

溶接管理技術者の体験紹介

溶接型排気弁の製造コスト削減の取組みについて

株式会社三井 E&S マシナリー  
小 濱 大 輔

1. 背 景

当社では新造船向けの 2 サイクル船用低速ディーゼルエンジンを製造している。私が所属している機械工場では、エンジンの大型溶接構造物並びに燃烧室構成部品（排気弁、ピストン冠、シリンダカバー等）を製造している。船用低速ディーゼルエンジンの概略と排気弁を図 1 に示す。

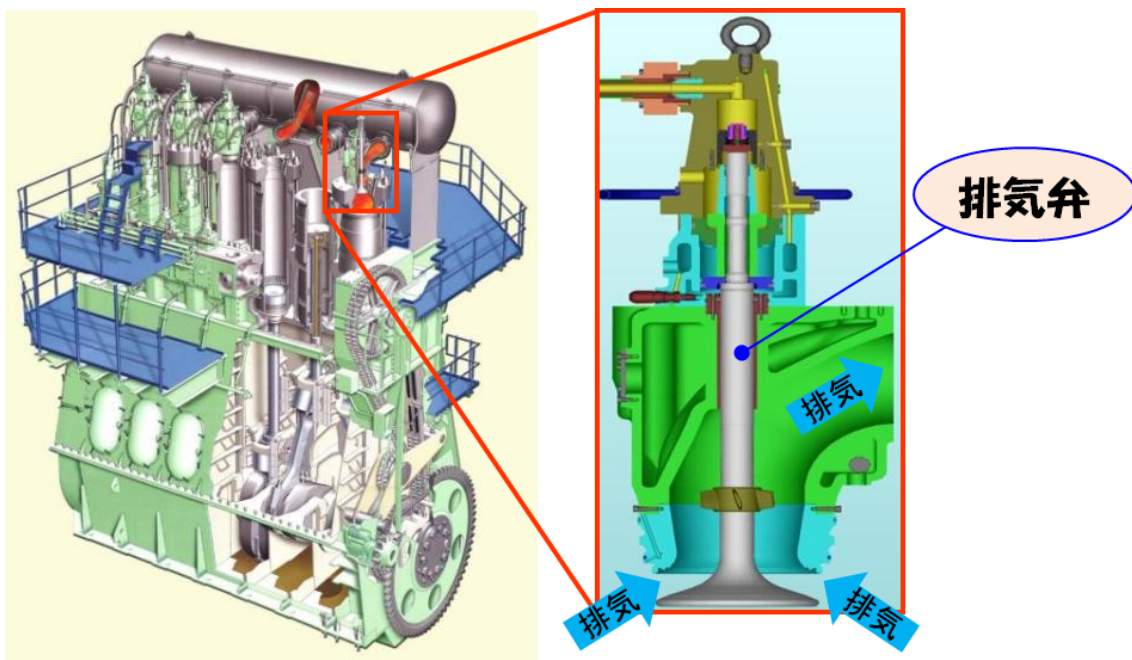


図 1 船用低速ディーゼルエンジンの概略と排気弁

燃烧室構成部品の中でも特に Ni 基耐熱合金を母材とする排気弁などは、長期間の就航において排ガスにより焼損するため、新造エンジンへの組み込みのみならず、定期的な溶接補修またはアフターサービス用パーツとしての需要が見込まれる。そこで、このアフターサービス需要のある排気弁を戦略部品と位置付け、製造コスト削減に取り組むこととした。本報では、溶接管理技術者として若手スタッフを指導しながら溶接品質を向上し、かつコスト削減に取り組んだ結果を記述する。

なお、この活動で対象としている排気弁は、本体にオーステナイト系耐熱鋼(SNCRW)を使用し、燃烧ガスが直接接触する爆発面にインコネル 625、排気の流路となるシート面にインコネル 718 を肉盛溶接した溶接型排気弁である（図 2）。

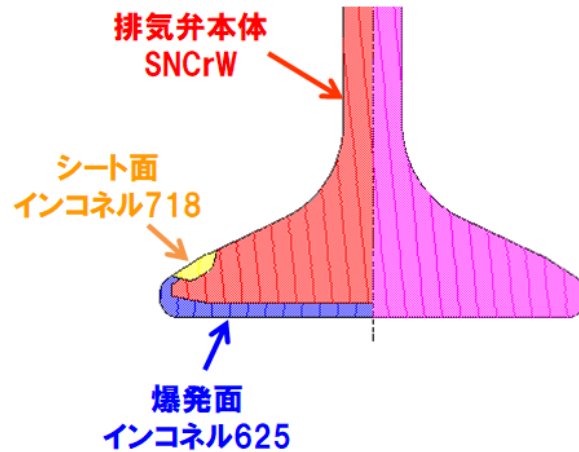


図2 溶接型排気弁の構造

## 2. 現状認識

この活動開始当初は、当社ディーゼルエンジンのラインナップの中で小型の部類に位置付けられる機種(以下、小型エンジン)の排気弁について、内製コストと海外競合メーカーとの価格を比較すると、価格差が内製原価の約30%もあった(内製原価の方が高い)。そのため、内製排気弁の大幅なコスト削減が急務であった。

一方、アフターサービス需要については過去実績を基準に考慮すると、小型エンジンの肉盛溶接型排気弁で約1ヵ月分の工場生産量に相当する本数の需要があることが分かった。しかし、急速な人員及び設備増強はできない。そこで、溶接及び機械加工の現場工数を削減し、アフターサービス向け排気弁製造のための余力の創出を急いだ。

なお、小型エンジンとは言え、エンジン出力12,000馬力以上、エンジン総重量200トン以上、排気弁単体重量は1本あたり40Kgの規模である。

## 3. 目標設定

前述のように小型エンジンの肉盛溶接型排気弁の内製コストと海外製排気弁の購入価格を比較すると価格差が内製コストの約30%あるが、具体的な改善アクションにつなげるために、排気弁素材、溶接・機械加工費、溶接材料費などのコスト構成要素別に分類し比較調査した。そして、海外製排気弁購入価格以下の製造コストを達成するために、コスト削減目標を以下のように設定した。

また、この改善活動を通して、若手スタッフ及び現場作業者を育成するために、これまでにない多様な改善項目を実施し、それを達成することで改善の喜びを実感させたいと考え、新造及びアフターサービス需要向け排気弁を外注に頼らない100%内製とすることの実現を指示し、現場作業費を54%削減という非常に高い目標を設定した。

### 【全体目標】

- ・製造原価30%削減

### 【要素別目標】

- ・現場作業費(溶接・機械加工費)54%削減
- ・排気弁素材費、溶接材料費14%削減

## 4. 現場観察と課題設定

### 4.1 溶接、機械加工工程の問題

肉盛溶接型排気弁は、SNCrW（オーステナイト系耐熱鋼）を母材とする排気弁本体の爆発面及びシート面に高機能材料であるインコネル 625 及び 718 を肉盛溶接し、肉盛溶接部を完成形状に加工して製造する。この肉盛溶接量は、小型エンジン排気弁 1 本当たり爆発面 11.6Kg、シート面側 1.6Kg 程度である。機械加工工程での肉盛部の切削量を調査したところ、最終的に製品として残るインコネルは約 60%程度で、40%は機械加工工程で削り落している、つまり半分近く捨てていることが分かった。現場作業費および溶接材料費を削減するには、ムダな肉盛溶接量を減らすことが重要である。

また、当社の排気弁工場では自動溶接装置 2 台（図 3）、NC 旋盤 3 台を使って施工しており、ワークは上流工程から 1 本ずつ工程を流す“1 個流し”生産となるよう作業工程を構築しているが、本活動開始当初は加工前準備やワーク段取りなどの作業者の付帯作業が多く、機械加工設備が停止している時間が目立った。そのため、作業費削減のためには、機械加工設備の稼働時間を伸ばす仕組みを構築する必要があった。



図 3 排気弁自動溶接装置

### 4.2 排気弁素材、溶接材料の調達費用削減の停滞

排気弁素材について、旧型のナイモニック排気弁が主流だった頃は排気弁素材調達先が国内大手素材メーカー 1 社であり、素材価格低減が困難であった。肉盛溶接型排気弁製造開始に合わせ、素材調達先を 2 社体制とし価格競争ができる環境としたが、大幅な素材価格低減が進んでいない状況であった。

前述のような問題点に対し、大幅な作業費及び素材費削減を実現するために、以下の 3 項目のように課題を明確化し改善に取り組んだ。

- ・課題① インコネル肉盛溶接量の削減

- ・課題② NC 旋盤の付帯作業削減と稼働率向上
- ・課題③ 排気弁素材の調達先拡充

## 5. 対策実施

3つの課題に対し、それぞれ実施した対策を以下に述べる。

### 5.1 対策① インコネル 625 肉盛溶接量及び肉盛溶接時間削減

最も多く肉盛溶接している爆発面側について、5層肉盛溶接していた溶接量を4層に減らすことによる溶接量削減を検討した。しかし、4層に減らすと後工程の機械加工切削量がギリギリになり溶接量のバラツキによっては仕上げ寸法に達しない部分も生じる状況であった。そこで、溶接条件を細かく制御することで、従来の溶接作業では考えられなかった 0.1mm という非常に高い精度の肉盛溶接厚さの制御を実現し、また 0.1mm 単位での加工基準の見直しにより爆発面側の肉盛溶接を1層削減でき、削り落とすインコネル 625 の量を約 30%まで減らすことができた。

なお、この排気弁のインコネル肉盛溶接は、溶接材料にはφ1.2mmのソリッドワイヤを使用し、MIG溶接法による自動溶接で施工している。この自動溶接装置は、排気弁専用機として構築したもので、デジタル溶接電源を備え、各溶接条件を細かく設定することができる。インコネル肉盛溶接の場合は、後述する高温割れ防止のために母材成分が肉盛金属内に希釈する割合をできるだけ抑制し、さらに溶接入熱をできるだけ下げる必要がある。一方で、融合不良も抑制しなければならないため相反する条件設定が要求される。この活動では、溶接欠陥防止と1層当たりの肉盛量の確保という難しい調整が必要になったが、非常に細かく自動溶接プログラムを調整することで品質確保と溶接量削減を実現できた。

### 5.2 対策② NC 旋盤の付帯作業削減による稼働率向上

NC 旋盤の加工工程では、作業者の付帯作業が多く発生していた。この付帯作業中は機械が停止するが、NC 旋盤が実際にワークを切削する付加価値時間を増やすには、この付帯作業を削減する必要がある。そこで、特に付帯作業が多い仕上げ工程について連続観測により改善の的を絞ることとし、付帯作業の内容を分類した。その結果、ワーク段取り、芯出し、計測及びチップ交換などの付帯作業時間の割合が高いことが分かったため、その作業の改善に集中的に取り組んだ。その結果、仕上げ加工の工程集約やチップ形状変更による加工プログラム集約などの改善が進み、23分/本の加工工数削減を達成した。また、機械稼働率については50%から85%に改善することができた。

### 5.3 対策③ 排気弁素材および溶接材料の調達先拡大による調達コスト削減

排気弁素材は、調達部門と協力して海外の新規調達先の開拓を進めることとした。従来は金型費償却の問題もあり国内からの素材調達が優先されていたが、価格低減のためには新規海外調達先の開拓も視野に入れるべきと考え、海外メーカー数社からの素材見積もり入手を指示した。その結果入手した見積もりは活動目標である排気弁素材費 14%削減が達成できる価格だった。そこで、調達部門担当者と一緒に海外の新規調達先に行き、工場監査等を実施し調達実現につなげた。

## 6. 活動の成果

前述の対策をはじめとする様々な改善活動を実施した結果、以下の成果を得ることができた。

成果1； 製造現場作業費 50%削減

排気弁素材費 14%削減

肉盛溶接型排気弁 1 本当たりの製造原価 24.4%削減

しかし、全体目標である製造原価 30%削減は未達であり、今後の活動の課題である。

成果2； アフターサービス向け排気弁の受注達成

## 7. インコネルの高温割れ

本報は製造コスト削減の取組みに焦点を当てたため、溶接技術よりは加工技術や調達関係の記述が中心になったが、私はこの肉盛溶接型排気弁に関しては、製造工場立ち上げ及び製造開始から、今回のコスト削減活動まで一貫して関与している。排気弁製造開始当時は、特にインコネル 718 の溶接金属中に発生する凝固割れ (図 4(a)、(b)) や、インコネル 718 と母材(SNCrW)との熔融境界部に発生する液化割れ(NbC の局部溶解に起因する結晶粒界のマイクロ割れ)が多く発生したためその抑制に苦労した。インコネルのような Ni 基合金の高温割れは、溶接金属の凝固最終段階において結晶粒界に低融点不純物元素が偏析することで発生したり、NbC のような析出相の局部溶解にともない結晶粒界が液化し、結晶粒界に収縮ひずみが作用して発生すると考えられている (図 5)。このような高温割れの防止には溶接入熱の抑制等により結晶粒の粗大化を抑制し、結晶粒界への応力集中を抑制することなどが重要となる<sup>1) 2)</sup>。従って、溶接条件の調整、シールドガスの調整 (Ar と He の混合比の工夫) による溶け込み深さの制御や、溶接時のパス間温度を下げるためにワークを冷却するための水冷装置を備えるなど、様々な条件設定の見直しや自動溶接装置の改善を実施し、現在では自動溶接装置を使ってインコネルの多層肉盛溶接を UT 検査の判定基準に合格する品質で施工できるまでになった。

10mm

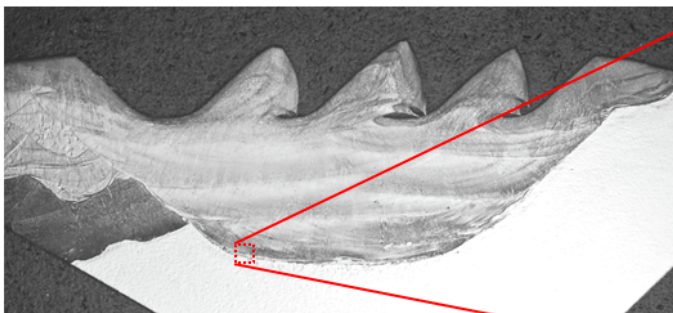


図 4(a) シート面の断面マクロ組織

0.1mm

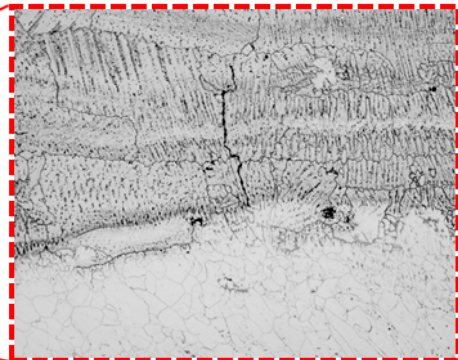


図 4(b) 凝固割れ部のマイクロ組織

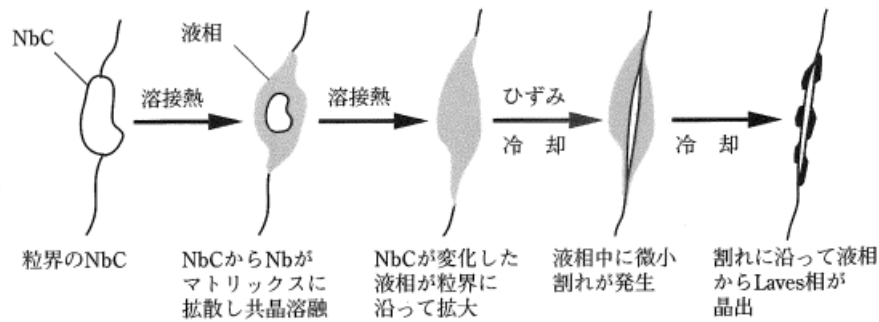


図5 インコネル 718 の液化割れ発生機構の模式図<sup>3)</sup>

## 8. おわりに

2 サイクル船用低速ディーゼルエンジンの歴史は古く、技術的・構造的にも成熟した製品のため、今回報告したような新しい溶接装置の導入から新製品の溶接品質確保及び、製造コスト削減までの一貫した活動をする機会は減ってきている。そのため現在の若手溶接技術スタッフは新製品製造における苦労を経験することが少なくなっているが、コスト削減活動などを通じた改善を繰り返すことで、溶接条件見直しなどの作業をなるべく多く経験してもらいたいと考えている。

今回経験したようなインコネルの高温割れなどは溶接部表面には現れないものであり、また極めて微細な欠陥のため、教科書で発生メカニズムを読むことはあっても、実際のその存在を体感する機会は少ない。私達のようにこの高温割れに苦しめられた経験を持つ者は、若手スタッフに様々な課題を与えることで経験を積ませ、溶接技術が継承されるための仕掛けを提供することが重要だと考える。

## 参考文献

- 1) スーパーアロイの溶接 -耐熱・耐食合金の溶接ガイドブック-, 第 1 章インコネル合金, 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会 編
- 2) 接合・溶接技術 Q&A1000, Q4-1-6, JWES (一社) 日本溶接協会/溶接情報センター
- 3) スーパーアロイの溶接 -耐熱・耐食合金の溶接ガイドブック-, 42 ページ 図 1.30, 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会 編

### 小 濱 大 輔 (こはま だいすけ) 溶接管理技術者特別級

#### <略歴>

2002年 山口大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻 修了  
 2002年 三井造船株式会社入社 玉野事業所 機械工場 製造部 溶接課 配属  
 2006年 溶接管理技術者 特別級取得  
 2017年 本社 経営企画部戦略企画室 主管  
 2019年 株式会社三井 E&S マシナリーへ転籍  
 玉野機械工場 生産総括部 生産技術グループ 主管  
 2020年 同グループ グループ長  
 現在に至る