報 告

第 4 回日ソ製鋼物理化学シンポジウム

日ソ合同シンポジウム準備委員会

Report of the 4th Japan-USSR Joint Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Processes 1973

Executive Committee of the Japan-USSR
Joint Symposium

1967 年第 1 回シンポジウムがモスクワで開かれて以来、モスクワおよび東京において隔年毎に開催され、本年はその第 4 回シンポジウムが 5 月 31 日および 6 月 1 日の 2 日間、東京経団連会館において開催された。今回のシンポジウムの企画にあたっては、日本側準備委員長盛利貞教授、ソ連側科学アカデミー会員 Ageev 教授の間で数回にわたる交渉の結果、主題を、金属およびスラグの物性、ならびに、ガス・金属・スラグ間の反応の速度論および熱力学とすることになった。今回来日されたソ連側参加者は 9 名を予定されていたが先方の事情で次の名となった。

Prof. V. A. Vatolin	ソ連科学アカデミイウラル金属研究所長
Prof. V. I. Yavoisky	モスクワ鉄鋼および合金専門講座主任
Prof. I. S. Kulikov	ソ連科学アカデミイバイコフ金属研究所上級研究員
Prof. V. I. Lakomsky	ウクライナ科学アカデミイパトン電気溶接研究所金属部門主任
Prof. V. I. Borisov	鉄鋼中央調査研究所実験室長
- 日本側の参加者は盛委員長以下 88 名であった。

双方から提出された論文は、それぞれ 12 論文ずつ計 24 論文であったが、日程の都合上 2 日間で行なわれた。以下本シンポジウムの順に従って、簡単な内容と主な討論の結果について御紹介することにする。

開会に先立ち、盛委員長が主催者側を代表して、ソ連代表団の歓迎の辞を述べ、これに対しソ連側からは Prof. Vatolin が団長として挨拶を述べた。

第 1 日はまづ溶融金属の物性関係から始められた。今回のシンポジウムにおいては、X 線回折による溶鉄の構造に関する実験結果が、ソ連側から 2 篇、日本側から 1 篇それぞれ披露された。まづ Vatolin は実験によつて得られた動径分布関数を解析した結果を報告した。すなわち、Fe の液体の構造は、融点近傍では固体の δ 相(bcc)

に類似しておりあまり変らないが、温度をあげて 1700 °C 付近になると、 α 相 (fcc) に対応した原子配列に近づき、一種の「液体構造の転移」を示す。しかしながら Ni ではこのような変化はみられず、融点のところで融解による大きな構造変化がみられる。さらに Fe-Si, Ni-Si, Fe-C 合金系の構造についても固相化合物との類推で説明される。液体の構造を固体構造の知識で理解しようというのが Vatolin の基本的立場である。とくにこの溶鉄の特異な構造変化については、かつて Samarin が密度の温度変化の研究 (1964) に関連して提案して仮定のようなであるが、本研究は直接構造解析の面から支持を与えたことになろう。これに対し森田 (阪大) はやはり粘性、密度の測定結果でも液体の Fe のこの構造変化に対応する変化を認めていることを述べた。一方江見 (川鉄技研) は高温回折実験に伴う誤差の問題について指摘したが本論文におけるような液体構造の異常な温度変化については今後は議論のわかれるところでもあり、今後の精密な検討が必要であらう。

次に洲崎 (東大工) は Fe, Co, Ni の X 線による回折結果を発表した。Fe, Ni については早稲田ら (1970) の中性子回折の結果とほぼ一致した結果が得られ、さらに Co については、これまでに報告されたものがなかったようで、新知見を加えたものである。ついで Geld と Petrushevsky の論文は統計熱力学に関するもので、Vatolin によつて代読されたが、液体構造との関連および基礎となるモデルの仮定が通常の理論とどのように異なるか不明のように見受けられた。

Yavoisky の報告は純鉄および Fe-C 合金の X 線回折から得られた分布関数に、Percus-Yevick 積分方程式を用いて、ペアポテンシャルを求め、それを表面能力の場合は Fowler の式、粘性のときは Born-Green の式に代入して計算した結果について述べたもので、固体構造との関連はそれほど強調されていない。純鉄のペアポテンシャルについては、すでに早稲田・鈴木が中性子回折

挨拶をされる Vatulov 教授 (経団連会館1101室)

座長席における盛, Lakomshy 両教授

による動径分布関数に Born-Green 積分方程式を適用して求めているが、本研究と同じく振動型のペアポテンシャルが得られているのは興味深い。

午前の部の General Discussion では、下地 (北大) が Fe と Ni の液体構造の差異と電気抵抗の融解時の変化とが強い関連を持つことを指摘した。すなわち Ziman の理論式にいわゆる muffin-tin potential (通常の pseudo-potential は Fe, Ni などの遷移金属の場合は不適当なので) と実験的に得られる構造因子を代入して計算された抵抗値が、Fe, Ni, Cu に対する実験値にほぼ一致することよりみて、抵抗値におよぼす構造の影響は無視し得ぬものと考えられ、融解時 Fe の場合電気抵抗はほとんど変わらず、Ni の場合 30% 程度増大するのは、Vatulov によつて強調された Fe と Ni の液体構造の差異 (Fe では固体からの変化が少なく、Ni では大きいこと) に関係する可能性のあることを示した。さらに液体金属のペアポテンシャルをきめる方法のうち、Na と K については、最近、hyper-netted chain の積分方程式を使うのが最善と考えられてきているので、Fe の場合もこの方法による解析が望ましいことを述べた。

午後の部では、まず Borisov が金属の溶融、凝固と kinetics との関連に関する理論を提出し、これについて下地はこの理論で実験事実をどのように説明できるかと質問したが、ガリウムについては結晶生長速度に関して

の kinetic coefficient K の値のオーダーで実験結果と一致が認められたが、それ以外の金属については実験上の困難のため確認されていないようである。次に森田 (阪大) は Fe-Ni 系融体の密度と粘性について、改良アルキメデス法および回転法による最近の測定結果を発表した。それによれば、この系は液相線上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ で粘度異常のあらわれることから、何らかの構造変化の存在を示唆した。Borisov は粘度の温度変化に特異点が見出されたことは、 $\delta \rightleftharpoons \gamma$ 型の移行、すなわちきわめて狭い領域における近接オーダーの変化が存在することを強く推測させると述べ、これに関連して二、三の意見を述べた。ついで、Kulikov は Kashin らの新しく密度測定法として試みられた ionization-radiometry method による Fe-C 系溶体の性質に関する研究結果を紹介した。この方法により彼らは安定な Fe-C colony が存在することを認めた。この Colony の構造や大きさについて川合 (九大) の質問に対して Kulikov は直接的方法では観察されなかつたこと、また不破 (東北大) は、かつて Baikov 研究所で centrifugal method で Fe-C 液体の密度の異常性を見出しているが、これと今回の研究結果との関連をただしたのに対し、Kulikov は必ずしも完全に一致してはいないと述べた。

以上の3論文に関連した General Discussion では、Borisov が液体構造に関する研究の動向について意見を述べた。

次に白石 (東北大) は溶融 CaO-SiO_2 スラグ中の酸素の自己拡散について O^{18} を用いた実験結果を報告した。その結果によれば、活性化エネルギーの値から考えて、主として酸素は $\text{Ca}^{++} \cdot \text{O}^{2-}$ のイオン対で拡散すると思われることを述べた。これに対し Kulikov, Vatulov, Borisov らはそれぞれこのような酸素の機構について質問や意見を提出したが、白石は本研究ではまず拡散の正確なデータを得ることが第一で、機構については決定的な結論を出すのはむづかしいと述べた。ついで Vatulov は Yesin の溶融珪酸塩中のアニオンの分布に関する論文を代読した。本論文によれば、溶融珪酸塩は Me^{n+} 、および O^{2-} イオンと $\text{Si}_2\text{O}_7^{4-}$ の形の Si-O アニオンから成るというモデルを仮定してアニオンの分布の近似計算式を立て珪酸钠溶液の実態値と比較して定性的な一致がみられること、またそれから orthosilicate および methasilicate が diorthosilicate よりも安定であることを説明した。後藤 (川上, 東工大) は本理論の高濃度溶液における適用性について、また Temkin の関係式は稀薄溶液においてのみ成立つので、これを使つたときの誤差をどう評価するかを質した。しかし溶融珪酸塩に完全イオン溶液を適用することにより生ずる誤差の大きさを決めることは困難のようである。次に江見 (川鉄技研) は、メタルスラグ界面現象を明らかにするため、Pt 電極と種々の二成分系溶融スラグ界面における電

気二重層容量と電極反応速度の測定を試み、スラグ界面の構造を推定し界面反応を支配する電極反応パラメーターを導いた結果を報告した。これに対し Borisov は境界層の構造について、また Vatolin は $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 系と $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 系スラグの C_D-q_1 曲線（微分二重層容量—電位）にあらわれる極小値がほぼ同じ値を示す理由について討論が行なわれた。また、Vatolin は Yesin の意見として、彼が 1956 年にスラグメタル界面の多原子層について発表した論文に対してどのように考えるか、また C_D^{in} の値に対する cation 半径の影響もこの多原子層を取り扱った式で計算することができると述べた。江見は Yesin の意見に同意したが、 C_D^{in} に対する第一層の寄与は Yesin の指摘した 20% よりもつと大きくなると考えられると述べた。ここで、以上の 3 論文に関する General Discussion として、柳ヶ瀬（九大）は Yesin の論文に関連して、一般に二液相に分離するような溶融珪酸塩に高分子液体論がどの程度適用出来るかが問題であろうと意見を述べた。

第 2 日目の午前の部では、現代の製鋼法を代表する LD 転炉法についての基礎的研究に関する論文が、日本側から 3 件、ソ連側から 1 件紹介された。まず佐々木（住金中研）は試験転炉の脱炭酸素効率に及ぼす吹錬条件の影響について発表した。すなわち、単孔ノズルから噴射されたジェットのコア—長さ、および軸方向、半径方向圧力分布をシュリーレン装置および圧力測定装置を用い、マッハ数、酸素流量、ノズル径、ランス高さを変化させて測定を行なった。その結果を用い、軸上流速 U_m をノズル出口径 (D_e) と自由噴流長さ (x) の比 (D_e/x) およびマッハ数 (M) の関数として求めた。この無次元流速 U_m/U_0 を用い、60 kg 転炉の実験で得られた脱炭酸素効率を解析したところ、脱炭酸素効率はこの無次元流速に一義的に支配されていることがわかった。これに対し、噴流に関して山田（鋼管技研）、菊池（東北大）から、またコールドモデルの実験方法について Vatolin から質問があつた。

次に Yefimov の酸素吹錬における脱炭反応速度に及ぼす流体力学的因子の影響に関する論文を Lakomsky が代読した。本論文は上吹酸素製鋼における脱炭速度が炭素濃度支配となる臨界炭素濃度を理論的に取り扱ったものである。まず酸素噴流によつて生ずるクレータ表面での脱炭反応を境界膜理論と流体力学を適用して取り扱い、酸素の移動速度が炭素の移動速度よりおくれ始める炭素濃度を計算し、 $[C] \approx 2\%$ を得た。次にクレータから鋼溶内部に混入する O_2 気泡と、その界面での脱炭反応を扱い、酸素効率 η をパラメーターとした関数が臨界炭素濃度を計算した。それによると、酸素効率が 90% で $[C]_{critical} = 0.09\%$ となり、実際の脱炭反応をよく説明できると述べた。これについて山田（鋼管技研）は溶鉄粒による脱炭を考える必要があるのではないかと意見を述べ

たが、Lakomsky はソ連では現在粒滴の脱炭に及ぼす寄与は 10~15% と実験および計算で得られていると答えた。また溝口（新日鉄）は Yefimov のおこなつた O_2 気泡と C との反応速度式の導入方法に関して意見を述べさらに理論式を実験データで実証したか否かについてたづねたが、本人不在のため充分な討議は出来なかつた。

ひきつづき植村（神鋼中研）は石灰の滓化現象について報告した。すなわち、石灰の滓化に対する各種添加成分の効果を明らかにする目的で、 C_2S 晶出領域のスラグの液相線温度、スラグの石灰への浸潤速度および石灰のスラグへの溶解速度について行なつた実験結果を検討したものである。基本スラグとしては $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ を用い、 FeO の高い (55%) スラグと FeO の低い (30%) スラグの 2 種類を使用し、添加成分としては CaF_2 、 B_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO などを用いた。結論として石灰の溶解速度にはスラグの石灰内部への浸潤が大きな役割を果し、その主役は FeO であると考えられる。また石灰を滓化させるフラックスとしては、 CaF_2 、 B_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO などが程度に差はあるが効果的である、実際操業にこれらのフラックスを有効に使用するには適切な使用方法、操業方法をとる必要があり、たとえばスラグ中の FeO を多くすることが石灰の滓化には望ましいが、 B_2O_3 などは FeO の少ない場合に、 MgO は逆に FeO の多い場合に効果的である。本論文に対して、山田（鋼管技研）は石灰へ浸造してくるスラグ成分の変化について、また山田および Yavoisky はフラックスの浸透速度に及ぼす影響の仕方と、石灰の溶解速度に及ぼす影響の仕方に相違があつたことにどう考えているかを質問した。植村は E、P、M、A で石灰中にシリカがほとんどが認められなかつたこと、また一般的には、本来スラグの浸透速度と石灰の溶解速度は対応しているが、種々のフラックスを添加した場合は種々の物理的性質の影響によつて異なつた結果があらわれたのであろうと答えた。

次に山田（鋼管技研）は石灰の滓化速度に及ぼす因子について発表した。この論文では、転炉の精錬にとつて石灰の滓化速度の重要性を 50 t 転炉のデータで示し、吹錬中の石灰の滓化状況、および石灰の滓化に重要な FeO の生成機構を検討している。また石灰棒を転炉スラグと同成分の溶融スラグ中に浸漬し、その溶融スラグと石灰棒への浸透速度を調べ、浸透メカニズムについて考察している。さらに石灰棒に回転を与え、約 100 r.p.m. の回転数で溶解速度に臨界値があることを指摘し、この理由として 100 r.p.m. で石灰の周辺に反応生成物としてできた C_2S 膜の分離に必要な剪断力が生じたためであると説明した。これに対し、片山（新日鉄八幡技研）は実際の LD 転炉内での攪拌は C_2S 膜の分離に必要な十分な剪断力となつているか否かの質問があつた。これについて山田は LD 転炉内では投入された石灰の存在位置により

攪拌の効果をjける割合が大きく異なり、一言では答えられないが、概して不十分であると考えられると述べた。

以上の二つの論文について、後藤(東工大)より石灰の溶解速度の律速段階についての意見が述べられ、特にこの問題についてソ連での研究結果についても質問された。これに答えて Yavoisky は Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 O^{2-} 、 $\text{Si}_m\text{O}_n^{4-}$ の移動速度をきめることはむづかしく、特に高 Fe O スラグでのこの問題のとりあつかいはむづかしいと述べ、活発な討論がなされた。

午後の部に入り、まづ Yavoisky は固体および液体鉄合金中の水素について発表した。これはまず改良された Sieverts 法により水素の溶解度を測定し、水素の溶解度に及ぼす第3元素の影響は、Ellicott と萬谷らのデータとほぼ同じ傾向を示したが、Ta の影響については Elliott のデータと不一致であった。しかし相互作用母係数と周期律表の原子番号との密接な関係から考えて今回のデータの方がより妥当性があると述べた。本論文はさらに合金鋼の凝固時における水素の挙動について言及し、原子状水素の他にマイクロ空隙に含まれる分子状水素の存在があり、これが水素の溶解度測定の話差および材質に大きな影響を及ぼすものと考えている。すなわち、性状の異なる水素の拡散の難易および試料内の水素濃度の不均一性を指摘し、鋼を真空加熱すると、まづ第一に原子状のものが放出され、次にマイクロ空隙表面に吸着した水素が放出され、最後に空隙内の分子状のものが放出されることを実験で示し上記3種の形態で水素が存在することを実証した。これについてはさらにそれぞれの放出速度から、活性化エネルギーを求めると、最初の放出はH原子の拡散のエネルギーと対応づけられ、最後の放出は H_2 分子の分解速度の活性化エネルギーに相当することを示した。また本論文ではレーザー光線を熱源としマススペクトルメーターを用いた微少部分(30~40 μ)の水素を精度よく($\pm 5\%$)分析できる装置をつくり、これを用いて合金鋼中の水素濃度の不均一性を調べた結果、鋼中に空洞や非金属介在物があると、その水素濃度が高く、またオーステナイト系ステンレス鋼では鑄造組織の粒界に1.5~2.0倍の水素量のあることを示した。さらにまた、溶接部の水素のマイクロ偏析についても興味あるデータを示した。さらに圧延により空隙欠陥などを排除することによって、水素の不均一性が改善されることを示すと同時に、450×450 mm ブルームを200 mm ϕ ビレットに圧延された場合の冷却条件の相違によっても水素のマイクロ偏析の状態が変化することを明らかにした。本論文に関して中村(新日鉄基礎研)はスラブおよび板の Lamella 部の水素濃度がマトリックスの水素濃度と異なる現象について意見を求め、また郡司(金材研)はレーザー発光装置の種類、試料表面へ吸着した水分の問題、サルファイドに含有される水素の形態などについて

質問を行ない意見を交換した。また盛(京大)はオーステナイト相における水素溶解度について、第3回日ソシンポジウムに報告した盛らのデータと比較して意見を述べ、不破(東北大)は介在物と鋼中水素の核生成との関連について意見を述べ、マイクロ空隙をもつ部分の高水素濃度の存在に同意見であると述べた。萬谷(東北大)は $\epsilon_{\text{H}}^{\text{Ta}}$ の値は数年前に行なつた自分らの結果とよく一致しているとコメントを述べた。

シンポジウム会場

次に鈴木(日鋼室蘭)は溶鋼の水素吸収ならびに放出速度について発表した。本研究では従来行われたこの種の実験手法と全く異なる実験方法を用い、溶鋼と水素の移行に関する機構を検討したものである。その結果、水素吸収速度は溶鋼表面の反応律速で二次反応式で表わされる。これに反し、水素放出は溶鋼中の水素の物質移動によつて律速され、一次反応であるという説明がなされた。これに関して Lakovsky からは実験方法、吸収実験における水素移行の界面のとりあつかい、つぼとの副反応の影響などについて質問があり、また佐野(名大)は本質的には吸収と放出は同じ機構であるにもかかわらず、見掛け上、両者に違いがあり理由について意見を述べ、Borisov もまた同様に両者に可逆性がないのは何故かと尋ね、溶鉄中の水素の拡散を固体鉄中のそれと対応して意見を述べた。鈴木は吸収と放出の非対称性については、溶鉄-窒素系においてもみられる現象であるが、その機構の説明は本実験結果のみからは困難である、さらに詳細な検討を加えたいと述べた。

Lakovsky は N_2 を含むプラズマからの溶鋼のN吸収についての研究結果を発表した。これは含窒素合金鋼製造の基礎として特にCrを含む溶鋼を対象としたものである。プラズマアーク下におけるN吸収は、通常の状態のガス吸収に比べてきわめて複雑な要因をもつことは想像されるところであるが、彼はメタルと接する境界層で、Nは原子→分子へ再結合し、このN分子が溶鋼と反応するという機構を述べた。この機構ならびにプラズマ温度、電流密度との関係について佐野(東大)、後藤(東工大)から質問が出されたが、界面近傍のN分子の再結

合過程については十分な説明は得られなかった。しかし、ソ連ではこのような現象の解釈についてはかなり検討が加えられているようである。

午後の部に入り、まず片山(新日鉄技研)は減圧下における脱炭、脱窒同時反応について発表した。すなわち普通鋼および 17Cr 鋼を 10 kg の真空溶解炉で減圧下で酸素吹精による脱炭、脱窒同時反応を行なわせ、反応の解析結果、脱窒反応は脱炭速度が大きく、圧力も低いほど効果的であると述べた。この問題は工業的にも興味があり Kulikov, Yavoisky から N の挙動について、山田(鋼管)丸橋(日新)から酸化膜の影響、気相中の N のみかけの平衡分圧に関連して質問討論がなされた。

次に Kulikov は Fedorchenro らの熔融 Fe, Ni, Co 系合金への N の移行に及ぼす合金元素の影響に関する研究を代読した。この実験手法はレベーターション法によつたもので、合金系の物性値の変化に伴う N の物質移動係数への影響、および溶液中の合金元素と N の熱力学的数相(相互作用係数)と移行速度係数との関係を明らかにしたものである。また表面活性な酸素の影響については、Fe-Ni, Fe-Ni-Cr 系合金についても、ほぼ同じような傾向が認められた。中村(新日鉄基礎研)は高酸素レベルにおける著者らの表面多分子層についてたづねたが、Kulikov は著者らの意見は分らないがと前おきして、表面の Fe, O 原子の挙動について意見を述べた。また郡司(金材研)は二元系溶液における相互作用係数と拡散係数の関係について、また井上(名大)は本論文の合金系における N の物質移動係数の max 値のあらわれ方についてたづね、さらに Fe-C 系溶液における N の物質移動係数はむしろ C の表面活性的性質によつて説明する方が妥当であると意見を述べた。

石井(北大)は高炉内の Si の挙動に関連して SiO からの溶鉄への Si 移行の機構についての実験結果を、還元条件下の不均化反応として説明した。これに対して大谷(東北大)は熱力学的に CO による還元反応の可能性ならびに C のないメタルに SiO から Si が移行する可能性について質問した。石井は界面における SiO の分解反応の機構についての考え方を説明し、さらに SiO の不均化反応自身は、メタル表面の接触反応で C のない場合も起ることを Fe, および Cu をベースとする二元合金系の実験例をあげて説明した。Kulikov はこの内容に関連して、Si-O-C 系に関する最近のソ連の研究について簡単に紹介した。

少憩後、最後の session に入り、先づ郡司(金材研)は多成分系熔融鉄合金中の N の活量係数について測定した一連の研究結果を説明した。すなわち、0.4%N 以下では Wagner の式を用いて計算した値とほぼ一致するが、それ以上では r_N 、あるいは e_N^{Fe} を考慮に入れる必要があることを明らかにした。Yavoisky は測定法としてサンプリング法と Sieverts 法の違いの影響について郡

司、不破と討論した。つまり、いずれの方法がよいかは、その系の種類、測定温度に依存するものである。

ついで Kulikov は熔融 Fe, Ni, Co, Cu を対象として、脱酸平衡値と酸素溶解度を用い脱酸元素と酸素の相互作用パラメーターを推定する式を導出して説明した。この関係式の導出に関連して盛(京大)、中村(新日鉄基礎研)、坂尾(名大)が意見を述べ、郡司(金材研)はそれぞれの点のバラツキの原因が脱酸剤の活量係数の値の不正確さによるものであらうと指摘した。Kubikov の提出した論文に関連して、坂尾(名大)は、かつて自身が導出した種々の合金系における酸素の相互作用母係数 $\epsilon_{\text{O}}^{\text{Fe}}$ と酸化物生成自由エネルギーとの関係を示す式、および図を紹介し意見を交換した。

最後に加藤(早大)は Knudsen Cell と質量分析法を組合わせた方法を用い、1600°C における Fe-V 合金の活量を測定した結果を発表した。すなわち、Fe-V 系は 1600°C においては、いずれも Paoult 則から負に偏倚することを明らかにし、関連する熱力学的数値を算出した。Yavoisky は測定上の問題点につき二、三の質問を行ない、さらに彼自身が最近求めたレベーターション法による鉄の蒸発のエンタルピー $\Delta H_{\text{Fe}}^{\text{g}} = 97.7 \text{ cal/mol}$ が本実験値とかなりよく一致していると述べた。一瀬(京大)は V の稀薄濃度における実験上の精度および再現性について、また後藤(東工大)は平衡酸化物をどう見做すかについて質問を行ない討議した。

以上で 2 日間にわたるシンポジウムを終えるにあたり、ソ連側を代表して Prof. Yavoisky が謝辞を述べ、特に言葉の障害を乗り越えて広範囲な問題点に、和氣にあふれた雰囲気の中で卒直な討論が行われたことを高く評価し、さらにわれわれの交流をつづけてゆく必要性を確信すると述べた。これについては、日本側の参加者の多くも同感であつたことと思われる。

前記のように本シンポジウムも今回で 4 回を重ねたことになるが、これまで行なわれた 3 回の経験にかんがみ、出来るだけ早く交互に提出論文を交換し、参加者にあらかじめ論文内容を十分検討できるよう努力した結果、討論に重点をおくという目的にかなり沿うことができたと思われる。それでも通訳はさんでの討論となるため、時間は不足勝ちにならざるを得なかつたが、内容はきわめて充実した有益なものであつたといえよう。殊にソ連側の出席者が提出論文数に比して少なかつたにもかかわらず、代読された方が内容をよく把握して討論にほとんど支障を来さなかつたことは、彼らが本シンポジウムに寄せる熱意のあらわれと受けとめたい。

なお、翌 6 月 2 日には Prof. Yavoisky の公開演会が開かれ、“溶鋼の脱酸と鋼塊の凝固過程における非金属介在物の生成に関する最近の研究”と題して、きわめて興味ある講演で、多数の聴講者に深い感銘を与えた。

以上今回のシンポジウムの論文およびその討論の内容

について概説し問題点を述べたが、これらは追って特別報告書として出版するべく目下その編集を急いでいる。

なお Yavoisky 教授の公開講演論文はできれば Trans. ISIJ に掲載したいと考えている。

今回のシンポジウムを開催するに当り経費を負担された新日本製鉄(株)、日本鋼管(株)、住友金属工業(株)、

川崎製鉄(株)、(株)神戸製鋼所、(株)日本製鋼所、日立金属(株)、大同製鋼(株)および日新製鋼(株)の各社ならびに吉田進、月出皎司両氏を派遣され通訳の便をはかられた日商岩井(株)に厚く御礼申し上げます。

(井上道雄、榊井 明)

報 告

第 4 回 ICVM 国際シンポジウム会議報告*

第 4 回 ICVM 国際会議実行委員会

Report of 4th International Conference on Vacuum

Executive Committee of the 4th ICVM Symposium

第 4 回真空冶金国際会議 (4th ICVM) は日本鉄鋼協会、日本金属学会、日本真空協会の共催により、1973 年 6 月 4 日(月)～8 日(金)の 5 日間にわたり、東京、経団連会館で開催された。参加者は海外より約 85 名、国内約 200 名であり、発表論文数は 4 篇の特別講演、7 篇の招待講演を含め、全部で 74 篇であり、これを 8 section に分類し、1 会場で順次発表された。会議全体の模様は鉄鋼協会記事 (鉄と鋼, 59(1973), No 9) に記載されているので、ここでは主として講演について section 別に略述することにする。

特別講演

本国際会議の実行委員長である斎藤教授、ソ連の Morozov 教授、西独の Wahlster 博士、米国の Bunshah 教授により、それぞれ特別講演が行なわれた。

斎藤教授は、溶融鉄合金のガス吸収およびガス放出に関して講演し、ガスの溶解度に対する統計力学的考察およびガス吸収、放出速度に対する律速段階について、主としてわが国の研究結果に基づき解説された。

Morozov 教授は真空マーク再溶解 (VAR) による合金の構造、性質に及ぼす影響について講演した。ソ連では高級構造用鋼の製造のため VA 炉はますます大型化される傾向にある。酸化物系介在物は電極作製時の脱酸方法に依存すること、偏析が電極下の磁場によつて影響されることを指摘した。また実例をもつて高張力構造用鋼の製造に VAR が適していることを示し、さらに問題点として VAR によるメタルの蒸発ロスについて言及した。

Wahlster 博士は製鋼における真空処理と再溶解法の得失について論じた。溶鋼の真空処理は脱ガス、均質化などに有効であるが、ある限度がある。他方、再溶解法は凝固時の精製効果を期待でき、とくに電子ビーム溶解 (EBR), AVR, ESR は注目に値する。真空を利用する EBR, AVR では、ガス成分、Mn などが飛びやすく、スラグ-メタル反応がある ESR では O, S が抜ける。これらの再溶解法を用いると鋼塊の偏析は少くなり、良好な鋼塊が得られる。再溶解法は今後ますます採用されるであろうが、各方法の特徴と限界を十分明らかにしてお

く必要があり、また選択基準として経済性について考慮する必要があることを述べた。

Bunshah 教授は金属、合金、化合物の高速蒸着について講演した。高速蒸着はシート、パイプのような self-supported (そのもの自身で形状を保ち、下地によつて支える必要がない) なもの、および表面の被覆に工業的に用いられるようになり、蒸着物の高純度、微細な結晶粒、下地との密着性、表面仕上りの良さという特長をもっている。ここで高速 (high rate) というのは工業的な意味だけでなく、残留ガスの混入を避けるうえでも効果がある。蒸着速度を増すためには蒸着物の蒸発速度を大きくする必要があり、このため蒸発面積を広くし、蒸発温度を高くすることが要求される。蒸発過程では成分の蒸留効果を伴うため、不純物の分離に利点を示すが、合金の蒸着においては組成の変動を伴うこととなる。多重蒸発源をもつ装置がこのために開発されているが、単一蒸発源でも 5000 倍程度の蒸気圧の差違は実用的に克服できる。セラミックの蒸着の場合、雰囲気と反応させながら蒸着させる方法が良い。蒸着膜の性質は基板温度によつて大きく左右されることが判明し、基板温度の適切な制御により、優れた性質をもつ蒸着物を得ることができる。このように蒸着による新材料の開発は今後の重要な課題であることが力説され、蒸着法によつて作つた各種のシートを実例として提示された。

Section 1 Physical Chemistry of Vacuum Metallurgy

Section 1 では招待講演と一般講演 8 篇が発表された。招待講演をされた IRSID の Olette 博士は鉄鋼の真空溶解に関し、蒸留、suboxide のような揮発性化合物、炭素による脱酸について、従来の諸家の研究結果を整理して講演された。一般の講演では質量分析計による蒸気圧、活量、蒸発分子種などに関する報告 (2 篇)、真空下での溶鉄と酸化物間の界面現象に関する報告、減圧下でのガス気泡の生長に関する理論と脱ガスへの適用、不活性ガス吹込みによる溶鋼の脱ガス現象、脱炭反応の解析、水素、窒素の減圧下での溶解速度、減圧下でのステンレス鋼の脱炭反応などについて講演が行なわれた。結局、こ

シンポジウム会場（経団連会館国際会議場）

デイカッション風景

の section は真空冶金の基礎というより、むしろ section 2 で取扱う鉄鋼関係の物理化学という色彩が強かった。

Section 2 Vacuum Melting and Refining Processes

この section で鉄鋼製錬関係の論文がほとんど消化された。論文数かなり多く、論文内容に従って以下の 3 sub-section に分類して発表された。

Section 2-1 Vacuum Treatment of Stainless Steel (5 篇)

Section 2-2 Degassing of Steel (4 篇)

Section 2-3 Special Melting and Refining (10 篇)

招待講演は Moscow Steel and Alloys Institute の Javoisky 教授が行ない、真空溶解時の脱ガスと蒸発過程について講演された。脱ガスと蒸発の速度は溶湯の攪拌状況、残留ガス圧、表面活性成分の有無によって左右される。多孔質プラグを通して溶湯へガスを吹込む効果は、吹込むガスの種類によって異なり、Ar-プロパン混合ガスで脱窒の好結果が得られた。蒸発速度は残留ガス圧およびガスの種類によって異なり、また短時間処理では蒸発速度が、長時間処理では溶湯中の拡散が影響し、さらに表面活性成分が存在すると拡散律速になることなどを述べた。

Section 2-1 ではステンレス鋼の脱窒および減圧下の

酸素吹きによる脱窒に関する報告(3 篇)、真空脱硫に関する報告、溶鋼の真空処理による高級鋼の性質向上についての報告などが発表された。

Section 2-2 では DH 脱ガスによる水素除去の解析、RH 処理による非金属介在物の低減、真空アーク脱ガスの半連続化による熱効率の改善、真空取鍋処理における攪拌が脱酸速度に及ぼす影響などについて研究発表がなされた。

Section 2-3 では misch metal を用い Ar 溶解によって脱硫を行なうという報告、VAR の鑄塊の偏析についてメタルプールの攪拌条件を変えて偏析の原因を調べた報告、高 Cr 鋼の EB 溶解による精製効果の報告、プラズマアーク溶解における鋼の脱酸、脱硫の動力学的解析、プラズマ誘導炉による Ni 基合金の脱水素、脱酸、脱硫に関する報告、プラズマトーチによるスクラップ溶解に対するシミュレーションと高合金鋼の溶解結果の報告、ドイツ民主共和国の製鋼において特殊溶解の占める位置についての報告などがなされた。

以上のように section 2 では鉄鋼製錬に対する真空の適用について、その現状の解析ならびに特殊溶解などによる新しい精錬技術の試みが発表され、活潑な討論とともに将来の発展に対し寄与をなしたものと考えられる。

Section 3 Process Metallurgy in Vacuum

Section 3 では非鉄金属の真空製錬がとり挙げられた。この section では西独、Lurgi Chemie und Hüttentechnik GmbH の Krüger 博士の招待講演のほか 7 篇の報告が寄せられた。Krüger 博士は非鉄製錬における真空適用の代表例として、粗鉛の脱亜鉛ならびに高融点金属の還元、精製をとり挙げて解説された。一般講演は DC プラズマアークを用いた Nb_2O_5 、 Al_2O_3 の炭素還元ならびに鉄鉱石の Ar- H_2 還元に関する報告、真空タンマン炉を用いた Nb-Nb₂C-NbO 系の平衡 CO 分圧の測定および Nb_2O_5 -WO₃ 固溶体から Nb-W 合金を作る実験の報告、ハロゲン化物の金属による真空中での還元についての報告、Mg および Mg 合金中の水素の溶解度に関する報告、Al および Al 合金の連続真空精製に関する研究室的規模実験の報告、複雑硫化鉄の真空中での分解に関する熱力学、動力学および工業的連続精製装置の操業成果の紹介、ISP 法で生じる Zn の連続蒸留の操業に関する報告などがなされた。

非鉄製錬は対象が広いだけ、真空技術の適用の形も多様であり、一概に論ずることは困難である。この section の発表論文をみても、相互の関連や学問的水準に不十分などところはあるにしても、新しいプロセスに真空を応用する試みに大きな関心が寄せられていることが感じられる。基本的原理や技術には、鉄と非鉄の区別はない訳で本 ICVM において鉄、非鉄双方の研究者、技術者が意見を交換しえたことは有意義なことであつた。

Section 7 Vacuum Equipment for Metallurgical Processes

Section 7 では Liechtenstein, Balzers の Winkler 博士の招待講演と 2 篇の報告が発表された。Winkler 博士は真空冶金の領域で用いられる排気装置を、使用目的に従って分類し、それぞれの装置の特色を明らかにするとともに、経済性の観点からも真空装置の選択基準を示した。続いて Top of the Mold 型の VA 炉による Ta, Ti および Ti 合金の溶解に関する報告、大口径の可撓配管の設計とその top-degasing への応用についての報告があつた。

Section 8 Welding, Casting and Mechanical Working under Vacuum

この section ではソ連論文の cancell があり、welding 関係は阪大、荒田教授の招待講演のみとなり、ほかに Casting 関係 5 篇、Mechanical Working 関係 1 篇が発表された。荒田教授は高エネルギー密度の電子ビーム溶接について、その特性、冶金上の問題—spiking, porosity, cracking など—につき教授の仕事を中心にして詳述された。一般講演は zircaloy の真空中での double arc 溶解による均質な ingot の製造についての報告、EB 炉による Ti cast parts の連続製造に関する報告、Ti の铸造性におよぼす 7 種類の添加元素の影響を調べた報告、6 本のプラズマ EB を用い Ti のスラブ状鋳塊を製造する報告、米国における Ti 铸造の現状と問題点についての報告、真空または不活性雰囲気中での加工について、その特色と将来性を論じた報告などがなされた。

Section 6 Vacuum Sintering

この section では ZrB_2 と Ta, Mo, W などの粉末混合物の hot-press に関する報告と Ti の真空焼結に関する報告が発表された。予定されていた分散強化 Ni 基合金の真空焼結についての講演は講演者の病気のため欠講となつたのは残念であつた。

大会 4 日目に発表された section 7, 8, 6 は門外漢である筆者にとつて、真空冶金の一面を知る良い機会となつた。真空ポンプの多様化は単に到達真空度だけでなく真空の質の面において選択の自由度を増し、仕事の目的、性質に沿つた真空ポンプの使用を可能としつつあるように思われる。また溶接、铸造においては EB, プラズマアークの利用により、種々の耐火金属の加工が可能となるであろうと思われる。このような技術は高温技術の進歩を通して種々な分野の進歩に寄与するであろう。

Section 4 Behaviour of Materials in a Vacuum Environment

Section 4 では米国、Celesco Industries の Chuan 博士の招待講演と 6 篇の研究報告が発表され、宇宙工学の問題から金属表面の性質まで、非常に幅広い分野が取り挙げられた。

Chuan 博士は人工衛星のような宇宙飛行体の直面し

ている冶金的な問題—低温溶接、脱ガス、自己汚染—を取り挙げて、その解決の方向について論じられた。続いて宇宙空間のシミュレーション装置とその利用についての報告、蒸着過程の化学工学的解析の報告、真空中で使用する潤滑材についての報告、真空開閉器用材料に関する報告、蒸着膜 (Si-Au, SiO_2 -Al 系) の厚さ、組成を Auger 電子分光 (AES) した結果の報告、MgO 上にエピタキシャル生長した鉄の被膜を LEED, AES で観察した報告などが講演された。

Section 5 Vacuum Deposition of Coatings and Self-Supported Structures

この Section では米国、Battelle-Columbus Laboratories の Carmichael 博士の招待講演と 7 篇の研究報告が発表された。

Carmichael 博士は Implanting について、原理、特長、蒸着膜の性質に及ぼす操作条件 (圧力、バイアス電圧、蒸発速度など) の影響について述べられた。研究報告は蒸着時の雰囲気ガスの影響に関する報告、高速蒸着 (high rate physical vapor deposition) で作つた Ni シートと圧延シートの特性を比較した報告、EB 蒸発により鋼板上に Cu, Al など、およびプラスチック上に金属を積層蒸着させた報告、EB 蒸発した金属、耐火材 (酸化物、炭化物、硼化物) の蒸着物 (mm 厚み) の性状について、基板温度を変えて実験した報告、RF スパッタリングを用い Pt-W-Rh 三元合金を蒸着し、その電気的特性を調べた報告、Microwave の Strip line 用ベリリアのメタライズに関する報告などがなされた。

この Section で取り上げられた蒸着関係の分野は真空技術なしでは成立しえない領域であり、真空冶金という分野では最もプロパーなものではあると思われる。Bunshah 教授の特別講演、Carmichael 博士の招待講演にもあるように、高速度での蒸着技術が発達すると、工業的にも種々な新材料の開発や表面処理の方法が可能になるものと期待される。今回の国際会議において、この Section へ国内の論文が発表されなかつたが、このことが蒸着の分野でのわが国の立遅れを意味するものでなければ幸であると考えられる。

以上において会議の内容をほぼ発表順に概括したが、最後に本国際会議の成果について私見を記してみる。第一は特殊鋼製錬において真空再溶解法の評価が明確になつてきたことおよびプラズマアーク溶解法についての展望が開けてきたことである。これらに関する研究発表は鉄鋼協会によつて並行して主催された第 4 回 ESR 国際シンポジウムの成果と相まつて、非常に有意義であつた。第二は蒸着関係の進歩であり、新材料の開発に対して一つのアプローチを期待しうる段階になつてきたことである。付加価値の高い技術集約型の生産を指向しようとする場合、蒸着法による新材料の開発、表面処理の開発は、わが国においても着目さるべきものであると思わ

れる。

真空冶金という概念は漠として把握し難い。それだけに国際会議という形で、広い領域の話を聞くことは、日頃狭い専門領域に閉じこもっている研究者、技術者にとつ

て非常に有意義であり、今後、真空冶金国際会議に対しわが国からの寄与を引き続き行なつてゆくことが重要である。（白石 裕）

報 告

第 4 回 ESR 国際シンポジウム会議報告

第 4 回 ESR 国際シンポジウム協力小委員会

Report of 4th International Symposium on Electroslag Remelting Processes

Executive Sub-Committee of the 4th ESR Symposium

1973 年 6 月 7 日と 8 日の両日東京において、第 4 回 ESR 国際シンポジウムが第 4 回真空冶金国際会議と並行しておこなわれた。

ESR 国際シンポジウムは従来会議運営のための正式な国際的組織機関がなく、過去 3 回のシンポジウムはすべて、米国の Carnegie-Mellon 工科大学で開催された。第 1 回 (1967 年) と第 2 回 (1969 年) は Carnegie-Mellon 工科大学と米国の航空材料研究所の共催によって組織され、主として ESR の基本のおよびその応用技術が討論された。第 3 回シンポジウム (1971 年) は主催が AIAE の Pittsburgh 支所に移され、そこでは新たに ESR 以外の特殊溶解技術、超大型 ESR 炉の問題も提起された。

今回の第 4 回は以上のような経過の下で、米国以外の国で開かれた初めてのシンポジウムであったが、日本および諸外国から 32 編の論文が提出され、また出席者の数も 250 名におよんで非常に盛況であった。

論文はそれぞれの内容に応じて、次のような 5 つの Session に分類されて討論がおこなわれた。

- Session 1. Heat, Mass and Momentum Transfer in the Electrode-Flux-Ingot System
- Session 2. Relation between the Operating Parameters and Chemical, Physical and Mechanical Properties of the ESR Products
- Session 3. New Applications of ESR Technique
- Session 4. Manufacturing and Properties of Tool, Bearing, High Alloy Steels and Super Alloys
- Session 5. Equipments and Operations for Production and the Properties of Large Ingots

本報告では、これらの Session でおこなわれた講演および討論の概要について述べることにする。

シンポジウムの冒頭では、田畑鉄鋼協会専務理事の司会によつて、中野鉄鋼協会会長および斎藤実行委員長 (東北大名誉教授) から歓迎の挨拶がなされた後、Dr. G. K. Bhat (米・Mellon Inst. of Carnegie-Mellon

Univ.) から過去の ESR シンポジウムの経過とその意義が述べられた。また後藤実行委員 (東工大助教授) からは日本における ESR 設備の現状について報告がおこなわれたが、これらの内容は紙面の都合上割愛する。なおシンポジウムの論文集は鉄鋼協会から 9 月に発刊された。

I. Session 1. Heat, Mass and Momentum Transfer in the Electrode-Flux-Ingot System

Session 1 の講演は第 1 日目の 6 月 7 日の午前から午後にかけておこなわれ、ESR の基礎的あるいは理論的な研究に関する論文 8 件の報告があり討論がなされた。

(1) A. Mitchell (カナダ・Univ. of British Columbia) は“Macrosegregation, Liquid Movement and Heat Flow in the ESR Process”という題目で、マクロ偏析と熱移動におよぼす溶融プール内の液体の攪拌の影響について講演した。モールド直径 8cm の ESR 炉で、AISI 1015, W80 の溶解中プール内の Sn, S 濃度を急激に変化させて得られた鋼塊について、これらの Tracer 元素の濃度分布を調べた。実験から Sn, S の実効分配係数を計算するといずれも 0.8 になり、その値は溶解条件に依存しないことがわかった。そのためプールには攪拌が存在し、凝固前面には攪拌の影響を受けない拡散層があると結論した。攪拌はプール内の温度勾配によつて生ずる対流によつてもたらされ、その程度は外周で大きく中心付近では小さいと述べた。

Szekely (米) はこの講演に対して tracer 元素の分布を均一と考えてよいかと質問し、またこの講演の中では effective thermal conductivity を考えていたが、local thermal conductivity を考える必要があると述べた。Mitchell は tracer 元素は完全に混合されていること、および両者の thermal conductivity の差は小さいことなどを答えた。J. F. Elliott (米) は実効分配係数の計算の仮定で用いたプール内での完全混合モデルに対し、また thermal conductivity による攪拌の説明に対して反論した。さらに真殿 (理研ピストン) は Mitchell が

シンポジウム会場風景 (経団連会館国際会議場)

用いたモデルの大型鋼塊に対する適応性について質問したが、定常状態モデルは鋼塊の大きさには関係なく、直径1mの鋼塊に対しても適応させることができるという答があった。

(2) P. O. Mellberg (スウェーデン・Royal Inst. of Technology) は“Temperature Distribution in Slag and Metal during Electroslag Remelting of Ball-Bearing Steel”について、直径100mmのAC・ESR炉を使用してスラグおよび溶鋼プール内の温度分布を実測する方法と、その結果を発表した。実験では水冷モールドの側面から内部にBN製の保護管を介して熱電対を挿入し、スラグ量、電圧、電流を変化させることによって、溶解条件、温度分布、凝固組織の間の関係を調べた。電流が一定の条件下ではスラグ量を多くするとプールの底は平坦になる。デンドライトアームスパーシングは凝固速度の増大に伴い小さくなること、および鋼塊の中心から1/2R部までは冷却速度の差は小さく、その外側で急激に大きくなることなどについて述べた。

この講演に対して真殿、川合(日立金属)らが実験装置と実験方法に関する質問をした。またJ. F. Elliottはこの研究における実験技術を称賛した。

(3) 萩野和己、原 茂太(大阪大・工)はESRにおける脱硫反応機構を研究した“Desulphurization of Steel with Electroslag Refining Type Flux”を発表し、原が講演した。実験室的な溶解によつて溶鉄とスラグとの脱硫反応を検討し、一部X線を使用して脱硫過程における溶滴の形状の変化も観察した。脱硫反応は溶鉄に接するスラグ中の拡散層内の物質移動によつて律促されることがわかった。その反応速度は非常に大きく、実際のESR溶解では電極-スラグ界面で反応がほとんど終了すると述べた。また反応過程における溶滴の形状の変化を溶鋼の界面張力の変化と関連づけた。

Mitchellはこの講演に対しESR過程における物質移動はスラグの攪拌強度に依存していると述べ、さらに溶鋼プールとスラグとの反応による脱硫はほとんどおこられないという考えは自分の実験結果とよく一致して

いると述べた。Gammal(独)は原の実験では黒鉛つばを使用していたので、溶滴へのCOガスの付着の有無について質問した。原はX線の像の中にCO気泡は認められず、溶滴の表面の形状が一部不規則であったのは局部的な界面張力の違いがもたらしたものであると答えた。

(4) 小島 康、加藤 誠、豊田剛治、井上道雄(名古屋大・工)はウッドメタルとNaOH水溶液を用いたモデル実験によるESRの溶解現象についての研究“A Model Study on the Metallurgical Phenomena of Consumable Electrode in Electroslag Remelting Process”を発表し、小島が講演した。溶解速度が小さいときには溶滴の大きさは電極径に依存したが、溶解速度が1g/sec以上になると溶滴径は電極径に無関係となつた。溶解速度が1g/secの場合にはlaminar flowの長さは溶滴の直径よりも大きい0.6~1cmにもなり、実際のESR過程ではこれが溶鋼プールまで達することが考えられた。また高速カメラによる観密からスパーク現象があることを確認し、発熱はこのアーク現象にもとづいてると結論した。

Gammalは次の2点について質問した。(1)電極とNaOHとの間に反応があるかどうか、(2)ガスが溶滴に付着しないか、これに対して小島はウッドメタルは耐蝕性が強いのでNaOHとの反応はないこと、および溶滴に付着するガスは影響が小さいことなどを答えた。

(5) EL Gammal(独・Inst. für Eisenhüttenkunde Tech. Univ. AACHEN)は“The Role Played by the Electric Current on Metal Droplet Formation in the ESR-Process”という題目で、ウッドメタル-NaCl水溶液系でESRのモデル実験をおこない、溶滴の形成におよぼす電流密度と周波数の影響について研究した結果と、実際の鋼をエレクトロスラグ溶解した場合の結果との比較を発表した。電流密度を上昇させると溶滴の直径は減少する。周波数との関係については、溶滴の直径は400 cycle/minで不連続的に極小値を生ずるが、周波数の増加に伴って直径は増大することがわかった。またモデル実験で得られた結果は実際のESR過程における現象、とくにガス成分の挙動をよく説明できると述べた。

Schwerdtfeger(独)は電解質中の水素は H^+ として存在するかあるいは OH^- として存在するかと質問したが、Gammalは OH^- は分解して H^+ になると答えた。また加藤(早稲田大・工)は水素分析試料の採取法について質問し、これに対しては鋼塊から採取したと述べた。

(6) K. Schwerdtfeger, K. Klein(独・Max-Planck-Inst. für Eisenforschung)は CaF_2 を含有するスラブからのFの揮発に関する研究“Rate of Fluorine Volatilization from Fluoride Containing Liquid Slags”について発表し、Schwerdtfegerが講演した。 CaF_2 -

CaO, CaF_2 -CaO, SiO_2 系からなる 3 成分のスラグを 1600°C で 1 atm の He, N_2 雰囲気さらし、スラグの重量変化を熱天秤によつて測定した。またガス拡散が律促進過程であると仮定して理論計算もおこなった。スラグからの F の揮発は おもに CaF_2 の蒸発と HF の生成によつておこなわれ、HF の生成はガス中の水蒸気分圧の増大に伴い増加することがわかった。また SiO_2 含有量が多いスラグからの SiO_4 の蒸発速度は CaF_2 の蒸発速度より大きいことを計算によつて明らかにした。実験結果をもとに、F を含有するスラグからこれらの揮発を防ぐためには、材料を十分に乾燥するとともに、雰囲気内の水分を除く必要があると述べた。

後藤は $\text{CaF}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{HF}$ の反応は考えないかと質問し、Schwerdtfeger はその反応による組成変化は考える必要がないと答えた。不破 (東北大・工) は自分の実験室における CaF_2 を含んだスラグの H_2O 溶解度を測定した実験で、 $\text{CaF}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{HF}$ の反応でスラグの組成が多少変化したことを覚えていと述べた。また加藤は $\text{CaF}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 7/3$ のスラグで CaF , Ca_2F_3 , CaF_2 の存在が確認されたと述べた。

(7) J. D. W. Rawson, D. I. Dawson, N. Kirkham (英・BSC Corporate Development Lab.) は透明物質を使用したモデル実験によるスラグと溶融プールの動きに関する研究 “Slag and Metal Flow in Electroslag Remelting” を発表し、Rawson が講演した。実験ではスラグに LiCl と KCl の共晶組織を用い、モールドにはバイレックスガラスを使用して Al, Cu を溶解した。スラグの動きはおもに電磁力の影響によつて発生し、対流の影響は小さいことがわかった。单相、単極の場合にはその動きは電流の通路に依存し、toroidal circulation になる。Bifilar 電極および 3 相の場合にはスラグは非常に複雑な動きをする。外的な電磁場によつてスラグに回転運動を与えると、溶滴はスラグ内で螺旋状の運動をしながらモールドの壁に沿って落ちるようになるので、プールの底は平坦になり、鋳塊の肌および内部組織が改善されると述べた。

Mitchell はスラグと溶融プール界面での運動量の伝達について、およびスラグ内の対流と熱移動との関係について質問した。Rawson は前者の質問に対しては溶融プールには溶滴の落下による攪拌とスラグ内での toroidal stirring の影響による攪拌が存在すると述べた。また後者の質問に対してはこの実験はモデル実験なので難しい問題であるが、スラグの温度が高くなるほど電磁力の攪拌に加えて対流の影響も存在するであろうと答えた。Cremisio (米) は真空アーク溶解では溶融プールにおける一方向攪拌は鋼塊にマクロ偏析を発生させるが、この実験で周期的な攪拌をおこなったかと質問した。これに対して Rawson はおこなっていないと答え、さらに ESR 法では攪拌の状況が VAR 法とは異なつて、溶

融プール内の攪拌はおもにスラグ内の攪拌の影響によつて生じ、この程度では鋼塊に攪拌は発生しないと述べた。

(8) J. F. Elliott (米・Massachusetts Inst. of Technology) は “Steady State Model in ESR System” という題目で、ESR の凝固プロセスを電子計算機で解析した結果を発表した。半径 20 cm の鋼塊に対して熱移動の微分方程式を電極、スラグ、鋼塊における種々の境界条件を入れて解き、固液共存相領域の形状と位置におよぼす溶融プール表面の温度、鋼塊表面から冷却水までの熱伝達率、プール内の熱伝導率などの影響を計算した。その結果によると鋼塊と冷却水の間の熱伝達率が増加して冷却速度が大きくなるとプールは浅くなり、モールド壁付近での二相領域の勾配が減少する。また液体金属の熱伝導率が増加するとプールの深さも増加する。プール表面の温度分布は液相線の形状をほとんど変化させないことがわかった。このモデルによる解析は鋼塊の高さが半径の 2~2.5 倍に達した後で有効であると結論した。

Mitchell は非定常状態の場合モデルをどのように関係づけるかと質問したのに対し、J. F. Elliott は普遍的な適用はできないと述べた。また Szekely は攪拌の影響を考えるために effective thermal conductivity を使用していたが、局所的な熱伝導の違いを考える必要はないかと質問した。J. F. Elliott は局所的な攪拌に伴う熱伝導の変化はプールの深さに対して大きく影響しないと述べた。

以上のように Session 1 の講演は溶融プール、スラグ内の動き、鋳塊の凝固、スラグ内の反応など ESR の基礎的および理論的研究に関する論文が報告された。ESR 法は電極-スラグ-溶融プール-鋳塊という独特のシステムを有し、スラグに覆われている溶融プールは通常直接には観察することが不可能なため、諸現象の解析は小型 ESR 炉について透明な無機化合物を用いたモデル実験、tracer 元素を使用した実験、あるいは電子計算機によるモデル化した計算などによつて多くおこなわれていた。

鋳塊の凝固組織および偏析現象と密接な関連性を有する溶融プール内の動きは、従来からも VAR 法との比較において述べられてきたが、ESR 法の場合にはマクロ偏析を発生させるほどの流動は少ないにしても、熱的対流あるいはスラグ-溶融プール界面での運動量の伝達による攪拌などがこの Session でおもに議論の対象になっていた。

スラグ内の溶滴の挙動およびスラグとの反応についても興味ある実験データが多数発表されたが、これらは ESR の溶解プロセスを理解し、実際的には適切な操業条件を把握するための貴重なデータになると思われる。さらにスラグと溶融プール内の温度の実測に関する研究も一件報告されたが、良質な鋼塊を製造するためには鋼塊が大型になるほどスラグおよび溶融プールの温度管理

が重量となるので、この種の研究は実験技術上困難を伴うが進歩していくものと考えられる。

ESR 法は溶解、反応、凝固が連続しておこなわれるシステム化されたプロセスであり、今後もさらに個々の過程の詳細な解析、あるいはそれらの総合的見地からの解析が進むであろうが、現象がより複雑な大型鋼塊の溶解と凝固過程を理論化する研究へと進展していくことも期待される。

II. Session 2. Relation between the Operating Parameters and the Chemical, Physical and Mechanical Properties of the ESR Products

Session 2 の講演は第2日目の6月8日の午前におこなわれ、ESR 法の操業要因と材料の性質に関する論文が6件提出された。

(1) 山口国男、船津政彦、市原 忠(大同製鋼)は電極-モールド直径比と野塊の性質に関する研究“Effect of Electrode-Mold Diameter Ratio on ESR of Steels”を発表し山口が講演した。鋼塊直径 230~530 mm の ESR 条件に対する電極-モールド直径比の影響を調査し、直径比が減少すると溶解速度は減少して電力費が増加すること、また同一溶解速度においては直径比が減少するとスラグの温度が高くなりスラグ殻が薄くなることを指摘した。鋼塊の性質および経済性の面から直径比は 0.65~0.55 が最適であり、溶解速度は鋼塊直径(mm)×0.8 kg/hr が好ましいことを報告した。

江見(川崎製鉄)よりスラグの固相・液相温度幅とスラグ殻の厚さとの関係について質問があつた。山口はスラグの性質についての実測は困難であるが、共晶組成のスラグでは良好な鋼塊肌が得られ、固液共存の温度範囲の広いものではスラグ殻が厚くなり鋼塊肌が悪化すると述べた。なお江見からスラグ殻に対する因子としてスラグの粘性があるとの追加意見があつた。

(2) 梶岡博幸、山口 紘(新日鉄)は“Effects of Various Melting Parameters on the Qualities of Electro-Slag Remelted Ingots”について発表し山口が講演した。鋼塊直径 230 mm と 350 mm の低合金鋼、ステンレス鋼、superalloy を溶解し、溶解速度とプール深さに影響する要因および鋼塊品質におよぼすスラグ組成の影響などを調べた。溶解速度と溶鋼プールの形状は投入電力によつて最も大きな影響を受け、その他電極-鋼塊直径比、鋼種、スラグ量、鋼塊高さなどによつても影響されることを指摘した。また鋼塊肌とスラグ成分との関係、水素含有量におよぼす操業条件の影響、Al, Si などの酸化性成分の挙動および介在物の減少率と電極の品質との関連性などについて報告した。

この講演に対して Mitchell はスラグ中の FeO をコントロールすることが重要であり、介在物含有量などの電極の品質が製品の品質に影響するという意見に賛成す

るとの見解を述べた。

(3) 鈴木禎一、杉原 徹(日立金属)は ESR における精錬効果の研究“The Quality of Remelted Steel by ESR”を発表し杉原が講演した。VAR 法と ESR 法(AC, DC+, DC-)とを鋼塊直径 300 mm の溶解で比較した。溶解速度、成分偏析、介在物量などに関しては VAR 法または AC-ESR 法が優れており、DC(-)・ESR 法が最も悪いことを指摘した。DC(+)-ESR 法では Mn の減少が認められ、TiO₂ を含むスラグではこの減少が大きい。また DC(-)・ESR 法では Al の増加が認められた。AC-ESR 法では鋼塊酸素含有量はスラグ中の FeO 濃度に影響されることなどを述べた。

Roberts(米)はこの講演に対し、自分の実験では DC(-)・ESR 法でも大きな溶解速度が得られたことを述べた。また Mitchell は硫黄と酸素とは関係があるので、介在物組成、酸素含有量、硫黄含有量、機械的性質の間の関係を論じる場合、介在物がどのような型に属しているかを明確にすることが重要であるとの意見を述べた。山口(紘)は TiO₂ を含有するスラグを使用した場合に鋼塊中の酸素含有量が増加したかと質問したのに対し杉原は増加したと答えた。

(4) D. M. Longbottom, A. A. Greenfield, G. Hoyle(英・British Steel Corp.)はエレクトロスラグ溶解の効率と鋼塊品質におよぼす溶解条件の影響についての研究“A Statistical Evaluation of E. S. R. Operating Parameters”を発表し、Rawson が論文を代読した。実操業上の溶解条件として鋳型断面積、スラグ深さ、電極-モールド断面積比、モールド円周、投入電力の五つの条件を変化させた場合のスラグ抵抗値、溶解速度、消費電力、鋼塊表面状況、溶鋼プールの形状を 16 溶解の結果から統計的に数式化した。スラグ抵抗値はその深さを増すほど、また電極断面積比を小さくするほど大きくなる。溶解速度は投入電力および電極断面積比の増加に伴い大きくなる。消費電力はスラグ深さ、電極断面積比が増加するとともに小さくなる。鋼塊表面はスラグ深さ、電極断面積比、投入電力が大きくなるほど改善される。プールの形状はスラグ深さが大きく投入電力が小さいほど良く、投入電力が小さい場合には電極断面積比が大きいほど良いことを指摘した。

Mitchell は実験において種々の値を測定した鋼塊の高さ方向の位置について質問し、Rawson は鋼塊下端からの冷却の影響が無視できる直径の2倍以上の高さであると答えた。

(5) R. S. Cremisio(米・Consultant to Zak Inc.), E. D. Zak(米・Zak Inc.)は ESR のモールドに関する“Consideration of Mold Design Parameters and ESR Production Technology”を発表し、Cremisio が講演した。種々の ESR モールド(固定、可動、鋼塊引抜き、円形、矩形など)についての実用上の問題

点および設計上の問題点、たとえば構造物のクリープ、冷却面の鉍物付着防止、冷却水の沸騰防止のための流速、内面材 (Cu) の厚み制限、熱膨張の逃げ方、脱型のためのテーパーなどについての考え方を述べた。

Mitchell はモールド内面の最高温度について質問し、Cremisio は溶解法によつて異なるが、銅モールドでは約 200~220°C であると答えた。Wahlster (独) は銅の材質とモールドの寿命との関係について質問し、Cremisio はこれに対して次のように述べた。銅の純度を高めれば寿命は伸びるが高価である。現在銅合金のモールドについて研究を進めており、近い将来これが使用される可能性がある。

(6) J. Luchok, R. J. Roberts (米・Consar Corp.) は ESR 法の生産性に関する研究 “An Evaluation of Factors Influencing ESR Furnace Operating Efficiency” を発表し Roberts が講演した。直径 203 mm と 330 mm の電極を用いて直径 406 mm の鋼塊を溶解した。同一溶解速度では電極-モールド直径比が大きい方が溶鋼プールは浅く使用電力が少ないことを指摘した。電極径はモールドとのスパーク溶損がおこらない範囲において大きくすべきである。モールド上昇方式または鋼塊引下げ方式では銕肌を良くするためにあるいは漏鋼を防止するために直径比を小さくすることが普通である。この場合抵抗値の高いスラグを使用すれば溶鋼プールは浅くなり消費電力は小さくなる傾向にあるが、経済性の面から品質に悪影響をおよぼさない限り直径比を大きくすることが望ましいと述べた。

J. F. Elliott はこの講演に対し電極直径比を大きくすることによって溶鋼プールが浅くなるのは大きな鋼塊の場合には考えられるが、この実験のような鋼塊では電極直径比が小さい場合の溶鋼プールを深くしている原因としては投入電力が高くなることになると指摘した。これに対して Roberts はここでは溶解速度を一定にした場合の電極直径比の影響を報告したのであって、入力を一にたした初期の実験ではこれと逆の結果が得られている。工業的には溶解速度を大きくすることが直要であると述べた。Holzgruber (オーストリア) はスラグ殻に関して質問したが、Roberts は電極直径比が大きくなるとスラグ殻は厚くなるがこれはスラグ温度が低くかつ攪拌が少なくなるためであると答えた。さらに Holzgruber は電極直径比がより小さな場合でも浅く均一なプールが得られることおよび電極直径比を大きくした場合にはゴーストなどの問題が生じると述べた。

以上この Session では実操業上の問題点が活発に討論された。比較的小型の鋼塊の場合における溶解条件が鋼塊品質に与える影響については従来から定性的に求められていたが、本シンポジウムでは系統的な実験によって定量化する試みが数社から報告された。また VAR と ESR の比較およびモールド設計上の問題点なども報告

された。

ここで取り上げられたおもな溶解条件としては電極の品質、電極-モールド直径比 (あるいは断面積比)、モールドの形状、スラグ量、電源の種類などがあつたが、一般的には電極-モールド直径比がおもな議論の対象になつていた。直径比が大きくなれば消費電力が小さくなり、経済的であることは大方の一致する意見であつたが、溶鋼プールの形状との関連において品質に与える影響については意見が分かれていた。すなわち直径比が増加すると前述のような利点はあるが、溶鋼プールを深くするので悪いという見解と、もう一つは溶鋼プールの深さは溶解速度によつて調節することができ、直径比が大きな場合には表面近くでの温度勾配がゆるやかになるので逆に良いという見解である。

このような直径比に関する一見矛盾する議論は実操業面での他のいろいろな溶解条件 (たとえば鋼種、鋼塊高さ、使用スラグなど) によつて左右されるし、スラグの温度や電磁攪拌などが定量的に体系づけられていない現状においては一致した結論を得ることは難しいように思われた。

III. Session 3. New Applications of ESR Technique

Session 3 の講演は第 1 日目の 6 月 7 日の午後 Session 1 にひき続いておこなわれ、ESR 法の新しい分野への応用に関する興味ある論文が 5 件発表された。

(1) J. B. Tobias, M. Bisnette, W. R. Foley (米・Teledyne Surface Eng.) は ESR 法によるロール表面被覆技術に関する研究 “Some Resign, Operational and Economic Considerations of an Electroslag Roll-Rebuilding Machine” について発表し、Tobias が講演した。ロール表面被覆の実験的設備については第 2 回シンポジウムで報告したが、今回はそれを工業的規模まで拡大した機械の構造、操業法および経済性を説明した。前もって表面仕上をした芯金ロールを水冷銅モールドの中に垂直にセットし、さらにロールとモールドの間には最高 27 本までの電極を兼ねたワイヤーを円周状に配置してエレクトロスラグ被覆をおこなう。1 本の電極当りの最大溶着速度は 25 lb/hr であり、被覆できるロールの最大直径は 36 インチである。ESR によるロール表面の再生は他の方法よりも被覆速度が大きく経済的であり、ロール総コストの約 25% の低減が可能である。また溶着金属を適切に選択すればロールの寿命の向上にもつながる。

Rawson はクラッドロールの実際の使用実績と被覆した後の表面の仕上について質問した。Tobias はまだ使用実績は得られていないが 6 カ月後には若干のデータが得られること、また仕上代は少ないことを答えた。Holzgruber はロールの種類と組成および被覆後のクラックの発生危険性について質問した。これに対して

Tobias はホットワークロール用としてダイス鋼を用いた経験しかないこと、および後者についてはロールをモールドから抜き出した後すばやく一定温度の炉に装入することによってクラックの発生は防げると答えた。最後に電極にワイヤーを使用する理由については Teledyne 社ではワイヤーを製造していること、またワイヤーは非常に応用範囲が広く大量のストックが可能であることなどを述べた。

(2) 氏家 昭, 佐藤昭三, 酒井幸雄, 永田順一 (三菱重工) は ESR による耐熱合金管の製造法および製品の品質についての研究 “Development of New Dynamic Casting for Application of Cylindrical Products” を発表し氏家が講演した。種々の断面形状を有するパイプおよびH型製品の製造に対して開発された技術は溶造法と称され、固定水冷モールドと引抜き機構に特徴がある。鑄造されたパイプの内外面はスラグ膜を通して急速に冷却されるので結晶粒の微細な製品を得ることができる。溶造法による HK40, HK50 のパイプの特性について説明したが、表面性質は良好で成分も均質であり機械的性質も優れていた。粒界における共晶炭化物が少なく炭素の固溶度が大きいので、2 次炭化物が充分析出して熱間強度が上昇した。溶造管を実際のエチレンプントで使用した実績も良好であると報告した。

(3) 鈴木健三 (理研ピストン) は Cu-Fe 合金のエレクトロスラグ溶解に関する “Production of Cu-Fe Alloy by Electroslag Melting Process” を発表した。Cu-Fe 合金は均質な鑄造組織が得られたい合金で有用な性質を有するにもかかわらず工業的に生産することは困難であったが、ESR 法によってこの問題は解消した。 $80\text{CaF}_2\text{-}10\text{MgF}_2\text{-}10\text{Al}_2\text{O}_3$ のスラグを用いて溶解した場合、微細で均質な組織の鋼塊が得られた。鋼塊の直径が 60 mm から 250 mm に増加するとミクロ組織は粗くなるが、均質性は失われなかった。Cu-Fe 合金は通常の溶解法では熱間加工性はきわめて悪いが ESR 法では 40~90%Cu の領域でそれが改善され、鑄造、圧延のほか冷間加工も可能となった。このような製造法によって得られた合金の機械的性質、電気伝導度、磁気特性についても述べ、さらに製品の例を説明した。

この講演に対して 50Fe-50Cu 合金の鍛造温度に関して質問があり約 850°C であるという返答があつた。またスラグに MgF_2 を混合する理由については表面性質の向上のためであるとの返答があつた。

(4) G. K. Bhat (米・Mellon Inst. of Carnegie-Mellon Univ.) は中空鋼塊の製造を主とした “Manufacture of Shaped Castings through the Electroslag Remelting Process” について講演した。ESR 法によって製造される合金とその製品について概説したあとで、例えばガスタービン用の superalloy の場合でも VAR 法は将来 ESR 法に置き換えられることを指摘し

た。さらに回転ディスク用素材としての中空 ESR 鋼塊の製造が重要になることを述べた。ESR 法によって中空鋼塊を製造する場合の問題点として、(1) マンドレルの引抜き、(2) マンドレルの冷却、(3) 内外面の表面状況、(4) コストなどをあげ、Mellon 研究所で製造した種々の中空鋼塊の機械的性質を説明した。将来は中空鋼塊を低コストで製造する方法を開発することが必要であることを指摘し、一本電極および複数電極を使用した製造法を提案した。その他 ESR 法の応用範囲として大型鋼塊の製造、複雑な断面形状の鋼塊の製造の可能性を述べ、最後に非消耗電極を使用したスクラップ供給方式の溶解法についても説明した。

この講演に対しては非消耗電極溶解法に関する質疑応答が数多くおこなわれた。まず Gammal よりスラグの脱酸およびスラグの組成に関する質問がなされ、それに対して Bhat はスラグの脱酸が非常に重要で溶解中数分間隔で Al, Ca などの脱酸剤を周期的に添加すること、またスラグは溶解する合金に適した組成を選ぶが、 CaF_2 30~70% に MgO , CaO , Al_2O_3 を混合したものが標準であることなどを述べた。脱硫、 Al_2O_3 系介在物の問題に関しては脱硫は完全におこなわれ、 Al_2O_3 はスラグに集まるので問題ないと述べた。Holzgruber は非消耗電極式 ESR 炉で溶解される合金の種類と電極の材質について質問した。Bhat は前者については Inco 718, Inco 600 であり、多量に発生する切粉を有効に使用することが目的の一つであると述べた。後者については表面にタングステンのスプレーした水冷銅電極を用い電極はゆっくり回転させると説明した。Roberts は電極の回転の目的と溶解電圧、電流について質問したが、Bhat は回転はスラグによる局所的な侵食を防ぐためであり、また溶解は 30~32 V, 8 KA でおこなっていると答えた。

(5) B. E. Paton, B. I. Medovar, G. A. Bojko, I. I. Kumish (ソ連・E. O. Paton Electric Welding Inst.) は ESR 技術による大型機械部品の接合に関しての “Shaped Electroslag Casting in Workpiece Production” を発表し Bojko が講演した。ESR 鑄造 (ESC) と ESR 溶接 (ESW) を組合わせた ESR 技術 (EST) の概念を一部映画により説明し、製造された種々の大型機械部品の例を紹介した。ESR 鑄造品は性能が熱間加工品に劣らない製造が得られるが、EST はこの長所を利用して多数の部品を接合し大型の複雑な形状の製品を作る方法である。ソ連では大型ディーゼル用クランクシャフト、圧力容器、冷間圧延用ロール、コネクティングロッド、中空鋼塊などがこの方法によって製造されている。複雑で大型の構造物の製造は将来鍛造方式から EST 技術へ移行することが考えられ、高品質で精密性を有する部品の製造にも応用が期待されていると述べた。

この講演に対しては ESR 材と鍛造材の強度の比較について質問があり、Bojko はまったく問題ないと答えた。また Gammal は材料を ESR で接合した場合接合面にスラグ膜が形成されないかと質問したが、そのような膜は形成されず介在物も少ないとの答があつた。

以上のごとくこの Session では ESR 法の新しい分野への応用について活発な討論がおこなわれたが、講演数が 5 件と少なかつたにもかかわらず内容は比較的豊富であつた。ここで述べられた ESR 法の新しい分野としては Session 5 の大型 ESR 鋼塊は別として次の 4 項目に分類できる。

- (i) 溶着、被覆あるいは接合による複合材料、大型複合製品の製造
- (ii) ESR 材の品質を生かし、加工工程を簡略化するための複雑な断面形状の鑄塊の製造
- (iii) superalloy、非鉄金属などエレクトロスラグ溶解する合金の範囲の拡大
- (iv) スクラップを直接原料とする溶解

これらの技術はいずれも完成されたものではなく、将来の応用技術としてますます研究が進むであろうし、それに付随してまったく新しい応用分野が開発されることも期待される。

IV. Session 4. Manufacturing and Properties of Tool, Bearing, High Alloy Steels and Super Alloys

Session 4 の講演は第 1 日目の 6 月 7 日の午後および 6 月 8 日の午後の 2 日間に分けておこなわれた。この Session では低合金鋼、工具鋼、高合金鋼などの製造と品質に関する論文が集められ 7 件の研究結果が発表された。

(1) B. Sjöberg, A. Cederlund, C. Engström (スウェーデン・Uddenholms Aktiebolag Steel Research Dept.) は ESR 条件と工具鋼の性質の間の関係に関する研究 “The Influence of the ESR Melting Rate and Ingot Size on Some Important Properties of Tool Steels” を発表し、Sjöberg が講演した。AISI H13 の衝撃強度におよぼす溶解速度の影響および AISI D2 の炭化物組織におよぼす溶解速度と鋼塊サイズの影響を調べた。H13 については溶解速度を 475~750 kg/hr の間で変化させた 600 mmφ の鋼塊を 275 mmφ に鍛伸した材料について衝撃試験をおこなったが、衝撃値は溶解速度の増加に伴って悪化した。これは溶解速度が増加するとミクロ偏析、大型介在物の量が増加するためである。D2 については 120, 300 mmφ と 400 mmsq. の鋼塊について実験したが、炭化物組織におよぼす溶解速度の影響は鋼塊サイズによつてかなり異なつた様相を示した。300 mmφ の鋼塊は炭化物量は溶解速度に依存しないが、400 mmsq. の鋼塊では溶解速度の増加に伴って炭化物組織は改善された。120 mmφ の場合には溶解速

度が増加すると表面部の炭化物組織は良くなるが中心部では逆に悪化した。

Mellberg は溶解速度は電圧、電流、スラグ組成など種々の因子の相互関係で決まるが、溶解速度を何によつて変化させたかと質問したのに対して、Sjöberg は電極直径、スラグ組成、量、電極のスラグ中の浸入深さなどを一定に保ち入力増減のみによつて変化させたと答えた。J. F. Elliott は凝固組織は局部凝固時間に依存するので、単に溶解速度と凝固組織の関係は述べることはできず、溶解速度と局部凝固時間との間の直接的な関係は種々の因子を一定に保つてはじめて考えることができるという意見を述べた。

(2) 湯浅悟郎、矢島忠正、椎名堅太郎(日本特殊鋼) は高合金鋼、superalloy などの ESR における精錬効果および材料の品質に関する “Quality Improvements of High Alloy Steels by ESR” を発表し椎名が講演した。モールドの直径は 160~570 mm でスラグは通常 CaF_2 -30 Al_2O_3 の組成であるが、superalloy の場合には 100% CaF_2 を用いた。高合金鋼の脱硫率は電極中の S 濃度に依存し、これが 40 から 240 ppm に増加すると脱硫率は 30 から 50% に上昇する。Al, Ti を含む superalloy の場合には 65% の脱硫率が得られた。13% Cr 鋼では酸素含有量は平均 35 ppm まで減少する。また非金属介在物は A 系が 80%, B+C 系が 50% 減少し、さらに鋼塊サイズの増大および Si, Al の増加に伴って減少量は大きくなる。ESR 高速度工具鋼についてはとくに炭化物組織が良好で、一般鋼塊に比較して一次炭化物が細かく均一に分散した。そのため鍛伸後も一般鋼塊材との差異は明らかに認められ、ESR 高速度工具鋼は鍛伸率が小さくても結晶粒は微細で高い硬さが得られた。

(3) 門瀬益雄、添野 浩、柴田 勲、生田 勲、石川 勾(日立製作所)は冷延ロール用鋼の品質について VAR 材と ESR 材を比較した “The Quality of Vacuum Arc and Electro Slag Remelted High Carbon Chromium Steel” を発表し柴田が講演した。0.8%C-2%Cr の冷延ロール用鋼を直径 500 mm の VAR 炉および直径 750 mm の ESR 炉で溶解した。VAR の場合には半分を回転攪拌溶解、半分を静止溶解でおこなつたが、前者の場合にはフレックルが多数観察された。静止溶解の場合にはフレックルは減少するが完全には消失しなかつた。一方 ESR 鋼塊ではマクロ偏析のない清浄度の良い鋼塊を得ることができた。しかしデンドライト組織は ESR 鋼塊より VAR 鋼塊の方が微細で、ロールに要求されるミクロ的な均質性の面では VAR 材の方が優れていた。合金元素含有量と共晶炭化物の量を測定し、それらの間の関係を定量的に表わした。その結果から均質なロールを作るのに必要な C, Cr, Mo などの組成範囲を指摘した。

Cremisio は VAR における攪拌は自然に発生したものかあるいは強制的に与えたものかと質問し、柴田は外部磁場によつて過大に与えたと答えた。また鑄造状態で ESR 鋼塊の方が VAR 鋼塊より炭化物が細かくなることがあるかとの質問に対して柴田はこの研究では共晶炭化物の面積とデンドライトセルサイズを測定し、炭化物の大きさは測定しなかつたと答えた。

(4) 望月俊男、大賀栄次(三菱製鋼)は ESR ロール材の品質に関する“On the Quality of Forged Hardened Rolls Made by Electroslag Remelting”を発表し望月が講演した。ESR 溶解した 0.9%C-3%Cr-Mo-V の 800 mmφ の鋼塊から鍛造した 450 mmφ の冷延用ロールについて諸性質と実際の使用実績を述べた。ESR 鋼塊は表面肌が良く内部のマクロ組織はほぼ全体的に柱状晶から成りマクロ偏析は存在しない。非金属介在物は通常鋼塊の 1/3 に減少し、樹枝状晶間における炭化物の分布も均一である。ロールにおける Cr の偏析指数は通常鋼塊からのものが 1.55 であるのに対して、ESR 材では 1.32 に減少する。実際の使用の面からは ESR ロールは耐肌荒れ性、ダル加工性、ダルの耐磨耗性が優れている。また耐スポーリング性も向上するので、将来 ESR 法は鍛鋼焼入ロールの製造に対して重要性を増すであろうと結論した。

山口(紘)は写真における ESR 鋼塊中の介在物はアルミナクラスターのように思われるが、鋼塊中に多く存在するかと質問したのに対して、望月はまれであると答えた。

(5) R. S. Cremisio (米・Consultant to the U. S. Air Force), D. A. Shinn (米・Air Force Materials Lab.) は特殊鋼および superalloy 中の微量元素に関しての“Trace and Residual Element Consideration in Vacuum and ESR Melting of Specialty Steels and Super-Alloys”を発表し Cremisio が講演した。Superalloy の性質に悪影響をおよぼす微量元素を有益なものと有害なものに分類して概説し、VIM, VAR, ESR, EB などの各種溶解法における微量元素の挙動を述べた。つぎに具体的に superalloy の機械的性質を劣化させる有害な微量元素 Bi, Te などの作用および superalloy の熱間加工性を改良する Ca, Mg の添加の効果を説明した。また米国において製造されている superalloy 中の微量元素含有量の実態を述べるとともにこれの分析技術に関して現状では問題点があることを指摘した。さらに真空溶解における有害な微量元素の除去についての実験結果を説明し、将来の研究手法なども提案した。

この講演に対して Rawson はレアアース元素の添加を実験したことがあるかと質問した。Cremisio はおこなったと答え、さらに次のように述べた。レアアース元素の添加でいろいろな問題を解決することができた。レアアース元素は通常化合物の形で添加されるので Ce,

La などの個々の元素の適量については明らかでない。レアアース元素は非常に有効であり、個々の元素の果たす役割を充分理解した上で使用することが望ましい。たとえば Ce は Pb に対してきわめて有効であると述べた。真鍮からの Ni 基合金の水素の問題に関する質問には、溶解中水素の pick up はなく電極も VIM 電極を用いるので問題はないと答えた。山口(紘)は ESR でスラグ成分とくに CaF_2 から微量元素が侵入することがあるかと質問し、Cremisio は Pb が侵入する場合がありますと答えた。

(6) V. J. Colangelo (米・Watervliet Arsenal), K. E. Holmes (米・AMMRC) は ESR 高抗張力鋼の機械的性質に関しての“Effect of Forging Reduction on ESR Melted High Strength 4337+V Steel”を発表し Colangelo が講演した。4337+V 高抗張力鋼の製造方法の改善と ESR 材の鍛錬比と機械的性質の関係を検討することを目的として直径 10 インチと 12 インチの鋼塊を製作した。鋼塊は鍛伸率 1.77, 2.56 の円筒および鍛伸率を 1.2 から 3.0 まで段階的に変えた段付き円筒に鍛伸し鑄造状態とそれぞれの鍛伸材について機械試験をおこなった。ESR 鋼塊は鑄造状態でも均質であり、強度および靱性が真空脱ガス鋼塊の鍛伸材より優れていた。さらに ESR 材においては衝撃値以外の機械的性質におよぼす鍛錬比の影響は小さい。これは樹枝状晶間のミクロ偏析が少ないためである。高温で均質化処理をおこなうと降伏点と抗張力はさらに上昇した。これらの結果からテーパのない ESR 鋼塊からテーパ付きの高品質の鍛造品を作ることと可能であると述べた。

Cremisio は均質性を調べる方法について質問したが、Colangelo は micro probe で確かめたと答えた。また Holzgruber は鍛伸率が小さい領域での機械的性質を、鍛伸温度、結晶粒度に関連させて意見を述べた。

(7) C. F. Elliott, J. W. Vorberger, M. G. Staton, G. L. Mills (米・Teledyne Allvac Co.) は A. C. ESR 炉での superalloy の溶解に関する研究“Super Alloy Melting Using an Ingot Bottom Withdrawal A. C. ESR Furnace”について発表し C. F. Elliott が講演した。炉は鋼塊引抜き、電極交換方式の ESR 炉で直径 20 インチ、15 000 lbs までの鋼塊を溶解することができる。2 次側の出力は 100V, 15 000A の 60 Hz 交流を用いる。Nickelvac H-X, H-C, 16-25-6, N155 などの固溶強化合金は良い表面性状を得るために以前は VAR 炉電源を使用して D. C. ESR 炉で溶解されていたが、現在では A. C. ESR 炉での生産体制が確立している。Mn, N などの volatile な元素を含む合金でも表面が良質の鋼塊を得ている。Ti, Al のような活性元素を含む A286, X750, Rene 95 のような析出硬化型合金の溶解も現在実験的におこないつつあり、成分偏析が極めて少ない鋼塊が製造されている。ESR による Superalloy の熱間加工

性は良く、特に Rene 95 については VAR 鋼塊に比較してそれがかなり改善されたが、ESR スラグの脱硫効果によるものか否から今後の研究課題であると述べた。

真殿は操業時の出力電圧および fill ratio について質問し、前者については通常 50V であること、後者については面積比が 0.6 できると答えた。Cremisio はエレクトロスラグ溶解した superalloy 中には若干の Mg がスラグの CaO とともに入る傾向があり、硫化物は $TiSC_2$ に代つて細かく球状に分散してそのために横方向の靱性が改善されると述べた。J. F. Elliott は Ti, Al を含む superalloy の製造が ESR 法によって容易になったことを認めたあとで、VAR 法と ESR 法では S の挙動に大きな違いがあると考えられているが Ti, Al を含む Co-Ni 合金中で Ca の溶解度があることを確認したかと質問した。C. F. Elliott は VIM でも CaO で脱硫すると熱間加工性が改善され ESR と同じ傾向が認められるが溶解度の点は明確でないと答えた。またソ連の文献では Ca, CaO を含むスラグから Ca が減少するというデータがあるが、彼の以前の実験では Ca の減少は認められなかったこと、およびその文献のデータはおそらく Ti, Al を含まない Ni 基合金の場合で Al, Ti を含む合金の場合についてはそのようなデータは見たことがないと述べた。また Mitchell からは高純 Ni を CaF_2 -CaO スラグで溶解した場合、電極先端から Ni 中に Ca が拡散することを確認したなどが述べられた。

Session 4 では以上のごとく構造用鋼、工具鋼、高合金鋼および superalloy などの主に ESR 材の品質に関する講演、討論が精力的におこなわれ、ESR 法の適用範囲が広いこと、および非常に大きな関心もたれていることが改めて認識される内容であった。材料における均質性あるいは微細な炭化物組織が要求されている工具鋼、冷延ロール用鋼などに対しては ESR 法の一つの特徴である比較的速い冷却速度、あるいは一方向凝固プロセスを利用したものである。また均質性ととも機械的性質あるいは熱間加工性を悪化させる有害な微量元素が極力少ないことが要求されている高抗張力鋼、高合金鋼、superalloy などに対しては ESR 法のもう一つの特徴であるスラグによる精錬反応を主に意図して適用されていると考えてさしつかえない。それによつて得られる材料はいずれも現状での溶解製造技術の最高水準に近い品質を有している。

このような理由から ESR 法で溶解される鋼種および合金の種類は、それぞれの目的に応じてますます広範囲に拡張されるであろうし、高合金鋼はいうまでもなく superalloy についても ESR 法が占める量的な比率は今後増加していくものと思われる。それに伴ない適切なスラグ組成の開発、選択などに関する研究も活発におこなわれていくと考えられる。

V. Session 5. Equipments and Operations for the Production and the Properties of Large Ingots

この Session の講演は第 2 日目の 6 月 8 日の午後におこなわれ、大型 ESR 鋼塊に関する論文が 6 件集められ討論された。

(1) 真殿統 (理研ピストン) は超大型 ESR 炉の概念に関する “Concept of Producing Very Large Ingot by Electroslag Melting” を報告した。ESR 炉を大型化する場合多極方式ではスラグのエネルギーバランスが悪くスラグ殻が不均一になる問題がある。また高電流による溶鋼攪拌も生ずるので、大型 ESR 炉には電極直径比を大きくした単相方式を採用すべきであると述べた。

(2) 新実高保、三浦正淑、松本重喜、鈴木章 (神戸製鋼) は 50 ton ESR 鋼塊の内部性状に関する研究 “An Evaluation of the Large Electroslag Remelted Ingot” を発表し新実が講演した。0.55% C 鋼の 1500 mm ϕ の鋼塊の組織、成分偏析、機械的性質および水素含有量などを調査した。溶解条件が適切ならば偏析のない健全な鋼塊が得られるが、適切でない場合にはストリンガー状の偏析が発生する。鋼塊の水素含有量は大気中の水蒸気分圧の平方根に比例する。水素の問題はスラグ面をアルゴンでシールすることによつて完全に解決すると述べた。

(3) M. Wahlster, R. Schumann (独・Leybold-Heraeus GmbH & Co.) は超大型 ESR 鋼塊の品質に関する “A Contribution to the Electro-Slag-Remelting of Large Forging Ingots” について発表し Wahlster が講演した。4 極電極交換方式で製造した 1300 mm ϕ (52 ton) および 2300 mm ϕ (80 t) 鋼塊について品質の調査をおこない銑肌、酸素、水素含有量、成分偏析、介在物含有量などの点がすべて良好なことを示した。したがつて 4 極電極交換方式で問題なく大型 ESR 鋼塊を製造できることを述べ、ロータなどの高品質大型鍛造用鋼塊に対して有効な手段であることを指摘した。

真殿はこの講演に対して多極 (4 極) 方式では磁力攪拌がおこり、さらに電極-モールド断面積比が小さいと電力消費量が大きく不経済であると述べた。Wahlster は各極が電氣的に独立しているため磁力攪拌はなく、また電力消費量の増加は全経費の 2~3% に過ぎず、それより品質上の問題から電極断面積比は小さい方がよいと答えた。さらに単極方式の場合には電流制限から 900 mm ϕ 以上に電極を大きくすることはできないとの意見が Wahlster から出されたが、真殿は Al の電解工場の例にもあるように投入電流の制限は全く無いと述べた。

(4) P. J. Wooding, J. Luchok (米・Consarc Corp.) は大型鍛造品用鋼塊の製造に関する “An Electroslag System for Large Forging Ingot Production” を発表し Luchok が講演した。3000 ϕ $\times$ 6000 mm (300 t) の鋼

を溶解する ESR 炉の設計をおこなった。水素の問題に対しては装置を容器内に密閉し、磁場による攪拌の間に対しては電極断面積比の大きい単極方式を採用し、それに伴う大型電極の製造および偏析の問題に対して 1/4 円断面を有する鋼塊を横注ぎで 4 本製作し、これを溶接によつて円柱状の電極に組立てる方式を採用し、溶解速度が 8000 lb/hr の場合の高さ 6000 mm の置での溶鋼プールの形状を計算によつて求めると、プールの深さは約 1000 mm になると報告した。

この講演に対し Holzgruber は溶鋼プールの深さによつて、1000 mm ϕ の鋼塊の実際の溶解で溶解速度を 300 lb/hr にすると深さは 2000 mm 以上にもなることから、計算結果の 1000 mm というのは誤りで 2500~300 mm に達することが推定されるという意見を述べた。

(5) M. Wahlster (独・Leybold-Heraeus GmbH & Co.) は大型 ESR 鋼塊の経済性に関する “Comparison of the Economy of Manufacturing Forgings by Conventional Methods and by the Electric Furnace Slag melt (ESR) Process” を報告した。大型 ESR 鋼塊の製造上の問題点の一つであると考えられる経済性について実際の製造実績をもとに検討し、ESR 法は最も経済的であることを指摘した。ESR の経済性は (a) 炉の産量をも高める (固定費の減少)、(b) 小型炉では高合金鋼のみを溶解する、(c) 事故率の高いものを溶解する、(d) 鍛造費の高いものを溶解する、などによつて高められると述べた。

(6) P. E. Paton, B. I. Medovar, V. P. Andreev, u. G. Emeljanenko, Yu. V. Sobolev (ソ連・E. O. Paton Electric Welding Inst.) は EST による大型鋼塊の製造に関する “Production of Super Large Billets from Ingots and Forgings on the Basis of Electroslag Technology” を報告した。電極と同一鋼種のモールドを用いてこの内面を溶かすことにより大きな ESR 鋼塊を製造する方法を述べ、100~150 t の鋼塊の製造が可能であることを示した。また ESR 双極方式により 2 つ以上の ESR 鋼塊を溶接し大型鋼塊を製造する方法について述べ、1500 mm ϕ での実績が良好であるので、3000 mm ϕ の鋼塊の溶接も好結果が期待されていると報告した。

この Session で講演された論文は既発表のものが一部あり、大型鋼塊としてはやや新鮮味に欠けていた感じもある。6 件の講演の内容から大型鋼塊 (50 t 以上) の製造上の問題点を総括すると次のごとくになる。

- (i) 水素の pick up の防止手段
- (ii) 大電流による溶鋼の攪拌の防止手段
- (iii) 偏析の少ない大型電極の製造方法
- (iv) 溶鋼プールを浅くする方法

水素の pick up を防止する技術および溶解速度を小さくしてプールを浅くする技術はすでに解決されたということが 2, 3 の会社から報告され特に異議はなかったが、プールの電磁力攪拌については意見が分れていた。すなわち多極方式では、極間の電氣的アンバランスおよび高電流による溶鋼攪拌は現技術では防止できないという意見、そして単相多極方式を採用すれば防止できるという意見である。またこれに関連する問題として、短尺モールド (moving mould, ingot withdrawal process) を使用する場合には、鋼塊収縮の不均一、スラグ殻の不均一によつてもたらされる漏鋼の危険性も指摘されたが、スラグを高温化し、しかも溶解速度を小さくすれば解決できるという意見があつた。

パーティー会場風景 (経団連会館ダイヤモンドルーム)

さらに多極電極交換方式を支持する理由として、偏析の少ない経済的な電極の製造が単極方式では難しいことをあげているが、縦方向に 4 分割したモールドに注入し後に円注状に溶接して組立てれば大きな電極の製造も可能であるという意見があつた。

いずれにしても超大型鋼塊の製造技術は経済性を含めて大きな問題を残しており、その点ソ連で研究されている溶接によつて大きな鋼塊を作る方法、および consumable mould 法などは今後現実的な手段として論議されていくものと思われる。

以上のように 2 日間にわたつておこなわれた今回の ESR 国際シンポジウムは内容的に基礎から応用までバラエティーに富み、多数の出席者の熱心な討論によつて実りのあるものであつた。今回のシンポジウムが今後の ESR 技術の発展に果たす役割は非常に大きいものと考えられる。

最後に 田畑専務理事より次回のシンポジウムは 1976 年にオーストリアのウィーンで Wahlster が幹事役となつて開催されることになったと述べられた。

(三浦正淑, 金原 茂)