

通常950℃以下で行われるガス浸炭よりも容易に浸炭温度を上昇することが出来るなどのメリットが多い。浸炭温度上昇は、数時間以上かかる浸炭時間を短縮可能なメリットがある。ただし、高温浸炭ではオーステナイト結晶粒が粗大化し、衝撃特性低下や焼入れ歪増大などの弊害を生じる可能性が高い。これより、1000℃以上の浸炭においてもオーステナイト結晶粒の粗大化を防止する鋼材の開発が各社盛んに実施されている。今後、減圧（真空）浸炭技術の導入により、今後数年間の間に肌焼鋼の世界が大幅に変化する可能性もある。

(5) 快削鋼

地球環境問題より、スクラップ処理とリサイクル性改善の検討が盛んに行われている。その代表例として、被削性改善のために快削鋼中に広く添加されている鉛の削減の検討がある。国内自動車メーカーは使用済み自動車のリサイクルに関する自主行動計画を1996年に発表している。それによると、バッテリーを除く鉛の使用量を2000年末までに1/2以下、2005年末までに1/3以下までに低減することになっている。EUにおいても、規制を強化する動きが見られたことから、鉛フリー快削鋼の研究開発が各社で実施され、一部実用化されたとの報告がなされている。

鉛フリー化の手段としては、硫黄の増量添加と、硫化物系介在物の形態制御が最も一般的な手法として報告されている。Ca、MgやTi添加による硫化物の形態制御により、更なる被削性改善、並びに硫黄増量添加により低下する機械的特性の改善が可能になると報告されている。自動車用部品としては、クランクシャフトで採用されている。一般部品に多用される低炭素硫黄複合快削鋼の鉛フリー化においては、計算状態図を活用して硫化物系介在物の大型化をCr添加で試みた結果が報告されている。また、硫化物に頼らない新しい手法も検討され、鉛と類似金属のビスマスの活用、黒鉛化鋼、BNの活用などについても研究開発され、一部実用化されているとの報告もある。

(6) 非調質鋼

Vの析出強化を活用し、熱間鍛造まま、あるいは圧延ままで調質材と同等の強度を得ることが可能な非調質鋼が、自動車のエンジン部品であるコネクティングロッド（以下コンロッド）などで広く使われている。この鋼種においては、トータル製造コストダウンが重要な課題として検討されてきた。例えば、コンロッドはクランクシャフトに組み付けるために、大端部がロッド部とキャップ部に分割されている。従来、ロッド部とキャップ部を個別に熱間鍛造、機械加工されていたが、ロッド部とキャップ部の噛み合わせの整合性が重要であり、そのための丁寧な機械加工が不可欠になり、コストアッ

プの要因になっていた。この問題を解決するために、ロッド部とキャップ部を一体で成形後、破断分離する「かち割りコンロッド」が欧州や米国から採用され始めた。延性の低い材料が使用されるので、破断後は脆性破面を呈し、破断後に破面同士を再度組み合わせることが出来る。破面の凹凸により合わせ面の位置合わせが容易に出来るので、従来手法で必要であった位置合わせのための機械加工が省略でき、コストダウンが可能となった。欧州と米国では、当初、粉末冶金法で製造されたコンロッドや高炭素鋼材に適用されていた。しかし、日本国内においては、鍛造コンロッドが主流であることと、高炭素鋼では被削性が低下することにより、新たな鋼種の開発が要望されていた。被削性改善に炭素濃度を低減し、強度確保のためにVの増量添加による析出強化、PやSi添加による固溶強化を図った鋼材が提案された。この手法により良好なかち割り性と高強度化の両立が可能と報告されている。

(7) 軸受鋼

軸受に使用される鋼は、高炭素クロム鋼系、肌焼合金系、耐食、耐熱系があるが、高炭素クロム軸受鋼（主としてSUJ2）が最も多く使用されている。本鋼種は、約1世紀前に欧州で基本成分が確立されてから、合金組成はほとんど変わっていないが、転動疲労寿命は、鋼中の酸化物系介在物が、真空脱ガス処理技術の導入などにより、大幅に低減・小型化されたことにより大幅に改善された。最近10年間も同様の傾向であり、酸素量で5ppm以下の制御が当たり前になっている。

4.2.4 耐熱鋼、耐熱材料

(1) 耐熱鋼

高温で長時間使用される耐熱鋼の開発は、火力・原子力発電、化学プラント、廃棄物発電、自動車等の産業の発展の鍵を握っている。この10年間、CO₂削減、省資源、ダイオキシン等の環境リスク物質の低減化が強く求められた社会的背景の下、より高温での使用を可能とする高強度高耐食耐熱鋼開発、及び、長時間クリープ強度評価や寿命予測といった材料評価の両面で、我が国では欧米をはるかに凌ぐ大きな進展が見られた。

火力発電分野では、それまでのフェライト系耐熱鋼の使用上限温度は約620℃であったが、650℃の超々臨界圧（USC）発電プラントで長時間使用可能なボイラ系大径厚肉鋼管（パイプ）用およびタービン用の高強度9-12Crフェライト系耐熱鋼の研究開発が進められるとともに、ボイラ過熱器管（チューブ）用オーステナイト系耐熱鋼では18Cr-8Ni系から20Cr-25Ni系へ、さらに高Cr-高Ni化とW等の添加により

高性能化が図られ蒸気温度700℃まで使用可能な段階に達した。

原子力分野では、650℃の高速増殖炉燃料被覆管として、高温クリープ強度が非常に高く耐照射特性にも優れた酸化物分散強化9Crフェライト鋼が開発された。

化学プラントの水素精製装置では、反応容器に2.25Cr-1Mo鋼を用いていた1990年代前半には454℃-17MPaであったが、高強度3Cr-1Mo-V鋼や2.25Cr-1Mo-V鋼の開発により高温高压化が進み、1995年頃から482℃-24MPaに、現在では510℃-24MPaに達しつつある。

廃棄物発電では、高耐食オーステナイト系耐熱鋼の開発により従来プラントで300℃程度であったボイラ蒸気温度が現在では500℃まで上昇している。

自動車では、排気系耐熱部品のエキゾーストマニホールドに従来は鋳鉄が使用されていたが、エンジン性能向上による排ガス温度上昇にともない高強度化が求められ、18Cr-2Mo-Nb鋼等の開発により排ガス温度900℃以上が達成されている。

材料評価面では、物材機構のクリープデータシートをはじめとして、各関連企業が長時間データを蓄積するとともに、クリープ変形・破壊挙動の解析を基にした新たな長時間寿命予測法の提案がなされた。また、一部のフェライト系耐熱鋼では長時間経過後に強度が顕著に低下することが明らかになるなど、長時間クリープ試験の重要性と長時間クリープ強度の支配因子解明の必要性が再認識されている。

650℃級フェライト系耐熱鋼の開発では、従来鋼の使用上限温度を超えるための革新的な材料設計指針の確立が求められ、物材機構の超鉄鋼プロジェクトを中心にクリープ強度だけでなく耐酸化性、溶接継手強度、クリープ疲労寿命等に関して種々の提案がなされた。クリープ強度向上に関する最近の研究成果で特筆すべき点は、粒界近傍など部分的にでも弱い組織が形成されると局所的にクリープ変形が促進され早期に破断することが微細組織観察とクリープ変形挙動解析により明確になったこと、及び、粒界近傍の強化組織を長時間まで維持できる材料設計の指針がいくつか明確になったことである。

この指針に基づいて、高濃度ボロン添加によって粒界近傍 $M_{23}C_6$ 炭化物の長時間微細分散を狙った鋼、MX型微細窒化物のみで粒界近傍組織の安定化を狙った鋼、炭窒化物を利用しないで $Fe_2(Mo, W)$ Laves相等の金属間化合物のみを微細分散させた鋼等が提案されたが、現在も継続されている長時間クリープ試験の結果や組織安定性に我が国のみならず欧米でも注目している。耐酸化性、溶接継手強度、クリープ疲労特性についても特性向上の指導原理が明示され、それに基づいて研究開発が進められている。

長時間クリープ強度評価に関しては、特に、焼戻マルテンサイト組織を有する高強度9-12Cr系鋼では長時間経過後にクリープ強度が顕著に低下する現象が550℃ないしより高温でしばしば現れることが日欧で明らかとなり、クリープ強度低下をもたらし組織因子の解明が、最新のエネルギーフィルター型透過電顕等による解析も積極的取り入れて進められた。

最近開発された高強度9-12Cr鋼は、焼きならし焼戻熱処理によって、高転位密度のラス、ブロック組織に微細な $M_{23}C_6$ 炭化物や M_2X 、MX型炭窒化物が分散した、析出強化度の高い組織に調質されている。しかし、クリープ中にこれら微細析出物の粗大化が進行したり、熱力学的により安定で粗大な M_6X 型炭窒化物、Z相(Cr(V, Nb) N型複合窒化物)、 $Fe_2(Mo, W)$ Laves相の析出に伴って $M_{23}C_6$ や M_2X 、MXの再固溶や分布の不均一化が進行すると、析出物による転位、ラス境界、ブロック境界のピン止め力が低下し、クリープ強度が急激に低下することが明らかになった。最近、Z相の析出に伴う微細な M_2X 、MXの再固溶に関心が集まっている。

長時間クリープ強度評価の研究進展と相まって、短時間データから10万時間クリープ寿命を予測する研究にも顕著な進展が見られた。寿命予測にはLarson-Miller法等の時間-温度パラメータ法(TTP法)が広く用いられてきたが、従来のTTP法では長時間クリープ寿命を正しく評価できず、過大評価するケースが多いことが次第に明らかになってきた。これを改善するために、クリープ破断データを同じ温度依存性、すなわち、同じ活性化エネルギーを示す領域ごとに区分して解析する手法、及び、高応力では非時間依存型塑性変形の寄与が大きいため、引張試験の0.2%耐力の1/2を基準にしてクリープ破断データの領域を分割し、低応力域のデータのみを用いて解析する手法が提案された。

両手法ともTTP法に基づくが、全データを用いるのではなく、同じ変形・破壊挙動を示す領域のデータを用いている点に特徴があり、寿命予測の精度が向上した。長時間クリープ強度評価や寿命予測の進展は、実機プラントで耐熱鋼を長期間安全に使用する上で有益な指針を与えるだけでなく、長時間でクリープ強度低下を示さない次世代高強度鋼の開発にもフィードバックしていくと期待される。

(2) 耐熱材料

耐熱材料はここ10年において、その主要機器であるジェットエンジンのタービン入口温度が1,600℃を超え、発電用ガスタービンは1,500℃に到達するといった高温化が進む中で、更なる発展を遂げている。ここでは、この開発動向を超合金を中心に述べるとともに、それを越える耐熱性が期待さ

れている先進材料についても展望する。

超合金は、強化析出相として γ' 相 [$\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$] が利用されるようになって以来、Ni 基合金を中心に合金設計技術、製造技術の進歩と相俟って大きな進歩を遂げてきた。ジェットエンジンのタービン動・静翼は近年複雑な冷却構造を有し精密鑄造で作られているが、1960年代末から70年代にかけて一方向凝固法を用いた柱状晶翼 (DS翼) が、また1980年代には単結晶翼 (SC翼) が実用化されている。

ここでは、結晶粒界をなくし粒界強化元素の添加を最小限あるいはなくすことで合金の融点降下を抑えるとともに、 γ' 相を完全固溶させる溶体化熱処理を可能とし高温強度改善を図った第一世代単結晶合金、これにReを3%添加し改善を図った第2世代単結晶合金、また5~6%までReを増量しさらに改善を図った第3世代単結晶合金が開発され実用化されている。しかし、このReを中心とした耐火金属の多量添加はTCP (Topology Closed Pack) 相の析出、あるいはコーティング層と基材の間に形成される拡散層下に γ' 相中にP相と γ 相がセル状に析出したコロニー (SRZ: Secondary Reaction Zone) の形成を誘発し逆に強度低下をきたした。このため、添加量の調整および新たな元素の模索が行われており、現在Ruに代表される白金族元素を中心に次世代単結晶合金の開発競争が行われている。

発電用ガスタービンへのDS/SC翼の適用は、ジェットエンジンから各々約10年の遅れで実用化され、最新鋭機のタービン動・静翼にはSC翼が用いられるようになってきている。ここでは、高温での長時間組織安定性に優れ耐食性も配慮したCrを5~12%含有する第1世代あるいは第2世代単結晶合金が用いられている。今後高温化の流れの中で、さらに優れた超合金が求められるが、加えて冷却の強化に伴い生じる過大な熱応力に起因する熱疲労も無視できなくなっており、この点も考慮した材料設計が大型翼の製造技術およびその補修/再生技術と共に重要となってくるであろう。

ジェットエンジンのディスク材には、 γ'' 相 (Ni_3Nb)、 γ' 相を主強化析出相とするNi-18Cr-3Mo-18.5Fe-0.9Ti-0.5Al-5.1 (Nb+Ta) に代表されるNi基鍛造合金が1970年代から用いられており、1990年代後半には発電用大型ガスタービンにも適用されるようになってきている。ここでは均質で清浄なインゴットが必要なことからVIM (Vacuum Induction Melting) /ESR (Electroslag Remelting) /VAR (Vacuum Arc Remelting) のトリプルメルトが用いられ、現在約10トンまでのインゴット製造が可能となっている。なお、ジェットエンジンではさらに耐熱性の優れたものとして粉末冶金法を用い体積率が約40~60%の γ' 相を有する合金が実用化されている。今後さらに高温化を図るために、これらの製造プロセスも含めた開発が進められることになるで

あろう。

さて、この超合金に代わる先進材料の研究開発はこれまでと同様この10年においても継続して行われてきている。金属間化合物ではTiAl、NiAlが、また延性・塑性加工性に課題を残し実用化検討が遅れているNbならびにMoの金属間化合物も候補材として挙げられる。この中ではTiAl合金が軽量で比強度に優れ900℃程度までの耐熱性を有することから積極的に開発が進められており、ジェットエンジンでは試作実証試験を終えるまでになっている。また、自動車用ターボチャージャーにはすでに1990年代末より適用が開始されている。

高融点金属合金は、概して密度が高く、溶解・製造が困難、耐酸化性が悪い等の課題を有するが、Nb合金は密度がNiよりやや小さく融点はNiより約1,000℃も高いため有望視されてきた。近年、NbにSiを添加しNb固溶体と Nb_5Si_3 の複合組織とした一方向凝固合金、またW、Moを添加しさらに高強度化を図った合金などが提案されてはいるが、実用化への課題を解決するまでには至っていない。

酸化物分散強化形合金 (ODS: Oxide-Dispersion-Strengthened alloys) は、メカニカルアロイングを用い安定な微細酸化物 Y_2O_3 を耐熱合金のマトリックス中に分散させた合金であり、単純なNi基あるいはFe基、またはNi基超合金をマトリックスにしたものまで開発された。しかし、製法的に冷却構造の物には適さず、またコストも高いことから完全に普及するまでには至っていない。しかし、耐食性に優れることから、ガラス工業、化学プラント、加熱炉関係への適用が図られている。

セラミックスは、モノリシックでは Si_3N_4 を中心に小型ガスタービンへの適用化研究が国家プロジェクトを中心に進められている。ここでは脆性材料の設計法を含めた検討が行われている。材料面では1990年代後半に発表された一方向凝固酸化物共晶複合材料 (MGC: Melt Growth Composites) が注目される。共晶組成の酸化物複合材料を一方向凝固し、酸化物の単結晶同士が三次元的に連続して複雑に絡み合う組織構造としたもので、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) 系では室温強度350~400 MPaが融点直下の1,800℃まで維持されている。

一方、セラミックス基複合材料 (CMC: Ceramic Matrix Composites) は軽量かつ高耐熱性を有することから次世代ジェットエンジンの性能向上に欠かせない材料として期待されている。セラミックス単体の低靱性を繊維とマトリックス間に中間層を設けることにより大幅に向上させている。その耐熱性は酸化物系では1,200℃、非酸化物系では1,400℃といわれており、ジェットエンジンのタービンベーン、ブリスク、燃焼器等への適用化研究が活発に行われている。なお、

最も高い温度まで使用できると期待されている軽量耐熱材料は炭素繊維強化炭素複合材料 (Carbon Carbon Composites) である。航空宇宙機器への適用が期待されているが、実用化するためには製造方法や耐酸化性等の課題が依然として残されている。

4.2.5 ステンレス鋼

(1) 需要動向

ステンレス鋼の適用分野は多岐にわたり、その要求性能も分野ごとに異なる。ここでは用途別の動向と最近開発された材料の特徴を述べる。1990年代の10年はバブル崩壊後、経済が低迷していた時期であるが、ステンレス鋼の生産量は図4.9に示すように伸び率は低いものの伸び続けており、熱間圧延鋼材の生産実績は300万トンを超えるまでになっている。

用途別の需要は、1990年頃の統計資料では厨房機器が250千トン前後と最も大きな市場だったが、この10数年で輸送機器が伸び率、量とも大きくステンレス鋼需要の最大の用途となっている。用途別需要の伸びは経済や技術の発展と密接に関係しており、電子機器の進歩や環境問題、消費者意識の変化を反映してステンレス鋼の用途も変遷しつつある。近年では、量は少ないが家電機器用や精密機器で約1.7倍の伸びを示している。

(2) 輸送機器

現在ステンレス用途の20%近くを占め最も大きな市場となった輸送機器分野では環境問題への取り組み、メンテナンスなどの削減を目的としたステンレス鋼の適用拡大が進んだ。

輸送機器の中でも自動車用途が80%以上を占め、排気ガ

ス規制や車体軽量化の動きと併せて、重量のある鋳鋼製エキゾーストマニホールドの軽量化、マフラーなどの腐食環境の厳しい部位での長寿命化などを目的にこの10年で急速にステンレス化が進行し、かつ要求性能に応じたステンレス鋼の開発が積極的になされた。

表4.1に自動車におけるステンレス鋼の開発鋼種を示すが、開発鋼種のJIS化も同時に進行し部位毎に多彩なステンレス鋼が使用されている。例えばエキゾーストマニホールドでは排気ガスの高温化に対応して、高温での熱疲労特性に優れたSUS444系の鋼種が開発され、さらなる高温化には耐酸化性や強度にすぐれたオーステナイト系ステンレス鋼 (SUSXM15J1や23Cr-11Ni-N) を使った2重管エキマニも採用されている。また、コストと性能が両立するSUS429系のステンレス鋼が開発され主流となりつつある。フレキシブルパイプはバルジ加工が施されるため高延性のオーステナイトステンレス鋼が使用され、触媒担体にはセラミックスに代わり高Al系のステンレス箔も採用され、その厚みも20 μmまで薄くできる製造技術が開発されている。

また、近年自動車の燃料給油管においてはメッキ鋼板に代わり耐食性で有利なステンレス鋼の使用が指向されており、SUS436L系の材料が使用されはじめている。燃料給油管ではフェライト系ステンレス鋼としては極めて厳しい拡張性が要求される。この要求に対して素材成分の高純度化と熱間圧延、冷間圧延条件の最適化による素材加工性向上を達成するとともに、溶接管製造技術との組み合わせにより優れた拡張性を達成した材料が開発されている。この技術により一体構造の燃料給油管の製造が可能となっている。

自動車の新しい動きとして、環境問題の高まりから燃料電池車が期待されている。燃料電池のセパレーターには従来カーボンセパレータが使用されてきたが、薄肉化、量産性やコスト問題などを解決するためステンレスセパレータの研究が

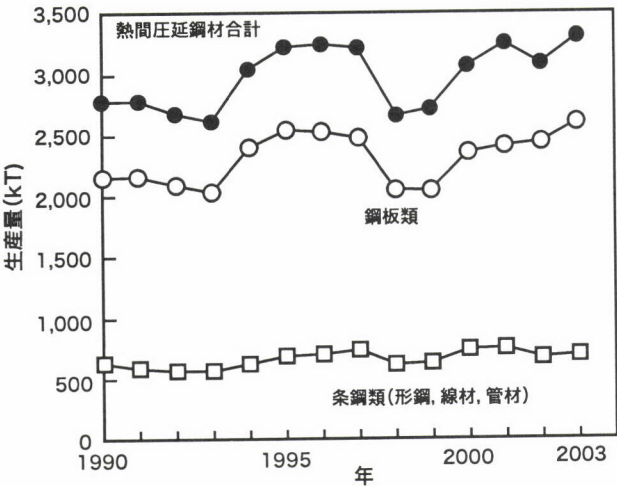


図4.9 ステンレス鋼の生産量推移

表4.1 自動車用ステンレス鋼の適用状況

	1985	1990	1995	2000
エキゾーストマニホールド	鋳鉄			
	SUH409L			
	SUS430J1L			
	SUS444系			
	SUS429系			
フレキシブルパイプ	2重管エキマニ内管			
	SUSXM15J1, 23Cr-11Ni-N			
	SUS304			
触媒担体	セラミック			
	20Cr-5Al			
マフラー	溶融 Al メッキ鋼板			
	SUH409L			
	SUS436L			
燃料給油管	SUS436J1L			
	SUS436L			