

# 連続雰囲気炉 (オキシノン<sup>®</sup> 炉)による 自動車用 EGR クーラーのろう付



## 1. はじめに

EGR クーラーはエンジンから排出された高温排 気ガスの一部をエンジンに戻すために,排気ガス を適切な温度に冷却するための熱交換器である。 そのため EGR クーラーの構造は排気ガスが通過す る部分とそのガスを冷却する水冷部分から構成さ れている。ガスの通過する部分は一般的には熱の 拡散を効果的に行うため,薄いステンレス鋼板を 複雑な形状に加工したフィンの集合体であり,ガ スを冷却する水路の部分も流速を弱める工夫がな されている。写真1に EGR クーラーの外観写真を, 図1に EGR の概念図を示す。

排気ガスと冷却水は薄いステンレス鋼板を通し て熱交換し排気ガスを冷却する。この構造は多く の組立て部分をろう付により接合し形成される。 使用するろう材は高温ろう材で,一般的にはニッ ケル系のろう材を使用する。

母材となる部分は排気ガスの循環に耐えるため、オーステナイト系及びフェライト系ステンレス鋼が使用される。これらのろう付には真空加熱炉の使用が一般的あるが、今回提唱するのは真空加熱炉方式ではなく特殊の構造体をした連続式雰囲気炉(オキシノン<sup>®</sup>炉)である。

本研究ではオキシノン<sup>®</sup>炉を用いた,フェライ ト系ステンレス製 EGR クーラーの新しいろう付け 方法及び,ろう付技術に関する基礎的な知見を得 たので報告する。



写真1 EGR 外観写真

\* 関東冶金工業株式会社 技術開発室 主任 K. Watanabe



連絡先 E-Mail:Kenichi.watanabe@k-y-k.co.jp

## 2. EGR のろう付

EGR クーラーの構造はステンレス鋼とニッケル ろう材 (BNi-5, Ni-Cr-Si-P など)の組み合わせ であり、ろう付加熱温度は 1000 ℃以上が一般的 であり、EGR クーラー製造に関わる幾つかの基礎 的な研究発表を見ることが出来る。 $^{1 \sim 7)}$ 

これらの研究では、使用される母材は殆どが オーステナイト系ステンレス鋼板で、ろう材は BNi-5 (JIS)系に加え、新たに開発された、Ni系、 Fe系が用いられている。特にNi-Cr-Si-P系のろ う材は上記研究論文の全てに使用され、評価され ている。これらの実験に使用されるろう付加熱は 真空加熱方式である。

本研究ではこれらの研究経緯を参照し、ろう材 として、Ni-Cr-Si-P系のろう材を使用した。母材 としては一部で実用に使用されはじめたフェライ ト系ステンレス鋼を選び、ろう付における基礎的 な研究を行った。

さらに,加熱方式としては,これまで一般的に 用いられてきた真空加熱炉方式に代えて写真2に 示す「オキシノン<sup>®</sup>炉」を使用し,そのろう付特 性を評価し,フェライト系ステンレス鋼製EGRクー ラーのろう付け特性に関し基礎的な知見を得る事 を目的とした。



写真2 オキシノン<sup>®</sup>炉

本研究ではステンレス鋼(フェライト系)とNi 系ろう材との高温ろう付であり、ろう付中、母材、 ろう材の酸化防止、還元は重要な要素である。オ キシノン炉はこの条件を充分満足する特性を持っ ている。<sup>8)</sup>

オキシノン<sup>®</sup>加熱炉による,EGR 製造に必要なろう付性の知見を得るために以下の実験を行った。

## ① ろう材の広がり性(ぬれ性)

② ろう付部の機械的特性(引張せん断強さ,圧 縮せん断強さ,硬さ分布) ③ ろう付部の耐食性

④ 加熱雰囲気ガスの影響(Ar ガス, N2 ガス雰囲気)

## 3. オキシノン<sup>®</sup> 炉とは・・・

ここで、オキシノン<sup>®</sup>炉について簡単に説明す る。オキシノン<sup>®</sup>炉とは関東冶金工業株式会社に て製造される雰囲気連続炉で近年、EGR ろう付及 びステンレス系熱交換器のろう付等、様々な製品 製造に活用されている炉である。

本炉は C/C コンポジット製のベルトを使用した 連続炉で,連続炉の特徴である「量産性」に優れ た炉体構造を備えている。この事は大量生産でコ スト低減が求められている自動車業界のニーズに 合った設備と言え,EGR の量産も例外ではない。 C/C コンポジットベルトは最高で 2600 ℃ での高 温搬送を可能とした。一般的に金属ベルトの最高 使用温度は 1150 ℃ までと言われている。また従 来の金属ベルトと比較し高温強度も高いので EGR 等の重量物も安定して搬送することが出来る。

また,炉内構築物はグラファイトを使用してい る。グラファイトによって炉内雰囲気の酸素分圧 を 10<sup>-15</sup> (Pa)以下まで下げることが出来る。ステ ンレスのろう付には水素炉が使用されることが多 いが,オキシノン<sup>®</sup>炉は爆発の危険性のある水素 をいっさい使用せず,窒素,アルゴンの不活性ガ スのみでステンレスを光輝に熱処理することが出 来る。これは水素による還元ではなく,熱解離と いう原理を利用したものである。オキシノン<sup>®</sup>炉 の詳細については文献8で報告しているので省略 する。

一般的に雰囲気連続炉は真空炉と異なり、炉内 に「雰囲気ガス」を使用しなければならず、この「ガ ス代」がランニングコストを大きく左右する要素 であった。オキシノン<sup>®</sup>炉も窒素、アルゴンの不 活性ガスを使用して運転される。近年の省エネ需 要の高まりを受け、オキシノン<sup>®</sup>炉は改良を重ね ており、炉内供給ガスを削減しランニングコスト を大きく下げた新型のオキシノン<sup>®</sup>炉も開発され ている。具体的には図2に示すように、炉体の出 入口に真空置換室を設けることで外部からの空気 の侵入、雰囲気の流出を防ぐ構造である。

また,従来,連続炉の運転管理には,熟練の作 業専任者が必要とされてきた。

特に生産開始時には,炉内雰囲気のパージ状況, 温度,各種機器の異常有無の情報を専任者が的確 に判断し, 生産開始の判断を行ってきた。

この点もオキシノン<sup>®</sup>炉は改良を重ねている。 これまで熟練者の判断に頼っていた雰囲気の情報 を「見える化」することで雰囲気の状態を,より 見やすく,わかりやすく表示する改良を行った。 この事で,例えば海外の生産拠点にて不慣れな オペレーターでも安定した運転管理が可能となっ た。(図 3)



(エレベータ式,真空置換式)図2 出入口置換室



図3 雰囲気の「見える化」パネル

## 3. 試験方法

3.1 ろう材

EGR クーラー用ろう材としてはこれまで, BNi-5 (Ni-Cr-Si) が一般に使用されてきた。

このろう材の使用理由としては,他のNi系ろう材と異なり,ボロン(B)を含有しないことであり,EGRのように,腐食性のガスを処理する場合はボロン(B)含有のろう材に比較して耐食性が優れているためと言われている。しかしながら,ボロンを含有しないために,溶融温度が高く,結果として高いろう付温度が必要であり,高度なろう付技術が必要とされた。

ここ数年、Ni素材の高騰もあり、Ni含有量の 低減の考えから、幾つかのろう材が開発されて きた。例えば、Ni-Cr-Si-P,Ni含有量を低減し た Fe 基の Fe-Cr-Ni-Si-P, Fe-Cr-Ni-Si-P-Mn-Cu, などのろう材である。

本研究ではこれらのろう材の中,EGRクーラー 用として一般に認知されてきたNi-Cr-Si-Pを選 択しろう付性を検証した。使用したろう材の形状 は粉末ろう材をバインダと混合し、ペースト状に したものである。

3.2 母材

これまでのディーゼル用 EGR クーラーでは,ガ スの腐食性を考え,母材はオーステナイト系ステ ンレス鋼 (SUS304, SUS316)が一般的であったが, 近年のガソリンを対象とした EGR では,フェライ ト系ステンレス鋼が多く用いられている。本研究 ではこの事を踏まえて,対象母材をフェライト系 ステンレス鋼である SUS430J1L 及び, SUS444 とし た。

3.3 雰囲気ガス

オキシノン<sup>®</sup>炉の雰囲気は,不活性ガスを用い るが,窒素と親和力の強い材料の処理にはアルゴ ンガスの使用が一般的である。

今回, ランニングコスト面を勘案して, アルゴ ンガスの他に窒素ガスの使用を試み, 使用ガスの 違いによる, 広がり性, 接合部機械的性質, 耐食 性への影響を検証した。

3.4 濡れ広がり試験

ろう材の広がり性はろう付性を考察する上で 重要な因子である。広がり性の測定は図 4, 図 5 に示すように, ステンレス鋼板 ( $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} t$ )上に 0.1g のろう材 ( $^{\sim}$ ースト状)を置き加 熱後得られた広がり面積から広がり値 (A)を求 めた。

なお,広がり値(A)は広がり試験後のろうの 広がり形状が殆ど円形であることから,広がり形 状の,x y長さの1/2とした。

ろう付条件は,加熱温度を1080℃,1130℃, 1180℃の3点とし,ろう付時間を,5分,15分, 30分,と変化させ,広がり性への影響を調べた。

また,ろう付温度を1130 ℃と一定にし,ろう 付時間を5分,15分,30分とした条件で,雰囲 気をアルゴンガス,窒素ガスとした場合の広がり 性への影響を考察した。

さらに,加熱温度 1130 ℃, 15 分における,オ

キシノン<sup>®</sup>炉加熱と真空炉加熱の違いを T 型ろう 付継ぎ手の接合界面の組織観察を行い検証した。



図5 濡れ広がり試験評価方法

## 3.5 ろう付強度試験

3.5.1 引張せん断試験

引張せん断試験片 (JIS Z 3192)の形状を図 6 に示す。重ね継ぎ手接合における引張せん断の場 合,重ね面積がせん断強さに与える影響が大きい とされるが本実験では,重ね代は板厚と同じ長さ とした。これは試験後のろう付部における板の変 形は少なく,得られた値は形状による影響は少な いと考えられたからである。ろう材の添付は重ね 部に密着しておよそ 0.1g を添付した。ろう付方 法は,これまで一般に使用されてきた真空加熱方 法と,オキシノン<sup>®</sup>炉加熱方法の両者を選択し, さらに加熱雰囲気を,アルゴンガス,窒素ガスと し,試験片を作成した。ろう付温度は 1130 ℃を 選択した。



図 6 引張せん断試験片 (JIS Z 3192)

## 3.5.2 圧縮せん断試験

圧縮せん断試験片の形状を図7に示す。試験 片は30mm×30mm×6mmtのステンレス鋼板 (SUS444, SUS430)上に同一材料の $\phi$ 10mm, 10mmh ステンレス鋼棒を設置しろう付を行った。ろう材 は0.1gをステンレス鋼板と棒の間に塗布した。 ろう付条件は広がり試験と同じ条件の1080℃, 1130℃, 1180℃, 5分, 15分, 30分とした。得 られたろう付試験片は,図8に示す治具に固定し 圧縮加重を負荷し最大切断応力を求めた。



#### 3.6 腐食試験

広がり試験で得られた試験片を用いて、塩水噴 霧試験(5%濃度塩水)を行った。塩水噴霧の負荷 時間は最長40時間噴霧を行い、試験後、試料表 面を評価した。試験片制作の条件は、アルゴンガ ス雰囲気、窒素ガス雰囲気で、母材はステンレス 鋼板(SUS430, SUS444)、ろう材はNi-Cr-Si-Pを 用いた。

## 4. 結果考察

4.1 濡れ広がり試験結果

ろう材の広がり形状は写真3に示すようにほぼ 円型であり,添付したろう材がX,Y軸方向に均 一に広がっており,ろう材の広がり性は良好と考 えられる。



写真3 濡れ広がり試験結果(抜粋)

評価結果を図9にまとめた。オキシノン<sup>®</sup>炉ア ルゴン雰囲気の場合,加熱温度の影響は1080℃ から1180℃に上昇しても広がり性にはほとんど 影響は見られなかった。しかし,各温度における ろう付時間の影響は5分から時間が長くなると若 干広がり面積が大きくなる傾向が見られる。また 母材による違いは,SUS444,に比べSUS430にお ける広がり面積はおよそ20~30%増加している。

またオキシノン<sup>®</sup>炉における,アルゴンガスと 窒素ガス中での広がり面積は,SUS444 では大きな 差は見られないが,SUS430 においては,アルゴン 雰囲気に比べて,窒素雰囲気における広がり面積 は,およそ30~40%増加している。この広がり 面積の違いについては今後検証する予定である。 この事はオキシノン<sup>®</sup>炉におけるガス雰囲気は広 がり性に関しては,アルゴンガスの使用に限定す





Arron (Oxynon) 1130℃×15分 SUS430



Arron (Oxynon) Vacuum 1130°C-15min SUS444

図 10 T 型継ぎ手のろう付部の組織観察

500. Oun

ることなく窒素ガス雰囲気使用の可能性を示唆し ていると考えられる。

図10にはT型継ぎ手のろう付部の組織観察を 真空加熱炉とオキシノン<sup>®</sup>加熱炉の結果を比較し 示す。ろう付接合界面において溶融ろうによる母 材の溶融現象(エロージョン)が見られる。この エロージョンの差違はオキシノン<sup>®</sup>加熱,真空炉 加熱とも大きな違いは見られない。なお,両条件 ともフィレットは良好に形成されている。



図9 濡れ広がり評価結果

## 4.2 ろう付強度試験結果

図 11 の引張せん断強さの結果から,真空炉加 熱とオキシノン<sup>®</sup>炉加熱による強さの違いはほと んど見られず,ほぼ同じ強さが得られている。ま たアルゴン雰囲気と,窒素雰囲気による違いは若 干ではあるが,窒素雰囲気加熱がオキシノン<sup>®</sup>加 熱,真空加熱とも強さは上昇するようである。

圧縮せん断強さは図 12 に示すように、オキシ ノン<sup>®</sup>加熱炉において、加熱温度、加熱時間の違 いによる強さへの影響はほとんど見られなかっ た。炉中雰囲気の影響についてもアルゴン雰囲気、 窒素雰囲気の結果を比較したが大きな違いは見ら れなかった。



図11 引張せん断試験結果





図12 圧縮せん断試験結果

## 4.3 硬度測定試験

T型継ぎ手のサンプル断面の硬度測定を実施し た結果を図13に示す。Ni-Cr-Si-P系ろう材の組 織は完全均一相とならず、樹葉状の組織と素地か らなる組織となる。窒素ガス、アルゴンガスそれ ぞれのろう付組織の内部硬度分布を比較すると、 両条件には大きな差異がみられなかった。



図 13-1 硬度測定試験結果(アルゴン雰囲気)



図 13-2 硬度測定試験結果 (窒素雰囲気)

図 14 には、広がり試験で得られた試験片の表 面拡大写真と SEM 画像を示す。表面状態はアルゴ ン雰囲気加熱が平滑であるのに対し、窒素雰囲気 加熱は表面に析出物が密集している。



アルゴン雰囲気(光学&SEM像) 窒素雰囲気(光学&SEM像)図 14 ろう材表面組織

表面から硬度を測定した結果,アルゴン雰囲気 での加熱は表面硬度が 599 ~ 627 HV であったが, 窒素雰囲気での加熱の場合 772 ~ 907 HV であった。 窒素雰囲気でろう付を行うとろう材表面硬度が高 くなる傾向が分かった。窒化物が表面に析出し硬 度が高くなったと考察される。

### 4.4 腐食試験結果

図 15 に 40 時間塩水噴霧試験前後の広がり試 験片の腐食状況を示している。試験後のろう材及 び母材表面に若干変色が見られるが,この変色は 簡単なラッピング処理によって容易に除去出来る 変色であり,重量減になるような腐食は見られな かった。

広がり試験片を5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>水溶液に浸漬し,24 時間ごとの重量減少率を記録したものを図16に 示す。

その結果24時間後の計測で,窒素雰囲気で熱 処理したものは他の条件と比較し,大きく重量減





試験前 試験後 (SUS430J1L アルゴン雰囲気 1130℃×15分) 図 15-1 塩水噴霧試験結果





試験前 試験後 (SUS430J1L 窒素雰囲気 1130℃×15分) 図 15-2 塩水噴霧試験結果



```
少を示した。これは窒素雰囲気での熱処理にてス
テンレス中のクロムが窒化したことが原因と考え
られる。一方アルゴン雰囲気で熱処理したものは
真空炉等と比較し,同等の耐食性が得られている。
```

#### 4.5 ろう付部外観写真

写真4にろう付け部の金属組織写真を示す。こ れからわかるように、フィンとチューブのろう付 部には健全なフィレットが認められた。



写真4 フィンとチューブのろう付部写真

## 5. まとめ

これまで一般的に考えられてきた EGR クーラー のろう付を,真空加熱炉によらず,独自に開発し たオキシノン<sup>®</sup>連続加熱炉を用いて検証し,広が り性(ぬれ性),機械的性質(引張せん断試験, 圧縮せん断試験,硬さ分布),腐食特性,などの 基礎的実験を行いろう付性を検討するのに必要な 結果を得ることが出来た。これらの実験結果を考 察し,フェライト系ステンレス鋼とNi-Cr-Si-P ろう材の組み合わせによる EGR クーラーのオキシ ノン<sup>®</sup>炉によるろう付の可能性が見出せた。

その結果オキシノン<sup>®</sup>加熱炉の特性を十分に活 用し問題なく EGR クーラーのろう付が行えること が確認できた。これにより,従来工法と比較し, 量産性が大きく向上し,省力化,省エネルギー化, 及び低コストが計られるものと推断する。

またオーステナイト系ステンレス鋼を用いた EGR クーラー製造に必要な各種ろう材とのろう付 性(広がり試験,引張せん断試験,圧縮せん断試験, 硬さ分布,腐食特性試験)の実験を行い,同様に 良好な結果が得られている。この結果から,母材 をオーステナイトステンレス鋼とした場合も,オ キシノン<sup>®</sup>炉を用いたEGR クーラーのろう付が問 題無く遂行できる事を確認している。

- U. Persson, : Iron-based brazing filler metals for high temperature brazing of stainless steel, Proceedings of the 8th International Conference on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding, LÖT 2010 Aachen, DVS Berichte 263, p. 38-41
- 2) T. Hartmann and D. Nutzel, : Nickelchromium-based amorphous brazing foils for continuous furnace brazing of stainless steel, Proceedings of the 8th International Conference on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding, LÖT 2010, , Aachen, DVS Berichte 263, p. 42-47
- 3) T. Hartmann and D. Nutzel, : Chromium containing amorphous brazing foils and their resistance to automotive exhaust gas condensate, Proceedings of the 5th International Brazing and Soldering Conference, IBSC 2012, Las Vegas, USA, p. 394-401
- 4) Y. Miyazawa and T. Ariga Other : Brazing of ferritic stainless steel and microstructure at the brazing joint, Proceedings of the 5th International Brazing and Soldering Conference, IBSC 2012, Las Vegas, USA, p236-239

- 5) O. Mars and M. Stroiczek and U. Persson: Erosion control of Stainless Steel brazing alloys Proceedings of the 5th International Brazing and Soldering Conference, IBSC 2012, Las Vegas, USA, p. 169-173
- M. Weinstein and L Lee and C. J. Skinner
   Further developments in Boron free Nickel-Chromium-Phosphorous-Silicon brazing filler metals, Technical Article 2012 Wall Colmonoy
- 7) S. Takahashi and K. Kanda Other : Development Low-Oxygen Atmosphere Controlled Furnace and its Application to Brazing Technology, Proceedings of the 8th International Conference on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding, LÖT 2010 Aachen, DVS Berichte 263, p. 289-295
- 8) 神田輝一,橋本巨,日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 719, P. 2322-2329, (2006)