浮揚溶解装置（CCLM）の進展

只野　英顕（ただの　ひであき）　　**貝沼　研吾**（かいぬま　けんご）

1　まえがき

浮揚溶解法は，金属をるつぼから浮揚させて各種材料を溶解する方法である。近年の高周波パワーデバイスの開発に伴うインバータ電源の高周波・大容量化により，溶解量はこれまでの数百gから産業用生産設備向けの大容量化が可能となった。

富士電機では，1989年から浮揚溶解装置「CCLM（Cold Crucible Levitation Melting）」の研究開発を継続的に進めてきた。1992年にチタン2.3 kgのCCLMの開発以来，溶融金属の出湯方法と大容量化の開発を進め，1995年には世界に先がけて溶解量50 kg，るつぼ底穴からの非接触出湯による大容量CCLMの製品化を達成した。現在では，溶解量が数百g～数十kgの研究開発から産業用生産設備向けまでのCCLMシリーズを製品化している。

本稿では，これまでのCCLMの進展について報告し，さらに大容量CCLM，連続鋳造CCLM，高真空CCLMなどの製品について述べる。

2　CCLMのるつぼと電源の全体構造

CCLMは，スリットの入った水冷銅るつぼとその周囲に巻かれた水冷のコイルおよび高周波電源で構成される。コイルに高周波電流を流すと，るつぼおよび金属に渦電流が誘導され，これら電流の間に電磁反発力が発生する。このときの電磁反発力が金属の重力より大きければ，金属はるつぼから離れ浮揚する。同時に渦電流によるジュール熱で加熱され金属は溶解する。

図1にCCLMのるつぼと電源の全体構成を示す。この装置の特長として，①コイル間の相互干渉を少なくする方式を採用している，② IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor），MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor），サイリスタを使ったMW級インバータにより構成されている，③安定浮揚させるためには，電磁力を一定に制御することが必要だが，負荷変動があっても電流一定制御の直列共振タイプを上コイル側に採用している，などが挙げられる。

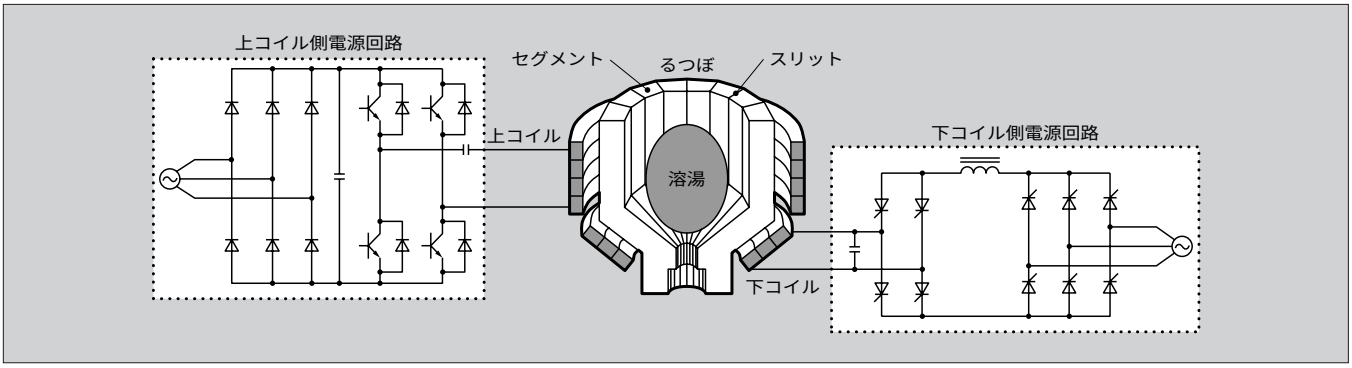
3　大容量CCLMの開発経過

3.1　浮揚溶解の安定化方策

電磁力が強いと浮揚しやすいが，溶湯の安定化が困難になる。溶湯がるつぼ内で安定した浮揚状態を保つためには，溶湯の重さに打ち勝つ浮揚力とるつぼ側面からの反発力，それら全体のバランスが必要である。

そこで溶湯の安定浮揚化を図るために，二重電源励磁方式の採用とるつぼ底部形状の最適化を行った。

図1　CCLMのるつぼと電源の全体構成



只野　英顕

電磁界解析ならびに電磁気応用機器の研究開発に従事。現在，富士電機ファーネス(株)エンジニアリング本部CCLMグループ主任。

貝沼　研吾

電磁界解析ならびに電磁気応用機器の研究開発に従事。現在，富士電機ファーネス(株)エンジニアリング本部CCLMグループ主任。

図２　浮揚力測定装置

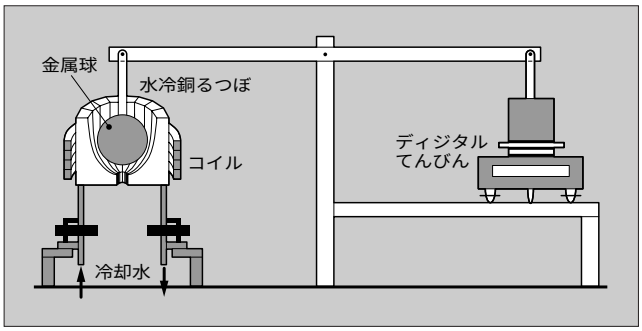


図３　金属材料の違いによる浮揚力と電力の関係

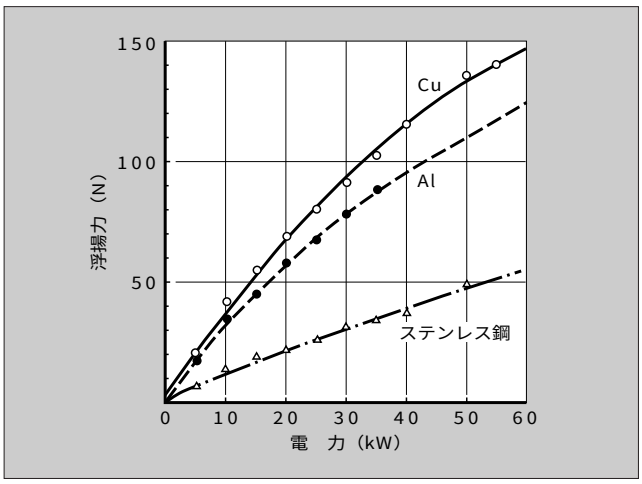


図４　周波数の違いによる浮揚力と電力の関係（Cu 球）

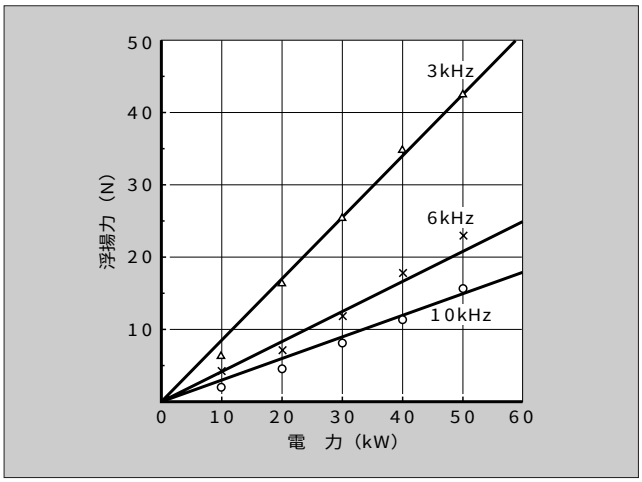
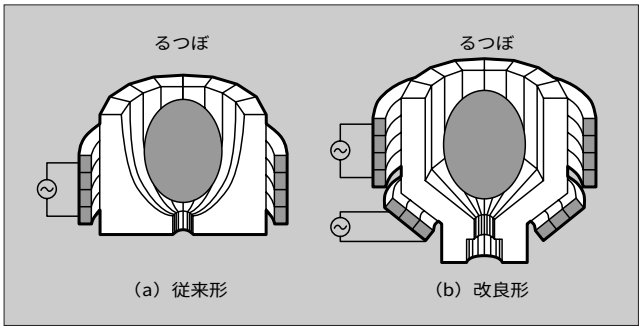


図５　るつぼ形状とコイルの構成



3.2　二重電源励磁方式の検討

周波数と電磁力の関係を調べると，コイル内に生じる交番磁界が金属表面に沿っている場合（浸透深さが金属の厚みと比較して十分小さい場合），次のように表される。[1]

$$F=\sqrt{\frac{\mu}{2\pi\rho}}\cdot\frac{W}{\sqrt{f}} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここで，

F：電磁力（N）

μ：金属の透磁率（H/m）

f：周波数（Hz）

ρ：被溶解金属の抵抗率（Ω・m）

W：電力（W）

である。

式(1)から浮揚力（電磁力）Fは，電力 W を一定とすると周波数 f が低いほど大きいことを示していると同時に，金属の種類によって抵抗率 ρ が変わるので，金属に対応する周波数を選択する必要があることも分かる。

これらの関係は，**図２**に示すような，水冷るつぼ内の金属球に働く浮揚力をてんびんで測定した浮揚溶解モデル実験により確認されている。[1] **図３**は金属の材質の違い（抵抗率の違い）による浮揚力と電力との関係を示し，**図４**は周波数の違いによる浮揚力と電力との関係を示す。これらの基礎データから，金属によって比重，抵抗率が異なることや溶解量が異なった場合を考慮すると，一電源励磁では制約が生じる。そこで富士電機では，周波数の異なる二つの電源を用いた二重電源励磁方式を採用した。すなわち，るつぼ下部には重力に逆らって金属を浮揚させるために浮揚力が強い数 kHz の運転周波数を，るつぼ上部には浮揚力が弱く加熱に優れる数十 kHz の運転周波数を選択している。二つのコイルは，おのおの独立して制御できるので，材料の種類や溶解量が異なっても安定浮揚溶解とフレキシブルな運転パターンが実現できる。

3.3　るつぼ底部形状の最適化

溶湯の浮揚溶解安定性は，るつぼとコイルの形状にも大きく依存する。これらの形状の最適設計を有限要素法を用いて溶湯に働く電磁反発力を解析し，浮揚溶解特性の改善を図った。その結果を基に，るつぼ底部の電磁力が大きくなるように，**図５**(a)に示すような単純な形状のるつぼとコイルを，同図(b)に示すような特殊な形状のるつぼとコイルに改良した。[2] **図６**は改良形るつぼ形状で溶湯に作用する電磁力分布を上下コイルについて解析した結果である。下コイルが溶湯に働く電磁力分布は，下側ほど大きくなり，浮揚溶解の安定性が改善されている。

3.4　2 kg 級 CCLM の開発

浮揚溶解の安定性を図るために，電磁界解析とるつぼの試作溶解実験結果から，コイルターン数の最適化を図った

図６　溶湯に作用する電磁力分布

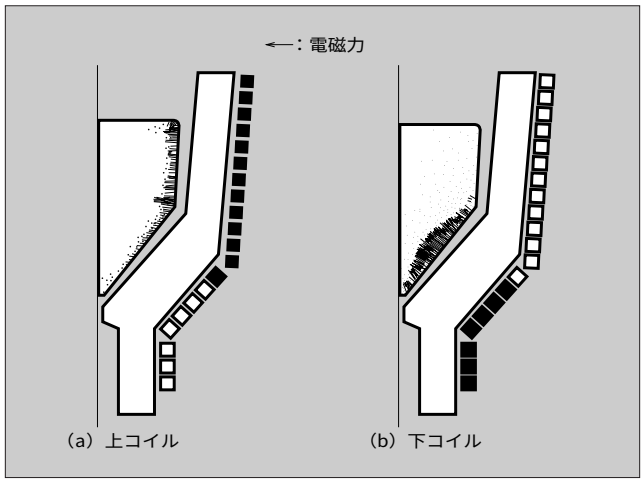
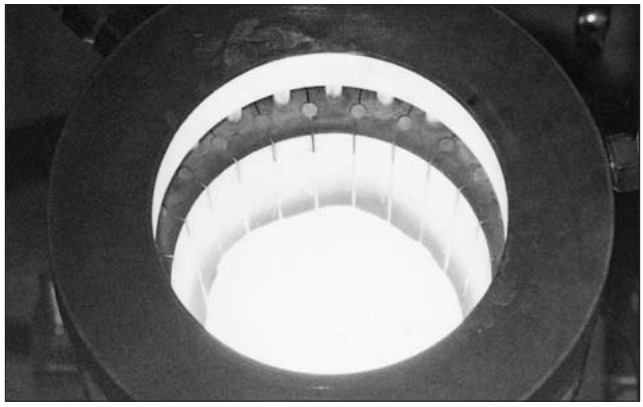


図７　チタン 2.3kg 浮揚溶解時の様子



り，るつぼスリット数をそれまでの 6 スリットから24スリットへと増加させ，溶湯全体の電磁力バランスを保つ改良を行い，1992年に二重電源励磁方式による kg 級 CCLM を開発した。この装置は，チタン 2.3 kg を 2 分間で急速溶解することができる[3]。

図7にチタン 2.3 kg の浮揚溶解時の様子を示す。2 kg 級装置の開発に成功し，新しい溶解プロセスを確立できる段階に到達した。富士電機は CCLM の工業分野への適用に向け，溶解後の金属の取出し方法の開発と大容量化技術の確立を図った。

3.5　底部非接触出湯機能の開発

溶湯をるつぼから非接触状態を維持しながら取り出す技術は浮揚溶解装置を工業化するうえで重要な課題である。

富士電機ではるつぼ底部に穴を設け，電磁力制御によりこの穴から出湯させる底部出湯方式を開発した。この方式は装置構成が簡単なうえに，歩留りが良く，保全性などにもメリットを見いだすことができる。その原理を次に記す。**図8**に示すように二重電源励磁により安定溶解した後，上コイルの通電電力を増大させる。これにより溶湯に働く半径方向の電磁力が増す。その結果，溶湯は縦長になり溶湯下部の重力が増加する。重力が浮揚力よりも大きくなると溶湯は底穴から出て鋳型に入る。この方式の導入により，

図８　底部非接触出湯

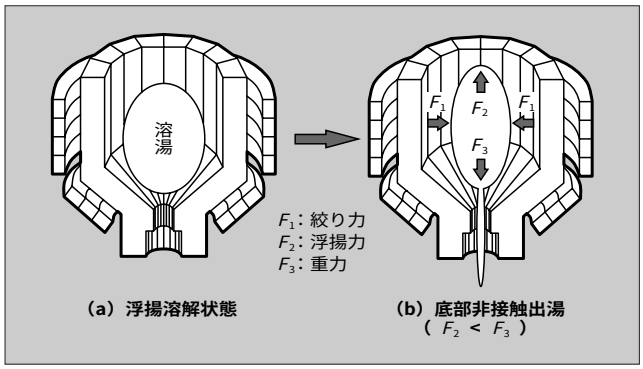
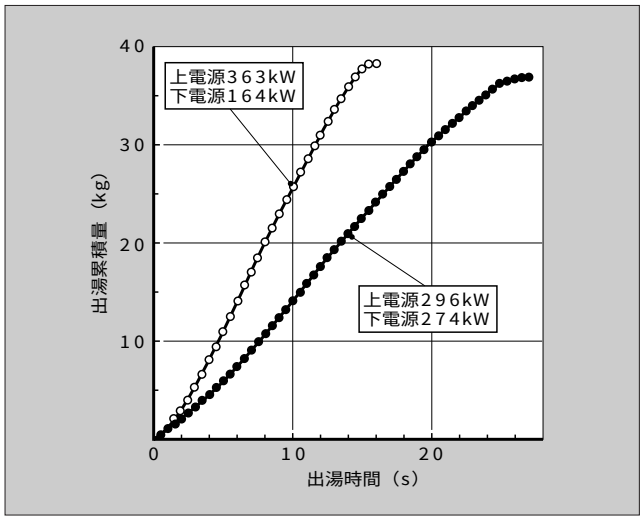


図９　出湯時電力による出湯累積量の違い



溶解金属の鋳込みが可能となった。

さらに出湯時の電力量を制御することによって湯の絞り力を調節できるため，出湯速度を変化させることが可能である。**図9**は，鋳鉄 38.5 kg について出湯時の電力を変えたときの出湯時間と出湯累積量を示したものである。電力量の違いにより出湯速度が変化していることが確認できる。

3.6　50 kg 級大容量 CCLM の開発

装置の大容量化に際しては，①精度よく計算された電磁力と熱損失の算定，②るつぼ・コイル構造の最適化，③冷却設計技術の確立，④微細精密加工・組立技術の確立などが新たに求められた。そこで三次元渦電流解析と熱・冷却解析技術，ならびにるつぼセグメントなどの精密加工技術を確立し，これらに基づいた大容量 CCLM の設計・製作を行った。

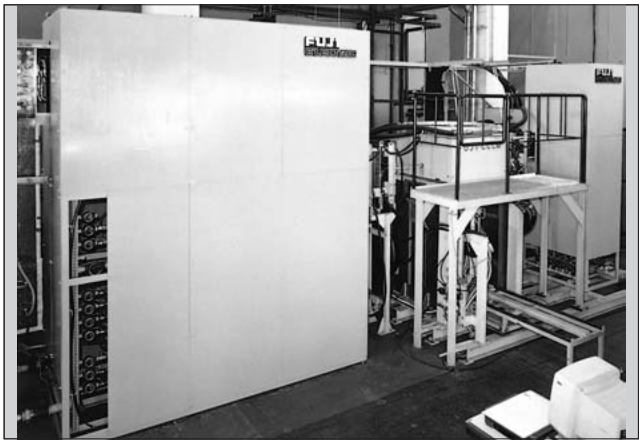
富士電機は 1995年，溶解量50 kg 級の大容量 CCLM の開発に成功した[4]。**表1**に50 kg 級 CCLM の仕様を示す。**図10**は装置全体の写真である。浮揚溶解用るつぼとコイルが設置され，その左側に上電源が，右側に下電源が設置されている。この装置では溶解後の金属をるつぼ底部から非接触出湯して鋳型に鋳造できる構成になっている。

現在，鋳鉄50 kg をアルゴン雰囲気中において，上電源： 30 kHz　400 kW，下電源： 3 kHz　200 kW の運転にて

表１　50kg級CCLMの仕様

項　目		仕　様
溶解量・溶解時間		鉄50kg，5分
出湯方式・出湯時間		底穴非接触出湯，15秒
るつぼ容量		7,000cm^3
るつぼ内径・高さ		φ260mm，320mm
周波数・溶解電力	上電源	30kHz，400kW
	下電源	3kHz，200kW

図10　50kg 級 CCLM の外観



５分間で完全溶解することができる。また，溶解後の金属を約15秒で全量出湯できる。

4　CCLM の製品紹介

富士電機では浮揚溶解法の特長を生かし，CCLM シリーズの新しい応用製品を創出している。

4.1　CCLM シリーズ

富士電機の CCLM は**表２**に示すように，溶解量が数百 g ～数十 kg 級をシリーズ化し，研究開発から産業用生産設備まで対応でき，使用条件や多種多様なニーズに応じて真空容器，排気装置，自動運転制御装置，監視システム，計測システムなどを提供できる。

4.2　連続鋳造 CCLM

浮揚溶解技術を応用して，従来のるつぼでは溶解が困難であった高融点金属などを，例えば丸棒で連続的に製造することが可能である。富士電機では連続鋳造 CCLM として，ダイス方式，下引抜き方式の２方式について製品化を行っている。ダイス方式ではφ６の丸棒が，下引抜き方式ではφ60の丸棒が連続製造可能である[5]。**図11**にダイス方式連続鋳造 CCLM の外観を，**図12**に下引抜き方式連続鋳造 CCLM の外観を示す。

表２　CCLMの容量別装置の仕様

分類 / 項目		小容量	1kg用	2kg用	大容量
溶解容積（cm^3）		5～80	50～200	100～450	1,000～7,000
質量（比重8.0換算）		40～640g	400g～1.6kg	800g～3.6kg	8.0～56.0kg
電源（最大）	上側電源	一電源方式～100kW	100kW	150kW	500kW
	下側電源		50kW	100kW	400kW
るつぼ冷却水量（L/s）		1.0	1.0	1.4	13
るつぼ寸法（mm）		φ60×80	φ74×120	φ110×150	φ260×320

図11　ダイス方式連続鋳造 CCLM の外観

4.3　高真空 CCLM

金属の超高純度化は，材料本来の性能を高めるうえで非常に有効な方法であると考えられている。浮揚溶解装置は金属が水冷銅るつぼから浮揚しているため，るつぼからの汚染のないことが大きな特長であるが，金属の高純度溶解においては，溶解雰囲気からの汚染も無視できない。高真空雰囲気または高清浄不活性雰囲気中で浮揚溶解を行えば，高純度な材料の生成や新材料創製が期待できる。また高真空中や不活性ガス中で溶解を行うことで，不純物が脱ガス効果により取り除かれるため，高純度化も期待できる。

富士電機は真空中で溶解出湯が可能な高真空 CCLM の開発を行った。装置の仕様を**表３**に，装置の外観を**図13**に示す。

この装置は，溶解室と溶解後の金属を出湯して鋳造する

図12　下引抜き方式連続鋳造 CCLM の外観

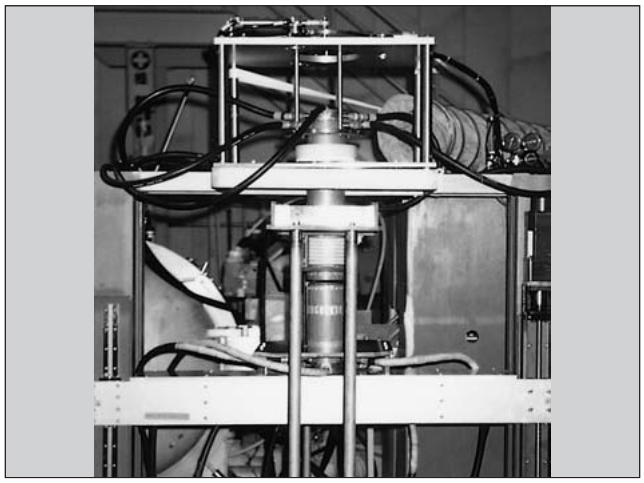


表3　高真空CCLMの仕様

項　目		仕　様
溶　解　雰　囲　気		10^{-3}Pa
溶解量・溶解時間		3kg，3分
出湯方式・出湯時間		底穴非接触出湯，10秒
る　つ　ぼ　容　積		500cm^3
るつぼ内径・高さ		φ120mm，200mm
周波数・電源容量	上電源	50kHz，350kW
	下電源	3kHz，100kW

成形室とに分かれており，その中間に真空仕切弁を配置し，おのおのが独立して真空排気が可能な構成となっている。溶解室には水冷銅るつぼ，コイルがセットされ，るつぼ上部に材料追加投入部が据え付けられている。成形室には金型が据え付けられており，出湯時は昇降機により金型が上昇する。金型は水冷による急冷鋳造や一定温度で保持した徐冷鋳造などが行える構成となっている。

溶解雰囲気は，10^{-3}Pa の高真空雰囲気中または真空引き後に高純度不活性ガスを封入した雰囲気中での溶解および底部出湯鋳造が可能である。これにより，るつぼからも溶解雰囲気からも汚染のない高純度溶解および鋳造が実現できる。真空雰囲気中でこれまでに鉄，チタン，コバルトの溶解実績がある。

5　あとがき

浮揚溶解装置のこれまでの進展ならびに製品系列としての CCLM シリーズについて述べた。本装置は科学技術庁金属材料技術研究所殿，中部電力(株)電気利用技術研究所殿との共同研究成果を基に開発を進めてきたものであり，

図13　高真空 CCLM の外観

ご指導とご支援をいただいたことに深謝する次第である。

また，本稿で述べた製品以外にも富士電機では CCLM の技術をベースに，水冷銅鋳型内で連続鋳造する電磁モールド装置や溶解量10 kg のチタン溶解装置を納入している。

今後は，高真空 CCLM の大容量化を図った溶解鋳造生産設備の開発および浮揚溶解の特長を最大限に生かした新材料創製などに貢献できる製品開発を進めていく所存である。

参考文献

(1)　櫻谷和之ほか：コールドクルーシブル内の固体金属球に働く浮揚力の実測と計算比較，電気学会静止器研究会資料，SA-91-36，RM-91-102（1991）
(2)　Tadano, H. et al. : Levitation Melting of Several Kilograms of Metal with a Cold Crucible. IEEE Trans. Vol.30, No.6，p.4740-4742（1994）
(3)　山崎素央ほか：金属を空中に浮かせて溶かす，電気学会誌，Vol.114，No.3，p.156-160（1994）
(4)　Kainuma, K. et al. : Development of Large-size Cold Crucible Levitation Melting. UIE XIII Congress on Electricity Applications. p.MII 9-MII 16（1996）
(5)　山崎素央ほか：浮揚溶解法によるインゴット生成装置の開発，電気学会全国大会，No.778（1994）

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。