

解 説

UDC 669.14.018.85 : 621.434 : 656.13

自動車の排気浄化対策用材料の現状と今後の動向*

大 林 幹 男**・伊 藤 卓 雄***

Development and Future Trend of Alloys for
Automobile Emission Control Devices

Mikio OBAYASHI and Takuo ITO

1. はじめに

自動車の排気浄化対策の一環として、すでにサーマルリアクターや触媒コンバーターなど各種の浄化装置が広く実用化されている。これら構成材料には、長時間高温の排気にさらされたり、エンジンの頻繁な始動、停止に伴う急激な温度変化に耐えるために、すぐれた耐食性、高温強度あるいは耐熱疲労性などが要求される。従来、自動車部品の中で、耐熱合金が用いられていたものは排気弁、プラグなど二、三のエンジン部品にすぎなかつた。その上、排気対策そのものが自動車産業にとって、内外ともに全く未経験な分野であつたために、材料面でも多くの試行錯誤が繰り返されたが、今日では一応いくつかの有力材料に絞られて、量産化が進められている。

各種浄化装置の現用材料については、すでにすぐれた解説^{1)~9)}に詳しくまとめられているので、ここでは材料を選定するに当つて採られてきたこれまでの評価過程を概観し、今後の動向を探つてみたいと思う。

2. サーマルリアクター用材料

サーマルリアクターは未燃焼の HC や CO を含む排気中に、外部から二次空気を供給して、排気自身の持つ高熱を利用して再燃焼させ、無害な H₂O や CO₂ に変換する装置で、従来のマニホールドの位置に設置されている。排気が直接接触するインナーコアなどは常時 1000°C に近い高温に長時間さらされるため、浄化装置用材料の中でも最も酷しい条件が要求される。例えば、1970年に NASA が「リアクター用 Fe 基耐熱合金の研究開発」を公募した時に提示された条件は、(i) 982°C、

100 h のクリープ破断強度が 3.5 kg/mm² 以上、(ii) 982°C の引張強度が 8.4 kg/mm² 以上で、伸びも 10% 以上、(iii) 1093°C の繰返し加熱冷却に対する酸化抵抗が Fe-Cr-Al 合金よりもすぐれていること、(iv) 成形性、溶接性が焼なまし状態のステンレス鋼に匹敵すること、(v) Pb と S による腐食に十分耐えることの 5 条件であつた。内外の材料メーカーはこのような酷しい条件を満たすために、既存合金の改良と新合金の開発を積極的に進め、一方自動車メーカーは排気浄化システムの性能向上や、装置自体の設計面での改良によつて、この条件を少しでも緩和するような努力を払つてきた。その結果、現在では SUS310S およびその類似鋼によつて量産が進められている。以下において、具体的にどのような問題が検討されてきたかを、順次記述してみよう。

2.1 空気中での繰返し加熱冷却に対する耐酸化性

浄化装置の機能から、まず長期の繰返し加熱冷却による酸化に耐えることが必要であろうということで、多くの実験が行なわれた^{1)~9)}。Fig. 1 は大気中 1000°C での、また Fig. 2 は排気中の水分を想定して 10% の水蒸気を添加した空気中、982°C での繰返し酸化試験の結果を示す。FCH2, 18-SR など Fe-Cr-Al 合金が最もすぐれた耐酸化性を有し、また高 Cr-高 Ni のオーステナイト鋼も比較的良好な耐酸化性を示すことがわかる。

浄化装置は一般に薄板で製作されるために、耐酸化性を正しく評価するには、粒界酸化や内部酸化属を含む侵食深さにも着目する必要がある。幸い両者の間には、Fig. 3 に示すような相関性があり、耐スケリング性のすぐれた合金は内部侵食も小さいことが認められてい

* 昭和 52 年 5 月 13 日受付 (Received May 13, 1977) (依頼解説)

** (株)豊田中央研究所 工博 (Toyota Central Research and Development Laboratories Inc., 2 Hisakata Tempaku Nagoya 468)

*** (株)豊田中央研究所 (Toyota Central Research and Development Laboratories Inc.)

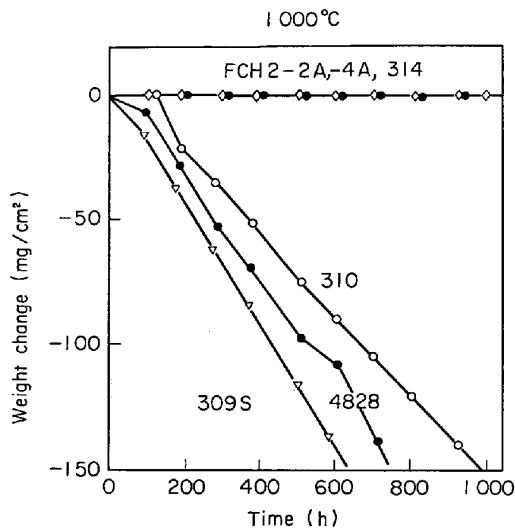


Fig. 1. Cyclic oxidation behavior of austenitic and ferritic alloys in air at 1000°C cycled every 15 min.

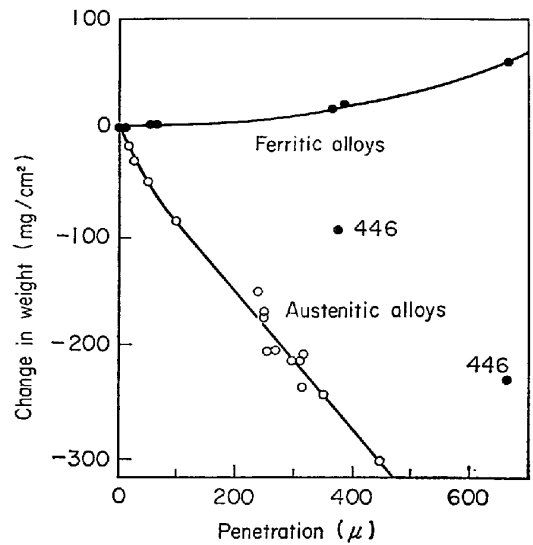


Fig. 3. Relationship between weight change and penetration depth in the cyclic oxidation of austenitic and ferritic alloys in air.

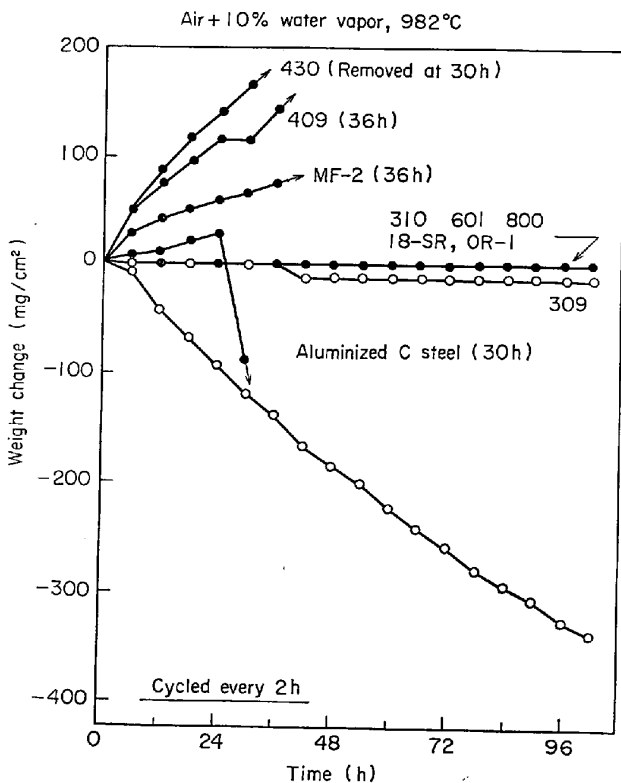


Fig. 2. Cyclic oxidation behavior of austenitic and ferritic alloys in air+10% water vapor at 982°C cycled every 2 h.

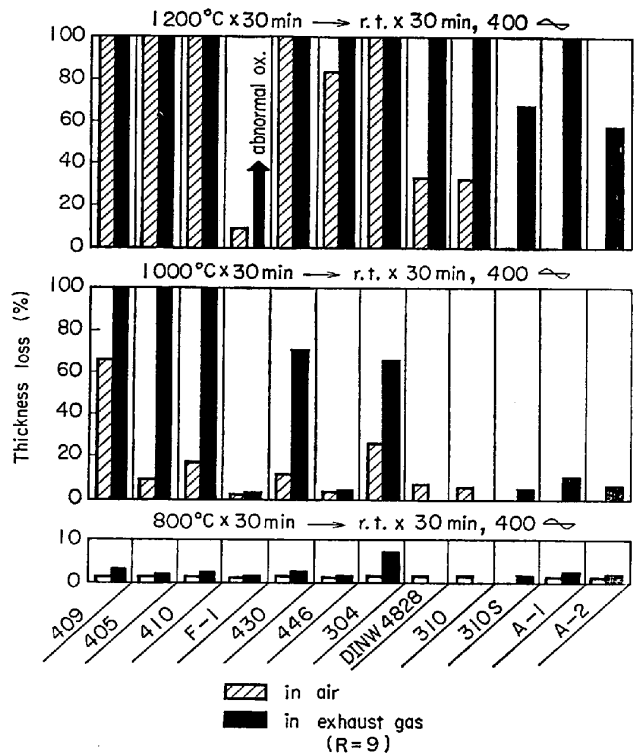


Fig. 4. Descaled thickness loss comparison of austenitic and ferritic alloys after 200 h cyclic oxidation test in air and in exhaust gas. (R=fuel/air ratio)

る)。

2.2 高温排気に対する耐食性

ある合金が浄化装置用材料として適しているかどうかを調べる場合、その合金で実際に装置を試作して実機テストを行なうのが最も望ましいが、時間と経費がかかるため、エンジンからの高温排気による腐食試験法が代用

されている^{9)~13)}。Fig. 4 は、大気中あるいは排気中でそれぞれ 400 サイクルの酸化試験を行なった結果である⁹⁾。大気中に比較して、排気中における試験片の酸化損失は著しく大きい。1000°C では 15Cr-4Al-Ti 鋼 (F-1)、16Cr-13Ni-3.5Si 鋼 (A-1)、19Cr-13Ni-3.5Si

鋼 (A-2), 310S などが良好な耐食性を示すが, 1200°C になるとこれらの合金はいずれも激しく腐食されることがわかる。

排気による腐食試験では, 使用するガソリンによつて腐食挙動がちがってくる。Fig. 5¹⁴⁾ はその一例を示すが, 321 や 310 では明らかに加鉛ガソリンの方が腐食量が大きくなっている。Inconel 601 や Hastelloy X のような Ni 合金では, もともと耐食性がすぐれていることもあつて, Pb の影響は非常に小さい。

排気中に混入して, 材料の腐食に影響を及ぼす元素としては, Pb 以外に P, S, Cl などが考えられている⁹⁾¹²⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。

2.3 Fe-Cr-Al 合金の異常酸化

上述のように, Fe-Cr-Al 合金は非常にすぐれた酸化性を有しているが, 時に局所的な激しい酸化 (異常酸化) を引き起こすことがある。この現象はかなり古くから知られていたが¹⁷⁾, 排気浄化装用材料に関して改めて数多くの研究が行なわれた。その結果, 異常酸化は窒素吸収を伴う酸化反応で, 腐食生成物として合金表面に Fe を主体とする酸化物が, また母材には塊状の AlN が形成されること, さらに合金元素の影響など, その実態が明らかにされた^{4)9)18)~24)}。そして, その発生が Fig. 6 に示すような Ti や, Y などの微量添加によつてかなり抑制されることがわかつたので¹⁹⁾²¹⁾²⁵⁾²⁹⁾, 現在ではこの問題よりも, むしろ加工性や溶解性, あるいは高温強度の不足が Fe-Cr-Al 合金の適用範囲を限定している。

2.4 サーマルリアクターとしての耐久性

排気による腐食試験において良好な耐食性を示した合金でも, 実際にリアクターを製作した場合には, 変形や割れなど思いがけないトラブルを起こすことが心配され

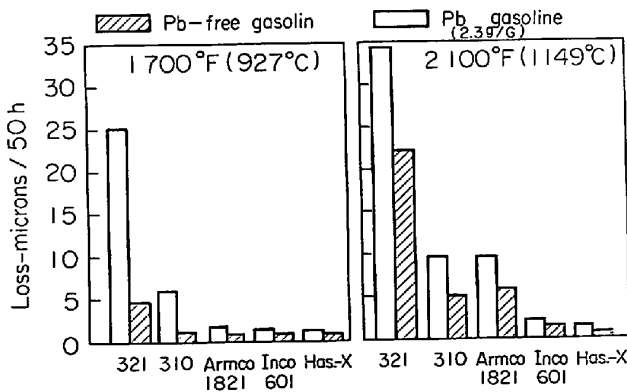


Fig. 5. Descaled thickness loss comparison of heat resistant alloys after 50 h corrosion test in exhaust gas at 927°C and 1149°C using lead-free gasoline and leaded gasoline.

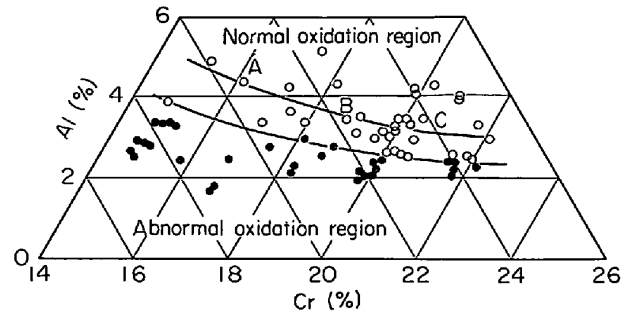


Fig. 6. Occurrence region of abnormal oxidation in Cr-Al-Ti steels heated in exhaust gas at 1200°C. (ABC: in Cr-Al steels)

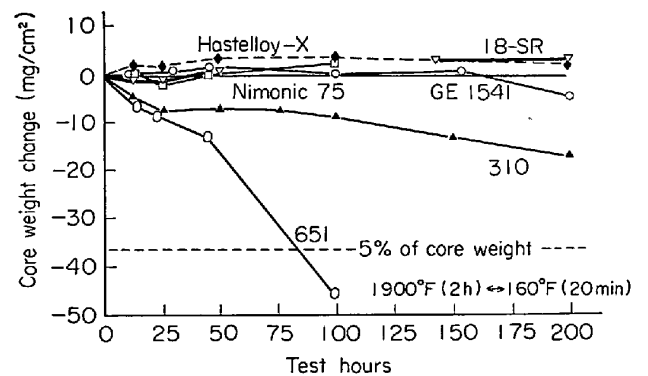


Fig. 7. Weight change of uncoated thermal reactor cores during 200 h of accelerated creep and corrosion screening tests. Cycle consisted of 2 h exposure at 1040°C followed by 20 min forced cooling to less than 70°C and 5 min return to peak measured reactor core metal temperature.

るので, 最終的には実車あるいは台上での耐久試験によつて評価される¹⁶⁾²³⁾³⁰⁾³¹⁾。Fig. 7 はその一例を示す³⁰⁾。試験条件は, 加鉛ガソリン (2g Pb/gal) を使用したエンジンで, インナーコアの温度が 1040°C になるまで急熱し, 2 h 保持した後, アイドリング状態で 70°C 以下に 20 min 強制空冷するという非常に酷い条件である。AISI 651 は短時間のうちに著しく腐食されたが, 高 Cr-高 Ni の 310 は長時間にわたつて腐食減量がゆるやかに増加しており, 一応合格線上にある。これに対して, 18-SR, GE1541 および Hastelloy X は重量変化がほとんど認められず, 良好な耐食性を示している。しかし, 18-SR はインナーコアのゆがみが, また GE-1541 では膨脹変形が生じたため, これらの寸法変化を十分吸収できるような設計上の考慮が必要であると指摘されている。Hastelloy X はクラックが多発したために, インナーコア材としては不適當であると評価された。

Photo. 1 は, SUS 310S 製リアクターの高鉛ガソリ

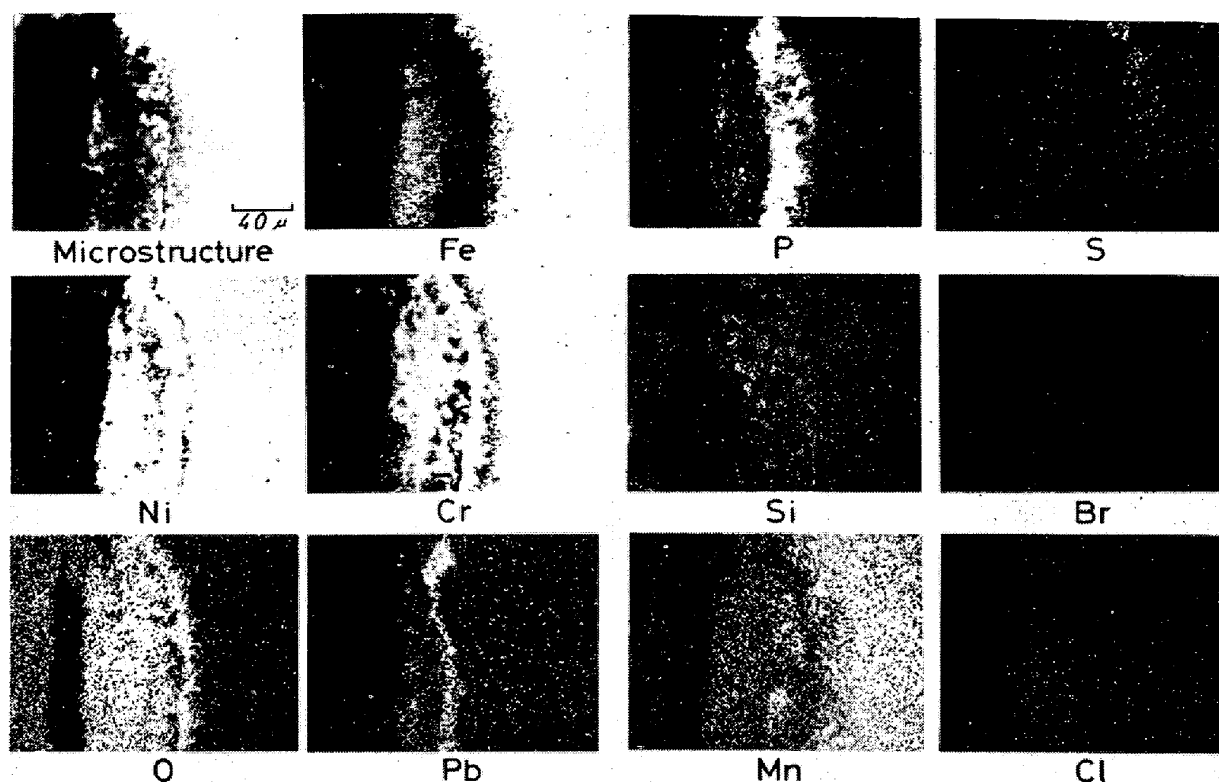


Photo. 1. Microstructure and X-ray images of section of the scale formed on the SUS 310S thermal reactor core.

ンを使用した耐久試験後の、腐食組織および EBS 像を示す³²⁾。腐食が単なる酸化ではなくて、Pb, P, S などが関与した複雑な腐食であることがわかる。

高速排気流によるエロージョンも、耐久試験によつて初めて表面化する現象で、非常に重要な問題である。すなわち、作動時間が増すにつれて、排気流が直接衝突する部分の板厚が極端に減少し、時には貫通に至る場合がある。例えば、排気腐食試験で最良の耐食性を示した Ni 基合金 (Ni-21Cr-10Mo-19Fe) で製作したリアクターでも、構造によつてはエロージョンによつて十分な耐久性がえられなかつたということが報告されている²³⁾。このようなエロージョンに対しては、高温の排気が合金表面のごく狭い領域に集中するのを避けるように、やはり設計面での配慮が必要である。

2.5 表面被覆の効果

合金の表面に Ni, Cr, Al などから成る層を被覆する方法は、耐食性の向上に有効な手段として広く研究されている²³⁾³⁰⁾³¹⁾³³⁾³⁴⁾。Fig. 8 と 9 は各種の表面被覆を施した AISI 651 製リアクターの耐久試験の結果を示す³⁰⁾。Cr-Al や Ni-Cr (NC-9) などを被覆したインナーコアは重量減少は非常に小さいが、無処理品と同様に変形を生じた。特に Aluminide 被覆したものは 2% 以上の大きな膨脹を示した。

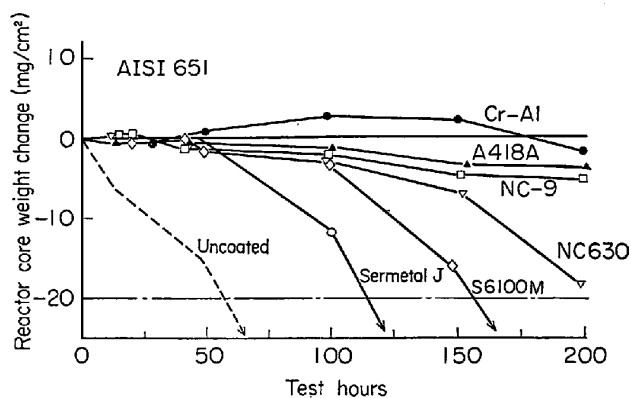


Fig. 8. Weight change of coated thermal reactor cores during 200 h of accelerated creep and corrosion screening tests. (NC-9= Ni-Cr-Si, NC-630= Ni-Cr-Si-TiSi₂-TiN, Sermetal J=Al-Si, A418 and S6100M= Ceramics).

このような変形や割れの発生は被覆層と母材との組合わせによつて大きく異なるが、例えばオーステナイトステンレス鋼に NiAl を被覆する場合、適正な母材組成は Fig. 10 の DEFGH 範囲内に限定されるといわれている。すなわち、これらの合金で製作されたリアクターは 100~200 μ の Al 拡散層を有し、最高 1066°C, 250 h のエンジンテストでも重量変化はほとんどなく、歪や割れも生じなかつた³⁴⁾。しかし、この結果を見る限り、

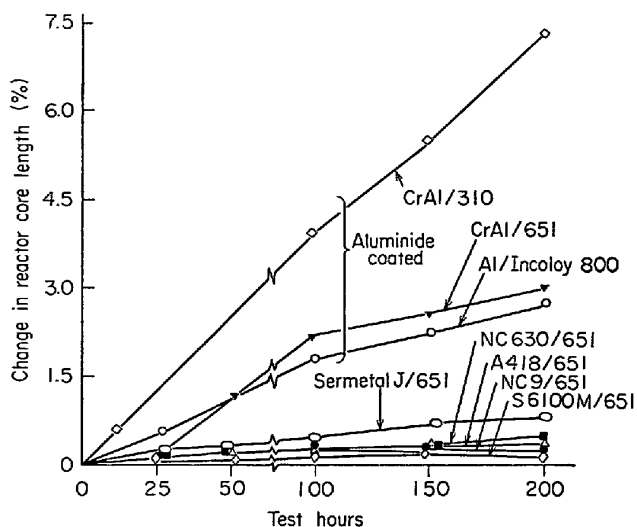
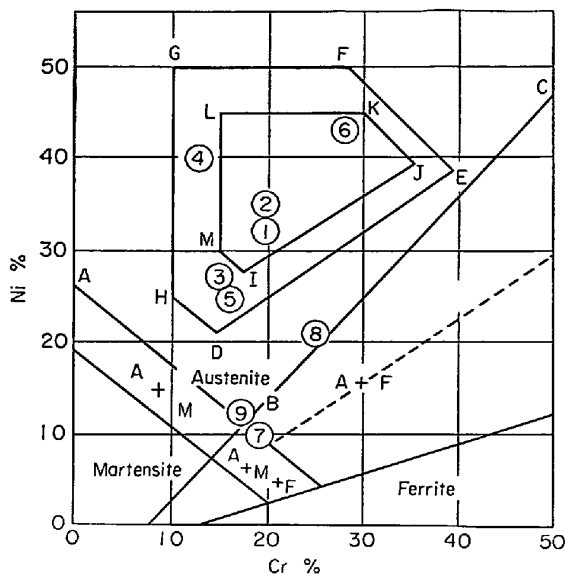


Fig. 9. Change in coated thermal reactor core length during 200 h accelerated creep and corrosion screening tests.

完全な表面被覆をするためにはより高級な母材が必要となり、表面処理が必ずしもコストを下げるための有利な方法にはなりえないことを示唆している。

2.6 在来合金の総合評価と新材料に対する期待

合金の評価は、一般に上述の耐食性や高温強度、耐熱疲労性などの性能面を主体に行なわれているが、自動車産業の量産性を考えると、合金の成形加工性や溶接性はもちろん、合金の供給能力や価格も重要な問題である。Table 1 は主要合金の組成と、その総合評価結果の一例を示す¹²⁾。Fe-Cr-Al 合金は比較的安価で、耐食性もすぐれているが、高温強度が小さく、また加工性や溶接性も劣る。高 Cr-高 Ni 系のオーステナイト鋼や Ni 基耐熱合金は、一部に耐酸化性や耐熱疲労性に欠けるものも



① Incoloy 800 ② 35-20 ③ ATV-3 ④ Incoloy 901 ⑤ 16-26-6 ⑥ Incoloy 804 ⑦ 304 ⑧ 310 ⑨ 316

Fig. 10. Chemical composition of the alloys suitable for Ni-Al coating treatment.

あるが、総体的にすぐれた高温強度と加工性を有し、性能面ではフェライト鋼をはるかに凌ぐ。このため、価格と資源的な面に問題が残されているが、現在では SUS-310S あるいはその類似鋼が主要材料として広く使用されている。

最近、リアクター用材料として、18Cr-13Ni-3Si 鋼 (JISX15J1 相当)^{9)35)~38)}、含 Y オーステナイトステンレス鋼³⁹⁾、あるいは NASA-18T⁴⁰⁾ など新しい合金が次々と提案されている。

Fig. 11³⁵⁾ は 18Cr-13Ni-3.5Si 鋼の大気中、繰返し酸化試験の結果を示す。Fig. 4 に示した排気中での腐食試

Table 1. Comparative performance evaluation of alloys tested. Composition, wt % (1)

Alloy	Cr	Ni	Al	Other	Relative cost index	Characteristics and performance
MF-1	11	0.21	0	0.5Ti	Low	Unsatisfactory
AISI Type 410	12	—	—	—	Low	Unsatisfactory
OR-1	12	—	3	0.6Ti	Low	Poor high temp. strength, Good corrosion resistance
AISI Type 304	18.5	9.5	—	—	Low	Unsatisfactory
A1821	18	—	2	1Si	Low	Poor high temp. strength, Good corrosion resistance
AISI Type 309	23	13.5	—	—	Intermediate	Unsatisfactory
AISI Type 310	25	20	—	—	Intermediate	Candidate
RA 330	19	35	—	—(2)	Intermediate	Candidate
Inconel 601	23	60.5	1.35	—(3)	Intermediate	Candidate
Inconel 600	15.8	75	—	—	Intermediate	Unsatisfactory
JS 700	21	25	—	—(4)	Intermediate	Candidate
Hastalloy X	22	49	—	—(5)	High	High cost

Notes : (1) Balance essentially iron unless otherwise indicated (4) 4.5Mo, 0.5Si, 1.7Mn, 0.3 Niobium
 (2) 1.25Si, 1.50Mn (5) 9Mo, 1.5 max Co, 0.6W
 (3) 0.5Mn

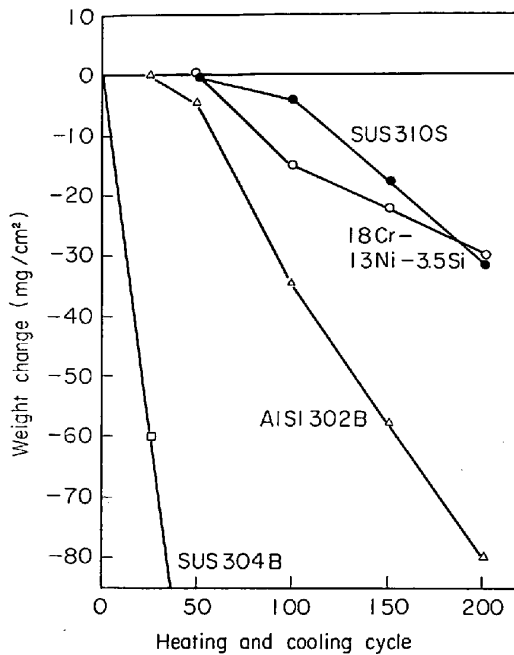


Fig. 11. Cyclic oxidation behavior of austenitic alloys in air at 1100°C cycled every 30 min.

験結果A-1, A-2)も考慮すると、この系の鋼は SUS-310S 相当の耐食性が期待できる。その上、高温強度、加工性、溶接性も比較的良好なため、310S に代る候補材料の一つとして有望視されている。

NASA では、18-SR および GE1541 の 2 種類の Fe-Cr-Al 合金をベースにして、耐酸化性を大きく害することなく、高温強度あるいは加工性の向上を目的とした研究が行われ、NASA 18T が開発された。この合金は、18Cr-2Al-1Si-1.25Ta の組成をもち、800°C、400 h のクリープ破断強度が 18-SR の約 2 倍と高く、また耐食性、加工性、溶接性などいずれの性質も 18-SR 相当といわれている⁴⁰⁾。

今後、浄化装置自体の設計面での改良によつて、このような新材料の採用が積極的に進められるようになり、またそれによつて更に新合金の開発が促進されるようになることが望まれる。

3. 触媒コンバーター用材料

コンバーターは排気中の NO_x や HC, CO を触媒の作用によつて、比較的低温度で還元あるいは酸化させて浄化するための装置であるが、現在量産されているものは HC, CO の除去を目的とした、いわゆる酸化触媒コンバーターである。容器は従来のマフラーよりも高温になるために、より高級な材料を必要とするが、最も高温になるコア部分でも 700~800°C であり、また無鉛ガ

ソリンの使用が指定されるので、リアクターに比較すれば、材料選択には余裕がある。現在、SUS 304 がその良好な加工性や溶接性などの特長を買われて、多用されている。しかし、加工性や溶接性に関する問題が解決されるならば、さらに安価なフェライト鋼 (430, 409 など) や表面処理鋼板などの利用が望まれる。

4. ガソリンの無鉛化対策用のバルブシート合金¹⁾⁴¹⁾⁴²⁾

従来の加鉛ガソリンにはアンチノック剤としてアルキル鉛が添加されており、その燃焼生成物である PbO·PbSO₄ や Pb(Br, Cl)₂ などがバルブとシートとの間の潤滑剤の働きをしていた⁴³⁾。しかし、無鉛ガソリンになると、そのような潤滑作用が行なわれなくなるので、従来型のエンジンでは、特に高速、高負荷走行などの酷しい条件下で、排気バルブシートが異常摩耗 (バルブリセッション) を起こすことがある⁴¹⁾。このため無鉛ガソリン用のバルブシート材料の開発が必要となつた。

バルブシートの温度は、通常ガソリンエンジンでは、吸気側で 150~200°C、排気側で 250~300°C 程度であるので、これまでシート用材料としては軽負荷用には普通鋳鉄、高負荷用には 13Cr 鋳鋼、SUH4, SUH31 などが用いられてきた。しかし無鉛ガソリンを使用した場合、鋳鉄製シリンダーヘッドと一体のバルブシートでは摩耗量が著しく増大し、またバルブのフェイス側にも、しばしばアバタ状の異物 (α -Fe₂O₃, FeO, α -Fe) の付着が認められる⁴⁴⁾⁴⁵⁾。このような観察結果から、異常摩耗はバルブとシートとの金属接触による溶着摩耗が主要原因と考えられている。この対策のためには、ヘッドの材質を改良して、シート部を高周波焼入する方法なども試みられたが、現在ではシート合金の開発に主力が注がれている。

我国でも昭和 46 年の新生産車からインサート方式のバルブシートによる無鉛化対策が実施されているが、以来数多くのシート用合金が開発された。中でも焼結合金は組成の選択が容易なことから、炭化物や金属間化合物などの硬質粒子を分散させたり、Pb などの易溶金属を溶浸して自己潤滑性を付与したり、あるいはガラス成分を加えた種々の合金が提案されている。Table 2 に最近のバルブシート用合金の化学組成例を示す^{1)42)46)~49)}。

このように多くの合金が開発されているにもかかわらず、すべてのエンジンに適合するような万能な合金は見当たらないように思われる。このことはバルブリセッションが、実際にはバルブの作動条件やエンジンヘッド回りの設計諸元など多くの因子に関係していて、単にシート

Table 2. Chemical composition of typical new alloys for valve seat insert.
Composition, %

Alloy	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	W	Fe	Others
Heat-resistant steel	1.0	2.0	0.5	20.0	0.1	2.0	1.0	—	bal	
Cast alloy (1)	1.9	1.4	1.1	22.0	20.0	12.0	2.5	6.0	bal	P=0.2 S=0.2
“ (2)	3.8	3.5	0.5	0.3	0.5	—	4.0	—	bal	
Sintered alloy (1)	1.4	—	—	8.0	2.0	9.0	0.5	3.0	bal	
“ (2)	1.0	—	—	3.0	—	—	0.3	—	bal	Pb>10 Pb=4.0 glass=2.0
“ (3)	1.0	—	—	12.0	20.0	—	2.0	—	bal	
Tribaloy (T-400)	—	2	—	8	—	62	28	—	—	

材料の改質だけでは解決されない複雑な問題であることを強く示唆している。しかし、今後は、無鉛ガソリンを使用するあらゆるエンジンに適合するばかりではなく、無鉛、加鉛ガソリンの両方に兼用できるようなバルブシートを目指して、更に新しい合金の開発が進められていくであろう。

5. ま と め

排気浄化装置用材料の開発は、着手してから年月も浅く、しかも材料メーカーおよび自動車産業ともに未経験な分野であつたために、かなり難航した。しかし、両者共同の研究成果として、すでに53年規制をクリアした対策車が生み出されている。これからは改めて材料の見直しが行なわれ、現在最も無難な材料として広く使用されている310Sや304に代る新材料の利用が積極的に進められていくものと考えられる。

バルブシートについても、バルブリセッション対策用の合金の開発だけでなく、更に無鉛、加鉛両ガソリンに対して兼用できるようなシート用合金の開発へと発展していくことが望まれる。

二十数年前、21-4N鋼がPbO耐食性のすぐれたバルブ専用鋼として脚光を浴びて登場した時と同じように、性能、コストおよび資源的な問題も満足するような、真の“排気浄化対策用材料”が開発される日の近いことを期待している。そのためには、材料メーカーおよび自動車メーカー共同による、今後いつその研究が必要であろう。

最後に、本解説を作成するに当たり、貴重なデータを用用させていただきました各研究者の方々、また種々のご援助を賜りました当研究所の小松登所長、および小林孝雄氏に心から感謝の意を表する次第です。

文 献

- 1) 大沢 恂: 日本金属学会会報, 16(1977), p. 31
- 2) 庄司雄次, 秋山俊一郎: 内燃機関, 14(1975)11, p. 79

- 3) R. OPPENHEIM: Stahl u. Eisen, 94(1974), p. 426
- 4) 鈴木隆志, 川端紀雄他: 耐熱金属材料研究委員会研究報告, 13(1972), p. 279; 鉄と鋼, 63(1977), p. 681
- 5) 川端紀雄, 鈴木隆志他: 鉄と鋼, 60(1974), S 597
- 6) 門 智, 山崎桓友他: 鉄と鋼, 60(1974), S 595
- 7) H. T. MICHELS: SAE Paper 740092, (1974)
- 8) C. A. BARRETT and C. E. LOWELL: NASA TN D-7615, (1974)
- 9) 門 智, 山崎桓友他: 鉄と鋼, 63(1977), p. 736
- 10) 岩田徳重, 北条信良他: 鉄と鋼, 61(1975), S 724
- 11) 藤岡外喜夫, 衣笠雅晋他: 鉄と鋼, 61(1975), S 192
- 12) A. JAIMEE, D. E. SCHNEIDER et al.: SAE Paper 710293, (1971)
- 13) A. M. EDWARDS, R. A. E. HOOPER et al.: Instn. Mech. Engrs., Conference Publication 16, (1974), p. 87
- 14) C. POLLONE: SAE Paper 720485, (1972)
- 15) J. W. SJOBERG and A. I. ROZAMANITH: Mat. Protect. and Perform., 10(1971)9, p. 31
- 16) D. L. CHALK: Automotive Eng., 78(1971)8, p. 28
- 17) 例えば岡本正三, 宮川大海: 日本金属学会誌, 25(1961), p. 520
- 18) 門 智, 山崎桓友他: 鉄と鋼, 63(1977), p. 724
- 19) 門 智, 山崎桓友他: 鉄と鋼, 60(1974), S 593
- 20) S. KADO, T. YAMAZAKI et al.: 6th I. C. M. C., Sydney, (1975)
- 21) 諸石大司, 牧浦宏文: 鉄と鋼, 59(1973), S 551
- 22) 大林幹男, 伊藤卓雄他: 鉄と鋼, 60(1974), p. 637
- 23) E. N. CANTWELL, I. T. ROSENBLUND et al.: SAE Paper 690139, (1969)
- 24) G. C. WOOD and M. G. HOBBY: Proc. 3rd I. C. M. C., (1969), p. 102
- 25) 庄司雄次, 秋山俊一郎他: 鉄と鋼, 62(1976), p. 108
- 26) 日下邦男, 鶴見州宏他: 鉄と鋼, 57(1971), S 163
- 27) 佐藤信二, 岡 裕他: 鉄と鋼, 59(1973), S 163

- 28) *J. E. ANTILL and K. A. PEAKALL*: JISI, 205(1967), p. 1136
- 29) *M. J. BENNETT, G. H. CHAFFEY et al.*: Proc. 4th I. C. M. C., (1972), p. 155
- 30) *R. E. OLDRIEVE*: NASA TM X-67970, (1971)
- 31) *C. P. BLANKENSHIP and R. E. OLDRIEVE*: SAE Paper 740091, (1974)
- 32) 大林幹男, 伊藤卓雄, 小林孝雄: 未発表
- 33) 特許公報: 昭 52-13774
- 34) 特許公報: 昭 46-2042
- 35) 深瀬幸重, 根本力男: 鉄と鋼, 63(1977), p. 688
- 36) 庄司雄次, 秋山俊一郎: 鉄と鋼, 63(1977), p. 700
- 37) 飯泉省三, 衣笠雅晋他: 鉄と鋼, 63(1977), p. 715
- 38) 沢谷 精, 伊藤秀樹: 鉄と鋼, 61(1975), S 636
- 39) 住友金属工業, 日本ステンレス資料: 含Yオーステナイトステンレス鋼, (1974)
- 40) *R. E. OLDRIEVE*: NASA TN D-7966, (1975)
- 41) 斉藤 孟: 自動車技術, 28(1976)1, p. 50
- 42) 鮎谷清司: 金属, 臨時増刊号 (1977/3), (1977), p. 56
- 43) *D. GODFREY and R. L. COURTNEY*: SAE Paper 710356, (1971)
- 44) *W. GILES*: SAE Paper 710368, (1971)
- 45) *W. L. KENT and F. T. FINNIGAN*: SAE Paper 710673, (1971)
- 46) 特許公報: 昭 51-10804
- 47) 特許公報: 昭 51-6607
- 48) 特許公報: 昭 51-13093
- 49) *C. B. CAMERON and D. P. FERRISS*: Anti. Corr., 22(1975)4, p. 5