

討 9 50T鋼塊に出現した巨大介在物の生因について

日立製作所 勝田工場 門瀬益雄 ○吉岡一郎
日立研究所 新山英輔

1. 緒言

鍛造用キルド鋼塊に現われる各種の非金属介在物系欠陥の生因とそれらの防止対策については、鍛鋼品を取り扱う者にとってとくに重要な課題の一つであると同時に、これまでも非常に多くの事例の検討結果や研究の成果が報告されている。

本報告は、当工場の50T真空鋳造鋼塊を使用して製造した発電機用軸材に出現した巨大な非金属介在物の性状とその生因に関して検討を行った結果を述べたものである。

2. 鋼塊製造実績の概略

60T塩基性電気炉にて溶解し、60T取鍋に受鋼した後、中間取鍋を介して50T鋳型内に真空鋳造した。鋳型および定盤は鑄鉄製、押湯は金枠内面にシャモット質耐火煉瓦を内張りした煉瓦製である。

材質は表-1に示す通り、0.25% C、3% Ni-Mo-V鋼であって、発電機軸材用の鋼塊である。鋳型内注入時の溶鋼温度はおよそ1550°C、真空度は5段スチームエゼクタにより0.5 mmHg前後であった。

鋳込終了直後にAl系発熱保温剤を押湯内溶鋼面に投入し、さらに電弧加熱を実施した。電弧加熱器は単相交流でその容量は50V-2000A、加熱用電極は黒鉛製で直径6吋である。電弧による加熱は50T鋼塊の場合9時間を予定していたが、鋳込完了後2.5時間の時点で回路の断線のため通電不可能となり、約1時間断電して修理を行ない、3.5時間後に再度加熱を開始した。以上が鋼塊製造実績の概略であるが、電弧加熱が約1時間中断された以外には製造上でとくに重要視するような問題は認められないとして、当鋼塊を次工程に進行させた。

表 1 鋼塊の成分規格と取鍋下分析値(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
成分規格	0.23 0.28	0.15 0.35	≤0.80	≤0.020	≤0.020	≤0.10	≥3.10	≤0.50	≥0.25	≥0.03
分析値	0.25	0.26	0.55	0.007	0.009	0.05	3.28	0.19	0.41	0.11

3. 欠陥の発生状況

本鋼塊を使用した軸材を熱処理前の時点で超音波探傷を実施したところ、鋼塊の底部側に相当する部分に重大な欠陥が内在していることが発見された。製品で検出された欠陥の発生位置と、それを元の鋼塊に引き直してみた場合の状態を、図-1に示す。本軸材の場合、括え込みおよび伸し等の鍛造加工を受けており、鋼塊内部における欠陥部の移動量、変形量を正確に把握することは困難であるが、概略の位置関係は図-1のようになる。すなわち、鋼塊での欠陥の内在位置は、

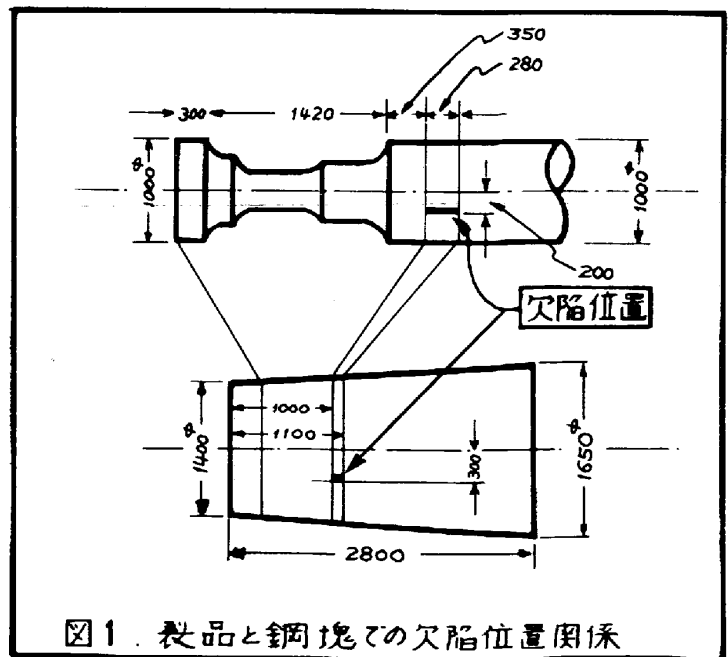


図 1 製品と鋼塊での欠陥位置関係

巻部側より約 1000 mm の高さにあり、かつ、鋼塊の中心軸より外側に約 300 mm 程度偏芯していることになる。このような位置に重大な欠陥が検出された事例は皆無に等しいことから、欠陥発生部分と切断し、その性状の調査と生因の検討を行なってみた。

4. 欠陥の性状

軸材の欠陥発生位置の横断面上には、最大長さで 50 mm にもおよぶ巨大な非金属介在物が出現し、その色調は茶褐色および灰色を呈していた。図-1 に示されているように、鋼塊での介在物の存在位置は、明らかに、鑄込終了後の鑄型、定盤等による急速凝固の領域外であるにも拘らず、溶鋼との比重差が大きく、寸法的にも当然ストークスの法則に近似の状態て溶鋼外に浮上除去されるべきはずの巨大な非金属介在物が捕捉されたということは、介在物系欠陥の生因の究明に関して興味深い問題である。

欠陥部より取り出した介在物の顕微鏡写真を図-2、図-3に、化学分析の結果を表-2に、X線回折の結果を表-3、表-4に示す。

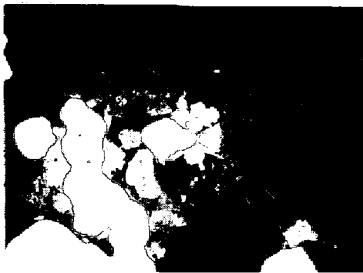


図-2. 介在物: A (茶褐色)
X 400.

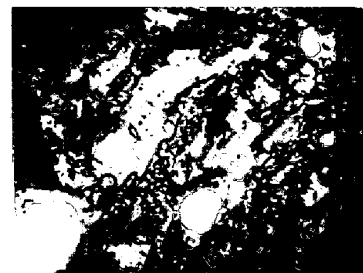


図-3. 介在物: B (灰色)
X 400.

従来から介在物の起源の推定には、まず特徴的な構成成分の検出を行なうのが一般的な手段として行われていたが、こ

のような考え方にもとづいて本介在物を観察してみると、その組成上の特徴はオーに多量に存在する Al_2O_3 成分である。すなわち、図-2 に示す茶褐色を呈するは主体がアルミスピネルであり、図-3 の灰色を呈する方は、アルミスピネルに加えて、かなりの量の $\alpha-Al_2O_3$ の存在が認められる。これまでに我々の取り扱ってきた多くの非金属介在物のうち、真空鑄造鋼塊（脱酸その他の目的で Al を添加することは殆んどない）から検出された比較的大型の介在物のうちで、今回のもののように $\alpha-Al_2O_3$ をはじめとする多量の Al_2O_3 成分を含有している介在物は見当たらない。まれには Al_2O_3 成分の含有量の多い介在物も検出されたことはあるが、寸法的には、どちらかといえは

表 2. 介在物の化学分析結果 (%)

	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	計
介在物: A (茶褐色)	20.0	15.7	37.6	Tr.	7.9	1.4	12.5	95.1
介在物: B (灰色)	17.4	5.8	44.4	Tr.	6.0	4.9	10.9	89.4

表 3. X線回折結果(介在物 A)

(MgFe)O · Al ₂ O ₃	強
$\alpha-Al_2O_3$	弱
MgO · SiO ₂	弱

表 4. X線回折結果(介在物 B)

$\alpha-Al_2O_3$	強
(MgFe)O · Al ₂ O ₃	中
CaO · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	弱

顕微鏡的水準に近いものばかりであった。とくに α - Al_2O_3 の存在からは、本介在物の基本組成の形成段階には、かなりの量の金属 Al が存在しており、それが溶鋼内外の酸素と結合することによって、 α - Al_2O_3 が形成されたものと考え得る。先にも述べたように、本鋼塊の場合は脱酸その他の目的で Al の添加は行なっていないこと、電気炉々中で添加した各種の合金鉄中の Al 含有量からしても量的に関係づけ難いし、炉中スラグを代表する成分である CaO 量が少ないことなどから、残された α - Al_2O_3 およびその他の形で存在する Al_2O_3 成分の考え得る源泉として、押湯部の保温用に投入した Al 系の発熱保温剤に注目してみた。

5. 発熱保温剤の性状

Al 系発熱保温剤の使用前の組成と、これを実験室的に燃焼させた時の化学分析による組成を表-5に示す。また、保温剤を投入し電弧加熱を行なった鋼塊の押湯部より採取したスカムの化学分析の結果を表-6に示す。

表5 保温剤燃焼前後の化学分析結果 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Met. Al	MnO	CaO	MgO	計
保温剤 (燃焼前)	9.50	16.41	6.16	16.37	23.07	0.59	1.74	4.44	78.28
保温剤 (燃焼後)	9.80	46.11	8.30	17.10	7.57	0.54	0.82	5.69	95.93

表6 押湯スカムの化学分析結果 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Met. Al	MnO	CaO	MgO	計
押湯スカム (1)	15.76	51.80		13.75		11.66	1.46	3.56	97.99
押湯スカム (2)	21.72	45.76		10.35		16.45	0.87	3.98	99.13

表によれば、燃焼後の保温剤、押湯スカムともに、全量の約 1/2 に近い量の Al_2O_3 成分を含有しており、それ以外の構成成分の比率についても検出された介在物に非常に近い化学的組成を有していることがわかる。また、実験室的に燃焼させた保温剤のX線回折によれば、スピネル(強)、 α - Al_2O_3 (中)程度の結果が得られており、鉱物組成的にみても検出された介在物に非常に類似したものであると判断できる。

6. 考察

介在物組成等の検討結果から、その源泉は押湯保温剤の燃焼を主体として形成されたスカムと考えられるが、注湯が完了した後に投入した保温剤の燃焼によって形成されたスカムが、鋼塊本体内部のしかも中心部に近い位置に多量に存在したということは、スカムが何らかの機構で凝固過程にある鋼塊の内部に移動(沈降)したと考えるのが最も妥当である。

顕微鏡的寸法の介在物については、初晶に伴われたり、熱対流の影響等で鋼塊のかなり低い位置にまで移動する可能性は十分に考えられるし、そのような現象によると思われる介在物系欠陥の事例の報告も多い。しかしながら、今回検出された介在物の大きさからは、このような理論との関連性には無理がある。これに関して我々の注目した点は2項で記述した電弧加熱の中断と再入という作業

上の問題点である。すなわち、2.5時間後に加熱が中断し、約1時間経過してから加熱を再開したことである。定量的な把握は困難であるが、この1時間の中断の間に押湯上面部にはかなりの程度にまで凝固殻が形成されていたものと思われるが、電弧加熱の再開によって、これらが再溶解する過程において大型の遊離の凝固殻が形成されに可能性が強い。溶湯内における溶湯以外の物体の沈降、浮上に関しては移動する物体の溶湯との比重差の他に、寸法、ぬれ性など多くの要素の総合的結果によって決定されるものであろうが、溶湯内に自然発生した大型の凝固殻の場合は、ぬれの程度は極めて大であるので、単純に比重の差によって沈降する可能性が高いと考える良いであろう。すなわち、今回検出された巨大な非金属介在物の形成機構に対しては、電弧加熱の再開によって押湯上面に形成された大型の遊離凝固殻がスカムを伴って内部に沈降して行ったという仮説が成り立つ。

電弧加熱を再開したのが3.5時間後であるということは、この直後に凝固殻の沈降が起こったことになるが、鋼塊での欠陥発生位置は、この時間における鋼塊の凝固の進行状況と合致するはずである。この観点から、鋼塊の凝固の進行状況を推定するために、前進差分法による温度計算を行なってみた。鋼塊と押湯を含む系の縦断面を縦横14×13の直交格子で分割し、曲線部と傾斜部は段形状で近似させた。分割格子の寸法は、実際の鋼塊では40cm×10cmに相当する。計算を行なうに当って使用した熱的物性値は表-7に示すとうりであって、凝固潜熱(65cal/g)は凝固温度範囲でのみかけの比熱の増加として扱い、温度範囲内に均等に配分した。境界条件として、鑄型外面と空気の間

表7 鑄造金属、鑄型等の熱的物性値

	鑄造金属	鑄型	砂型
密度 (g/cm ³)	7.0	7.7	1.5
比熱 (cal/g deg)	0.15	0.15	0.2
熱伝導度 (cal/cm.s deg)	0.08	0.08	0.003
液相線温度 (deg.C)	1505	—	—
固相線温度 (deg.C)	1450	—	—

に熱伝達係数 $h=0.002$ (cal/cm².s.deg), 鋼塊と鑄型の間に $h=0.02$ を仮定し、また押湯上面中心部100cm²の上方の空気を電弧加熱に相当する温度に保持した。初期条件として、鑄型は30°C、溶湯の鑄型内への注入時温度を1550°Cから出発し、時間刻み250秒で温度変化を求めた。電弧加熱が再開された3.5時間の時点における温度分布を図-4に示す。本計算の場合、液相内における対流熱伝達および初晶の沈降は考慮してないので、実際の凝固開始は図-4に示したものより若干早いと思われるが、その影響度は小さいので、およそ本図のような凝固の過程にあるものと考えて良いであろう。図-1と図-4を対応させると、介在物の存在していた位置は、電弧加熱を再開した3.5時間では、固相がおよそ30%程度形成されている粘稠層領域内に相当していることがわかる。この結果から、今回検出された巨大介在物の形成機構として、電弧加熱の再開によって遊離の状態となった大型の凝固殻が押湯スカムを伴って沈降し、粘稠層領域内に捕捉されたものであるという仮説が裏付けられると考える。

今回とりあげた事例は、明らかに押湯部の保温法に問題のあったものであるが、このような現象による介在物系欠陥の形成される可能性は、電弧加熱法適用の是非、押湯の保温法、押湯保温剤投入の時期、凝固過程にある押湯部の取り扱い方法などに関して課題を提起したものであるといえる。

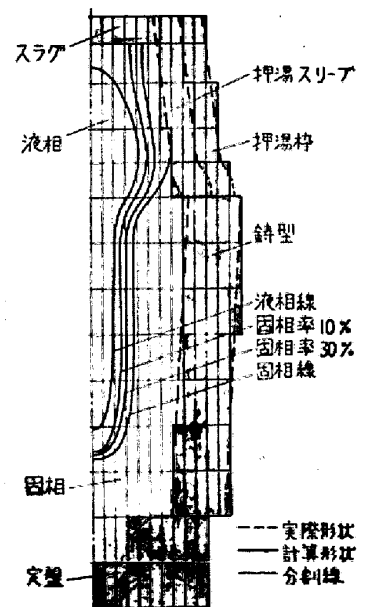


図-4. 凝固の進行状況 (3.5時間後)