

技術報告

UDC 620.192.45 : 669-147

連続铸造鋼片の大型非金属介在物の生成原因*

白岩 俊男**・荒木 泰治***

藤野 允克**・松野二三朗***

The Origin of Large Nonmetallic Inclusions in the Continuously Cast Steel Billets

Toshio SHIRAIWA, Taiji ARAKI,
Nobukatsu FUJINO, and Fumio MATSUNO

Synopsis:

The origins of large nonmetallic inclusions in continuously cast plain carbon steel billets have been investigated in relation to the mould scums. Three kinds of synthetic scums containing tracer elements of La, Ce or Ca individually are added into the liquid plain carbon steel in the continuous casting mould poured by means of an open nozzle, and inclusions in the billets are analysed in electron probe microanalyser. The results obtained are as follows.

- 1) In the inclusions larger than about 150 μ in diameter, tracer elements are observed, but none in those smaller than about 100 μ in diameter.
- 2) The compositions of large inclusions are similar to those of mould scums.
- 3) From these results it is concluded that most of large inclusions originate from mould scums.

(Received Jan. 22, 1972)

1. 緒 言

普通鑄込を行なった連続铸造鋼片には大型介在物が多く認められるがこれについての報告は森ら¹⁾の報告があるだけで十分解明されてはいない。

湾曲型連続铸造機で鑄込まれた 110 mm ϕ 鋼片では、大型介在物は上面側（曲率の小なる側）に集中して認められる。著者らはこれら大型非金属介在物の生成原因を確かめるべく、小倉製鉄所の 6 ストランド 110 mm ϕ 連続铸造機²⁾での普通鑄込の際に非放射性的のトレーサー元素 (La, Ce および Ca) を含有せしめた合成スカムを鑄型内に添加し、鋼片中の介在物を EPMA で分析することによって鋼片中の非金属介在物と鑄型内スカムとの関係、とくに大型非金属介在物との関係を解析した。その結果、鑄型内スカムが大型非金属介在物の源となつていことを確かめたので報告する。

2. 実 験

2.1 110 mm ϕ 連続铸造鋼片中の大型介在物の調査

0.4% C, Al 細粒鋼の鋼片について、鋼片中の大型介在物の分布組成の調査を行ない、大型介在物の実態を把握した。

2.2 合成スカムトレーサー実験

大型介在物の調査により、普通鑄込(オープンノズル、

オイルキャストング)の場合に多く認められる大型介在物は、鑄型内スカムを起源としていることが予想されたので、鑄型内に合成スカムを添加して、介在物と鑄型内スカムとの関係を調べる実験を行なった。

2.2.1 トレーサー元素を含む合成スカム

鑄込中に鑄型内に添加した合成スカムの組成を Table 1 に示す。合成スカムはトレーサー元素として La, Ce, Ca をそれぞれ含む 3 種類のマンガシリケートであり、添加したトレーサー元素はいずれも非放射性的である。合成スカムのベースをマンガシリケートとしたのは、実験を行なった鋼種の場合鑄型内で生成するスカムがマンガシリケートであるためである。

合成スカムは試薬 (いずれも JIS 1 級) を Table 1 に示した組成になるように秤量し、よく混合後 1250°C にて 1hr 空気中において焼結させ、その後再び粉碎混合することによって作成した。これらの合成スカムについては別途溶融温度を測つたがいずれも 1300°C くらいであった。

2.2.2 合成スカムの鑄型内添加

小倉製鉄所の 110 mm ϕ コンキャスト S 型連続铸造機

* 昭和45年4月本会講演大会にて発表
昭和47年1月22日受付

** 住友金属工業(株)中央研究所 理博

*** 住友金属工業(株)中央研究所

Table 1. Chemical compositions of added synthetic scums.

Synthetic Scum	MnO	SiO ₂	La ₂ O ₃	CeO ₂	CaO
A	54.0	36.0	10.0	—	—
B	54.0	36.0	—	10.0	—
C	45.9	39.1	—	—	15.0

で合成スカムの添加実験を行なった。合成スカムの添加を行なった際の鋳込鋼種は機械構造用中炭素鋼 (C : 0.30, Si : 0.31, Mn : 0.86, S : 0.015, Al : 0.03) で、連々鋳第2チャージ目の鋳込開始 10 min 後から合成スカムの添加を開始した。合成スカム添加のタイムスケジュールを Fig. 1 に示すが第2チャージ目の鋳込開始 10 min 後から合成スカムの添加を開始し、A, B, C の順にそれぞれ 10 min 添加、10 min 添加なしのくり返して添加を行なった。

合成スカムの添加 3 min 前および添加開始 5 min 後には、鋳型内に浮遊しているスカムを採取した。

合成スカムは添加するとすぐに溶解し、鋳型内には溶鋼から生成するスカムと合成スカムが融合して浮遊していることが観察された。しかるに鋳込時には絶えずスカムの除去を行なっているため合成スカムの添加は少量ずつ絶えず行なうことにし、添加期間中に添加しない時期に比べ鋳型内スカムがあまり多くならないようにし、しかも合成スカムが常に鋳型内に存在するようにした。

鋳込法はオープンノズル使用、オイルキャストリングの普通鋳込であり、鋳込速度は平均 2.3m/min で添加実験中に大きな変動はなかつた。

鋳片には第2チャージ目の鋳込開始とともに、一定時間ごとにマーキングを行なった。供試材は 12.3m の定尺に切断した端部から採取し、介在物を調査した。

2.2.3 鋳型内スカムおよび介在物の調査

Fig. 1 に示したタイムスケジュールで採取した鋳型内スカムはマイクロ観察、X線回折および EPMA 分析で調査した。また鋳片中の介在物については鋳片の断面を研磨し、マイクロ観察後 EPMA で介在物の組成分析を行なった。

3. 実験結果

3.1 鋳片中に認められる大型非金属介在物

110 mm φ 連続鋳造鋳片 (0.4% C, Al 細粒鋼) 中の大型非金属介在物を調査したところ、オープンノズルを使用しオイルキャストリングを行なった普通鋳込鋳片の場合には、Fig. 2 に示すように鋳片の上面 (湾曲型連続鋳造機の曲率の小さな側) から 10~25 mm 内部に肉眼で見える 200~400 μφ の大型非金属介在物が集中していることが観察された。顕微鏡観察による介在物の観察でも普通鋳込鋳片の場合 100 μφ をこすような大型のもの

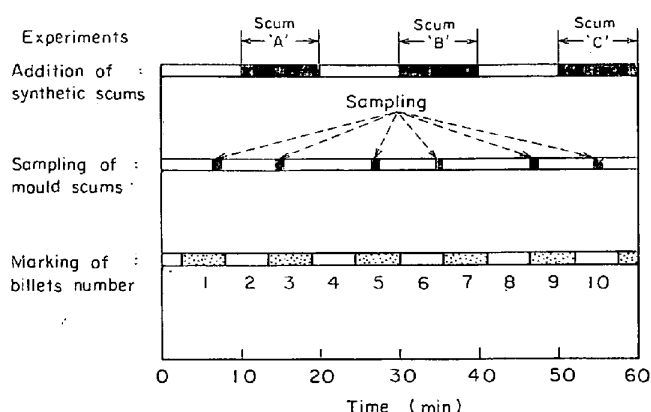


Fig. 1. Schematic illustration of schedule of experiment.

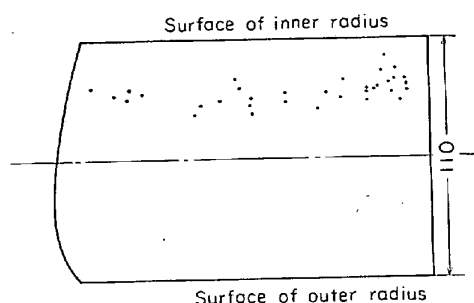


Fig. 2. Schematic illustration of the distribution of large inclusions in the billet (open nozzle, oil casting).

は鋳片の上面側半分だけに認められ、下面側半分の介在物は粒径の 1~5 μ クラスタ状 Al₂O₃ であることが認められた。

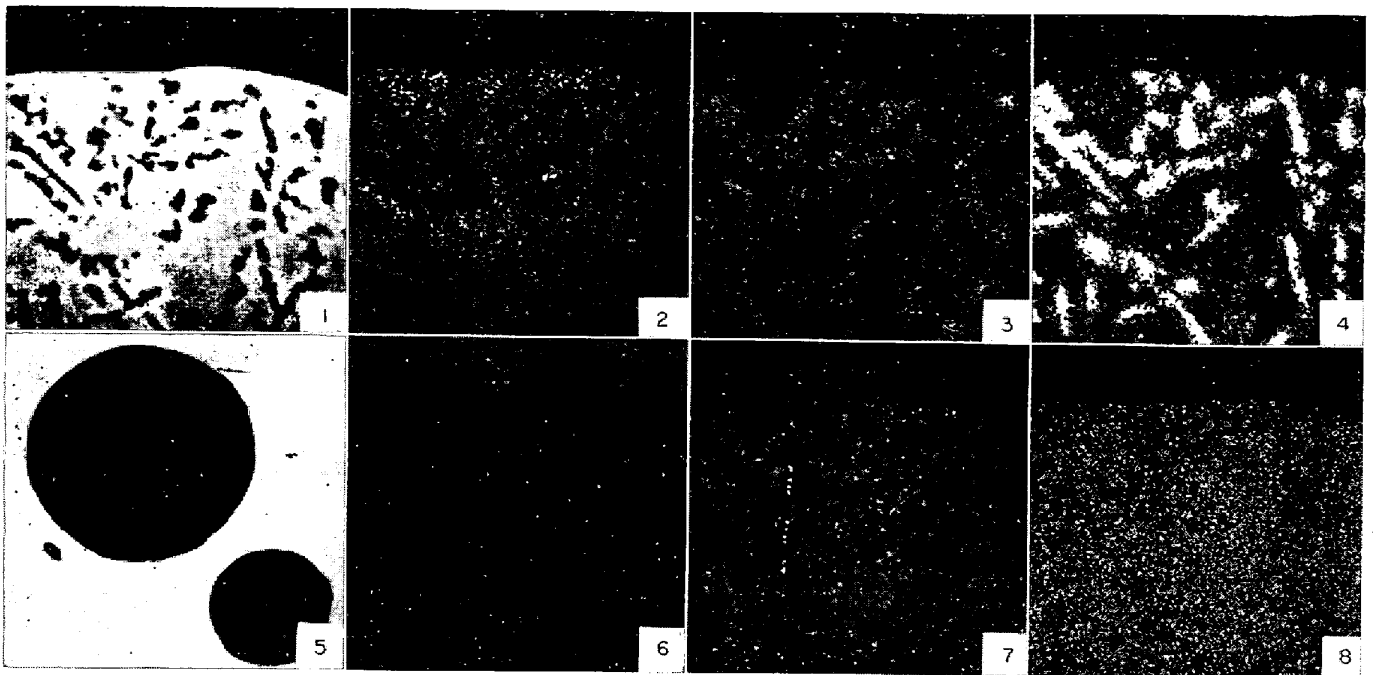
大型非金属介在物の一例を Photo. 1 に示すが、普通鋳込鋳片中に認められる大型介在物はいつの場合、ガラス質だけからなるものかあるいはガラス中に晶出結晶を伴うかのいずれかである。

このような大型介在物が多数認められるのは普通鋳込の場合に限られ、同一溶鋼をエクステンドノズルを用いて鋳込んだ場合の介在物は粒径 1~5 μ の Al₂O₃ クラスタを主体とするものであり、大型介在物とは組成的に異なることなどから、大型介在物の源として、鋳型内のスカムの巻き込み、たたき込みが考えられた。

3.2 合成スカムトレーサー投入実験結果

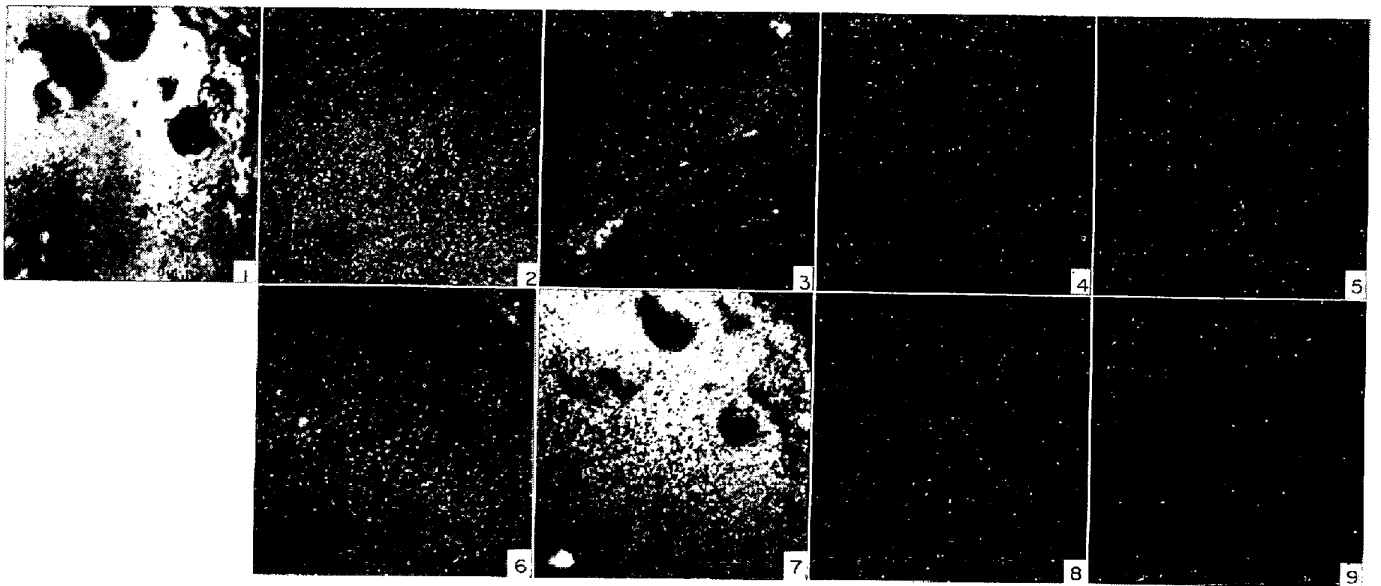
3.2.1 鋳型内スカム調査結果

合成スカム A の鋳型内添加前に採取した鋳型内スカムの EBS 像 (Electron Beam Scanning Image) を Photo. 2 に示す。Photo. 2 に示すように実験を行なった中炭素鋼の普通鋳込の際に生成する鋳型内スカムはマンガンシリケート中に若干の FeO, Al₂O₃, TiO₂ を含むものである。鋳型内スカムの採取は鉄棒の先端に付着させて鋳型から取り出されることによつて行なわれているので急冷されているためガラス質となつていた。Photo. 2 の EBS 像で丸く見える斑点は空洞である。



1: SC ($\times 880$), 2: Si, 3: Al, 4: Ti, 5: optical ($\times 100$), 6: Fe, 7: Mn, 8: O (5/9)

Photo. 1. Electron scanning images and optical micrograph of large inclusion in 110 mm ϕ Si killed steel billet. (Open nozzle and oil casting).



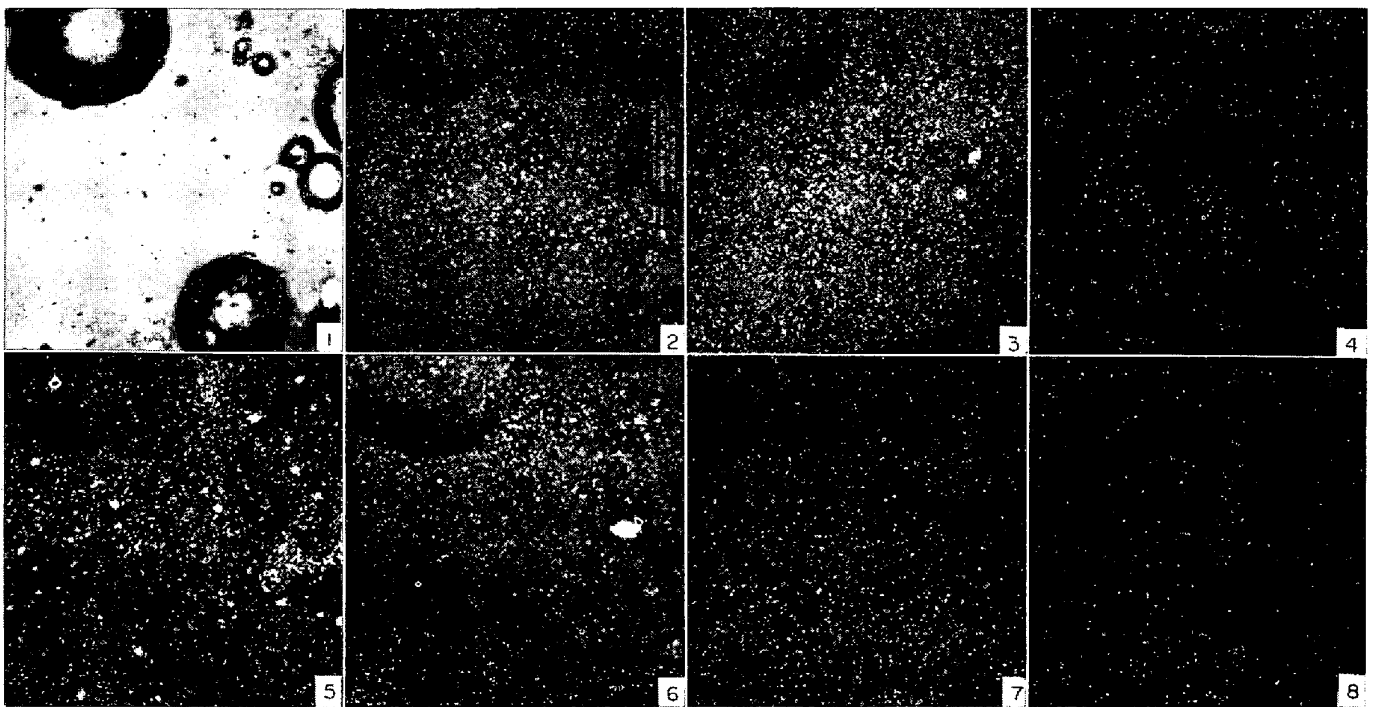
1: BSE ($\times 220$), 2: Mn, 3: Al, 4: La, 5: Ca, 6: Fe, 7: Si, 8: Ti, 9: Ce (3/7)

Photo. 2. Electron scanning images of mould scum obtained before the addition of synthetic scum 'A'.

合成スカムの添加中に採取した鑄型内スカムの EBS 像を Photo. 3, 4, 5 に示す。Photo. 3 に示したのは La 入合成スカムの添加中に採取したものであり、La が均一に分布した Mn-Al-Fe-La-Si-O である。

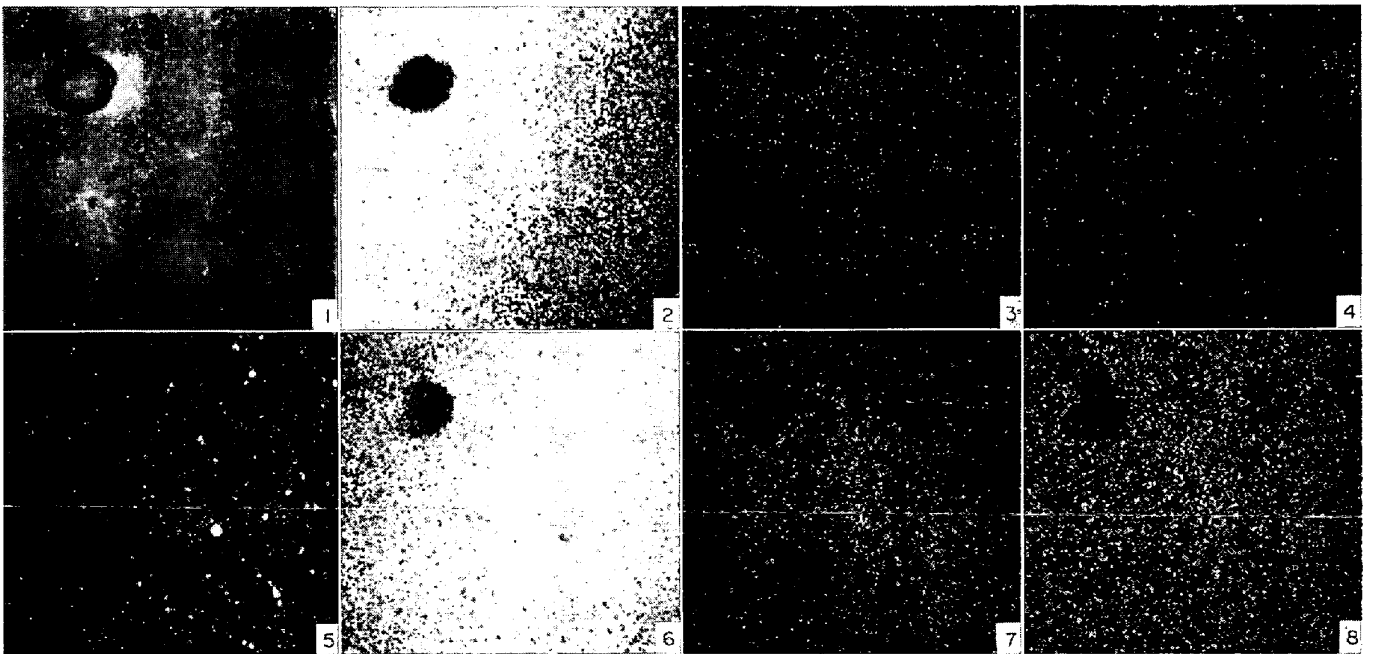
Photo. 4, 5 は Ce および Ca をトレーサー元素として含有せしめた合成スカムの添加中に採取した鑄型内スカムの EBS 像であるが Mn-Al-Fe-Si-O 中に Ce および Ca が均一に分散していることが明らかである。

以上のことから合成スカム添加中の鑄型内スカムにはトレーサー元素がほぼ均一に分散していることが明らかとなったが、どの程度の濃度で入っているかを調べるために Ce をトレーサー元素として含む合成スカム C の添加時に採取した鑄型内スカムの定量分析を EPMA で行なった。その結果を Table 2 に示すが CeO_2 は添加前の 10% から 8.0% になっていた。このことは合成スカムが自然に発生するスカムと融合しあつて濃度がうすめられていることを示している。



1: SC (×220), 2: Mn, 3: Al, 4: Ce, 5: Fe, 6: Si, 7: La, 8: Ca (5/9)

Photo. 3. Electron scanning images of mould scum obtained during the addition of synthetic scum 'A'.



1: SC (×220), 2: Si, 3: Ca, 4: La, 5: Fe, 6: Mn, 7: Al, 8: Ce (5/9)

Photo. 4. Electron scanning images of mould scum obtained during the addition of synthetic scum 'B'.

Table 2. Results of quantitative analysis of mould scum obtained during the addition of synthetic scum B.

MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	FeO	CaO	CeO ₂
45.8	3.4	39.0	0.4	3.5	0.1	8.0

3.2.2 鑄片中の非金属介在物の調査結果

介在物の調査に供した鑄片は定尺に切断した端部から 200 mm だけ切り出したものである。合成スカムの添加時期とピレット番号は Fig. 2 に示してあるが、これらの供試材について EPMA で介在物にトレーサー元素が含まれているか否かをひとつおり調べた結果、ピレット No 3, 6, 10 にトレーサー元素である La, Ce, Ca を

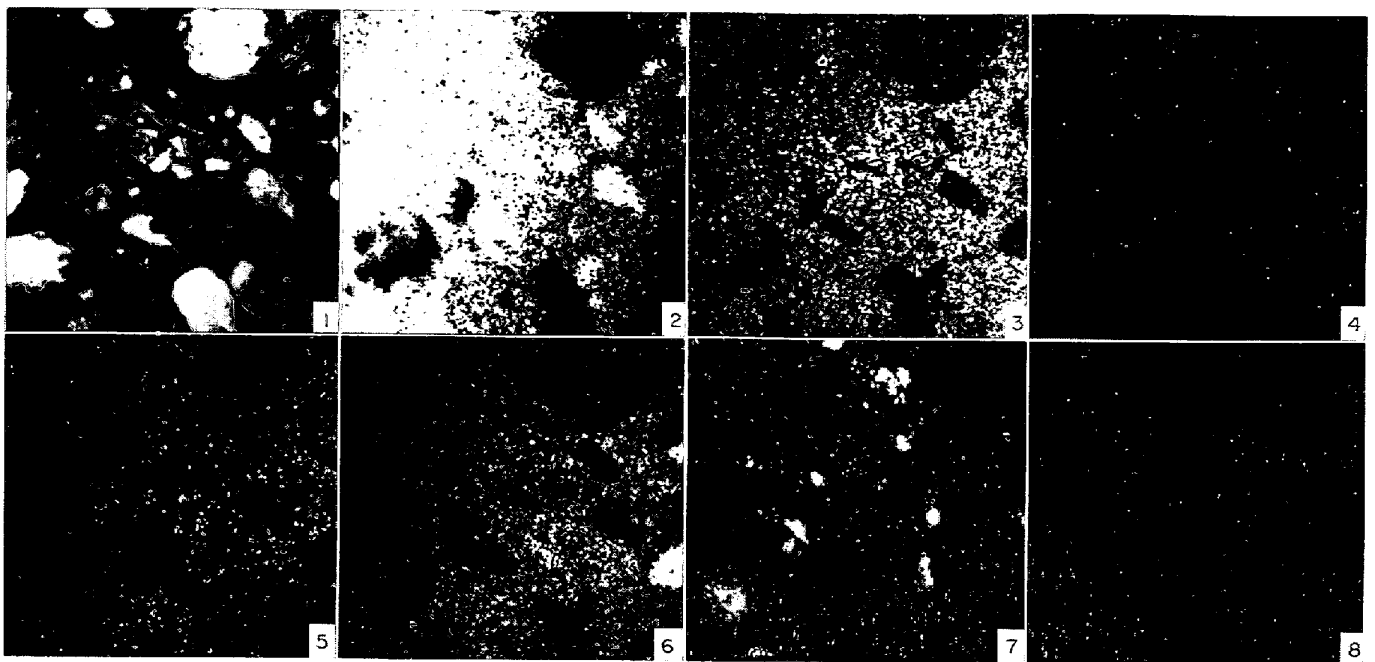
1: SC ($\times 220$), 2: Si, 3: Ca, 4: La, 5: Fe, 6: Mn, 7: Al, 8: Ce (5/9)

Photo. 5. Electron scanning images of mould scum obtained during the addition of synthetic scum 'C'.

Table 3. Results of qualitative analysis of inclusions by EPMA.

Added synthetic scum	Billet No	Diameter of inclusion (μ)	Composition of inclusion
A MnO : 54% SiO ₂ : 36 La ₂ O ₃ : 10	3	290	Mn-Al-Si-La-O + SiO ₂
		272	Mn-Si-La-(Al)-O + SiO ₂
		54	Al-Mn-Si-(Ti)-(Ca)-O-S
		28	Al-Mn-Si-(Ti)-(Ca)-O
		21	Al-Mn-Si-(Ti)-(Ca)-O
B MnO : 54 SiO ₂ : 36 CeO ₂ : 10	6	168	Mn-Si-Ce-(Ti)-O + SiO ₂
		195	Mn-Si-Ce-(Al)-O + SiO ₂
		78	Mn-Si-Al-(Ti)-O + SiO ₂
		44	Al-Mn-Si-(Ca)-O-(S)
		37	Al-Mn-Si-(Ca)-O
		14	Al-Mn-Si-(Ca)-O
C MnO : 45.9 SiO ₂ : 39.1 CaO : 15.0	10	147	Mn-Si-Al-Ca-(Ti)-O + SiO ₂
		32	Mn-Al-Si-(Ti)-O
		28	Mn-Al-Si-(Ca)-(Ti)-O
		15	Mn-Al-Si-(Ca)-Ti-O

() : Minor element

それぞれ含む介在物が見い出されたので、これらについて詳細に調査を行なうこととした。

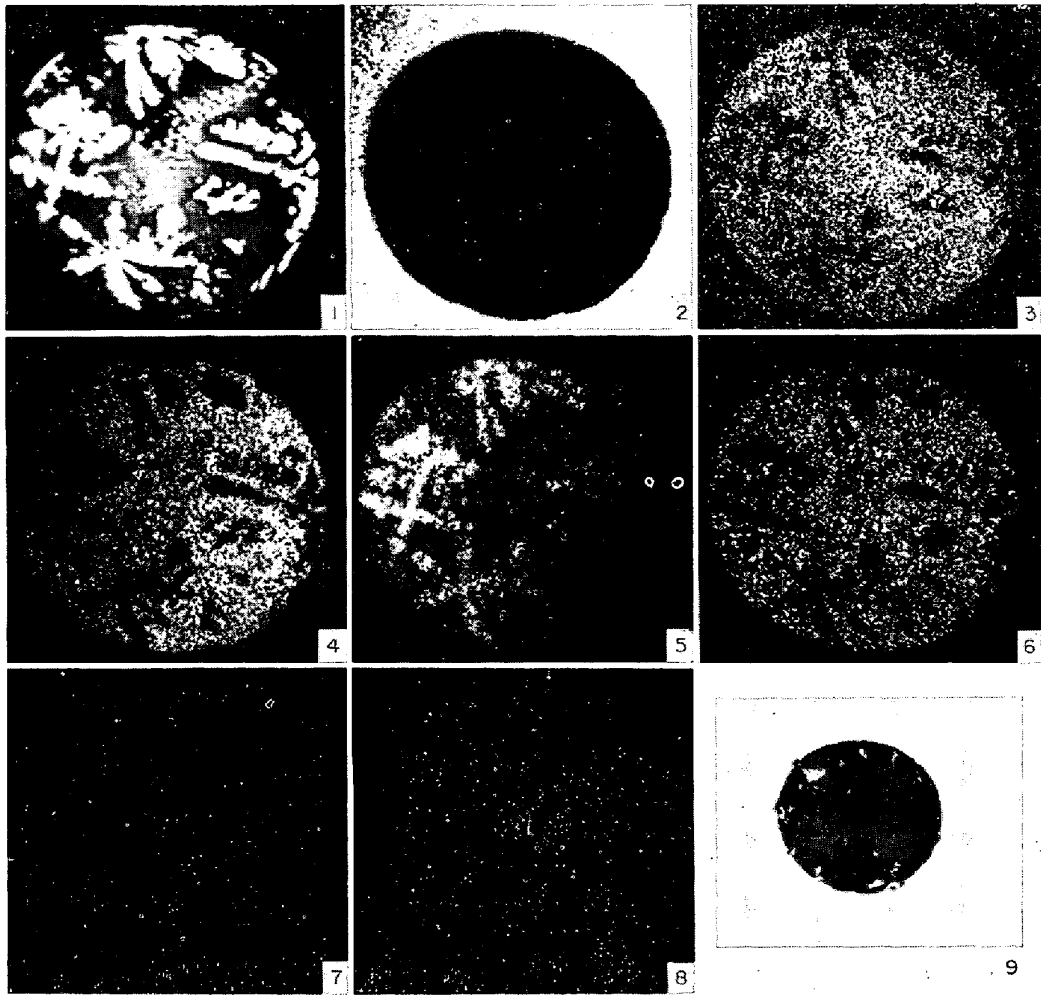
Table 3 に No 3, 6, 10 ビレット中の介在物の EPMA による分析結果を示す。この表からトレーサー元素の検出された介在物はいずれも大型介在物であることがわかる。

Photo. 6, 7, 8 に No 3, 6, 10 ビレット中の大型介在物の EBS 像を示す。Photo. 6 に示したのは No 3 ビレット中に存在する直径 290 μ の介在物であるが、トレーサー元素である La が介在物のガラス質中にほぼ均一に入っていることが明らかである。Photo. 6 に示した介

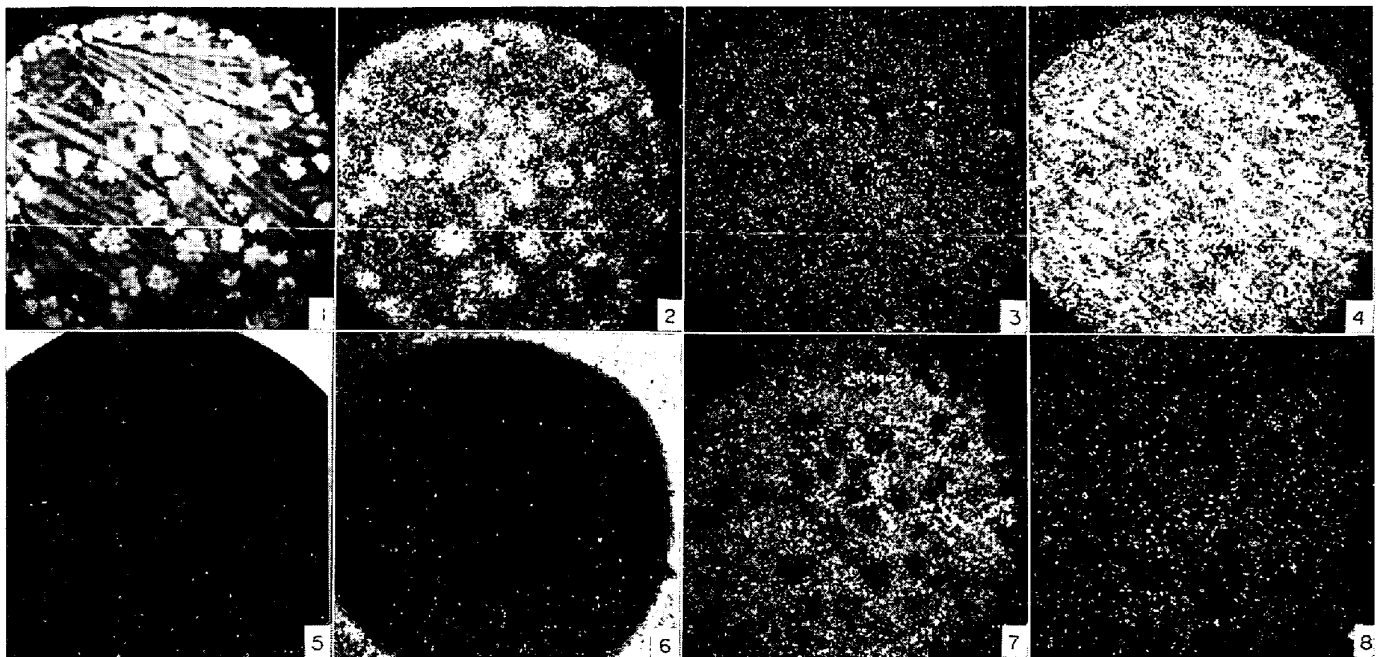
在物は顕微鏡写真でも明らかなようにガラス質と結晶質とから成るが、EBS 像から結晶質は SiO₂ であり形態からクリストバライトと考えられる。ガラス質は Mn-La-Si-O で若干の Al を含んでいる。

Photo. 7 に示したのは No 6 ビレット中に観察された直径 168 μ の大型介在物であるがこの介在物も結晶質とガラス質とから成る。結晶質は SiO₂ でクリストバライトと考えられる。ガラス質は若干の Al を含有した Mn-Ce-Si-O でありトレーサー元素の Ce がかなりの濃度で均一に分布していることが明らかである。

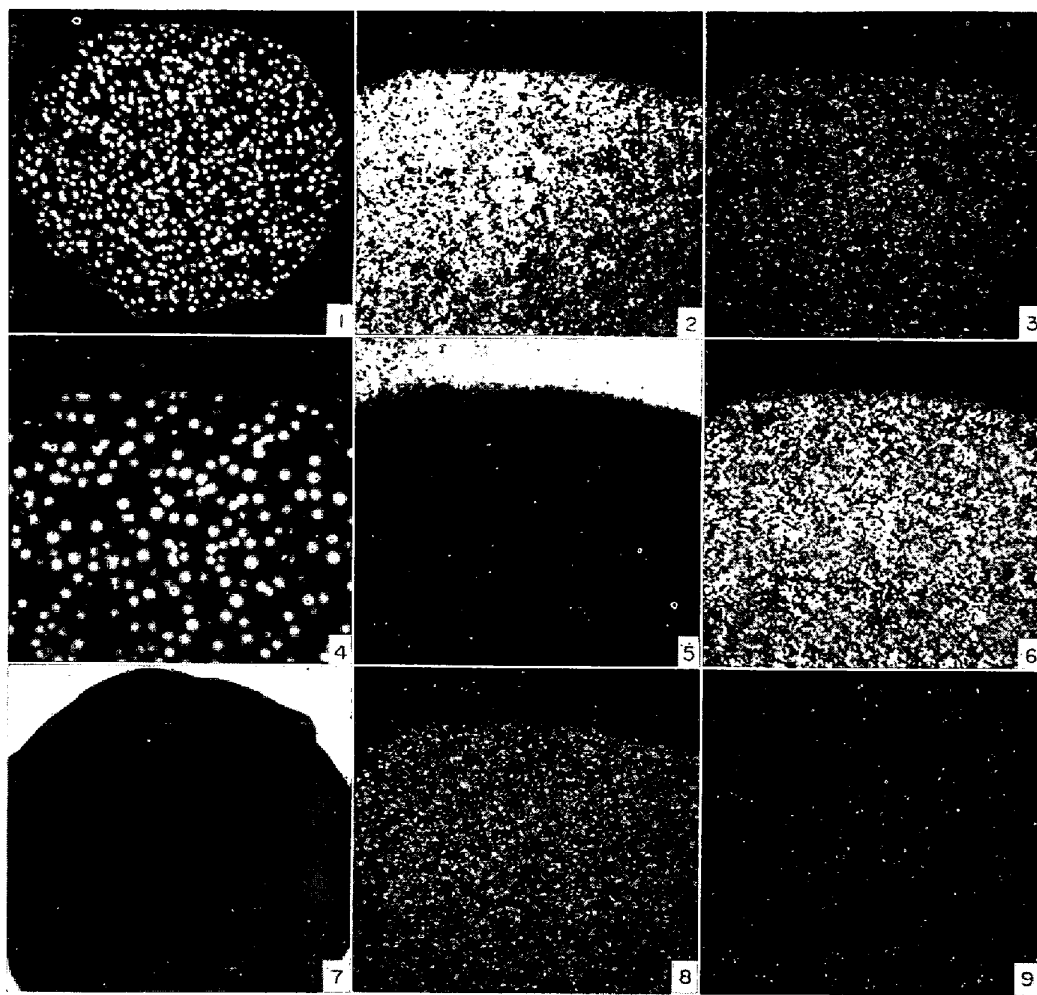
Photo. 8 に示したのは No 10 ビレット中に観察され



1 : SC ($\times 220$), 2 : Fe, 3 : Al, 4 : Mn, 5 : Si, 6 : La, 7 : Ca, 8 : Ti, 9 : optical ($\times 100$) (5/9)
 Photo. 6. Electron scanning images and optical micrograph of large inclusion observed in the No 3. billet.



1 : SC ($\times 220$), 2 : Si, 3 : Al, 4 : Ce, 5 : optical ($\times 500$), 6 : Fe, 7 : Mn, 8 : Ti (5/9)
 Photo. 7. Electron scanning images and optical micrograph of large inclusion observed in the No 6 billet.



1: S ($\times 220$), 2: Si, 3: Al, 4: S ($\times 880$), 5: Fe, 6: Mn, 7: optical ($\times 500$), 8: Ca, 9: Ti (5/9)
 Photo. 8. Electron scanning images and optical micrograph of large inclusion observed in the No 10 billet.

た直径 147μ の介在物であるがこの介在物も小さな結晶質を伴ったガラス質からできている。この場合も結晶質は SiO_2 (クリストバライト) である。ガラス質は Mn-Ca-Al-Si-O でありトレーサー元素である Ca がかなりの濃度でほぼ均一に入っていることが認められる。

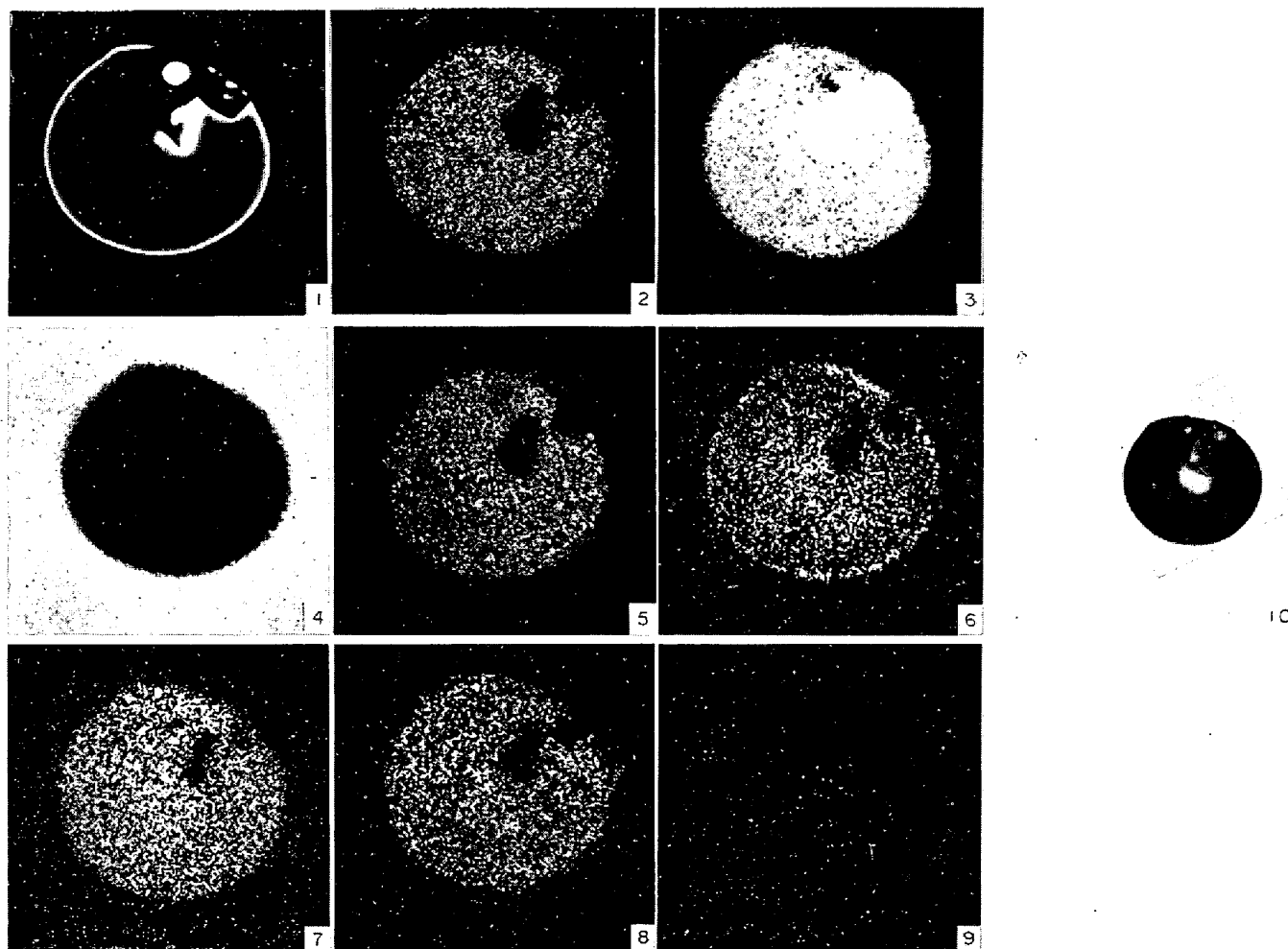
Table 3 に示した EPMA による分析結果からわかるように分析を行なった直径 147μ 以上の大型介在物にはすべてトレーサー元素がガラス質部にほぼ均一に入っていることが観察された。鑄片中にはこのような大型介在物以外に直径が数十 μ あるいはそれ以下という非金属介在物が存在するわけであるが、これからはトレーサー元素は検出されなかつた。

大型介在物以外の介在物の分析例として Photo. 9, 10, 11 に No 3, 6, 10 ビレット中に存在する介在物の EBS 像をそれぞれ示す。Photo. 9 に示したのは No 3 ビレット中に存在する直径 54μ の介在物である。この介在物はガラス質と結晶質とから成り、結晶質は EBS 像から明らかなように Al_2O_3 である。ガラス質は Mn, Al, Ti, Ca, Si, O の硅酸塩質である。S の X 線像か

ら明らかなように介在物の周辺および介在物中には硫化物も共存していることが認められる。No 3 ビレット中の大型介在物中には Photo. 6 に示すようにトレーサー元素である La が検出されたのであるが、この例に示すように小型介在物には La は検出されなかつた。

Photo. 10 に示した介在物は No 6 ビレット中に観察された直径 37μ の介在物である。この介在物はガラス質であり Mn-Al-Si-O に Ca, Ti が若干固溶されたものである。No 6 ビレットの大型介在物からは Photo. 7 に示すようにトレーサー元素である Ce が明りように検出されたのに対し、この例のような小型介在物からはトレーサー元素である Ce は検出されなかつた。

Photo. 11 に示す介在物は No 10 ビレット中に存在する直径 28μ の介在物である。この介在物はガラス質から成り、組成は Mn-Al-Ca-Ti-Si-O である。No 10 ビレットの鑄込の際には Ca 入合成スカムを鑄型内に添加したのであるが大型介在物からは Ca が Photo. 8 に示すように Ca が明りように検出されている。しかるに中、小型介在物にも Photo. 9~11 に示すように Ca が



1: SC (×880), 2: Mn, 3: Al, 4: Fe, 5: Si, 6: S, 7: Ti, 8: Ca, 9: La, 10: optical (×500) (5/9)
 Photo. 9. Electron scanning images and optical micrograph of small inclusion observed in the No 3 billet.

Table 4. Results of quantitative analysis of nonmetallic inclusions observed in the No 6 billet.

Size in diameter	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	TiO ₂	CaO	CeO ₂
195 μ	50.8	2.9	36.5	1.8	1.3	0.3	6.4
78 μ	58.0	6.4	31.1	0.8	2.7	0.2	—
37 μ	28.0	40.0	26.1	1.9	2.9	1.3	—

検出されている。Photo. 9, 10 の介在物は鑄型内に添加した合成スカムに Ca が入っている場合のものであり、この場合の Ca は明らかに合成スカムを起源とするものではなく、自然に入ってくるものである。Ca はこのようにその起源は明らかでないが自然に介在物に入るので、La, Ce に比べるとトレーサー元素としては劣るが、自然に入ってくる Ca は CaO に換算して約 1% くらいであり、大型介在物の Ca 濃度とは明りように区別できるので実験上支障はなかつた。

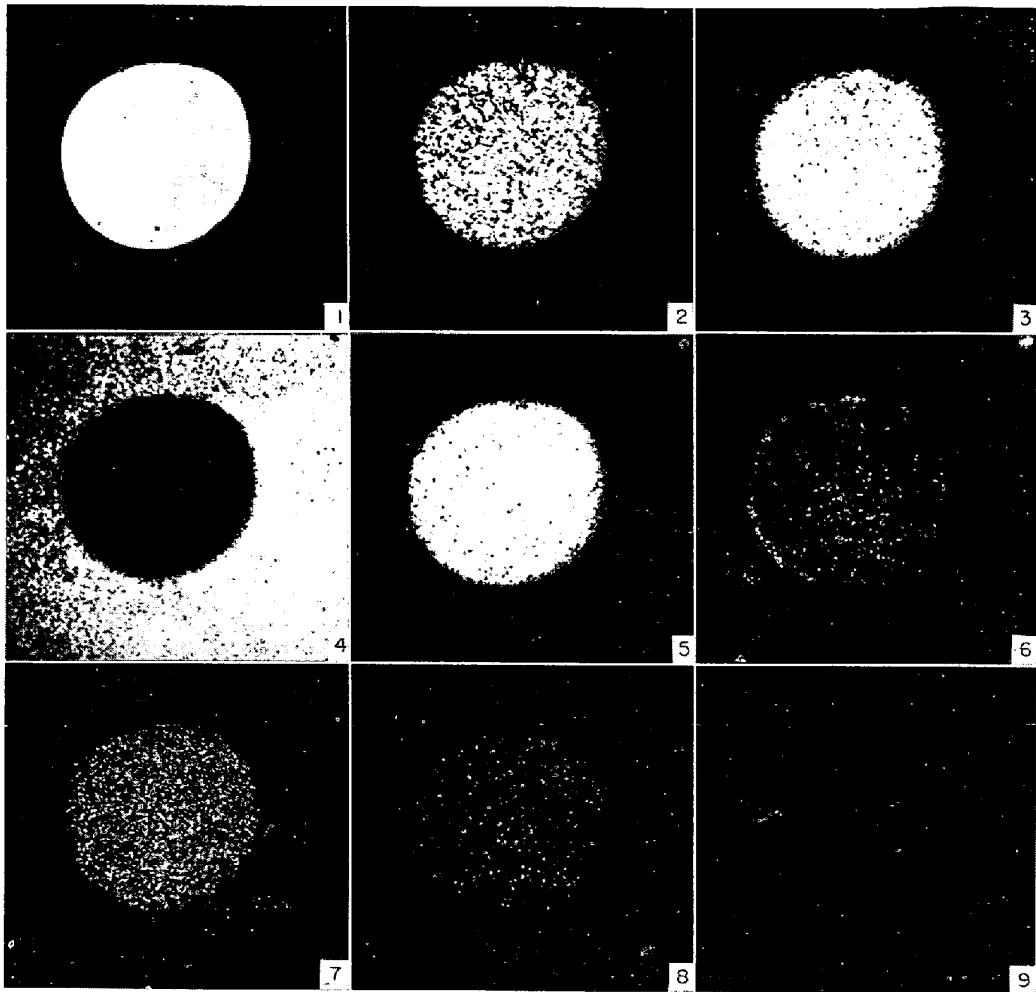
No 6 ビレット中の大型介在物のガラス質部分および中、小型介在物のガラス質部の定量分析の結果を Table 4 に示す。大型介在物には CeO₂ が 6.4% 含まれてお

り Table 2 に示した鑄型内スカムの組成と比較すると両者の組成はよく類似していることがわかる。

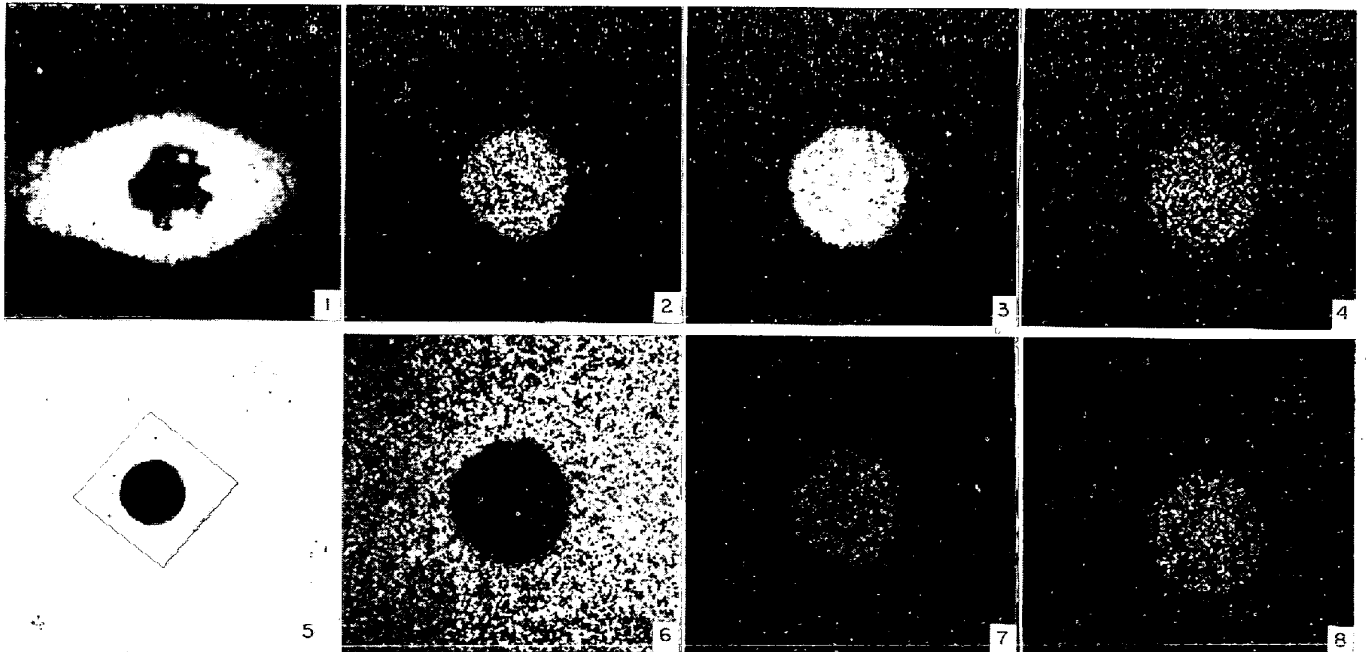
また中、小型介在物中に含まれている Ca であるが CaO で約 1% くらいまでであることがわかつた。

4. 考 察

連続铸造の場合、本研究の場合のような 110 mm φ 鑄片のような小断面積鑄片に大型非金属介在物が多いことは森らりによつても指摘されているがその原因は連続铸造という鑄込法が非金属介在物の浮上分離に対して不利な条件を備えていることにあると考えられる。連続铸造の場合には鋼塊法と異なつて鑄片が下方に引き抜かれる



1: SC (×880), 2: Mn, 3: Al, 4: Fe, 5: Si, 6: S, 7: Ti, 8: Ca, 9: Ce (5/9)
 Photo. 10. Electron scanning images of small inclusion observed in the No 6, billet.



1: SC (×880), 2: Si, 3: Al, 4: Ca, 5: optical (×500), 6: Fe, 7: Mn, 8: Ti (5/9)
 Photo. 11. Electron scanning images and optical micrograph of small inclusion observed in the No 10 billet.

ために浮上速度が見かけ上小さくなること、鋼の凝固速度が鋼塊法に比べ速いことが介在物の浮上分離性を悪くしていることは容易に理解されることである。森ら¹⁾によればあるいは近似としてストークスの法則で計算すると連続鑄造の場合の浮上分離しうる介在物の直径は、引き抜き速度 4m/min の 80mm ϕ 鑄片ではその限界サイズは 400 μ 以上となり引き抜き速度 1.5m/min の 160mm ϕ 鑄片では 250 μ 以上である。

このように連続鑄造の場合は引き抜かれながら凝固が進行するので介在物が鋼中にたまりやすいと考えられるのであるが、つぎに問題となるのはその起源と生成過程である。鋼塊法の場合の大型介在物については多くの報告^{9)~12)} がなされており次第にその生成機構が明らかにされているが連続鑄造の場合においては報告が少ない。

森ら¹⁾ は大型介在物の生成過程として鋼の凝固中に生成する 2 次脱酸生成物の凝集肥大および溶鋼の空気酸化生成物とかスカムのたたき込みを考慮しており、小断面積鑄片の場合凝固中に凝集肥大したものは少なく、溶鋼の空気酸化生成物とかスカムのたたき込みの割合がより多いと推測している。

本実験の結果から、本実験の鑄込条件すなわちオープンノズル使用オイルキャスティングという条件下では少なくとも 150 μ をこえるような大型介在物の起源としては鑄型内スカムを考えるべきであり、しかも合成スカム添加時の鑄片中の大型介在物でトレーサー元素を含まないものは認められなかつたことから大型介在物のほとんどが鑄型内スカムを起源としていることが明らかとなつた。Table 2 と Table 4 とを比較すると大型介在物の組成は鑄型内スカムとよく類似していることがわかり、大型介在物は鑄型内スカムそのものである可能性が大である。

これらのことから普通鑄込の鑄片中の大型介在物は森ら¹⁾ の推測していることに一致して鑄型内スカムのたたき込み、あるいは鑄型内溶鋼表面層の攪拌によるスカムの巻き込みによつて溶鋼内に入り浮上分離が妨げられるために介在物となつたと考えられる。

これに対して直径が 100 μ 以下の介在物はトレーサー元素が検出されないこと、スカムと比較すると組成が異なることなどから鑄型内スカムとは無関係であると判断される。

大型介在物の分布は上面側に集中して認められるがこれは連続鑄造機が湾曲型であることに原因すると考えられる。広本ら¹³⁾によつても湾曲型の連続鑄造機の場合には上面から約 50mm の位置に大型介在物が集中して存在することが報告されている。この原因は鑄込時に未凝固部分が曲げられるため介在物が上面側に浮上することによつて上面側に集中するためと考えられる。また大型介在物が表面より約 10mm 以上の位置から発生していることは凝固が約 10mm 進行した場所（鑄型の出口付

近)で凝固面が下向きになり浮上してきた介在物が捕捉しやすい状態となつているためと考えられる。

介在物の生成経路の研究にトレーサー元素を使用した研究には RI を使用した報告と¹⁴⁾¹⁵⁾ 出鋼前スラグに非放射性的元素を添加した報告¹⁶⁾ があるが、連続鑄造においてはほとんど見当たらない。本研究で行なつた合成スカム添加法は簡単に実施でき、しかも明りような結果が得られ、ほかにも応用できる有用な方法であると考えられる。

本実験法の問題点として自然に生成してくる鑄型内スカムの物性が合成スカムを添加したことによつて変化し、溶鋼中に入る挙動が異なつてくるのではないかと懸念されるが、自然発生してくる鑄型内スカムも Mn-Si-O 系のものであり、合成スカムと MnO/SiO₂ 比はほとんど類似したものである。このことについてはあまり考慮する必要がない。La₂O₃、CeO₂、CaO はスラグ中に均一に入つており、Table 2 に示した分析値でも 8.0% であるのでスラグの物性を大きく変えることはないと判断される。

3 種類の異なつたトレーサー元素を含有せしめた合成スカムを添加して同様の結果が得られたということは、合成スカムを添加しなくとも鑄型内スカムが大型非金属介在物になつているということが実際に起こつていていると考えられる。

5. 結 言

オープンノズル使用、オイルキャスティングを行なつた、110mm ϕ 連続鑄造鑄片中に認められる介在物とくに大型介在物と鑄型内スカムとの関係を明らかにする目的で、La, Ce, Ca をトレーサー元素として含有せしめた合成スカムを鑄込中に鑄型内に添加し、鑄片中の介在物を EPMA 分析するという合成スカムトレーサー実験を行なつた。

実験は小倉製鉄所のコンキャスト S 型連鑄機で行ない次のような結果を得た。

1) 合成スカム添加時の鑄片中に認められる直径 150 μ 以上の介在物からはトレーサー元素が検出されたが、100 μ 以下の介在物からはトレーサー元素は検出されなかつた。

2) 合成スカム添加時の鑄型内スカムと大型介在物の組成は類似しており大型介在物は鑄型内スカムそのものと判断された。

3) 以上のことから、普通鑄込みを行なつた場合の大型介在物は鑄型内スカムが落下溶鋼流によるたたき込みあるいは鑄型内溶鋼の攪拌による巻き込みなどによつて溶鋼中に入り、連続鑄造の場合溶鋼が下方に引き抜かれること、凝固速度が速いことなど介在物の浮上分離性が悪いために鋼中に介在物としてトラップされたものと考えられる。

文 献

- 1) 森ほか: 鉄と鋼, 56(1970)14, p. 1824
- 2) 岡野ほか: 住友金属, 20(1968)2, p. 192
- 3) 中川: 鉄と鋼, 52(1966)10, p. 1678
- 4) 中川, 百瀬: " , 53(1963)13, p. 1477
- 5) 泉田: " , 53(1967)1, p. 11
- 6) 満尾ほか: " , 53(1967)11, p. 1210
- 7) " : " , 57(1971)3, p. 505
- 8) " : " , 57(1971)6, p. 915
- 9) P. H. SALMON, et al.: JISI, 201(1963)10, p. 863
- 10) A. KOHN, et al.: Rév. Metall., 62(1965)4, p. 311
- 11) 池田ほか: 鉄と鋼, 56(1970)6, p. 708
- 12) 浅野ほか: " , 54(1968)6, p. 643
- 13) 広本ほか: " , 57(1971)11, S 453
- 14) 宮川ほか: " , 54(1968), p. 872
- 15) 森ほか: " , 51(1965), p. 1930
- 16) 永山ほか: " , 56(1970)13, p. 1716