1970), 3.
2) ステンレス鋼技術史, 日本金属工業, (1983), 1.
3) 太田定雄 : フェライト系耐熱鋼, (1998)
4) JIS G 3411 耐熱棒鋼.
5) JIS G 4312 耐熱鋼板.
6) ステンレス鋼便覧第3版, ステンレス協会編, (1995), 253.
7) 出口喜勇爾 : 応用金属学大系, 松永陽之助編, 6 (1965), 197.
8) 金属材料高温強度データ集第2編, ステンレス鋼編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1975)
9) ステンレス鋼便覧第3版, ステンレス協会編, (1995), 551.
10) 田中良平編 : 耐熱鋼高温特性データシート, ステンレス協会, (1978), 78.
11) 金属材料高温強度データ集第2編, ステンレス鋼編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1975)
12) 藤田利夫 : 金属材料, 17 (1977), 95.
13) 嵯峨卓郎, 宮川大海, 相原民彦, 末吉国夫 : 材料, 15 (1966), 10.
14) P.J.Grobner, V.Biss and D.L.Sponseller : Metall. Trans. A, 11A (1980), 909.
15) 田中良平編 : 耐熱鋼高温特性データシート, ステンレス協会, (1978), 79.
16) 耐熱鋼データ集, 特殊鋼倶楽部編, (1965), 30.
17) 田中良平編 : 耐熱鋼高温特性データシート, ステンレス協会, (1978), 24.
18) 金属材料の高温酸化と高温腐食, 腐食防食協会編, (1982)
19) L.A.Morris : Met.Eng., (1968), 30.
20) G.C.Wood, I.G.Wright, T.Hodgkiess and D.P.Whittle : Werkst.Korros., 21 (1970), 900.
21) T.Moroishi, H.Fujikawa and H.Makiura : J.Electrochem. Soc., 126 (1979), 2173.
22) 富士川尚男, 村山淳一郎, 藤野允克 : 鉄と鋼, 69 (1983), 678.
23) 富士川尚男 : 鉄と鋼, 70 (1984), 1541.
24) 今井勇之進, 村田威雄 : 日本金属学会誌, 29 (1965), 1053.
25) 清水寛, 石井和秀, 蓮野貞夫, 吉岡啓一, 川崎竜夫 : CAMP-ISIJ, 4 (1991), 1768.
26) ステンレス鋼便覧第3版, ステンレス協会編, (1995), 640.
27) 植田茂紀, 濱野修次, 阿部直弘, 野田俊治 : 電気製鋼, 73 (2002) 2, 93.

(2015年6月5日受付)