論 説

UDC 629.12:621.436:669.14.018.853.4

船用ディーゼル機関弁用耐熱合金の現状

小畑英一*

Present Situation of Heat Resisting Alloys for Marine Diesel Engine Valves

Eiichi Obata

Synopsis

The overview covered the case history of marine diesels in Japan since the first domestic production till now, the qualities of the fuel oil at present and in future, and the requirements for heat resisting alloys fabricated into valves and hardfaced of marine engines, mainly low-speed 2cycle types, burning the above oil.

Subsequently photos demonstrated the typical damage of valves in active engines, while the ordinary measures were introduced to prevent them from degrading.

Finally the author analyzed the state of the art and tried to predict the trend in heat resisting alloys for valves of marine diesels.

1. ま え が き

船舶用の主機関としてわが国最初のディーゼル機関は漁船用では舩新潟鉄工所が大正8年(1919)設計製作し、商船用では三菱重工業舩長崎造船所が大正15年(1926)に Sulzer 型を完成したことに始まる。その後幾多の変遷^{1),2)}をへて船用ディーゼル機関の生産は、最近十数年間世界的にみてわが国が圧倒的に多数を占めるに至っている。

現在の船用ディーゼル機関は、低速(70~200 rpm) 2サイクル機関と、中速(200~800 rpm) 4サイクル機関に大別され、さらに2サイクル機関は掃気方式により、排気弁を使用するユニフロー掃気形と、排気弁を使用しないループ掃気形に区分される。しかしながら第2次オイルショック以

降の燃料油高騰に伴い熱効率の改善による燃料消費量の低減が船用ディーゼル機関の主要な開発目的となり、最近ではこの点でまさるユニフロー形でかつ行程/口径比の大きい機関が次々と開発され、船用ディーゼル機関でも大部分の機関で排気弁が使用されるようになってきた。

本稿では以上のような状況をふまえて、低速2サイクル機関用の排気弁用耐熱合金を主体として、現在使用されている合金の各種の性質、問題点などにつき概説する。

2. 船用燃料油の動向

船舶の低速ディーゼル機関用燃料油は昭和30年ころまではA重油が主体であったが、その後はC重油(重質残渣油)が専ら使用されるようになった。Table 1に石油メジャー各社から公表された燃料油の現況と今後予測される性状³⁾を示す。1980年と1985年以降の油の性状を比較すると下記

昭和58年9月1日 受付

*日本造船機械㈱専門部長

Table 1. Qualities of present and future fuel oil predicted by petroleum major.

Oil Maker	Year	1980	1985		1985～		
		Standard fuel oil at present	EXXON	SHELL	EXXON	SHELL	B.P.
Density (g/ml/15°C)		0.9602	0.99	0.99	—	—	0.99
Viscosity (cSt @50°C)		142.26	480～500	460	600	600	600
(RW. No. 1 @100°F)		—	4 800	4 500	6 000	6 000	6 000
Carbon residue (wt %)		9.94	20	16.5	20	20	22
Asphaltenes (wt %)		4.54	10.5	—	14	—	—
Sulfur (wt %)		3.04	5.0	4.5	5.5	5	5
Vanadium (ppm)		63	500	—	550～600	—	—
Ash (wt %)		0.01	0.1	0.1	0.15～0.2	0.15	0.2
Water (vol %)		—	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Bottom settlings and water (wt %)		—	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Flash point (°C)		116	60	60	60	60	60
Pour point (°C)		－7.5	30	24	30	30	30

のような傾向がみられる。

- (1) 比重が1.0へ増加する。
- (2) 粘度の増大 (Table 1 では6 000R.W.であるがさらに7 000R.W.くらいまでを予測する人もいる)。
- (3) 残炭、アスファルテンの増加：燃焼不良、燃焼残渣の堆積の増大が予想される。
- (4) 硫黄分の増加：硫酸（低温）腐食による排気弁軸部、弁箱に及ぼす悪影響。
- (5) 灰分、V分の増加：バナジウムアタック（高温腐食の排気弁棒傘表部、フェース面、弁座シート面への悪影響）。
- (6) 引火点の低下：燃焼不良。
- (7) 流動点の上昇：予熱の必要性。

さらに最近では石油精製過程で熱分解法または接触分解法が採用され、それによって出来た残渣油には、固形炭素分が多く、シリカ、アルミナなどの高硬度の触媒粒子を混入した低質油が増加する方向にある。これは排気弁フェース面の異常摩耗の原因となると考えられる。

3. 現用の船用ディーゼル機関弁用耐熱合金

3.1 弁棒本体用合金

わが国で始めて排気弁が国産化された昭和23～30年ごろは、現在の SUH31 の鍛造技術が確立された時期であり、固溶化熱処理のままでフェース面に特殊の硬化肉盛なしで使用されたが、燃料油も良質だったこともあり、あまり問題は起きなかったようである。

しかし前述のようにC重油の使用が増加するに従って、排気弁の損耗が増大しその寿命向上が必要となり、Co基のStellite 6が硬化と耐食性向上のため、弁棒フェース面、弁座シート面に肉盛施行されるようになった。

Table 2に現在実用されている主な排気弁棒本体用の耐熱合金の化学成分を示す。

マルテンサイト系耐熱鋼は中速機関排気弁用として広く使用されているが、吸気弁として使用されることもある。わが国では大部分がSUH3であるが、欧州ではSUH1およびSUH4相当材の使用が多い。

Table 2. Chemical composition of representative heat resisting alloys for marine diesel engine valves.

(wt %)									
Material classification	Alloy designation	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	Others
Martensitic heat resisting steels	SUH 1	0.45	3.2	0.5	—	8.5	—	—	
	SUH 3	0.4	2.1	0.5	—	11	1	—	
	SUH 4	0.8	2.0	0.4	1.4	20	—	—	
Austenitic heat resisting steels	SUH31	0.4	2.0	0.5	14	15	—	2.5	
	GWV	0.35	1.5	1.0	9	19	—	1.5	Nb 0.25 B 0.005 N 0.04
	HWV	0.25	1.4	1.0	9	19	—	1.5	Nb 0.2 B 0.005 N 0.06
	SNCrW	0.3	1.0	1.0	9	20	—	2	
Ni base super alloys	Nimonic80A	0.08	0.2	0.1	Bal.	19.5	—	—	Ti 2.4 Al 1.4 Fe 1.0

マルテンサイト系耐熱鋼を本体とする弁棒は、フェース面に軽度の吹抜けなどがある場合フェース面の切削、研削などの補修機械加工後再使用されるが、通常機械加工による補修が不可能な状態になると廃却される。中速4サイクル機関の排気弁で溶接補修までして再使用される場合は、本体はオーステナイト系耐熱鋼を使用するのが普通である。

オーステナイト系耐熱鋼は大部分の低速2サイクル機関の排気弁に使用され、弁棒完成品で1本20kgから170kgくらいにおよぶものもある。わが国では現在SUH31の改良鋼であるHWV相当の材料が主力であるが、SUH31もまだかなり使用されている。

低速機関用排気弁は単重が大きいこともあり、吹抜けなどによりフェース面が損傷すると、再度硬化肉盛のために溶接開先を機械加工して損傷部を完全に除去した後、硬化肉盛をして再使用に供するのが普通で、盛金用材料との溶接性が良好なことも必須条件である。

Ni基超合金のNimonic 80Aは当初中速機関排気弁として特定の中速機関に採用され良好な寿命を示した。最近ではその実績に基づき、特殊の加工により全体の硬度を標準熱処理品より高くして、フェース面に硬化肉盛をしない排気弁が低速機関にも採用され始めている。

3.2 弁フェース盛金用材料

Table 3に現在弁棒および弁座の硬化肉盛用に使用される盛金材料の化学成分を示す。

燃料油がC重油となってからは、マルテンサイト系、オーステナイト系を問わず弁棒フェース面、弁座シート面には高硬度の肉盛加工が施工されている。盛金材料としては高温での耐熱性、耐食性にすぐれ、かつ硬度低下の少ないCo基またはNi基の合金が使用される。

Co基は比較的溶接性が良好なので古くから使用され、Stellite 6が主流であるが、燃料油の低質化に伴って、さらに高硬度のStellite 12の使用も増加している。

Ni基肉盛硬化合金は第2次オイルショック以降、燃料油の低質化が急速にすすみ、Co基合金の硬度では燃焼残渣のかみこみに対して十分な抵抗性が得られなくなってきたため使用され始めたもので、盛金後の硬さがHRCで55~62が得られるColmonoy 6, HSP 1-60などがわが国では多く使用されている。Alloy 60は同程度の硬さが得られるが主として欧州で使用されている。Ni基は溶接がCo基に比べ難しいほか、高硬度であるが機関運転中に盛金層にきれつが入る不安が残っており、Table 3以外でも多くの合金が試用されている。

Table 3. Chemical composition of typical hard facing alloys.

(wt %)									
Material classification	Alloy designation	C	Si	Ni	Co	Cr	W	B	Fe
Co base hard facing alloys	Stellite 1	2.5	1	≤ 3	Bal.	30	12.5	—	≤ 3
	Stellite 6	1.1	1	≤ 3	Bal.	28	4	—	≤ 3
	Stellite 12	1.4	1.4	≤ 3	Bal.	29	8	—	≤ 3
Ni base hard facing alloys	Alloy 60	0.5	4.5	Bal.	—	16	—	3.5	4.5
	Colmonoy 6	0.75	4.3	Bal.	—	13.5	—	3	4.8
	Colmonoy 5	0.65	3.8	Bal.	—	11.5	—	2.5	4.3
	HSP 1-60	0.75	4.3	Bal.	—	15	—	3.1	3.5
	HSP 1-50	0.45	3.9	Bal.	—	11	—	2.3	2.5

Fig.1 Age-hardening curve of Nimonic 80A⁴⁾.

3.3 排気弁用合金の各種の性質

3.3.1 熱 処 理

SUH3はJISの標準的な焼入・焼もどしを盛金施工後行って使用する。

HWV, SUH31は据込鍛造後、固溶化熱処理を行い、盛金施工後は徐冷のみで機械加工して製品とする。

Nimonic 80Aは仕様によって据込鍛造後、固溶化熱処理を行って時効硬化処理をする場合と、据込鍛造後、時効硬化処理する場合とがある。

Fig. 1にNimonic 80Aの時効硬化曲線⁴⁾を示す。

Fig.2 Temperature distribution of exhaust valve⁵⁾.

3.3.2 高温の機械的性質

機関運転中の排気弁棒の温度分布の一例⁵⁾をFig. 2に示す。図からわかるように定常運転時は傘表部が600°C付近、盛金したフェース面は500~550°Cくらいであるが、フェース面の一部に欠陥が発生すると排気ガスがその部分を集中して通過するので局部的に異常高温となることがある。従って船用排気弁の場合は、一般的性質としての常温の機械的性質と共に500~600°C付近の機械的性質が実用的には必要である。

Fig. 3に実用排気弁用耐熱合金の室温および高温の引張強さ、0.2%耐力を示す。Nimonic 80AはSUH31, HWVに比べかなり高い高温強さを有する。

Fig. 4には650~800°Cの1000hrクリープ破断

Table 4. Weight loss in molten salt for some valve alloys.

Test condition Materials	(g/m ² /hr)		
	V ₂ O ₅ -10%Na ₂ SO ₄	V ₂ O ₅ -15%Na ₂ SO ₄	V ₂ O ₅ -20%Na ₂ SO ₄
Nimonic 80A	84.5	162.5	181.5
SUH 31 ⁿ	137	842.5	864
GWV ⁿ	184.5	387	408.5
HWV	164	362	383.5
SUH 3	72.5	—	572.5

Immersion test in molten salt at 800°C for 5 hrs.

Fig.3 High temperature tensile properties.

強さを示す。HWV は700°Cの一点だけでデータ不足であるが参考にされたい。SUH31のこの図のデータは固溶化熱処理が950°Cの場合であり、さらに高温の固溶化熱処理を実施すればクリープ破断強さは若干高くなるものと思われる。

3.3.3 耐 食 性

船用機関用排気弁のフェース面、傘表面は、Table 1に示す燃料油の燃焼残渣と排気ガスに対する耐食性が必要であり、弁棒軸部に対しては、

Fig.4 Creep rupture strength at 1000hr.

弁座の冷却方式によっては水蒸気とSO₂あるいはSO₃ガスの存在による結露に起因する硫酸腐食の発生が考えられる。

Table 4に実用合金のパナジウムアタック試験結果を示す⁷⁾。GWV, HWVはSUH31に対してパナジウムアタック耐食性を大幅に改善した鋼種といえる。

Table 5に沸騰5%硫酸による腐食試験の結果を示す。

SUH3はパナジウムアタックに対してはオーステナイト系耐熱鋼に匹敵するが、耐硫酸性では著しく劣ることがわかる。

しかしこれらの腐食に対しては、実用面ではバ

Photo. 1. Blow-by at dent caused by combustion residue.

Table 5. Weight loss in sulfuric acid solution for two valve steels.

Materials	Weight loss (g/m ² /hr)
HWV	102.2
SUH 3	4.238

Immersion test in boiling 5% H₂SO₄ solution for 3 hrs.

ルブ本体の耐熱鋼だけで完全に防止することは不可能で、弁棒、弁座の高温腐食に対しては、弁棒フェース面、弁座シート面に Table 3 に示す各種の盛金材料を溶接または溶射により盛金して防止している。

また弁棒軸部、水冷弁座、弁箱などの硫酸腐食に対しては、Ni-P メッキ、低硬度(HRC 30 程度)の Ni 基合金の溶射などの防止法がとられている。

3.3.4 高温硬さ

Fig. 5 に Nimonic 80A および実用硬化肉盛合金のオーステナイト系耐熱鋼へ盛金後の高温硬さを示す。

Fig. 5 Hot-hardness of Ni and Co base hardfacing alloys.

Nimonic 80A は標準熱処理した場合のデータなので、特殊加工の場合には全般に高硬度側に移行するものと思われる。

Photo.2 Blow-by resulting from the deposition of combustion residue and peel off.

Photo.3 Hot corrosion on valve head surface.

Photo.4 H_2SO_4 corrosion occurred on the shaft of valves.

4. 排気弁に発生する損傷例

つぎに最近の船用ディーゼル機関で発生した排気弁の損傷例を Photo. 1 ～ 4 に示す。

Photo. 1 および Photo. 2 はフェース面の吹き抜けの例である。この部分は最も損傷の起こりやすい個所で、燃焼排気ガス中に含まれる硬い燃焼残渣のかみこみと燃料油中に含まれる V による高温腐食が主原因とされている。

Photo. 3 は最も高温にさらされる傘表面の腐食例で、酸化にバナジウムアタックが加わり腐食を促進するといわれている。

Photo. 4 は弁棒軸部の摺動部付近に発生した硫酸腐食の例である。

5. あとがき

以上船用ディーゼル機関の弁用耐熱合金につき、最近の実情、損傷例、それらの対策などについて述べてきたが、今後の動向として使用燃料油の一段の低質化、燃料消費量低減のためのシリンダ内最高圧力の増大など排気弁に対しては、ますます使用条件が苛酷となっていく傾向にある。一方設計面からは、回転翼の取付による弁棒フェース面温度分布の均等化、弁座冷却の強化によるフェース面の温度低下など排気弁の負担を軽減する方策もとられている。

また現在は弁棒本体合金も、Nimonic 80A という非常に高価な超合金による一体弁棒と、フェース面を硬化肉盛り、本体合金は比較的低廉な耐熱

鋼を使用する肉盛弁棒に二分されている。

Nimonic 80A 弁棒の低速機関における実際の評価ができるのは数年先になるが、今後の動向としては、弁棒本体合金については両者の中間的性能を有する、適当な価格の耐熱合金の開発とか、低廉合金との圧接による全体価格の低減などの方策が逐次実用化されていくのではなかろうか。

いづれにしても、船主、機関製造者、排気弁供給者が密接な関係を保ちながらよりよい方向に迅速に対応することが必要であろう。

（文 献）

- 1) 藤田秀雄：日本船用機関学会誌，18（1983）6，471～483
- 2) 三井造船機編：三井造船のディーゼル50年，（1976）
- 3) 岡本哲：日本船用機関学会誌，17（1982）11，881
- 4) The Nimonic Alloys, 1974, Arnold, 97
- 5) 小林清：内燃機関，17（1978）217，74
- 6) 特殊鋼倶楽部編：耐熱鋼データ集，昭40（1965），75，129
- 7) 西義徹，松本嘉猷，菊地侃生，飯田仁：鉄と鋼，56（1970）2，339