

インド品質 No. 1 特殊鋼に向けた介在物微細化技術開発 -バルドマンスペシャルスチール社技術支援-

Development of Inclusion Refinement Technology

for No. 1 Quality Special Steel in India

- Technical Assistance for Vardhman Special Steels Limited -

大田 泰* 八明 輝修** 杉原 毅***
Yasushi Ota Terunobu Yatai Tsuyoshi Sugihara

Abstract

In 2019, Aichi Steel Corporation entered into a capital and technical partnership with India's Vardhman Special Steels Limited to address steel demand in ASEAN countries and the Indian market. This partnership aims to combine both companies' technological strengths and establish a supply system for high-quality steel tailored to local needs. Since the partnership began, Aichi Steel has introduced its manufacturing technology and quality control expertise to Vardhman's production sites, continuously implementing various improvement activities.

During a quality inspection of Vardhman steel materials, large inclusions were identified. Therefore, focused efforts were undertaken to improve inclusion levels. Specifically, the melting and refining processes were reviewed, and process control was strengthened to identify and eliminate the sources of inclusions. Through these initiatives, we have succeeded in minimizing the inclusions. This report details these inclusion level improvement initiatives.

1. はじめに

インドは2023年に中国を抜き世界最大の人口を有する国となり、2025年には14億人を超え、2035年には15億人を超えると予測されている。これに伴い経済規模も急速に拡大しており、GDPは2025年の約3.7兆ドルから2035年には約7兆ドルへと倍増する見込みである。

インド政府は「Make in India」の政策を通じて、自動車部品や特殊鋼の国内生産を推進している。自動車生産台数は2025年に約560万台、2035年には1,000万台に達すると予測されており (Fig. 1)、国内外の需要に応える形で生産能力の拡充が進んでいる。自動車の軽量化・安全性向上・環境対応が求められる中で、特殊鋼の役割はますます重要になっている。こうした背景から、インドの特殊鋼市場は今後も力強い成長が見込まれている。

愛知製鋼 (以下当社) は2019年にバルドマンスペシャルスチール社 (以下 VSSL) と資本提携・技術支援契約を締結し、グローバルでの品質・コスト競争力向上による特殊鋼事業の基盤強化に取り組んでいる。

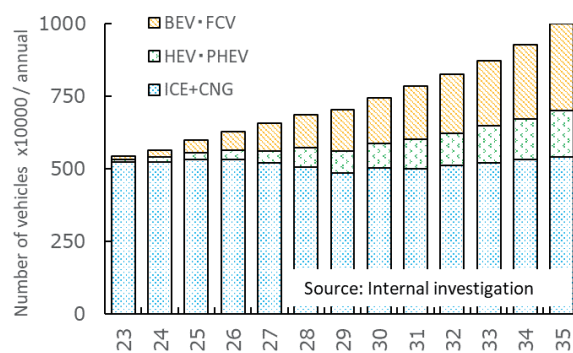


Fig. 1. Passenger vehicle market forecast in India

2. インド事業戦略

本提携の狙いを Fig. 2 に示す。中・韓鉄鋼メーカーの進出が進むアジア、アセアン市場において、当社が技術支援したインド鋼材をアセアン子会社に供給することにより①競争力向上とともに②日本国内の供給弾力性向上を図る。また③今後も成長が見込まれるアセアン、インド市場での新規需要を取り込むことで、④将来アフリカなど新興地域への供給へと繋げていく。

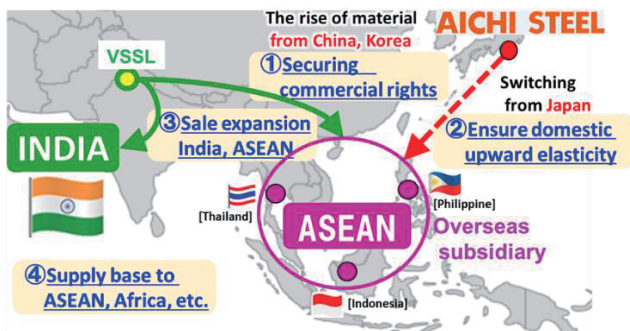


Fig. 2. India business strategy

3. VSSL 社紹介

3. 1 VSSL 紹介

Fig. 3 に示す通り VSSL はインド北部パンジャブ州に位置する。創立は 1973 年、テキスタイル企業を親会社に持つ (Table 1)。売上高は約 310 億円、生産能力は 24 万 t (2024 年度実績) で主に 2 輪用、4 輪用の特殊鋼棒鋼製品を製造している。インド国内はもとよりアセアン、欧州へも鋼材を供給している。



Fig. 3. VSSL location

Table 1. VSSL outline

Item	Content
Group company (Parent com.)	Vardhman-Textile
Established, Capital	1973, 810 Million INR
Sales amount (FY 2024)	VSSL : 31 billion JPY (Gr. total : 203 billion JPY)
Employees	1,363 (2024)
Partnership with Aichi Steel	Capital tie-up, Technical assistance agreement (TAA) 1 st TAA:2019, 2 nd TAA:2022, 3 rd TAA:2025 Aichi Steel Shareholding ratio : 24% (increase investment : 2025)

3. 2 VSSL 製造プロセス

製造工程は Fig. 4 に示すように製鋼、圧延、製品検査をそれぞれ 1 ライン有している。1 チャージ 37t を小断面の連続铸造機で铸造し 1 ヒート圧延している。製品検査ラインは当社と同等の設備で表面、内部品質を保証している。

Process	Steelmaking				Rolling	Inspection
	Melting	Refining	Degassing	Casting	Rolling	Non-destructive testing
	37ton			160s 200s		
Equipment	EAF	LRF	LVD	CCM	RHF・BDM+CRM	MLFT・UT
	[Explanation of abbreviations] EAF : Electric Arc Furnace LRF : Ladle Refining Furnace LVD : Ladle Vacuum Degassing CCM : Continuous Casting Machine				RHF : Reheating Furnace BDM : Break Down Mill CRM : Continuous Rolling Mill MLFT : Magnetic Linkage Flux Testing UT : Ultra-sonic Testing	

Fig. 4. VSSL manufacturing process

3. 3 当社技術支援内容

VSSL では「インドにおける品質 No. 1 特殊鋼メーカー」を目指しており、朝会活動によって抽出した課題や客先ニーズに対応した改善活動、設備投資、および技術開発に対し技術支援を行っている。

Table 2 に品質に関する当社からの主な技術支援項目を示す。表面キズ低減を例に挙げると、連続铸造での均一・緩冷却化や分塊圧延時のキズ伸展防止に関する製造技術開発、キズ深さ 0.15 mm の探傷技術導入等、日本国内と同等品質の製品供給体制を構築してきた。

ここで、介在物微細化の取り組みは日本材同等の介在物水準を目指しており、客先要求を満足するための活動でもある。その内容は Fig. 5 に示す通り、A) 介在物微細化のための製造技術支援と B) 介在物の評価に関する技術支援の二本柱である。本報ではこれら支援内容について紹介する。

Table 2. List of main technical assistance

Items	Evaluation	Production
Surface defects improvement	• MLFT 0.15 mm detection	• CCM slow cooling • Preventing defect extension in breakdown mill
Inclusion reduction	• Introduction of SEM-EDS • Introduction of skills for High-frequency ultrasonic flaw detector	• Inclusions refinement (Optimization of aluminum addition amount and timing)
Improved chemical composition accuracy	• Aichi Steel/VSSL cross-checking activity	• Review of alloy charging method
Jominy tight control	• Introduction of automatic grinding machine and automatic hardness tester	• Introduction of the Jominy formula

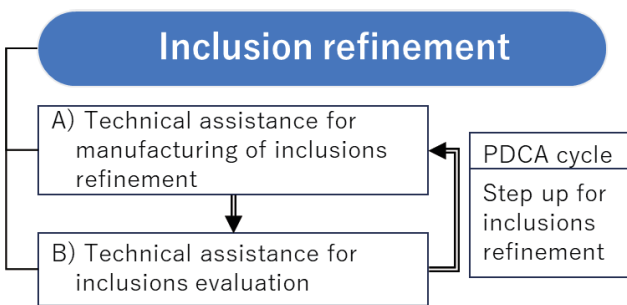


Fig. 5. Assistance Methods for Refining Inclusions

4. 介在物評価技術支援

4. 1 介在物評価

量産材の介在物評価は当社、VSSL とともに、JIS 法、ASTM 法で実施している (JIS G 0555, ASTM E45)。また、当社における改善活動では、高周波超音波探傷機 (以下、高周波 UT) 及び SEM-EDS を用い介在物の特定及び組成分析を実施し解析を行っている。

今回の取り組みでは、VSSL で製造した試作材の介在物詳細調査を当社が実施することとした。またその調査方法について技術支援を行った。VSSL における介在物評価方法を Table 3 に示す。

Table 3. Evaluating method of inclusion as example

Category	Items for evaluation	In the case of ASC	In the case of VSSL
Mass-production (JIS G 0555 ASTM E45)	Cutting and polishing of sample	Cutting and polishing machine	Same as Aichi Steel
	Verification of inclusions size and quantity	Optical microscope	Same as Aichi Steel
Improvement activity	Identification of inclusions	High frequency ultrasonic flaw detector	No skill
	Compositional analysis of inclusions	SEM-EDS	Nothing

なお、VSSL における改善活動でも当社と同様の調査・解析が実行可能なよう Fig. 6、Table 4 に示す SEM-EDS を 2023

年に導入した。

更に当社から分析技術者を派遣し、介在物の特定及び組成分析技術を指導した。現在は VSSL 内で介在物詳細調査が可能となり、機動的に品質改善を進める体制が整っている。



Fig. 6. SEM-EDS at VSSL

Table 4. SEM-EDS specification

Supplier	Hitachi High-Tech
Model	SU3800
Secondary electron resolution	3.0 nm to 15.0 nm
Back scattered electron resolution	4.0 nm
Magnification	x5 to x300,000
Maximum sample size	200 mm

JIS 法 (JIS G 0555) のサンプルサイズ (200mm²) に対し、当社が使用している高周波 UT は鋼材の切断面全体 (φ60 の場合、2,827mm²) を探傷するので被検領域を大きく取ることができ、さらに 20 μm 以上の介在物の大きさ、個数を検出することが可能である。

高周波 UT 装置の外観と仕様を Fig. 7、Table 5 に示す。全没水浸方式の探傷機であり、50MHz の超音波を使用した。



Fig. 7. Appearance of high-frequency ultrasonic flaw detector

Table 5. Specification of high-frequency ultrasonic flaw detector

Item	Specification
Method	Fully submerged method
Scanning direction	Vertical scanning
Number of scan axes	6
Scan pitch	Min. 5 μm
Supplier	Krautkramer

4. 2 介在物水準調査

VSSL 材の介在物水準（サイズ、個数）を確認するため当社材と比較調査した。対象材は SCM420 相当とした。Table 6 に SCM420 の成分組成を示す。Fig. 8 に当社材と VSSL 材の単位体積当たり介在物個数をサイズ毎に指数で示す。VSSL 材では 100 μm を超える介在物が確認された。

Table 6. Chemical composition of SCM420 (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo
0.18-0.23	0.15-0.35	0.60-0.90	0.90-1.20	0.15-0.25

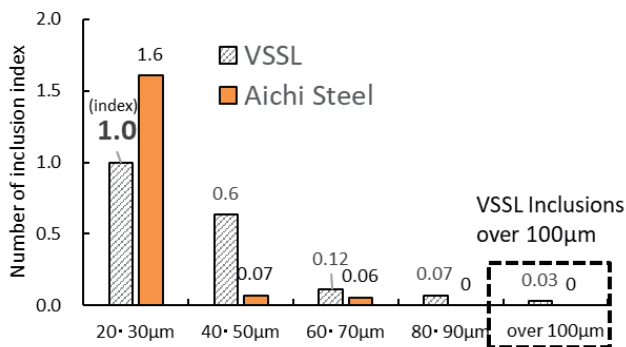
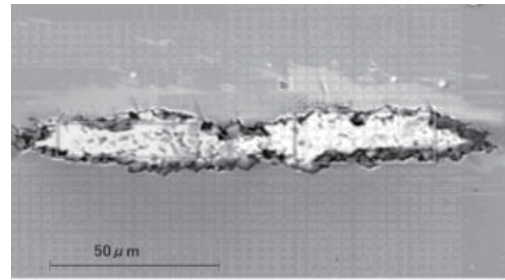
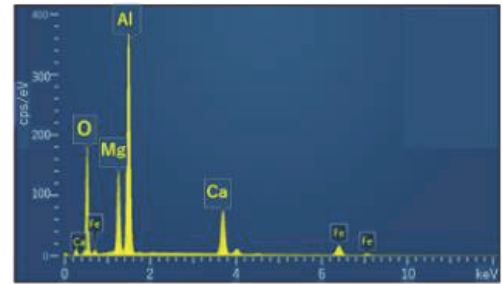


Fig. 8. Number of inclusions

高周波 UT で介在物が検出された部位からサンプルを採取・研磨したところ、Fig. 9 の介在物が確認された。また SEM-EDS 分析の結果、介在物は $Al_2O_3 \cdot CaO \cdot MgO$ 系であると推定される。



(a)



(b)

Fig. 9. Inclusion identified by high frequency ultrasonic flaw detector

(a) Inclusion photo, (b) SEM-EDS spectra

5. 目標設定

今回の改善活動では目標値を 2 ステップに分けて取り組んだ。以下、第 1 ステップの取り組みについて述べる。

第 1 ステップ：介在物 $\geq 100 \mu m$ ゼロ化（今回報告）

第 2 ステップ：介在物 $\geq 60 \mu m$ ゼロ化（取り組み中）

（インド No. 1 レベル）

6. 介在物微細化製造技術支援

6. 1 介在物発生メカニズムの推定

Fig. 10 に VSSL と当社の各工程の溶鋼中全酸素濃度推移を示す。電気炉出鋼（EAF）から取鋼精錬（LRF）間で VSSL 酸素量が当社に比べて高いことが確認された。これは電気炉出鋼時に十分な脱酸がされていないことにより、その後の工程で脱酸反応が継続し、介在物が生成しているためと推定した。

当社では溶鋼中の酸素を早期に Al_2O_3 を主体とした介在物にすることで、その後の精錬工程で浮上除去されるのに対し、VSSL では精錬以降も溶鋼に残存した酸素から介在物が生成するため、十分な浮上時間が確保されていないものと考えられる。

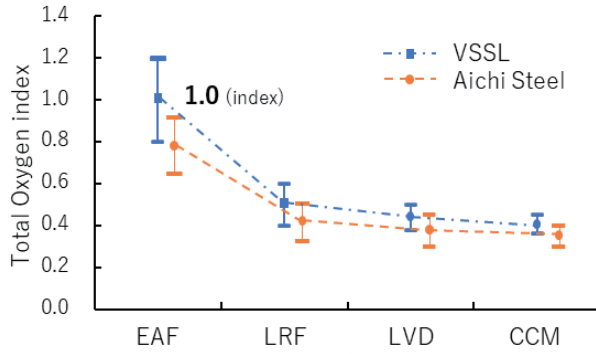


Fig. 10. Total Oxygen transition for process stage

今回確認された $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}$ 系介在物の生成メカニズムを Fig. 11 のように推定した。電気炉出鋼後の高酸素の溶鋼に脱酸用の Al を投入することによって溶鋼中酸素と Al が反応し Al_2O_3 が生成する (Fig. 11(a)、式 1)。また投入した Al は石灰中の CaO を還元し、 Al_2O_3 の生成と同時に Ca が溶鋼中に溶け出す¹⁾ (Fig. 11(b)、式 2)。更に溶け出した溶鋼中 Ca が酸素や Al_2O_3 と反応して $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ 介在物が生成する (Fig. 11(b, c)、式 3, 4)。一方、溶鋼中には取鍋耐火物を起源とする MgO が存在し²⁾ (Fig. 11(d)、式 5)、生成した $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ 介在物及び MgO 介在物は精錬中に凝集・合体する³⁾ (Fig. 11(e)、式 6)。

凝集体を繰り返しながら $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}$ 介在物は浮上し、スラグへ吸着されることとなる (Fig. 11(f)、式 7)。しかし浮上時間不足の場合、一部介在物が製品内に残存したと考えられる。

6. 2 介在物微細化方策

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}$ 系介在物の微細化のため、以降の方策を実施した。

- ① 脱酸の強化及び早期化
 - 電気炉出鋼～LRF 開始までの脱酸材 (Al) 投入量増量と投入タイミング早期化
- ② 脱酸生成物 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}$ 介在物) の浮上除去促進
 - 脱ガス終了後、浮上時間の延長

Fig. 12 に電気炉出鋼時と取鍋精錬時にそれぞれ投入した Al 量を介在物抑制方策実施前後で示す。対策前は主に取鍋精錬時に投入していたが、対策後は電気炉出鋼時に投入する Al を増量することで、より早期に介在物を生成させることを狙った。また従来は Al 規格を満足するため脱ガス後に

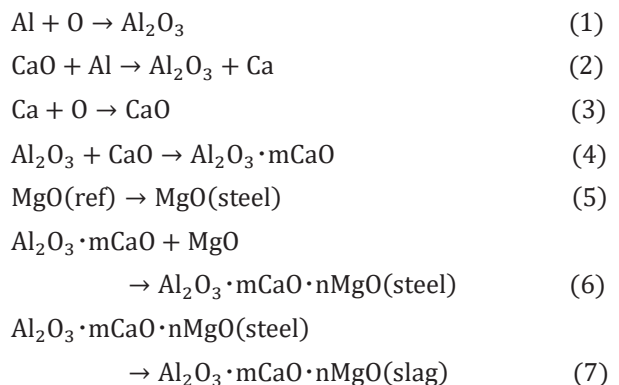
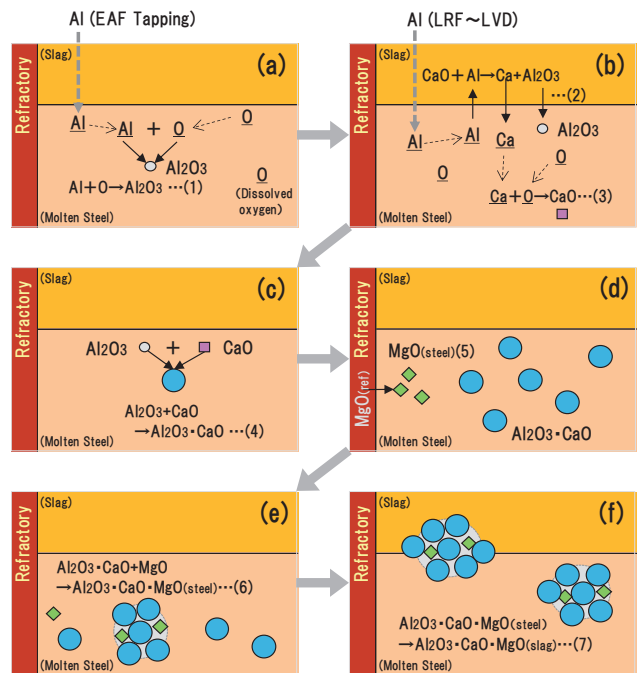


Fig. 11. Mechanism of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ inclusion generation

少量の Al を投入していたが、対策後は投入しないことを基本ルールとした。

また Fig. 13 に脱ガス後の浮上時間を示す。対策後は従来の 2.5 倍の時間を確保し、介在物の浮上促進を図った。

6. 3 効果の確認

Fig. 14 に対策前後における高周波 UT による介在物調査結果を示す。対策前には $100 \mu\text{m}$ 以上の介在物が確認されていたが、対策実施後には $100 \mu\text{m}$ に加え $80 \mu\text{m}$ の介在物も確認されなかった。

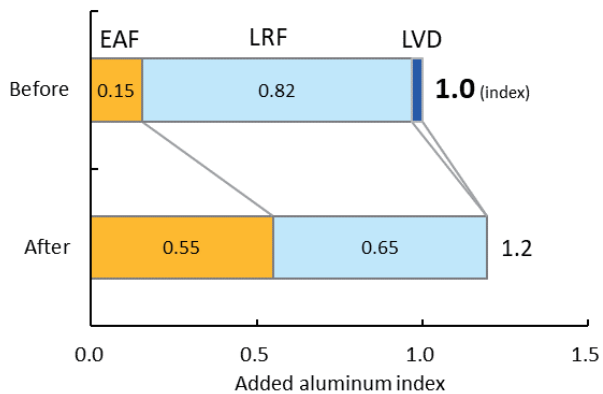


Fig. 12. Amount of aluminum added

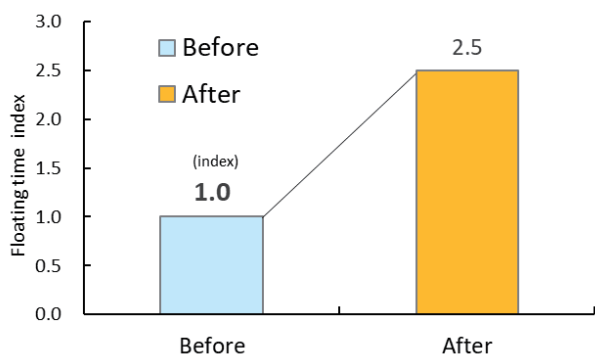


Fig. 13. Floating time after L degassing

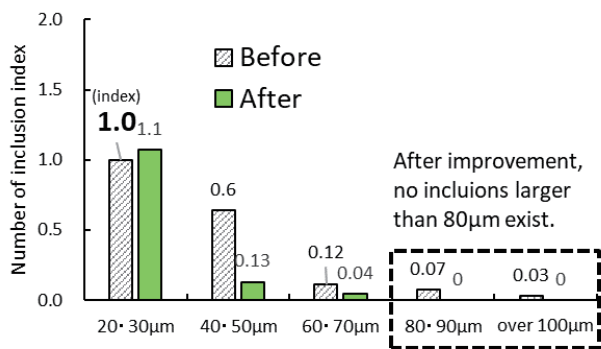


Fig. 14. Number of inclusions before and after improvement

7. 今後の進め方

技術支援として介在物微細化の技術開発に取り組んだ。その結果、第一ステップの目標である 100 µm 以上のゼロ化を達成した。

2025 年 10 月には第三期技術支援契約を締結し、更なる品質改善のため第 2 ステップの 60 µm 以上の介在物ゼロ化をはじめ、表面キズの低減、成分・焼入れ性（ジョミニー）のタイトコントロールに取り組んでいる。“インド品質 No1 特殊鋼”を目指して、今後も改善活動に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 川上潔, 谷口剛, 中島邦彦, 鉄と鋼, Vol. 93(2007), 29.
- 2) 加藤恵之, 塗嘉夫, 山陽特殊製鋼技報, 4(1997), No. 1, 63.
- 3) 溝口利明, 上島良之, 杉山昌章, 水上和実, 鉄と鋼, Vol. 99(2013), No. 10, 601.