

開発ステンレス鋼の適用事例の紹介

神吉 保宗*1, 春名 靖志*2

1. はじめに

ステンレス鋼は優れた耐食性をベースに、耐熱性や高強度、高硬度、高加工性等多岐に亘る高機能材料として、幅広く利用されている。特に最近では、地球環境保全やエネルギー問題、IT対応などから、新しい需要の創出と新規鋼種の開発も求められている。

本稿では、当社が開発したステンレス鋼の環境、情報通信、エネルギー、輸送等の各分野における適用事例と推奨される用途などを鋼種の特徴や特性と併せて紹介する。

2. 環境分野

2・1 非鉛快削鋼

快削ステンレス鋼の中でも低融点金属であるPb添加鋼は、優れた切削性や耐食性より幅広く利用され、JIS規格にも規定されている。しかし、近年の環境保護意識の高まりにより、PbやSn等の環境負荷物質の削減意識が広がってきている。

有害物質使用削減について定めたEU指令¹⁾では、鋼材中のPbは0.35%以下の添加は例外とされている。しかし、自動車メーカーや家電メーカーを中心にPb全廃への動きもあり、今後、鋼材も非Pb化の要求が益々強くなっていくと思われる。

この非Pb化の要求に対応し、当社が開発したマルテンサイト系ステンレス鋼のQS12Eと電磁ステンレス鋼のQMR1Eを紹介する。

2・1・1 QS12E

ステンレス鋼が使用されている産業機械用部品は、火力発電等の電力設備用や化学プラント用を初め、半導体設備用や洗濯機等の家電用など多くの分野で使用されている。耐錆性と強度を必要とする環境で使用される洗濯機用シャフトの場合、優れた切削性も求められるため、従来からPb系快削ステンレス鋼(Y2L)が使用されている。家電の非Pb化の動きに対して開発された非Pb系快削マルテンサイト系ステンレス鋼のQS12Eを紹介する。

表1にQS12Eの化学成分を示す。QS12EはPbの代替

としてSを添加しているが、更にMnを下げて耐錆性の低下を抑えている。図1に12Cr鋼におけるMn/S比と硫化物組成の関係を示す。Mn/S比の低下と共に硫化物中のCr濃度が上昇し、Mn濃度が減少する。また、Mn/Sが4以下となれば硫化物中のCr濃度は約20%を超え、硫化物組成が変化する。この適正なMn/S比の調整により、QS12Eは耐錆性(図2)、切削性(図3)がY2Lと同水準の特性を示している。

QS12Eは非PbであるがPb系快削ステンレス鋼の特徴を維持し、グリーン調達化や有害物質全廃を求めるユーザーに対し十分貢献できる材料である。

表1 化学成分 mass %

	C	Cr	Mn	S	Pb
QS12E	0.14	12.0	≤0.8	0.17	-
Y2L	0.14	12.0	≤1.0	-	0.18

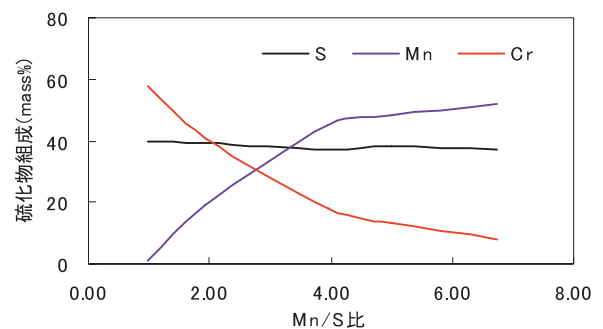


図1 QS12EにおけるMn/S比と硫化物組成の関係

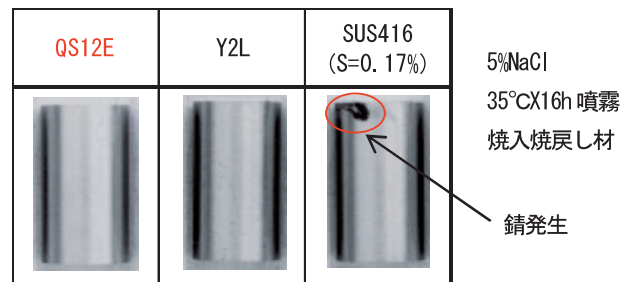


図2 耐錆性 (塩水噴霧試験)

*1 研究・開発センター高合金鋼グループ
*2 研究・開発センター高合金鋼グループ長

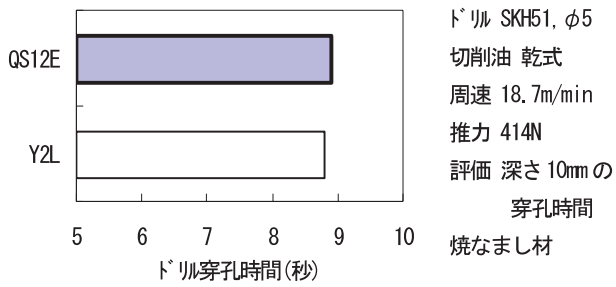


図3 ドリル穿孔性

2・1・2 QMR1E

電子制御可能な電磁弁(図4)は、油圧・空圧機器を中心に様々な設備で使用されている。電磁弁の機能として重要な鉄心の材料は、従来は電磁軟鉄が使用されてきたが、電磁軟鉄よりも固有抵抗が高く、耐錆性に優れた特性を有する電磁ステンレス鋼に替わってきた。

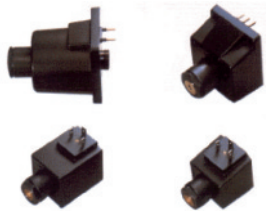


図4 電磁弁製品

電磁弁の鉄心材料は優れた切削性も求められるため、Pbが添加された電磁ステンレス鋼(QMR1L/5L)が使用されている場合が多い。前述の通り、非Pb化の要求が高まっている中、これに対応可能な非Pb系電磁ステンレス鋼のQMR1Eを紹介する。

表2にQMR1Eの化学成分を示す。QMR1EはPbの代替としてCaとSを少量添加した材料である。QMR1Eは磁気特性(表3)、耐錆性(図5)、工具寿命(図6)ともにQMR1Lと同水準以上の特性を示し、電磁弁用鉄心の非Pb鋼として十分満足できる。また、電磁弁に限らず、電子制御システムが増えつつある燃料噴射装置やアクチュエータ等の自動車用部品への適用も可能である。

表2 化学成分

	mass %						
	C	Si	Cr	Al	S	Pb	Ca
QMR1E	≤0.03	3.0	7.0	-	≤0.03	-	添加
QMR1L	≤0.03	2.0	7.0	0.7	≤0.01	0.18	-

表3 磁気特性

	磁束密度(T)		固有抵抗 ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)
	B2	B25	
QMR1E	1.0	1.4	84
QMR1L	0.9	1.4	84

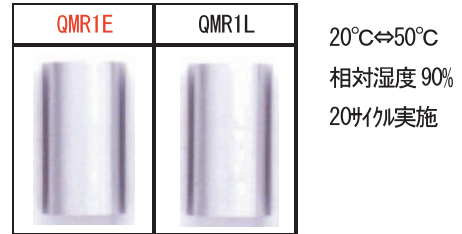


図5 耐錆性(湿潤サイクル試験)

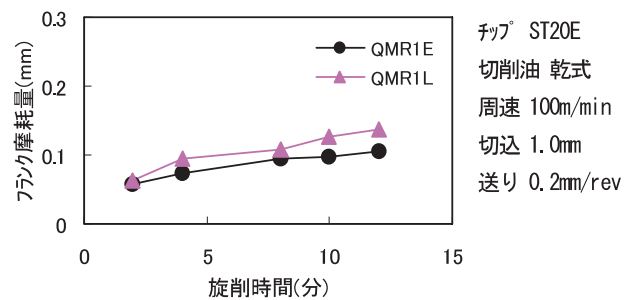


図6 工具寿命試験

2・2 ごみ焼却炉用発電ボイラー鋼管 QSX5

ごみ焼却炉の排ガスを利用した廃棄物発電は、現在、廃棄物エネルギーの有効利用として積極的に推進されている。ごみ焼却炉内の環境は、都市ごみの質変化により様々なごみを焼却するため過酷であり、高温腐食の問題から廃熱ボイラの蒸気温度は従来300℃以下が一般的であった。しかし、ダイオキシンの発生問題や発電の高効率化の要求から蒸気温度400℃に耐える材料の要求があったが、ごみ発電に特有の著しい高温腐食の問題により、鋼種開発から進める必要があった。

当社は、東京都と上記要求に耐用可能なオーステナイト系ステンレス鋼QSX5を開発し、実証試験を経て、現在、東京都の清掃工場を中心に計9件の採用実績を有している。最初に採用となった東京都二十三区清掃一部組合中央清掃工場のボイラ過熱器管では、2001年8月竣工以降、大きな損傷もなく稼働している。また、(財)発電設備技術検査協会から、QSX5はごみ焼却の排ガス環境でメタル温度475℃以下(蒸気温度約425℃)の使用を認可されている²⁾。

表4にQSX5の化学成分を示す。QSX5はSUS310SにNi, Si, Moを適正に配合した材料で、耐高温腐食性(図7)はSUS310Sより格段に優れ、超合金であるNCF625やNCF825と同水準である。

表4 化学成分

	mass %				
	C	Si	Ni	Cr	その他
Q5X5	≤0.03	3.0	23.0	25.0	Mo, Nb添加
SUS310S	≤0.08	≤1.5	20.0	25.0	-

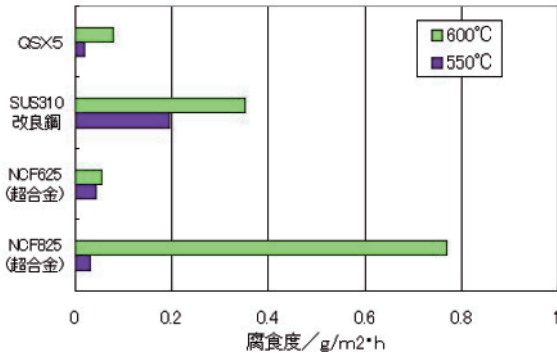


図7 耐高温腐食性

3. 情報通信分野

3.1 半導体製造装置用配管・継手・バルブ

VAR316L, S316L

半導体の高密度化、高容量化に伴い、半導体製造装置の微細化技術が発展を遂げている。微細化には各プロセスで使用されるガスの純度だけでなく、その導入経路となる配管、継手、バルブも汚染源とならないよう、高いクリーン度が求められる。これらに使用される配管・継手・バルブはクリーンルーム内で精密洗浄が行われるが、材料からの汚染原因として「材料からの溶出」と「溶接時のメタルヒューム」が考えられる。「材料からの溶出」を防ぐには材料の高清浄度が、「溶接時のメタルヒューム」を防ぐには低融点金属であるMnやCu等の低減が必要不可欠である。

当社の「高清浄度鋼」の技術で製造されたスーパークリーンオーステナイト系ステンレス鋼“VAR316L”と“S316L”は極めて高い清浄度を実現し、この要求に応えたものである。図8にS316Lで製造された継手部品の内表面SEM写真を示す。内表面は電解研磨仕上げされ、模様が殆どなく滑らかで均一である。

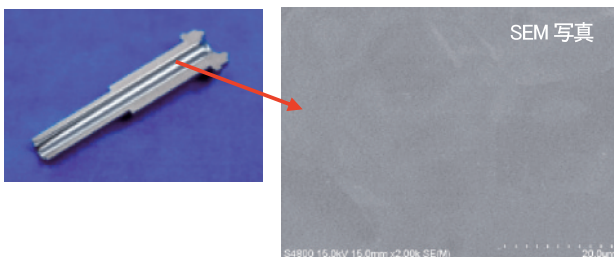


図8 継手部品 電解研磨後の内面肌写真

表5にVAR316L, S316Lの化学成分を示す。VAR316Lは清浄度を高めた高清浄度鋼を更に再真空溶解し、メタルヒュームの防止としてMnを0.3%以下へ抑えた最高ランクの超清浄度鋼である。また、S316Lは再真空溶解を行わないがMnを0.8%以下とし、高清浄度と耐メタルヒューム防止を兼備した材料である。

表6に清浄度を示す。半導体製造装置の規格として標準化されたSEMI規格³⁾において、S316LはHigh Purityレベルを、VAR316LではUltra High Purityレベルを十分に満足する超清浄度鋼である。

このスーパークリーンオーステナイト系ステンレス鋼は、バイオ関連や医療、食品プラントなどにも適用されており、今後更にニーズが広まっていくものと考えられる。

表5 化学成分

	mass %, 但しOはppm						
	C	Mn	S	Ni	Cr	Mo	O
VAR316L	≤0.03	≤0.3	≤0.01	13.0	16.0	2.0	≤20
S316L	≤0.03	≤0.8	≤0.01	12.0	16.0	2.0	≤80
SUS316L	≤0.03	≤2.0	≤0.01	12.0	16.0	2.0	-

表6 清浄度 (ASTM E45 A法)

	A系		B系		C系		D系	
	Thin	Heavy	Thin	Heavy	Thin	Heavy	Thin	Heavy
VAR316L	0	0	0	0	0	0	1.0	0
S316L	0	0	0.5	0	0	0	1.5	0.5
SUS316L	0.5	0	0.5	0	0	0	2.0	0.5
SEMI規格	Ultra-HighPurity	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0
(参考)	HighPurity	≤2.0	≤1.0	≤2.0	≤1.0	≤2.0	≤1.0	≤1.0

4. エネルギー分野

4.1 レキュペレータ(熱回収装置) SICシリーズ

レキュペレータ(熱回収装置、図9)は、発生する熱を回収・再利用して燃焼に必要な空気を予熱する装置で、燃焼効率を高めるためには必要不可欠である。加熱炉や熱処理炉で使用されるレキュペレータは、その排ガス温度が非常に高く、かつ重油等の燃料燃焼時に発生するSやV等により、過酷な高温腐食環境となるため熱交換器管の取替え頻度も高かったが、フェライト系ステンレス鋼SICシリーズの適用により、従来使用されていたSUS304やSUS310などと比べてその鋼管寿命は著しく延長し、広く使用されるようになった。

表7にSICシリーズの化学成分を示す。SICシリーズは熱伝導性の高いフェライト系ステンレス鋼にSi, Cr, Alを適正に配合し、SIC9, 10, 12となるに連れて耐高温酸化性が優れる。

図10に加熱炉環境下における高温腐食後の外観を示

す。SUS304，SUS310共に高温酸化が著しいが、SIC10，12では殆ど酸化していない。この結果は、図11の実験データとよく一致する。

レキュペレータの熱交換器管として使用されるSIC鋼管は、国内のみならずアジアや北米でも適用が増えている。

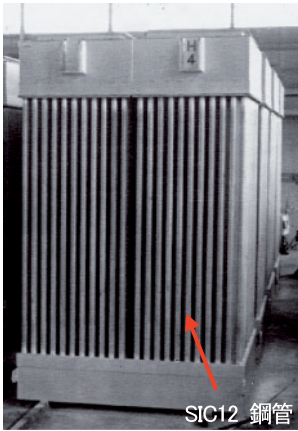


図9 レキュペレータ外観

表7 化学成分
mass %

	C	Si	Cr	Al
SIC 9	≤0.12	1.1	13.0	0.9
SIC 10	≤0.12	0.8	17.0	0.9
SIC 12	≤0.12	1.3	23.0	1.4



図10 加熱炉環境下(暴露)における高温腐食後の外観

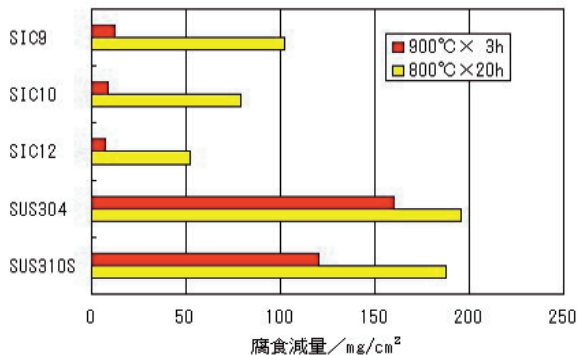


図11 SICシリーズの耐高温腐食性

4・2 高圧送電線用のコア線 INVAR-H3, Z3

発電所から都市部や工業地帯を結ぶ超高压の架空送電線は、都市部の使用電力の急増または、工業地帯の設備増強

などにより大容量化が求められている。この要求に対応して、設備の大型化または、既存設備に大容量を流せる設備変更が要求されている。

既存の架空送電線は、張力を支えるコア線の周囲に、電流を通電するためのアルミ線をより合わせた構造としている。ここに、大電流を流すと、コア線及びアルミ線でのジュール熱発生によって熱膨張し、電線全体が伸びて架空送電線の弛みが増えるという課題がある。

この方策として、コア線(鋼線)として高強度の鋼線を開発し、コア線のみ張力をもたせる構造や、コア線の線膨張係数の低いインバー合金線を使用した電線が採用されている。ここで、インバー合金線を既存の架空送電線のコア線である鋼線の強度と、同等にすることが課題であったが、この高強度化という要求に対して開発された新インバー合金線INVAR-H3, Z3について紹介する。インバー合金は、高強度の鋼線を使用した特殊構造に電線対比では停電工事期間の短縮という利点があるが、Niを含有するため鋼線より高価格であることから電力会社の計画により、選別使用されている。

図12に送電線の外観、図13にINVAR-H3, Z3の熱膨張を示す。鋼線と比較して熱膨張は半分以下と低く、特に250℃以下での適用に優れている。一般に、低熱膨張率を要求される場合はインバー合金が使用されるが、INVAR-H3, Z3は高強度も兼ね備え、光学部品や極低温設備への適用も可能である。

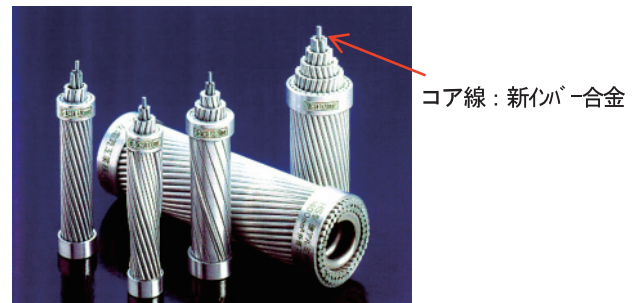


図12 送電線の外観

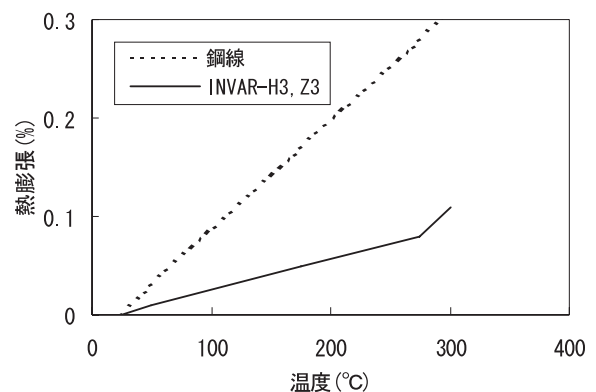


図13 熱膨張特性

5. 輸送分野

5・1 超電導リニアモーターカー用ボルト QSM5

スピードと環境保全が期待される超電導リニアモーターカーの超電導コイル締結用ボルトとしてQSM5が使用されている(図14)。



図14 締結用ボルト製品

超電導リニアモーターカーのレールは、ガイドウェイ底の浮上コイルと側面の推進コイルで構成され、何れも超電導磁石の力を利用するため、磁場に影響を与えない非磁性の材料が求められる。また、屋外設置のため耐錆性を、パネル締結力やリラクゼーション防止として高強度が求められる。これら課題を満足したオーステナイト系非磁性ステンレス鋼QSM5について紹介する。

表8にQSM5の化学成分を示す。QSM5はSUS304の省Ni鋼に位置付けられ、強度と冷間成形性確保よりMn, Cu, Nを適正に配合した材料である。図15に冷間加工後の硬さを示す。冷間加工率40%で約400HV、更に時効処理によって約420HVの高硬度が得られる。また、この時の透磁率も 1.01μ 以下の非磁性を確保できる。

QSM5は冷間加工後の高強度と非磁性を兼備しており、Ni価格が高騰している中、低Niオーステナイト系ステンレス鋼としても適用が増えてくると思われる。

表8 化学成分

	mass %				
	C	Mn	Ni	Cr	その他
QSM5	≤ 0.08	5.5	6.5	18.0	Cu, N添加
SUS304	≤ 0.08	≤ 2.00	8.0	18.0	—

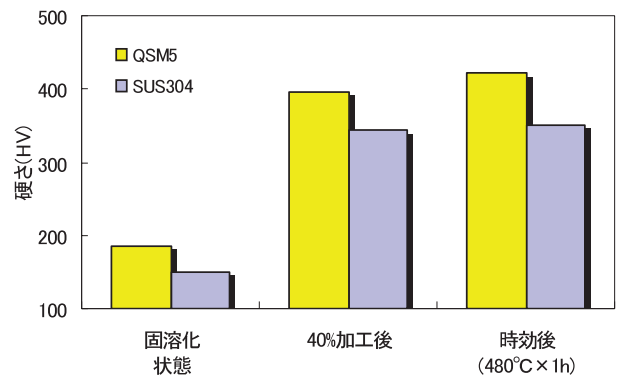


図15 冷間加工量と硬さ

5・2 高硬度ステンレス軸受用鋼 QD51, QPD5

ステンレス軸受は、クリーンルーム用や耐食性を中心に使用され、高硬度と耐食性を要求されることからJIS規格で規定されたSUS440Cが多く使用されてきた。しかし、SUS440Cは粗大な一次炭化物が多く(図16)、切削加工性や疲労特性、耐食性に難点があった。

適正なCとCrの配合により一次炭化物を減少し、更に焼なまし硬さを低下させたマルテンサイトステンレス鋼QD51, QPD5について紹介する。

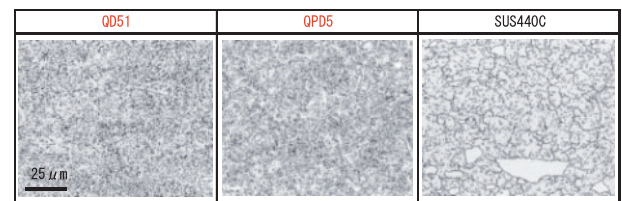


図16 ミクロ組織

表9にQD51, QPD5の化学成分を示す。QD51, QPD5となるに連れてCとCrを適正に減少させ、QPD5は耐食性維持のためMoを添加している。その結果、図16に示す通り、QD51とQPD5では一次炭化物が大幅に減少している。この粗大な一次炭化物の減少により、切削加工性(図17)や転動疲労寿命(図18)も大幅に改善した。

QD51とQPD5はSUS440Cが抱える難切削加工性や低転動疲労寿命性を解消し、更に高周波焼入れ化による生産性向上等への可能性も期待できる材料である。

表9 化学成分

	mass %		
	C	Cr	その他
QD51	0.7	13.0	—
QPD5	0.5	10.0	Mo添加
SUS440C	1.0	17.0	Mo添加

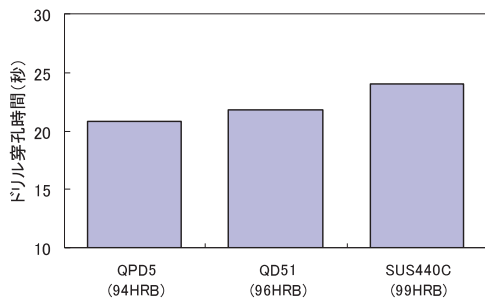


図 17 ドリル穿孔性

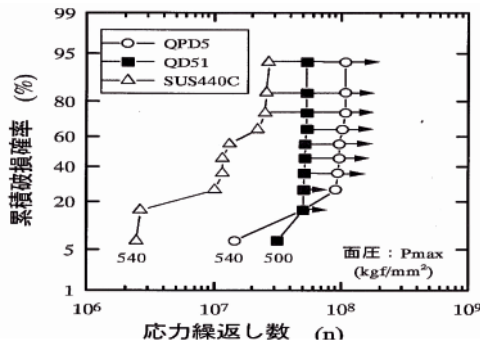


図 18 転動疲労寿命

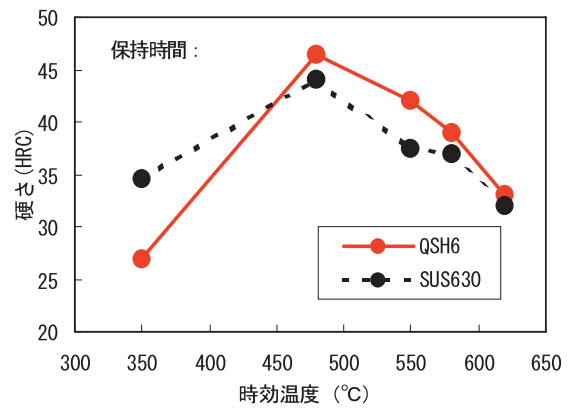


図 19 時効処理材の硬さ

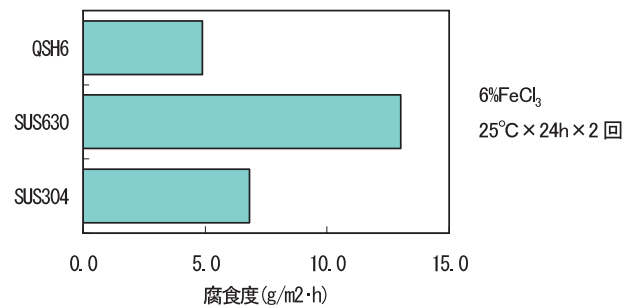


図 20 耐孔食性

5・3 船舶用プロペラ軸 QSH6

船舶用プロペラ軸は、海水内で高速回転されて使用されるため、耐海水性と高強度、高靱性が必要である。一般に、当該部品にはJISに規定されたSUS630が使用されているが、固溶化熱処理状態での硬さが約35HRCと高く、難削材として位置付けられている。

この切削性を改善するため、固溶化熱処理状態での硬さを低減に着眼し、切削性と耐食性に優れた析出硬化型ステンレス鋼QSH6について紹介する。

表 10にQSH6の化学成分を示す。QSH6はCを低減し、NiとMoを適正に配合した材料である。

図 19に析出硬化処理前後の硬さを示す。固溶化熱処理状態では、QSH6はSUS630と比べて5HRC低く、析出硬化後の硬さもSUS630と同等以上の硬さが得られる。

図 20に耐孔食性を示す。QSH6はSUS630と同等以上で、かつオーステナイトステンレス鋼の代表であるSUS304と同水準の耐食性を有している。

この高耐食性、切削加工性の特徴より、耐食用プラ型や紡糸ノズル、沿岸又は海水領域でのボルトやシャフト材として、幅広い使用が期待できる。

表 10 化学成分 mass %

	C	Ni	Cr	Cu	その他
QSH6	≤0.03	5.5	15.5	3.0	Mo添加
SUS630	≤0.08	4.0	15.5	3.0	—

6. おわりに

これまで紹介したように、様々な要求特性に対し、種々の方法を組み合わせることで対応することが可能である。最後に、本報告で紹介出来なかった他事例も併せて、当社が開発したステンレス鋼の適用事例を表 11に纏めた。

近年では、極低温用途や耐水素ガス特性などの用途への耐用性も求められ、ますますステンレス鋼のニーズは高まると思われる。これらのニーズに対し、今後も積極的に対応し、「高信頼性鋼」の山陽として役割を果たしていきたい。

参考文献

- 1) Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003.
- 2) 電気施設技術基準機能性化適合調査(発電設備材料・構造)報告書
- 3) SEMI F20-0704 "Specification for 316L Stainless Steel Bar, Forgings, Extruded Shapes, Plate, and Tubing for Components used in General Purpose, High Purity and Ultra-High Purity Semiconductor Manufacturing Applications".

表 1 1 開発ステンレス鋼の適用事例一覧

大分類	用途分類		鋼種名	組織	概略成分	特長	
	中分類	部品名事例					
環境分野 エネルギー分野	産業機械用シャフト	洗濯機シャフト, 圧縮機シャフト 他	QS12E Y2L	M M	12Cr-S 12Cr-Pb	Y2L代替の非Pb快削鋼(硫化物制御) 被削性と熱処理による強度を兼備	
		電磁弁	QMR1E	F	7Cr-Si-S-Ca-低C, N	QMR1L代替の非Pb快削鋼	
	ごみ焼却炉	発電用ボイラー管	QMR1L	F	7Cr-Al-Si-Pb-低C, N	強い吸引力と良好な被削性	
		白煙防止装置	QSx5	A	25Cr-22Ni-Si, Mo, Nb	ごみ焼却ガス環境で優れた高温耐食性	
	加熱炉, 熱処理炉 スターリングエンジン	加熱炉, 熱処理炉	QS2025MT	A	20Cr-25Ni-3.5Mo-Ti	塩化物を含む腐食環境での優れた耐食性	
		熱交換器用管	SI9, 10, 12 QHR800G	F A	13~25Cr-Si-Al 21Cr-33Ni-その他	燃焼ガス中での優れた耐高温腐食性 ガス燃焼温度での優れた耐酸化性	
	情報通信分野	半導体製造装置	配管, 継手, バルブ	S316L VAR316L	A A	16Cr-12Ni-2Mo-低C, N, O 16Cr-13Ni-2Mo-極低C, N, O	高 cleanliness, 鏡面仕上性と電解研磨性良好 超 high cleanliness, 鏡面仕上性と電解研磨仕上性良好
			腕時計 OA機器装置	QS316F QSF416LX SUS303HS3 SUS430FHS2	A M A F	16Cr-12Ni-2Mo, S, Ca 12Cr-S, Se, Pb 18Cr-9Ni-S 17Cr-S	被削性と耐食性を兼備 12Cr系で最も優れた被削性 オーステナイト系で最も優れた被削性 フェライト系で最も優れた被削性
	輸送分野	鉄道	超電導リニアモーターカー/締結ボルト	QSN5 SUS304C1	A A	18Cr-6.5Ni-5.5Mn-Cu, N 18Cr-8Ni-Cu	冷間加工による高強度化と非磁性, 耐食性 良好な冷間加工性
			自動車	QS192 QS430M, SUS430S QPD5	F F M	18Cr-2Mo-低C, N 17Cr-低C 10Cr-0.5C-0.5Mo	高温での耐酸化性と良好な熱疲労特性 良好な冷間加工性と優れた耐酸化性を兼備 焼入焼戻しによる高硬度と優れた耐錆性
船用		噴射ノズル プロペラ軸 他 エンジンバルブ 耐食用軸受, 直動軸	QMR1L, 5L SUS430S QSF430L	F F F	7~15Cr-Al-Si-Pb-低C, N 17Cr-低C 17Cr-Pb	強い吸引力と良好な被削性 良好な冷間加工性と優れた耐酸化性を兼備 良好な被削性	
			QSH6 QHR31M QD51 QPD5	M A M M	16Cr-6Ni-3Cu-Nb, Mo 19Cr-9Ni-Ti-0.3C-W, Nb 13Cr-0.7C 10Cr-0.5C-0.5Mo	SUS304と同等の耐食性とSUS630の高強度を兼備 高硬度と優れた耐酸化性を兼備 焼入焼戻しによる高硬度と優れた耐錆性 焼入焼戻しによる高硬度と優れた耐錆性	
社会インフラ分野 その他 装置, 構造物		高圧送電線 化学装置	コア線 熱交換器用管	INVAR-H3, Z3 QS192 QS261	A F F	Fe-36Ni-その他 18Cr-2Mo-低C, N 26Cr-1Mo-低C, N	高強度と低膨張率を兼備 高温での耐酸化性と良好な熱疲労特性 応力腐食割れ感受性がなく, 耐食性に優れる
			紡糸ノズル ポンプシャフト	QS2205 QSH6 QS2205	AF M AF	22Cr-5Ni-3.5Mo-低C 16Cr-6Ni-3Cu-Nb, Mo 22Cr-5Ni-3.5Mo-低C	塩化物を含む腐食環境での優れた耐食性 SUS304と同等の耐食性とSUS630の高強度を兼備 塩化物を含む腐食環境での優れた耐食性
構造物		アンカーボルト セフト・リリグ・ネジ 他	SUS304Se QSB16N	A M	18Cr-8Ni-Se 16Cr-0.2C-Mo, N	冷間鍛造可能な快削ステンレス鋼 焼入焼戻しによる高硬度と優れた耐錆性	

* 組織 A: オーステナイト系 F: フェライト系 M: マルチフェイズ系 AF: 二相系