

2011

11

特殊鋼

The Special Steel ————— *Vol.60 No.6*

特集／耐熱金属材料：発電機から航空機・自動車まで



特殊鋼



目次

2011

【編集委員】

委員長	並木 邦夫 (大同特殊鋼)
副委員長	久松 定興 (中川特殊鋼)
委員	福井 康二 (愛知製鋼)
〃	小椋 大輔 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	出町 仁 (新日本製鐵)
〃	鎌田 芳彦 (住友金属小倉)
〃	本田 正寿 (大同特殊鋼)
〃	内藤 靖 (日新製鋼)
〃	縄田 隆男 (日本金属)
〃	加藤 方隆 (日本金属工業)
〃	殿村 剛志 (日本高周波鋼業)
〃	佐藤 昌男 (日本冶金工業)
〃	加田 善裕 (日立金属)
〃	柴野 芳郎 (三菱製鋼)
〃	中村 哲二 (青山特殊鋼)
〃	池田 正秋 (伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	岡崎誠一郎 (UEX)
〃	池田 祐司 (三興鋼材)
〃	金原 茂 (竹内ハガネ商行)
〃	甘利 圭右 (平井)

【特集／耐熱金属材料：発電機から航空機・自動車まで】

I. 耐熱金属材料の概要	…(株)超高温材料研究センター 田中 良平	2
II. 耐熱金属材料の用途		
1. A-USC 先進超々臨界圧火力発電技術	…………… 独立行政法人 物質・材料研究機構 福田 雅文	8
2. 自動車 (エンジンバルブ)	…………… フジオーゼックス(株) 廣瀬 正仁	14
3. 航空エンジン材料	…………… (株)IHI 中野渡 功	17
	…………… 竹川 光弘	
4. 廃棄物処理と耐熱材料		
—発電拠点としての役割と課題—		
…………… 首都大学東京 大学院 吉葉 正行		22
III. 耐熱金属材料の開発動向		
1. 超耐熱合金	…………… 日立金属(株) 大野 文博	26
2. 耐熱鋼 (棒鋼)	…………… 大同特殊鋼(株) 高林 宏之	31
3. 耐熱鋼 (パイプ)	…………… 住友金属工業(株) 岡田 浩一	35
IV. 耐熱表面処理	…………… (株)日立製作所 児島 慶享	39
V. 会員メーカーの耐熱金属材料・技術		
固体酸化物形燃料電池用金属インターコネクタ材	…………… 日立金属(株)	42
“特集”編集後記	…………… 日立金属(株) 加田 善裕	43



あらゆる素材を次世代に向けて



ISO 9001 (全事業所)

ISO 14001 (特殊鋼部門)

JCSS

は計量法に基づくトレーサ
ビリティ制度のロゴです。

流量—小流量国家認定事業者



特殊鋼・高合金・半導体装置

株式会社平井

<http://www.kk-hirai.co.jp/>

本社：〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町2丁目17番9号

TEL.03-3667-7311(大代表) FAX.03-3667-7341~4

営業所：所沢・北関東・名古屋・静岡 加工センター：所沢・北関東

システム事業部(半導体) システム事業部技術研究所

●一人一題：「プロジェクトから学ぶ」

..... 伊藤忠丸紅特殊鋼(株) 今西 清裕 1

■業界の動き	44
▲特殊鋼統計資料	47
★倶楽部だより (平成 23 年 8 月 21 日～ 10 月 20 日)	51
☆社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧	52
☆お知らせ 平成 23 年度調査票提出促進運動について	53

特集／「耐熱金属材料：発電機から航空機・自動車まで」
編集小委員会構成メンバー

役名	氏名	会社名	役職名
小委員長	加田 善裕	日立金属(株)	特殊鋼カンパニー技術部長
委員	小椋 大輔	(株)神戸製鋼所	鉄鋼事業部門 線材条鋼商品技術部 課長
〃	金須 貴之	新日本製鐵(株)	棒線事業部 棒線営業部 棒線商品技術 Gr マネジャー
〃	内藤 靖	日新製鋼(株)	商品開発部 特殊鋼開発チーム
〃	加藤 方隆	日本金属工業(株)	研究開発本部 研究部 参事
〃	山崎 浩郎	日本高周波鋼業(株)	技術部 担当次長
〃	佐藤 昌男	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部次長
〃	岡本 裕	三菱製鋼(株)	技術管理部
〃	金原 茂	(株)竹内ハガネ商行	技術部長
〃	甘利 圭右	(株)平井	常務取締役



ばね用・精密機器用
特殊鋼二次製品

いかに より お役に立つか

株式会社 **プルートゥス**

本社 〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-11-11
 ☎ 03-3861-0101 FAX 03-3863-6153
 東京営業所 ☎ 03-3766-6301 FAX 03-3762-8130
 北関東支店 ☎ 0282-86-6613 FAX 0282-86-6513
 前橋支店 ☎ 027-266-8361 FAX 027-266-8363
 仙台支店 ☎ 0224-55-1184 FAX 0224-57-1587
 新潟プルートゥス ☎ 025-260-7701 FAX 025-260-7812
 諏訪プルートゥス ☎ 0266-53-0775 FAX 0266-58-0104

「プロジェクトから学ぶ」

伊藤忠丸紅特殊鋼(株)
代表取締役社長いまにしきよひろ
今西清裕

大学を卒業し社会人（丸紅の鉄鋼部隊に配属）になって35年余経過しましたが、振り返って見ますと、特に入社～15年目頃までに参画させて貰った色々なプロジェクトを通じて学んだことが、非常に有益な経験として、後々様々な局面において生きてくることになったとの思いを強くしています。

若くして斯様な経験を積ませて頂いた会社並びに諸先輩の方々には大変感謝している次第です。

ところで「プロジェクト」という外来語を我々日本人も特に違和感なく日常的に使っていますが、日本語への適訳は結構難しいのではと思います（英和辞典を引くと「計画事業・企画」とありますが）。意識ではありますが個人的には、Projectとは「Professional (Pro) に事業目的 (Object) を完遂させること」ではないかと考えています。

入社数年後から幸運にも、様々なプロジェクトに参画又は自分自身で立案するチャンスが適宜巡って来る訳ですが、その中でも私にとって真さに活きた経験をしたとの思いが強いプロジェクトを何件かご披露させていただきます。

- 1) 入社数年目:中東イランで鉄骨構造のビル（ホテル）建設。建設途上、イラン革命が勃発、カントリリスクを肌身で感じることになる。
- 2) 入社4～7年目：中東リビアで石油パイプライン&付帯諸設備建設。調達を担当するが納期遅延が多発、ジャンボ・軍用機6機での大空輸作戦を余儀なくされ、調達の難しさを認識することになる。
- 3) 入社8～13年目（米国に駐在）：米国加州サンディエゴにて高級リゾートホテルを建設・運営。コンセプト作り、各種業者選定、資金調達（プロジェクトファイナンス）、環境アセスメントへの対応など等、未体験ゾーンへの挑戦は想像を絶する難関続きで足掛け5年を要したが無事開業後暫くして第三者に売却。日本でのテレビ番組でも成功した高級ホテルとして紹介されました。多種多様な業務の基礎を徹底的に叩き込まれ、その後の応用編への対応力アップに繋がることになる。
- 4) 入社14～16年目（米国に駐在）：米国NBA（プロバスケットボール協会）新アリーナ建設。米国ユタ州で幅広く事業を展開し、NBAの強豪チームである「ユタジャズ」のオーナーでもあったジョンミラー氏とある米国の友人の紹介で会食したことから本プロジェクトが始まりました。来シーズン開幕までに新アリーナを建設したいとの相談を受け、デザインから建設、ファイナンスの手配まで全てパッケージで任されることになった。オルガナイザー機能をフルに発揮し、予定通り約1年間で開幕までに無事完工。人脈と普段からの信頼関係が如何に大事かを再認識することになる。（開幕戦ホームゲームではコーチ・選手と同じベンチに座り観戦させて貰い感動。最近日本でもNBAの試合をテレビ中継していますが、満員の同アリーナが映ると大変誇らしく思います）。

上記以外にも思い出に残るプロジェクトは多数（米国アラスカ向け石油掘削用リグ/シェル向け世界最長のプラットホーム等）ありますが、その都度、様々な方々のサポートを頂きながら色々な事を学べたことに感謝し、これからも学び続ける姿勢を大事に行きたいと思っています。

特 集

耐 熱 金 属 材 料

： 発 電 機 か ら 航 空 機 ・ 自 動 車 ま で

I. 耐熱金属材料の概要

(株)超高温材料研究センター 技術顧問 た な か り ょ う へ い
東京工業大学名誉教授 **田 中 良 平**

◇ 耐熱金属材料とは

文字通り熱に耐える、高温で使用できる金属材料の総称である。“高温”とは何℃以上を指すか明確な定義はないが、学問的には金属の種類によって“高温”の範囲は異なる。一般に加工などで硬化した金属も、ある温度以上に加熱されると結晶を構成する原子の移動・拡散が容易になり、加工組織は再結晶して軟化する。その再結晶温度、つまり、およそ1時間程度の加熱で、ひずんだ結晶が生まれ変わる再結晶が容易に起こる温度は、その金属の融点 T_m （絶対温度）の約1/2の温度であり、表1に示すように純金属のAlやMgの再結晶温度は200℃以下である。

構造物の強度を負担する金属材料は、多かれ少なかれ他の元素が添加されて強度などを高めた合金として用いられるが、合金では純金属の再結晶温度に達してもすぐに軟化するとは限らない。むしろ、後述のNi基超合金では、純Niの再結晶温度よりはるかに高い高温（1000℃付近）で数万時間という長時間にわたり使用される。

したがって融点の高い金属が有利となるが、表1でTiはNiやFeより融点が高く、かつ室温では

耐食性に著しく優れているものの、高温では酸化しやすいため、Ti合金の使用可能な限界温度は500℃程度である。Nb、Mo、Wなどは高融点金属¹⁾として知られているが、耐酸化性に乏しく、酸化性環境での利用可能な温度はおよそ500℃以下であり、しかも融点が高く、溶解をはじめとする“ものづくり”が容易ではない。

高融点金属の中ではNbがもっとも融点が低く、低温での延性にも優れ、耐熱金属材料として大きな可能性を秘めている。すでに人工衛星の軌道変更や姿勢制御に用いられる小型ロケット（スラスタ）に使用されている。ガスタービン用に向けてNb基超合金²⁾の開発が行われ、強度面では最強のNi基超合金の耐用温度を大きく上回る新合金は開発されたが、十分な信頼性を持つ耐酸化コーティング手法はまだ確立されていない。

◇ 耐熱金属材料に求められる性質は？

耐熱金属材料に要求される特性は表2のように様々であるが、高温での耐酸化・耐食性と十分な強さに加え、“ものづくり”に欠かせない製造性、妥当なコストで供給できる経済性が必要である。各項目の重要性の大小は用途によって異なるもの

表 1 主な耐熱金属材料の主成分金属の融点と再結晶温度

金 属	マグネシウム Mg	アルミニウム Al	銅 Cu	ニッケル Ni	コバルト Co	鉄 Fe	チタン Ti	ニオブ Nb	モリブデン Mo	タングステン W
融 点(℃)*	650	660	1085	1455	1495	1538	1670	2469	2623	3422
再結晶温度(℃)**	189	194	406	591	611	633	699	1098	1175	1575

*小数点以下は四捨五入してある。

**絶対温度で表した融点の1/2の温度（℃で表してある）。

表 2 耐熱金属材料にはどんな性質が要求されるか

物理的性質	融点、密度、熱伝導率、熱膨張係数、拡散速度、減衰率など
化学的性質	高温の空気、水蒸気、CO、CO ₂ 、H ₂ Sなどを含む各種燃焼排ガス、溶融塩、その他の環境での耐酸化性、耐食性、酸化皮膜の密着性など
力学的性質	高温での強度と延性・韌性。とくにクリープ強さ、クリープ破断強さ、および疲労強さ、耐熱疲労性、耐熱衝撃性、長期の高温使用に対する安定性など
製造性	溶解、鑄造、鍛錬、圧延、溶接、焼結などで必要な形状・寸法の部品に製造できること
経済性	原料費、加工費などが低廉。とくに製造プロセスが低コストであること

の、材料開発の観点からは、高温での耐酸化・耐食性と強度は“車の両輪”にも例えられる。

前節で述べた理由から、高温用の材料として広く使用されている金属材料は、表1のなかのFe、Ni、およびCoの3金属をそれぞれ主成分とする合金にほぼ絞られる。

1. 耐酸化・耐食性と耐熱コーティング

高温では、大気以外にも様々な環境での酸化・腐食の問題があり、材料表面の現象のみならず、表面から内部へ、とくに結晶粒界に沿う粒界侵食も起こる。Fe、Co、Niのいずれも純金属のままでは高温での耐酸化・耐食性は不十分で、用途に応じて異なる特性を満足させるために多くの工夫が重ねられてきた。

火力発電などで期待される10万時間、あるいは10年間という長期の使用を考えれば、炭素鋼は400℃が限界である。Crを添加すると、鋼の表面に緻密な酸化物の皮膜を生じて鋼内部を保護する貴重な作用を示す。酸化性の雰囲気中でどの程度の温度まで使用できるかの“耐酸化限界温度”は、期待する使用時間や許容される腐食の程度によっても異なるが、Crはこの限界温度を高めるためにもっとも有用な元素で、例えば100時間の酸化で10mg/cm²の質量増加を許すとすれば、10% Crでは約850℃まで使用可能、1000℃まで使いたければ18% Crが必要で、質量増加を1mg/cm²以下と制限すれば限界温度は約100℃低く見積もる必要がある³⁾。

耐熱鋼では、CrとともにAl、Si、Zr、Yなどの組み合わせ添加も行われている。一方、後述する

Ni基超合金の発展には、いわゆるγ'相の析出による強化が重要な役割を果たしているが、Cr量の増加はγ'相による強化を阻害する傾向があり、耐酸化・耐食性と強度の両立が困難な場合が多く、最先端のNi基超合金では使用温度上昇への方策としてCr量は減らし、耐酸化・耐食性は表面コーティングに頼る方向にある。

高温の耐酸化・耐食性を高めるには、合金元素の添加以外に酸化・腐食に強い物質で部品表面を被覆するコーティングがある。耐熱コーティングの方法は次のように分類される。

- (1) 金属の拡散浸透法
- (2) プラズマ溶射…大気中溶射、減圧溶射
- (3) 化学蒸着 (CVD)
- (4) 物理蒸着 (PVD)

航空機や発電用のガスタービンでは、遮熱コーティング (Thermal Barrier Coating, TBC) が広く採用されている。ガスタービンの静翼、動翼などでは、中空の内部を空気冷却する構造を持つ部品の表面に、MCrAlY (エムクラリと読む。M: NiまたはCo) を中間層とし、最外層にはセラミックスをプラズマでコーティングする方法が主流である⁴⁾。

2. 高温強度

機械的性質では、もっとも基本的な特性としてクリープ特性が挙げられる。一定の力のもとでも時間とともに徐々に変形するクリープ (creep) では、例えば火力発電用の材料などで0.01% / 10万時間のクリープ速度を生じる応力 (クリープ強さ)、あるいは10万時間で破断とした場合の応力 (10⁵時間クリープ破断強さ) などを機器の設計に利用する。

10万時間は約11年5か月であり、そのような長時間の試験を多様な高温機器に必要な多種類の材料、温度、応力などのもとで実施し信頼性の高い設計資料を確立するには大変な資金、時間と労力が必要である。国産の耐熱鋼および超合金の性能が国際的なレベルであることを保証することが不可欠であるとして、1966年に金属材料技術研究所 (NRIM) がクリープデータシート作成プロジェクトに着手し、現在の(独)物質・材料研究機構 (NIMS) に引き継がれて、多数のNIMSクリープデータシートが公開されている。単一試験片で

連続、かつ最長のデータは、2011年2月末に世界最長記録（ドイツの356,463時間）を更新した（NHKテレビ、2011年2月25日）。

それらの豊富なデータの解析が進められるとともに、長時間クリープ寿命の予測評価法に「領域分割解析法」が新たに提案され、この方法に基づいて今後の蒸気火力発電に重要な高強度フェライト系耐熱鋼の許容引張応力が見直された⁵⁾。その再評価は米国と欧州の許容引張応力の引き下げにも反映されている⁶⁾。

◇ 主な耐熱金属材料の分類とそれらの特徴

Feを主成分とする高温用合金が耐熱鋼（Heat-resisting steels）である。日本工業規格（JIS）と国際標準化機構（ISO）規格の整合化が進められ、この二つの規格で耐熱鋼は10.5%以上のCrを含むとされている。しかし耐熱鋼とは別に、ボイラや高温圧力容器などに用いる鋼材をはじめとして用途別あるいは形状別の高温用鋼材などの規格がある。表3には後述する超合金も含め、それらの規格名称（略記）やJIS番号と鋼種記号をまとめた。

NiとCoの合金は耐熱合金、あるいは超耐熱合金ともよばれ、英語ではSuperalloysと簡略化されており、本稿では“超合金”と記述する。なお、日本工業規格（JIS）では原子炉用合金の規格として初めに制定された関係から、“耐食耐熱超合金”の名称が用いられている。

以下では、これらの耐熱鋼と超合金の進歩について簡単に展望してみたい。

1. 耐熱鋼

JISとISOでは耐熱鋼をステンレス鋼と同様、10.5%以上のCrを含む鋼としている。ステンレス鋼は常温での耐食性のみならず、高温での耐酸化性にも優れているため、多くの耐熱鋼は、初期にはステンレス鋼をそのまま高温用に転用し、また必要に応じて化学組成を高温用に改良するなどの工夫を重ねて発展してきたものも多い。

炭素鋼は強度面でも約400℃が限界で、使用温度が高くなるにつれてCrを主とする数種の合金元素を添加したフェライト（ α ）系、あるいはマルテンサイト系（これも素地は α ）の耐熱鋼が用いられる。フェライト系は、安価で加工しやすい、熱膨張係数が小さく加熱冷却によって機器に発生する熱応力が小さくて有利という利点がある。マルテンサイト系は、高温から急冷してマルテンサイト組織にはするが、そのままではクリープ特性が劣るため、使用温度より100℃程度高い温度で焼戻し、組織を安定化して用いる。

それらの鋼の素地 α 相は体心立方晶（bcc）である。純Feには912℃に α （bcc） \leftrightarrow γ （面心立方晶fcc）の同素変態があり、変態温度は合金元素によって変化するが、bcc構造の α 相はfccの γ 相に比べてクリープ強さは劣る。そのため α 相を素地とする耐熱鋼は、耐クリープ性の点でおおよそ600℃以上では不十分な場合が多い。

一方、 γ 相は合金元素の固溶度が大きく、それによる固溶強化のほか炭化物による析出強化も利用できる。そこで耐酸化性などに不可欠なCrと

表 3 耐熱鋼をはじめとする高温用鋼と超合金の主なJIS

種別	形状、種類とJIS番号	記号
耐熱鋼	棒（G 4311）、板（G 4312）	SUH、SUS
ボイラ・熱交換器用鋼管*	炭素鋼（G 3461）	STB-HTB
	合金鋼（G 3462）	STBA-HTB
	ステンレス鋼（G 3463）	SUS-HTB
鍛鋼品	高温圧力容器用合金鋼（G 3203）	SFVA
鋳鋼品	高温高圧用（G 5151）	SCPH
	高温高圧用遠心力鋳鋼管（G 5202）	SCPH-CF
	耐熱鋼及び耐熱合金（G 5122）	SCH
耐食耐熱超合金**	棒（G 4901）、板（G 4902）	NCF

* ボイラ・熱交換器用鋼管には、JISにはまだ規定されていない比較的新しい鋼種についても、経済産業省 原子力安全・保安院発行の「発電用火力設備の技術基準の解釈（直近では平成19年7月）」により、材料規格（化学成分、引張強度特性等）と許容応力をセットにして規定された鋼種が多数あり、「火STBA 27」のように、種類の記号の初めに“火”を付けて実用されている。

** 通称Hastelloy Xと呼ばれるNi基超合金は、非鉄関係のJIS H 4551：1992ニッケル合金板及び条の中にNW6002として規格化されている。

ともに約8%以上のNiを添加したfcc素地のオーステナイト (γ) 系耐熱鋼が重要となる。

オーステナイト系耐熱鋼はFe-18Cr-8Niの組成をもつ、18-8ステンレス鋼 (SUS304) を基本組成にしていると言えるが、その耐酸化・耐食性をさらに高めるためCrを増量し、また高温強度をより大きくするためMoその他の合金元素添加などで改良を重ねられ、より高温での使用に耐える耐熱鋼に発展してきた。

このような事実から、現在のJISによる耐熱鋼は、ステンレス鋼と同様、主な合金元素によってCr系とCr-Ni系に大別され、また金属組織の点からCr系はフェライト系とマルテンサイト系に分け、Cr-Ni系はオーステナイト系ともよばれる。

耐熱鋼とは別に、JISには表3に示すように、ボイラ・熱交換器用鋼管が規定されている。耐熱鋼の高温強度については、構造設計に必要なデータはまだ、不十分として、JISに機械的性質は規定されていないが、ボイラ用鋼管などについては高温高圧機器の設計に関係して前述のクリープ試験データが豊富に取得されている。

図1には、NRIMデータシートから求めた低合金鋼とステンレス鋼の10万時間クリープ破断強さを比較した。左端の低炭素鋼に比べCr-Mo鋼は約100°C高温まで使用できるが、18Cr-8Niなどオーステナイト系4鋼種はCr-Mo鋼に比べさらに100°C以上も高温での使用が可能であり、fcc構造の材料が高温強度の点で有利であることがわかる。し

かし、オーステナイト系の鋼種は高価なNiを含み、熱膨張係数が大きく、加熱冷却による熱応力が生じやすいなどの短所は避けられない。

図1の各鋼種などを基本にしてボイラなどの高温化のニーズに応えた多様な開発が進められてきた。例えば、図1でもっとも強い(右側にある)18Cr-12Ni-Nb鋼 (SUS347HTB) の650°C -10万時間クリープ破断強さは85MPa程度であるが、これに少量のCuとNを組み合わせ添加した18Cr9NiCuNbN (火SUS304J1HTB) では168MPa、またCrやNiを増量しWも添加した22.5Cr18.5NiWCuNbN (火SUS310J3TB) は203MPaに達している⁷⁾。一方、安価で使いやすいフェライト系の耐熱鋼を極限まで改良しオーステナイト系耐熱鋼を代替する努力も続けられている⁸⁾。

なお、経済産業省の統計によれば、耐熱鋼熱間圧延鋼材の生産量は2005年(2006年以降はステンレス鋼と合計の数字になっている)に約32.6万トンで、ステンレス鋼の2005年の326万トン弱に対してほぼ10%である。しかし耐熱鋼は1960年に比べて58倍に増加し、ステンレス鋼の同期間の18倍に対して生産量の伸びがはるかに大きい。

2. 超合金

Ni基とCo基の2つが中心であるが、それらとは別に、耐熱鋼を改良するため、Cr、Niなどの添加量を大きく増加してFeの含有量がおおよそ50%を切るほどに減少した材料は、鋼の延長というより、Fe基超合金、あるいはNi-Fe基超合金と

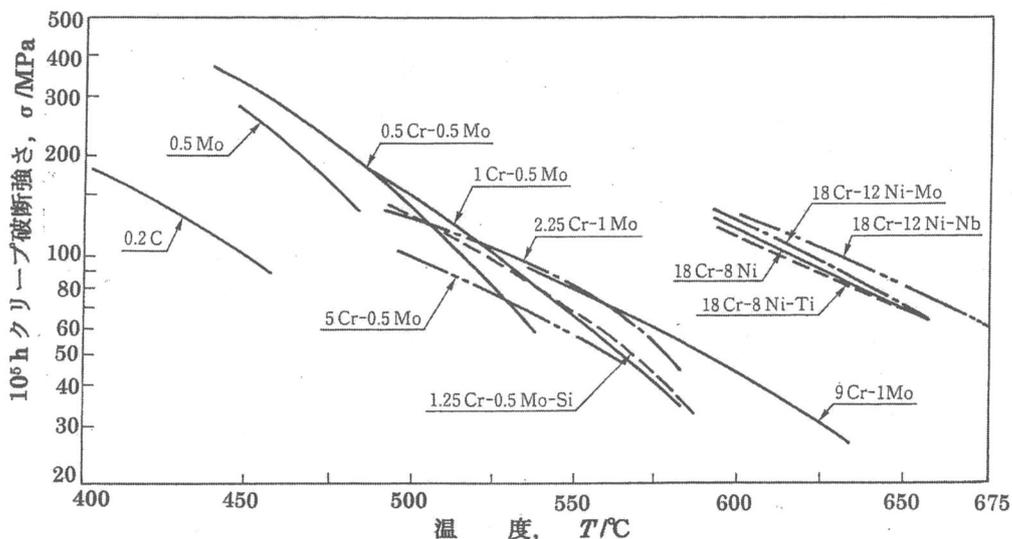


図 1 ボイラ用鋼管に用いられる低炭素鋼、Cr-Mo鋼および18-8系ステンレス鋼の 10^5 時間クリープ破断強さと試験温度の関係 (NRIMクリープデータシートのデータから作成)

もよばれている。

ジェットエンジンの開発は、1930年代に始まったが、その高温に耐える材料が求められ、1940年代以降、CoとNiをそれぞれベースとする一連の超合金の開発が行われた。とくに、航空機の高速度・大量輸送などの強いニーズから、エンジンの過酷な高温運転を可能にする燃焼器や静翼、動翼などのため、Co基とNi基の合金は、Fe基超合金をはるかに超える強度レベルへと急速な進歩を遂げた。

1950年代半ばまでは、Co基合金が優勢であったものの、その後はNi基合金でよりすぐれた高温強度をもつ多数の合金が開発されて現在に至っている。ただし、ジェットエンジンでも、また発電用ガスタービンでも、Fe基を含め各合金系それぞれの特徴を生かして適材適所に利用されているのが現状である。

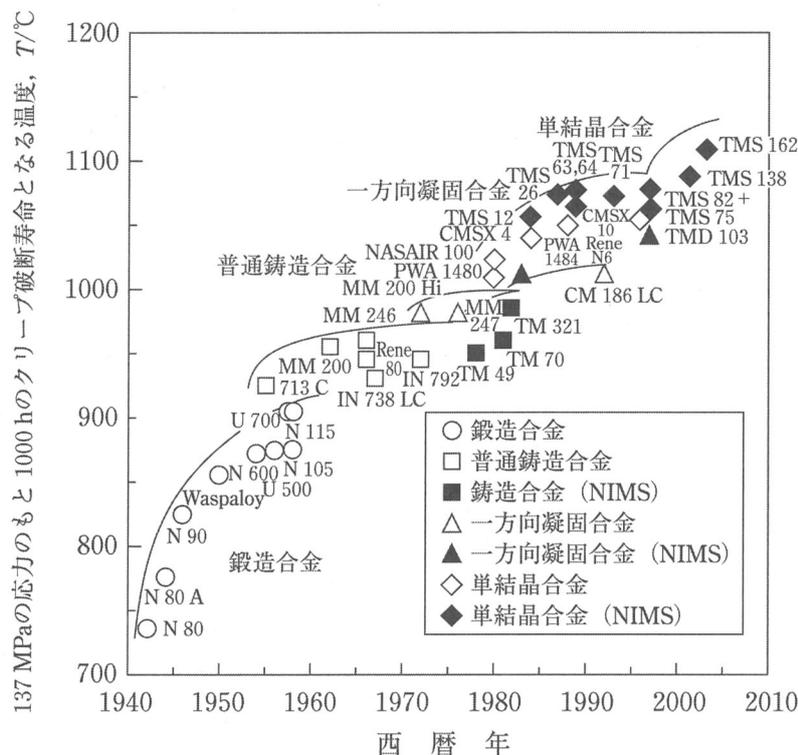
超合金の名前に“超”つまり“Super”と付ける理由は、それらの合金が1000℃付近の高温（実際の燃焼ガス温度は1500℃前後）まで大きな強度と、延性・韌性にも優れているためで、ジェットエン

ジンや発電用のガスタービンなど、ほかの金属材料はとても使用に耐えないようなきびしい高温環境でしかも大きな応力を受ける回転部品などに使用できることから来ている。

図2⁹⁾は最近までの超合金の発展を耐用温度の変化で示した。これらの合金ではMo、Wなどの固溶強化元素添加のほか、AlやTiの添加で金属間化合物Ni₃(Al, Ti)（これをγ'相とよぶ）の析出強化を利用するが、これらの合金元素の添加量増加は高温強度上昇の反面で加工性は劣化し、鍛造などで素材や部品を製造することが次第に困難となってきた。

Co合金の精密鑄造法がNi合金の製造に新たな転機をもたらしたのは1950年代であった。ジェットエンジン動翼が精密鑄造で複雑な曲面形状をニアネットシェイプ、つまり最終製品に近い形状をつくり込めるようになり、加工性の制約もなくなって合金元素をより多く添加した新合金も開発され、エンジンの高性能化を加速した。

セラミックス中子を用いて中空の動翼や静翼を製造し、それらの内部を空気冷却する手法も考案



され、一方向凝固による柱状晶 (DSとよぶ)、次いで単結晶 (SC) 動翼の製法も開発されて高温強度と耐用温度が大幅に高められた。DS (図2の△▲) とSC (◇◆) に適した合金も次々と開発され、結晶制御合金と総称される。DS材は1980年代の前半に、またSC材も1980年代の後半にはそれぞれ欧米で民間航空機用エンジンに実用化され、DS材は日本でも発電用ガスタービンに使われはじめている。

合金設計法の開発と改良が進み、SC材では初期の第1世代合金に続いて、Reを3%程度含む第2世代、Reを5~6%含む第3世代などが相次いで開発された。日本ではNIMSの原田⁹⁾が独自の合金設計法を展開し、Re 5%に白金族のRuを2~3%加えた第4世代合金、Re 6.4%にRu 5%を含む第5世代合金などが開発されている。

図2右上のTMS 162は2004年に小泉、原田らによって発表された世界最強のNi基単結晶超合金で、Ni-Co-Cr-Mo-W-Al-Ta-Hf系に4.9% Reと6.0% Ruを添加し、137MPa・1000時間の耐用温度は1105℃とされている¹⁰⁾。この1105℃は、実際にその温度まで実用できることを意味するわけではなく、Larson-Millerによる外挿法で、定数を20として換算すると1万時間では約1050℃に相当する。また137MPaという応力も合金開発の一つの目安に過ぎず、実機の許容応力は別途に求めなければならない。

さらに同じガスタービンと称しても、航空用(ジェットエンジン)と発電用とでは設備の規模も運転条件も大きく異なり、航空用では離陸・上昇時の短時間に最大の負荷がかかる。また第1段動翼の大きさは、発電用の方が寸法で2~3倍(質量では一けた以上)も大きい場合があり、大型の発電用ガスタービンへのSC材の適用には課題は多いが、原田らによるこれら一連の成果は高く評価される。

なお、上記のような高強度超合金とは別に、燃焼器などには、大きな強度は必要としないが、薄板に製造でき耐酸化・耐食性に優れ、しかも溶接

も可能な比較的強度の合金が多用され、またエンジンのディスク用に700℃付近での強度の大きい鍛造合金の生産も多い。

むすび

航空機の離陸上昇時には、ジェットエンジンのタービン入口温度は最高1500~1700℃に達している。大型の発電用ガスタービンでは公称1500℃の設備が1999年に日本でも実用化され、1700℃を目指した国家プロジェクトも進められて、2011年2月にはJ型ガスタービンの実証運転で世界最高の1600℃、定格単機出力で約32万kWを実現、2015年までに計6基が電力会社に納入される予定と報じられている¹¹⁾。

2011年3月の東日本大震災は、原子力発電に大きな曲がり角をもたらした。それに応じて、再生可能エネルギー利用の急増を期待しながらも、当分の間はCO₂削減を図りつつ火力発電の高効率化、そのための超高温化と、それを支える高性能の耐熱鋼や超合金の開発がますます必要となろう。

なお、本解説に記述した商品の名称には、それぞれ各社の商標として使用されている場合がある。

参考文献

- 1) 田中良平: 金属、80 (2010) No.8、45
- 2) 田中良平: 金属、76 (2006) No.2、153.
- 3) 根本力男、富士川尚男: ステンレス鋼の高温酸化と高温腐食 (田中良平編、ステンレス鋼の選び方、使い方、日本規格協会、2010)、p.127.
- 4) 原田良夫: 日本ガスタービン学会誌、31 (2003)、p.44.
- 5) 発電用火力設備の技術基準の解釈、経済産業省 原子力安全・保安院、NISA-234c-05-8 (2005)、67; 同、NISA-234a-07-2、(2007)、3.
- 6) 木村一弘: ふえらむ、13 (2008)、775.
- 7) 五十嵐正晃、伊勢田敦朗、菅 孝雄: 学振123委員会研究報告「耐熱鋼研究の最先端と将来展望」、44 (2003)、205.
- 8) 例えば 五十嵐正晃: ふえらむ、11 (2006)、285.
- 9) 原田広史: 金属、75 (2005) No.7、7.
- 10) Y. Koizumi et al.: Superalloys 2004、(2004) 35.
- 11) 日刊工業新聞 (2011年5月27日) .

Ⅱ. 耐熱金属材料の用途

1. A-USC 先進超々臨界圧火力発電技術

独立行政法人 物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門 福田 雅文

まえがき

1973年の「オイルショック」以後、一次エネルギーのベストミックスを指向するなかで石炭火力発電所の建設が進み、国内設備容量は現在35GW程度、発電電力量では2009年度に25%まで拡大してきた(図1)。一方、東日本大震災により原子力発電への懸念が生じ、将来の電源構成が世間で議論されている。本論ではそれに立ち入ることはしないが、発電用一次エネルギーにおける天然ガス、石炭等の化石燃料の位置づけが高まる方向にある。

しかしながら、石炭火力発電は他の発電方法に比べて単位電力量あたりの二酸化炭素排出量が多く、地球温暖化問題への対応が強く迫られている。石炭を使いつつ、二酸化炭素排出量を減らすには、まず熱効率向上による燃料使用量の削減、将来的には発生した二酸化炭素を回収し、地中の帯水層等に貯留するCCS(Carbon Capture and Storage)等の対策が考えられている。

先進超々臨界圧発電技術(A-USC, Advanced Ultra Super Critical Steam Condition)は石炭火力

発電の熱効率向上を目指した技術である。現在の石炭火力発電所はほとんど全てがボイラと蒸気タービンを組み合わせた汽力発電技術を採用しており、A-USCもその一種である。

A-USCは熱効率を大幅に向上するために蒸気タービン入口における蒸気温度を従来よりも100℃程度高い700℃まで高めようとしている。そのためには高温で使用できる材料の開発、さらに材料に適した溶接や加工等の製造技術開発が必要である。

A-USCは国の温暖化対策である「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」に取り上げられ、2008年夏から9年間にわたる本格的な要素技術開発プロジェクトが進められている。

◇ USCからA-USCへ

図2に国内火力発電所の蒸気条件の変遷を示す。主蒸気温度は1950年代に538℃から566℃に向上したが、その後長期間同じ温度が維持された。そして、1993年に中部電力の碧南3号機で再熱蒸気温度593℃が、1997年に電源開発の松浦2号機で主蒸気温度593℃が達成された。さらに1998年

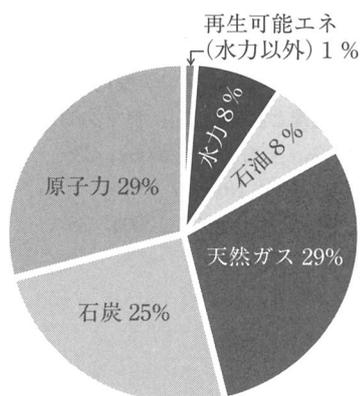


図 1 2009年度発電電力量の内訳¹⁾

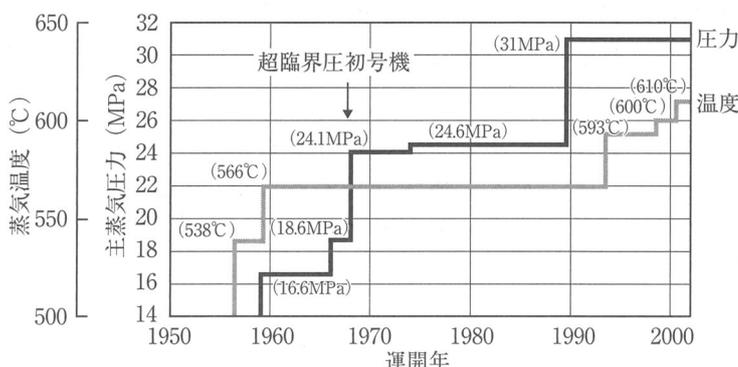


図 2 国内火力発電所の蒸気条件の変遷

には中国電力の三隅 1 号機で600℃に上昇した。2000年になると電源開発の橘湾 1 号機で再熱蒸気温度610℃が達成された。一方、主蒸気圧力は1967年に東京電力の姉ヶ崎 1 号機で初めて超臨界圧の24.1MPaが達成された。そして、1989年に中部電力の川越 1 号機で二段再熱方式が採用され、主蒸気圧力も31MPaまで上げられた。

超臨界圧で温度が593℃以上の蒸気条件の技術が一般に超々臨界圧発電技術 (USC, Ultra Super Critical Steam Condition) と称されている。USCは比較的燃料コストが高い日本で開発された技術で、蒸気条件の向上による高効率化により燃料使用量を減らし、発電コストの低減を狙ったものである。USCの実現には耐熱材料の開発が不可欠だった。

電源開発(株)は国からの補助を受け、1981年から2000年にわたる長期の開発を主導した。その結果、593℃、600℃級USCに適用可能な9～12% Cr鋼が開発され、順次実プラントに適用されてきた。

現在、わが国の石炭火力発電所発電容量のほぼ半分をUSCが占めている。開発された技術は欧米諸国や中国、インドにも輸出、波及し二酸化炭素削減に寄与している。

A-USCは600℃級USCに対してさらに100℃以上の蒸気温度向上を狙っている。その結果、高位発熱量基準 (HHV) の送電端熱効率は42%から46～48%へ向上し、二酸化炭素排出量は約10%以上低減できる (図3)。

◇ A-USC技術開発

1. 開発課題

図4にA-USCの代表的なシステムと適用材料を示す。A-USCは汽力発電システムの一つであり、主たる構成要素としてはボイラと蒸気タービンがある。ボイラでは火炉で石炭等の燃料が燃焼し、その熱で水を蒸発させる。発生した蒸気は小径の伝熱管群から構成される過熱器で700℃の温度まで過熱された後、大径の主蒸気管と主蒸気弁を通して超高压タービンに導かれ仕事をする。

超高压タービンから出た蒸気はボイラに戻され、小径の伝熱管群から構成される再熱器で720℃まで再熱される。再熱された蒸気は大径の再熱蒸気管と再熱弁を通り、高压タービンに送られ仕事をする。高压タービンから出た蒸気はもう一度ボイラに戻され二回目の再熱をされた後中圧タービンにもどり再び仕事をする。中圧タービンを出た蒸気は低压タービンでも仕事をし、復水器で冷却され水に戻る。

700℃の蒸気温度を実現するには耐熱材料や構造に開発課題がある。600℃級USCの実現には9

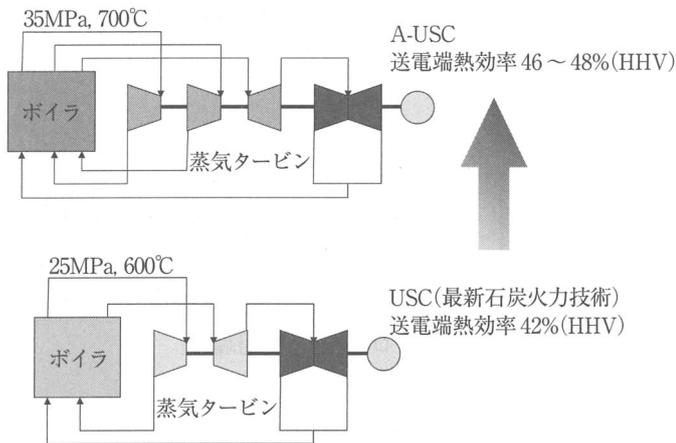


図 3 A-USC技術開発目標

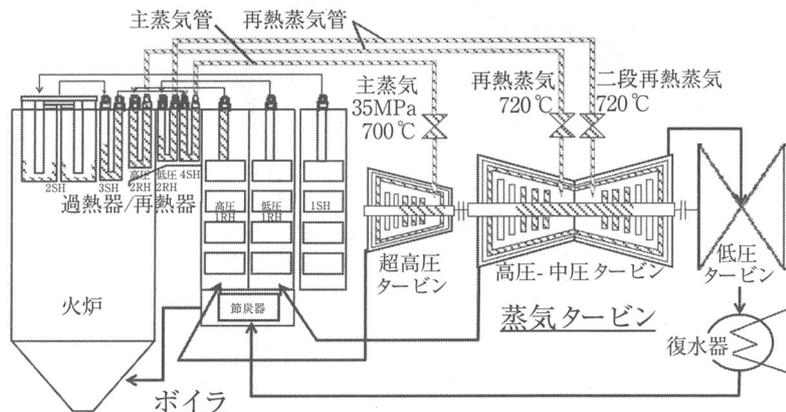


図 4 A-USCのシステム構成

～12% Cr鋼の高温強度向上が主役を演じたがA-USCではさらに高温に耐える材料としてNi基合金に期待がかけられている。図中ハッチング部分がNi基合金の適用部材である。

ボイラでは小径の伝熱管と大径の蒸気管が該当する。図5に伝熱管と蒸気管の使用環境を示す。伝熱管は約50mmの外径であり、外部から1000℃程度の燃焼ガスで加熱され、内部の蒸気に熱を伝える役割を有している。そのため、管材の温度は蒸気温度よりも高い750℃程度まで上昇する。一方、蒸気管は500mm程度の大径であるが、熱を大気に逃がさないように保温材が巻かれているので、管材の温度は内部の蒸気と同じで700～720℃程度になる。

図6に超高压タービンのロータ模式図を示す。タービン入口蒸気温度は700℃で、出口蒸気温度は500℃程度なので、ロータ表面には入口側で

700℃、出口側で500℃の蒸気が流れることになる。そのため、ロータ材の一部は700℃程度の温度に上昇し、Ni基合金を適用する。冷却することによりロータ材の温度を下げるという選択もあるが、熱効率の低下を伴うので好ましくない。

Ni基合金はこれまでガスタービンの高温部材や石油、化学工業の耐食性部材として使われてきたが、重量はガスタービンディスク材の2～3トン程度が最大だった。蒸気タービンではロータ、ケーシングに数十トンの部材が、ボイラでは過熱器、再熱器、主蒸気管、再熱蒸気管が百トンを超え、Ni基合金の従来実績をはるかに上回る大きさとなる。そのようなサイズでも偏析、欠陥や強度の低下等の問題が生じないNi基合金を開発する必要がある。また、高価なNi基合金の適用部位を極力抑制した設計にする必要がある。

Ni基合金を実際のプラントに適用するには単に材料の開発にとどまらず、システム全般にわたり多様な技術開発が必要になる。図7に示すように保守管理技術の開発、製造加工技術の開発、構造・機器の開発、システムの最適化等が必須であ

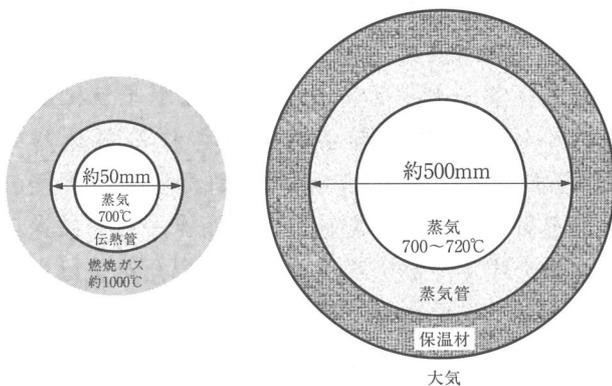


図 5 伝熱管と蒸気管の使用環境

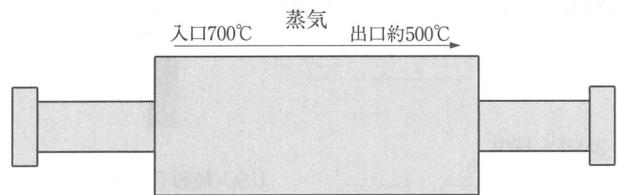


図 6 ロータの使用環境

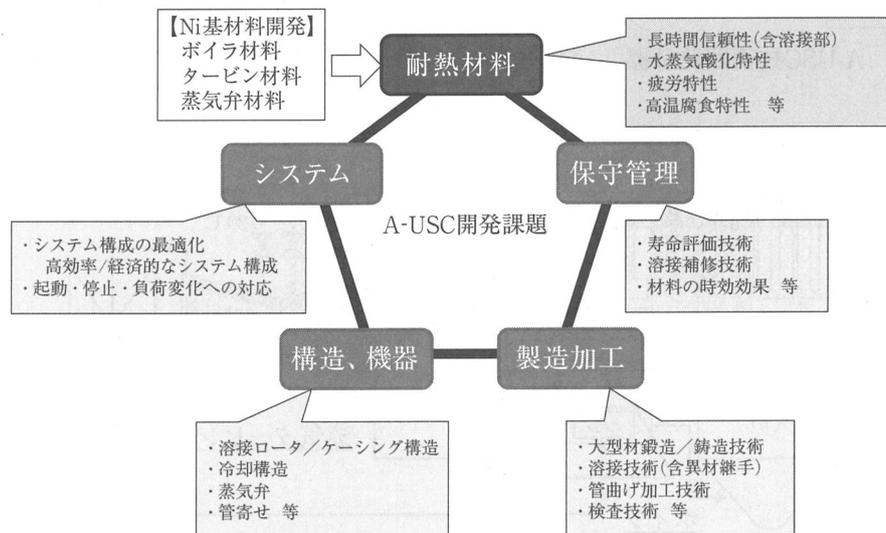


図 7 A-USC開発課題

る。特に、発電システムでは部材を交換せずに数十年間使用するので、高温環境下での材料の長期信頼性検証は最重要項目である。

表1にボイラに適用する新規材料の候補を示す。700℃の温度領域で用いるFe-Ni基またはNi基合金6種類が挙げられている。HR6W、HR35、Alloy617は比較的加工が容易で主蒸気管や再熱蒸気管といった厚肉大径管と過熱器や再熱器の小径伝熱管に適用可能である。

Alloy263、740、141は前者よりも耐熱性が高く過熱器や再熱器の最高高温部に適用可能である。HR6W、HR35、Alloy141はA-USC向けの国内開発材であり、期待が寄せられている。さらに、従来の9%Cr鋼は630℃が使用の限界だったが、少しでもNi基合金の適用範囲を狭めるために、650℃まで耐熱性を向上した高B-9Cr鋼、低C-9Cr鋼、SAVE12ADといった先進9Cr鋼が候補に挙げられている。

蒸気タービンロータの候補材料としてはFENIX-700、LTES700R、TOS1Xの3種類が挙げられている。全て国内開発材でありそれぞれ特徴をもった材料である。FENIX700はIN706からの改良材であり、10トン超の大型ロータ部材を製作目標としている。LTES700Rは12%Cr鋼との溶接を前提としており、線膨張係数がNi基合金としては低めになるように材料設計されている。TOS1XはIN617からの改良材であり、720℃以上の温度領域での使用が目標である。

上記以外に、蒸気タービンについてはケーシング、翼、ボルト等、高温弁については弁棒、ブッ

シュ材料等についても候補材を選定している。

2. 要素技術開発プロジェクト

経済産業省の補助を受けて、2008年から2016年までの9年間におよぶ「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」プロジェクトが開始された。

図8にマスタースケジュールを示す。主として前半の5年間で材料試作、開発を行い、後半の4年間で実プラントのボイラを用いた「実缶試験・回転試験」を実施する予定である。

ボイラについては2008年度から2012年度にかけて表1に掲げた材料の開発、評価を行う。また、「溶接技術開発・試験」、「曲げ試験」等を行い、ボイラ製造技術を開発する。A-USCでは材料の長期信頼性が最も重要であることから、9年間にわたって「高温長期材料試験」を行い、母材、溶接継手の3～7万時間のクリープ強度を検証する。伝熱管は高温の石炭燃焼ガスに曝されるので、高温腐食についての検証を行う。また、伝熱管内面の高温蒸気による水蒸気酸化に関しても検証を行う。

蒸気タービンについては2008年度から2012年度にかけて表2に掲げたロータ材およびケーシング材等の主要部品を試作、評価する。また、「ロータ、ケーシング等の大型溶接技術、試作」を行い、実機大型部品を製造するために必要な技術を開発する。ボイラと同様に9年間にわたって「高温長期材料試験」を行う。

高温弁としてはタービン蒸気弁、ボイラ起動弁（タービンバイパス弁）、ボイラ安全弁等がある。これらはタービンの蒸気流量の制御、ボイラ起動

表 1 ボイラ候補材料

材料呼称		組成	厚肉大径管	小径管
HR6W	Fe-Ni基	45Ni-23Cr-7W	主蒸気管 高温再熱蒸気管 高温部管寄せ 高温部連絡管	高温部伝熱管
HR35	Ni基	50Ni-30Cr-4W-Ti		
Alloy617	Ni基	Ni-22Cr-12Co-9Mo-Ti-Al		
Alloy263	Ni基	Ni-20Cr-20Co-6Mo-Ti-Al		
Alloy740	Ni基	Ni-25Cr-20Co-2Nb-Ti-Al		
Alloy141	Ni基	Ni-20Cr-10Mo-Ti-Al		
高B-9Cr鋼	フェライト鋼	9Cr-3W-3Co-Nb-V-B	管寄せ及び連絡管 (約650℃まで)	伝熱管 (従来高Cr鋼と同程度の温度領域)
低C-9Cr鋼	フェライト鋼	0.035C-9Cr-2.4W-1.8Co-Nb-V		
SAVE12AD	フェライト鋼	9Cr-3W-2.6Co-Nb-V-B		

		2008 H20	2009 H21	2010 H22	2011 H23	2012 H24	2013 H25	2014 H26	2015 H27	2016 H28	2017以降		
システム設計	システム設計、設計技術開発	基本設計、配置最適化、経済性試算											
要素開発	ボイラ	材料開発	大径管、伝熱管用新材料開発、材料改良										
			高温長期材料試験（3～7万時間）										10万時間
		材料製造性検証	溶接技術開発・試験、曲げ試験										
	タービン	材料開発	材料改良仕様策定等		実サイズ部材試作								
			ロータ、ケーシング等の大型溶接技術、試作										
			高温長期材料試験（3～7万時間）										10万時間
高温弁	構造・要素・材料開発	試設計		試作									
実証試験・回転試験（高温弁含む）		設備計画		設備設計		設備製造、据付		試験、評価		実証機			

図 8 マスタースケジュール

表 2 蒸気タービンロータ候補材料

候補材料	開発のポイント		
	重量	耐用温度	特徴
FENIX-700	10ton超	700℃	10ton超クラス大型鍛造品 IN706からの改良 鉄-Ni基合金
LTES700R	30～40ton 超合金部分10ton	700℃以上	10tonクラス大型鍛造品 低線膨張係数 溶接継ぎ手強度・信頼性確保が重要
TOSIX		720℃以上	10tonクラス大型鍛造品 IN617からの改良 720℃クラスの温度 溶接継ぎ手強度・信頼性確保が重要

組成（質量%）	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	Fe	C	B
FENIX-700	42	16					2	1.24	1.7	Bal.		
LTES700R	Bal.	12		6.2	7			1.5	0.9		0.031	
TOSIX	Bal.	18-28	10-15	5-12		0.1-0.7	0.1-0.4	0.8-1.5	0.6-1.5		0.01-0.15	0.001-0.006

時の蒸気流量制御、緊急時に蒸気を逃がす等の機能を有し、システムを安全に運用する上でたいへん重要な機器である。700℃の蒸気環境下での高い信頼性を確保するために、弁の摺動部の耐久性や、弁棒周りからの蒸気リーク防止するパッキン材の耐久性に関する開発、検証を行う。

開発はIHI、ABB日本ベレー、住友金属工業、東芝、バブコック日立、日立製作所、富士電機システムズ、三菱重工業、電力中央研究所、物質・材料研究機構から構成される「A-USC開発推進

委員会」により推進されている。

3. 開発状況

要素開発プロジェクトが開始され、3年が過ぎ、ほぼ予定に沿って試作、検証試験が進められている。図9は試作されたボイラ用の大径管であり、高温長期材料試験、溶接試験、曲げ加工試験に供された。

図10には高温長期材料試験の一例としてHR6Wの母材と溶接継手のクリープ試験状況を示す。大径管材料の開発目標は10万時間、700℃で

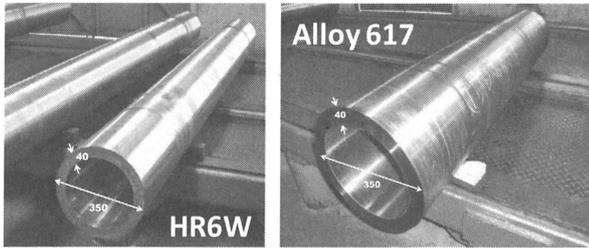


図 9 試作されたボイラ大径管 (住友金属提供)

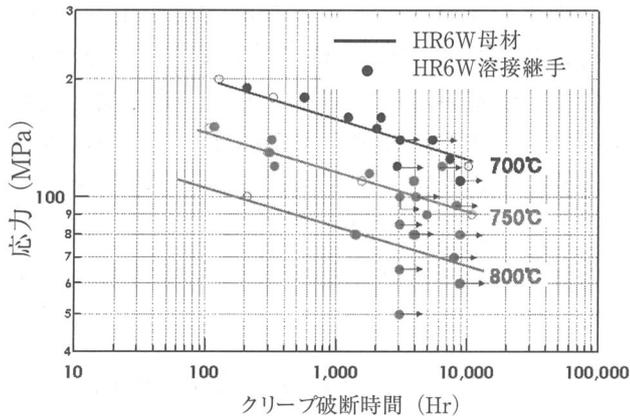


図 10 HR6W母材と溶接継手のクリープ強度 (住友金属他提供)

90MPa以上のクリープ強度であるが、今のところ1万時間程度まで順調に試験が進んでいる。

蒸気タービンについては図11に示すような溶接ロータ、溶接ケーシング構造が提案されている。ロータやケーシングの中でも高温部だけにNi基合金を使い、それに従来の鉄鋼材料を溶接し、大型の部材を構成しようというものである。図12は試作された7トンのNi基合金製ロータであり、

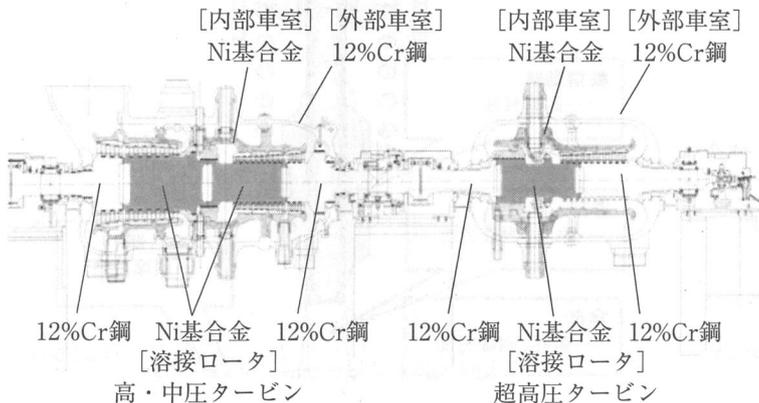


図 11 蒸気タービン溶接構造 (三菱重工業提供)



図 12 Ni基合金製ロータ (東芝提供)

より大型化すべく開発を進めている。さらに、試作ロータから切り出した試験片により高温長期材料試験等の材料試験を行うとともに、溶接試験を実施している。ケーシング、高温弁等についても同様に試作、材料試験を行っている。

むすび

石炭火力発電からの二酸化炭素排出削減を狙い、700℃級の蒸気条件を有するA-USCの要素技術の開発が推進されている。開発には国内の主なボイラメーカー、タービンメーカー、研究所などが参加し、2008年度から2016年度の9年間で、ボイラ、タービン、高温弁などの材料開発/検証、要素技術検証等を行っている。

要素開発プロジェクトが開始されてから約3年が経過したが、ほぼ予定に沿って試作、検証試験が進められている。

これまでに、ボイラでは候補材料による大径管等の部材試作が実施され、それらから切り出された試験片等によりクリープ試験、溶接試験、曲げ試験等が行われている。タービンでは候補材料によるロータ、ケーシング等の部材試作が実施され、クリープ試験、溶接試験等が行われている。

今後、A-USCの実現に向けて、鋭意、技術開発、検証を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 平成22年度電力供給計画の概要について、<http://www.meti.go.jp/press/20100331011/20100331011-1.pdf>、経済産業省、2010。

2. 自動車 (エンジンバルブ)

フジオーゼックス(株) ひろ せ まさ ひと
CS推進部 開発室 廣 瀬 正 仁

まえがき

エンジンバルブは4サイクルのレシプロエンジンに於いて、燃焼を制御する主要な構成部品であり、その役割から、高温且つ高負荷の過酷な環境で耐用できる機能を有することが求められる。

昨今では、環境保全の観点から、最適燃焼領域での運転域拡大や代替燃料への置き換えが進むなど、エンジンバルブの要求品質はこれまで以上に高まる傾向にある。以上の背景より本稿ではエンジンの技術動向を述べるとともに、エンジンバルブの機能及び要求特性、今後の課題について紹介する。

◇ エンジンバルブの機能及び要求特性

エンジンバルブには燃焼室内に混合気(直噴エンジンでは空気)を導く吸気バルブと燃焼室から燃焼ガスを排出する排気バルブがあり、カムにより開閉されて、燃焼室内の気密性を確保する機能を担う。図1にレシプロエンジンの直打式動弁機構を示す。

エンジンバルブは単体部品であるが、部位により、いくつかの異なる特性が要求される(図2)。

要求特性の中で重要視されるのは、長時間の間、高温下の使用に耐え得る強度である。特に排気バ

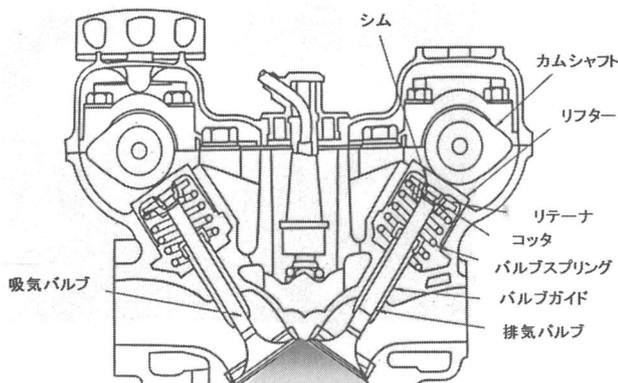


図 1 レシプロエンジンの直打式動弁機構

ルブは高温の燃焼ガスに晒されるため、800℃を超える温度域で使用されることが多い。高温下では、酸化や腐食などによる経時劣化が生じる為、基材には高い強度を維持できる耐熱鋼やNi基超合金などが用いられている。また、他部品と接触するフェース部、軸部、先端部は、正常な作動状態を確保するため、各々適正なクリアランスを維持することが重要であることから、用途に応じた表面硬化処理や硬質合金の肉盛など耐摩耗処理を行なっている。

◇ エンジンバルブの種類と特徴

エンジンバルブの仕様は大別すると5つの仕様に分けられ、用途に応じて、使い分けられている(図3)。

通常、使用される材料は、吸気バルブにはマルテンサイト系耐熱鋼、排気バルブにはオーステナイト系耐熱鋼やNi基超合金などの高温強度の高

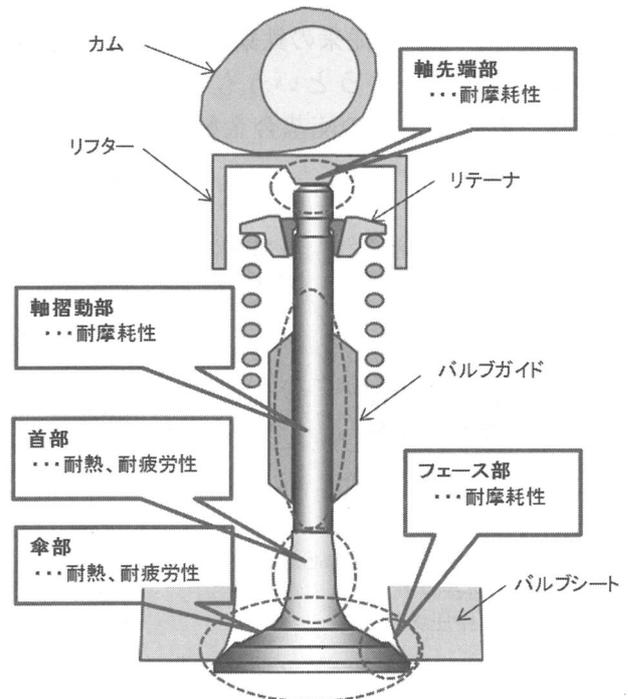


図 2 エンジンバルブの要求特性

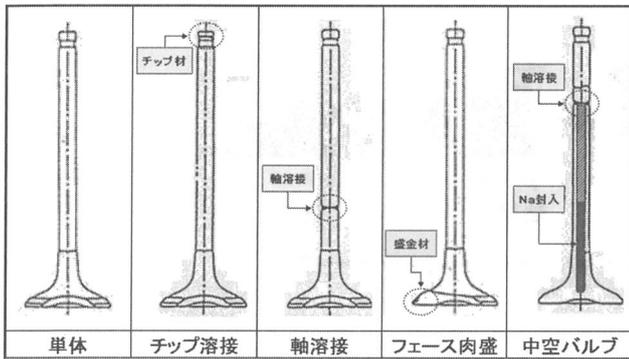


図 3 バルブの種類

い材料が用いられる。また、軽量化を目的にチタン合金などの比強度が優れる軽量材料を用いた事例も見られる。

チップ溶接バルブや軸溶接バルブは2種類の材料で構成され、軸先端部の耐摩耗性向上を目的としている。

また、フェース盛金バルブはフェース部に耐摩耗性に優れる材料を肉盛り、バルブフェースとバルブシート間に生じる摩耗が抑制できるため、高負荷のエンジンに採用されている。

中空バルブは中空孔内に冷媒を封入することで、高い冷却性能と軽量が特徴である。

◇ エンジンバルブの要求トレンド

地球温暖化防止の観点から温室効果ガス（二酸化炭素、オゾン、メタンなど）排出量の低減が求められており、レシプロエンジンに於いても厳しい排出ガス規制値が設定されている。この規制値を達成するため、レシプロエンジンを含めた低燃費化技術の開発推進が積極的に行われている。

レシプロエンジンの低燃費化手段として、熱効率向上、軽量化、代替燃料への置き換えなどの取り組みが行なわれている。

①熱効率向上… $\lambda=1$ 運転領域の拡大

$\lambda=1$ （理論空燃比）運転領域拡大により、出力、燃費を高次元で両立することができるが、燃焼温度の上昇に伴い、排気バルブの作動温度が上昇する。

最近では、バルブの耐熱要求温度が900℃を超えるケースも発生している。

②ダウンサイジング化

小排気量化に伴い、出力を過給機で補完すると

ともにEGRなどの積極的使用により、低燃費と出力を高いバランスで維持する。過給機搭載やEGR率の拡大により、排気バルブには耐熱性、吸気バルブには耐食性の要求レベルが高まる見込みである。

③軽量化

車体やエンジン本体の軽量化が進められる一方で、エンジンの可動部についてもフリクション低減が求められている。

動弁系部品も例外ではなく、チタン合金製バルブや中空バルブなどの採用によって軽量化を図り、慣性質量を低減することが課題となっている。

④代替燃料

バイオエタノール燃料を筆頭に、天然ガスなどの代替燃料の採用拡大が検討されている。

代替燃料は従来のガソリン、軽油に対して、H/C比が高く、水分の混入やギ酸、酢酸などの生成による腐食の進行やドライ雰囲気による摩耗が懸念されていることから、エンジンバルブにも耐食、耐摩耗性に優れる材料の開発が求められている。

⑤高圧縮比化

高圧縮化の課題として、ノッキング対策が最重要課題であり、ヒートスポットを構成部品の熱伝導性改善等により回避する手段が求められている。特にヒートスポットになる排気バルブについて、高い熱伝導性を示すNa封入中空弁が注目されている。

◇ エンジンバルブの製造方法

エンジンバルブは丸棒素材から、鍛造工法で成形し、その後、熱処理を経て、機械加工で完成形状まで加工される。

鍛造工法には太径素材を用いて、搾出工程と成形工程の2段階からなる搾出鍛造工法と製品軸径と同等の細径素材を通電加熱し、団子形状を得る行程と据え込行程からなる電気鍛縮（アプセット）工法の2種類の工法があり、大ロット品には生産性の高い搾出鍛造工法が適用される。

鍛造後は熱処理を施し、CBN研削工法を主体とした機械加工で製品寸法に仕上げ、表面処理を行なって完成する（図4）。

表面処理には耐摩耗性に優れている事やコスト

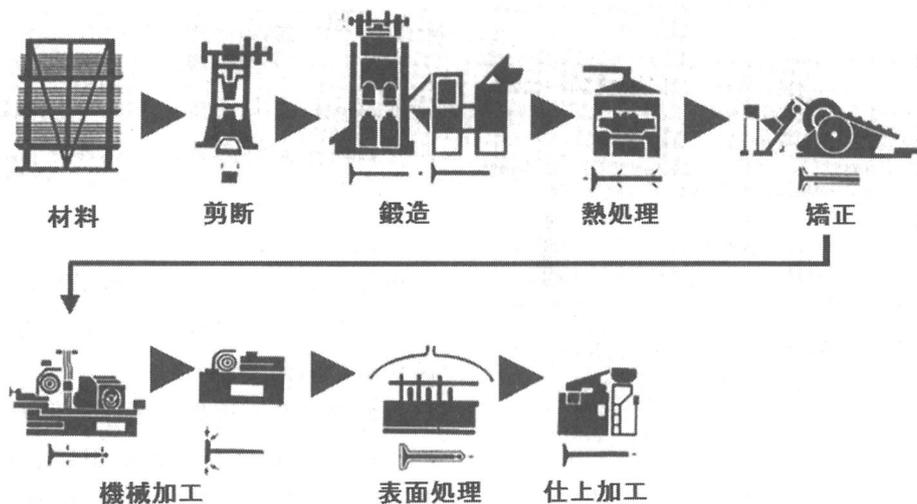


図 4 バルブの製造工程

面から軟窒化処理が多く使われている。

◇ 今後の取り組み

エンジントレンドから、エンジンバルブの使用環境は今後、更に厳しくなることが予測され、耐熱性と耐食性の改善要求が高まる見込みである。

一方、軽量化についても、引き続き要望されている。

耐熱性を向上する手段として、従来、Ni基超合金が適用されてきたが、Ni相場の変動影響が大きい事や900℃を超える高温領域では、強度低下代が耐熱鋼に比べて大きいことから、今後は冷却効果の高いNa封入中空バルブの適用も検討される見込みで、低廉中空バルブの開発が求められている。

また、中長期対応として、更なる低廉化や、軽

量化、高熱伝導性を備えたエンジンバルブの開発が必要と考えている。

むすび

レシプロエンジンにおける改良取り組みにより、ここ数年間で、エンジンからの排出ガス量は大幅な削減を果たし、環境保全に貢献している。エンジンバルブはレシプロエンジンが創成してから今日まで、大きく構造を変えることはないが、仕様を最適化することで、この改良に貢献し、使われ続けてきた。

今後、排出ガス規制値は一層厳しくなる見込みだが、エンジンの技術改良取り組みに対して、エンジンバルブメーカーとして、積極的に新技術を取り入れ、改善に取り組んでいきたい。



3. 航空エンジン材料

(株)IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター 材料技術部 なかのわたり いさお
中野 渡 功
 (株)IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター 材料技術部 たけかわ みつひろ
竹川 光 弘

まえがき

民間航空機用ジェットエンジンの運用開始から約60年が経過した。この間にエンジン形態は当初のターボジェットからターボファンに変化し、最新のターボファンエンジンは第五世代まで進化している。さらなる低燃費、低騒音、低燃焼排出物を追求した開発競争に向けて、設計技術、生産技術・加工、部品機器技術などの技術革新と合わせ、素材技術開発が果たす役割は非常に大きくなっている。

本稿では、航空エンジンの構成と使用材料の概要を紹介するとともに、今後のエンジン開発と適

用材料の技術動向について耐熱金属材料を中心に概説する。

◇ エンジンの構成と要求される材料特性

図1はターボファンエンジンの構成と、使用環境温度、及び典型的な損傷事由と使用材料の概要を纏めたものである¹⁾。ファンと低圧タービン、圧縮機と高圧タービンがそれぞれシャフトで結合され、高圧タービンは圧縮機を、低圧タービンはファンを駆動させる2軸の方式である。

飛行環境では氷点下となる外気は、圧縮機での昇圧により600℃を超える温度域までの高温となり、燃焼器以降の高温部位においては、ニッケル

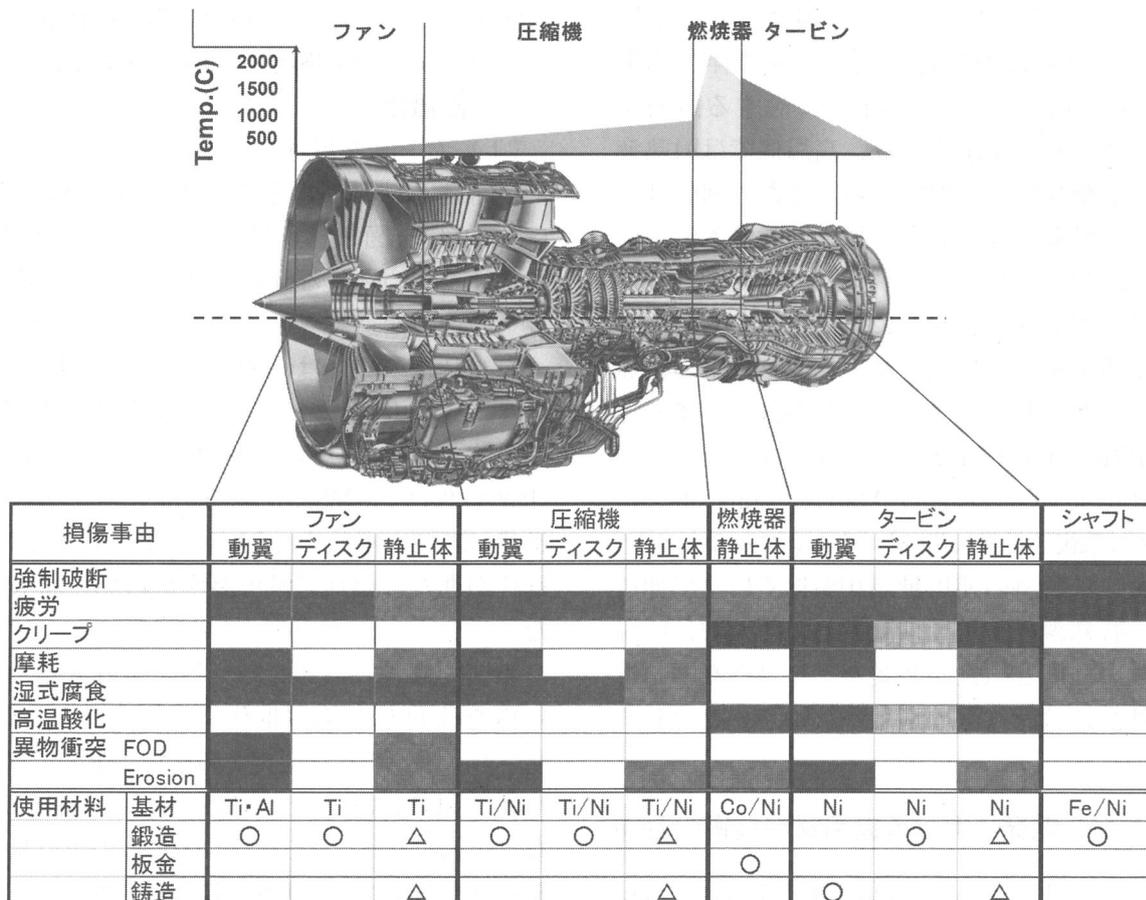


図 1 エンジンの構成、使用環境温度および損傷事由、使用材料

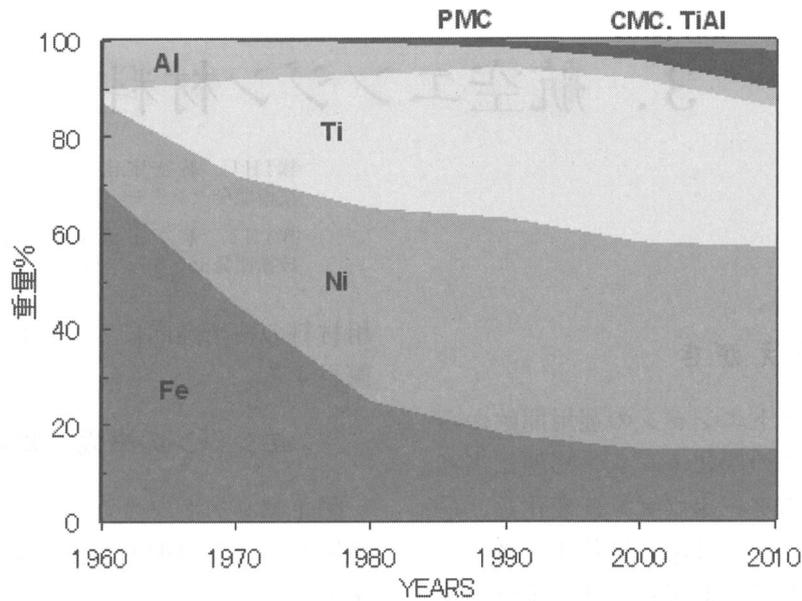


図 2 エンジンに使用する各素材の重量比の変遷

(注) 略語 PMC: 高分子系複合材料 CMC: セラミックス系複合材料 TiAl: チタンアルミナイド

基耐熱合金の融点をはるかに超え、タービンの入り口温度は1600℃を超える。このため、高温部位では、圧縮機で昇圧した空気の一部を使った冷却設計や熱遮蔽コーティングを組み合わせている。

エンジン入口のファンから圧縮機前段にかけては、鳥や氷などの異物の吸い込みに伴う損傷(FOD: Foreign Object Damage)に対する耐衝撃性や耐湿式腐食性が求められ、高温側では耐熱疲労、耐高温酸化性が重要である。また、回転部のディスク・動翼では遠心力や振動に対する耐疲労特性と、高温側では耐クリープ特性が重要となる。

図2に典型的なエンジンに使用する各素材の重量比の変遷を示す。現在ではエンジン重量の70%程度はニッケル基、チタン基合金が占め、また近年ではPMC (Polymer Matrix Composite高分子系複合材料)、CMC (Ceramic Matrix Composite、セラミックス系複合材料)、TiAl (チタンアルミナイド)といった軽量材料の使用量が10%近くにまで伸びてきた。特殊鋼の使用量は減少してきたが、中温度域で高い強度と靱性が必要なシャフトなどの重要回転部品には特殊鋼の適用が続くものと思われる。

◇ エンジン開発における適用材料技術の動向

エンジンの性能向上、特に低燃費化においては、熱サイクルの高温・高圧化と、高バイパス比化に

よる推進効率向上が鍵となる。高温・高圧化には、タービン翼材及びディスク材の耐用温度向上が不可欠である。また、高バイパス比化は、ファンの大型化とそれを駆動する低圧タービンの重量増を意味することから、これらの部位を中心に軽量材の適用、及び軽量構造の採用が必須となる。

1. 高温化

(1) タービン翼材

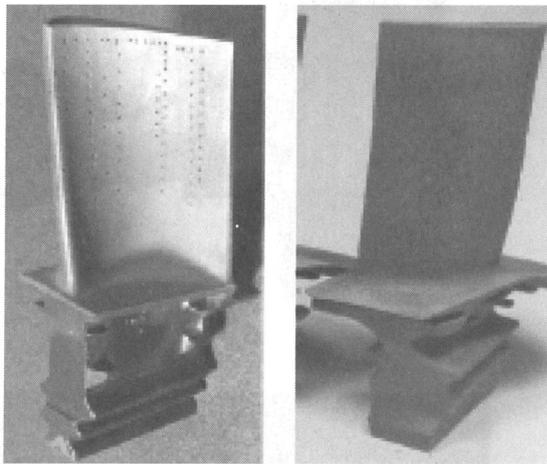
精密鑄造法により製造されるタービン翼材材料(その外観を図3(a)に示す)の中でも特に高い耐熱性が求められる部材には、ニッケル基単結晶合金の適用が進んでいる。

単結晶材の開発は、1000℃級の第一世代(CMSX®-2、PWA1480®など)にはじまり、現在の民間航空機用エンジンに多用されている第二世代(PWA1484®, CMSX-4®, Rene'N5®など)、第三世代(CMSX-10®, Rene'N6®, TMS-75®など)へと、世代が進むにつれて耐用温度が約25℃向上してきた。

米国ではさらに、高温長時間使用下での組織安定性を改善した第四世代(EPMI02®など)²⁾が開発され、最新のエンジンへの適用が進んでいる。また我が国においても、NIMS (物質・材料研究機構)などが第四世代、さらには1100℃級の第五世代の単結晶材を開発し³⁾、世界的に注目を集めている。

一方で、世代を追うごとにReやRuといった希

(a) タービン翼の例²⁾



(b) タービンディスクの例⁵⁾

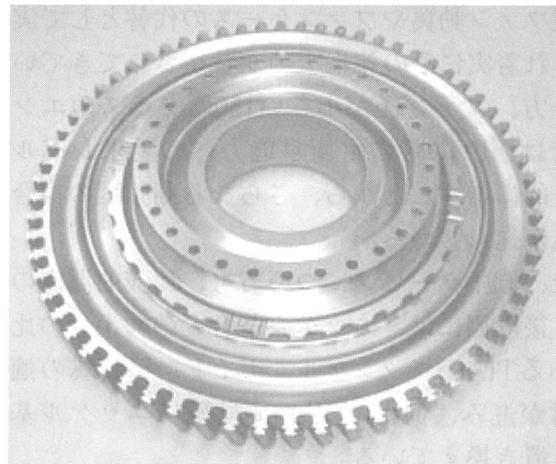


図 3 主要なモジュールの代表部品とそれらに必要な材料要求特性

少性の高いレアメタル添加量が増加し、調達性や経済性の面でのリスクが増大してきている。これに対し、例えばGE社では、レアメタルの安全在庫の確保やリサイクル体制の整備に加え、第二世代Rene N5®をベースにその特性を損なうことなくRe使用量を低減したRene N515®及びRene N500®を開発し、本格的に民間航空機用エンジンへの適用を開始している⁴⁾。

今後の単結晶材開発は、このような資源戦略・経済性とのバランスが重要な視点となって進んでいくものと思われる。

尚、ニッケル基超合金の融点近い温度域でも使用可能で、ニッケル基合金に比べ比重が1/3～1/4と非常に軽量のCMCの動静翼への適用検討も注目を集めている。こうしたさらなる高温・軽量材料の実用化は、それを保持するタービンディスク材の形態を大きく変えていく可能性をもつ。

(2) タービンディスク材

ディスク材の外観を図3(b)に示す⁵⁾。タービンディスクは、外周部に動翼を保持して高速回転し、数百トン規模の遠心力を単一部品で保持する必要があることから、極めて高い強度特性と信頼性が求められる。このため、耐用温度向上のための合金開発と、不均一組織あるいは介在物等の欠陥を徹底的にマネジメントするための製造プロセス開発の両面からのアプローチが不可欠である。

タービンディスク材はその製造方法から、溶製鍛造材(C&W: Cast & Wrought)と粉末冶金材(PM: Powder Metal)に大別される。C&W材と

しては、現在はAlloy718あるいはさらに耐用温度の高いU720が広く普及している。

近年では、米国Allvac社がAlloy718をベースに耐用温度を約55℃高めるとともに製造コストともバランスをとった718Plusを、また、仏Aubert&Duval社はAD730をそれぞれ開発し^{6)、7)}、一部ではエンジンメーカーによるディスクグレードの溶解プロセスの認定作業も進み、実機への適用検討が本格化している。

一方、耐熱性向上のための高合金化は、インゴット溶製時の成分偏析や鍛造性を大きく損なうなど製造性上のリスクがあり、より高温域で使用される高圧タービンディスク材には、PMによる均質・微細組織のディスク材適用が一般的となっている。損傷許容設計の進歩に合わせ、耐用温度向上とともにき裂進展特性を大幅に改善したRene' 88DT®、さらにはME3®の実機適用が進んでいる⁸⁾。

PMディスクはその製造コストが課題であったが、近年は民間エンジンの量産機種への適用範囲が大幅に広がり、事業規模が大きく拡大したことから低コスト化が進んでいる。

国内では、NIMSにて、コバルト(Co)基超合金の良い性質も併せ持ち先進のPM材に近い耐用温度のC&W Ni-Co基超合金が進み⁹⁾、エンジンへの適用検討が進んでいる。

2. 軽量化

(1) 軽量材の適用

ファン部の軽量化には、PMCの実機適用が広

がってきており、GE90など大型エンジンではチタン製ファン動翼やファンケースの代替として実用化され着実にその運用実績が蓄積されてきている。一方、ファン径が小さい150席クラスのエンジンでは、FOD時の耐衝撃能力への要求レベルが相対的に増すことから、さらなる高強度の複合材開発が進んでいる。

また、低圧タービンについても、比較的温度の下がる後段側には、ニッケル基合金の約半分の比重であるTiAl（チタンアルミナイド）製動翼の適用検討が進み、例えばGEnxでは既にニッケル基合金を置き換えている。

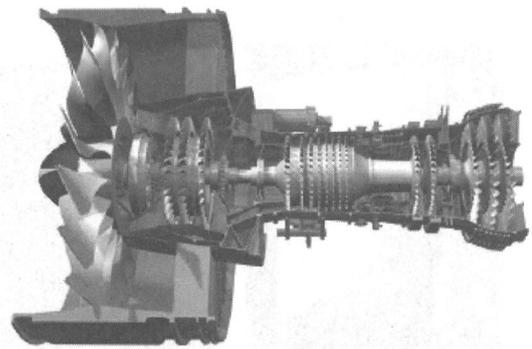
（2）軽量構造の採用

軽量構造としては、回転系に動翼とディスクを一体化したブリスク構造の採用が進んでいる。また、静翼とこれを支持する強度部材の一体化が部品点数削減からも有効である。フレーム類等の構造部材においても素材段階から複雑形状化、一体化構造の採用が進んでいるが、鋳造品での製造性としては難易度が非常に高く、現状は事業として成立しうる技術力、インフラを備えた鋳造素材メーカーは世界的に見ても数社しか存在しない。欧米諸国では鋳物に替わる別の選択肢として、鋳物、シート材、リング材を溶接して構造部材を成形するファブリケーション技術や、CADデータ通りに粉末材を使って構造部材を成形するRapid Manufacturing技術開発に注力している。

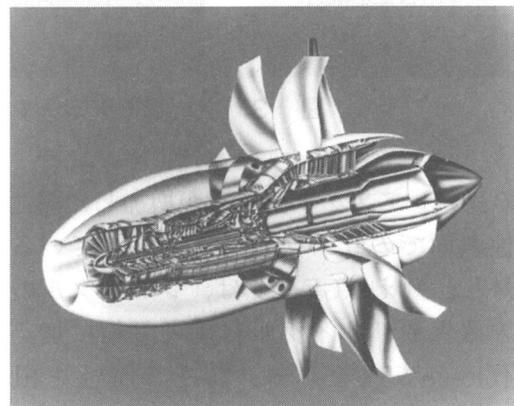
◇ エンジン開発動向と材料技術

高温・高圧化、軽量化によるエンジンの高効率化に加え、バイパス比を大幅に上げる手段として、今後は、図4に示すようなギヤードターボファン（GTF）やオープン・ローター（OR）といった新しいエンジンアーキテクチャーも加わって開発が進んでいくと考えられる^{10), 11)}。

GTFは、低圧タービンでファンを駆動せず、一旦減速歯車で回転数を落としてからファンを駆動する方式である。数年後に運航開始が予定されている三菱航空機MRJ、ボンバルディアC Series等へ搭載予定のエンジンはこのタイプである。一方、ORは、ダクト無し的大型2重反転ファンを推力発生源とする方式である。航空機への搭載上、プロペラサイズに制約が出ることから、大型機に



(a) ギアド・ターボファン (GTF)¹⁰⁾



(b) オープン・ローター (OR)¹¹⁾

図 4 GTF、ORエンジン構成例

は向かないと思われるが、150席級以下のクラスにおいては可能性がある。

GTFの減速歯車はエンジン内部にあるため、大きさの制約が厳しいことや放熱しにくい構造となることから、歯車の小型化に伴う軸受の高負荷化への材料面からの対応、高温条件下で使用可能な歯車材が必要となる。航空エンジン用の歯車材としては現在、AISI9310鋼などが多用されているが、GTFの減速歯車には、これよりも高温で使用することのできる材料が必要となる。

海外では300℃程度までHRC60以上の硬さを保つことのできるステンレス鋼も開発されているが、大型化するにつれ重量が課題となり、軽量の耐摩耗材開発がエンジンの構成に大きな影響を及ぼすことになるものと思われる。

むすび

宇宙・航空機用機器のうち、耐熱金属材料が多用される航空エンジンについて、そのしくみと開発動向、材料適用技術動向について述べてきた。

航空エンジン事業では、設計技術や生産技術だけでなく、部品や素材技術も含めたトータルの「ものづくり力」が競争力を左右する。

航空用耐熱金属材料の分野は、海外では戦略的なM&Aが進み、水平あるいは垂直統合された巨大な素材メーカーが、規模による開発力と「認定」の高い参入障壁を背景に、主要なサプライチェーンをおさえる構造が出来上がっている。こうした趨勢の中で、国内の優れた素材技術の実用化にあたっては、技術開発と併せ、原料から加工・リサイクルまで通したValue Chainを確立する企業戦略、そして経済性が揃うことが不可欠である。

例えばタービンディスク材の開発においては、これまで実ディスク製造に必要な数万トン規模の鍛造プレス機が国内に存在せず、ボトルネックとなっていたことから、平成20年7月に「航空用大型鍛造プレスの国内設置に関する研究会」を立ち上げ、機体・エンジンメーカー、素材メーカーなど関係各社と一緒に大型設備の国内設置の可能性について議論をさせて頂いた。関係機関の皆様にもご支援を頂き、今年3月には具体的にその建設がスタートすることになった¹²⁾。

これにより、ディスク開発ステップの大幅な加速が期待される。こうした動きも先行例として、従来の枠を超えた連携も視野に新たな素材技術や大きな設備投資に挑戦し、「ものづくり力」を継

続的に伸ばしていく取り組みが必要である。

参考文献

- 1) 服部 博、熱処理、44(2)、69-75 (2004)
- 2) S. Walston et al., Joint Development of Fourth Generation Single Crystal Superalloy, SUPERALLOY 2004, (2004) p15-24
- 3) A. Sato et al., A 5th GENERATION SC SUPERALLOY WITH BALANCED HIGH TEMPERATURE PROPERTIES AND PROCESSABILITY, Superalloy 2008, (2008) p132-138
- 4) Robert E.Schafrik, "Accelerated materials and process development", ISABE-2009-1167
- 5) 竹川光弘ほか、学振123委員会研究報告、42、183 (2001)
- 6) W.D. Cao et al., "Role of Chemistry in 718 type Alloys-Allvac® 718Plus™ Alloys Development", SUPERALLOY 2004, (2004) p91-99
- 7) Alexandre Devaux et al, Development of new C&W superalloys for high temperature disk applications, Advanced Materials Research, Vol. 278, (2011) p405-410
- 8) UEET (Ultra-Efficient Engine Technology Program), Fiscal Year 2002 Performance report.
- 9) Y.F. Gul, et.al., "DEVELOPMENT OF Ni-Co BASE ALLOYS FOR HIGH TEMPERATURE DISK APPLICATIONS", SUPERALLOY 2008, (2008) p53-61
- 10) プラット・アンド・ホイットニー社ホームページ、<http://www.pw.utc.com>
- 11) GE社ホームページ、<http://www.geae.com/engines/index.html>
- 12) 2011年3月1日付 (株)IHI、(株)神戸製鋼所等 プレスリリース



4. 廃棄物処理と耐熱材料

—発電拠点としての役割と課題—

首都大学東京 大学院 よし ば まさ ゆき
理工学研究科 機械工学専攻 教授 吉 葉 正 行

まえがき

廃棄物やバイオマスからのエネルギー変換の高効率化を目指して、廃熱ボイラによる発電の高温高圧化が進んでいる。この背景には、CO₂排出削減を中核とした地球温暖化対策や、再生可能エネルギー利用促進などにおけるバイオマス系エネルギー資源への熱い期待など、今世紀に入り廃棄物・バイオマスが保有する多様な価値の有効利活用の機運が高まっていることが挙げられる。しかしその一方で、廃棄物処理プラントにおける技術課題は、腐食や摩耗などの部材表界面問題に集約されるといっても過言ではないほど複雑かつ多様な損傷の様相を呈し、とりわけ表1に示すように、プラント各部位において発現する多様な腐食現象との格闘の歴史でもある。さらに今後、廃棄物・バイオマスが有する資源エネルギー価値の利用技

術の高度化に際しては、国民の理解や行政面での対応など多くの面で課題が残されている。

本稿では、1990年以降精力的に展開され、実用化が進んでいる廃棄物発電の高効率化技術を支える耐熱耐食ボイラ過熱器管用材料の研究開発動向を中心に紹介する^{1)~4)}。なお、廃棄物焼却処理におけるダイオキシン類(DXNs)など健康リスク物質に対する環境負荷低減を目指した研究開発も1997年以降展開されたが、この観点の詳細については他の解説に譲りたい^{2) 3)}。

◇ 廃棄物発電プラントの技術動向と 発電部材の高温腐食問題

1. 高効率発電技術

廃棄物焼却余熱によるエネルギー利用の高度化技術を主眼に廃棄物発電の高効率化を目指した研究開発が1990年以降活発に展開され、大きな成果

表 1 廃棄物焼却プラント主要部位における腐食損傷事例の概要と対策例

部位	温度・環境の特徴	適用材料	腐食損傷の概要	対策例
燃焼室 火格子	火格子表面温度：約380～650℃ ごみの燃焼状況により火格子表面では急激な温度変動を伴う	鋳鋼 鋳鉄	溶融塩とガスによる複合腐食(塩化-酸化-硫化、酸化-還元)	・高Cr耐熱鋳鋼の使用 ・鋼中Ni含有量の適正化
燃焼室水冷壁管	燃焼ガス温度：800～1200℃ 金属表面温度：230～300℃ 二次燃焼により急激な温度変動を伴う	炭素鋼 ステンレス系複合材料	酸化-還元ならびに熱サイクルによるスケール崩壊と複合腐食の助長	・高酸素濃度での安定燃焼 ・二次燃焼域での耐火物の打撃 ・肉盛、溶射などによる耐食合金コーティング
ボイラ [過熱器管ガス側]	ガス温度：500～750℃ 金属表面温度：300～550℃	炭素鋼・合金鋼 ステンレス鋼 Ni基合金	塩化物-硫酸塩系溶融塩とガスによる複合腐食(塩化-酸化-硫化)	・ボイラ設計の改善 ・排ガスの温度-流速等の低減 ・安定な固相硫酸塩生成による腐食環境の調和 ・高耐食性合金システムの導入
ボイラ [過熱器管蒸気側]	過熱蒸気温度：250～500℃	炭素鋼・合金鋼 ステンレス鋼 Ni基合金	アルカリ腐食(孔食)	・ボイラ負荷(温度)の安定化 ・リン酸塩処理に基づくボイラ水管理の適正化
排ガス処理設備 (HCl、SO ₂ 等)	排ガス処理温度：(180～280)℃→70℃ 中和反応による排ガスの冷却吸収	構造用鋼 ステンレス鋼 Ti	酸(HCl、H ₂ SO ₄ 等)ならびにアルカリ(NaOH等)による溶液腐食	・急冷管内面へのFRP被覆またはテフロンシート加工
煙突 (RC外筒-保温型 鋼製煙突)	排ガス温度(煙突入口)：180～280℃ 鋼板表面温度：50～80℃ 炉の起動停止に伴う熱変動と排ガス成分の凝縮	構造用鋼 コンクリート	温度変動下での酸腐食 露点腐食 すきま腐食	・煙突下部でのドレーン抜き ・SUS316L以上の高耐食性鋼板の使用 ・耐酸性樹脂コーティング

を挙げた。廃棄物行政を所管する当時の関係省庁の取組み状況を反映して、主に以下のような高効率化技術が実用化されている³⁾。

- (1) ボイラ過熱器 (SH) 高温高压型 [ごみ固化燃料 (RDF) による高温高压型を含める] (当時、厚生省、通産省)
- (2) ガスタービン複合型 [スーパーごみ発電] (当時、自治省)

このような国家プロジェクトによる研究開発の結果、廃棄物発電ボイラの過熱蒸気温度と発電端効率⁴⁾は1995年以降大幅に改善され、300℃ - 3MPa以下であった当時の蒸気条件が大型プラントで400℃ - 4MPaクラスの導入普及により20%以上の発電効率が現在の標準となっている³⁾。

さらに、廃棄物からの高度マテリアルリサイクルをも可能にする次世代型廃棄物処理技術の中核として、「熱分解ガス化溶解」システムが1995年以降導入され、現在既に約60箇所以上の自治体への設置が進んでいる⁴⁾。この方式によれば、従来の焼却処理では避けられなかった残灰処理が不要になるうえ、熱分解過程で得られる金属やガレキ類から灰の燃焼溶解過程で生ずるスラグの再利用まで一貫して最大限のマテリアルリサイクル化と同時にDXNs問題も基本的に解決できる合理的システムである。現在までに設置導入が進んでいる主なガス化溶解システムとしては、シャフト炉 (高炉) 方式による直接ガス化溶解システム、ロータリーキルン方式あるいは流動床方式による熱分解ガス化溶解システムの3種類があり³⁾、これらに共通して、約1300℃に達する灰溶解炉ガス的高温熱源等を利用して高効率廃棄物発電も可能である²⁾。しかしその一方で、早急にクリアすべき課題も相当多く残されている²⁾。

その結果、廃棄物発電における発電出力 (供給能力) は1995年以降急速に増加し、現在では一般廃棄物と産業廃棄物の処理プラント合計で約200万kWに達して、火力、原子力、水力発電に次ぐ第四の電力供給源となっている。一方、2005年に改訂された供給サイドの新エネルギー導入目標によれば、廃棄物・バイオマス発電に対する期待は太陽光発電に次いで非常に大きい。

2. 廃棄物発電部材の高温腐食問題

石油や石炭など化石燃料による超々臨界圧

(USC) 型ボイラや先進型超々臨界圧 (A-USC) ボイラでは、650 ~ 700℃クラスの過熱蒸気利用により引張強さやクリープ強度特性を基本的設計仕様とし、高温耐食性に関しても硫化-酸化反応主体の耐環境特性を担保することが通例である。これに対して廃棄物発電用ボイラでは、過熱蒸気条件が最高でも500℃ - 10MPa以下と低いため、温度-応力レベルからみれば耐力または引張強さが基本的強度特性であり、普通鋼でも通用する条件である。したがって、廃棄物燃焼特有の過酷な腐食環境で長時間運用されるボイラではむしろ、SH材料の耐用寿命が腐食減肉によって決定される場合が多いという特徴がある。

廃棄物発電プラントにおける伝熱管材の腐食速度は、いわゆる「釣り鐘型」の温度依存性を示し、320℃程度以上で急激に腐食減肉が顕在化する。このため、従来型プラントのように管壁温度が320℃程度以下に抑えられていれば普通鋼であっても高温腐食は基本的に問題にならないが、それ以上になると飛灰成分の管壁への付着堆積に起因した溶解塩腐食が急激に深刻化するために高耐食性合金が不可欠となる。とくに、廃棄物燃焼灰特有の低融点塩化物共晶系化合物が腐食に直接関与することが特徴的である。当該プラント環境で問題とすべきNa、Kや重金属類などからなる各種塩化物共晶系化合物の多くは約180℃以上で溶解し、多元系化合物の融点はさらに低下する。一方、焼却処理されるごみ質やプラントの性能と規模、燃焼条件などによっては燃焼ガス中に500 ~ 1,000ppm程度の高濃度HClを含むために腐食性が相当強く、それゆえ高温化ボイラSHでは溶解塩と流動燃焼ガスとの競合による複合腐食が深刻な問題となる⁵⁾。ここでの腐食反応は基本的に、塩化-酸化反応の繰返しによるオキシクロリネーション反応が主体で、一部には金属酸化物などを触媒剤とするDeacon反応によりHClのCl₂への転換を伴う急速な腐食反応が関与しているものと考えられている³⁾。

◇ 高温高効率ボイラの設計指針と高耐食性合金開発

上述のように極めて厳しい複合腐食による損傷問題解決のためには、環境側と材料側双方からの

アプローチにより総合的な腐食抑止策を講ずる必要がある。このような観点から、1990年代当時の検討結果を要約し、400℃クラス以上のボイラにおいて有効な腐食軽減策と具体的ガイドラインを列挙すると以下のようになり、現在では大半のプラントがこの条件を満たすよう設計されている³⁾。これらの対策はまたDXNs抑止策からみても好条件を与える。

- (1) ボイラ構造設計の改善による腐食環境の緩和
 - 特に灰付着堆積の抑止 -
 - ・ 燃焼ガス流の水平化と吊下式過熱器管（テールエンド型ボイラ）の採用（図1）
 - ・ 大口径煙道による燃焼ガス流速低減：約3～5 m/s以下
 - ・ 熱交換用燃焼ガス温度域の低減：約620～650℃以下
 - ・ 堆積灰除去システムの最適化：プロテクタの設置、機械的ラッピングなど
- (2) 燃焼制御によるガス雰囲気条件の改善
 - 特にS分圧の増加 -
 - ・ 熱化学的に安定な固相硫酸塩の生成：塩化物誘起腐食の抑止^{3) 6)}
- (3) 高耐食性耐熱鋼の設計開発と実用化導入

上記対策のうち特に（3）の材料技術に関しては、ボイラSH材料を中心とした研究開発における進歩が1995年以降目覚ましく、厳しい腐食環境で適用可能な材料の提案が相次いだ。高効率廃棄物発電の当面の目標である500℃程度の蒸気温度域では当然、設計上の配慮などにより環境の腐食性が相当軽減できたとしてもNiとCrを中心とする高合金化が不可避の状況にある。また、ここで特徴的なことは、酸化性雰囲気中で優れた耐食性を発揮する50Ni-50Cr合金といえども高温域では相当激しい腐食損傷を受けること、そしてここではオキシクロリネーション反応に基づく侵食が二相組織中のCr-richの α' [Cr]相に沿って選択的に起こるため、これよりも低Crの γ 相（Ni-Cr固溶体）や通常のNi基合金と比較しても局所的な侵食深さがかえって増加することが明らかになっている⁵⁾。したがって、Fe基やNi基の合金に対してCrを中心とする有益な合金元素添加によって耐食性を保証することが必須であるが、高温側になるほどCr系保護酸化皮膜（ Cr_2O_3 ）形成のみによる単純な耐食性向上策では腐食リスクの軽減が難しいため、Moなどの複合添加が必要となる。ここに合金設計の妙味がある。

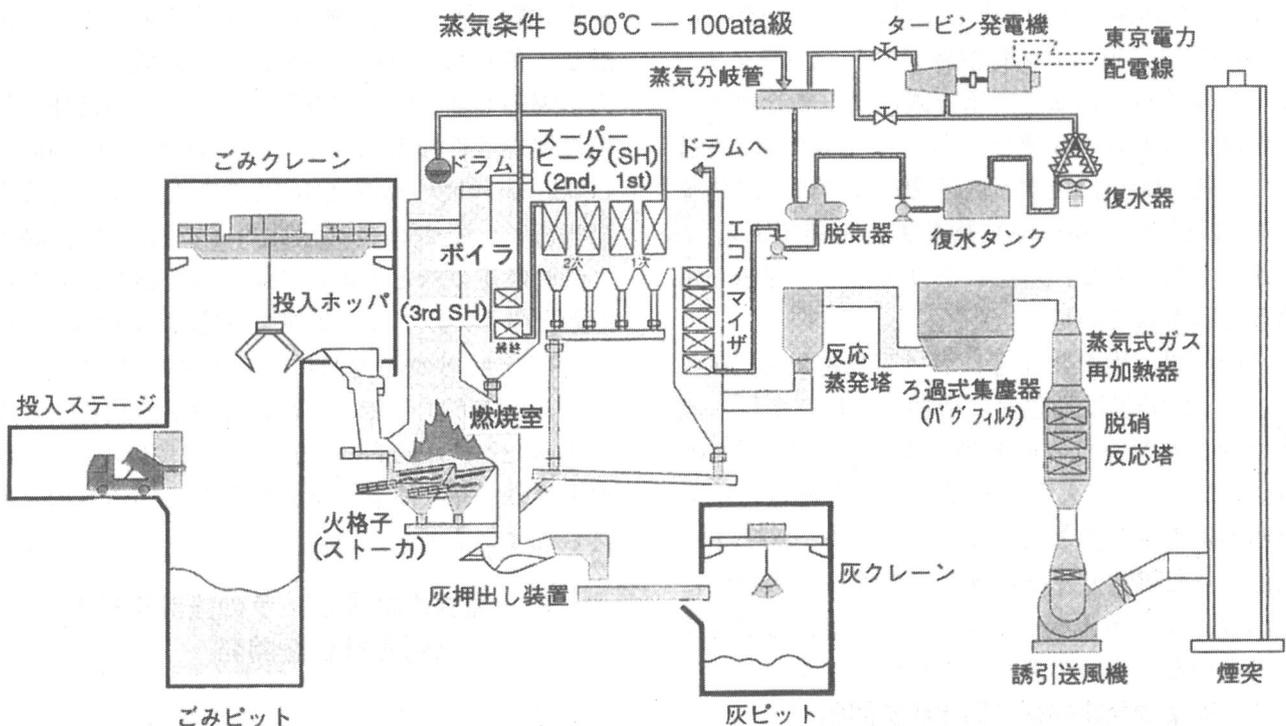


図 1 高温高効率型廃棄物発電プラントのシステムフロー（NEDO津久井実証プラントの例）

表 2 400～500℃クラス蒸気耐用の高耐食性過熱器管合金の開発

[400～450℃級蒸気耐用合金]		[500℃級蒸気耐用合金]	
合金名	主要合金組成 (mass%)	合金名	主要合金組成 (mass%)
SUS 310	Fe-25Cr-20Ni	Alloy 625	Ni-21Cr-9Mo-4Nb-3.5Fe
HR 3C (SUS 310J1)*	Fe-25Cr-20Ni-0.4Nb-N	Alloy C22	Ni-22Cr-13Mo-3W-2.5Co-4Fe
NF 709R (SUS 310J2)*	Fe-22Cr-25Ni-1.5Mo-0.15Nb-N-low C	JHN 24*	Ni-20Cr-18Mo-0.7Nb-2.5Fe
QSX 5*	Fe-25Cr-23Ni-3Si-1.2Mo-Nb-N-low C	MAC-N*	Ni-26Cr-3.5Si-0.3Nb-11Fe
QSX 3*	Fe-25Cr-23Ni-3Si-Nb-N-low C	MAC-F*	Fe-38Ni-23Cr-3.8Si-0.3Nb
YUS 170 (SUS 309J1)*	Fe-25Cr-13Ni-1Mo-N-low C		*日本で開発された合金
HR 2M (SUS 309J2)*	Fe-22Cr-14Ni-1.5Mo-N-low C		
HR 30M*	Fe-28.5Cr-30Ni-1Mo-N-low C		
HR 11N*	Fe-28.5Cr-40Ni-1Mo-N-low C		
Alloy 825	Fe-22Cr-42Ni-3Mo-3Cu-0.8Ti		

以上のような種々の検討結果を踏まえて、400～500℃クラス過熱蒸気耐用の高効率廃棄物発電ボイラSH材として開発導入が進んでいる耐熱鋼・耐熱合金を列挙すると表2のようになり、日本発信の材料開発と提案が進んだ¹⁾。

◇ あとがき —今後の展望と課題

誌面の制約上、詳述は避けるが、廃棄物発電推進に向けて克服すべき下記の諸課題がある。

(1) 我が国の廃棄物発電規模ではシステム効率的にみて高効率化には不向きであり、欧米のように廃棄物収集の広域化と施設の大型化を図り、発電所としての機能を向上させるべきである。また、一般廃棄物量の約半分が発電に利用されていないという現状を早急に改めるべきである。産業廃棄物の可燃分をも含めると、未利用廃棄物資源が保有する潜在的発電出力(エネルギー賦存量)は、標準的規模の原子力発電プラント10基分に相当するとの試算データもある⁷⁾。

(2) 廃棄物やバイオマスのエネルギー利活用に関する所管省庁が錯綜しているうえ、歴史的変遷の煽りを受けて行政面での引き継ぎやドキュメントが途絶えている。このため、それぞれ部分最適化は図られているものの、グランドデザインに基づいた全体最適化が描かれていない。このような背景から、2011年8月に制定された固定価格全量買取制度に関する「再生可能エネルギー特措法」において廃棄物発電の位置づけは悲観的状況に置

かれており、この根源には政治・行政力の衰退化が強く絡んでいるといわざるを得ない^{8)～10)}。

(3) 廃棄物・バイオマス発電を中心とする「環境調和型地域分散電源」は、地方自治体の財源確保にとっても有効であり、「地域主権」の切札的存在にもなりうる。ただし、この推進に際しては、国民の意識を「ごみは貴重なエネルギー資源」に改めるための十分な説明努力が必要である。

東日本大震災によって顕在化した我が国の原発至上主義によるエネルギー政策の破綻に対して、被災地の復興や経済活性化に向けた戦略を今後展開するうえで、廃棄物・バイオマス発電の果たす役割は決して小さくない。東京二十三区清掃一部事務組合が所管する約20箇所の清掃工場では、廃棄物発電により56億円強の売電収入を2009年度に上げているという厳然たる事実がある⁸⁾。

参考文献

- 1) 吉葉正行：廃棄物学会誌、13 (2002)、38.
- 2) 吉葉正行：日本金属学会会報「まてりあ」、39 (2000)、336.
- 3) 吉葉正行：日本鉄鋼協会 第194/195回西山記念技術講座 テキスト、(2008)、117.
- 4) 吉葉正行：高圧ガス、46 (2009)、836.
- 5) 吉葉正行：日本金属学会会報「まてりあ」、38 (1999)、203.
- 6) H. H. Krause：High Temperature Corrosion in Energy Systems, ed. by M. F. Rothman, TMS-AIME, (1985)、83.
- 7) 新エネルギー財団：廃棄物発電導入促進検討の手引き、(2003)、9.
- 8) 吉葉正行、篠田淳司：環境施設、第122号、(2010)、35.
- 9) 吉葉正行、篠田淳司：環境施設、第124号、(2011)、16.
- 10) 吉葉正行、篠田淳司：環境施設、第125号、(2011)、11.

Ⅲ. 耐熱金属材料の開発動向

1. 超耐熱合金

日立金属(株) おおのたけひろ
 関西支店 技術部 大野 丈博

◇ 超耐熱合金の分類と強化機構

超耐熱合金 (Superalloy) は高温強度を高めるためにCr、Ni、Coや他の元素を多量に含む合金系である^{1, 2)}。表1にベース金属、強化機構、ならびに製造法から分類した超耐熱合金の分類と最近の開発合金を含む代表合金を示す。また表2にそれらの合金の化学成分を示す^{註1)}。

ベース金属はFe基 (あるいはFe-Ni基)、Ni基、Co基の3種類に分類される。表1よりわかるようにNi基合金の種類が最も多く、また各種製造法が適用されている。これらの合金の結晶構造は全てオーステナイトである。これは高温ではオーステナイトが最も強度が高くかつ合金元素の固溶度

が大きいため高度に合金化できることによる。組織をオーステナイトにするためにFeのみの系は存在せずNiあるいはCoが添加される。さらに高温強度あるいは耐酸化性を高めるためにNiあるいはCoが主成分となったものがNi基、Co基合金である。

強化機構は通常、固溶強化型、炭化物析出強化型、 γ' (ガンマプライム) 析出強化型の3種類に分類される。固溶強化はMo、Wなどをオーステナイト基地に固溶させることによる強化である。強化作用としてはそれほど大きくないが高温まで強化が持続する。炭化物による析出硬化は大きな強化が得られないためこのタイプの合金はあまり多くは用いられていない。最も顕著な強化が得ら

表 1 超耐熱合金の分類と代表合金ならびに開発合金

ベース金属	強化機構	製造法				
		鍛造	粉末冶金	casting		
				普通 casting	一方向凝固 (DS)	単結晶 (SC)
Fe基	固溶強化	Incoloy 800H	-	-	-	-
	炭化物析出強化	LCN 155	-	-	-	-
	γ' 析出強化	A 286	-	-	-	-
Ni基	固溶強化	Inconel 600 Inconel 617 Inconel 625 Hastelloy C-276 Hastelloy X	-	-	-	-
	γ' 析出強化	Inconel 718 Waspaloy U 720/720Li 718 Plus TMW 4M3 FENIX 700 USC 141 LTES 700R	IN 100 AF 115 Rene' 88DT	Inconel 713C IN 738LC	Mar-M 247LC CM 186LC	PWA 1480 CMSX 4 TMS 138 TMS 162 TMS 196
Co基	固溶強化	L605 HA188	-	-	-	-
	炭化物析出強化	-	-	X 40 FSX 414	-	-

表 2 代表的 超耐熱合金の化学成分 (mass%)

ベース	合金名	C	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Ta	Fe	その他	備考
Fe基	Incoloy 800H	0.08	32.5	21.0	-	-	-	0.4	0.4	-	-	Bal	-	
	A286	0.04	26.0	15.0	-	-	1.3	0.2	2.0	-	-	Bal	V : 0.3, B : 0.004	
Ni基	Hastelloy X	0.10	Bal	22.0	1.5	0.6	9.0	-	-	-	-	18.5	-	
	Inconel 600	0.08	Bal	15.5	-	-	-	-	-	-	-	8.0	-	
	Inconel 617	0.07	Bal	22.0	12.5	-	9.0	1.0	0.3	-	-	-	-	
	Inconel 625	0.05	Bal	21.5	-	-	9.0	0.2	0.2	3.6	-	2.5	-	
	Inconel 718	0.04	Bal	19.0	-	-	3.0	0.5	0.9	5.1	-	18.5	-	
	U 720	0.04	Bal	18.0	14.7	1.25	3.0	2.5	5.0	-	-	-	B : 0.033, Zr : 0.03	
	U 720LI	0.02	Bal	16.0	14.7	1.25	3.0	2.5	5.0	-	-	-	B : 0.015, Zr : 0.03	
	Wspaloy	0.07	Bal	19.5	13.5	-	4.3	1.4	3.0	-	-	<2.0	B : 0.006, Zr : 0.09	
	718 Plus	0.02	Bal	18.0	9.0	1.0	2.75	1.45	0.7	5.45	-	10	P : 0.014, B : 0.004	
	TMW 4M3	0.02	Bal	13.5	25.0	1.2	2.8	2.3	6.2	-	-	-	B : 0.015, Zr : 0.03	
	FENIX 700	0.03	41	15.5	-	-	-	1.25	1.7	2	-	Bal		A-USC
	USC 141	0.03	Bal	20.0	-	-	10	1.2	1.6	-	-	-		〃
	LTES 700R	0.03	Bal	12.0	-	7	6.2	1.5	0.9	-	-	-		〃
	IN 100	0.07	Bal	12.4	18.5	-	3.2	5.0	4.3	-	-	-	V : 0.8, B : 0.02, Zr : 0.06	粉末
	AF 115	0.05	Bal	10.5	15.0	5.9	2.8	3.8	3.9	1.8			Hf : 0.8, B : 0.02, Zr : 0.05	〃
	Rene'88 DT	0.03	Bal	16.0	13.0	4.0	4.0	2.1	3.7	0.7	-	-	B : 0.015, Zr : 0.03	〃
	Inconel 713C	0.12	Bal	12.5	-	-	4.2	6.1	0.8	2.0	-	-	B : 0.012, Zr : 0.1	鑄造
	IN 738LC	0.11	Bal	16.0	8.5	2.6	1.7	3.4	3.4	0.9	1.7	-	B : 0.01, Zr : 0.05	〃
	CM 186LC	0.07	Bal	6.0	9.0	8.0	0.5	5.7	0.7	-	3.0	-	Re : 3.0, Hf : 1.4, B : 0.015, Zr : 0.015	DS
	Mar-M 247	0.14	Bal	8.3	10.0	10.0	0.7	5.5	1.0	-	3.0	-	Hf : 1.5, B : 0.015, Zr : 0.05	〃
CMSX 4	-	Bal	6.5	9.0	6.0	0.6	5.6	1.0	-	6.5	-	Re : 3.0, Hf : 0.1	SC	
TMS 138	-	Bal	3.2	5.8	5.9	2.8	5.9	-	-	5.6	-	Re : 5, Ru : 2, Hf : 0.1	〃	
TMS 162	-	Bal	2.9	5.8	5.8	3.9	5.8	-	-	5.6	-	Re : 4.9, Ru : 6, Hf : 0.09	〃	
TMS 196	-	Bal	4.6	5.6	5.0	2.4	5.6	-	-	5.6	-	Re : 6.4, Ru : 5, Hf : 0.1	〃	
Co基	Haynes 25 (L605)	0.10	10.0	20.0	Bal	15.0	-	-	-	-	-	-	Mn : 1.5	
	Haynes 188	0.10	22.0	22.0	Bal	14.0	-	-	-	-	-	<3.0	La : 0.08	
	FSX 414	0.25	10.0	29.0	Bal	7.5	-	-	-	-	-	1.0	B : 0.01	鑄造
	X 40	0.50	10.0	25.0	Bal	7.5	-	-	-	-	-	1.5	Si : 0.4	〃

れるのは γ' 析出強化である。 γ' 相は Ni_3Al を基本とする金属間化合物であるが、 γ' 相が基地のオーステナイト (γ 相) と整合であるため微細析出できること、逆温度依存性という特異な性質を示し 700°C 程度までは高温になるほど強度が増加することなどにより高温材料の析出強化として大変優れている。この γ' 相中の Al に置換して γ' 相を形成する Ti、Nb、Ta などを添加することで γ' 相自体を強化し、さらに γ' 相の量を増加するこ

とによりこのタイプの合金の強化が図られ多くの合金が開発されてきた。

以上は結晶粒内の強化手法であるが、結晶粒界も強度に大きく影響する。結晶粒界の影響は単純ではなく常温から $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 付近までの引張強度や疲労強度に対しては通常の鉄鋼材料と同様に結晶粒界は転位の運動の障壁として働いたため粒界強度は粒内強度より大きい。従って結晶粒を細かくすることが強度向上に有効である。しか

しながらそれ以上の高温では一般にクリープ強度が使用限界を決定するが、高温におけるクリープ変形のような歪み速度の小さい場合は粒界すべりが生じて粒界強度が低下し粒内強度を下回り粒界で破壊を生じるようになる。従って高温クリープ強度が重視される場合は粒内の強化とともに、粒界の強化が必要である。結晶粒界自体の強化は通常、炭化物析出、B、Zr、Hfの添加などが知られているが限界がある。一方、粒界の形態制御としては通常の鉄鋼材料とは逆に結晶粒を粗大化させ粒界面積を小さくすることが有効である。さらに特殊な手法として結晶粒を応力軸に平行にそろえる（一方向凝固：Directionally Solidified：DSと略す）、あるいは結晶粒を全くなくす（単結晶：Single Crystal：SCと略す）ことが有効である。この手法は主に鋳造合金でしか用いることができないが、高温で用いられるタービンブレードの製造方法として必須となっている。

超耐熱合金の種類は多いが、上記のように使用される温度、使用限界を決める特性（疲労、クリープ、酸化など）さらにコストなどを勘案し適切な合金、製造法を選ぶことが必要である。

◇ 超耐熱合金の製造法

以下では最も高強度を有する γ' 析出強化型合金について製造法を主体にその概要について述べる。

1. 鍛造超耐熱合金

このタイプの合金は通常の鉄鋼材料と同様、インゴットを熱間鍛造して作られる。鍛造により組織の均一化と結晶粒微細化が図られ比較的低い温度（600～700℃以下）での高強度（引張り、疲労）と高い信頼性が得られる。クリープ強度を重視する場合は高温で固溶化処理が行われる。このタイプの合金では鍛造を前提とするために合金元素の添加量に限界が存在する。すなわち合金元素量が多くなることによる凝固時の偏析と熱間加工時の変形抵抗の高さが問題となり、また鍛造設備の大型化・精密制御も必要となってくる。Inconel 718合金は最も多く用いられている γ' 析出強化型であり高いNb含有を特徴とし、約650℃までの高い強度を示す。Inconel 718をさらに高強度化するために結晶粒微細化（HS718）、結晶粒微細化+直

接時効（DA718）プロセスが開発されてきた³⁾。

これらの合金の凝固時の成分偏析を防ぐために二重溶解が適用されることが多い。すなわち、一旦真空誘導溶解（VIM）を行った後さらに真空アーク再溶解（VAR）あるいはエレクトロスラグ再溶解（ESR）を行うものである⁴⁾。VAR、ESRともに電極先端部を逐次溶解・凝固させながら積層凝固させるものであり偏析低減に有効である。さらに介在物除去作用を有することも大きな利点である。近年ではVIM-ESR-VARを行うトリプルメルトも行われている。

2. 粉末冶金合金

前述のように添加合金量が多くなるとインゴット偏析のため鍛造が困難となる。粉末冶金法はこの限界を打破する有力な方法として特に高強度を要求されるタービンディスク用に開発されてきた。粉末冶金法は、熔融金属を粉末として急冷凝固させた後にこれを固化して鍛造用素材にするかあるいは直接製品にする方法であり、凝固単位が小さいために偏析の少ない微細な組織が得られる。問題は異物（介在物、ガス）の混入と粉末表面の酸化などの汚染であり、これを防止するため厳密な管理が要求される。

3. 鋳造超耐熱合金

前述のように高温で高いクリープ強度を得るために合金元素添加量を増やすと鍛造が困難になる。そのため精密鋳造による製造プロセスが発展してきた。鋳造により前述の結晶粒界の制御（DS、SC化）も可能となり、さらに高温強度向上が可能となった。

製造プロセスは、真空誘導溶解（VIM）で一旦インゴット（マスターインゴット）を作った後ロストワックス法により製品形状に鋳込むのが通常であり、これを普通鋳造法と呼んでいる。一方前述の一方向凝固（DS）や単結晶（SC）組織を得るためには、マスターインゴットを一方向凝固炉で凝固させることが必要である。一方向凝固炉は鋳型を高温で加熱した炉の中に設置し、先端を水冷チルに接触させ、徐々に炉から引抜くことにより凝固を一方向に制御するものである。単結晶製造の場合は鋳型先端にセクターと呼ばれる狭い通路を設け、一つの結晶粒のみを選択的に成長させるようにする。単結晶翼製造法の例を図1に示

す¹⁾。

普通鋳造の代表合金であるInconel713Cは自動車のターボチャージャーなどにも用いられている。

◇ 最近の開発動向

1. 鍛造超耐熱合金

合金開発の動向としては、単純な高強度化には限界があるため新規に開発された合金はそれほど多くはないが、特定用途に特化した合金開発が進められている。航空機用タービンディスクを狙いとした合金開発としては海外では718PLUSが開発された⁵⁾。国内では物質・材料研究機構(NIMS)が開発したTMW合金がある。TMW合金はNi基合金とCo基合金を融合するという概念のもとに開発され実用スケール(直径440mm)の模擬タービンディスクの試作が行われ、U720Li合金以上のクリープ強度、疲労特性を示した⁶⁾。

自動車用途では低コスト化が重要なテーマでありエンジンバルブ用にNi量を低減した合金の開発が行われた⁷⁾。

溶解法に関してはトリプルメルトの適用や電子ビームあるいはプラズマによるコールドハース溶解による介在物低減が挙げられる⁸⁾。

鍛造に関してはタービンディスクの最終成形は通常型打鍛造によるが、超耐熱合金の変形抵抗が大きいため大型ディスクの成形には数万トンの大型型打ちプレスが必要とされる。しかしこのような大型プレスは従来国内には存在しなかったために必然的に海外に製造を頼っていたが、最近国内で5万トンの型打ち油圧プレス設置に向け動き出した⁹⁾。2013年度に装置完成の予定であり、今後の航空機用ディスクや他の製品の製造にとって大きな期待がかかる。

最近注目されている先進超々臨界圧(A-USC)蒸気タービンの開発においては、従来の耐熱鋼クラスから超耐熱合金の使用が検討され、A-USC専用の合金開発が進められている。海外ではInconel 617およびその改良合金、国内ではFENIX700¹⁰⁾、USC800¹¹⁾、USC141¹²⁾、LTES700R¹³⁾などが開発された。700℃以上でのクリープ強度に加え、USC141、LTES合金などは12Cr耐熱鋼との熱膨張係数のギャップを小さくすることを意図した

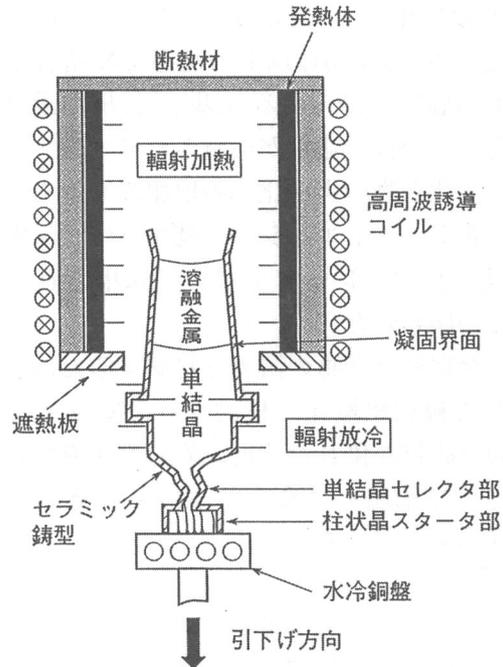


図 1 単結晶翼の製造方法の

ものである。またローターに適用する場合は10トンクラスの大型製品となるため、前述の凝固時の成分偏析の問題がクローズアップされ、例えばInconel718ではこの要求に応えることができない。そのため種々の偏析予測手法が開発され、偏析が発生しにくい合金ということが重要な要因となりつつある¹⁴⁾。

2. 鋳造合金

1970年代よりDSおよびSCブレード専用の合金開発が盛んに行われた。特にSC専用合金は結晶粒界強度の制限からフリーになったため、日本で発達した合金設計手法を用いて種々の合金が開発されてきた。SC専用合金は第1世代から始まり、レニウム(Re)を3%含む第2世代合金、Reを5~6%含む第3世代合金、ルテニウム(Ru)など貴金属を2~3%含む第4世代合金、さらに貴金属を5~6%含む第5世代単結晶合金へと開発が進められている。国内では(独)物質・材料研究開発機構(NIMS)により精力的に開発が進められ有力な合金が開発された⁶⁾。

◇ 新しいアプローチ

最近の新しい概念に基づいた開発の一端を以下に簡単に述べる。

Co基合金においてもNi基合金の γ' 相に相当す

る析出強化相として $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ が存在することが見出され、 870°C 以上の高温でNi基合金と同等以上の強度が得られるCo基 γ' 析出型耐熱合金が開発され今後の適用が検討されている¹⁵⁾。

金属間化合物の実用化への取組みも進められており、新ジェットエンジンの低圧タービン翼の最終2段にTiAlブレードが初めて採用され大幅な軽量化が図られた¹⁶⁾。

また金属間化合物の限界を打破するための取組みとして複相組織化が検討され、 Ni_3Al と Ni_3V の二重複合組織が優れた強度、安定性を有することが示されNi基超々合金と名づけられその適用研究が進められている¹⁷⁾。

注1) 本稿に示した合金名は最も一般的に用いられている名称を用いたが、各開発期間での登録商標名を含んでいる。

参考文献

- 1) 渡辺力蔵：超耐熱合金を中心としたオーステナイト系耐熱合金、日本鉄鋼協会、(2000)
- 2) 田中良平：熱処理、Vol.49 (2009)、No.1、p4
- 3) 服部博、竹川光弘：熱処理、Vo.44 (2004)、No.4、p209

- 4) 景山靖之：特殊鋼、Vol.55 (2006)、No.6、p22
- 5) Proceedings of the Int. Conf. On Niobium for high Temp. alloys, TMS, (2003)
- 6) 原田広史、川岸京子、谷月峰、横川忠晴、藤岡順三：日本ガスタービン学会誌、Vol.38 (2010)、No.2、p 71
- 7) K. Sato, T. Saka, T. Ohno, K. Kageyama, K. Sato, T. Noda and M. Okabe : SAE Paper 980703, (1998).
- 8) 出川通：日本金属学会報、Vol.30 (1991)、p763
- 9) 日立金属、神戸製鋼、IHI、川崎重工業:プレス発表、2011年3月1日
- 10) S. Imano, H. Doi, K. Kajikawa and T. Takahashi : Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005, TMS, p77
- 11) 今野晋也、佐藤順、鴨志田宏紀：日本学術振興会耐熱金属材料第123委員会研究報告、Vol.49 (2008)、No.1、p85
- 12) 大野丈博、上原利弘、今野晋也、土井裕之：CAMP-ISIJ Vol.21 (2008)、p1566
- 13) 倉田征児、上田茂紀、野田俊治、山本隆一、角谷好那、中野隆、田中良典、馬越龍太郎：電気製鋼、Vo.79 (2008)、No.3、p239
- 14) 梶川耕司、佐藤健史、山田人久：鉄と鋼、Vo.95 (2009)、Mo.8、p813
- 15) 大森俊洋、石田清仁：金属、Vo.80 (2010)、No.7、p555
- 16) 藤村哲司、西川秀次、守谷信彦、今村満勇：IHI技報、Vol.48 (2008)、No.3、p153
- 17) 高杉隆幸、金野泰幸、小林寛：日本学術振興会耐熱金属材料第123委員会研究報告、Vol.50 (2009)、No.3、p409



2. 耐熱鋼（棒鋼）

大同特殊鋼(株) 研究開発本部 たか ぼやし ひろ ゆき
 特殊鋼研究所 耐食・耐熱材料研究室 高 林 宏 之

まえがき

現在、耐熱鋼は航空機、宇宙開発、火力発電、石油工業、自動車等の様々な分野で用いられ、基幹産業の発展を支える材料の一つとなっている。この耐熱鋼の基盤は20世紀初頭に築かれ、Brenarly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などに伴い、種々の耐熱鋼が考案されてきた。

ここでは耐熱鋼の内、棒鋼を中心に分類、特徴、合金元素の役割の概略を述べるとともに、合金元素の役割および今後の開発動向について紹介する。

◇ 耐熱鋼に求められる特性

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。

1. 時間依存型損傷

- ・耐力以下の応力で時間とともに変形、破損するクリープ現象
- ・伸び一定の状態に締付け応力が時間とともに低下するリラクゼーション現象
- ・振動に伴う繰返し応力により変形、破損する疲労現象
- ・温度の上下変動に伴う熱膨張、熱収縮で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、溶融塩腐食、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

◇ 耐熱鋼棒の種類と特徴

JIS G 4311規格によると、耐熱鋼棒とは、耐熱

表 1 代表的な耐熱鋼の化学組成および主な用途

分類	鋼種名	組成 (mass%)	主な用途
オーステナイト系	SUS304	Fe-18Cr-8Ni	800℃以下の繰返し加熱・冷却が生じる耐酸化用部品、炉部品
	SUS310	Fe-25Cr-20Ni	1,000℃以下の繰返し加熱・冷却が生じる耐酸化用部品、炉部品
	SUH35	Fe-21Cr-4Ni-9Mn-0.4N-0.5C	エンジン排気バルブ
	SUH660	Fe-15Cr-25Ni-1Mo-0.2V-2Ti-0.2Al	耐熱ボルト、耐熱ばね
フェライト系	SUS430	Fe-17Cr	900℃以下の耐酸化用部品 炉部品
	SUH446	Fe-25Cr-N-0.2C	燃焼室
	FCH1	Fe-25Cr-5Al	ヒーター発熱体
マルテンサイト系	SUS403	Fe-12Cr-0.1C	600℃以下の耐高温強度用部品
	SUS410J1	Fe-12Cr-0.4Mo-0.1C	600℃以下の耐高温強度用部品
	SUH3	Fe-11Cr-1Mo-2Si-0.4C	エンジン吸気バルブ
	SUH11	Fe-9Cr-2Si-0.5C	エンジン吸気バルブ
析出硬化系	SUS630	Fe-17Cr-4Ni-4Cu-0.3Nb	タービンコンプレッサーブレード タービン部品

用途に用いられる丸鋼、角鋼、六角鋼および平鋼を総称し、耐熱鋼線材も含まれる。JISに規定された耐熱鋼棒の鋼種は計35種類あり、SUH系とSUS系に大別される。SUH系は耐熱鋼のみの規格であり、SUS系はステンレスと同等の規格(JISG4303、4308)の鋼種体系となっている。またそれぞれは、金属組織からオーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系、析出硬化系に細分類され、特徴に合わせて使い分けられている。表1に代表的な耐熱鋼の化学組成および用途、図1に耐用温度の位置付けを示し、以下に各耐熱鋼の特徴と合金元素の役割を述べる。

1. オーステナイト系耐熱鋼

Cr耐熱鋼にオーステナイト安定化元素のNiを添加することにより、常温においてもオーステナイト組織が得られる。

一般的に用いられるオーステナイト系耐熱鋼としてSUS304、310が挙げられる。これらのオーステナイト系耐熱鋼はいずれの使用温度域においてもフェライト系よりも高い強度を有し、またマルテンサイト系に比較すると600℃までは強度が劣るものの、600℃以上では高い強度を有している。またSUS304は800℃まで、SUS310は1000℃までの温度域において繰返し加熱・冷却における耐酸化性が優れている。一方で、オーステナイト系は700～900℃で長時間使用するとσ相が析出し脆化すること、熱膨張係数がフェライト系およびマ

ルテンサイト系に比較して高いため、熱疲労による時間依存型の損傷が生じ易いなどの特徴があり、用途環境を考慮した適用判断が必要である。

排気バルブとして用いられているオーステナイト系耐熱鋼にSUH35がある。強化手段としてC添加による炭化物析出強化とN添加による固溶強化を利用しており、高温強度は高く排気バルブでは800℃までの使用に耐える。しかし、炭化物が多いため母相中の固溶Crが消費され、耐酸化性、耐高温腐食性はSUS310、SUS304に及ばないことや、マルテンサイト系のように焼きなましができないため、冷間加工は不可能であるといった短所も有している。また、SUH35はNを添加させるためにMnを高くしており、また両元素ともオーステナイト安定化元素であるため、Niを4%と低くしてもオーステナイト組織が得られている。

さらに代表的なオーステナイト系耐熱鋼として、耐熱ボルトや耐熱ばねとして用いられているSUH660がある。このSUH660はAlおよびTi添加によるγ'相(Ni₃(Al,Ti))の析出強化とMo、Vによる固溶強化を図った鋼種であり、γ'相を固溶させた状態では約75HRB程度と軟らかく冷間加工可能であるが、700℃程度の時効処理をすると約33HRCに硬化し、650℃程度まで高い高温強度を有する特徴がある。

2. フェライト系耐熱鋼

一般的に用いられるフェライト系耐熱鋼とし

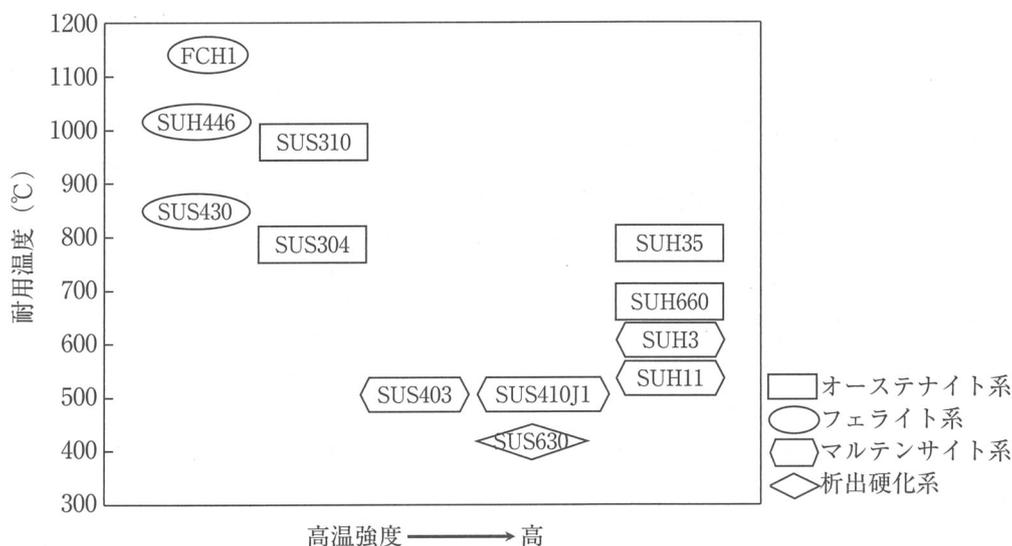


図 1 耐熱鋼の耐用温度の位置付け

て、低C-17% CrのSUS430が挙げられる。Crは耐高温腐食性を向上させる元素であり、耐熱鋼には欠かせない元素である。そのためSUS430は耐酸化性に優れ、またCr以外の元素を含まないため比較的安価である。SUH系ではSUH446が有り、SUS430よりさらにCr量が多く高温での耐酸化性、耐高温腐食性に優れる。しかし、いずれも高温から焼き入れても硬化せず、高温強度も低いため、用途はあまり強度が必要でない部品に限定される。また500℃近傍で長時間使用すると、スピノーダル分解による脆化相の形成により脆くなるため、用途環境を考慮した適用判断が必要である。

他に発熱体に用いられるFCH1は、25% Cr鋼に5% Alを積極添加した鋼種で、高温でスケール表面に緻密なAl₂O₃層を形成することでCr同様に耐酸化性を向上させている。Al₂O₃層は高温での酸化に対する強固な保護被膜となるため1200℃までの繰返し使用に耐えることができる。

3. マルテンサイト系耐熱鋼

一般的に用いられるマルテンサイト系耐熱鋼として、0.1%程度のCを含む12% Cr鋼のSUS403およびSUS410J1が挙げられる。これらの耐熱鋼は高温から焼き入れることで硬化し、さらに焼戻しすることでマルテンサイト母相にM₂₃C₆などの炭化物を析出させ強化している。そのため600℃程度まで高強度を維持することが可能である。さらにMoを添加すると一層の高強度を維持することができる。しかしマルテンサイト系耐熱鋼は、焼戻し温度以上の高温になると析出物の粗大化あるいは相変態により組織が変化するため、強度が急激に低下する。また元々Cr量が12%と少ない上に炭化物として母相中の固溶Crが消費されるため、他の系統の耐熱鋼に比較して耐酸化性が低い特徴を有している。したがって、マルテンサイト系は、600℃以下の温度域で、耐酸化性よりも強度が重視される用途に適用される。

吸気バルブとして用いられるマルテンサイト系

表 2 耐熱鋼の各特性に及ぼす合金元素の役割

元素名	合金元素の役割		
	相安定性	強化手段	備考
C	γ	析出強化 (炭化物)	耐高温腐食性低下
Mn		-	被削性向上 (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		固溶強化	高価
Si		-	耐酸化性向上 (緻密な酸化被膜形成) 靱性低下 (固溶Si増加)
Cr	α	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 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
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)

※ α：フェライト安定化元素、γ：オーステナイト安定化元素

耐熱鋼としてSUH3およびSUH11がある。これらの耐熱鋼は、スケール表面に緻密な酸化層を形成して耐酸化性を高める効果があるSiを添加することで、耐酸化性を改善している。

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) 相を形成し強化している。しかし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。

◇ 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、棒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2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。またそれぞれの合金元素には長所、短所がある。しかし合金元素は単独での効果だけでなく、他の元素との複合的な効果があるため、その組み合わせは無限に広がっている。

むすび

近年では、石油など地下資源の保護やCO₂削減による地球温暖化抑制などの観点から、エネルギー効率の改善および排気ガスの浄化などが主要技術課題となっており、そのため耐熱鋼にはより一層の高性能化が要求されている。一方で、耐熱鋼に用いられるNi、W、Mo、Co、Vといった原料に対する投機的影響もあり、価格変動を懸念してこれらの合金元素量を低減した耐熱鋼開発の要求も高い。材料的には双方ともに相反する開発方向ではあるが、今後は素材材質だけではなく表面処理や加工条件などのプロセス技術を融合し、双方の要求を満たす材料の開発がなされていくものと思われる。



3. 耐熱鋼 (パイプ)

住友金属工業(株) 総合技術研究所 おか だ ひろ かず
鋼管研究開発部 鋼管材料グループ 岡 田 浩 一

まえがき

火力発電ボイラーの主要な構造部材は鋼管であり、その材料は炭素鋼、2%以下のCrを含む低合金フェライト鋼、9~12%Crを含む高Crフェライト鋼、18%Cr-10%Ni-Nb(ニオブ)の化学組成をもつSUS347H鋼に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼(オーステナイト鋼と略す)など多様な耐熱鋼が使用されている。

図1に主に石炭を燃焼させる火力発電ボイラー全体の模式図と、代表例として水壁管、過熱器管(これらは熱交換器管と呼ばれる)および主蒸気管(大径厚肉の配管)の外観写真を示す。1~2%Crを含む低合金フェライト鋼の水壁管で水を蒸気に変え、順次、高温蒸気に加熱しながら最後に18~25%Crを含むオーステナイト鋼の過熱器管を通った高温高圧の蒸気は、9~10.5%Crを含む

高Crフェライト鋼の主蒸気管でタービンに送られ発電機を回す。

オーステナイト鋼はフェライト鋼に比較してCr量が多く高温の耐食性(腐食に強い)と高温強度が高く、主に熱交換器管として高温高圧部材に用いる。一方、主蒸気管(大径厚肉管)は起動停止に伴う熱疲労が負荷されるため、主に線膨張係数の小さいフェライト鋼を用いる。

発電ボイラーの効率は蒸気温度と圧力によって決まるため、蒸気の高温高圧化にとりくんだ長い歴史がある。すなわち30年前までは蒸気が538~566℃、19~24MPaの亜臨界圧~超臨界圧ボイラーが国内の主流であったが、1990年代に600℃級(593~610℃、24~27MPa)の超々臨界圧(USC: Ultra Super Critical pressure)ボイラーが実用化され¹⁾、現在では、日本のみならず世界の主流になっている²⁾。

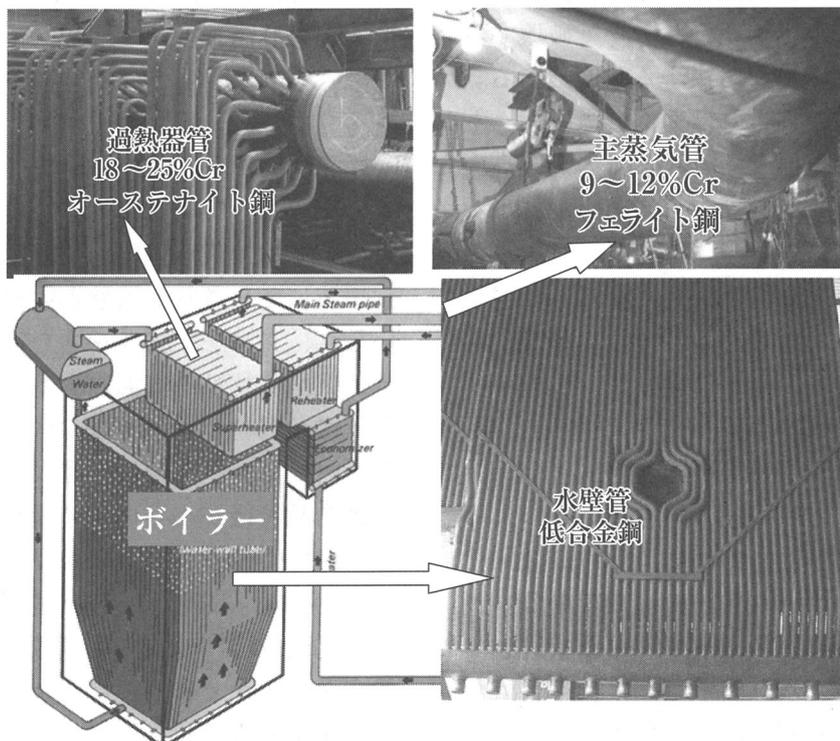


図 1 火力発電ボイラーの全体模式図、外観写真と適用材料

表 1 フェライト鋼における化学組成と許容引張応力の例

区分	規格	代表組成 [mass%]										許容引張応力* (MPa)	
		C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Nb	V	その他			
2Cr鋼	従来鋼	STPA24	0.12	0.3	0.4	2.25	1						48
	開発鋼	火STPA24J1	0.06	0.3	0.3	2.25	0.2	1.6	0.05	0.25	B		90
高Cr鋼	従来鋼	STPA26	0.1	0.3	0.4	9	1						21
	開発鋼	火STPA28	0.1	0.3	0.4	9	1		0.08	0.2	N		66
		火STPA29	0.1	0.3	0.4	9	0.5	1.8	0.07	0.2	N, B		86
		火SUS410J3TP	0.12	0.3	0.5	10.5	0.4	2	0.06	0.2	Cu, Ni, N, B		68

*) 2Cr鋼は550℃、高Cr鋼は600℃における値を示す。

このような蒸気の高圧高温化を実現できたのは、なにより耐熱鋼管を高強度・高耐食化した高性能な新材料の開発に支えられてきたといえる。

本資料ではユニークな新しいボイラー用鋼管の化学組成、その特性や金属組織と強化機構について紹介する。

◇ フェライト鋼

表1に新旧代表的なフェライト鋼の化学組成と許容引張応力（設計に用いる強度）を示す。規格名の冠に火とあるのは、『発電用火力設備の技術基準の解釈』に規定されたボイラー用鋼管である。ここで許容引張応力は、高温における引張強さや耐力、時間とともに金属が変形しやがて破壊する高温特有のクリープ強さから決まる強度である。

この許容引張応力が高ければ薄肉でコンパクトなボイラーの設計が可能となり、蒸気の高圧高温化が可能となる³⁾。2% Cr系フェライト鋼では、従来のSTPA24/STBA24鋼管に比較し、550℃の許容引張応力を約2倍に高めた、火STPA24J1/STBA24J1⁴⁾が開発されている。この鋼管は、溶接性を重視した炭素量の低い材料であり、B（ボロン）を添加して金属組織をペーナイト組織とし、転位強化を活用した点が特徴である。

さらにV（バナジウム）やNb（ニオブ）による微細なMX型炭化物を析出させて、その分散強化を活用して高温のクリープ強さを高めている。

一方、高温の耐食性（腐食に強いことでは）の一つで、蒸気と接する鋼管内面の耐水蒸気酸化特性の向上にはCrの多量添加が有効である。約600℃の高温蒸気にさらされる鋼管には9～12%

Cr系フェライト鋼が必要となる。高Cr系フェライト鋼では、従来のSTPA/STBA26鋼管に比較して許容引張応力が約3～4倍も高い火STPA28/火STBA28鋼管、火STPA29/火STBA29鋼管⁵⁾や火SUS410J3TP/火SUS410J3TB鋼管⁶⁾が開発されている。

これらの高Cr系フェライト鋼は、転位密度の高い焼き戻しマルテンサイト組織を有し、さらにVおよびNb添加によりそれらの微細析出物によって高温強度を高めている。また、N（窒素）を積極的に添加してMX型炭窒化物を析出強化に活用している。固溶強化元素には、従来はMoが活用されてきたが、火STPA29/火STBA29や火SUS410J3TP/火SUS410J3TBではMoをWに置き換え、より高強度化が図られている。

◇ オーステナイト鋼

表2に新旧代表的なオーステナイト鋼の化学組成と許容引張応力を示す。オーステナイト鋼は構造材料として最も過酷な高温高圧蒸気と厳しい腐食環境にさらされる過熱器管や再熱器管として用いられ、クリープ強さを含む高温強度に加え、耐水蒸気酸化特性や高温腐食特性も重要である。水蒸気酸化特性は金属組織の結晶粒度（結晶粒の大きさ）に大きく依存し、耐水蒸気酸化特性の確保には結晶粒径が小さい細粒鋼が必要である⁷⁾。

一方でクリープ強さは製品の固溶化熱処理温度に依存する。高温で固溶化熱処理を行えば、CrやNbなどの炭窒化物が十分固溶し、実機ボイラーの高温高圧化で使用中に、ナノレベルで微細に分散析出する炭窒化物が増加するため高温クリープ強さは高くなる。

表 2 オーステナイト系耐熱鋼における化学組成と許容引張応力例

区分	規格	代表組成 [mass%]										許容引張応力* (MPa)	
		C	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Nb	W	その他			
18Cr系	従来鋼	SUS304HTB	0.07	18	8								42
		SUS316HTB	0.07	16	12		2						50
		SUS321HTB	0.07	18	10			0.4					37
		SUS347HTB	0.07	18	10				0.8				54
	開発鋼	火SUS304J1HTB	0.08	18	9	3			0.4			N、細粒鋼	80
		火SUS321J2HTB	0.07	18	10	3		0.2	0.3			B	81
		TP347HFG	0.08	18	10				0.8			細粒鋼	61
火SUS347J1TB		0.03	18	9				0.4	2		N	81	
25Cr系	従来鋼	SUS310STB	0.06	25	20							17	
	開発鋼	火SUS310J1TB	0.06	25	20				0.4		N	76	

*) 650℃における値、TP347HFGはASMEの許容引張応力値から換算

しかし、従来は高温で固溶化熱処理すると、金属組織が粗粒になってしまい、耐水蒸気酸化特性が著しく劣化することが課題であった。新しく開発されたTP347HFG鋼管は、化学組成や加工と熱処理を工夫した材料であり、高温で固溶化熱処理を行っても、細粒組織を作ること成功し、高い高温強度と優れた耐水蒸気酸化特性を兼ね備えた材料である⁸⁾、この技術は火SUS304J1HTB鋼管⁹⁾にも適用されている。

従来鋼の強化機構は、M23C6やTiやNbによるMX型炭窒化物の析出強化、あるいはMoの固溶強化が主に活用されてきた。新しく開発された鋼管では新たな強化が加えられている。すなわち火SUS304J1HTB鋼管や火SUS321J2HTB鋼管¹⁰⁾では、約3% Cu (銅)を添加することにより、実際のボイラーの高温高圧化で使用中にCu富化相のナノレベルの微細析出強化が活用されている。

また、火SUS347J1TB鋼管¹¹⁾は、溶接熱影響部の鋭敏化 (Crの炭化物が結晶粒界に析出し応力腐食割れを起こしやすくなった状態)を避けるため低炭素とした材料で、Nを多量に添加して微細なZ相 (CrNbN、CrVN)による析出強化と、W添加による固溶強化が活用されている。

次に石炭を燃焼させるボイラーの高温腐食は石炭に含まれるS (硫黄)量が重要である。すなわち良質なS量の低い石炭を燃焼させる場合には、18% Crのオーステナイト鋼管でも高温腐食特性は問題ない。一方、S含有量の高い石炭を燃料と

して使用する場合にはよりCr量が高い耐高温腐食特性に優れた材料が必要になる。

従来鋼で25% Crを含むSUS310STB鋼管では、高いCr含有量が災いした脆いσ相が析出しクリープ強さや靱性が著しく低下する。従来から高温で使用されるボイラーにはほとんど適用されなかった。新しい火SUS310J1TB鋼管¹²⁾は、シグマ相の析出を抑制しながらNbを添加して微細なZ相の析出強化によってクリープ強さを高めた材料であり、25% Crを含むオーステナイト鋼として初めてボイラー用鋼管にした材料である。

むすび

ユニークな新しい耐熱鋼管の開発によって、高温強度や耐食性が改善され、火力発電ボイラーの高温高圧化と高効率化が実現した。日本発の材料と技術が世界の超々臨界圧ボイラーを実現したといつてよい。

現在、さらに高温高圧化をめざした700℃蒸気級のA-USC (Advanced Ultra Super Critical pressure)ボイラーの研究開発が進められており、その実現のために革新的な耐熱合金鋼管の研究開発が世界ですすめられている。

参考文献

- 1) 増山不二光、石原岩見、横山知充、藤田正昭：火力原子力発電、46 (1995)、498。
- 2) 大塚哲夫、山地裕一、竹中進、一柳真規、門馬弘昌、高野伸一、

- 火力原子力発電、57 (2006)、734.
- 3) 五十嵐正晃：鉄鋼協会異業種交流セミナー「材料と環境シリーズ」－これからの日本のエネルギー動向と鉄鋼材料－、2001年11月2日.
 - 4) Y. Sawaragi, K. Miyata, S. Yamamoto, F. Masuyama, N. Komai and T. Yokoyama: Advanced Heat Resistant Steels For Power Generation, The University Press, Cambridge, (1998), 144.
 - 5) 大神正浩、荒木敏、直井久、小川忠雄、保田英洋、増本広毅、藤田利夫：鉄と鋼、76 (1990)、1124.
 - 6) 伊勢田敦朗他：火力原子力発電、45 (1994)、900.
 - 7) 小若正倫、永田三郎：日本金属学会誌、36 (1972)、496.
 - 8) 行俊照夫、吉川州彦、寺西洋志：鉄と鋼、70 (1984)、1692.
 - 9) 榎木義淳、大塚伸夫、小川和博、加藤信一郎、平野奨：住友金属誌、43 (1991)、24
 - 10) A. Toyama, M. Miyauchi, Y. Minami : Materials for Advanced Power Engineering 1994, Part1, p.495-504, Liege, Belgium
 - 11) 石塚哲夫、三村裕幸、森本弘、松本光弘、永島光二、水本学、岡本潤一：新日鐵技報、380 (2004)、91.
 - 12) 榎木義淳、寺西洋志、牧浦宏文、三浦実、久保田稔：住友金属誌、45 (1993)、96.



IV. 耐熱表面処理

(株)日立製作所 日立研究所
エネルギー材料研究部 **こ じ ま よ し た か**
児 島 慶 享

まえがき

高温用途、及び耐熱材料に使われているコーティングの種類、役割、開発動向について解説する。産業分野としては、航空・宇宙、発電等が代表的である。用途としては、高温耐酸化・耐食、耐摩耗、耐熱等が主流である。コーティング方法も、化学蒸着 (CVD)、物理蒸着 (PVD)、熱拡散、溶射等がある。

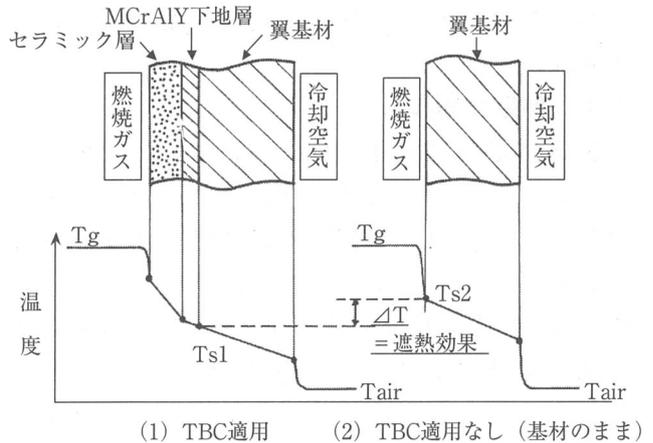
本報では、発電用ガスタービン (GT) を中心に説明する。地球温暖化の対策として、省エネルギー、炭酸ガスの排出量削減が我国の大きな課題として掲げられており、GTの高効率化、熱効率向上が進められている。熱効率向上に有効な手段として、燃焼ガス温度の上昇があり、最新の運用されている発電用GTは、入口温度が1500℃級に達し、コンバインド発電プラントでは熱効率50% (LHV) 以上に達している。

そのためにはGT動静翼用材料の耐熱性 (高温強度) 向上が必要である。耐熱性に優れた材料の開発とともに、翼冷却技術と組み合わせた遮熱コーティング (TBC)、耐熱材料に高温耐酸化・耐食を付与するMCrAlY (M: Ni, Co) 合金コーティングが必要となる。

◇ TBC (Thermal Barrier Coating) の開発状況、課題

図1は遮熱を狙ったTBCの遮熱効果の模式図である。TBCは、高温部材の表面に低熱伝導率のイットリヤ安定化ジルコニア (YSZ) からなる0.3~0.5mm厚さのトップコートと部材との間にMCrAlY合金からなる厚さ0.1~0.3mmのボンドコートを設けた構成で、YSZの遮熱効果で50~150℃の部材温度低減が可能になる。一方、TBCの耐久性は熱衝撃、熱サイクル、高温酸化、高温腐食などによって支配される。

図2はTBC翼の長時間使用後の断面模式図を



Tg: 燃焼ガス温度
Ts1.2: 基材表面側温度
Tair: 冷却空気温度

図 1 TBCの遮熱効果

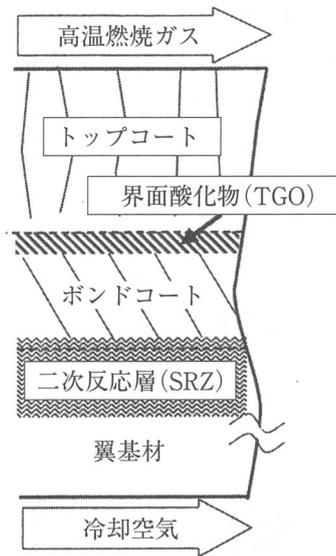


図 2 TBC翼の稼動後の断面模式図

示す。トップコートとボンドコートとの界面には界面酸化物 (Thermally Grown Oxide: TGO) が生じ、ボンドコートと基材との界面にはそれぞれの合金成分の相違による相互拡散によって二次反応層 (Secondary Reaction Zone: SRZ) が生じる。更に、トップコートのセラミックでは、多孔質セ

ラミックスの焼結も生じる。これらの組織変化だけでなく、起動停止の熱応力に伴う熱衝撃、熱サイクルなどにより、機械的損傷（クラック、はく離など）も生じ、更に、多孔質セラミックスの焼結による熱特性（熱伝導率）の変化も生じる。これらの、すべての変化がTBCの遮熱効果、耐久性に大きな影響を及ぼし、長時間安定な高耐久性TBCの開発課題となる。

1. 熱応力緩和

図3は熱応力緩和作用を付与した多層コーティングの一例（四層型TBC）¹⁾、及び柱状組織セラミックスを設けたTBCの模式図を示す。四層型TBCでは、セラミックス層は大気中プラズマ溶射、MCrAlY層及びセラミックスとMCrAlY混合層は減圧雰囲気中プラズマ溶射（LPPS）で形成されている。このTBCでは、セラミックス層と基材との熱膨張差に起因する熱応力をセラミックスとMCrAlY混合層で緩和する構造である。また、多孔質セラミックス層を通じての混合層の高温腐食・酸化を防止する環境遮断用MCrAlY層を設けている。

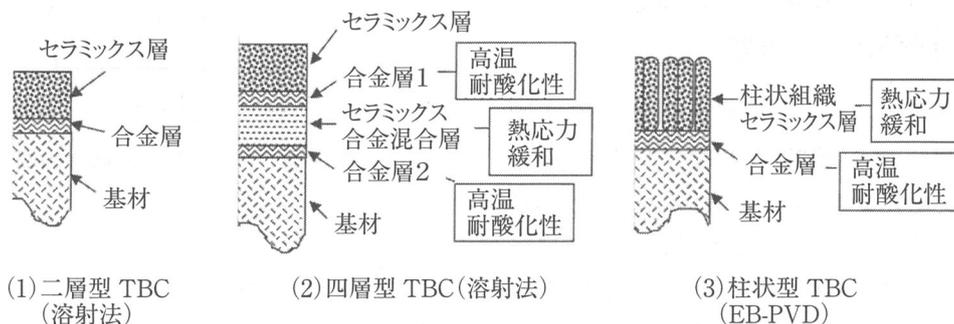
四層型と二層型TBCの熱サイクル試験結果では、四層型TBCは熱応力緩和と環境遮断作用により二層型TBCに比べ約2倍の耐久性を示していた¹⁾。また、トップコートにCaO-SiO₂-ZrO₂系のガラス質セラミックスを適用し、孤立分散型のマイクロクラックを皮膜内に多数分散させて、熱応力緩和とマクロクラックの進展抑止を図った例もある²⁾。プラズマ溶射によるトップコートでは、

通常、溶射偏平粒子が積層した多孔質なセラミックス層が得られる。このような積層組織では、皮膜内にはく離を生じる方向に潜在的な欠陥を抱えているため、耐剥離性には限界がある。最近、プラズマ溶射により、熱応力緩和を狙った縦クラック型セラミックス組織をプラズマ溶射で形成する報告が多い^{3)~6)}。

基材表面を高温に保持した状態でセラミックスをプラズマ溶射することで、緻密な組織で、かつ、縦クラックが均一分布した組織を形成するのが一般的である。本来、熱応力緩和効果を狙った柱状組織セラミックスはEB-PVD（Electron-Beam Physical Vapor Deposition）で形成されているが、設備が大規模で生産性、コスト等の課題がある為、大気中で施工できるプラズマ溶射が着目検討されている。

2. TGO（Thermally Grown Oxide）の抑制

トップコートとボンドコートとの界面に生成するTGOの主成分はAl₂O₃である。このAl₂O₃は多孔質なトップコートを通じての酸化によって、ボンドコートのMCrAlY合金中のAlが優先的に酸化して生成したもので、本来、ボンドコートの内部酸化を防止する役割を果たす。しかし、高温長時間の使用により、Al₂O₃層の厚さが厚くなった場合、TBCの損傷の原因となる。従って、TGOの成長の抑制がTBCの耐久性向上に重要になる。TGOの成長抑制として、ボンドコートの合金組成を検討した結果、MCrAlY合金中のYを除いたY-free合金ではMCrAlY合金のTGOに比べ、約1/2の厚



四層型 TBC：中間層（混合層）による熱応力緩和
 柱状型 TBC：セラミックス層の組織制御（柱状組織化）による熱応力緩和

図 3 TBCの断面模式図

さに低減できる。高温保持を伴う熱サイクル試験結果、TBCの損傷に至るまでの繰り返し数が約2.5倍となり、耐久性向上に有効であることが明らかになった^{7), 8)}。

熱的要因で生成するTGOがTBCの機械的特性に及ぼす影響について検討し、TBC損傷メカニズムを提案している報告もある⁹⁾。これらの研究成果は、今後、発電用ガスタービン動静翼用TBCの耐久性向上に大きく寄与すると考えられる。

◇ 耐熱合金コーティングの開発状況

最新の耐熱合金コーティングの開発としては、高温長時間使用による合金皮膜と基材との相互拡散での合金皮膜の特性劣化を防止する検討がなされている。特に、耐熱温度が高い単結晶材を用いた動翼では、合金皮膜と動翼基材での元素の相互拡散に起因して前述のSRZが生成し、基材の強度低下、及びコーティングの特性低下を生じる。SRZの抑制検討の一方法として、EQコーティングが提案されている¹⁰⁾。EQコーティングでは、基材Ni基合金中の析出強化因子である γ' 相と熱力学的に平衡 (Equilibrium) 関係となる組成のMCrAlY合金を用いることで、基材とコーティング層の界面でのSRZ層の生成を抑制する。 γ/γ' 相、 β 相EQコーティングの基礎検討結果では、拡散によるSRZの抑制が認められている⁹⁾。また、(Ni, Pt)-Al β 相単層のコーティングの検討例も報告されている¹¹⁾。

一方、SRZ抑制検討として、基材とコーティング層の界面にReなどからなる σ 相の拡散バリアーを設ける検討例もある¹²⁾。更に、高温使用時にコーティング層の最表面に形成され環境遮断効果を発揮するAl₂O₃スケールの密着性を改善する希土類元素添加のメカニズム検討例もある¹³⁾。

このように、最近の合金コーティングの開発としてSRZの抑制が注目されている。特に、単結晶材翼では、最高使用温度が高く、SRZの問題が今後大きくなると考えられる。

むすび

GT部品の耐熱コーティングは、高効率高温GTの開発上必須の技術である。その目的は高温耐酸

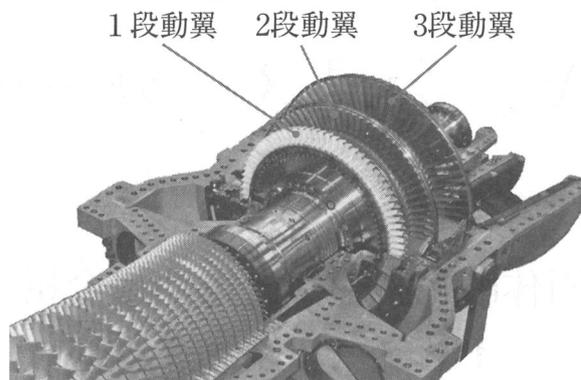


図 4 発電用ガスタービンの外観

化・耐食、及び遮熱等と種々あり、コーティングプロセスも、拡散浸透、めっき、溶射、化学蒸着 (CVD) および物理蒸着 (PVD) と多岐に及び、それぞれの方法の特徴を生かして既に、燃焼器、動静翼などの高温部品に適用されている。図4は初段動翼にTBCを適用した発電用GTの外観写真を示す。長時間の耐久性が要求される発電用GTでは、これらの耐熱表面処理が効率、部品の信頼性、運用効率等の向上に大きく寄与している。

参考文献

- 1) 児島慶享, 和田克夫, 寺前哲夫, 古瀬裕: 高温学会誌, 17, 303 (1991)
- 2) 原田良夫: 熱処理, 39, (4), 198 (1999)
- 3) D.M. Gray, Y.C. Lau, C.A. Jhonson, M.P. Borom, W.A. Nelson; US Patent, US5830586 (1998)
- 4) R. Annigeri, P.S. DiMascio, R.M. Orenstein, J.R. Zuiker: ASME Paper 2000-GT-580
- 5) A. Bolcavage, A. Feuerstein, N. Hitchman: Proceedings of ITSC (2005)
- 6) A. Tricoire, M. Vardelle, P. Fauchais: Proceedings of ITSC (2005)
- 7) Hideyuki Arikawa, Yoshitaka Kojima, Takayuki Yoshioka, Mitutoshi Okada, Tohru Hisamatu: Proceedings of the 1st ATSC (2005), 63-64
- 8) T. Izumi, H. Arikawa, Y. Kojima, M. Okada, T. Hisamatu: Proceedings of ITSC (2011)
- 9) 小川和洋, 丹野昌利, 庄子哲雄: 耐熱材料123委員会研究報告44-2, (2003) 117-187
- 10) 川岸京子, 佐藤彰洋, 原田広史: 耐熱材料123委員会研究報告46-3, (2005) 281-286
- 11) C. G. Levi: Current Opinion in Solid and Material Science, 8 (2004), 77-91
- 12) 成田敏夫: 特開2001-323332
- 13) 黒川一哉, 川田壮志, 山内啓, 渡辺精一, 成田敏夫: 耐熱材料123委員会研究報告46-3, (2005) 311-316

V. 会員メーカーの耐熱金属材料・技術

日立金属(株)

固体酸化物形燃料電池用金属 インターコネクタ材

まえがき

燃料電池は、CO₂排出量削減による地球温暖化抑制や化石燃料の節約等、環境・エネルギー問題を解決する有力な手段の一つとして注目されている。中でも固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）は、①発電効率が低い、②天然ガス・灯油等の多様な燃料に対応可能、③家庭用分散電源から火力発電との複合発電まで幅広い規模に対応できる、④白金等の高価な触媒が不要、等の長を有することから、実用化に高い期待が寄せられている。

インターコネクタ材は、セラミックス製の発電セル間を作動温度で電氣的に接続する部材であり、一例として、図1のように配置される。従来1000℃作動のSOFCが主流であったが、2000年頃から750℃程度で作動するSOFCが加速的に開発されてきたため、セラミックス対比で低コストかつ加工性の良い金属材料をインターコネクタ材に適用する検討が活発化している。

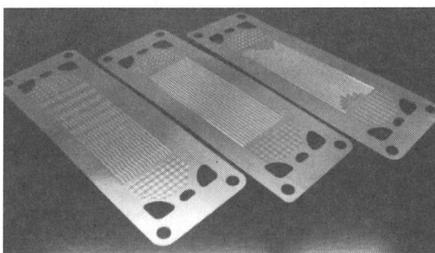
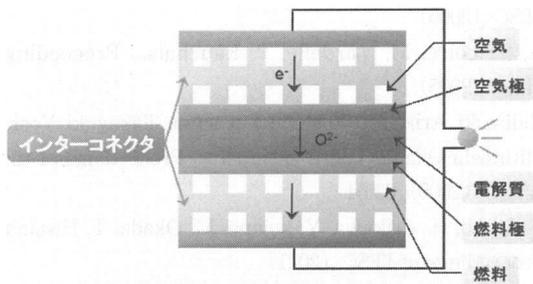


図 1 固体酸化物形燃料電池の構造模式図と金属インターコネクタ加工例

◇ 開発概要

SOFCインターコネクタは700～850℃程度の高温で大気および燃料ガスに曝されるため、高温での耐酸化性が必要とされ、かつ発電した電気を流す接続部材としての役割も有するものであるため、高温での良好な電気伝導も必要である。一般的な耐熱材料のように高い高温強度はあまり必要とはされない用途である。SOFCインターコネクタ材への主な要求特性は、作動温度での「①良好な耐酸化性」、「②良好な電気伝導性」、「③セル材料（セラミックス）に近い熱膨張係数」である。日立金属では、上記の要求を満たすため、1997年、Fe-22Crフェライト系合金ZMG[®]232を開発、その後改良を進め、ZMG232Lを2005年に開発・サンプル提供を行ってきた。

しかし、SOFCの実用化推進のために、SOFCを構成する各部材のさらなる耐久性向上が求められている。また、金属インターコネクタ材は、一般に板厚の薄い状態で使用されるが、過去の検討から板厚が薄いほど耐酸化性が低下することが分かっている。よって、金属インターコネクタ材の主な課題は、薄板における耐酸化性の向上である。

そこで、ZMG232Lをベースに、酸化皮膜の薄膜化・緻密化を狙った合金組成設計に取り組み、2010年、耐酸化性、導電性を向上させた合金ZMG232J3、ZMG232G10を開発した。

むすび

2011年度より、本稿で述べた合金、ZMG232J3、ZMG232G10の市場投入を開始した。今後は、SOFC普及時に必要とされる低コスト化、およびSOFCの耐久性に影響する金属インターコネクタからのCr蒸発を防止するコーティングとの組合せの検討などを進め、SOFCの実用化に貢献していきたい。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託研究「固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発」にて得られた成果を含むものです。関係各位に深く感謝いたします。

〔日立金属(株) やすだ のぶたか
安来工場 冶金研究所 安田 信隆〕

“特集”編集後記

福島原子力発電所の事故を発端とした脱原発の動きの中、全国的な電力不足の当面の対策として、各種火力発電の適用が拡大してきています。この火力発電の必需品である耐熱材料を紹介してはどうかとの提案が、今回の「耐熱金属材料」特集のキッカケです。

編集内容を立案するため、以前の冊子を調べてみますと、「耐熱材料」特集は、'71年以来40年振りであり、その後は、'84年の「ステンレス鋼、耐熱鋼、耐熱合金の新鋼種並びに用途開発」特集で「航空機用ジェットエンジンの材料動向」の解説があっただけと分かりました。そして、編集小委員会で、久し振りなので航空機・自動車用途なども含めて紹介しようとの方針が決まりました。

本特集は、耐熱金属材料の概要・用途・開発動向、耐熱表面処理の解説の構成になりました。最初の田中先生の概要解説は非常に分かり易く、事務系の人にも理解し易い内容と思います。この中で、図2が印象的で、ここ70年間、製造方法開発も含め、耐熱温度の高い合金が継続的に開発されてきたことが分かります。また、このような開発

が、発電機や航空機などの開発を支えてきたことも想像出来ます。

用途、材料開発動向の項では、耐熱材料が使われる発電機などの開発動向も含めて詳しい解説があります。用途により要求特性が異なることや、材料開発がどのように行われてきたかについて、説明されています。普段、触れることの少ない情報ですが、私たちの過ごす社会がこのような技術に支えられていることを知ることが出来、非常に参考になります。

さて、これから冬に向かい、定期点検で休止した原発が再稼動しないことによる電力不足が懸念されています。そのようなニュースが入ってきた時、本特集で紹介された火力発電技術及び耐熱材料のことを思い出して頂ければ、この特集も意義があったと言えるでしょう。

最後になりますが、ご多忙の中、本特集にご寄稿頂いた皆様、編集にご協力頂いた関係者の皆様に厚くお礼申し上げます。

〔日立金属(株) 特殊鋼カンパニー技術部 加田 善裕〕

業界のうごき

お詫び

本誌9月号「業界の動き」58頁、59頁に「日新、日金工統合へ ステinless国内最大規模」との記事を業界主要紙より抜粋掲載しましたが、両社はプレスリリースでこの旨を否定しております。両社及び読者の皆様にご迷惑をおかけしましたことをお詫び申し上げます。

岡谷鋼機、東南アで事業拡大 現地の顧客サービス強化

岡谷鋼機は、東南アジア地区を中心とした海外展開を今後も強化する。円高や外需の高かまりに対応して海外展開を強めているユーザーの現地でのサービス強化を図るとともに、建築需要などが見込めるアジア地区での市場を開拓し、実績拡大につなげたい考え。

同社では、国内の製造業が海外展開することに対応して、これまでも家電向けなどを主体に鋼板・部材加工などを手掛ける現地子会社などを展開。また、自動車部品関連の子会社なども設立して業績が好調。

最近では、経済成長の著しいインドネシアでの商社活動を強化するために、今年7月にジャカルタ市内に現地法人を設立。営業を開始した。

また、同様に今後経済発展が急速に進む見通しのベトナムでも、ビジネスチャンス拡大をねらってホーチミン駐在員事務所を現地法人化し今年7月から営業を開始。

(10月12日、鉄鋼新聞)

大洋商事、大阪新倉庫月内に竣工

大洋商事が建設を進めていた福町第2倉庫(大阪市西淀川区)は29日に竣工する。10月2日までに京都倉庫(京都府久世郡)から鋼材、機械設備などの移設を完了したい考え

で、翌3日から出荷業務を開始する予定。自動車、建設機械を中心に、特殊鋼材の需要が旺盛な時期だけに金子社長は「できるだけ速やかに移設を完了し、需要家ニーズに応じていきたい」と話した。同社の関西地区の在庫拠点集約では、土地、建屋などの購入、建設などで約4億5,000万円を投じた。

当初は8月中旬までに京都倉庫を閉鎖し、新たに建設する福町第2倉庫に移管する予定だったが、東日本大震災の影響により建設会社の資材がそろわないことなどで計画がやや遅れていた。29日に竣工式を行い、10月2日までの最短3日間で移管する。京都～福町間をトラックなどで約30往復する予定だ。(9月14日、産業新聞)

住金物産、印でプレス成形品事業

住金物産は、成長著しいインドにおける電機・自動車向けを中心とする旺盛な部品需要に対応するため、プレス成形品事業に参入すると発表した。今年9月、100%出資の新会社「スミキンブッサン・スチール・サービスセンター・インド」をデリー近郊のニムラナ工業団地内に設立した。住金物産にとってインドにおける初の事業会社。

新会社は、300トンプレス機などを設置し、プレス成形品のジャスト・イン・タイムでの納入体制を構築する。総投資額は約8億円。12年4月の稼働予定で、3年後の15年度に売上規模40億円を見込む。

新会社の所在地はラジャスタン州ニムラナ工業団地で、プレス成形品などの製造・販売を行う。資本金は4億2,400万INR(約7億7,200万円)。株主構成は、住金物産が99%、同社100%子会社の「SBコイルセンタータイランド社」が1%。従業員数は48人を予定。(10月6日、鉄鋼新聞)

ノボル鋼鉄、11年6月期経常益倍増

ノボル鋼鉄は11年6月期決算で売上高60億5,100万円(前期比23.7%増)、経常利益1億6,000万円(同2倍)、純利益9,300万円(同88%増)の増収増益を確保した。

東日本大震災で仙台支店、テクニカルセンター(福島県南相馬市、以下TC)が一部被災し、TCは福島第一原発事故の影響で一時的に閉鎖したが、震災前の業績堅調や地道な営業努力で年度当初の目標をクリアした。TCは8月下旬から一部再開したが、顧客の要請や社員の生活基盤などを総合的に勘案して本格的な再開時期を検討していく。

前期の震災関連の特別損失は仙台支店建屋、TC敷地の復旧費用などで2,000万円。仙台支店は早期復旧したが、TC復旧費用は今期も約5,000万円を見込む。

TCは月間3,000万円近い機械加工を行っていたが、原発事故の影響を考慮して一時的に閉鎖し、仙台、東京、静岡への配転などで雇用を維持してきた。(9月7日、鉄鋼新聞)

リントツが新本社ビル 来年12月竣工

リントツは、本社ビルを新築する。現ビルが老朽化しはじめていることや、耐震性を高めるため一新するもの。来年12月に竣工し、年内に新本社での業務を開始する。これにより業務効率の向上を進めるとともに、防災強化や自然環境の保全に役立てる。

新本社ビル(建設地・名古屋市中区橋1)は、敷地面積2,072.1m²に建築面積1,100.31m²、延べ床面積3,900.12m²、地上5階・地下1階の鉄骨(S)造りの最新型ビルを建設する。最高高さは29m。

ビルの建設期間中は場所を名古屋

業界のうごき

市中区大須4-11-39の川本ビル6階に移して営業する。

(10月19日、鉄鋼新聞)

愛知、強力磁石の量産化成功 「ディスプレイウム」フリー

愛知製鋼は、ディスプレイウムを使用せず、ネオジムの使用量も3割減らせる新合金によるボンド磁石「マグファイン」の量産化に成功し、販売を開始すると発表した。レアアースの資源問題に対応しながら、磁石の小型・軽量化と高い磁力性能を確保した。

厚みを従来比で3割薄肉化したリング磁石（電動工具向け）の量産を手始めに、2012年9月をめどに月間50トンの販売を目指す。

ネオジム系磁石で高温条件などでも磁力を維持する（保持力）ためには、ディスプレイウム（Dy）の添加によるのが一般的。新合金によるマグファインは、従来品をベースに、レアアースのDyを添加せずに高温での磁力保持性能を高めた新商品。

電動工具用で大量採用されたのははじめ、年内をめどに自動車用ボディー系モータ（シート、パワーウィンド、リアワイパなど）や介護ベッドモータ向けに生産を開始する。

(9月30日、鉄鋼新聞)

神鋼、相次ぎ開発 熱交換器用の新製品

神戸製鋼所は、プレート式熱交換器（PHE）向けチタン薄板で世界初となる2種類の新製品を相次ぎ開発した。表面に潤滑被膜を施すことに成功した「潤滑プレコートチタン」は、従来品より部材加工時の成形性が向上。一方の「高伝熱チタン」はPHEの性能を左右する熱伝導率を高められる。PHE向けチタンの世界需要は拡大傾向にあり、神鋼は開発製品を武器に同分野での販売数量を現

状比1.2倍に増やすことを目指す。

両製品とも10月から発売する。いずれも加古川製鉄所（兵庫県加古川市）の既設の鋼材ラインを活用して生産する。

プレコートチタンは従来品より約1割深くプレス加工できるのが特徴。表面にシリカなどを含む厚さ約1ミクロンの樹脂系被膜をコーティングして実現した。潤滑被膜は鋼材では一般的だがチタン薄板ではこれまで実現が難しかった。薄板用のコーティングライン（CCL）で生産する。

(9月27日、鉄鋼新聞)

JFE系電炉統合、 JFE条鋼が3社吸収

JFEスチールは、グループ電炉メーカー4社の事業統合により発足する新会社の概要を発表した。新会社はJFE条鋼を存続会社とし、ダイワスチール、東北スチール、豊平製鋼の3社を来年4月1日付けで吸収合併。新会社の名称は「JFE条鋼」となる。社長にはJFEスチールの野村寛副社長が就任。本社の所在地は現JFE条鋼本社（東京都港区新橋5-11-3）とする。株主はJFEスチール100%となる予定。

グループ電炉の中で最も規模の大きいJFE条鋼に他3社を吸収合併する形としたのは4社の一体化によりコストダウンを含めた統合効果を早期に発揮することを狙いとする。

ただ、今回正式に決まったのは新会社の概要のみ。新生「JFE条鋼」の工場や人員など具体的な生産・販売体制については今後、JFEスチールと統合4社で引き続き検討を進めるとしている。

(10月27日、鉄鋼新聞)

下村、「工程の見える化」推進 熟練工の作業を映像化

下村特殊精工は、「S（下村）M（見える化）K（活動）運動」開始から

2年が経過した。開始初期の作業環境改善が中心の段階から、工程の「見える化」によるビジュアルマニュアル作成など、高い生産性実現に向けた進展を見せている。

ビジュアルマニュアルは各工程で技術習熟度の高い現場社員の作業の様子をビデオで撮影し技能伝承につなげる試みで、今年度から松尾工場で開始。従来の作業標準書による現場教育では解釈のばらつきなどの問題があったが工程を映像により「見える化」し、「工程の作業ポイントの現場レベルでの理解がスムーズになるなど教育面で非常に効果がある。今後は熟練工の作業を標準とした独自のノウハウを蓄積したい」とし、コンバインドマシン工程を手掛ける製造第2課の全行程の約3割まで映像化が完了。

下期は、製造第1課、第3課と富士見工場でも映像化を開始する方針。

(10月13日、鉄鋼新聞)

新日鐵、神鋼、が開発 世界初1,180MPa級

新日本製鐵と神戸製鋼所はプレス成形性を約2倍に高めた自動車用の1,180MPa級の冷延ハイテンをそれぞれ開発したと発表した。いずれも日産自動車が13年度に発売する新車種の骨格部品に採用される。

従来は成形性の課題から980MPa級が主流で、1,180MPa級の骨格での本格採用は世界初。高強度化による板厚低減などを通じて車体軽量化に貢献する。1千MPa以上の超高強度ハイテンはこれまで補強部材などに適用が限られていたが、車の燃費規制強化などを背景に骨格部品向けにも広がってきた。

両社の開発製品とも車体骨格のうちセンターピラーやルーフサイドレールと呼ばれる複雑成形が必要な部位に採用される。両社の開発製品の採

業界のうごき

用で日産は車体骨格を1台あたり約15Kg減らせるとしている。

(10月6日、鉄鋼新聞)

大同、集光型太陽光発電システム 知多の植物栽培で成果

大同特殊鋼知多工場が09年夏から実施している集光型大洋光システムを用いた植物工場が順調に成果を出している。工場内に設置した発電機のエネルギーを用いて、同工場食堂に出すレタスの栽培が進んでいるほか、工場内で使う電動作業車(フォークリフト)、電気自動車のエネルギー源として活用されている。

同社では、国内の事業者や海外の太陽光発電所向けに拡販する。日欧の企業・大学が産学協同で発電効率をこれまで以上に高める(変換効率45%)研究を行う計画だ。

同社の集光型太陽光発電システムは、プラスチックのカバーがレンズとなり太陽光をモジュールに800倍以上に集光。さらに、架台が太陽の動きに対して正面を向くように移動することでさらに発電効率を高めている。

光から電気への変換効率は通常の25%(結晶シリコン型ソーラーパネル)に対し40%と格段に高い。

(10月5日、鉄鋼新聞)

住金・住商、印合弁 生産能力3倍に

住友金属工業と住友商事は、インドの自動車用鍛造クランクシャフト合弁に第2鍛造プレスラインを増設し、年産能力を80万本から220万本に拡大すると発表した。約10億ルピー(約19億円)を投じて5千トン高速鍛造プレスラインを設置し、12年11月に稼働開始する。現行の80万本体制では12年後半にフル操業化する計画で、需要拡大にはライン増設が必要と判断した。

日米中印の世界4極における鍛造クランクシャフトの年産能力を1,070

万本に拡大し、引き続き世界シェア10%超の達成を目指す。

インド合弁はSMIアムテック・クランクシャフト(資本金・5億4千万ルピー、本社ハリアナ州ダルヘラ)出資比率は住金40%、住商10%で現地の自動車用鍛造品メーカーであるアムテック・オートが50%、アムテック・オートのダルヘラ工場を買収し、10年4月に4千トン鍛造プレスラインでの操業を開始した。

(9月1日、鉄鋼新聞)

高周波、素形材事業を拡大 熱処理炉、旋盤を大型化

日本高周波鋼業は、素形材事業を拡大する。富山製造所の熱処理炉と旋盤を大型化することで、ほぼ全量を内製化しコスト・納期面での競争力を強化する。同社の素形材事業は構造用鋼で月100トン規模だが、ステンレス鋼・耐熱鋼もレパートリーに加え2年後には月300トンにまで拡大する計画だ。

現在は、多段シャフト材など月100トンの構造用鋼の素形材を生産しているが、鍛造後の熱処理炉や旋盤は「長さ6m基準」となっているためそれ以上の大型製品の場合は外注に頼っている。

鍛造後の熱処理炉については8基のうち1基を改造し「長さ9m製品」までの熱処理を可能にする。同時に大型旋盤を新規に導入、「長さ10m製品」までの加工を可能にする。今年10月下旬に工事を終え、試運転を経て12月から本格稼働に入る。

(9月21日、鉄鋼新聞)

日立、自動車用鋳鉄品生産 韓国拠点で3割増強

日立金属の韓国における自動車用鋳鉄品生産拠点である南陽金属(本社工場・大邱広域市)は、約20億円を投じて最新鋭の鋳造ラインを1基増設し、月産能力を現行比3割増の

8千トンに増強する。韓国国内の自動車メーカー向け、及び欧米自動車メーカー向けの受注が好調で、現有能力では対応し切れないため、12年夏に稼働開始する予定で新鋳造ラインを設置する。自動車用鋳鉄品(耐熱鋳鋼品などを除く)は日米韓の3拠点で、いずれもフル操業状態にある。

南陽金属は87年設立で、現在の出資比率は日立金属77%、大宇グループ23%。足回り関係、エンジン関係の高靱性ダクタイル鋳鉄品を中心に生産し、約7割をGMコリアなどの韓国自動車メーカーに納入し、約3割を欧米及び一部日本向けに輸出する。

(9月22日、鉄鋼新聞)

三菱製鋼、自動車用巻きばね生産 中国で新ライン稼働

三菱製鋼は中国の巻きばね生産拠点で能力増強投資を行っていたが、10月から自動車用巻きばねの新ラインが稼働、月産能力が2倍の50万本に増強された。同社は中国における日系自動車メーカーの生産拡大に対応して、浙江省寧波に自動車用巻きばね工場(寧波菱鋼彈簧)を建設、18年1月から本格生産に入った。リーマンショックによる一時的な生産減を除けば、ほぼ一貫してフル生産が続いているため、能力増強に踏み切った。

これまでは1ラインで月産25万本体制だったが、コンパクトで高生産性の新ラインを増設50万本体制に増強した。

隣接地では建設機械用太巻きばねの新工場も建設しており、来年3月には稼働を開始するスケジュールになっている。

(10月18日、鉄鋼新聞)

おことわり：この欄の記事は、最近月における業界のおよその動向を読者に知らせる目的をもって、本誌編集部において鉄鋼新聞ほか主な業界紙の記事を抜粋して収録したものです。

特殊鋼統計資料

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移

鋼種別

(単位：t)

年 月	構 造 用 鋼			計	特 殊 用 途 鋼							計	合 計
	工具鋼	機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼		ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他			
'09 暦年	118,838	2,843,319	2,361,756	5,205,075	290,195	546,103	2,346,002	526,073	3,630,014	607,092	7,945,479	13,269,392	
'10 暦年	264,305	4,709,973	3,765,411	8,475,384	433,942	990,566	3,084,123	808,875	5,613,907	833,938	11,765,351	20,505,040	
'09 年度	153,577	3,505,715	2,746,229	6,251,444	356,793	687,413	2,717,181	654,708	4,225,196	678,039	9,319,330	15,724,851	
'10 年度	268,456	4,792,776	3,921,740	8,714,516	433,798	1,036,426	3,112,544	805,346	5,697,842	866,488	11,952,444	20,935,416	
'10. 7-9月	65,643	1,227,553	987,845	2,215,398	111,499	245,252	764,195	194,503	1,399,428	215,750	2,930,627	5,211,668	
10-12月	73,306	1,226,066	1,022,408	2,248,474	112,048	272,596	774,723	208,641	1,472,455	213,762	3,054,225	5,376,005	
'11. 1-3月	63,236	1,187,637	1,008,036	2,195,673	105,703	273,415	771,323	201,479	1,412,039	230,058	2,994,017	5,252,926	
4-6月	64,735	1,020,892	931,971	1,952,863	85,422	283,099	745,033	146,367	1,165,149	220,871	2,645,941	4,663,539	
'10年 7月	23,099	394,813	343,537	738,350	38,797	83,820	259,859	63,517	473,492	69,195	988,680	1,750,129	
8月	20,333	405,755	296,969	702,724	35,996	75,045	246,718	63,477	447,286	77,246	945,768	1,668,825	
9月	22,211	426,985	347,339	774,324	36,706	86,387	257,618	67,509	478,650	69,309	996,179	1,792,714	
10月	26,059	405,225	345,642	750,867	36,130	91,971	252,340	67,638	505,565	73,336	1,026,980	1,803,906	
11月	23,590	411,048	343,160	754,208	36,373	91,738	250,159	67,058	454,076	79,221	978,625	1,756,423	
12月	23,657	409,793	333,606	743,399	39,545	88,887	272,224	73,945	512,814	61,205	1,048,620	1,815,676	
'11年 1月	22,283	417,734	339,187	756,921	31,395	86,645	270,224	67,302	513,614	83,309	1,052,489	1,831,693	
2月	19,620	386,538	341,738	728,276	39,960	89,670	258,076	69,948	439,760	82,809	980,223	1,728,119	
3月	21,333	383,365	327,111	710,476	34,348	97,100	243,023	64,229	458,665	63,940	961,305	1,693,114	
4月	22,741	337,058	312,323	649,381	28,366	87,597	239,079	40,384	362,056	74,579	832,061	1,504,183	
5月	19,179	325,136	303,691	628,827	27,328	98,484	244,836	44,204	358,433	78,098	851,383	1,499,389	
6月	22,815	358,698	315,957	674,655	29,728	97,018	261,118	61,779	444,660	68,194	962,497	1,659,967	
7月	22,281	355,331	348,247	703,578	35,487	92,094	255,413	65,285	393,823	75,509	917,611	1,643,470	
8月	20,271	382,506	321,949	704,455	39,289	79,978	250,979	64,145	468,032	65,085	967,508	1,692,234	
前月比	91.0	107.6	92.4	100.1	110.7	86.8	98.3	98.3	118.8	86.2	105.4	103.0	
前年同月比	99.7	94.3	108.4	100.2	109.1	106.6	101.7	101.1	104.6	84.3	102.3	101.4	

経済産業省調査統計部調べ

形状別

(単位：t)

年 月	形 鋼	棒 鋼	管 材	線 材	鋼 板	鋼 帯	合 計
'09 暦年	178,848	3,448,161	1,077,489	2,916,079	1,475,712	4,173,103	13,269,392
'10 暦年	393,638	6,029,672	1,355,012	4,382,009	2,074,482	6,270,227	20,505,040
'09 年度	244,335	4,265,765	1,060,842	3,544,893	1,496,432	5,112,584	15,724,851
'10 年度	436,149	6,259,449	1,405,850	4,395,761	2,105,357	6,332,850	20,935,416
'10. 7-9月	78,680	1,546,193	376,422	1,116,734	500,281	1,593,358	5,211,668
10-12月	121,209	1,626,096	352,780	1,130,512	572,970	1,572,438	5,376,005
'11. 1-3月	129,310	1,601,152	354,578	1,078,022	504,600	1,585,264	5,252,926
4-6月	112,882	1,430,918	378,062	908,179	464,461	1,369,037	4,663,539
'10年 7月	38,383	511,675	142,936	360,100	153,551	543,484	1,750,129
8月	13,480	485,177	113,665	380,724	165,244	510,535	1,668,825
9月	26,817	549,341	119,821	375,910	181,486	539,339	1,792,714
10月	29,470	547,121	132,491	366,447	218,787	509,590	1,803,906
11月	42,730	545,615	108,202	392,596	173,356	493,924	1,756,423
12月	49,009	533,360	112,087	371,469	180,827	568,924	1,815,676
'11年 1月	49,858	527,135	124,006	376,001	187,853	566,840	1,831,693
2月	34,802	533,300	119,913	372,282	152,552	515,270	1,728,119
3月	44,650	540,717	110,659	329,739	164,195	503,154	1,693,114
4月	30,598	452,051	134,453	291,701	142,834	452,546	1,504,183
5月	38,424	455,733	125,802	308,820	141,321	429,289	1,499,389
6月	43,860	523,134	117,807	307,658	180,306	487,202	1,659,967
7月	60,678	511,399	131,676	338,217	127,379	474,121	1,643,470
8月	34,788	482,060	125,245	355,383	178,768	515,990	1,692,234
前月比	57.3	94.3	95.1	105.1	140.3	108.8	103.0
前年同月比	258.1	99.4	110.2	93.3	108.2	101.1	101.4

経済産業省調査統計部調べ

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別販売(商社+問屋)の推移

(単位：t)

年 月	工具鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 金 鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス テ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 鋼	そ の 他			
'09 暦年	261,505	2,696,629	4,408,121	7,104,750	176,029	297,915	1,783,755	164,114	30,960	15,502	2,468,275	9,834,530	
'10 暦年	447,725	3,903,203	4,298,708	8,201,911	273,624	490,599	2,787,997	212,853	52,711	90,797	3,908,581	12,558,217	
'09 年度	321,270	3,015,334	3,932,857	6,948,191	212,180	330,580	1,871,810	188,055	29,854	25,038	2,657,517	9,926,978	
'10 年度	462,905	4,084,266	4,338,870	8,423,136	276,543	532,229	3,438,657	207,684	61,239	109,308	4,625,660	13,511,701	
'10年 12月	36,918	320,992	373,853	694,845	22,779	46,551	287,223	16,936	4,645	1,923	380,057	1,111,820	
'11年 1月	37,184	342,096	329,878	671,974	22,130	44,055	388,352	16,726	4,433	2,793	478,489	1,187,647	
2月	43,059	355,251	382,849	738,100	23,594	45,941	327,904	15,734	5,375	22,868	441,416	1,222,575	
3月	39,445	362,309	391,906	754,215	20,534	49,014	405,249	18,751	6,675	5,668	505,891	1,299,551	
4月	28,887	266,280	385,507	651,787	15,824	49,861	227,514	11,063	12,906	1,144	318,312	998,986	
5月	25,912	236,662	351,448	588,110	14,205	38,355	282,435	11,680	6,041	8,103	360,819	974,841	
6月	33,762	300,332	380,244	680,576	23,083	43,429	331,472	18,258	5,882	7,742	429,866	1,144,204	
7月	33,828	353,756	392,669	746,425	22,042	41,367	270,611	19,817	6,476	5,269	365,582	1,145,835	
8月	36,907	328,183	412,240	740,423	24,077	58,593	276,139	18,202	6,852	5,673	389,536	1,166,866	
前 月 比	109.1	92.8	105.0	99.2	109.2	141.6	102.0	91.9	105.8	107.7	106.6	101.8	
前年同月比	103.4	101.8	116.4	109.4	105.7	137.8	162.7	117.9	124.8	52.7	146.1	119.2	

経済産業省調査統計部調べ

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別在庫の推移

(単位：t)

メーカー在庫

年 月	工具鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 金 鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス テ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 鋼	そ の 他			
'09 暦年	4,601	153,500	91,618	245,118	25,398	31,876	108,939	32,693	131,497	26,428	356,831	606,550	
'10 暦年	8,211	196,285	116,884	313,169	26,837	32,899	118,937	32,660	171,362	33,367	416,062	737,442	
'09 年度	4,885	150,279	87,694	237,973	24,585	31,484	114,320	30,093	130,480	23,679	354,641	597,499	
'10 年度	8,496	172,140	103,840	275,980	23,338	30,420	111,558	29,060	154,845	47,895	397,116	681,592	
'10年 12月	8,211	196,285	116,884	313,169	26,837	32,899	118,937	32,660	171,362	33,367	416,062	737,442	
'11年 1月	9,289	199,272	105,331	304,603	24,456	31,650	126,660	35,905	188,950	39,097	446,718	760,610	
2月	9,421	195,068	115,475	310,543	28,910	34,563	123,971	36,273	146,405	45,683	415,805	735,769	
3月	8,496	172,140	103,840	275,980	23,338	30,420	111,558	29,060	154,845	47,895	397,116	681,592	
4月	9,383	197,610	121,720	319,330	23,813	31,912	120,983	29,736	162,059	49,214	417,717	746,430	
5月	7,376	185,884	127,478	313,362	25,964	36,642	112,276	27,873	185,706	55,033	443,494	764,232	
6月	8,778	172,482	113,860	286,342	20,615	35,518	117,125	27,365	188,379	41,488	430,490	725,610	
7月	8,824	170,723	124,705	295,428	21,464	32,868	119,375	28,363	168,398	42,677	413,145	717,397	
8月	9,257	178,275	123,853	302,128	20,730	34,885	125,540	28,452	179,893	41,328	430,828	742,213	
前 月 比	104.9	104.4	99.3	102.3	96.6	106.1	105.2	100.3	106.8	96.8	104.3	103.5	
前年同月比	146.2	106.1	135.0	116.3	83.7	107.6	108.4	95.3	151.2	113.5	120.3	118.9	

経済産業省調査統計部調べ

流通在庫

年 月	工具鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 金 鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス テ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 鋼	そ の 他			
'09 暦年	46,236	159,628	123,412	283,040	13,221	47,639	128,676	22,719	6,619	2,075	220,949	550,225	
'10 暦年	58,676	233,045	154,142	387,187	20,594	53,478	143,960	17,731	7,227	2,142	245,132	690,995	
'09 年度	37,814	181,341	117,345	298,686	14,797	50,383	128,100	19,782	6,074	1,762	220,898	557,398	
'10 年度	58,255	257,087	161,527	418,614	21,846	54,551	152,234	22,431	7,125	2,218	260,405	737,274	
'10年 12月	58,676	233,045	154,142	387,187	20,594	53,478	143,960	17,731	7,227	2,142	245,132	690,995	
'11年 1月	57,465	246,293	154,919	401,212	19,780	54,006	156,605	17,446	7,148	1,973	256,958	715,635	
2月	59,457	244,684	156,473	401,157	19,494	54,043	146,128	18,902	7,215	2,088	247,870	708,484	
3月	58,255	257,087	161,527	418,614	21,846	54,551	152,234	22,431	7,125	2,218	260,405	737,274	
4月	66,956	255,147	157,809	412,956	22,431	53,373	155,944	22,299	7,214	2,217	263,478	743,390	
5月	61,661	261,229	163,804	425,033	21,994	56,742	158,508	20,341	7,254	2,408	267,247	753,941	
6月	61,781	261,118	163,101	424,219	20,538	55,037	161,466	17,812	7,330	2,243	264,426	750,426	
7月	59,181	244,231	159,136	403,367	19,154	52,364	156,780	16,393	7,252	2,126	254,069	716,617	
8月	61,287	242,415	158,912	401,327	20,226	50,752	160,999	18,214	7,672	2,201	260,064	722,678	
前 月 比	103.6	99.3	99.9	99.5	105.6	96.9	102.7	111.1	105.8	103.5	102.4	100.8	
前年同月比	116.7	118.8	119.9	119.2	107.2	102.5	115.8	93.1	114.5	138.8	110.6	115.8	

経済産業省調査統計部調べ

特殊鋼熱間圧延鋼材の輸出入推移

輸出

(単位：t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼				その他の鋼			特殊鋼 鋼材合計
		機械構造 用炭素鋼	構造用 合金鋼	計	ばね鋼	ステンレス鋼	ピアノ 線材	計	高炭素鋼	その他 合金鋼	計	
'09 暦年	13,363	275,179	267,637	542,816	102,049	1,048,255	111,808	1,262,112	11,528	2,994,593	3,006,121	4,824,411
'10 暦年	29,076	526,073	515,148	1,041,222	178,652	1,245,293	178,065	1,602,010	16,986	5,092,548	5,109,534	7,781,841
'09 年度	15,360	370,560	330,811	701,371	128,111	1,137,033	137,736	1,402,881	11,838	3,591,215	3,603,053	5,722,664
'10 年度	32,088	518,301	537,548	1,055,849	186,550	1,312,165	188,479	1,687,194	17,707	5,342,937	5,360,643	8,135,776
'10年 12月	2,526	42,070	43,163	85,233	16,156	113,053	19,640	148,849	1,613	450,855	452,468	689,075
'11年 1月	2,032	38,440	43,852	82,292	16,141	93,482	20,619	130,241	1,534	453,745	455,280	669,845
2月	3,474	41,073	49,626	90,699	15,696	116,559	15,977	148,232	1,243	450,524	451,768	694,173
3月	3,277	42,813	44,982	87,795	19,312	134,332	19,326	172,970	1,362	546,372	547,734	811,775
4月	2,940	35,834	42,408	78,242	14,982	107,107	30,739	152,828	1,513	418,101	419,614	653,623
5月	2,897	37,951	44,723	82,674	13,823	101,659	28,559	144,041	436	396,053	396,489	626,101
6月	2,727	29,402	46,703	76,106	13,737	105,976	22,525	142,238	1,216	408,714	409,930	631,000
7月	3,009	26,572	38,012	64,584	13,855	107,388	18,830	140,072	1,611	437,652	439,264	646,929
8月	2,861	35,007	49,105	84,112	16,080	96,895	12,419	125,394	1,659	391,315	392,974	605,341
前月比	95.1	131.7	129.2	130.2	116.1	90.2	66.0	89.5	102.9	89.4	89.5	93.6
前年同月比	111.1	87.8	112.7	100.8	115.7	108.3	83.5	106.0	143.6	85.6	85.7	91.3

財務省通関統計

輸入

年月	工具鋼	ばね鋼	ステンレス鋼					計	快削鋼	その他の鋼			合計
			形鋼	棒鋼	線材	鋼板類	鋼管			高炭素鋼	合金鋼	計	
'09 暦年	2,723	735	476	8,883	8,920	98,080	5,442	121,801	5	8,438	47,544	55,982	181,246
'10 暦年	4,549	1,084	975	10,871	9,624	137,703	8,327	167,499	3	8,967	110,481	119,449	292,583
'09 年度	2,614	730	599	9,553	9,211	108,609	5,784	133,755	4	8,814	47,973	56,787	193,890
'10 年度	5,439	1,157	866	11,315	9,305	142,188	8,720	172,393	2	13,278	118,915	132,193	311,184
'10年 12月	599	109	66	1,213	712	12,221	884	15,095	-	1,474	8,696	10,170	25,973
'11年 1月	774	70	73	594	480	11,426	654	13,228	-	1,896	10,378	12,274	26,345
2月	496	112	52	846	684	10,736	733	13,052	-	708	7,760	8,468	22,127
3月	313	90	39	1,076	958	11,932	856	14,860	-	2,838	7,277	10,115	25,379
4月	351	91	92	1,080	711	14,941	929	17,753	17	4,570	17,365	21,935	40,147
5月	318	70	43	1,125	939	13,290	860	16,257	14	6,542	11,543	18,085	34,745
6月	425	90	32	998	788	15,493	1,140	18,450	-	5,076	14,219	19,296	38,260
7月	324	77	71	1,267	674	11,267	1,125	14,404	1	961	12,266	13,227	28,033
8月	477	112	26	788	977	14,415	990	17,195	47	222	19,070	19,292	37,124
前月比	146.9	145.4	36.8	62.2	145.0	127.9	88.0	119.4	3,991.4	23.1	155.5	145.9	132.4
前年同月比	108.2	77.2	24.0	86.0	125.0	115.5	94.7	112.1	-	19.7	224.5	200.5	145.3

財務省通関統計

関連産業指標推移

(単位：台)

(単位：億円)

年月	四輪自動車生産		四輪完成車輸出		新車登録		建設機械生産		産業車輛生産		機械 受注額	産業機械 受注額	工作機械 受注額
	うち トラック		うち トラック		うち トラック		ブル ドーザ	パワー ショベル	フォーク リフト	ショベル トラック			
'09 暦年	7,934,057	985,101	3,616,168	315,507	4,609,256	672,943	2,135	44,395	71,554	6,843	77,119	41,508	4,118
'10 暦年	9,628,920	1,209,224	4,841,460	450,312	4,956,136	731,094	4,354	101,788	104,767	9,726	82,555	47,731	9,786
'09 年度	8,864,908	1,062,598	4,086,631	354,985	4,880,264	692,034	2,183	53,520	77,925	7,454	77,405	46,010	5,471
'10 年度	8,993,897	1,146,862	4,806,058	437,594	4,601,135	709,410	4,938	111,978	106,057	10,066	84,480	47,463	11,136
'10年 12月	747,867	92,740	467,514	43,131	287,851	47,515	363	10,364	9,223	868	6,888	4,231	988
'11年 1月	706,107	87,830	365,188	29,976	305,494	45,698	468	9,459	8,301	802	7,165	4,291	1,046
2月	795,656	99,531	431,562	35,644	401,292	59,168	507	10,999	9,135	881	7,288	4,672	1,127
3月	403,937	50,781	312,478	28,324	437,598	71,988	385	9,408	7,758	730	7,360	6,692	1,135
4月	292,044	40,348	126,061	10,917	185,672	31,724	525	7,622	6,931	780	7,119	2,982	1,069
5月	489,759	74,840	202,833	20,144	237,363	36,618	586	9,380	8,791	921	7,334	2,740	1,081
6月	742,531	111,329	402,042	41,572	351,826	56,489	663	12,247	12,065	1,002	7,897	5,197	1,286
7月	790,325	109,607	410,390	42,654	373,058	59,297	517	11,303	10,862	866	7,252	3,263	1,134
8月	704,096	89,963	363,772	32,433	329,838	55,346	544	11,022	9,300	894	8,049	4,830	989
前月比	89.1	82.1	88.6	76.0	88.4	93.3	105.2	97.5	85.6	103.2	111.0	148.0	87.3
前年同月比	101.8	100.1	107.6	97.2	77.6	101.5	131.7	130.1	116.6	103.7	102.2	94.2	115.2

出所：日本自動車工業会、経済産業省、総務省、産業機械工業会、工作機械工業会

特殊鋼流通統計総括表

2011年 8月分

鋼種別	月別 項目	実数 (t)	前月比 (%)	前年同 月比(%)	1995年基準 指数(%)	1987~2011年随時				
						年月	ピーク時	年月	ボトム時	
工 具 鋼	生産高	20,271	91.0	99.7	91.2	91.3	29,286	09.4	5,565	
	輸出船積実績	2,861	95.1	111.1	79.9	87.3	10,368	09.6	693	
	販売業者	受入高計	39,013	124.9	113.5	189.7	11.2	45,051	09.2	10,035
		販売高計	36,907	109.1	103.4	181.1	11.2	43,059	09.2	13,875
		消費者向	20,454	101.5	102.1	217.9	10.6	22,315	09.2	6,438
		在庫高計	61,287	103.6	116.7	170.0	11.4	66,956	87.10	31,813
生産者工場在庫高	9,257	104.9	146.2	82.6	91.10	17,876	09.12	4,601		
総在庫高	70,544	103.7	119.9	149.3	11.4	76,339	88.1	41,105		
構 造 用 鋼	生産高	704,455	100.1	100.2	129.8	08.10	827,404	09.2	269,906	
	輸出船積実績	84,112	130.2	100.8	496.9	10.6	92,070	92.1	10,222	
	販売業者	受入高計	738,383	101.8	106.7	223.5	08.10	1,157,330	98.8	257,445
		販売高計	740,423	99.2	109.4	225.8	08.10	1,134,981	99.8	253,971
		消費者向	282,358	95.7	67.9	132.1	08.10	670,656	98.8	166,732
		在庫高計	401,327	99.5	119.2	167.0	11.5	425,033	87.10	169,822
生産者工場在庫高	302,128	102.3	116.3	100.9	97.11	320,394	09.4	176,539		
総在庫高	703,455	100.7	117.9	130.3	11.5	738,395	87.12	427,189		
ば ね 鋼	生産高	39,289	110.7	109.1	92.3	89.3	60,673	09.2	10,159	
	輸出船積実績	16,080	116.1	115.7	127.1	06.5	27,829	09.4	3,629	
	販売業者	受入高計	25,149	121.7	109.9	168.5	10.10	27,491	09.4	6,202
		販売高計	24,077	109.2	105.7	161.6	08.4	25,355	09.4	6,339
		消費者向	7,108	87.6	107.2	57.3	90.10	23,876	09.4	2,550
		在庫高計	20,226	105.6	107.2	636.4	11.4	22,431	03.9	1,534
生産者工場在庫高	20,730	96.6	83.7	64.5	95.12	41,374	09.4	15,541		
総在庫高	40,956	100.8	93.9	116.0	11.2	48,404	02.9	23,836		
ス テ ン レ ス 鋼	生産高	250,979	98.3	101.7	92.9	07.3	330,543	09.2	116,542	
	輸出船積実績	96,895	90.2	108.3	95.3	05.3	152,476	90.1	27,286	
	販売業者	受入高計	280,358	105.4	164.3	186.7	06.5	587,740	09.2	88,978
		販売高計	276,139	102.0	162.7	184.9	06.5	587,941	09.2	88,740
		消費者向	60,346	97.7	114.1	105.9	06.1	292,191	87.1	34,263
		在庫高計	160,999	102.7	115.8	145.6	01.10	169,096	87.3	51,419
生産者工場在庫高	125,540	105.2	108.4	85.3	02.4	188,988	09.6	94,564		
総在庫高	286,539	103.8	112.5	111.1	01.10	352,013	88.4	191,203		
快 削 鋼	生産高	64,145	98.3	101.1	72.4	88.3	116,819	09.2	22,054	
	販売業者	受入高計	20,023	108.8	127.2	119.0	06.9	25,874	04.9	7,949
		販売高計	18,202	91.9	117.9	110.0	08.4	26,351	09.2	10,358
		消費者向	17,696	93.5	118.1	124.4	08.4	23,235	04.9	9,649
		在庫高計	18,214	111.1	93.1	79.6	07.8	27,861	87.1	9,364
	生産者工場在庫高	28,452	100.3	95.3	126.6	87.1	43,166	01.12	17,975	
総在庫高	46,666	104.3	94.5	102.9	06.5	69,020	02.3	31,448		
高 抗 張 力 鋼	生産高	468,032	118.8	104.6	199.9	07.3	513,596	87.2	151,890	
	販売業者	受入高計	7,272	113.7	125.4	58.7	90.2	18,841	09.8	1,572
		販売高計	6,852	105.8	124.8	55.5	90.10	18,863	09.8	2,035
		消費者向	4,357	111.9	120.6	80.9	90.10	9,573	09.8	1,711
		在庫高計	7,672	105.8	114.5	57.9	99.12	20,289	02.12	5,895
	生産者工場在庫高	179,893	106.8	151.2	107.4	87.6	204,893	99.11	99,475	
総在庫高	187,565	106.8	149.2	103.7	01.5	217,711	06.3	110,555		
そ の 他	生産高	145,063	86.6	95.3	61.9	-	-	-	-	
	販売業者	受入高計	62,729	143.1	113.9	506.5	-	-	-	-
		販売高計	64,266	137.8	120.6	520.5	-	-	-	-
		消費者向	32,457	94.0	100.4	603.0	-	-	-	-
		在庫高計	52,953	97.2	103.6	399.6	-	-	-	-
	生産者工場在庫高	76,213	100.9	110.7	45.5	-	-	-	-	
総在庫高	129,166	99.3	107.7	71.4	-	-	-	-		
特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱延鋼材生産高合計	1,692,234	103.0	101.4	125.6	07.3	1,942,468	09.2	697,318	
	鋼材輸出船積実績計	605,341	93.6	91.3	180.4	11.3	811,775	87.1	153,788	
	販売業者	受入高計	1,172,927	105.5	117.7	204.8	06.5	1,516,366	87.1	435,213
		販売高計	1,166,866	101.8	119.2	205.1	08.6	1,512,463	87.5	442,211
		消費者向	424,776	96.0	77.7	126.2	08.6	926,258	98.8	267,392
		在庫高計	722,678	100.8	115.8	163.4	11.5	753,941	87.10	290,674
生産者工場在庫高	742,213	103.5	118.9	97.4	98.1	839,861	97.3	425,932		
総在庫高	1,464,891	102.2	117.3	121.6	11.4	1,489,820	97.1	873,633		

出所:経済産業省 大臣官房調査統計部

- 注 1. 総在庫高とは販売業者在庫高に生産者工場在庫高を加算したものである。生産者工場在庫高は熱延鋼材のみで、冷延鋼材及び鋼管を含まない。また、工場以外の置場にあるものは、生産者所有品であってもこれを含まない。
 2. 1987~2011年のピーク時とボトム時とは、最近の景気循環期間中の景気変動の大きさの指標を示す。
 3. 「その他」のピーク時、ボトム時は掲載せず

倶楽部だより

(平成23年8月21日～10月20日)

編集委員会

- ・小委員会 (9月15日)
1月号特集「国の技術開発プロジェクトと特殊鋼」(仮題)の編集内容の検討
- ・本委員会 (9月26日)
1月号特集「国の技術開発プロジェクトと特殊鋼」(仮題)の編集方針、内容の確認

流通委員会

- ・説明会 (9月29日)
「平成23年度第3・四半期の特殊鋼需要見通し」
講師：経済産業省製造産業局鉄鋼課
田久保課長補佐
参加者：40名

流通海外展開委員会

- ・講演会 (10月4日)
「BRICs (ブラジル、ロシア、インド、中国)におけるリスクマネジメント」
講師：東京海上日動リスクコンサルティング(株) 上席主席研究員
茂木 寿氏
参加者：50名

【大阪支部】

- 3団体責任者会議 (9月27日)
「鉄鋼会館移転詳細検討」
参加者：5名
説明会 (10月3日)
「平成23年度第3・四半期の特殊鋼需要見通し」
講師：経済産業省製造産業局鉄鋼課
高橋係長
参加者：44名

【名古屋支部】

- 説明会 (10月3日)
「平成23年度第3・四半期の特殊鋼需要見通し」
講師：経済産業省製造産業局鉄鋼課
田久保課長補佐
参加者：75名
3団体共催優良企業見学会 (10月14日)
見学先：(株)アマダ 富士宮事業所
参加者：26名
部会
・工具鋼部会 (10月20日)

社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覽

(社名は50音順)

<p>【会 員 数】</p> <p>(正 会 員)</p> <p>製造業者 27社</p> <p>販売業者 108社</p> <p>合 計 135社</p> <p>(賛 助 会 員) 0社</p>	【販売業者会員】		
【製造業者会員】			
<p>愛 知 製 鋼 (株)</p> <p>秋 山 精 鋼 (株)</p> <p>(株)川口金属工業</p> <p>(株)神戸製鋼所</p> <p>合同製鐵(株)</p> <p>山陽特殊製鋼(株)</p> <p>J F E 条 鋼 (株)</p> <p>J F E スチール(株)</p> <p>J X 日 鉦 日 石 金 属 (株)</p> <p>下村特殊精工(株)</p> <p>新日本製鐵(株)</p> <p>ステンレスパイプ工業(株)</p> <p>住友金属工業(株)</p> <p>大同特殊鋼(株)</p> <p>高砂鐵工(株)</p> <p>東北特殊鋼(株)</p> <p>日新製鋼(株)</p> <p>日本金属(株)</p> <p>日本金属工業(株)</p> <p>日本高周波鋼業(株)</p> <p>日本精線(株)</p> <p>日本冶金工業(株)</p> <p>日立金属(株)</p> <p>(株)不二越</p> <p>三菱製鋼(株)</p> <p>ヤマシンスチール(株)</p> <p>理研製鋼(株)</p>	<p>愛 鋼 (株)</p> <p>青山特殊鋼(株)</p> <p>浅井産業(株)</p> <p>東 金 属 (株)</p> <p>新井ハガネ(株)</p> <p>粟井鋼商事(株)</p> <p>石原鋼鉄(株)</p> <p>伊藤忠丸紅鉄鋼(株)</p> <p>伊藤忠丸紅特殊鋼(株)</p> <p>井上特殊鋼(株)</p> <p>植田興業(株)</p> <p>(株) U E X</p> <p>碓井鋼材(株)</p> <p>ウメトク(株)</p> <p>扇 鋼 材 (株)</p> <p>岡谷鋼機(株)</p> <p>カネヒラ鉄鋼(株)</p> <p>兼 松 (株)</p> <p>兼松トレーディング(株)</p> <p>(株)カムス</p> <p>(株)カワイスチール</p> <p>川本鋼材(株)</p> <p>北島鋼材(株)</p> <p>クマガイ特殊鋼(株)</p> <p>ケー・アンド・アイ特殊管販売(株)</p> <p>小山鋼材(株)</p> <p>佐久間特殊鋼(株)</p> <p>櫻井鋼鐵(株)</p> <p>佐藤商事(株)</p> <p>サハシ特殊鋼(株)</p> <p>(株)三悦</p> <p>三協鋼鐵(株)</p> <p>三京物産(株)</p> <p>三興鋼材(株)</p> <p>三和特殊鋼(株)</p> <p>J F E 商 事 (株)</p> <p>芝本産業(株)</p> <p>清水金属(株)</p> <p>清水鋼鐵(株)</p>	<p>神 鋼 商 事 (株)</p> <p>住金物産(株)</p> <p>住金物産特殊鋼(株)</p> <p>住商特殊鋼(株)</p> <p>住友商事(株)</p> <p>大同興業(株)</p> <p>大同マテックス(株)</p> <p>大洋商事(株)</p> <p>大和興業(株)</p> <p>大和特殊鋼(株)</p> <p>(株)竹内ハガネ商行</p> <p>孟 鋼 鉄 (株)</p> <p>田島スチール(株)</p> <p>辰巳屋興業(株)</p> <p>中部ステンレス(株)</p> <p>千曲鋼材(株)</p> <p>(株)テクノタジマ</p> <p>(株)鐵鋼社</p> <p>デルタステール(株)</p> <p>東京貿易金属(株)</p> <p>(株)東信鋼鉄</p> <p>特殊鋼機(株)</p> <p>豊田通商(株)</p> <p>中川特殊鋼(株)</p> <p>中野ハガネ(株)</p> <p>永田鋼材(株)</p> <p>名古屋特殊鋼(株)</p> <p>ナス物産(株)</p> <p>南海鋼材(株)</p> <p>日輪鋼業(株)</p> <p>日金スチール(株)</p> <p>日鐵商事(株)</p> <p>日本金型材(株)</p> <p>ノボル鋼鉄(株)</p> <p>野村鋼機(株)</p> <p>白鷺特殊鋼(株)</p> <p>橋本鋼(株)</p> <p>(株)長谷川ハガネ店</p> <p>(株)ハヤカワカンパニー</p>	<p>林田特殊鋼材(株)</p> <p>阪神特殊鋼(株)</p> <p>阪和興業(株)</p> <p>日立金属アドメット(株)</p> <p>日立金属工具鋼(株)</p> <p>(株)日立ハイテクノロジーズ</p> <p>(株)平井</p> <p>(株)福岡ハガネ商店</p> <p>藤田商事(株)</p> <p>古池鋼業(株)</p> <p>(株)プルータス</p> <p>(株)堀田ハガネ</p> <p>(株)マクシスコーポレーション</p> <p>松井鋼材(株)</p> <p>三沢興産(株)</p> <p>三井物産(株)</p> <p>三井物産スチール(株)</p> <p>三菱商事ユニメタルズ(株)</p> <p>(株)メタルワン</p> <p>(株)メタルワンチューブラー</p> <p>(株)メタルワン特殊鋼</p> <p>森寅鋼業(株)</p> <p>(株)山一ハガネ</p> <p>山進産業(株)</p> <p>ヤマト特殊鋼(株)</p> <p>山野鋼材(株)</p> <p>陽鋼物産(株)</p> <p>菱光特殊鋼(株)</p> <p>リントツ(株)</p> <p>渡辺ハガネ(株)</p>

平成23年度調査票提出促進運動について

経済産業省大臣官房調査統計グループ

経済産業省大臣官房調査統計グループが実施する各種統計調査につきましては、平素より御協力頂き、厚く御礼申し上げます。

皆様より提出された調査票は、当グループにおいて集計・加工・分析をした上で公表され、国・地方公共団体の行政施策の基礎資料、商工鉱業における企業経営資料として、さらには諸研究のための貴重なデータとして広く利用されております。また、社会経済の急激な変化や国民生活の多様化などに伴い、経済活動の現状を正しく見極める指標として、統計の果たす役割は一層重要性を増しております。

このため経済産業省では、皆様の統計調査へのご協力をいただくことを目的に、常日頃より調査内容の見直し等を行うなどして御報告いただく方々の負担軽減を図りながら、公共財として必要となるデータを公的統計として信頼性高く、早期に公表することに努めているところです。

こうした統計調査実施事業の成果をより高めるため、記入者の皆様に更なる御理解と御協力を賜ることを目的として、例年より「統計の日」(10月18日)を中心として「調査票提出促進運動」を実施しております。

公的統計の結果データが信頼性高く、早期に公表されるためには、何より皆様から正確な調査票を所定の期日までに御報告いただける事が重要かつ不可欠です。

ご多用な中、大変に恐縮ではありますが、引き続き皆様の御理解を賜り、当省が実施する統計調査の調査票による調査内容の報告につきまして御協力いただけますようお願い申し上げます。

本運動の詳細につきましては、当省のHPにて趣旨等をご紹介しますので、併せて御参照ください。

URL：<http://www.meti.go.jp/statistics/toppage/topics/sokushin/index.html>

【経済センサスー活動調査について】

経済産業省・総務省では、各府省協力のもと、平成24年2月1日に「平成24年経済センサスー活動調査」を実施することとしています。

本調査は、我が国の全産業分野における事業所・企業の経済活動の実態を全国及び地域別に明らかにすることを目的としています。調査の結果は各種行政施策の基礎資料としての利活用のみならず、事業者の方々にも経営の参考資料として活用していただくことを目指しております。

本調査の詳細につきましては、当省及び総務省HPにて目的や調査内容などを紹介しておりますので、ご参照ください。

■経済産業省HP内 経済サンセスー活動調査のページ

<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/census/index.html>

■総務省HP内 経済サンセス総合ガイド

<http://www.stat.go.jp/data/e-census/guide/index.htm>

本調査への御理解と調査票による調査内容の報告について御協力いただけますようお願い申し上げます。

特 集／わが国の技術開発プロジェクトと特殊鋼

- I. わが国の鉄鋼技術戦略と技術開発プロジェクト
- II. 鉄鋼、特殊鋼に関連した国の技術開発プロジェクト

3月号特集予定…難問・珍問集_{2nd}

特 殊 鋼

第 60 卷 第 6 号
© 2 0 1 1 年 11 月
平成23年10月25日 印 刷
平成23年11月1日 発 行

定 価 1,200円 送 料 100円
1年 国内7,200円 (送料共)
外国7,860円 (" 、船便)

発 行 所
社団法人 特殊鋼倶楽部
Special Steel Association of Japan

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3丁目2番10号 鉄鋼会館
電 話 03(3669)2081・2082
ホームページURL <http://www.tokushuko.or.jp>
振替口座 00110-1-22086

編集発行人 秋 山 芳 夫
印刷人 猪 俣 公 雄
印刷所 日本印刷株式会社

本誌に掲載されたすべての内容は、社団法人 特殊鋼倶楽部の許可なく転載・複写することはできません。

「特殊鋼」誌第60巻索引

2011年1～11月

■ 経済関係 ■

新年あいさつ「平成23年新年挨拶」…安川 彰吉 1・1

【年頭所感】

「年頭に寄せて」……………鈴木 正徳 1・3
「新春によせて」……………桐山 哲夫 1・5
「年頭所感」—イチロー選手の大記録について考える—
……………竹内 誠二 1・6
「年頭に際し」……………四戸 良治 1・7
「年頭所感」……………宮下 幸正 1・8
「年頭所感」……………守安 進 1・9
「年頭所感」……………佐伯 康光 1・10
「年頭所感」……………加藤 芳充 1・11
「次の10年を築く」……………深谷 研悟 1・12
「年頭所感」……………平岡 惟史 1・13
「年頭所感」……………田中 敬一 1・14
「10年先を、見据えて」……………平木 明敏 1・15

【一人一題】

「コントラバスの迷手、マーマー・ヨ！」
……………杉谷 和男 3・1
「[ガラパゴス化]考」……………富永 真市 5・1
「ガンバロウ日本」……………野口 祐二 7・1
「流通に求められる新しい役割」……………井上 寿一 9・1
「プロジェクトから学ぶ」……………今西 清裕 11・1

【需要部門の動向】

自動車工業……………志賀 俊之 1・16
産業機械……………庄野 勝彦 1・17

■ 技術関係 ■

《特集記事》

☆ 特殊鋼：その変遷と今後の夢

I. 日本の特殊鋼（業界）の変遷と現状の課題
……………田久保憲彦 1・20
II. 特殊鋼生産量の推移について…………… 1・23
III. 各種特殊鋼材料の変遷
1. 工具鋼
(1) 冷間金型用鋼……………殿村 剛志 1・27
(2) 熱間金型用鋼……………長澤 政幸 1・29
(3) プラスチック金型用鋼……………森川 秀人 1・31
2. 構造用鋼
(1) 歯車用鋼……………安達 裕司 1・34
(2) ボルト用鋼……………並村 裕一 1・36
(3) 非調質鋼……………水野 浩行 1・38
3. ばね鋼……………大石 裕之 1・40
4. 軸受鋼……………常陰 典正 1・42

5. ステンレス鋼

(1) 耐食性を改善したステンレス鋼
……………原田和加大 1・44
(2) 強度を改善したステンレス鋼
……………大森 勉 1・46
(3) 非磁性を利用したステンレス鋼
……………飛弾 高宏 1・48
6. 快削鋼……………渡里 宏二 1・50
7. ピアノ線材
(1) 高強度線材（橋梁用鋼線、タイヤコード）
……………山崎 真吾 1・52
(2) 高強度線材（弁ばね）……………須田 澄恵 1・54
8. 耐熱鋼・耐熱合金……………植田 茂紀 1・56
9. 電子材料……………川内 祐治 1・58

☆ 特殊鋼の海外展開

I. 総論

グローバル化に対する特殊鋼業界の課題
～ポスト京都以後の地球温暖化環境対策の方向
～わが国の25%削減の幻想～
……………足立 芳寛 3・2

II. 各素材メーカーの海外展開状況

神戸製鋼所の海外展開状況……………赤石 悟朗 3・6
新日本製鐵、特殊鋼棒線の海外展開について
……………土田喜一郎 3・9
住友金属小倉のグローバル戦略
～タイにおける二次加工事業について～
……………長谷川泰一郎 3・12
愛知製鋼の海外展開状況……………都築 光治 3・15
山陽特殊製鋼の中国での事業展開（NSSPの事業概要）
……………須多 毅 3・18

大同特殊鋼グループの海外拠点展開と

グローバル商品について……………岩田 龍司 3・20
日本金属工業の海外展開状況……………綿谷 知久 3・23
日本高周波鋼業の海外展開状況……………油谷 直彦 3・25
日本冶金工業の海外展開……………佐藤 昌男 3・27
日立金属における海外展開状況……………園山 正樹 3・29

III. 流通業者（商社）の海外展開状況

メタルワン特殊鋼の海外展開状況
……………田原 尚登 3・32

IV. ユーザーのグローバル調達と特殊鋼への要望

1. 自動車用特殊鋼のグローバル調達について
……………村上 陽一 3・35
2. 産機……………植浦 豊和 3・39
3. 軸受……………前田喜久男 3・42
4. プラント業界における資機材調達動向
……………土屋 弘道 3・46

V. 数字から見る特殊鋼（参考データ）

……………本田 正寿 3・49

☆ 特殊鋼を支える非破壊検査

I. 総論—特殊鋼の非破壊検査技術
杉 浩司 5・2

II. 非破壊検査機器の現状

1. 超音波探傷機器.....和高 修三 5・7

2. 磁粉探傷機器.....安積 均 5・10

3. 漏洩磁束探傷器.....佐藤 克也 5・13

4. デジタル画像撮影装置.....佐藤 貴久 5・16

5. 最新の検査機器
 (1) アコースティック・エミッション
長 秀雄 5・19

(2) 赤外線サーモグラフィ ..阪上 隆英 5・22

III. 各製品の非破壊検査の現状

1. 鋼片.....本田 正寿 5・25

2. 棒鋼.....澤 清和 5・27

3. 厚板
 (1) 厚板飯塚 幸理 5・29

(2) 厚板 (ステンレス鋼).....吉田 裕志 5・31

4. 薄板—その1.....永田 泰昭 5・34

薄板—その2.....高特 宗和 5・36

5. 鋼管.....佐藤 康平 5・38

6. 線材.....今村 徹 5・40

☆ やさしく知る損傷のメカニズム

I. 総論
 最近の損傷事例.....藤木 榮 7・2

II. 損傷のメカニズム

1. 工具鋼.....加田 善裕 7・7

2. 構造用鋼.....本田 正寿 7・11

3. ばね鋼.....稲田 淳 7・15

4. 軸受鋼.....常陰 典正 7・18

5. ステンレス鋼・耐熱鋼.....小林 裕 7・21

6. 快削鋼.....杉本 淳 7・25

7. 高炭素鋼線.....小此木 真 7・28

III. 支援技術

1. 損傷の分析・調査方法
 (1) 疲労破壊、クリーブ破壊、衝撃破壊、摩耗
山本 広一 7・31

(2) 全面腐食、局部腐食、応力腐食割れ
東 茂樹 7・34

2. 損傷防止、改善に寄与する技術ソフト
 (1) ESSO試験における動的き裂伝播停止特性(Kca)
 のFEM解析による評価
清水 洋志 7・38

(2) 冷間鍛造時の自由表面割れ発生予測技術
渡部 了 7・40

IV. 会員メーカーの損傷対策品、製法の紹介
 7・43~45
 大同特殊鋼(株)、日本冶金工業(株)、日立金属(株)

☆ 最近の特殊鋼原料

I. 総論.....林 薫 9・2

II. 特殊鋼原料の現状と問題点

1. 鉄源

(1) 石炭楠部 亨 9・6

(2) 鉄鉱石佐藤 功 9・9

(3) 鉄スクラップ—2015年を見通した
 原材料安定確保の視点から—
山下勇一郎 9・12

2. レアメタル

(1) ニッケル末田 洋 9・17

(2) クロム柴田 敏文 9・21

(3) タングステン恒吉 一宣 9・26

(4) コバルト堀田 毅幸 9・29

(5) モリブデン永井 崇 9・32

(6) マンガン梶山 弘明 9・35

(7) バナジウム島山 努 9・38

(8) ニオブ金田 野人 9・40

III. 特殊鋼のリサイクル

1. 特殊鋼材料.....鈴木浩一郎 9・43

2. 合金材料.....新苗 正和 9・47

IV. 会員メーカーの省資源・リサイクルの
 関連技術と商品..... 9・51~55
 (株)神戸製鋼所、山陽特殊製鋼(株)、(株)住友金属小倉、
 大同特殊鋼(株)、日本金属工業(株)

☆ 耐熱金属材料：発電機から航空機・自動車まで

I. 耐熱金属材料の概要.....田中 良平 11・2

II. 耐熱金属材料の用途

1. A-USC 先進超々臨界圧火力発電技術
福田 雅文 11・8

2. 自動車 (エンジンバルブ) ..廣瀬 正仁 11・14

3. 航空エンジン材料
中野渡 功、竹川 光弘 11・17

4. 廃棄物処理と耐熱材料
 —発電拠点としての役割と課題—
吉葉 正行 11・22

III. 耐熱金属材料の開発動向

1. 超耐熱合金.....大野 丈博 11・26

2. 耐熱鋼 (棒鋼)高林 宏之 11・31

3. 耐熱鋼 (パイプ)岡田 浩一 11・35

IV. 耐熱表面処理.....児島 慶享 11・39

V. 会員メーカーの耐熱金属材料・技術
日立金属(株) 11・42

【倶楽部だより】.....毎号掲載

【倶楽部ニュース】..... 1・61

【特殊鋼統計資料】

▲特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移.....毎号掲載

▲特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別販売 (商社+問屋)
 の推移.....毎号掲載

▲特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別在庫の推移.....毎号掲載

▲特殊鋼熱間圧延鋼材の輸出入推移.....毎号掲載

▲関連産業指標推移.....毎号掲載

▲特殊鋼流通統計総括表.....毎号掲載

【会員会社一覧】.....毎号掲載