論 説

UDC 669.14.018.25 669.14.018.44
669.14.018.58 669.14.018.82
669.14.018.85

最近の特殊鋼 (II)

澤 繁 樹*

Review on Recent Special Steels (Part II)

Shigeki Sawa

Tool steels. Stainless steels. Heat resistant steels. Magnetic materials.

1. 緒 言

工具鋼, 耐食材料, 耐熱材料, 電磁材料など特殊な用途に用いられる材料の近年の発達は, およそ4方向からのアプローチによって推進されてきた。蓄積されたデータと理論を駆使し, より使用目的に密着した合金設計, 炉外精錬や再溶解法など製造工程の改善による製品特性の向上, 粉末冶金, 非晶質合金などで代表される新しい発想による製品, および新しい表面処理技術の適用による実用特性の改良である。

これらのアプローチによって, 新しい材料の開発は枚挙に暇ない状態であるが, 価格を含めて入手のし易さ, 使い易さおよび性能の調和においてなお需要家の要求を満し得ないものが多い。材料開発者の最も腐心するところである。

2. 工 具 鋼

2. 1 熱 間 工 具 鋼

熱間工具鋼は自動車部品や家電部品の大量生産に伴って高寿命鋼が要望されるとともに, 環境保全の見地からも検討が加えられてきた。熱間型打鍛造用金型は従来より主に SKT4 (0.55C-1.8Ni-0.85Cr-0.4Mo-0.1V) が用いられてきたが, 環境保全の意味でハンマー鍛造からプレス鍛造に移行す

る傾向にある。したがって靱性よりも耐軟化性の向上を意図した工具鋼の開発がなされてきた。2次硬化を利用して耐軟化性を向上させた 0.28C-3Cr-1Mo-0.4V 鋼 (G F77) はこの一例であり, 耐摩耗性が高いため実用型で高寿命を得ている。

型打鍛造型のほかに, 高寿命のニーズに沿って開発された鋼種に, 軟窒化性, 耐軟化性の優れるアルミ熱押型用 0.4C-3Cr-2Mo-1V 鋼 (D H 71)¹⁾, 耐ヒートチェック性の優れるダイカスト型用 0.4C-5Cr-2Mo-1V 鋼 (D H 2 1)²⁾ が挙げられる。これらは, いずれも Mo, V の2次硬化により耐軟化性を高めたものである。

このような高寿命化の動きとともに, 金型製造コストの低廉化ニーズも注目値する。快削工具鋼は, このニーズに合致するものとして適用範囲が拡大しつつある。最近, 靱性を損なわずに被削性を改善できる Ca 快削工具鋼が実用化され³⁾, SKD61, SKT4 などに応用されている。Ca 快削鋼の V-T 線図の例を第1図に示す。

2. 2 冷 間 工 具 鋼

従来より SKD11 が主流であるが, 冷間プレス, 鍛造技術の進歩, および大量生産化に伴って金型への要求が一層苛酷になりつつある。このため工具としては靱性の高い鋼種を用い耐摩耗性は表面処理で補う動向にあると思われる。靱性向上のため1次炭化物を減少させた 8Cr 系工具鋼⁴⁾はこの例であり, 表面処理性, 被削性, 研削性に優れるため適用範囲が広い。SKD11 を用いて, 割れ, 欠

昭和53年12月5日 受付

*大同特殊鋼株式会社常務取締役, 研究開発本部長, 工博

切削条件

工 具: P 25 20 ϕ $\times$ MT2 $\times$ 1 枚刃

送り速度: 0.15mm/rev.

切削深さ: 2.0mm

切 削 油: なし (乾式)

寿命判定: フランク摩耗幅=0.3mm

硬 さ: GFA, GFA-Yとも Hs52

第1図 超硬エンドミルによるV-T線図

第2図 冷間工具鋼のシエンク式両振り曲げ試験におけるS-N曲線

けの生じ易い工具に活用されていくものと思われる。さらに靱性向上を狙って組成をマトリックス鋼系とした0.65C-3Cr-2Mo-0.4V鋼(DC51)⁵⁾は疲労強度もきわめて高いのが特徴である。ほかの冷間工具鋼と比較したS-N曲線を第2図に示す。

熱間工具鋼と同様に低廉化のニーズも大きく、自動車用板金プレス、抜き型などにフレームハード用鋼の使用量が増大しつつある。フレームハードは簡便な熱処理法で納期短縮にもなるため、各社でフレームハード用鋼の開発がなされてきた。適正焼入温度範囲が広く、焼入性の良いことが必須であり、GO5⁶⁾もこの狙いに沿って開発されたフレームハード用鋼である。

2. 3 高速度工具鋼

高速度工具鋼は高価な合金元素を多く含むた

め、その合金設計に当っては、価格も大きな要因である。従来より主体はSKH9とSKH55であるが、いずれもWを6%含むため近年のW価格の高騰により、高Mo系に移行する動向にある。AISi-M7(1C-4Cr-1.75W-8.75Mo-2V)は、この意味で使用量が増加しているが、高Mo系では棒状のM₂C炭化物が出現するため、今後微細化の対策が必要と思われる。

また冷間ダイス鋼と同様、靱性向上を狙ったマトリックス鋼⁷⁾が多く活用されるようになり、特に冷鍛用工具として量産用に用いられている。

高速度工具鋼のもう一つの動向は、合金設計のみならず、製造プロセスの研究が盛んに行われてきたことである。ESRは組織の微細化、機械的性質の方向性軽減のため^{8),9)}、高速度工具鋼の製造に当っては、もはや常識化しており、炭化物微細化の試みも行われてきた¹⁰⁾。さらに種々の方法で製造した粉末を用いて焼結高速度工具鋼の製造が実用化された¹¹⁾。炭化物の均一化、被研削性の改善、耐チップング性の向上などが評価され、今後、切削工具に活用されていくものと思われる。

2. 4 プラスチック金型用鋼

プラスチックは家庭用製品から工業用材料まで、その使用量はきわめて多い。プラスチック金型は比較的新しい分野であるが、用途に応じてSC, SCM系から高合金まで使い分けられている。この中で特色ある鋼種に0.13C-1.6Mn-1.0Cu-3.25Ni-0.10Cr-1.1Al-0.28Mo鋼(NAK55)¹²⁾がある。これは真空溶解で作られる時効硬化鋼であり、HrC40が得られ、鏡面性、シボ加工性にも優れている。

2. 5 表面処理

熱間、冷間工具を問わず、近年の表面処理の進歩にはめざましいものがある。従来、窒化、浸炭程度であったのが、窒化、浸炭のほか軟窒化、浸流、ボロン化¹³⁾、炭化物被覆¹⁴⁾など多岐にわたって工具への適用が試みられている¹⁵⁾。特に軟窒化法¹⁶⁾(タフトライド、ガス軟窒化¹⁷⁾、イオン窒化)、炭化物被覆は種々の量産用工具において効果を示している。

最近、高速度工具鋼などにTiN, TiC層を物理的、化学的に形成させるPVD, CVD法が実用化され¹⁸⁾、切削工具に適用されてきた。今後、表面処理は、耐摩耗性向上、焼付防止などの目的で、

第1表 最近のステンレス鋼

分類	鋼種	化学組成	系	特徴
耐食用	SUS304ULC	0.008C-18Cr-8Ni	オーステナイト	炭素と窒素を0.01%以下にし耐粒界腐食性がよい。
	SUS316ULC YUS170	0.01C-17Cr-12Ni-2.5Mo 24.7Cr-13.5Ni-0.9Mo-0.35N	〃 〃	〃 含窒素オーステナイト系ステンレスで、特に耐孔食性、耐海水性に優れる。
	RS806	29Cr-2Ni-4Mo	フェライト	Cl ⁻ を含む、耐応力腐食割れ性、耐孔食性に優れる。特に耐海水性はTiに匹敵する。
	YUS190	0.008C-19Cr-2Mo	〃	極低炭素フェライト系ステンレスで、耐食性はSUS304と同等であり、耐応力腐食割れや耐孔食性に優れる。
	DSD1H DCS1	24Cr-5.5Ni-1.5Mo 24Cr-8Ni-3Mo-2Cu	フェライト・オーステナイト 〃	一般耐食性、耐応力腐食割れに優れ、また強度も高い。 耐硫酸・耐孔食に優れた2相鋳鋼で、特に耐エロージョン腐食性はハステロイCと同等である。
高強度用	DSP1H	13Cr-7Ni-1.0Ti-0.8Al	マルテンサイト	冷間加工性に優れたPHステンレス鋼で耐食性も優れる。
	RDS310	13Cr-4.5Ni-3Cu	〃	時効硬化型プラスチック金型用鋼で被削性も優れる。
	RS420	0.7C-12Cr-Mo	〃	SUS440Cと同等の強度を有し、靱性にも優れる。
快削用	RDS732F	20Cr-2Mo-S-Pb-Te	フェライト	SUS303と同等の耐食性を有する超快削ステンレス鋼で、その被削性は、黄銅にも匹敵する。
	RDS312F	18Cr-8.5Ni-Cu-Se	オーステナイト	被削性はSUS303、耐食性はSUS304と同等のステンレス鋼である。
	RDS314F	17Cr-12Ni-2.5Mo-Cu-Se	〃	被削性はSUS303、耐食性はSUS316と同等のステンレス鋼である。
冷間加工用	DSK3U	17Cr-12Ni-2.5Mo-Cu	オーステナイト	SUS316と同等以上の耐食性を有し、かつ冷間加工してもオーステナイトが安定なヘッダー用ステンレス鋼。
極低温用	DCS5	27Mn-10Cr	オーステナイト	極低温で強度、靱性に優れ、LNG用のバルブ、ポンプに適している。
耐熱用	18SR	18Cr-0.5Ni-2Al-0.4Ti	フェライト	耐酸化性に優れるため、炉材や高温排気系用に使われる。
	430Zr	17Cr-0.5Si-0.5Zr	〃	Zrの添加によって1000℃までの耐酸化性を改善したもので、加工性もよい。
	309B	23Cr-15Ni-2Si	オーステナイト	SUS309のSiを高めて耐酸化性、耐浸炭性、耐サルファアタック性を改善したもの。
原子力用	304B	18Cr-8Ni-1.5B	オーステナイト	中性子吸収用としてボロンを含み、かつ耐食性に優れる。
	RS810	25Cr-5Ni-1.5B-V	フェライト・オーステナイト	304Bより耐食性、熱間加工性に優れる。

ますます活用されていくと思われる。

3. ステンレス鋼

近年、各種産業の発展に伴い、耐食性をはじめ溶接性、加工性などに対する要求が厳しくなり、さらにこれらの特性を二つ以上具備した材料が要求されるようになった。第1表は、これらの要求に対して開発された新鋼種を特徴別に分類したものである。各種耐食性を改善したものとしては、AODやVOD法などの溶解法によって炭素や窒素およびその他の不純物を十分低減できるようになったことが大きな特徴である。すなわち現在では、C+Nが300ppm以下のものが容易に製造できるようになり、オーステナイト系ステンレス鋼だけでなく、フェライト系ステンレス鋼に対してもC、Nを始めとする不純物規制によって耐食性および機械的性質に優れた合金が開発されている。例えば、AOD法で18Cr系フェライトステンレス鋼を溶製した場合、C 150ppm以下、N 100ppm以下、S 20ppm以下、H 4ppm以下、O 30～60ppmが得られる¹⁹⁾。またこのほか、電子ビーム溶解やプラズマ溶解法によってさらに不純物を低下した高純度のステンレス鋼も得られている。

第1表に掲げたRS806は、Cl⁻を含む環境における耐孔食および耐応力腐食割れ性に優れ、特に耐孔食性は第3図に示すようにTiに匹敵するといわれている。また18Cr系では、YUS190のようにC+Nを200ppm以下に抑えて、耐応力腐食および耐孔食鋼として実用化がすすんでいる²⁰⁾。Ni節減の意味からも今後フェライト系ステンレス鋼の需要はますます大きくなると考えられるが、溶接性および溶接部の機械的性質の改善が残された問題であろう。一方、フェライト系とオーステナイト系の両方の長所を取り入れたフェライト・オーステナイト2相ステンレス鋼は、SUS316以上の一般耐食性を有するとともに、強度が高くまた耐応力腐食割れや耐孔食性に優れており、これらの特徴を生かした用途への実用化が進んでいる。例えば、DCS1は第4図に示すようにハステロイCと同等の耐エロージョン腐食性を有しており、排煙脱硫装置のポンプ等に使用されている²¹⁾。

高強度ステンレス鋼は、マルテンサイト系および析出硬化型ステンレス鋼が各種開発されてい

第3図 RS806の耐孔食性

第4図 DCS1の耐エロージョン腐食性

る。第1表中のDSP1HとRDS310は、いずれも時効硬化型であり熱処理条件によって強度レベルを変えることができる。またRS420は、12Cr系マルテンサイトステンレス鋼の強度アップとSUS440Cの靱性を改善したものであり、疲労強度も高

切削条件

工 具：超硬K10 (0, 6, 6, 6, 8, 0, 0.2^R)

送り速度：0.15mm/rev.

切削深さ：1.0mm

切 削 油：なし

寿命判定：フランク摩耗幅=0.1mm

第5図 RDS732F の超硬工具寿命

い低廉ステンレス鋼である。

一方、快削ステンレス鋼に関しては、さらに被削性に優れた超快削ステンレス鋼の開発や、快削鋼であっても耐食性がそれ程劣化しない新鋼種の開発に対する要望が強い。RDS732F は SUS303 なみの耐食性を有し、かつ第5図に示すように超々快削鋼 SFC3FT (0.1C-1Mn-0.25S-Pb-Te) と同等以上の特性を有し、黄銅につぐ被削性を有するステンレス鋼として注目される²²⁾。RDS312F と RDS314F は、SUS303 と同等の被削性を有し、しかも耐食性は SUS304, SUS316 と同等の新しいステンレス鋼である。

冷間加工用特にヘッダー用オーステナイト系ステンレス鋼は、溶製法の進歩によりSやOの不純物の低減によってヘッダー性は著しく改善されている。したがって、今後はより変形抵抗が小さくより低廉の方向へ指向すると考えられる。SUS304 に Cu を添加した合金が新しく SUSXM7 として JIS 鋼種に制定されたが²³⁾、ほかにも SUS316 系のヘッダー用ステンレス鋼として開発された DSK3U は、オーステナイトが安定であり冷間加工用非磁性鋼として使用できる。

オーステナイト系ステンレス鋼は、低温靱性に優れているため低温用鋼として使用される。近年、クリーンエネルギーとしての LNG の使用が増加し、LNG 船や陸上タンク用バルブとして SCS13, SCS14 や高マンガンオーステナイト鋼が開発され、実用化テストが進んでいる。

自動車排ガス処理用に、耐熱ステンレス鋼が各種開発されている。JISにも、SUSXM15J1 として

高 Si 鋼が制定されたが、このほかにも 1 000℃までの優れた耐酸化性を得るために Si, Al, Ti, 希土類元素などを添加した鋼種が開発されている。

ステンレス鋼は、原子力産業にも多量使用されているが、SUS304 や SUS316 などでは誘導放射能を避けるため Co を 0.05 から 0.1% 以下に規制する特別の仕様が要求される。さらに放射線による損傷や、スウェリングの問題は、これから原子力関係に使用する際の大きな問題であろう。また、核燃料保管用ピットに使用される中性子吸収用材料として、含ボロンステンレス鋼が開発されている。

ステンレス鋼粉末は、噴霧技術の進歩に伴い種々の特性を有する粉末の製造が可能となった。例えば、圧縮性を改善した SUS304L-Cu や 17Cr-7Ni-N 鋼、フェライトの耐食性を強化した 18Cr-2Mo 鋼や 23Cr-1Mo 鋼、高強度材の SUS 329J1 および 17-4PH 鋼、被削性に優れた極低炭素 SUS303 などが開発されている。

4. 耐熱鋼および耐熱合金

産業の進歩に伴い耐熱鋼および耐熱合金の用途は航空機および工業用ガスタービンを始めとし、原子力、自動車、製鉄、石油化学などの各種高温用部品として多岐にわたっている。しかも各部門とも装置の大型化および高効率化の傾向をたどるにつれて、耐熱材料に要求される性能も一段と厳しいものとなってきた。また、新しいエネルギーの利用および省資源の立場から、新しい耐熱材料の開発も要求されている。

第6図に耐用温度の変化からみた耐熱合金の進歩を、第2表には用途からみた耐熱鋼および耐熱合金の最近の傾向を示す。また、第3表に代表的な耐熱合金の化学組成を示す。

耐熱材料の中で最も使用条件の厳しい航空機用ガスタービンの動翼には、析出強化元素の Al および Ti を多量に添加した IN-100 および Alloy 713C などの Ni 基鋳造合金が使用されている。新しい動翼用合金として、Co および W を添加して高温強度を改善すると同時に、Cr および Ti 含有量を増やし高温耐食性も改善した René80 や IN 738²⁴⁾が開発されている。また、鋳造合金に Hf を添加すると靱性が著しく向上することが見だし

れ^{25)~29)}, Hf を添加した Mar-M200+Hf や TRW-VIA が開発されている。さらに, Wおよび Ta を添加し, Ti/Al 比を適正化して Udimet500 の高温耐食性と IN-100 の高温強度とを兼備した IN792 が開発されている³⁰⁾。しかし, エンジン効率を高めるため, さらに高温強度の優れた超耐熱合金の開発が急がれている。この要求に答えるためには合金設計だけでは不十分であり, 新しいプロセスとの組み合わせで考えられている。例えば, 主応力と直角方向の粒界を減らし, クラック

の発生と伝播を遅らせ高温強度を向上させる一方向凝固法^{31), 32)}が Mar-M200+Hf および NX-188 などに利用されており, また, Mechanical Alloying 法を利用して, Y_2O_3 や ThO_2 などの酸化物による分散強化を図り, 高温まで強度低下の少ない Inconel MA753 および MA754³⁴⁾などが開発されている。このうち一方向凝固法を利用した Mar-M200+Hf は次期戦闘機 F-15 のタービンブレードおよびペーンに実用化されている³⁵⁾。

第2表 耐熱鋼および超耐熱合金の最近の傾向

用途		耐熱鋼	耐熱鋳鋼	Fe基超耐熱合金		Ni基超耐熱合金		Co基超耐熱合金
装置	部品名			弱析出型	強析出型	弱析出型	強析出型	
ガスタービン用	燃焼器			N-155 InconelMA956		Hastelloy X Nimonic86 TD-Ni	Inconel625 Inconel617 René41	HaynesAlloy No.188
	タービン動翼						U-500, U-700 IN100, Alloy713C Mar-M200+Hf InconelMA753	X-40(HS31) S816
	タービン静翼					InconelMA754	Alloy713C Mar-M200+Hf	X-40, X-45 FSX-414
	タービンディスク	H53V		Timken16-25-6	Discaloy Incoloy901		IN100(PM) Waspaloy Astroloy AF2-1DA	
	コンプレッサー							
工業用	燃焼器					HastelloyX		
	タービン動翼						InconelX-750 Inconel700 U-520, U-710 TM47, TM49	
	タービン静翼			N-155			U-500	X45
	タービンディスク	Ni-Co-Mo-V 3.5Ni-Cr-Mo			A-286 Discaloy			
原子炉				Incoloy800 RS513		Hastelloy X Inconel617	Inconel625 Inconel718 InconelX-750	
ガソリンエンジン	サーマルリアクター	SUSXM15J1 18SR SUS310		Incoloy800	HN11 (A-286)	InconelX-750		
	排気弁	21-2N 21-4N		CRK22	VMS513		Nimonic80A Inconel751	
	吸気弁	SUH3, SUH1 SUH11						
ディーゼルエンジン	プレコンパクション チャンバー	RS735		RS609 N-155			Nimocast80	HA36 UMCo50
	排気弁	HN8 21-4N			VMS513 RS214		Nimonic80A Inconel751	
ボイラー	加熱器管用 スパーサー	AN15	SCH13 DCN50			Inconel601		
化学プラント	ヒーターチューブ		HK40, HP	Incoloy800				
	サポート		SCH13 DCN50					
工業用炉	熱処理部品	NCF54	SCH13 SCH22(HK40) DCH21	Incoloy800				UMCo50 UMCo51
	スキッドライダー		RS727 RS802					UMCo50
	ハースローラー		HK40, Monel Supertherm RS609					
蒸気タービン	ブレード	SUH616 SUH630						
	ボルト	SUH616 H-58			Refractaloy26			

(注) MA: Mechanical Alloying, P.M.: 粉末冶金

第3表 超 耐 熱 合 金 の 化 学 組 成

	(wt %)													
合金	C	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ta	Ti	Al	B	Zr	Fe	その他
AF2-1DA	0.35	残	12	10	3.0	6.0	—	1.5	3.0	4.6	0.015	0.10	<0.5	—
Alloy 713C	0.12	"	12.5	—	4.2	—	2.0	—	0.8	6.1	0.012	0.10	—	—
HN11 (A-286)	0.05	26	15	—	1.25	—	—	—	2.15	0.2	0.003	—	残	0.3V
IN-100	0.18	残	10	15	3.0	—	—	—	4.7	5.5	0.014	0.06	—	1.0V
" 738	0.17	"	16	8.5	1.75	2.6	0.9	1.75	3.4	3.4	0.01	0.10	—	—
" 792	0.21	"	12.7	9.0	2.0	3.9	—	3.9	4.2	3.2	0.02	0.10	—	—
Incoloy 901	0.05	42.7	13.5	—	6.2	—	—	—	2.5	0.2	—	—	残	—
Inconel 700	0.12	残	15.0	28.5	3.7	—	—	—	2.2	3.0	—	—	—	—
" X-750	0.04	"	15.5	—	—	—	1.0	—	2.5	0.7	—	—	7.0	—
" 751	0.05	"	15.5	—	—	—	1.0	—	2.3	1.2	—	—	7.0	—
" MA753	0.05	"	20	—	—	—	—	—	2.5	1.5	—	—	—	1.3Y ₂ O ₃
" MA754	0.05	"	20	—	—	—	—	—	0.5	0.3	—	—	—	0.6Y ₂ O ₃
M8B(Refractaloy26)	0.03	38	18	20	3.2	—	—	—	2.6	0.2	—	—	残	—
Mar-M200+Hf	0.15	残	9.0	10	—	12.5	1.8	—	2.0	5.0	0.015	0.05	—	2.5Hf
Nimonic80A	0.04	"	19.5	—	—	—	—	—	2.5	1.4	—	—	—	—
NX188	0.04	"	—	—	18	—	—	—	—	8.0	—	—	—	—
René 80	0.17	"	14	9.5	4.0	4.0	—	—	5.0	3.0	0.015	0.03	—	—
RS513	0.20	30	20	—	3.0	1.0	1.0	—	—	—	—	—	残	—
" 727	0.30	24	28	7.0	—	3.0	1.0	0.8	—	—	—	—	"	—
" 802	0.07	21	28	23	—	2.2	—	—	—	—	—	—	"	—
TRW-VIA	0.13	残	6.0	7.5	2.0	5.8	0.5	9.0	1.0	5.4	0.02	0.13	—	0.5Re, 0.43Hf
Udimet 500	0.08	"	19	18	4.0	—	—	—	3.0	3.0	0.005	—	—	—
" 520	0.05	"	19	12	6.0	1.0	—	—	3.0	2.0	0.005	—	—	—
" 710	0.07	"	18	15	3.0	1.5	—	—	5.0	2.5	0.02	—	—	—
UMCo 50	0.08	—	28	50	—	—	—	—	—	—	—	—	残	—
VMS513	0.08	40	27.5	—	—	—	—	—	2.5	1.0	0.006	—	残	10Mn
Waspaloy	0.07	残	19.5	13.5	4.3	—	—	—	3.0	1.4	0.006	0.09	—	—

タービンディスクには高温引張強度の優れた Incoloy 901 および Waspaloy などの強析型 Ni 基鍛造合金が使用されている。最近になって、さらに出力/重量比を上げるために、Wや Ta を添加して高温強度を改善した AF2-1DA や粉末冶金と超塑性とを利用した Gatoriging 法³⁶⁾による IN100、熱間加工時に η 相 (Ni₃Ti) などの金属間化合物の利用を図った Minigrain-Processing 法³⁷⁾による Incoloy 901 などが注目されている。

一方、発電用ガスタービンの動翼には高温部に Udimet 500, 520 および 710 などが、低温部に InconelX-750および700などが使用されている³⁸⁾。³⁹⁾しかし、省資源の立場からガスタービンの廃熱を利用して蒸気タービンを運転し熱効率を高めようとする複合ガスタービンの考えがあり、そのためにはガスタービンの入口温度が1100℃以上であ

るガスタービンの開発が必要とされている³⁸⁾。この高効率ガスタービンの開発のために、昭和53年には通産省の大型プロジェクトが発足し、金属材料技術研究所を中心に、前述の Ni 基超耐熱合金 IN792 より優れた高温特性を有する耐熱合金の開発が進められている。

原子炉の多目的熱利用のためには、原子炉特有の現象に対しても安全性を失わない耐熱材料の開発が必要とされている。例えば、原子力製鉄用の熱交換器用合金として Co や Ta を含まない高W-Ni 基合金および Fe 基合金の RS513 などが検討されている。

自動車に用いられる耐熱鋼は、従来バルブを主体とした二、三の部品に限られていたが、最近の排ガス規制の実施に伴い急増した。排気バルブには性能、価格などを総合して、21-4N 鋼が優れて

おり長い間使用されているが、米国では Ni を下げた低廉な 21-2N 鋼が多用されている。一方、米国の場合、大陸横断用の重負荷トラックには高温強度の優れた強析出型 Ni 基耐熱合金が使用されている³⁹⁾。また、国内においても、最近の Co 急騰問題に関連して、現在 21-4N 鋼にステライトをハードフェイスして使用している重負荷バルブに高温強度と高温耐食性が優れているためハードフェイスを必要としない Nimonic80A や Inconel751 の適用が考えられている。しかし、いずれの合金も高価な元素を多量に含有するうえ、製造が困難なため、価格的に問題とされている。この問題を解消する合金として、Ni の一部を Mn や Fe に置き換え、それによって低下する高温耐食性を Cr の増加で補った VMS513 が開発されている⁴⁰⁾。一方、吸気バルブは高 Si のマルテンサイト系耐熱鋼 SUH3 が主流であったが、最近になり Cr を下げた低廉な SUH11 が使用されるようになってきた。また、米国では、さらに低廉な SAE 3140 などの構造用鋼に冷間鍛造と表面処理の技術を組み合わせて使用している³⁹⁾。排ガス対策用のサーマルリファクターや触媒コンバーターには、それぞれ SUS310S および SUS304 が主に使用されているが、SUS310S に劣らぬ高温特性を有し、かつ低廉な材料として、高 Si の SUSXM15J1(18Cr-13Ni-3.5Si) や、高 Cr-Al 鋼の SUH21(19Cr-3Al) などが開発されている。また、これらの装置を固定する耐熱ボルトには、AOD 溶解(Argon Oxygen Decarburization)と圧延分塊を組み合わせ、製造コストを下げた SUH660(HN11)が使用されている。

1000℃以上で使用される製鉄用炉内部品には、超高温における耐食性の優れた Co 基合金 UMC050 が用いられていたが^{41), 42)}、価格および高温強度の面から、Ni 基耐熱鋳造合金が多用されるようになってきた。このために開発された合金として、UMCo50 の Co の一部を Ni に置換え、さらに W などの耐火金属を添加して高温強度を改善した RS727 および RS802 などがある。

蒸気タービン用ブレードには、減衰特性、高温強度、耐食性などが優れた 12Cr 系耐熱鋼(SUS 403, SUH616 など)が使用されている。ブレードは複雑な応力条件下で使用されるため、高い清浄度を要求され、現在では消耗電極型真空アーク溶

解が施こされているが、一部 ESR 溶解の適用も考えられている。また、ボルトには高温強度が優れ、耐応力緩和特性の優れた SUH616 や Fe 基耐熱合金 M8B(Refractaloy26)などが使用されている。

以上述べてきたように、装置の大型化および高効率化に伴い高温特性の優れた耐熱材料の開発が必要であると同時に、自動車用耐熱材料にみられるように同一特性でありながら低廉な材料の開発が求められている。前者については、単なる合金設計だけではすでに限界に達しており、新しいプロセスとの組み合わせが必要である。また、一段と飛躍するためには、Cr や Mo などの耐火金属の利用や Si_3N_4 などのセラミック材料の利用が必要となる。

5. 電 磁 材 料

現在生産されている永久磁石の主流は、依然アルニコ系の鋳造磁石とフェライト系の焼結磁石である。アルニコ磁石は、C, S などの成分調整や柱状晶化により最大エネルギー積 $8\sim 11\text{MG}\cdot\text{Oe}$ に達⁴³⁾し、 2000Oe におよぶ高保磁力も得られている。しかし Co, Ni などの原料供給が安定しないことから、安価なフェライト磁石へ移る傾向が見られる。フェライト磁石は、湿式磁場プレスによる異方性磁石において最大エネルギー積が $4\text{MG}\cdot\text{Oe}$ ⁴⁴⁾におよび、等方性に比べ異方性のしめる割合が漸増している。また共沈法による原料粉を用いて、高保磁力を得たという報告⁴⁵⁾もある。

最近これらを脅かす新しい磁石材料が開発されてきた。そのうち希土類コバルト磁石は結晶磁気異方性が強く、 SmCo_5 系では最大エネルギー積が $20\text{MG}\cdot\text{Oe}$ 以上⁴⁶⁾に達するが、次第に $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 系へと研究の重点が移りつつある。Fe, Cu などの元素を添加することにより $30\text{MG}\cdot\text{Oe}$ 級の特性も報告⁴⁷⁾されており、第3の磁石として定着しつつある。一方スピノーダル分解を利用した Fe-Cr-Co 磁石は、アルニコ磁石に匹敵する性能をもち、塑性および機械加工ができる材料として依然注目⁴⁸⁾されている。Mn-Al-C 合金に温間押出し加工により異方性を付与した磁石⁴⁹⁾は、省資源型として高い関心がもたれている。そのほかフェライトや SmCo_5 の粉末を混ぜた可撓性のプラスチック磁石など、各種材料の応用が進んでいる。

第4表 高性能プラスチック磁石の性能比較

材 質	高性能プラスチック磁石	等方性プラスチック磁石	等方性フェライト磁石
磁 性			
残留磁束密度 Br(G)	2300~2500	1520	2200
保 磁 力 B_H (Oe)	2000~2300	1200	1800
保 磁 力 H_c (Oe)	3000~3500	1600	3200
最大エネルギー積 (BH)max(MGOe)	1.2~1.4	0.5	1.0
磁束密度の温度係数(%/°C)*	-0.18	-0.18	-0.18
比 重	3.3	3~4	4.9
被 削 性	良好	良好	不可

注)*-60~100°C

最近開発された高性能プラスチック磁石の代表特性を焼結フェライトと比較して第4表に示す。

半硬質磁性材料について、従来用途はヒステリシスモータの回転子などに限られていたが、最近のエレクトロニクス技術の進歩にともない、ラッチングリレー、半固定メモリーなどの電子機器に応用されつつある。保磁力発生機構より多種の材料が知られ⁵⁰⁾ているが、そのうち析出型のアルニコ磁石は、組成、熱処理条件を適当に選ぶことにより半硬質磁性材料としても使用される。パイカロイ、Fe-Mn 系などの合金は α/γ 変態型の代表であるが、この型の材料として高い強靱性を有するマルエージング鋼⁵¹⁾が注目されつつある。

一般に軟質磁性材料と呼ばれているものの種類は多い。変圧器の鉄心などに使用するけい素鋼板は歴史が古く、特性の限界に達したと考えられていたが、最近開発された HI-B⁵²⁾は結晶配向性が優れ、電力ロスを大幅に低減せしめた。Fe-Si 合金において Si を増した 6.5Si-Fe⁵³⁾は高透磁率を示し、また Al 添加による加工性改善により高磁束密度、低鉄損材料が得られている⁵⁴⁾。

最近話題の多い磁気ヘッドの材料は PC パーマロイが主流であるが、録音テープの進歩に伴うヘッドの耐摩耗対策として、Nb, Ta, Ti などを添加した耐摩耗性パーマロイが開発され^{55), 56)}、注目された。また最近センダスト合金が耐摩耗性が高く、飽和磁束密度も高いことから再び注目を集めている。しかし著しく脆弱であるため切断、研削等の加工性の改善を主眼に、組成、製造法などに

関する研究、粉末冶金法による製造の研究などが行われている。またパーマロイや Cr-Fe などの合金粉末について粉末冶金法が適用され、省力型の焼結磁性材料が製造されている。

このほか電磁純鉄、けい素鉄など軟く、粘い材料を削りやすくし、省力化を図った材料^{57), 58)}も開発されている。第7図に実用化が進んでいる快削電磁ステンレス鋼の被削性試験結果を示す。

第8図はこれら軟質磁性材料の磁化曲線をまとめて示したものである。

この2~3年、大いに話題になっている非晶質合金は、結晶磁気異方性をもたないことから、軟質磁性材料として期待されている。特に高 Co 系において磁歪がほとんど0であることから、優れた磁性を示す。また高硬度を有するため磁気ヘッド材料として有望視され、特性の安定性、均一化および製品形状の向上などについての研究がな

切削条件

工 具 : K10

送り速度 : 0.12mm/rev.

切削深さ : 1.0mm

第7図 快削電磁ステンレス鋼のV-T曲線

されている。そのほか各種特性が生かされ、磁歪遅延材、温度センサほかの応用が検討⁶⁰⁾されている。

第5表に最近報告された非晶質合金の磁気特性をまとめて示す。このうち $\text{Fe}_{72}\text{Co}_8\text{Si}_5\text{B}_{15}$ は 2×10^6 の高透磁率を有し、高磁束密度低鉄損材⁶¹⁾として有望視されている。

最近原子力産業や磁気浮上式リニアモータなどに非磁性鋼が使用されるようになってきている。従来一般に知られている非磁性鋼は Ni を含有し高価であるため⁶²⁾、低廉でかつ強度の高い高マンガン非磁性鋼⁶³⁾が注目されるようになった。この材料には高強度、あるいは溶接性、被削性などの材質改善が進められている。鉄筋材料として適当な $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の低熱膨張特性を有する非磁性材料も開発された。

第8図 軟質磁性材料の磁化曲線

6. 結 言

以上特殊用途材料の現況を概説した。紙数の関係で十分意を尽せなかったため、常識的な記述に終わったが何かの御参考になれば幸いである。なお本稿資料は大同特殊鋼(株)研究開発本部中央研究所の諸氏の御協力に負うものであることを附記して謝意を表する。

(文 献)

- 1) 新山：日特技報，8 (1972)，39
- 2) 新山：日特技報，10 (1975)，75
- 3) 太田，木村：電気製鋼，49 (1978)，196
- 4) 荒川，鈴木：日本金属学会報，5 (1966)，269
- 5) 西村，新山，並木：電気製鋼，48 (1977)，55
- 6) 上原，並木：特殊鋼，27 (1978) 9，62
- 7) A. M. Bayer：Met. Progress，97 (1970) 4，86
- 8) T. V. Philip：Met. Tech.，2 (1975)，554
- 9) A. Randak，A. Stanz and W. Verderber：Stahl u. Eisen，92 (1972)，981
- 10) 石川，須藤：電気製鋼，48 (1977)，33
- 11) 湯河，河合：日本金属学会報，13 (1974)，131
- 12) 渡辺：電気製鋼，45 (1974)，44
- 13) H. W. Müller Stock：DEW，Tech. Ber. 3 (1977)，3
- 14) 新井，杉本，太田，小松：鉄と鋼，60 (1974)，No. 11
- 15) 最近の熱処理硬化技術：日本金属学会報，14 (1975)，75
- 16) 藤原，渡辺：日本金属学会報，16 (1977)，476

第5表 非晶質軟質磁性材料の性能比較

	$\text{Fe}_{4.7}\text{-Co}_{70.3}\text{-Si}_{15}\text{B}_{10}$	$\text{Fe}_{7.8}\text{-Ni}_{23.4}\text{-Co}_{45.8}\text{-Si}_{8}\text{B}_{14}$	$\text{Fe}_{72}\text{Co}_8\text{-Si}_5\text{B}_{15}$	$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$	$\text{Fe}_{62.5}\text{-Ni}_{15.5}\text{-Si}_8\text{B}_{14}$	市 販 合 金			
						Super-alloy	Sendust	Oriented Si-Fe	50Ni-Fe
飽和磁束密度 $B_s(\text{G})$	8400	6000	16000	16000	13000	7700	10000	20000	16000
保磁力 $H_c(\text{Oe})$	0.002	0.001	0.007	0.04	0.006	0.01	0.005	0.1	0.05
キュリー点 $(^\circ\text{C})$	250	150	470	374	460	460	500	740	500
電気抵抗 $(\mu\Omega \cdot \text{cm})$	180	175	120	145	125	10	80	47	45
鉄 損* (W/kg)	—	—	0.10	0.45	—	—	—	0.64	1.2

(注)*50Hz，13kG

- 17) 上原, 磯川, 神谷, 関谷: 電気製鋼, 48(1977), 4
- 18) 小宮: 日本金属学会報, 17 (1978), 117
- 19) 細井: 日本金属学会報, 16 (1977), 405
- 20) 下平: 日本金属学会報, 16 (1977), 157
- 21) 藤倉: 金属材料, 17 (1977) 6, 61
- 22) 藤原, 中村: 金属, 48 (1978) 10, 13
- 23) 田中: 金属材料, 17 (1977) 6, 10
- 24) U. S. Patent No. 3 459 545
- 25) U. S. Patent No. 3 005 705
- 26) D. H. Duhl and C. P. Sullivan: J. Metals, 23 (1971) 7, 38
- 27) J. Hocklin and W. Tayler: 2nd World Conf. on Invest. Casting Düsseldorf, Germany, (June, 1969)
- 28) J. E. Doherty, B. H. Kear and A. F. Gianei: J. Metals, 23 (1971) 11, 59
- 29) W. P. Danesi: TMS Spring Meeting, Las Vegas Nevada
- 30) U. S. Patent No. 3 619 182
- 31) F. L. Ver Smyder and R. W. Guard: Trans. ASM, 52 (1960), 485
- 32) B. J. Pearcey, B. H. Kear, and R. W. Smaskey: Trans. ASM, 60 (1967), 634
- 33) J. S. Benjamin: Technical paper "Mechanical Alloying"
- 34) J. S. Benjamin: Met. Trans., 1 (1970) 10, 2943
- 35) 学振123委員会研究報告, 18 (1977) 3, 189
- 36) U. S. Patent No. 3 519 503
- 37) E. C. Brown, R. C. Boettner and D. L. Ruckle: MCIC-72-10 (1972), L
- 38) 山崎: 日本機械学会誌, 79 (1976) 148
- 39) J. F. Kocis and W. M. Matlock: Met. Progress, 108 (1975) 8, 58
- 40) A. Nehrenberg, E. T. vitcha and W. M. Matlock: Met. Progress, 106 (1974) 11, 67
- 41) M. Urbain: Cobalt, No. 23 (1964) 6, 63
- 42) A Status Report: Cobalt, No. 56 (1972) 10, 123
- 43) 鎌田, 安保: 日本金属学会誌, 31 (1967), 1053
- 44) 安保, 元根, 古谷, 佐々木: 電気製鋼, 48 (1977), 151
- 45) W. Roos et al: J. de Phys. Colloque C1-38, C1-35 (1977)
- 46) D. L. Martin and M. G. Benz: Cobalt, No. 50, (1969), 1259
- 47) 金子, 本間: 日本金属学会講演概要集, (1977) 4, 225
- 48) H. Kaneko, M. Homma and T. Minowa: IEEE Trans. Magn. MAG-12 (1976), 977
- 49) 加藤, 大谷, 小島ほか: 日本金属学会講演概要集, (1975) 4, 158
- 50) 川口, 山元: 電気製鋼, 45 (1974), 175
- 51) W. Heimann and S. Engineer: TEW. Tech. Bericht, 1 (1975), 56
- 52) 田口: 日本金属学会会報, 13 (1974), 49
- 53) 石坂, 山部, 高橋: 日本金属学会誌, 30(1966), 552
- 54) 成田, 榎園: 電気学会磁性材料研究会資料, MAG-77-7 (1977)
- 55) 増本, 村上: 日本金属学会会報, 13 (1974), 693
- 56) R. Sawada et al: Intermag. Conf., 31-4 (1972)
- 57) 加藤, 富岡: 電気製鋼, 39 (1968), 209 41 (1970), 51
- 58) 加藤, 関尾: 電気製鋼, 42 (1971), 41
- 59) H. Fujimori and T. Masumoto: Supplement to Sci. Rep., RITU, A, (1978), 181
- 60) K. Murakami: Supplement to Sci. Rep., RITU, A, (1978), 221
- 61) 加藤, 藤森, 増本, 森田: 日本金属学会講演概要集, (1978) 10, 240
- 62) H. Dietrich: DEW. Tech. Berichte., 4 (1964), 11
- 63) 藤倉: 鉄鋼界, 28 (1978), 41