

連携記事

プラスチック金型の鏡面研磨における ピンホール発生への鋼材の影響

Influence of Die Steel on Pinhole in Mirror Polishing of
the Plastic Injection Mold

関谷 篤
Atsushi Sekiya

大同特殊鋼(株)
工具鋼事業部 企画開発部
ソリューション室 副主席部員

1 はじめに

プラスチック製品の表面意匠には、光沢のある美しい鏡面や、複雑なパターンを持つ皮革を模したシボなど、デザイン次第で様々なパターンがある。これらはプラスチック製品を成形する金型の表面を鏡面研磨したり、シボ加工することで実現している。この金型の表面加工の工程は加工職人のスキルが必要な高度な作業であるが、鏡面研磨における「ピンホール」や「うねり」、シボ加工における「シボむら」など、様々なトラブルが起こりやすい。これらのトラブルは加工職人のスキルだけでなく、金型に使用する鋼材の「非金属介在物」や「偏析」などの欠陥に起因する場合も多く、鋼材の品質も大きく関わっている。

意匠性のための表面加工は、金型製作の最終工程であり、ここでのトラブルは製品納期やコストに重大な影響を与えるため、信頼性の高い鋼材のニーズは大きい。また、鋼材を製造する側から見ても、金型の様に鋼材内部を掘り込み、かつ、成形面全体の品質を問う使い方は非常に厳しく、より信頼性の高い製造技術が要求される。

当社の「意匠性向上に寄与するプラスチック金型用鋼」に対する知見と取り組みを、「鏡面研磨とピンホール」に焦点を当てて紹介する。

2 金型の鏡面研磨性に及ぼす 鋼材の影響

鏡面研磨は、砥石から研磨紙、さらにダイヤモンドペーストと研磨材を変えながら、磨き砥粒のサイズを順次小さく（磨き番手を大きく）していくことで、研磨面を徐々に平滑に

していく作業である。この過程で型材の特性や品質の影響で様々な問題が発生する。そのうち代表的なのが「ピンホール」（研磨面に微細な凹穴が発生する現象 図1）である。一般的に、ピンホールは鋼中の非金属介在物や炭化物などの硬質粒子を、細かい砥粒による鏡面研磨で掘り起こして発生することが多い。表1に代表的なプラスチック金型材料を示す。炭素鋼からステンレスまで様々な鋼材が使われ、製造方法や特徴など多様であり、磨きやすさやピンホール発生リスクも鋼材によって変わってくる。以下に、ピンホール発生リスクに対する鋼材の要因の影響について具体的に解説する。

2.1 ピンホールの生成過程

鋼中の硬質粒子には、 Al_2O_3 （酸化アルミニウム）、 AlN （窒化アルミニウム）、 MnS （硫化マンガン）などの非金属介在物やCr、Moなどの炭化物がある。非金属介在物は、鋼中の不純物としてのO、Nなどと各元素が結合して生成するが、O、N等は精錬で極力低減する努力をしている。非金属介在物でも MnS は細長く伸びた形態で、鋼を削り易くする快削鋼として意図的に生成しているものである。炭化物は、冷間ダイ

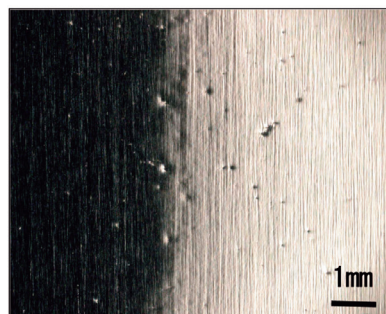


図1 プラスチック金型・鏡面磨きのピンホール

表1 代表的なプラスチック金型用鋼

区分	使用硬さ (HRC)	材質区分	AISI	大同鋼種名	特殊溶解	快削鋼
ブリハードン鋼	13	SC 系	1055	(PXZ)		(○)
	28	SCM 系	4140	(PDS3)		(○)
	32	SCM 改良	P20	PXA30 (PX5)		○
		SUS420J2 系	420	S-STAR	○	
		SUS420 系快削	—	G-STAR		◎ ※2
	35	SUS630 系	S17400	NAK101	○	
	40	NAK 系	P21	NAK80	○	
				NAK55	○	◎ ※2
焼入・焼戻し鋼		SKD61 快削	H13	DH2F		◎ ※2
	45	SKD61	H13	DHA1		
				DHA1-A	○	
	52	SUS420J2 系	420	S-STAR	○	
				D-STAR	◎ ※1	
	57	SUS 系 440C	440C	—	(○)	
	60	SKD11 改	D2	PD613	○	
	時効硬化鋼	50	マルエージング鋼	—	MASIC	○

() : 現在は一般的に商品ラインナップしていないもの

※1 : トリプルメルト材

※2 : 快削元素添加量の多いもの

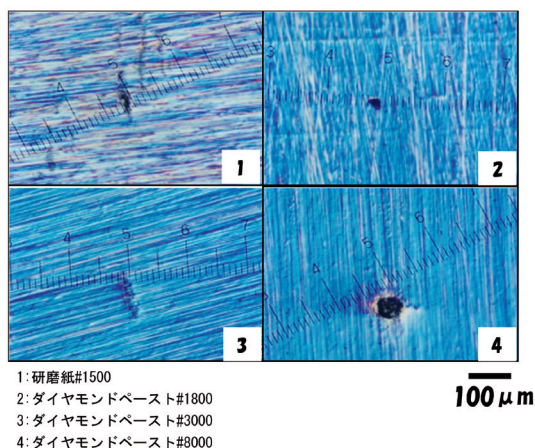


図2 PX5の鏡面研磨による表面状態の変化

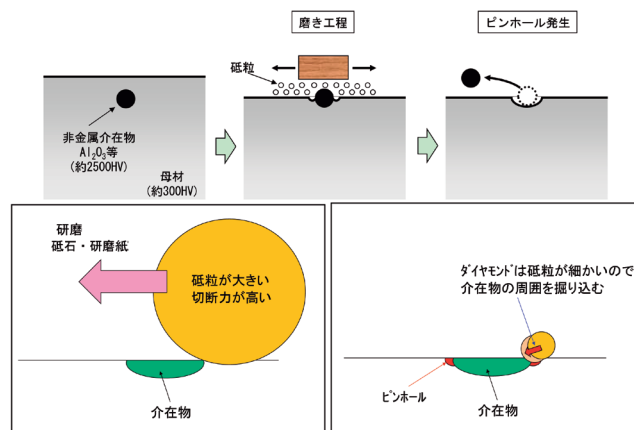


図3 ピンホール生成過程の模式図

ス鋼や高速度工具鋼など高硬度の鋼材に存在し、硬さや耐摩耗性に寄与するために意図的に生成する場合もある。

図2に#1500～#8000まで鏡面研磨したPX5表面を微分干渉顕微鏡で観察したものを示す。PX5は硬さ30HRCのS添加快削鋼であり、非金属介在物として主に Al_2O_3 とMnSが存在している。研磨紙#1500では、細長く伸びたMnSが確認できるが、目視で見えるピンホールにはなっておらず、ダイヤモンドペースト#1800(砥粒径 $9\mu\text{m}$)以上の研磨でピンホールが確認されるようになる。図3にピンホール生成の模式図を示す。ピンホールは、鋼中の硬質粒子を研磨の砥粒で掘り起こすことにより生成する。この際、鋼中の硬質粒子よりも砥粒が大きいと、硬質粒子は砥粒に切断されて掘り起こされることはなく、ピンホールにはなりにくい。しかし、砥粒が硬質粒子よりも小さいと、硬質粒子の周囲を掘り起こし最終的に硬質粒子が脱落してピンホールとなる。従って、ピンホールは磨き番手を上げるほど、あるいは硬質粒子が大きい程発生しやすい。また、砥石や研磨紙の様に砥粒が固定されてい

る研磨材よりも、ダイヤモンドペーストの様に砥粒がフリーな研磨材の方が硬質粒子を掘り起こし易い。

2.2 鋼材のピンホール生成への影響

図4にPX5のピンホールをSEMで拡大したものを示す。非金属介在物の一部が脱落してピンホールになっている。これは、MnSと複合して存在していた Al_2O_3 が脱落しており、比較的低硬度のMnSが優先的に削られることで脱落したと考えられる。非金属介在物が複合していない場合でも、非金属介在物の周囲の基材が硬い方がピンホールは発生しにくく、磨き番手を上げて鏡面研磨する場合は、鋼材の硬さを上げる場合が多い。

図5に、軟質な非金属介在物のMnSと硬質な非金属介在物の Al_2O_3 のピンホール発生状況の比較を示す。 Al_2O_3 は、研磨紙#1500から軽微なピンホールが発生するが、MnSは、ダイヤモンドペースト#3000の磨きでも掘り起こされずピンホールにならない。これはMnSが比較的低硬度のため、研磨砥粒によ

り MnS が切断されてしまうためである。#3000 の写真を見ると、細長い MnS のイメージ上にも研磨痕があり、MnS が削られていることが分かる。とは言え、MnS でもダイヤモンドペースト #8000 ではピンホールが発生しているの、MnS が多量に存在する快削鋼は高い番手の鏡面研磨には向いていない。

図6に NAK80 のピンホールを示す。NAK80 は硬さ 40HRC の特殊溶解材で、鏡面研磨性に優れた鋼材である。S は添加していない。化学成分の特徴から、生成する非金属介在物は主に AlN である。AlN の場合、他の非金属介在物に比較して大きさが小さく、特殊溶解材であるので AlN の数も少なく、微細なピンホールが発生しても目立ちにくく、実用上は問題がない場合もある。

以上見てきたように、鏡面研磨のピンホール生成には、鋼中の非金属介在物が大きく関わっており、非金属介在物の種類や大きさによりピンホールの様子も変わるため、鏡面の要求レベルに合わせた鋼材選択が重要である。しかし、非金属

介在物の量が少なく、その大きさが小さい方がピンホール発生リスクが少ないことは確かであり、鋼中の非金属介在物を低減する製造技術は重要である。

次に、非金属介在物を低減する製造技術として有効な「特殊溶解法」と当社の改善事例について紹介する。

3 非金属介在物を低減する製造技術

3.1 特殊溶解法

特殊溶解法とは、通常の工程で製造された鋼を、再び溶解・精練してよりクリーンで均質な鋼塊を得るもので、二次溶解法、ダブルメルト材とも呼ばれる。特殊溶解法には、真空アーク溶解法 (VAR)、エレクトロスラグ溶解法 (ESR)、電子ビーム溶解法 (EB)、プラズマ溶解法 (PAR) などがある。このうち、VAR と ESR は高級鋼の製造技術として世界的に定着しており、高い信頼性を要求される航空機部品等の製造を中心に



図4 PX5 のピンホール

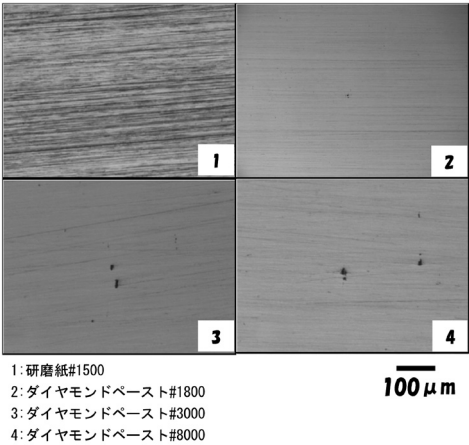


図6 NAK80 の鏡面研磨による表面状態の変化

	研磨紙#1500	ダイヤモンドペースト#3000	ダイヤモンドペースト#8000
Al ₂ O ₃			
MnS			

図5 MnS と Al₂O₃ のピンホール発生状況比較

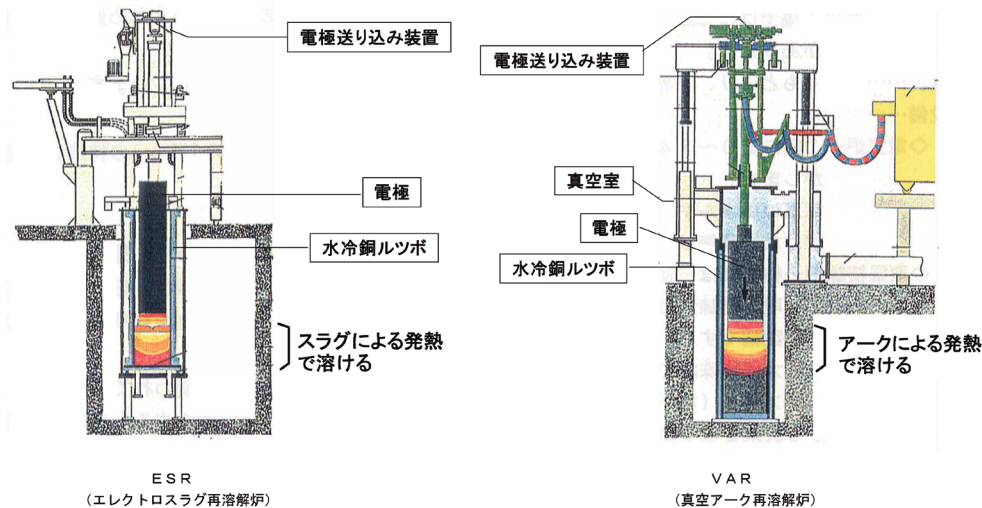


図7 VARとESRの設備概要

使われている。

3.2 VAR (Vacuum Arc Remelting) とESR (Electro Slag Remelting)

図7にVARとESRの設備概要を示す。両者とも通常の製鋼法で製造した「電極」を再溶解する製造方法である。VARは、電極に真空容器内で通電し、電極の先端と鋼塊（メタルプール）の間にアークを発生させ、そのアーク熱により電極を溶解するもので、電極先端は液滴となってメタルプールに滴下し、水冷Cuモールド内で浅いプールを保ちながら順次凝固していく。ESRは、密閉されていない水冷Cuモールド内で電極を熔融スラグに浸漬して通電することによるスラグのジュール発熱で溶解する。モールド内で溶解した液滴が順次凝固していくことはVARと同様である。

ESRのスラグは、ホタル石 (CaF_2)、石灰 (CaO)、アルミナ (Al_2O_3) などの混合物で、その組成は、溶解発熱のための比抵抗、精練能力、溶解性などの特性を考慮して決めており、鉄鋼メーカー各社のノウハウになっている。

VARとESRには、表2に示すようにそれぞれ特徴がある。VARは真空下の溶解なのでN、H等の脱ガス効果には優れるが、一方、ESRはスラグを使うことで脱O、S精練に優れている。また、ESRは電極中の非金属介在物が再びスラグに吸着されるので電極品質の影響を受けにくい、VARは電極に含まれる粗大な非金属介在物をトラップするリスクが僅かだが、電極品質への配慮がより重要である。航空機部品のVAR用の電極製造にはクリーンな溶解が可能な真空誘導炉 (VIM) が使われることも多い。しかし、コストが無視できない金型用鋼材には、その懸念の少ないESRがリーズナブルである。実際には、上記以外にも鋼材の化学組成などの諸要素も考慮して最適な製造工程を選択している。

3.3 積層凝固とは

VARやESRの様な水冷Cuモールド内で順次凝固していく造塊法は「積層凝固」と呼ばれる。図8に通常の下注造塊法とESRによる積層凝固の模式図を示す。下注造塊法では鋳型に鋳込んだ溶湯がそのまま固まるが、鋳型が大きくなると偏析や欠陥、非金属介在物や炭化物の大きさが増加する。一般的に小さな鋼塊の方が良好な内部品質が得られる。一方、積層凝固では、溶けている溶湯（メタルプール）の量が鋼塊の大きさに比較して極めて少ない。6t鋼塊でもメタルプールは600kg程度である。このため、大きな鋼塊を製造しても小さな鋼塊並みの内部品質を得ることができる。VARとESRは、偏析や粗大な非金属介在物、炭化物を嫌う「意匠性が重要なプラスチック金型用鋼」には有効な製造方法である。

4 VSR (真空ESR) の開発

当社では、高潔鋼の製造を目的に、ESRを更に進化させた「VSR (Vacuum electro Slag Remelting)」を開発し、実用化以来、数多くの製品を製造している。その開発の経緯と効果を紹介する。

4.1 開発の経緯

ESRで非金属介在物の低減のための脱酸精練を考えた場合、溶解中の大気雰囲気によるスラグ/溶鋼の酸化が大きな課題になる。ESRでは、大気酸化を防ぐためにAr等の不活性ガスによるシールを行っているが十分ではない。図9にESR溶解中の鋼塊中の酸素量 [%O] とスラグ中シリカ量 (% SiO_2) の変化を示す。溶解初期である鋼塊Bot側からTop側にかけて [%O]、(% SiO_2) とともに増加しており、溶解中に溶鋼中のSiが酸化してスラグにロスし、その結果、スラグの精練能力が

表2 VARとESRの比較

項目		VAR	ESR
設備	溶解エネルギー	アーク熱	スラグのジュール発熱
	電源	直流	交流
	溶解雰囲気	真空 (10 ⁻² ~10 ⁻³ torr)	大気圧 (不活性ガス雰囲気)
	スラグ	なし	CaF ₂ , CaO, Al ₂ O ₃ 等
造塊	鑄型	Cu水冷モールド	Cu水冷モールド
	凝固	積層凝固	積層凝固
精練	脱酸 (O)	CO脱酸 介在物浮上分離	スラグ精練 介在物吸着・浮上分離
	脱硫 (S)	×	○
	脱ガス (N, H)	○	×
生産	生産性	△	○
	コスト	△	○
課題		蒸発元素 (Mn, Cu) の変動 偏析欠陥 (フレック, リンク パターン)	水素性欠陥 活性元素 (Si, Ti, Al) の変動

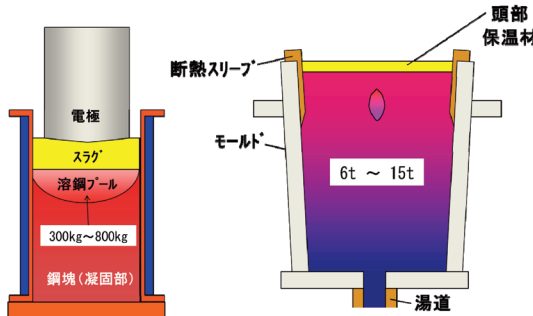


図8 積層凝固と下注造塊

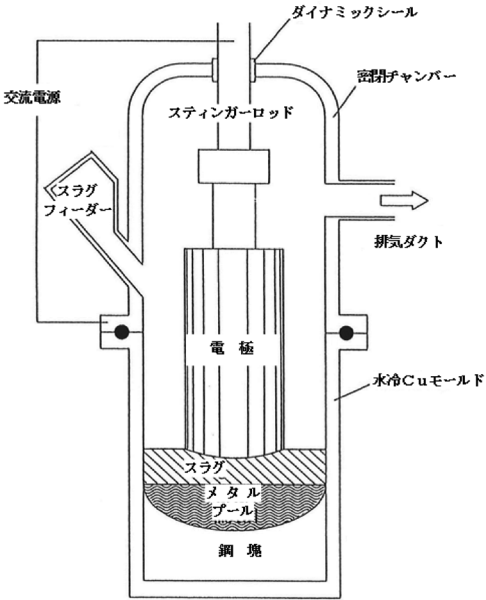


図10 VSRの設備概要

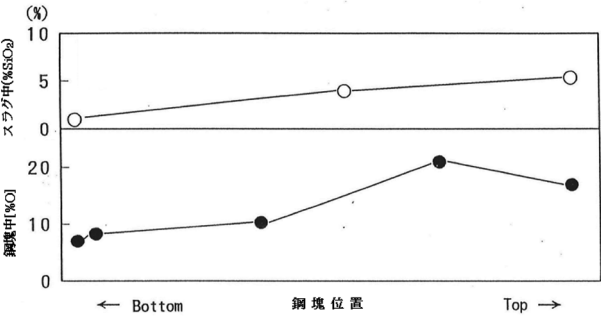


図9 ESR溶解中の鋼中 [O] とスラグ中 (SiO₂) の変化

低下し [%O] が上昇している。そのため、この大気酸化を防ぐために、完全密閉容器内で溶解が可能なVSRを開発した。

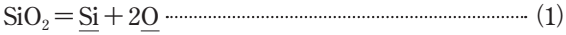
4.2 VSRの概要

図10にVSRの設備概要を示す。溶解は完全に密閉した容器内で行われ、スティンガーロッド (電極把持器) はダイナミックシールを通して制御される。電源は交流で電気的中性を保っている。溶解スタートは未溶解スラグを用いるコールドスタート方式で、密閉状態でスラグ追加装入が可能なホッパーを備えている。溶解前に1Pa以下まで完全に排気した後、不活性ガスを所定の圧力まで導入し溶解を開始する。これは高真空のまま溶解すると、スラグがボイルし溶解制御が

できなくなるためである。

4.3 VSRにおける脱酸

一般にESRにおける脱酸はSi脱酸が主体であると考えられており、下記の平衡反応に従う。



$$\log K = -30110/T + 11.40 \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2) 式より、

$$K = a_{\text{Si}} + a_{\text{O}}^2 / a_{\text{SiO}_2} = (f_{\text{Si}} \cdot [\% \text{Si}] \cdot f_{\text{O}}^2 \cdot [\% \text{O}]^2) / a_{\text{SiO}_2} \dots\dots\dots (3)$$

(2), (3) 式より、

$$\log [\% \text{O}] = (\log (a_{\text{SiO}_2} / (f_{\text{O}}^2 \cdot f_{\text{Si}} \cdot [\% \text{Si}])) - 30110/T + 11.40) / 2 \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式より、この平衡反応は a_{SiO_2} が小さい程 [%O] が低減する反応であることが分かる。図11にVSRの脱酸実績を示

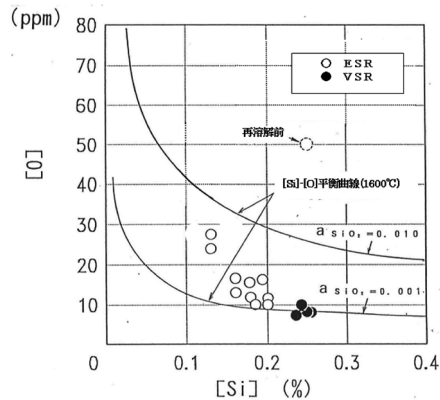
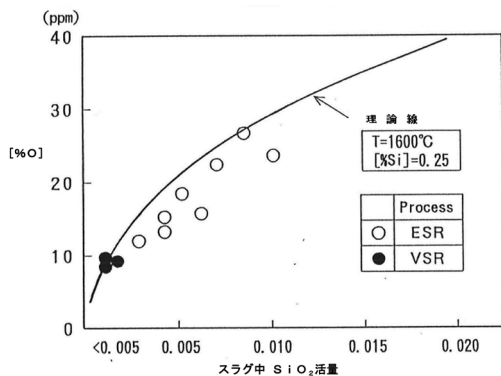


図11 VSRの脱酸実績（オーステナイト系ステンレス）

図12 鋼中 [O] とスラグ中 SiO_2 活量の関係（オーステナイト系ステンレス）

す。従来のESRではSiがロスして $[\%O]$ が20ppm以上までバラついていたものが、VSRでは溶鋼中のSiのロスがほとんどなく10ppm以下に安定している。これを a_{SiO_2} と $[\%O]$ の関係として示したのが図12である。(4) 式による理論線にそれぞれの実績をプロットしている。ESR、VSRとも理論線にほぼ従っており、VSRはスラグ中の a_{SiO_2} を低減できたことで低 $[\%O]$ を達成したことが分かる

4.4 溶解中のスラグ中 SiO_2 濃度の変化

ESRとVSR後のスラグ中の $(\% \text{SiO}_2)$ を比較すると、ESR後は14.7%、VSR後は1.4%と大幅に減少した。溶解前にスラグ原料から持ち込まれた $(\% \text{SiO}_2)$ は0.8%であるので、残りは溶解中の脱酸生成物と電極中媒介物による増加分である。VSRの $(\% \text{SiO}_2)$ 増加分は0.6%にすぎないが、ESRは14%も増加しており、これはESR溶解中の大気酸化に起因するものであり、VSRは大気酸化を大幅に抑制している。

4.5 VSRによる非金属介在物低減の効果

図13に、各製造プロセス毎の非金属介在物粒径分布の比較を示す。通常の電気炉製鋼法に比較してESR材は介在物個数が半分近くに低減するが、VSRによりさらに減らすことが可

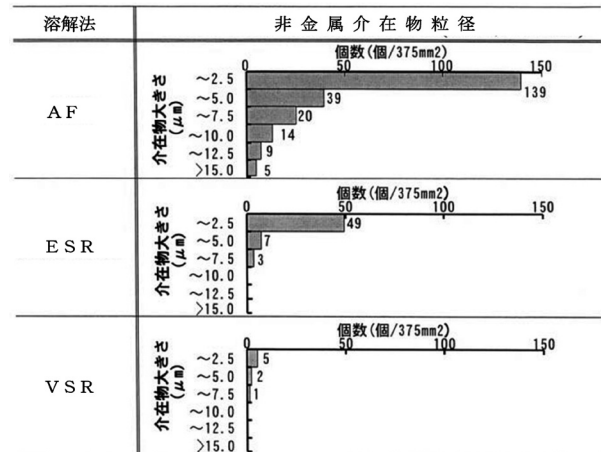


図13 VSRによる非金属介在物低減効果（オーステナイト系ステンレス）

能である。

4.6 まとめ

VSRは、雰囲気容器内でESR溶解することにより大気を完全に遮断することが可能であり「大気による酸化」というESRの課題を克服する技術である。当社では、清浄鋼の製造には欠かせないプロセスとなっている。

5 おわりに

以上、ピンホールの発生メカニズムとリスクを下げる製造技術について述べてきたが、その原理的に、現実にはリスクをゼロにすることは困難である。このため、鏡面の要求レベルと鋼材のリスクを判断して鋼材を選択することが重要になる。それぞれの鋼材のリスクを定量評価することができれば、適切な鋼材選択の助けになるはずである。鋼材の非金属介在物や偏析については、ある程度の定量評価も可能である。しかし、鏡面の評価が、実際には目視による官能検査が一般的であるために評価者によるバラツキが大きく、鋼材の評価結果と結びつけることが難しい。

鏡面評価の定量化技術は、さらなる製造技術の追求とともに今後の課題であると考えている。

参考文献

- 1) 笹山新一：第143・144回西山記念講座，日本鉄鋼協会編，(1992)，223.
- 2) 井ノ口貴之：電気製鋼，78 (2007)，361.
- 3) 関谷篤，中山傑，竹鶴隆昭：電気製鋼，66 (1995)，47.
- 4) 齋藤克倫，浅野怜，松谷博司：電気製鋼，80 (2009)，151.

(2017年7月31日受付)