

コールドクルーシブル誘導溶解炉のボトム出湯技術

蜷川伸吾(工博)*・長尾元裕*・草道龍彦*・仲山公規**・福元裕彦(工博)***

*技術開発本部・生産技術研究所 **技術開発本部・機械研究所 ***技術開発本部・開発企画部

Bottom Pouring Technology in Cold Crucible Induction Melting

Dr. Shingo Ninagawa・Motohiro Nagao・Tatsuhiko Kusamichi・Kiminori Nakayama・Dr. Hirohiko Fukumoto

A new pouring method for Cold Crucible Induction Melting (CCIM) was developed. In this method a solidified skull is melted with a high frequency coil placed under the bottom of a crucible. Then, the molten metal is poured from a bottom copper nozzle which is segmented and water-cooled. The shape of the pouring nozzle was designed through the numerical simulation of electromagnetic and thermal fields. Titanium melting and bottom pouring were successfully performed with the CCIM apparatus.

まえがき = コールドクルーシブル誘導溶解法 (CCIM : Cold Crucible Induction Melting) は、冷却水により冷却された銅製のつぼをもちいる溶解法であり、雰囲気制御されたチャンバ内で、チタンをはじめとする高融点でかつ活性な金属の無汚染溶解が可能である。第1図に従来のCCIMの概要を示す。高周波コイルの内側にスリットによって分割された水冷銅製のつぼを設置し、コイルで発生した高周波磁場をスリットから通過させてるつぼ内に浸入させ、金属を誘導加熱するものである。

CCIMの起源は1930年代に出願されたドイツ特許¹⁾に見ることができるが、本格的な研究が開始されたのは1960年代に入ってからである。当初、CCIMのるつぼ分割数は4もしくは8が主流であり、米国でるつぼ直径330mmを有するCCIMも試作されたが²⁾、チタンへの適用にあたっては溶湯のスリット部への浸入によって生じる電氣的短絡による発熱不足、るつぼチタン間のアーキングなどの問題が生じ不成功に終わった。1970年代に入ると同じく米国の鉱山局(Bureau of Mines)は、るつぼと溶融チタンの間にスラグ(CaF₂)を添加して溶解する方法を開発した³⁾。この方法はInductoslag Meltingと呼ばれ、電氣的短絡やアーキングなどの問題を解決しチタンの安定溶解を実現した。しかしながらこのプロセスは、チタン鑄塊中にスラグが不純物として混入するため実用化には至らなかった。

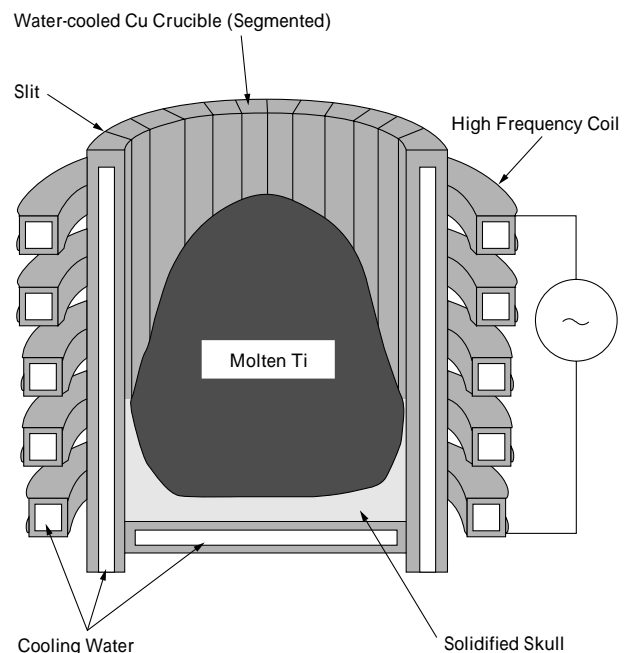
1982年、米国のデュリロン社は、24分割されたるつぼをもちい、さらにるつぼ構造を検討することにより、スラグを使用することなくチタン20kgの溶解に成功した⁴⁾。さらに、この技術を引き継いだコンサーク社は、1991年に500kWの高周波電源をもちいチタン32kgの溶解出湯に成功している⁵⁾。また、フランスでは、るつぼ底に引き抜き装置を設置した連続タイプのCCIMの研究がなされ、チタンスクラップを原料としてピレット(150×2000mm)を試作している⁶⁾。

国内においても1990年代から、CCIMの様々な研究がなされるようになった。出向井らは、CCIMと吸引精密鑄造の組み合わせによってTiAl製のターボチャージャの製造に成功し⁷⁾、また、金子らは、太陽電池用シリコ

ンの連続鑄造を実施している⁸⁾。

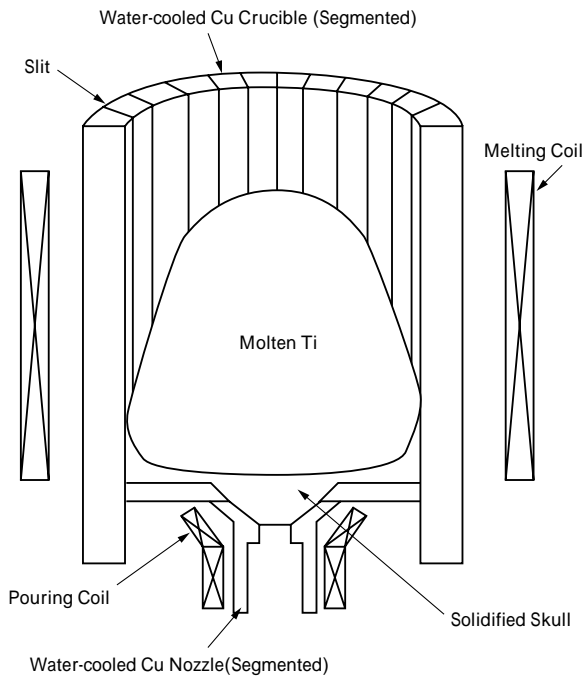
以上のように、発展途上にあるCCIM技術であるが、現行のCCIMでは、コイルごと水冷銅製のつぼを傾けて出湯する傾動法が一般的である⁹⁾。しかしながら、この方法では、出湯歩留まり、安全性と様々な点で問題がある。

そこで、著者らは課題である出湯技術に着目し、従来にない、るつぼ底より出湯をおこなう方法を検討した。第2図に概要を示す。るつぼ底部に新たに高周波コイルを設置し、底部の凝固スカルを高周波溶解し出湯をおこなうものである。るつぼ底の凝固スカルは水冷銅製のつぼにより強冷却されており、これを溶解して出湯するには、冷却に勝る発熱量を与えねばならず、出湯ノズル・コイル形状の最適化が重要となる。そこで、数値シミュレーションにより出湯ノズル形状を最適化し、ボトム出湯に成功したので報告する。



第1図 CCIM溶解炉の概要(従来型)

Fig. 1 Schematic view of cold crucible induction melting (conventional type)



第2図 ボトム出湯タイプのCCIM
Fig. 2 Bottom pouring type CCIM

1. 出湯ノズル設計

出湯ノズルはるつぼ同様、水冷銅の分割構造とする必要があり、さらに高周波コイルもノズル形状に合わせて製作しなければならない。そのため、複数のノズル・コイルを製作し、実機実験により出湯可能なものを選定する方法は、多大の費用と時間を要するため現実的ではない。そこで、本研究では、数値シミュレーションを活用して出湯ノズル形状を設計することとした。

1.1 数値シミュレーション

採用したシミュレーション手法は、電磁場と温度場を連成して解くものである。はじめに電磁場シミュレーションにより、チタン溶湯の誘導発熱分布を求め、このデータを伝熱凝固シミュレーションにインプットし、出湯可能条件、すなわち凝固スカルの溶解条件を求める。

1) 電磁場シミュレーション

CCIM はるつぼがスリットにより分割されており、るつぼを流れる誘導電流は三次元の各成分を有する。そのため、従来、CCIM は三次元のシミュレーション¹⁰⁾が必須であった。しかしながら、三次元は計算用メッシュデータ作成と結果の評価などに多大の時間を要するため、出湯ノズルの設計にもちいるのは適当でない。そこで、CCIM の三次元問題を軸対称二次元にモデル化する手法¹¹⁾を開発した。

CCIM を軸対象二次元として解くことは、水冷銅るつぼを一体型として取扱うことに等しく、この場合、誘導電流はるつぼ外表面にのみ誘起され、磁場はるつぼ内に浸入せずチャージは加熱溶解されない。これに対して、開発した手法は、るつぼ外表面に流れる電流と等しい量の仮想電流をるつぼ内側に流すことにより、るつぼ内のチャージにも誘導電流が流れるようにしたものである。ただし、この方法では、るつぼにかかる負荷は、解析上、

るつぼ外表面だけしか考慮されないため、るつぼ材質である銅の電気伝導度を補正する必要がある。具体的には、磁場測定値と整合がとれるように補正をおこなった。

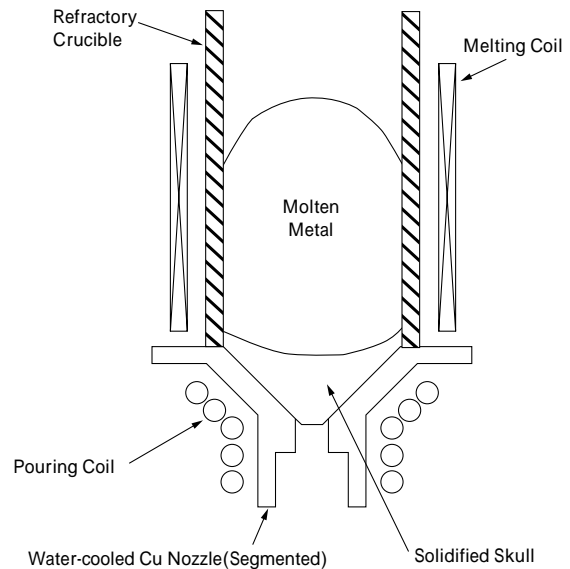
2) 伝熱凝固シミュレーション

電磁場シミュレーションによりえられた発熱分布を伝熱凝固シミュレーションの発熱データとして計算した。境界条件である凝固スカルの銅るつぼ間の熱伝達係数は、通常、鋼、アルミニウムなどの連続鋳造における凝固シェル・水冷鋳型間の値をもちいるのが一般的であるが、出湯ノズル部では、凝固スカルは高温もしくは溶融状態となるため、るつぼとの密着性が向上し、抜熱量がいちじるしく増加する。そこで、熱伝達係数が高温側で大きくなるような温度依存性を与えて計算をおこなった。

1.2 基礎実験とシミュレーション結果

実機をもちいた試験に先立ち、シミュレーション精度を高めるため、小型高周波誘導炉をもちいて基礎実験をおこなった。装置の概要を第3図に示す。溶解用るつぼはコールドクルーシブルではなく、一般的な耐火物るつぼであり、底部のみ水冷銅製の出湯ノズルを備えている。実験条件を第1表に示す。溶解材料としては、チタンと電気伝導度などの物性値に近い SUS304 をもちいた。

テーパ角 50° と 90° の 2 段の出湯ノズルについての実験結果と計算結果を比較して第4図a) に示すが、このノズルでは出湯不可能であった。そこで、実験後の凝固スカルの形状が、実験結果と計算結果で一致するように計算条件を決定した。出湯ノズルのテーパ角度は、出湯用コイルからの発熱効率と、出湯ノズル内表面での冷却能とのバランスにおいて重要である。すなわち、テーパ角度が小さいほど出湯コイルによる発熱量は増加するが、



第3図 ボトム出湯実験装置
Fig. 3 Experimental apparatus of bottom pouring

第1表 SUS304 でのボトム出湯実験条件

Material		SUS 304 6kg
Pouring Coil	Current	2 300 A
	Frequency	7.7 kHz

逆に出湯ノズル表面積は広くなり、抜熱量が増加する。

テーパ角度 90° と 60° の計算結果を第 4 図 b) および同図 c) にそれぞれ示す。90° の場合、出湯ノズル内部は固液共存状態 (1 410 以上) であることから、出湯が可能であると予測されるが、60° の場合は凝固層 (1 400 以下) が存在するため出湯は不可能である。以上により、出湯ノズルのテーパ角度を 90° に決定した。

1.3 CCIM 試験装置の出湯予測

出湯の成否は、出湯ノズルの内径寸法によっても大きく左右される。そこで、テーパ角度 90° として、ノズル内径 10mm および 20mm の場合について、チタンを対象に CCIM 試験装置のシミュレーションをおこなった。結果を第 5 図に示す。出湯ノズル内径 10mm ではわずかであるが未溶解部が存在し、出湯が不可能であることがわかる。いっぽう、内径 20mm では、出湯ノズル

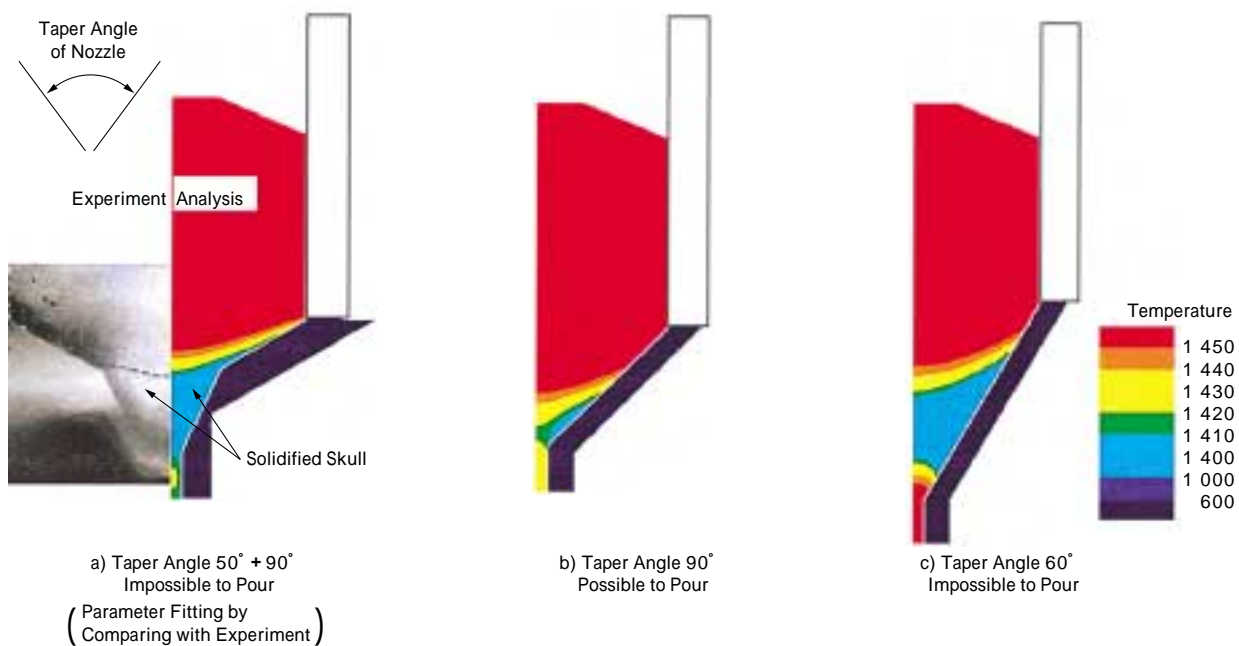
内部はほぼ液相状態となり、出湯可能と予測できる。

2. 溶解出湯実験結果

出湯を確実なものとするため、ノズル内径 25mm、テーパ角度 90° の出湯ノズルを CCIM 試験装置に装着し、チタンの溶解・出湯実験を実施した。結果を第 6 図に示す。シミュレーションにおける予測どおり、溶解出湯が可能であり、最大で溶解量の約 9 割の出湯を実現することができた。

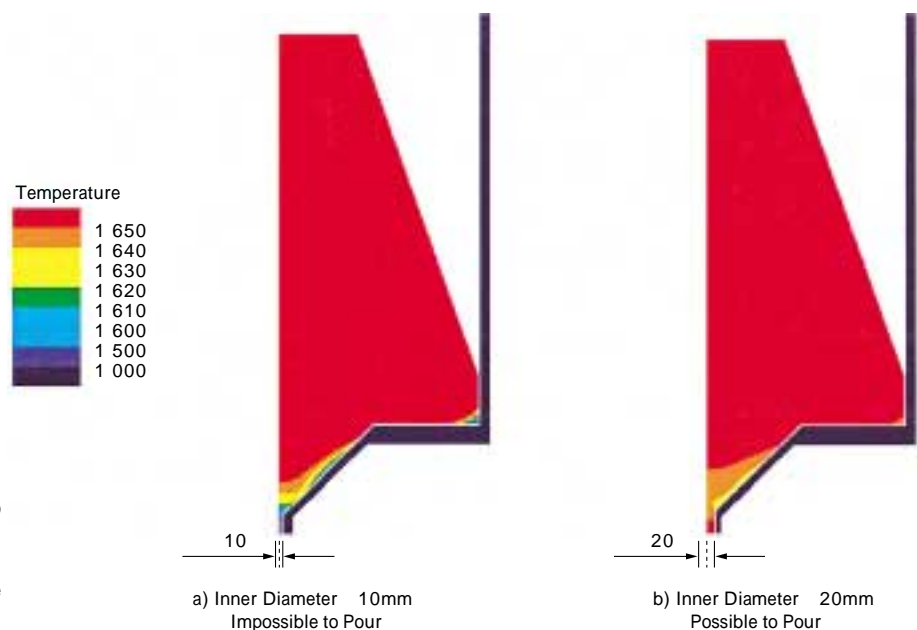
むすび=コールドクルーシブルの底部から出湯をおこなう方法を検討し、数値シミュレーション予測と基礎実験、さらに CCIM 試験装置をもちいた確認試験を実施し、以下の結果をえた。

1) 数値シミュレーション予測と基礎実験から、出湯ノ



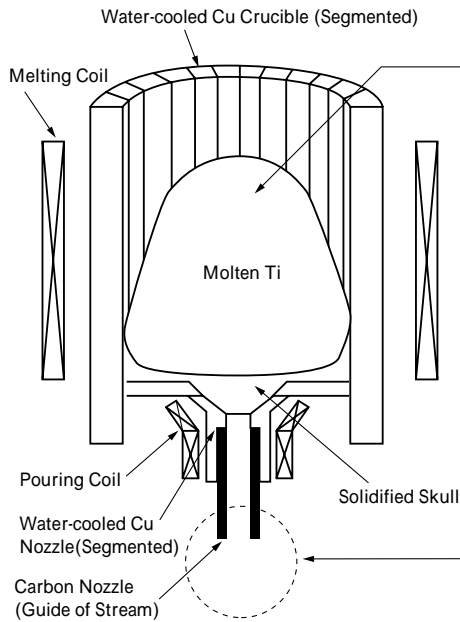
第 4 図 数値シミュレーションによる出湯ノズルの最適化設計

Fig. 4 Optimization of pouring nozzle profile by numerical analysis



第 5 図 CCIM 試験装置における Ti の溶解出湯予測

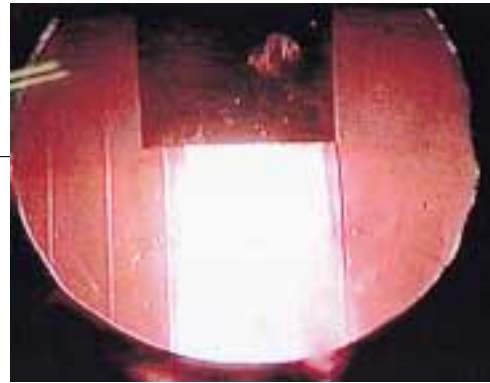
Fig. 5 Numerical prediction of melting and bottom pouring of Ti in the case of CCIM apparatus



第 6 図 CCIM 試験装置をもちいた溶解出湯実験
 Fig. 6 Experimental results of melting and bottom pouring of Ti by use of CCIM apparatus



a) Appearance of Melting Ti



b) Appearance of Pouring Ti

ズルの最適なテーパ角度，出湯可能なノズル内径を求めた。

2) CCIM 試験装置において，数値シミュレーション予測どおりチタンのボトム出湯に成功した。

3) ボトム出湯タイプの CCIM の出湯ノズル設計技術を確立した。

今後，CCIM の適用範囲と可能性を高めるため，出湯速度制御など，より高度な技術の確立を目指す。

参考文献

- 1) German Pat. 518499, (1931)
- 2) USAF Research and Technology Division Report No. MLTDR64-209.

- 3) P. G. Clites et al : U. S. Bureau of Mines(1982) Bulletin 673.
- 4) US Pat. 4738713,(1988).
- 5) D. D. Rees et al : " The Duriron Process : Past, Present , and Future ", The Duriron Co.(1993).
- 6) M. Garnier et al. : Proceedings of 6th Int. Iron and Steel Cong.(1990) Nagoya, ISIJ, Vol.4, p.260.
- 7) 出向井登ほか：素形材，(1993) p.12.
- 8) K. Kaneko et al. : Proceedings of 6th Int. Iron and Steel Cong. (1990) Nagoya, ISIJ, Vol.4, p.254.
- 9) 坂本浩一ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.45, No.2 (1995), p.27.
- 10) T. Yamaguchi et al. : Int. Sympto. EPM, (1994) Nagoya , ISIJ, p.121.
- 11) Christopher P. Riley et al : IEEE Transaction ON MAGNET-ICS, Vol.30, No.5 (1994) p.3008.