

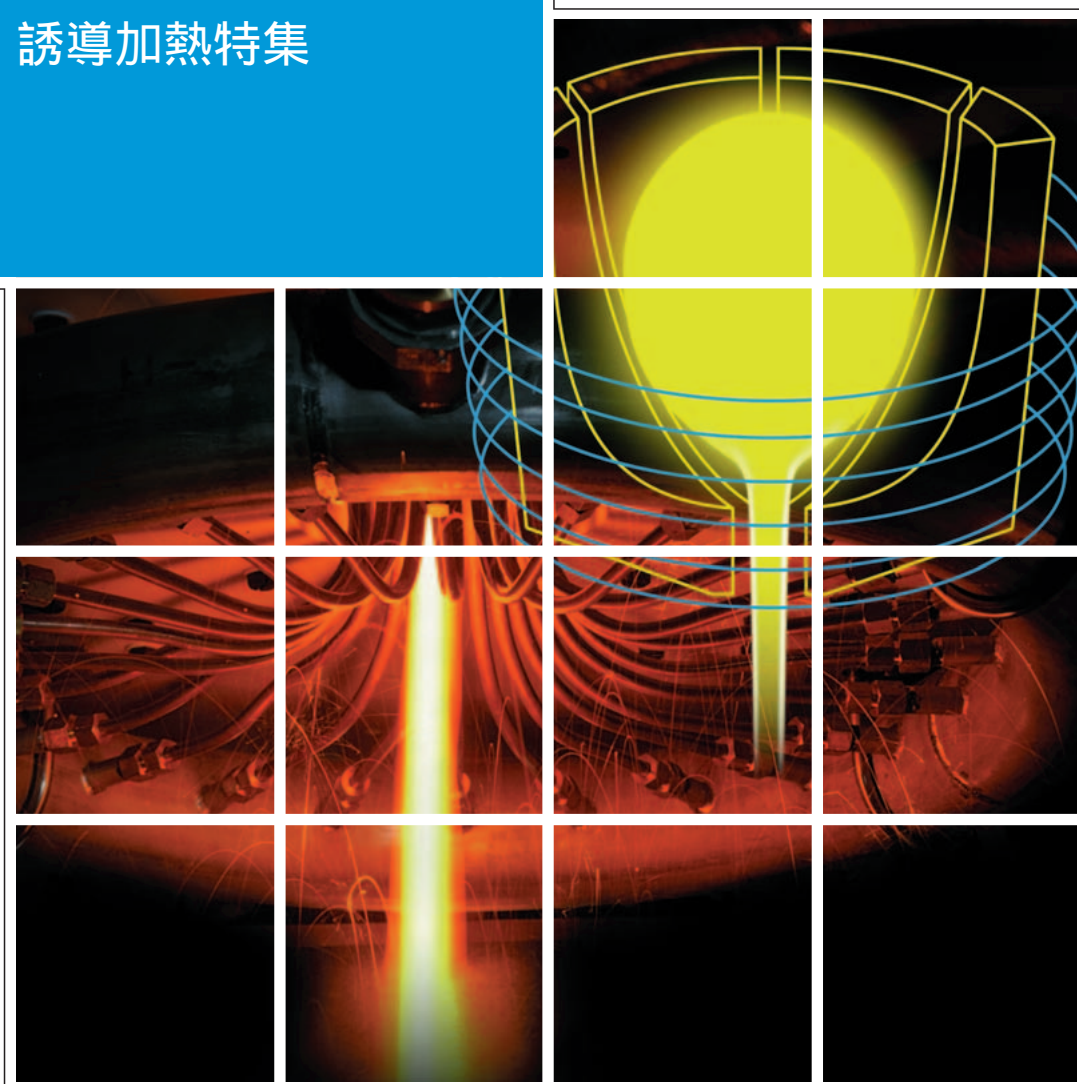
富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL



1998 VOL. 71

誘導加熱特集

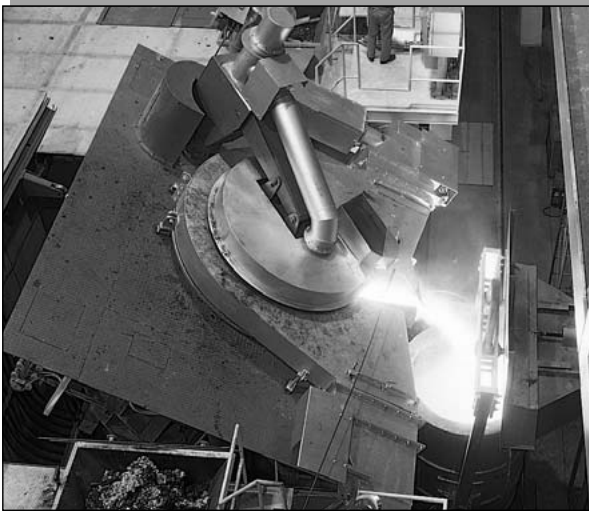


21世紀の クリーンテクノロジーを提案する 富士電機ファーンエス

富士電機ファーンエス(株)は 誘導炉・誘導加熱装置の製造から販売 メンテ サービスまで一貫してお任せいただける工業電熱製品の専門メーカーです。

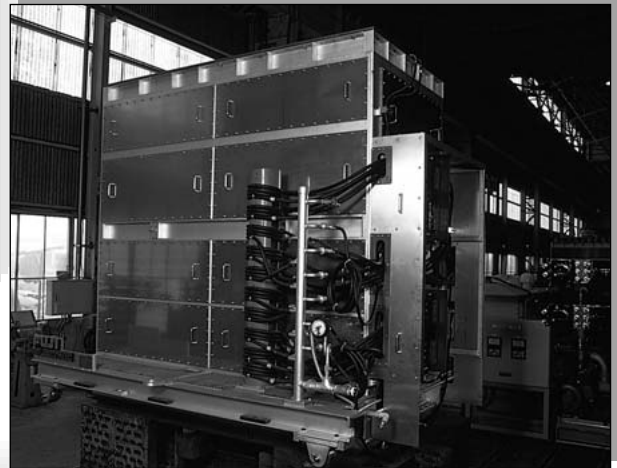
高周波るつぼ形誘導炉

誘導加熱により、金属を溶解。自動車部品の製造などに活躍し、国内トップシェア。



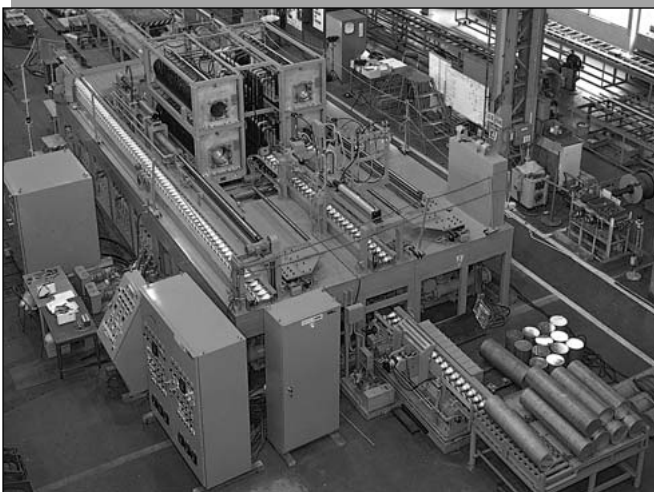
薄板加熱装置

薄鋼板を目標温度に瞬時に誘導加熱し、付加価値の高い、高級品の製造を実現。



ピレットヒータ

鍛造や押出成形のためにピレットを誘導加熱する装置で、サッシなどの製造に活躍。



50kg 浮揚溶解装置

金属を浮かせて溶かし、非接触で底部から出湯、新合金開発などに注目的。



富士電機ファーンエス株式会社
Fuji Electric Furnace Co.,Ltd.

富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

5

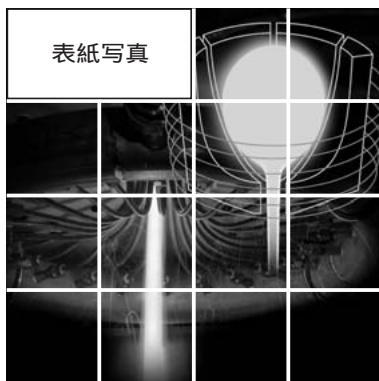
1998 VOL. 71

誘導加熱特集

目次

コールドクルーシブルメタラジーとセレンディピティー 福澤 章	248 (2)
誘導加熱の現状と展望 岡崎 金造 ・ 川崎 道夫	249 (3)
工業電熱製品への解析技術の適用 貝沼 研吾 ・ 佐久間政喜	255 (9)
浮揚溶解装置 (CCLM) の進展 只野 英顕 ・ 貝沼 研吾	259 (13)
浮揚溶解装置 (CCLM) の特長と溶解実績 篠倉 恒樹 ・ 武 達男	264 (18)
高周波誘導加熱電源 久本 正昭 ・ 伊藤 豊 ・ 野村 年弘	268 (22)
亜鉛スクラップ鋼板リサイクル用新誘導溶解システム 中谷 正博 ・ 植村 浩	274 (28)
省エネルギー形誘導溶解炉 加納 利行 ・ 古城 靖彦	280 (34)
最近の電縫管溶接装置 倉田 巖 ・ 中村 清和	285 (39)
鉄鋼プロセスにおける誘導加熱の適用 池田 泰幸 ・ 岡山 栄 ・ 安藤 孝一	288 (42)
廃棄物処理への誘導加熱の応用 喜田 清則 ・ 和田 清美 ・ 原田 満雄	293 (47)
アルミニウム缶リサイクル用ハイブリッド溶解システム 服部 英美	298 (52)
高周波インバータ式 ICP (誘導結合形熱プラズマ) トーチ 榊原 康史 ・ 片桐 源一	303 (57)
最近登録になった富士出願	273 (27), 297 (51)
技術論文社外公表一覧	279 (33), 284 (38), 292 (46), 306 (60), 307 (61)

表紙写真



環境問題が大きくクローズアップされているなかで、電気加熱は新しい時代を迎えている。すなわち、環境問題を克服する手段、技術革新をもたらす新素材の創製手段、あるいは、生産工場のさらなる合理化手段として、電気加熱はそのクリーンさ、効率の高さ、制御性のよさなどの利便性からその適用分野を広げている。

富士電機は、誘導加熱で培った豊富な経験をベースに、新技術の開発、トータルシステムの実用化に積極的に取り組み、社会の要請にこたえている。

表紙写真は、新材料の創製手段として注目を集めている浮揚溶解装置 (CCLM) の底部出湯状態を、イメージ図と写真とで表現したものである。

コールドクルーシブルメタラジーとセレンディピティー

福澤 章（ふくざわ あきら）

金属材料技術研究所フロンティア構造材料研究センター
材料創製ステーション総合研究官 工学博士



現在、金属材料技術研究所の材料創製棟には2電源方式のコールドクルーシブルが2基設置されている。1基は私どもの装置で溶解能力は鉄換算約1kgである。他の1基は埼玉県工業技術センターの装置で同5kgである。これは近々、本来の設置場所である同センターへ移設され、鑄造技術の新分野開拓に力を発揮するものと期待されている。空いた場所には同等規模のコールドクルーシブルが年内に入る予定である。これは出ていく予定はないので金属材料技術研究所では、今後しばらくの間2基でコールドクルーシブルメタラジーの可能性を求めて研究を推進する体制が整うことになる。

コールドクルーシブルメタラジーとはコールドクルーシブルを用い、るつば材質に制約を受けることなく高融点金属、活性金属を含めいかなる金属でも溶解・精製が可能という、その特徴を活かした冶金技術すべてを包括する新しい技術体系を表すものといえる。数年前からOHPあるいは口頭では使っていたが、活字にするのはこれが初めてである。単純に二つの言葉を並べただけなので、既出かも知れない。ご存知の方がおられたらお教えいただきたい。コールドクルーシブルメタラジーの輪が広がるので、誌面を借りてお願いする次第である。

次にその中身であるが、私どもの装置で得られた結果は、コールドクルーシブルメタラジーを喧伝したわりには実体がないとお叱りを受けるかもしれないが、以下の通りである。従来不可能といわれていたチタンの脱酸にある程度の可能性が見いだされたこと、そのとき明らかになったことだが、大きさ数ミクロンの脱酸1次生成物が系外に排出され清浄化が図られたこと、および、最近ステンレス鋼の精製において耐食性阻害元素である燐を、耐食性に必須の元素であるクロムを減ずることなく除去することに成功したことがあげられる。また、瀬踏み実験の段階であるが、高融点金属の溶解では融点約2,600のモリブデンの溶解には成功したが、2,900のタンタルは一部分溶解するにとどまっていること。以上の例からもコールドクルーシブルにより高融点金属、活性金属の溶解、溶解金属に懸濁する第2相の排出による金属の清浄化、および新しい精錬法の可能性がもたらされることがわかる。いろいろな高温冶金

上の問題をぶつけてもらいたい。何らかの解決策あるいはその指針が見えてくるのに役立つものと期待している。

1991年7月、今はない中目黒の研究所で老朽化激しい3kHz MGと乏しい予算でやっと購入した30kHzの電源を組み合わせ世界で初めてCu-Al合金310gの完全浮揚溶解に成功したときの達成感と安堵感は今も忘れられない。それが今では50kgの鉄を浮かして溶かすまでに成長している。1930年ドイツの特許に初めて顔を出して以来60余年、コールドクルーシブル自身、やっと時と所を得たと満足しているのではと思う。1988年秋に鈴鹿を訪ねて以来、国の研究所と企業、冶金屋と電気屋という異質の研究集団による共同研究の時代を経て、コールドクルーシブルが今日を迎えることが出来たのは、両組織の枠を越えた研究者同士の真のぶつかり合いがあったればこそであり、良きパートナーに恵まれ、チームの一員として参画できたことに感謝している。

2電源方式コールドクルーシブル浮揚溶解法の発想をセレンディピティーと呼んでくれたのは、1995年夏、当研究所を訪ねてくれた英国国立物理研究所(NPL)の室長である。ネイティブスピーカーがそういつてくれたのだから語の使い方に間違いはないと思う。セレンディピティーはThe Three Princes of Serendipという童話から派生した語で、当てにしないものを偶然にうまく発見する才能、と辞書にはある。しかし、共同研究チームとしては当てにして、いろいろやってみたが最後にこれしかないという状況で試みた技術であり、辞書とはちょっと違うようにも思われる。いずれにせよ研究者とはほめられると喜ぶ動物のようである。

コールドクルーシブルメタラジーは緒に就いたばかりの技術であり、その応用はネパーエンディングストーリーのように、それを思ってくれる人が増えるとともに広がり、セレンディピティーも次々見つかる可能性を秘めている。コールドクルーシブルに興味を持つ人のネットワークが広がることを望んでやまない。

* 鈴鹿：富士電機(株)鈴鹿工場

誘導加熱の現状と展望

岡崎 金造 (おかざき きんぞう)

川崎 道夫 (かわさき みちお)

① まえがき

熱エネルギーは人間社会における基幹エネルギーの一つである。熱エネルギーの利用は燃焼熱から電気による加熱への移行が進むにつれて、利用者は意識することなく利便性を増し、快適な生活を謳歌(おうか)している。

電気加熱技術の持つ本質的な優れた特性としては、省エネルギー性と環境の改善性である。

1997年末の「気候変動に関する国際連合枠組み条約第3回締約国会議」(地球温暖化防止京都会議)での枠組みを遵守し、産業活動を発展させることを考えると、来る21世紀は環境問題が最重要事項になるであろうし、社会的ニーズに向けた環境対応を付加価値にした産業活動を積極的に進めることが社会の要請となる。

こうした状況のなか、省エネルギー性の面からも、環境の改善性の面からも電気加熱への期待は大きい。なかでも、誘導加熱はその特長から金属溶融、加熱、熱加工などの分野では最も注目される技術となっている。

誘導加熱は、1831年にファラデーの発見した電磁誘導の原理に基づいている。誘導加熱の工業的利用は約80年の歴史をもち、わが国では1970年代の高度成長期に広く普及した。1990年代に入って民生用の電磁調理器、IH(Induction Heating)炊飯器などが一般的になり、だれでも目にふれる機会ができるようになり、今では現代生活を支える重要な要素技術として発展している。

誘導加熱の第一の特長は、その省エネルギー性である。卑近な例として、燃焼式加熱の代表例をガスレンジとして見ると、その熱効率は約40%であるのに対し、電磁調理器のそれは約80%と倍近いものとなっている⁽¹⁾。

第二の特長は、その環境の改善性である。ガスレンジを点火するとすぐにCO₂、CO、NO_xなどが増加するが、電磁調理器の場合には大気中のガス成分の変化はないし、また、周囲温度もほとんど変化はない。これは、工業用誘導加熱においても同様である。

さらに、誘導加熱の特長、クリーンな熱源、被加熱物の直接発熱、急速加熱、高温加熱、局部加熱や均

温加熱の調整が可能、加熱温度制御の容易さ、保守の簡便さ、電気エネルギー源のために個々の装置に対するCO₂など排ガス対策が不要、などを利用した種々の加熱応用がなされている。

誘導加熱は、省エネルギー、環境保全とともに上記特長からなる生産性向上を三本柱とした加熱方式であり、技術革新を伴いながら、今後ともわれわれの生活と密着して発展するものと考えられる。

② 技術動向

富士電機の誘導加熱応用技術の系譜を表1に示す。

社会需要の要求が技術の発展を促し、新たな需要を生み出してきたことがうかがえるものと思う。二度にわたるオイルショックが、省エネルギーの技術を進展させたし、サイリスタインバータの出現をうながし、省エネルギー性に優れた高周波誘導炉を飛躍的に発展させてきた。自動車のコストダウン要請に、合理化投資を進める手段として誘導炉設備が貢献してきたし、パワートランジスタインバータの登場を促し、ヒートパイプを中小の工場にまで普及させる結果となってきた。

円高不況が、重厚長大産業をハイテクノロジー産業に転換する一助として各種の誘導加熱製品群を登場させたし、エレクトロニクスの発展を側面から助長し、真空炉、リードフレーム用誘導炉などを提供することになった。

さらなる円高対応に、国内企業の海外進出が盛んとなり、それに伴ってグローバル化が進んだし、海外メーカーとの熾烈(しれつ)なコスト競争に打ち勝つ対応力も培われた。いずれも、社会構造の変革への対応策として、誘導加熱は合理化、生産性向上のポイント対策として導入されてきたし、社会の要求が新たな需要、ビジネスチャンスを生み出してきた。

現在では、社会構造の変革、地球環境問題がわれわれの周囲を取り巻く新たな課題となっているが、これらの社会環境がさらに新しいシステムを提供することになる。さらなる省エネルギーの強化、環境問題への対応、環境ISO



岡崎 金造

電気加熱を中心とした各種電源システムのエンジニアリング業務に従事。現在、システム事業本部産業・計測システム事業部技術第二部長。



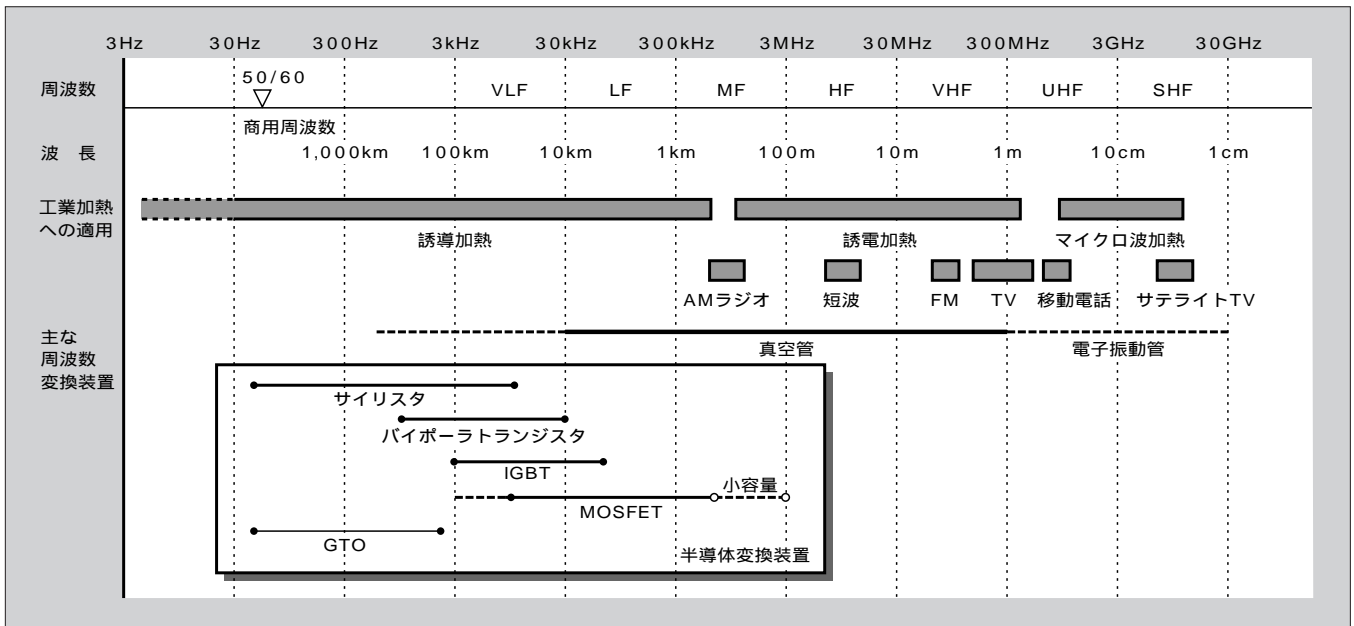
川崎 道夫

産業用加熱装置の設計、開発、エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機ファーマス(株)エンジニアリング本部長。

表1 富士電機の誘導加熱応用技術の系譜

年 度	為替 レート	社会事件	業界ニーズ	海 外	富士電機の系譜	累計台数		
1964		東京オリンピック			誘導炉1号機			
1966				初輸出				
1968					溶解プラント伸長	100		
1969					プロペラ用30t記録品 鋳鉄用溝形炉			
1970		大阪万国博覧会			高周波実験炉設置 真空炉	200		
1971	¥360	スミソニアン合意	大形化・大容量化		サービス専門の鈴鹿ファーンズ(株)設立 サイリスタ式高周波炉			
1972	¥308				大形炉組立工場完成 40t誘導炉完成			
1973	¥265	一次オイルショック			アルミニウムビレットヒータ	300		
1974	¥280				自動注湯炉 ダイスヒータ	400		
1975	¥293				韓国市場活発化	60t溝形炉		
1976	¥300				韓国へ技術供与	30t省エネルギー炉 新乾式築炉法採用	500	
1977	¥278					85t鋳鉄用溝形炉		
1978	¥224	二次オイルショック				製造・技術部門の一体化によるエンジニアリング 強化	600	
1979	¥219					高周波インバータ鈴鹿工場に集約 省エネルギー形アルミニウムビレットヒータ		
1980	¥238				旧ソ連への輸出活発化	環境装置部門設立 鉄ビレットヒータ	700	
1981	¥215	対米自動車輸出規制	公害防止		鉄ビレットヒータ伸長			
1982	¥236				10kHzインバータ開発 研究用薄板加熱装置設置	800		
1983	¥238				真空加熱装置			
1984	¥226	自動車海外進出盛ん			薄板加熱装置 パーヒータ トランジスタ式ビレットヒータ	900		
1985	¥251				温間鍛造用ビレットヒータ 40t省エネルギー誘導炉			
1986	¥168	円高不況 貿易摩擦		省エネルギー化	高周波炉の中国への 輸出活発化	10t高周波炉 500kg真空炉 廃プラスチック減容処理システム	1,000 台達成	
1987	¥140	内需拡大開始 ニューヨーク株価暴落				20t高周波炉 連続鋳造前タンディッシュ加熱装置		
1988	¥125	内需景気持続				タンディッシュ加熱活発化 アルミニウム用電磁かくはん装置 誘導加熱実験棟完成	1,100	
1989	¥132	消費税実施				大形真空炉 大形アルミニウムビレットヒータ 夜間自動溶解炉システム エッジヒータ	1,200	
1990	¥159					銅合金自動注湯システム CPCロール加熱システム		
1991	¥137	バブル崩壊			誘導加熱製造棟増設 とりべ加熱装置 薄板加熱装置 MOSFETインバータ	1,300		
1992	¥133	地球環境サミット 平成不況突入 毛利氏宇宙へ	新素材開発			真空溶解・加圧注湯総合システム 7.5tアルミニウム溶解炉 2kg浮揚溶解装置	1,400	
1993	¥111					GLポット(るつぼ形) 電磁かくはん式渦巻スターラ 500kHzインバータ電源		
1994	¥102	阪神大震災				東南アジア市場活況	10t自動注湯システム CCLM50kg実験機	
1995	¥84	金融破たん相次ぐ 円高最高値				中国との合作1号機 タイ駐在	GLポット(溝形) CCLM底部出湯技術	1,500
1996	¥104	東南アジア好景気			タイにサービス新会 社設立	CCLM1号機 脱亜鉛誘導溶解システム プラズマ電源	1,600	
1997	¥127	東南アジア・韓国不況 金融不況 地球温暖化京都会議				富士電機ファーンズ(株)設立 電磁モールド 新タイプ(中周波)誘導炉 10kgチタンCCLM		

図1 電気加熱に使用されている周波数領域



への対応、CO₂ 問題の解決の手段として、誘導加熱はますます発展する素地を秘めているが、いずれも今までにない技術開発を必要とするし、新しい要素技術の開発なくして新しいシステムの提供はありえない。

富士電機はこれらの期待にこたえるべく、種々開発を行ってきている。最近の特筆すべき要素技術の開発事項は次のとおりである。

2.1 解析技術の進展

コンピュータを利用した電界解析、磁場解析、熱解析が容易になり、開発ツールとして設計技術をサポートしている。従来、有限要素法、境界要素法などが主体で、表皮効果が顕著な誘導加熱技術に対しては、なかなか解析精度が上がらないものであったが、この数年の進歩は目をみはるものがある。

コンピュータそのものの性能向上によるところが大きいものの、表皮効果を考慮しての自動メッシュ切り、電磁場と流れ場との連性解析、自由表面解析、三次元対応などである。もちろん、解析結果と実際の相互検証により、解析精度向上を図ってきた集大成であることはいうまでもない。

今まで、経験工学に頼ってきたところが、事前確認できるようになったことで、開発のスピードアップに大いに寄与している。

その解析内容の設計への適用事例については、本特集号の別稿「工業電熱製品への解析技術の適用」を参照いただきたい。

2.2 高周波電源の進歩

電気加熱の根本的な原理は共通でも、子細に検討すると、周波数によっていろいろな特色や相違点が見いだされる。電気加熱に使用されている周波数帯は、50/60 Hz の商用

周波数帯から、10GHz もの高周波帯まで広範囲にわたってそれぞれの特性を最大限に見いだしている。

図1に電気加熱に使用されている周波数領域を示す。加熱方式の違いや異なる周波数変換容量にマッチした多種多様な電源が必要とされていることが分かる。このなかで、誘導加熱は商用周波数領域から約1MHzの領域の技術である。

富士電機では、このうちのインバータ技術を使用できる500kHzまでを製品化対象として提供している。これらの電源はパワーエレクトロニクス技術やマイクロエレクトロニクス技術に支えられて発展してきた。効率のよい新たな変換装置が考案され、安価に提供できるようになると、用途の拡大を促し、その都度大きく発展する原動力となってきた。半導体の進歩が、より高い周波数領域を安価にカバーできるようになるにつれ、また、最適周波数の選択と最適変換方式、最適電力制御が機能的に結合され、大電力発生用高周波デバイスの開発と低コスト化が達成されるに従って、新しい誘導加熱の用途が生み出されてきている。

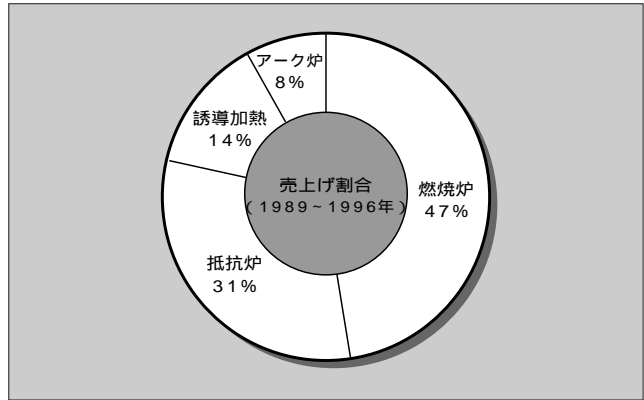
過去、サイリスタインバータの出現が高周波誘導炉を生み出し、パワートランジスタの出現がピレットヒータなどの誘導加熱の導入を促し、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) や MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) インバータの開発が、薄板加熱、浮揚溶解装置など新しい技術革新をもたらし、民生用機器としても電磁調理器などを一般にも普及させる手段となってきたし、溶接、焼入れなどの分野では真空管方式からの転換をもたらしつつある。

こうして、かつては、原理的な可能性だけが論じられてきたシステムも、高周波変換技術の進歩とともに、実現可能な技術になってきている。このような技術革新は、電気加熱を最先端の技術へ変貌させようという大きな期待を背負っている。

図2 わが国における年次別動向



図3 国内における工業炉の売上げ割合



2.3 社会的要求に合致したシステム開発

新エネルギー問題の解決や、環境問題への対応といってもそう簡単ではない。新しい技術の登場には、革新的新要素技術、新素材、システム開発などが伴わないと成し遂げることが難しい。

誘導加熱はキーテクノロジーには違いないが、実際の設備となると各要素技術をシステムティックに組み合わせ、機能を発揮させるシステム技術がポイントとなる。

新エネルギー問題の解決のためや、金属系新素材の開発に対応する設備として注目を集め始めた浮湯溶解装置を例にとってみると、必要とされた要素技術は、解析、構造設計、熱設計をはじめとして、電磁気、高電圧、大電流、高周波電力変換、高調波、マイクロエレクトロニクス、といった多岐にわたる電気技術をはじめとして、真空、メカニカル、冷却技術などである。さらには、冶金、鑄造、高温度計測、自動制御なども必要とされた。通常の誘導加熱においては耐火物、油空圧技術、ソフトウェアなども必要とされる。まさに、誘導加熱は複合技術の集大成であることが分かる。

これらを総合的に一つのものとして組み上げるシステム技術なしには、新しい社会のニーズに対応することは難しい。

本特集号では、これらの新しいシステム技術の一端を紹介している。

各分野別の展望、技術展望については、4章に示す。

③ 需要動向

現在の日本の産業界を取り巻く課題は言うに及ばないが、あえて言えば、産業構造の変革であり、いかにして国際競争に打ち勝つかである。それが、新規産業や、国際的にも魅力ある事業環境の創出となる。

また、地球温暖化防止プログラムの一環としての、環境問題対応、省エネルギー推進が課せられた責務である。こ

うしたなかで、誘導加熱は工場生産ラインの中核設備としての位置づけを不動のものにしつつあるが、現在の市場そのものは大きいとはいえない。

関連分野の産業統計を参考として市場の動向を考察する。図2は、わが国の産業用加熱装置の出荷額推移と素形材生産量統計を重ね合わせたものである⁽²⁾。この資料は通商産業省生産動態調査に基づくもので、産業用加熱装置には誘導炉のほか、アーク炉や抵抗炉も含んでいる。直接的なものとはいいいくいが、電熱需要を示すものとして考えることができる。

また図2には、工業炉のうち誘導加熱分野の売上げ動向指数⁽³⁾も合わせて示す。1970年(昭和45年)を1として見た指数である〔(社)日本工業炉協会発行の工業炉協会年報1997年版のデータから作成〕

産業用加熱装置の出荷額推移と、素形材生産量、売上げ動向指数はきわめてよく一致している。ここ数年の素形材生産量は横ばいであることを考えると、これらの既存機種は残念ながら、産業としての伸長度合は、せいぜい微増傾向どまりである。そして、現在の景気動向を考えると、今後急速に伸長するとは考えにくく、加熱装置全体としての産業状況は今後とも微増傾向で伸長していくと考えるのが妥当性が高い。

また、工業炉売上げの内訳を見ると、誘導加熱の占める割合は約14%にすぎない。図3に過去8年間の加熱装置別売上げ実績を示す⁽³⁾。化石燃料を使用する燃焼炉は、今後、環境問題から大きく誘導加熱に置換えが進む可能性を秘めている。

さらに、新規分野を見ると、4章に示すように種々開発アイテムには事欠かない。これらの新規分野は、環境性、省エネルギー性の点から、おのずと誘導加熱に変遷していくものと考えられ、今後の利用促進動向に注目すると同時に、それは既存分野の数倍の市場規模と想定される。

したがって、需要動向からみた今後の課題は、新技術の進展と実用化のスピードアップであり、さらなるコストダウンによる実用化の加速である。

今、われわれが置かれている大きな課題をビジネスチャンスとし、市場の要請にこたえることが、大きなマーケットを形づくるものと確信する。

各分野別の需要動向，開発課題，展望をまとめると次章のようになる。

④ 各分野別の展望

4.1 研究分野

新エネルギー利用促進としての太陽光発電に対しては，2000年度時点において40万kWが目標値とされ，太陽電池，高純度シリコンの溶製が盛んになっている⁽⁴⁾。

また，国家的プロジェクトである地球環境を考慮した，新世紀構造材料開発のスーパーメタル研究や超鉄鋼研究に見られる電磁プロセッシングや，新素材，新合金，新プロセスの研究にも，誘導加熱はキーテクノロジーとして位置づけられている。

さらには，半導体用クリーンターゲット材の創製の面でも誘導加熱は中核要素となつてくる。

そのプロセスへの誘導加熱の応用として注目を浴びている浮揚溶解装置の進展具合，ならびに浮揚溶解装置の特長と溶解実績の一例については，本特集号の別稿「浮揚溶解装置（CCLM）の進展」と「浮揚溶解装置（CCLM）の特長と溶解実績」を参照いただきたい。

4.2 鉄鋼・特殊鋼・造管分野

最近の鉄鋼業の小回りのきく製品対応には目をみはるものがある。この一助として，随所に誘導加熱が組み込まれている。製造工程の合理化のために，一貫したラインの制約のなかに，誘導加熱装置を組み込む工夫が必要とされるところである。

小ロット生産プロセスには，とりべの内部の溶湯のみ加熱，昇温するレードルヒータが活用されつつあるし，鋼板製造プロセスでは誘導加熱の特長を最大限に生かした，加熱，昇温，熱処理がなされている。急速加熱，加熱温度の制御性，雰囲気制御加熱，省エネルギーの重視などの目的である。最近ではさらに，高効率の加熱コイルが開発され，その用に供されている。

産業環境ビジョン政策の一つとして，製品の長寿命化のための表面処理鋼板などの高機能化が進められている。MOSFET式高周波インバータの出現により，最近では0.1mmもの薄板加熱への適用も可能となり，この結果，深絞り飲料缶への適用や，カラー塗装鋼板への適用ができるようになり，合金化炉への適用も増えている。一方，近年の高機能材の増加が鉄スクラップの不純物を増加させており，このリサイクル面での誘導加熱の適用も種々開発がなされている。

建材業界に対する表面処理鋼板需要としては，近年，ガルバリウム溶融めっき鋼板（アルミニウム-亜鉛合金）用誘導炉の導入が進んでいる。ガルバリウム鋼板は耐食，耐候性に優れ，景観材や建築材料としての使用が増加している。一方，ガルバリウム鋼板の製造時に問題となるのは，炉の底にたい積してくるドロスの処理であり，この問題の解決が炉の寿命を延ばすことになる。富士電機では，るつ

ぼ形誘導炉を使用したもの，溝形誘導炉を使用したもの両者ともに運用中であり，良好な稼働を続けている。

造管分野としては，電縫管が新たな局面を迎えている。この分野も，500kHz領域高周波インバータの出現で，30%もの省エネルギー，生産性の向上を図れることが実証されつつある。

鉄鋼プロセスへの誘導加熱の応用とガルバリウム鋼板への適用結果，ならびに最近の電縫管溶接装置の動向については，本特集号の別稿「鉄鋼プロセスにおける誘導加熱の適用」と「最近の電縫管溶接装置」を参照いただきたい。

4.3 鋳鍛造・素形材分野

鋳鍛造，素形材分野は，エネルギー多消費形産業の代表格である。省エネルギー法運用強化に向け，各ユーザーにおいては，この溶解，加熱用途でのエネルギー消費の多さをいかに少なくするかが最大の関心事であり，また，トータルコストダウン，合理化のポイントである。エネルギーの効率利用を図り，省エネルギーを推進することが，国際競争力をもたらす，企業の活力を養う糧となる。

さらに，CO₂排出抑制などの環境問題を考えるとき，誘導炉はキューボラに比べ，約1/10の排出量である。今後，各発生源での対応を余儀なくされるであろう社会環境を考えると，キューボラや化石燃料を直接使用する燃焼炉に代わって，誘導炉がさらに社会の要求にこたえる技術となるであろう。

電気加熱は，このような省エネルギー，環境保全といった社会的課題にも十分貢献できる意義ある技術であると考えられる。

鋳鍛造，素形材分野に一番かわりのあるものとして，また，富士電機が誘導炉生産を始めた当初からのコンセプト「省エネルギー」に重きをおき，環境問題を配慮した省エネルギー誘導炉技術については，本特集号の別稿「省エネルギー形誘導溶解炉」を参照いただきたい。

4.4 自動車産業分野

地球温暖化が社会問題化し，米国カリフォルニア州のZEV（Zero Emission Vehicle）規制が制定され，低公害車導入プログラムにより2003年から10%の無排気ガス車販売義務づけを受けたことにより，低公害車としての第二世代電気自動車が登場し，脚光を浴びるようになった。

それを支えるポイントの一つは電池の軽量化，長寿命化であり，このための電池用としてニッケル-水素電池に代表される水素吸蔵合金溶解用誘導炉の開発要求がもたらされ，さらに，自動車の低燃費化と高性能確保のため，車体の軽量化を達成する手段として，アルミニウム合金化に伴う新しい鋳造システムや新素材の開発が要望されている。

製造現場においては，亜鉛引きスクラップ鋼板（低級スクラップ）の増大により誘導炉溶解作業に支障をきたしている。それは，耐火物への亜鉛の浸透による湯差し事故の頻発であり，亜鉛ヒュームによる作業環境の問題である。

新しく開発した亜鉛引きスクラップ鋼板リサイクルのた

めの新しい溶解システムについては、本特集号の別稿「亜鉛スクラップ鋼板リサイクル用新誘導溶解システム」を参照いただきたい。

4.5 エレクトロニクス分野

エレクトロニクス分野では、クリーンで高精度な制御性をもつ熱源が要求され、クリーンターゲット材、リードフレーム、高純度シリコンによる太陽電池の製造などには、誘導加熱は不可欠な技術となっている。最近では、高級銅合金の製造に真空溶解、加圧注湯のハイブリッドシステムも導入された。

これらのエレクトロニクス分野を支えているのも、誘導加熱である。誘導加熱は溶解、加熱を支えるコイル負荷、メカニカル部分と高周波インバータに代表される電源部の両輪から構成されている。ターゲット材はこのインバータ用変換素子の性能向上にも大きく寄与している。

富士電機では、50/60 Hz の商用周波電源から、中周波サイリスタインバータ、ひいては世界最高クラスの半導体式 500 kHz トランジスタインバータまで幅広くシリーズをそろえている。

誘導加熱に適用されるインバータ電源については、本特集号の別稿「高周波誘導加熱電源」を参照いただきたい。

4.6 環境分野

環境保全、環境問題に対する社会的要求は、快適な生活を営むうえで最重要事項になりつつある。固形廃棄物、都市ごみの処理問題や再資源化、リサイクルによる資源の有効活用に電気加熱がそれぞれ重要な役割を果たしている。

温度のきわめて高い熱源が容易に得られる誘導加熱の特長を生かして、各種の廃棄物の処理プロセスでの利用も拡大しつつある。飲料缶の増大、回収率の増加も新たな処理システムを必要としている。CO₂ やダイオキシン問題、排ガスの対応に対しても、誘導加熱は非常に有効な手段である。

このように、誘導加熱は将来にわたる環境保全に大きく寄与できるものとする。環境問題への誘導加熱の応用事例として、アルミニウム缶スクラップ溶解装置、ならびに廃棄物処理への誘導加熱応用技術については、本特集号の別稿「アルミニウム缶リサイクル用ハイブリッド溶解システム」と「廃棄物処理への誘導加熱の応用」を参照いただきたい。

4.7 新規分野（プラズマ加熱）

誘導加熱を使用した応用分野として、誘導熱プラズマが挙げられる。熱プラズマを応用した加熱や溶解は、これまで主として溶鋼の温度降下補償や溶接、切断などのプロセ

スに利用されてきた。これらは主としてアーク放電を利用したものである。

誘導熱プラズマは電極を必要とせず、アークプラズマに比べ消耗部のないクリーンな加熱をすることができる。高温熱プラズマは10,000 を超える高温を発生し、新物質合成、高温溶融、脱臭、フロンガスの分解などに用途が期待され、低温のものはダイヤモンド薄膜などの CVD (Chemical Vapor Deposition) や、エッチングなどにも利用できる。500 kHz インバータを用いた誘導熱プラズマは真空管方式に比べ65%もの省エネルギーを達成した。現在、プラズマは応用研究が始まって間もないが、今後、大きな発展が期待される。

また、500 kHz 領域の高周波インバータは、従来の真空管式インバータに比べた省エネルギー性からの置換えと、新たな領域の誘導加熱需要を生み出しつつある。

誘導熱プラズマの最近の成果については、本特集号の別稿「高周波インバータ式 ICP (誘導結合形熱プラズマ) トーチ」を参照いただきたい。

⑤ あとがき

誘導加熱技術は、その特長を生かして、鋳鍛造、鉄鋼、自動車を中心として広く社会に貢献してきた。その技術は、環境への優しさ、人への優しさを有するものであること、社会の見えないところで技術革新を支える技術であることから、将来にわたっても、応用技術、応用分野の拡大によって、ますます広く社会に浸透するものと確信する。今後、より使いやすく、高効率な装置や電源の提供、コストダウンによるより安価なシステムの提供や、技術開発による新たな分野への展開が大いに期待できる。

今世紀も残りわずかであるが、新しい世紀の幕開けを飾るために、電気加熱はますます必要とされ、そのための多岐にわたる開発が必ずや実を結ぶであろうと確信している。

富士電機は、誘導加熱を支える国内トップメーカーとして「環境保護への貢献」や「省エネルギー」などの社会的ニーズにこたえ、社会構造の変化に打ち勝つ製品提供を通して、いささかなりとも貢献したいと考えている。顧客をはじめ関係各位のご指導をお願いする次第である。

参考文献

- (1) 藤谷洋治：業務用電気厨房機器の現状について、エレクトロヒート、No.81 (1995)
- (2) 通商産業省、生産動態調査1997年版
- (3) 日本工業炉協会、工業炉協会年報1997年版
- (4) 通商産業省、産業構造審議会地球環境部会報告書1997年版

工業電熱製品への解析技術の適用

貝沼 研吾 (かいぬま けんご)

佐久間 政喜 (さくま まさき)

1 まえがき

コンピュータの進歩とともに有限要素法などに代表される数値解析法も進歩を続け、近年では製品の開発設計にはなくてはならないものとなっている。

富士電機の工業電熱製品の開発・設計においても、電磁界、熱・構造、流体など種々の現象をコンピュータを使った数値解析を用いて製品仕様の決定、構造の最適化や開発のスピードアップを図っている。

本稿では、工業電熱製品に適用した解析方法とその適用例について概要を述べる。

2 解析手法

本稿で述べる解析に用いた手法と適用例を表1に示す。

2.1 磁界解析

工業電熱製品は、電気を熱や駆動力に変換して利用している。したがって、製品の設計時にはまず電磁気現象を把握することが重要である。この現象を数値解析で明らかにする手法として、有限要素法と電気ベクトルポテンシャル法をモデルに応じて使い分けている。

工業電熱製品に使用される周波数は、数 Hz ~ 数百 kHz である。周波数が高くなるにつれて浸透深さが小さくなるが、十分な解析精度を得るためにはこの範囲を密に分割す

る必要がある。ところがこうした分割は、解析対象領域が浸透深さに比べて大きい場合に分割数（計算時間）の増大や要素形状のひずみ（収束性の悪化）の原因となり、解析を実用的でないものとする。このような場合は、導体内部の分割が不要なカレントシート近似（表面インピーダンス法⁽¹⁾）を適用し、少ないメモリと計算時間で高精度な解析を実施した。さらに、モデルが強磁性体を含まない場合には、導体の表面のみ要素分割すればよい電気ベクトルポテンシャル法⁽²⁾⁽³⁾が適用できる。

2.2 熱・流体解析

製品の均一加熱状況や構造物の局部加熱、炉内の溶湯のかくはんや温度分布などは製品の品質や操業の安全性にかかわるため、磁界、温度、流体の流れなどを数値解析で求めながら設計を行っている。

熱または流体現象を解析する際には、磁界解析で求めた発生損失や電磁力を入力データとして用いる。このとき、おのおののソフトウェア間で要素の形状が異なるので、データ変換プログラムを開発した。

溶湯の液面形状などの自由表面を解析する場合には、表面の形状変化に応じて磁束分布も変化するので、磁界解析と自由表面解析を繰り返し、形状が収束するまで行う。

3 数値解析適用例

3.1 誘導炉の電磁力による溶湯のかくはん

誘導炉には大きく分けて、るつぼ形誘導炉と溝形誘導炉の2種類がある（図1）。近年、金属材料分野では生産材料の高品質化が求められており、溶解時の溶湯には均質性や均温性が要求される。そのため、溶湯の湯運動を把握することが重要である。富士電機では、誘導炉の湯運動を数値解析で求める技術を開発し、有効に活用している。以下に溶湯の流れ解析例を紹介する。

(1) るつぼ形誘導炉

一般にるつぼ形誘導炉において、溶湯は電磁力によって上下で反対方向に流れを生じる。このかくはんは溶湯の均

表1 代表的な解析手法と実機適用例

対象場	手 法	適用例
磁 界	有限要素法 (表面インピーダンス法) 電気ベクトルポテンシャル法	○誘導加熱における発生損失 ○電磁かくはん ○浮揚溶解渦電流
熱	有限要素法	○加熱シミュレーション ○冷却設備の設計検討
流 れ	有限体積法	○誘導炉溶湯のかくはん ○水冷るつぼの冷却
自由表面	VOF (Volume of Fraction) 法	○誘導炉溶湯の湯面状況 ○溶湯の浮揚と出湯状況



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、富士電機ファナース(株)エンジニアリング本部 CCLM グループ主任。



佐久間 政喜

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、(株)富士電機総合研究所電力技術開発研究所電磁機器開発グループ。

図1 誘導炉の種類と構造

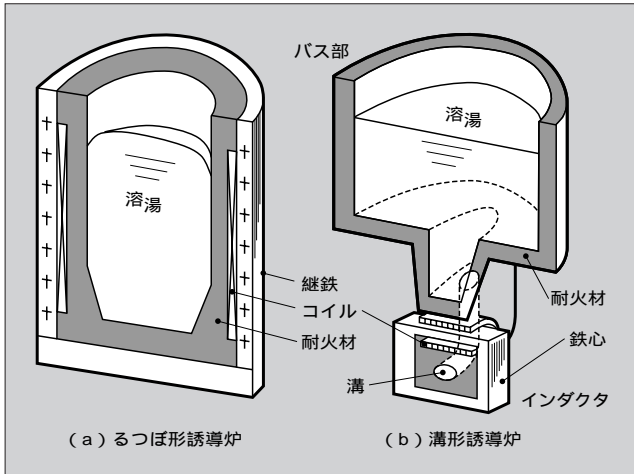
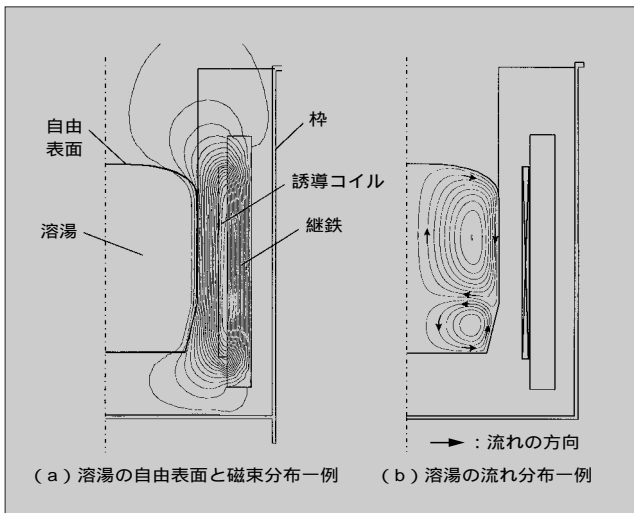


図2 りんぼ形誘導炉の電磁かくはん解析例



温化や均一化などに重要であり、製品の高品質化につながる。したがって、局所的な渦やよどみを発生させない構造設計が重要である。

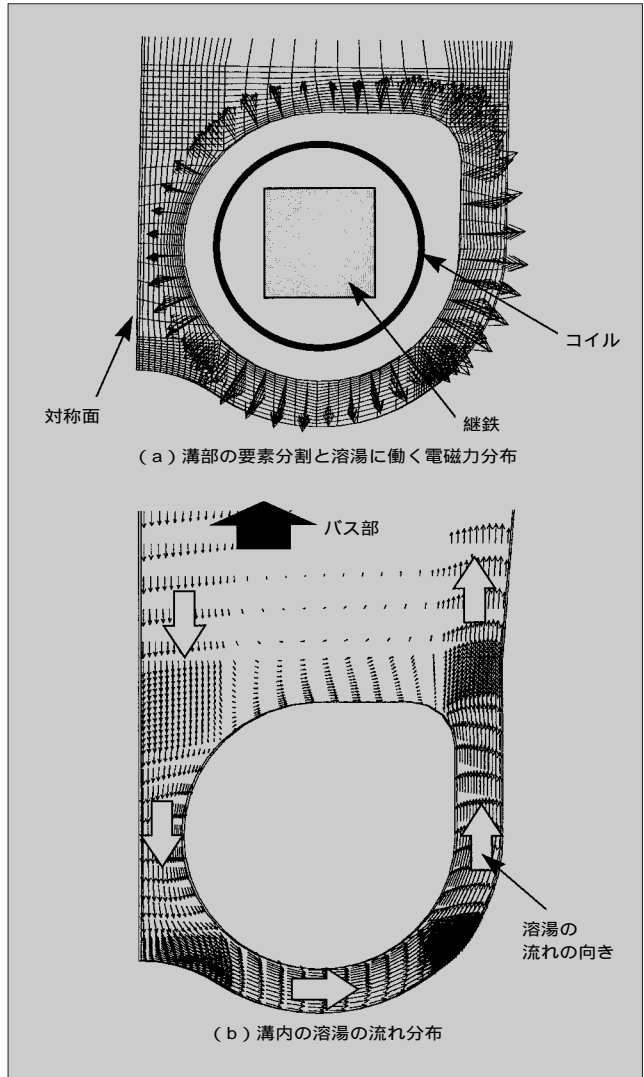
ここでは、磁界解析で求めた電磁力分布を用いて、誘導炉内の溶湯のかくはん状況を解析した結果を紹介する。図2(a)に高周波誘導炉の溶湯の自由表面と磁束分布を示す。溶湯側面に働く電磁力によって湯面が盛り上がる現象をよく表している。この湯面形状を境界条件として溶湯の流れ解析を行う。図2(b)に溶湯の流れ分布(流線)を示す。溶湯はこの線に沿って流れ、線の間隔が狭いほど流速が速いことを表している。このように数値解析を用いることにより、溶湯の流れ分布を視覚的に評価でき、かくはん現象を考慮しながらコイル位置やるんぼの形状、電気仕様などの検討を行うことができる。

(2) 溝形誘導炉

溝形炉はバス部(湯室)とインダクタ(加熱部)から構成され、インダクタの溝内には溶湯で満たされた1ターン、すなわち二次コイルが形成され、ここに電流が流れ加熱される。

インダクタ部は、溶湯に電磁かくはん力(一方向の湯の

図3 インダクタ溝部の溶湯流動解析



流れ)を与えるために溝の形状を非対称にしている。この構造を検討する際に、溶湯の流れ解析を用いている。図3(a)は流れ解析用の要素分割と磁界解析で求めた溝内の溶湯に働く電磁力分布を示す。この電磁力分布を入力データとして流動解析を行うと、図3(b)のように溝内の溶湯の流れ分布を明らかにできる。

3.2 ヒータの加熱解析

(1) ビレットヒータの均一加熱

ビレット材の鍛造や押出成形の直前加熱用に誘導加熱ビレットヒータが多く用いられている。生産される製品は経済性と品質が重視されるので、ヒータの設計においては特にコイルの高効率性と均一加熱できる能力が要求される。

加熱中のビレット材は表面エッジ部の温度が最も高く、中心部にいくにつれて低くなるが、この温度差を小さくすることが重要な技術となる。富士電機では、熱解析で温度分布を確認しながらコイルの粗密巻き構造を最適化することにより、加熱むらが従来よりも10%少ないコイルの開発を行った。

図4はアルミニウムビレットヒータ(直径203mm)の

図4 アルミニウムビレットヒータの温度解析例

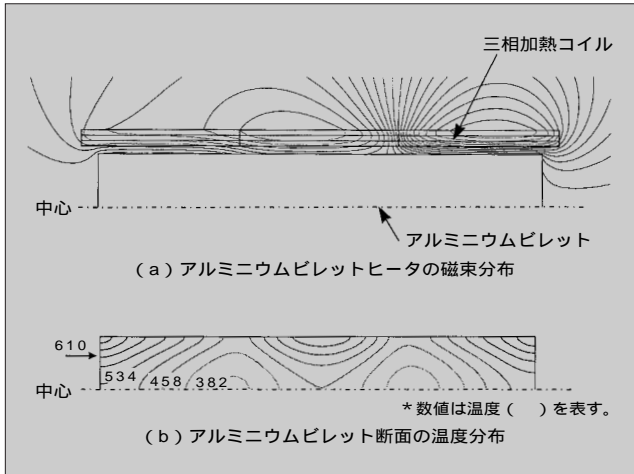
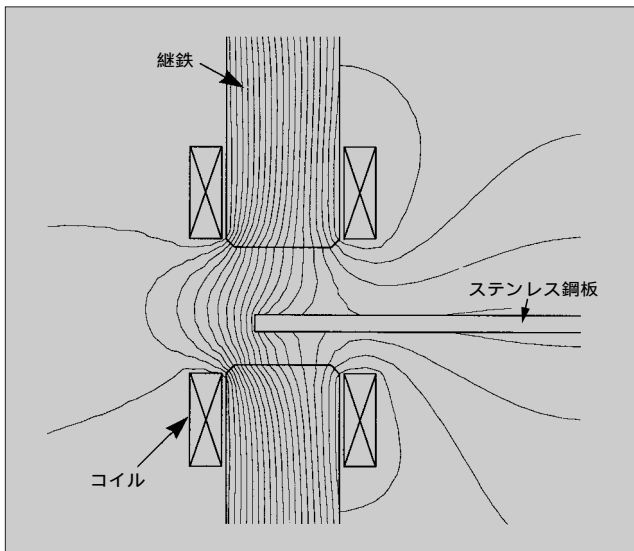


図5 ステンレス鋼板エッジヒータの磁束分布解析例



解析例である。図4(a)は周波数60 Hz の電流を通じたときの磁束分布を、図4(b)はワーク損失 223 kW で 165 秒加熱後の温度分布を示す。熱解析では、磁界解析の発生損失分布を入力データとして用いた有限要素法で解析した。

(2) 鋼板圧延過程のエッジ加熱

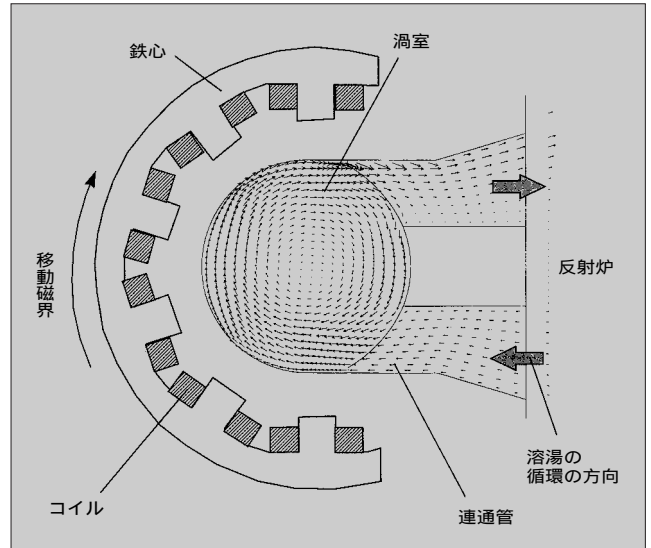
鋼板の圧延工程において、板の端部の温度低下を防ぐために、端部加熱装置（エッジヒータ）が用いられる。板の温度が低下すると、圧延ロールの寿命低下や圧延不良の原因となるため、加熱分布を考慮した構造設計が重要である。

鋼板中の発熱分布は有限要素法を用いた磁界解析で求めている。図5にステンレス鋼板のエッジヒータ（トランスバース加熱方式）の磁界解析の例を示す。

3.3 渦巻スターラの開発

渦巻スターラとは、アルミニウム缶材（主にチップ材）のようなかさ比重の小さいものを歩留りよく溶解させるために、リアモータの技術を応用した電磁式渦巻発生装置である。本装置は反射炉の側面に取り付け、それぞれを連通管で接続し、渦の回転力により溶湯を循環させることを

図6 渦巻スターラの溶湯流れ分布



特長としている。本装置の開発では、電磁界解析によりスターラの発生する磁界や溶湯に働く電磁力を求め、その結果を用いた熱・流れ解析から、渦室および反射炉内の溶湯の流れと温度分布を求めた。これらの解析結果を基に、コイル、渦室、連通管の形状、渦巻スターラの反射炉への取付け位置などを検討した⁽⁴⁾。

図6に渦室と連通管の溶湯の流れ分布を示す。矢印は溶湯の流れの向きと速さを表す（詳細は本特集号の別稿「アルミニウム缶リサイクル用ハイブリッド溶解システム」を参照いただきたい）。

3.4 浮揚溶解装置（CCLM）の開発

CCLM（Cold Crucible Levitation Melting）とは、水冷銅るつぼを用いて金属をるつぼ内で浮かしながら溶解する方法である。本装置の設計においては、熔融金属を安定に浮揚させること、るつぼを十分に冷却すること、が重要である。

(1) 浮揚条件の決定

浮揚力は、溶湯に生じた渦電流とるつぼに生じた渦電流との反発力およびコイルの励磁電流との反発力によって生じる。この反発力はるつぼやコイルの形状によって大きく変わるので、磁界解析を用いて溶湯に加わる電磁力を評価しながら構造の最適化を行い、完全浮揚条件を求めた⁽⁵⁾。

CCLMの解析モデルは、銅製のるつぼ、コイルおよび溶湯で構成されるため強磁性体を含まない。したがって、三次元磁界解析では電気ベクトルポテンシャル法を使用した。図7に、るつぼに流れる渦電流分布（等電気ベクトルポテンシャル線）を示す。図7(a)、bはそれぞれ上コイルおよび下コイルに通電した場合である。図中の線に沿って渦電流は流れ、間隔が密なほど電流密度が大きいことを示す。

上記の浮揚の検討の妥当性と、溶解後に底穴から溶湯を出湯させる条件を検討するために、自動分割機能を有する有限要素法を用いた磁界解析と、VOF（Volume of Frac-

図7 CCLM りつぼの渦電流解析

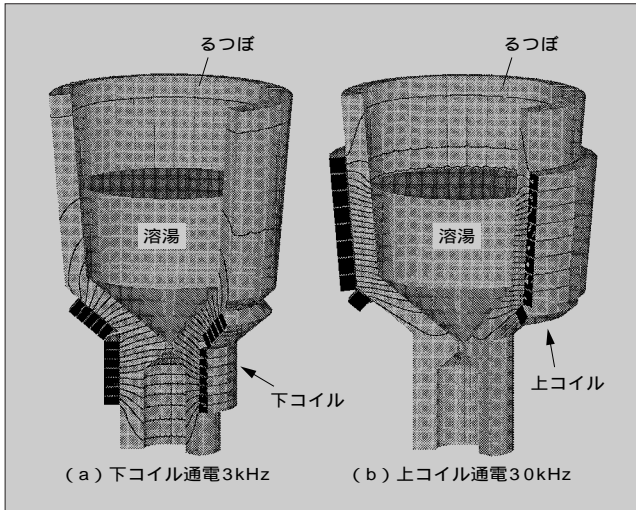


図9 CCLM りつぼの冷却解析

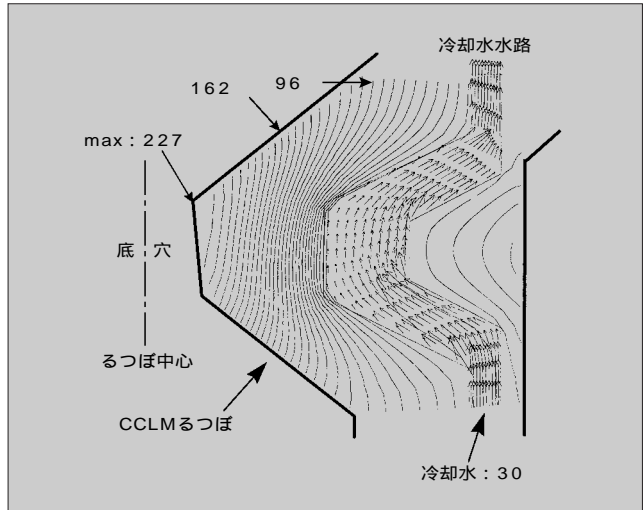
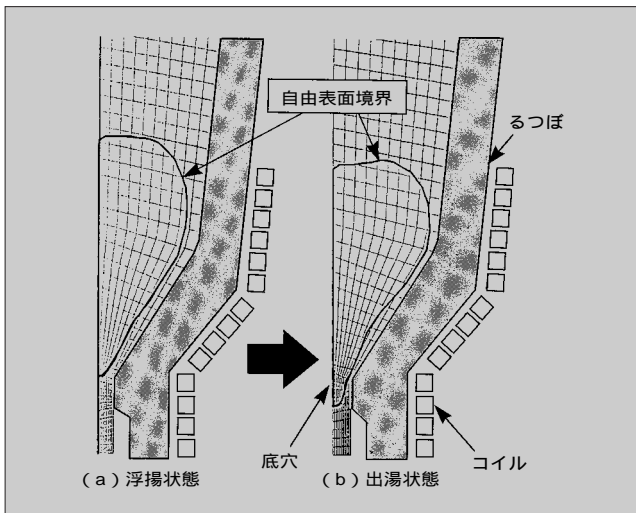


図8 CCLM 溶湯の自由表面解析



属を浮揚溶解し、底穴から出湯できる装置を開発した。

4 あとがき

工業電熱製品の設計および開発時に使用している数値解析手法とその適用例の一部について述べた。これらの例をみても分かるように、数値解析を用いて磁界や熱、流れなどの現象を可視的かつ定量的に把握することにより、製品の構造・仕様の最適化や試作試験にかかる時間と費用の削減ができる。

今後、コンピュータはもちろん、解析手法やマンマシンインタフェースも進化を続け、数値解析を用いた製品開発や設計はますます身近でかつ重要になると思われる。

今後は、非線形性などの物理現象を取り入れ、解析技術の高度化を図っていく考えである。

参考文献

- (1) 坪井始ほか：有限要素法による磁性導体の渦電流解析，日本シミュレーション学会第18回計算電気・電子シンポジウム，No.1-1-3，p.19-22（1997）
- (2) 坪井始ほか：ソース電流を考慮した薄板導体の渦電流解析，電気学会論文誌 A，Vol.110，No.9，p.591-597（1990）
- (3) 芦田有ほか：浮揚溶解モデルの三次元渦電流解析，電気学会全国大会，No.1010（1994）
- (4) 松尾孝ほか：電磁力応用アルミ缶リサイクリングシステム，第12回電熱大会予稿集，p.47-54（1997）
- (5) 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）
- (6) 芦田有ほか：浮揚溶解モデルの自由表面推定計算法，電気学会全国大会，No.1011（1994）
- (7) 貝沼研吾ほか：浮揚溶解装置での三次元電流解析と熱解析，電気学会回転機静止器合同研究会，SA-95-13，RM-95-75（1995）

tion) 法を組み合わせることで溶湯の自由表面解析を行った⁽⁶⁾。解析結果(図8)のように、溶湯の完全浮揚および底穴からの出湯条件を導いた。

(2) 冷却能力の評価

CCLMの大容量化は、数十kgの浮揚力を発生させるためのコイル設計とるつぼに発生する渦電流損失をいかに効率よく冷却するかが設計上の最も重要な課題の一つであった。

冷却検討では1)で求めた渦電流分布から発生損失(ジュール熱)分布を計算し、それを発熱源として熱解析を行った。さらに、冷却が難しいるつぼ底穴付近では冷却能力を稼ぐための水路形状を冷却水の流れと温度を連成して解析した。図9に、水路形状とるつぼ底穴付近の流れ分布(矢印)、表面の温度分布(等温線)を示す。このようにして、最も局部加熱が少なくなるような冷却構造を検討した⁽⁷⁾。

以上の解析技術を駆使し、富士電機は鉄50kg相当の金

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2.3kgのCCLMの開発以来、熔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50kg、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、コイル間の相互干渉を少なくする方式を採用している、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、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。

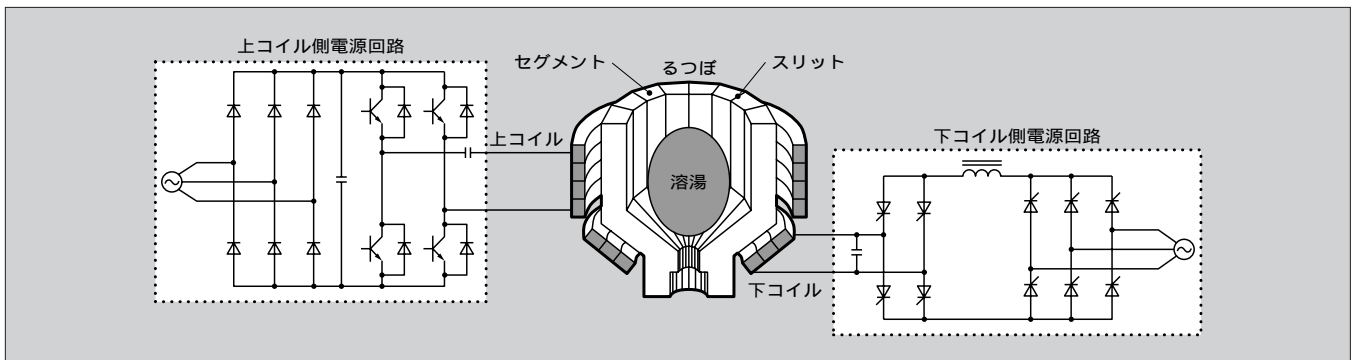
③ 大容量CCLMの開発経過

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、富士電機ファーンズ(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、富士電機ファーンズ(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

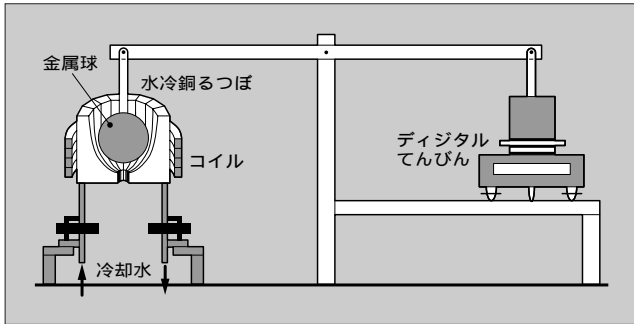


図3 金属材料の違いによる浮揚力と電力の関係

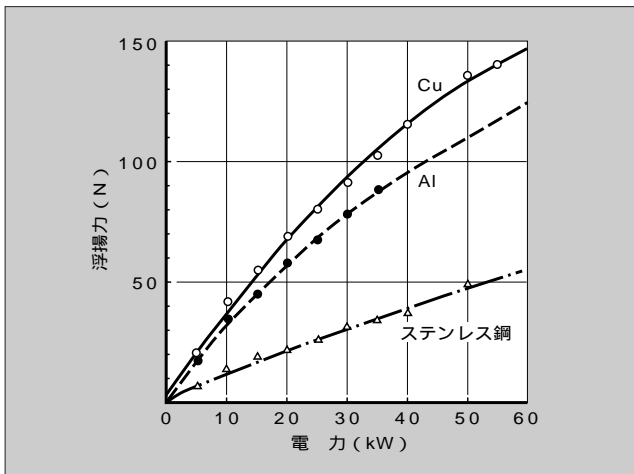


図4 周波数の違いによる浮揚力と電力の関係 (Cu 球)

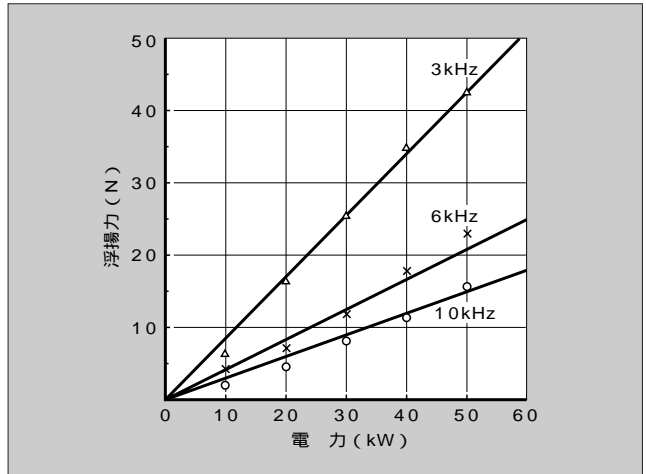
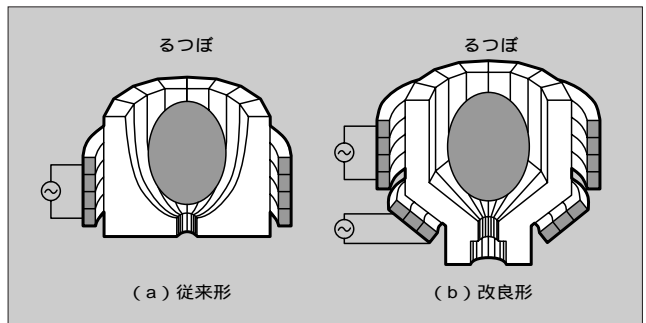


図5 りつぼ形状とコイルの構成



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⁾

$$F = \sqrt{\frac{\mu}{2}} \cdot \frac{W}{\sqrt{f}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

- F : 電磁力 (N)
- μ : 金属の透磁率 (H/m)
- f : 周波数 (Hz)
- : 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、水冷の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 り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

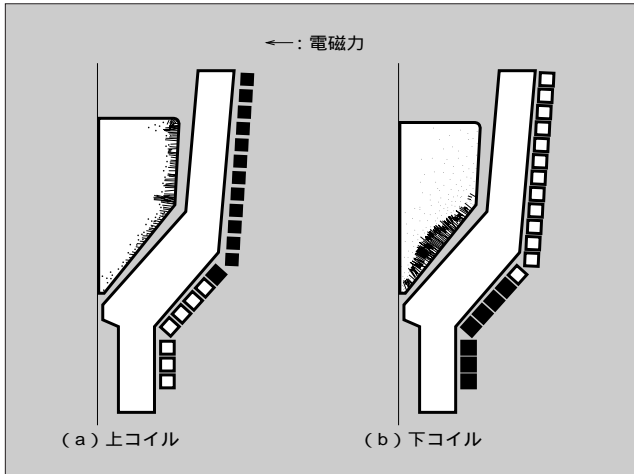
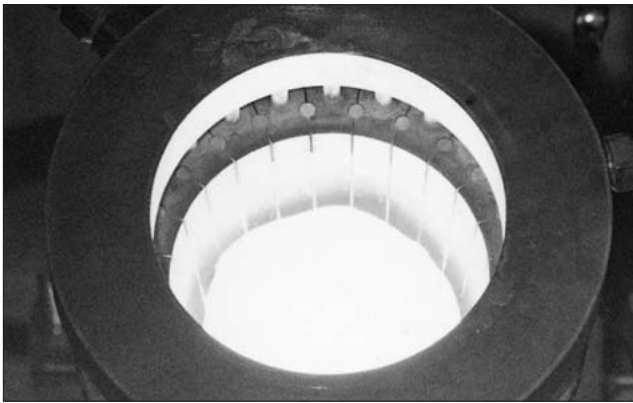


図7 チタン 2.3kg 浮揚溶解時の様子



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2.3kgを2分間で急速溶解することができる⁽³⁾。

図7にチタン2.3kgの浮揚溶解時の様子を示す。2kg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鑄型に入る。この方式の導入により、

図8 底部非接触出湯

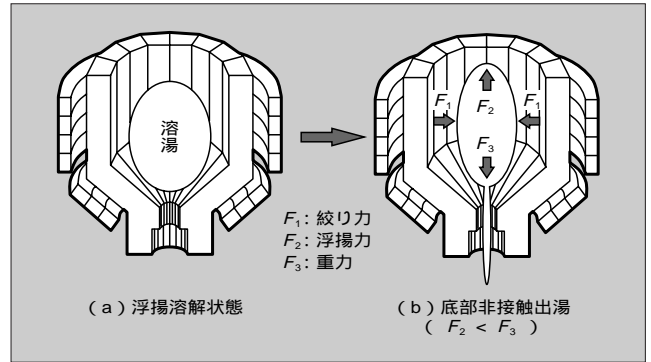
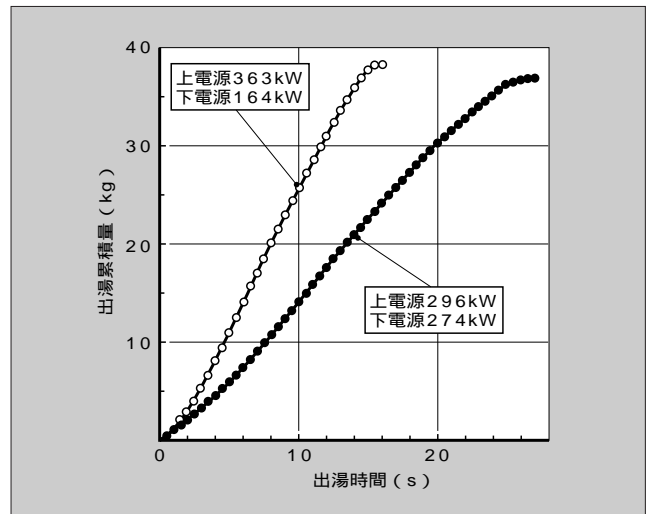


図9 出湯時電力による出湯累積量の違い



溶解金属の鑄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、鑄鉄38.5kg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 50kg級大容量CCLMの開発

装置の大容量化に際しては、精度よく計算された電磁力と熱損失の算定、るつぼ・コイル構造の最適化、冷却設計技術の確立、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。

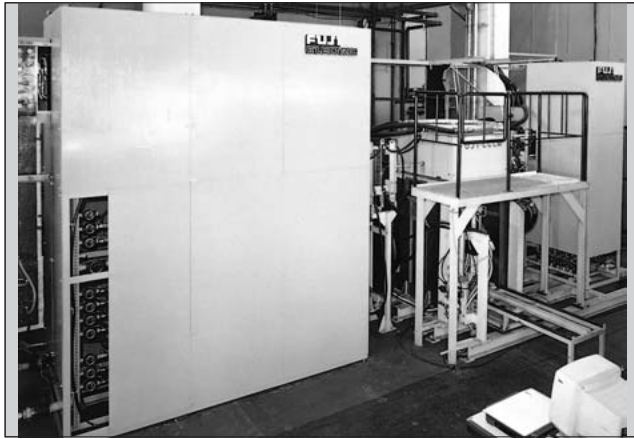
富士電機は1995年、溶解量50kg級の大容量CCLMの開発に成功した。表1に50kg級CCLMの仕様を示す。図10は装置全体の写真である。浮揚溶解用のるつぼとコイルが設置され、その左側に上電源が、右側に下電源が設置されている。この装置では溶解後の金属をるつぼ底部から非接触出湯して鑄型に鑄造できる構成になっている。

現在、鑄鉄50kgをアルゴン雰囲気中において、上電源：30kHz 400kW、下電源：3kHz 200kW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	260mm, 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。

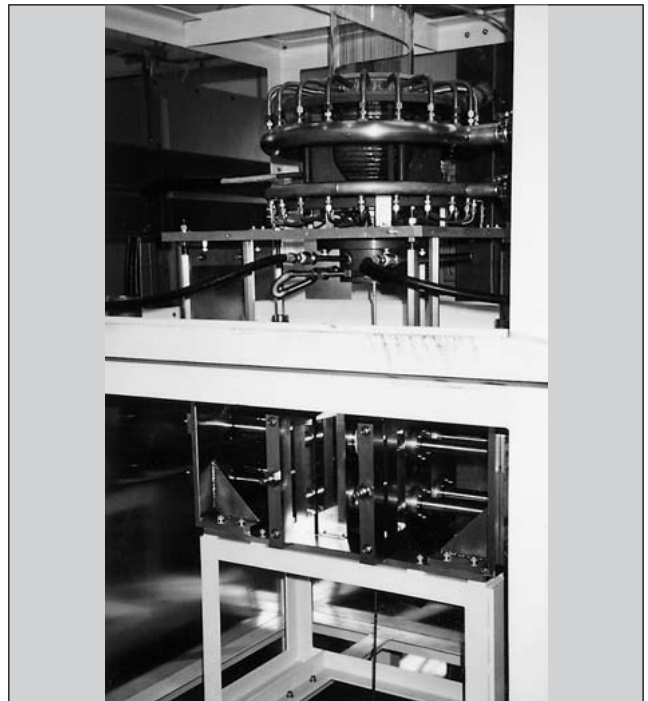
4.2 連続鑄造CCLM

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。富士電機では連続鑄造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6の丸棒が、下引抜き方式では60の丸棒が連続製造可能である⁽⁵⁾。図11にダイス方式連続鑄造CCLMの外観を、図12に下引抜き方式連続鑄造CCLMの外観を示す。

表2 CCLMの容量別装置の仕様

項目	分類				
	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 下側電源	一電源方式	100kW	150kW	500kW
		～100kW	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)	60×80	74×120	110×150	260×320	

図11 ダイス方式連続鑄造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の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純度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鑄造する

図 12 下引抜き方式連続鋳造 CCLM の外観

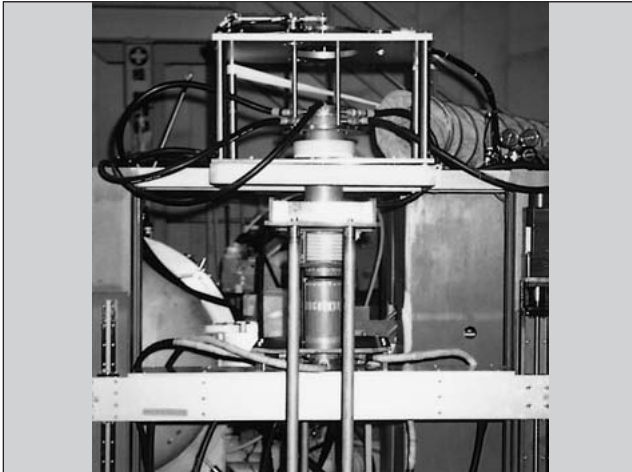


図 13 高真空 CCLM の外観



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		120mm, 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、

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10kg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 X Congress on Electricity Applications. p.M 9-M 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）

浮揚溶解装置 (CCLM) の特長と溶解実績

篠倉 恒樹(しのくら つねき)

武 達男(たけ たつお)

1 まえがき

金属系新素材の開発や金属材料の製造において、「金属をいかにうまく溶解するか」はきわめて重要である。従来はアルミナやマグネシアなど、耐熱性のるつぼを用いて溶解することが多かった。しかし、従来法では金属とるつぼが接触するため、高純度金属・高融点金属・活性金属の溶解には限界がある。そこで登場するのが、金属をるつぼから浮かして溶かす「浮揚溶解」であるが、装置の大容量化や出湯技術の確立が求められていた。

富士電機は 1995年、2 kg 級底部出湯式大容量浮揚溶解装置「CCLM (Cold Crucible Levitation Melting)」を開発し、製品化した⁽¹⁾。同年、50 kg 級の大形化、その後高真空溶解および連続铸造を可能にするなど技術の向上を図るとともに、実験用 CCLM を製作して各種金属を溶解し、その特長の実証に努めてきた。その結果、上述の金属の溶解だけでなく、介在物除去や均一溶解、急速溶解など種々のメリットのあることが実証された。

本稿では、CCLM の基本構造、特長、実験用 CCLM、各種金属の溶解実績について報告する。

2 CCLM の特長

特長を述べる前に、浮揚溶解・出湯の原理や CCLM の構造について簡単にふれておく [詳細は参考文献 1 を参照いただきたい]

まず、浮揚溶解の原理は次のとおりである。るつぼに巻いたコイルに交流を流すと、るつぼ内に交番磁界が発生して金属にコイル電流とは逆向きの渦電流が生じ、両電流間に電磁反発力が作用し、かつ金属内にジュール熱が発生するので金属は浮揚し、溶解する。

図 1 に CCLM の基本構造を示す。2 コイル・2 電源で構成され、上側は周波数を高くして主に加熱用、下側は周波数を低くして主に浮揚用としている。溶解後は同図に示す上下コイルの電力を調節して、金属への絞り力 f と浮揚力 F を制御し、るつぼ底穴から出湯させる。

次に CCLM の特長を述べる。構造上は図 1 に示すように、すり鉢状のるつぼと 2 コイル・2 電源を採用していることであるが、以下では使用上の特長を列挙する。

(1) 高純度金属、高融点金属、活性金属が溶解できる。

例：高融点金属は Nb, Ta, Mo など。

活性金属は Ti, Cr, Zr など。

(2) 急速溶解ができる。

例：鉄の場合 2 kg では約 2 分、50 kg では約 5 分。

(3) 非金属介在物の除去ができる。

例：鉄中のアルミナ粒子の除去。

(4) 合金の均一混合化が可能である。

例：銅とクロムの均一溶解。

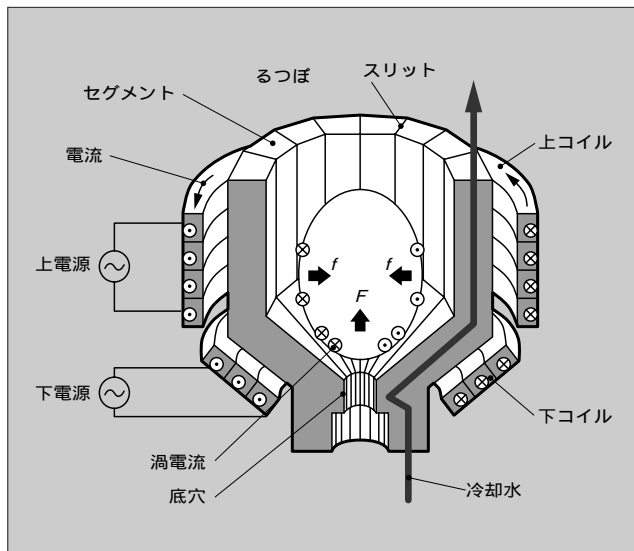
(5) るつぼの保守が不要である。

(6) るつぼ底穴からの出湯が可能である。

(7) るつぼ底穴を利用して連続铸造ができる。

これらの特長があるので、CCLM は表 1 に示すように従来の電子ビーム溶解やアーク溶解、高周波誘導溶解などと比較して種々の点で優れている。

図 1 CCLM の基本構造



篠倉 恒樹

生産技術、材料加工評価技術の研究開発に従事。現在、生産・システム企画室生産技術研究所主席、工学博士。



武 達男

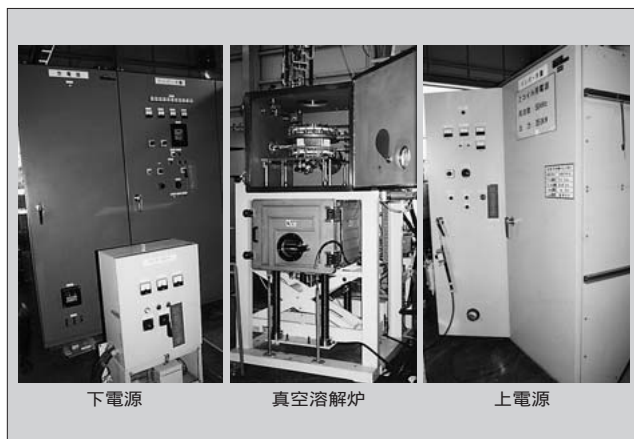
電磁界解析ならびに電磁気応用機器の研究開発に従事。(株)富士電機総合研究所電力技術開発研究所電磁機器開発グループ主席技師。

表1 CCLMと他の溶解法との比較

溶解法 項目	CCLM	電子ビーム	アーク	誘導
高純度金属溶解	A	A	B	C
高融点金属溶解	A	A	B	C
活性金属溶解	A	A	A	B
急速溶解	A	A	A	B
介在物除去	A	A	A	B
合金の均一混合	A	C	C	A
製錬効果	A	A	B	B
組成の調整	A	C	B	A
鑄造作業性	B	B	B	A
るつぼの保守	A	B	B	C
大量溶解	B	B	A	A

A: 良, 好適 B: 可, 普通 C: 不可, 要改善

図2 実験用 2kg 級 CCLM



3 実験用 CCLM

図1の構造に基づいて製作した実験用CCLMを図2, 図3に示す。図2は真空溶解用2kg級装置で, 真空中出湯の機能も備えている。図3は50kg級装置で, るつぼ直下に鑄型を置けば, 鑄造が可能である。

図4(a)は製作した連続鑄造実験用2kg級CCLMであり, 本装置の構造を同図bに示す。この図において, 管状ダイスはその穴内で溶融金属を凝固させるもので, その下部は水冷ジャケットで冷やされる。ダミー棒はその上先端で溶融金属をダイス内に導くものである。ピンチローラでダミー棒を引き下げれば, 丸棒が連続的に得られる。

実験用CCLMの主な仕様をまとめたのが表2である。

4 各種金属の溶解実績

前述の溶解装置を用いてこれまで各種の金属を溶解してきた。その主な金属を装置ごとに列記したのが表3である。これらのなかで下線を引いた金属の溶解結果を以下に述べ

図3 実験用 50kg 級 CCLM

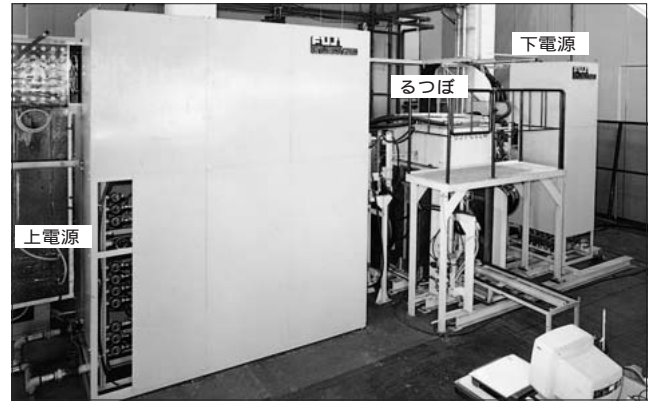
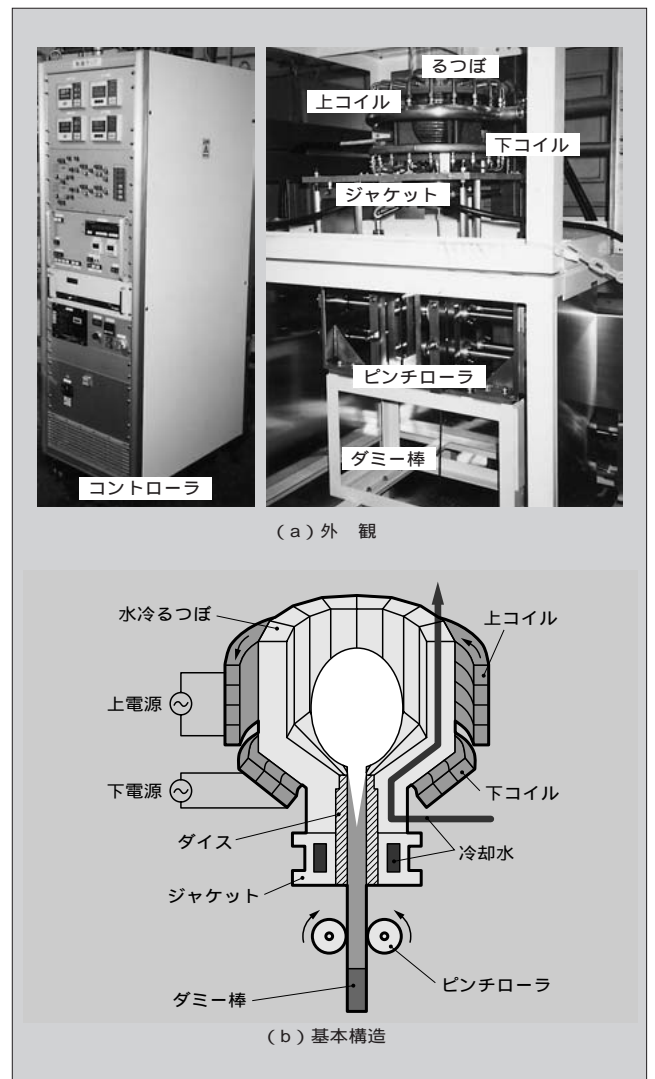


図4 連続鑄造実験用 2kg 級 CCLM の外観と基本構造



る。

4.1 実験用 2 kg 級 CCLM での溶解例

(1) コバルト (Co)

Coは近年高純度化が要求されている。高純度Coをアルゴン雰囲気の実験用CCLMで溶解し, C, P, O, Cuについて化学分析を行った結果が表4である。いずれも溶

表2 実験用CCLMの主な仕様

装置名		2kg級装置	50kg級装置	連続铸造装置
項目・単位				
溶解量	kg	2	50	2
るつぼ	内径	mm 110	260	110
	深さ	mm 150	320	150
雰囲気	Pa	真空 10^{-3} 不活性ガス	大気 不活性ガス	大気 不活性ガス
上電力	kW	150	1,000	150
下電力	kW	100	1,000	100
上コイル周波数	kHz	50	30	50
下コイル周波数	kHz	3	3	3
出湯方式		底穴出湯	底穴出湯	連続铸造
底穴直径	mm	10	20	10
その他		金型铸造が可能	鋳型铸造が可能	直径6mmの丸棒造型が可能

表3 各種金属の溶解実績

装置名	溶解した金属の例
2kg級装置	高純度金属: Co, Pt, Si 高融点金属: Ta, Mo, Nb, Cr 活性な金属: Ti, Zr 金属間化合物: TiAl 合金: 鋼, 鋳鉄, アルミ合金, はんだ, アルミナ含有鉄, Cu-Cr, ジルカロイ その他: Fe-Cr-Al, Fe-B-Ti, Pb-Zn, Ni-Cr-W, Pd-Fe-Mn, Fe-Cr-Mo, Pb-Al, Mn-Al, Sn-Bi-Ag, Co-Cr-Ta, Cu-Ni-Mn, など
50kg級装置	鋳鉄, ステンレス鋼, アルミ合金
連続铸造装置	鉛, 鋳鉄, 軟鋼

表4 Coの溶解前後の化学組成

(単位: ppm)

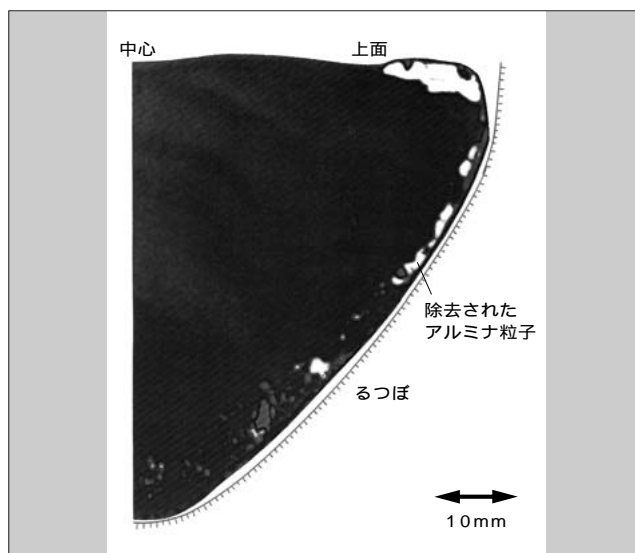
区分	元素記号	C	P	O	Cu
溶解前		29	40	19	10
溶解後		24	40	14	10

解前後でほぼ同じ値を示し、るつぼからの汚染のないことが実証された。また、100 ppm の酸素を含む高純度 Co を真空中 (10^{-3} Pa) で溶解し、酸素を分析した結果、約10 ppm であった。同じ実験を上電源のみの非浮揚溶解法で行った結果、約60 ppm であったので、CCLM は脱ガスにも有効であることが分かった。

(2) チタンアルミニウム (TiAl)

軽量・高耐熱材として近年注目されている金属間化合物 TiAl は、室温での延性が小さく、普通の溶解法での伸びは1%に満たない⁽²⁾。しかし、素材を高純度とし、非汚染溶解であれば、伸びの改善が期待できる。そこで Ti と Al の高純度素材を高純度アルゴン雰囲気の実験用 CCLM で溶解してみた。溶解量は約1kgで、るつぼ内凝固品からサンプルを切り出し、三点曲げ法で室温伸びを測定した結果、約1%であった。伸びの改善を図るため、1,200 で

図5 鋳塊半断面のアルミナ分布



の熱処理を加えた結果、最高レベルの2.1%が得られた⁽³⁾。これは高純度浮揚溶解と熱処理の相乗効果によるものと考えられる。

(3) アルミナ含有鉄 (Fe-Al₂O₃ 粒子)

電磁反発力は金属には働くが、非金属には働かないので、非金属介在物の除去が期待できる。これを実証するため、5 μm の Al₂O₃ 粒子を1%均一に混合した Fe 圧粉体 1.5 kg を実験用 CCLM で溶解した。るつぼ内凝固品の断面を X 線マイクロアナライザで面分析した結果、図5に示すように粒子が外周に除去されていることが分かった。さらに、溶解後金型に出湯し、鋳塊を定量的に化学分析した結果、粒子は0.004%に減じていること、および除去された粒子はるつぼ内に残留していることが判明した。

(4) 銅クロム (Cu-Cr)

電磁かくはん力による均一混合溶解の特長を実証するため、非混合金属の Cu と Cr をアルゴン雰囲気の実験用 CCLM で溶解した。2kg の Cu と Cr を溶解出湯し、水冷金型に铸造して断面の金属組織を観察した結果、図6に示すように Cu 素地に微細な Cr 粒が均一に分散していることが分かった。

なお、実験用 2kg 級 CCLM での溶解では、上コイルの電力は約 100 kW、下コイルのそれは約 50 kW、溶解時間は 2 ~ 3 分であった。

4.2 実験用 50 kg 級 CCLM での溶解例

(1) 鋳鉄

鋳鉄 50 kg の浮揚溶解・出湯を試みた。電力は上コイル 400 kW、下コイル 200 kW、溶解時間は約 5 分、底穴からの出湯時間は15秒くらいであった。

溶解・出湯状況は図7に示すように良好であった。

(2) ステンレス鋼

ステンレス鋼 50 kg を溶解・出湯したが、溶解・出湯状況は鋳鉄の場合とほぼ同じであった。

図6 Cu中のCr粒子の分散組織

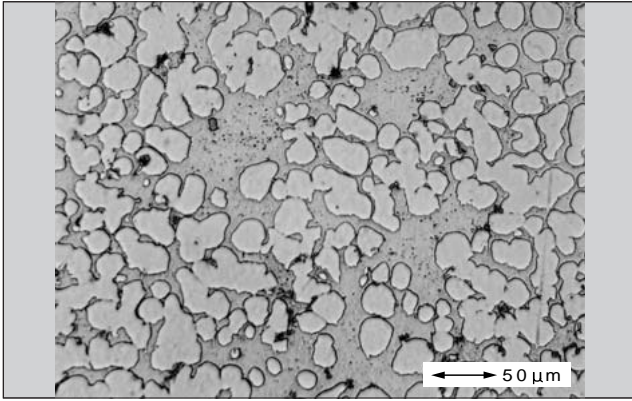
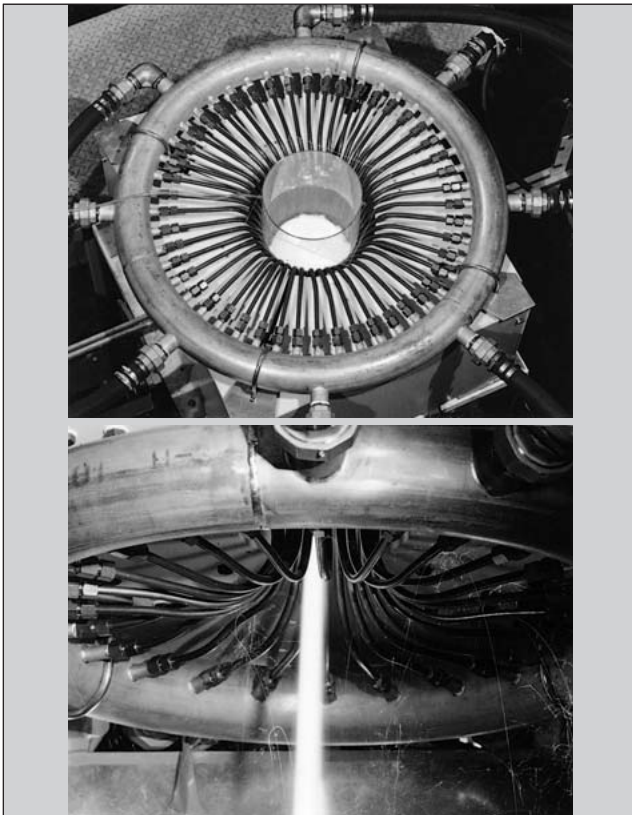


図7 実験用50kg級CCLMの溶解状況(上)と出湯状況(下)



4.3 連続鋳造実験

実験用CCLMでの連続鋳造技術を確認するため、取扱いが容易な鉛と鋳鉄で基礎実験を行った。

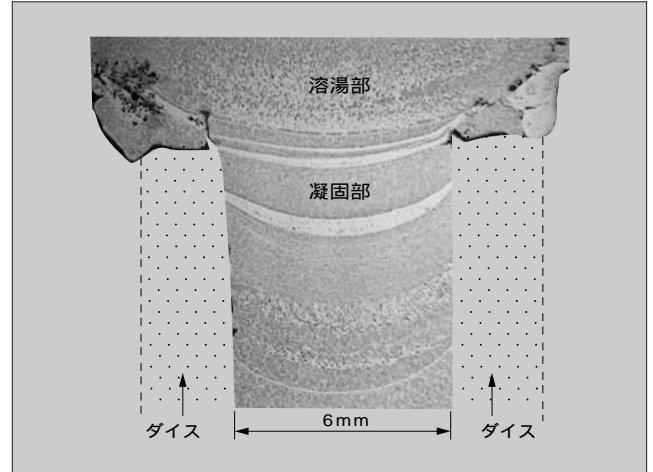
(1) 鉛丸棒の連続鋳造⁽⁴⁾

図4 bに基づいて、まず上先端に鉛の付いた鋼ダミー丸棒(直径6mm)を黒鉛ダイスの中心穴に貫通してセットした。次につぼ内に鉛0.5kgを入れて溶解し、ピンチローラを回転させて徐々にダミー棒を引き下げた。上電力40kW、引下げ速度10mm/minで連続鋳造し、長さ1.4mの鉛丸棒が得られた。

(2) 鋳鉄丸棒の連続鋳造⁽⁵⁾

鉛実験結果をベースに鋳鉄の連続鋳造実験を試みた。鋼

図8 連続鋳造凝固部の断面組織



ダミー棒をセットし、鋳鉄1kgを溶解した。上電力65kW、下電力20kW、速度20mm/minで2秒間引き下げた後6秒間停止を繰り返した結果、直径6mm×長さ1mの鋳鉄丸棒が得られた。

ダイス入口近くでの凝固状況を調べるため、連続鋳造の途中でいったん凝固させ、鋳鉄丸棒とダミー棒を取り出して凝固部の断面を調べたところ、図8が得られた。この結果、凹型のしま模様が見られたことから、ダイス入口近傍での凝固は凹形で進行することが明らかとなった。

5 あとがき

CCLMの課題である大容量浮揚溶解・出湯技術を確立でき、この技術が実験室的規模から生産規模へ拡大されたことは素形材産業のさらなる発展を促すものと考えられる。特に出湯機能の付加は特殊金属アトマイズ粉の製造や精密鋳造に新たな道が開けるものと思われる。また、介在物除去や均一溶解は材料特性の向上に、急速溶解やつぼ保守の不要は操業・工程の合理化に役立つであろう。さらに連続鋳造は難加工材の直接加工などに効果的と予想される。

このようにCCLMの利用分野は今後ますます広がるものと期待される。これからも顧客のご指導・ご協力を得ながら、溶解技術の向上に一層努めていく所存である。

参考文献

- (1) 武達男ほか：底部出湯式大容量浮揚溶解装置(CCLM)の開発，富士時報，Vol.68，No.4，p.225-228(1995)
- (2) 出川通・鎌田勤也：TiAl精密鋳造品と酸素の影響，パウングラリー，Vol.7，No.10，p.35-38(1991)
- (3) 只野英顕・篠倉恒樹：浮揚溶解法で得られたTiAlの延性，日本金属学会春季大会講演概要，p.18(1997)
- (4) 貝沼研吾・篠倉恒樹：浮揚溶解の鉛丸棒連続鋳造実験，日本金属学会秋期大会講演概要，p.283(1997)
- (5) 貝沼研吾・篠倉恒樹：浮揚溶解の鋳鉄丸棒連続鋳造実験，鋳造工学 第131回全国講演大会講演概要集，p.131(1997)

高周波誘導加熱電源

久本 正昭(ひさもと まさあき)

伊藤 豊(いとう ゆたか)

野村 年弘(のむら としひろ)

1 まえがき

電力用半導体素子を応用した高周波誘導加熱装置は、電磁誘導を利用したクリーンで高効率そして制御性に富んだ加熱装置であり、環境問題や資源有効利用の要求にこたえるシステムとして広く普及しつつある。

富士電機では、現在、表1のとおり各種容量、用途に応じた加熱用高周波インバータを製作している。

本稿では、これら富士電機の加熱インバータの特長、仕様、回路構成を示し、適用時に話題になる主回路方式の電流形と電圧形との比較について簡単に述べる。

2 サイリスタインバータ

2.1 標準系列と仕様

加熱用電源として、最も大容量となるサイリスタインバータの標準系列と仕様を表2に示す。

表2 サイリスタインバータの標準系列と仕様(単機容量)

項目	仕様							
交流入力	三相、電圧変動±10%。入力電圧は出力容量によって異なる。							
出力周波数	0.5kHz		1kHz		3kHz		10kHz	
出力	出力	出力電圧	出力	出力電圧	出力	出力電圧	出力	出力電圧
	350kW	600V	300kW	600V	250kW	500V	50kW	400V
	700kW	1,200V	600kW	1,200V	500kW	1,000V	100kW	400V
	1,000kW	1,800V	900kW	1,800V	1,000kW	1,000V	200kW	800V
	2,000kW	2,400V	1,500kW	1,800V	1,500kW	1,500V	300kW	1,200V
4,000kW	3,000V	2,000kW	1,800V	2,000kW	1,500V	500kW	1,200V	
出力調整範囲	5~100%							
出力制御方式	電圧制御							
主回路方式	フルブリッジ方式							
冷却方式	水冷式(純水循環方式)							
冷却水温	5~35							
種別	電流形インバータ							

2.2 特長

(1) 大容量・高効率

高耐圧、大電流の高周波サイリスタの適用とその直並列接続および電流バランスの組合せにより高電圧、大出力が可能で、変換効率が97%(500Hz、定格出力時)と高い。

(2) 広範囲の安定動作

負荷回路の特性周波数に同期して動作する自制式イン

表1 加熱用高周波インバータ

分類項目	サイリスタインバータ	汎用IHインバータ	MOSFETインバータ
デバイス	高速サイリスタ	IGBT	平形MOSFET
方式	電流形	電圧形	電圧形
周波数	0.2~10kHz	20~50kHz	20~500kHz
出力容量	~12MW	2~20kW	~1,000kW
用途	工業用	厨房用, 工業用	工業用
冷却方式	水冷	空冷	水冷
参考文献	(1)	(2)~(4)	(5)~(8)



久本 正昭

誘導加熱用高周波電源の設計および開発に従事。現在、富士電機ファースト(株)エンジニアリング本部開発グループ主査。



伊藤 豊

インバータの設計、開発に従事。現在、鈴鹿工場インバータ設計部課長補佐。



野村 年弘

電磁ブレーキなどの制御器具設計を経てパワーエレクトロニクスの設計、開発、研究に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所ハイパワーシステムグループ首席技師。

バータであり、被加熱物の温度や形状の変化による負荷インピーダンスの大幅な変動に対して、安定な動作が可能である。

また、加熱システムに応じて定電力・定電圧制御が可能で、目的に応じた加熱温度制御、プログラム運転などでもできる。

2.3 回路構成と制御方式

図1に基本回路構成と制御ブロック図を示す。入力回路として小容量機では、6相サイリスタ整流器を使用している。大容量機では、サイリスタ整流器の並列接続または直列接続による12相整流方式を採用し、入力側の高調波を低減している。インバータ部は、高周波サイリスタを用いた

フルブリッジで構成される。インバータ出力を並列接続して多重化することで、さらに大容量化することが可能である。負荷回路は、加熱コイルと力率改善用の整合コンデンサを並列接続して、並列共振回路を構成している。

2.4 サイリスタインバータの今後

比較的コンベンショナルな電源であるが、需要家の作業効率向上のため短時間加熱が求められており、一層の大容量化と制御性能向上が望まれている。このため、現在、より大容量化と高性能制御システム化を進めている。

③ 汎用 IH インバータ

3.1 標準系列と仕様

富士電機の汎用 IH (Induction Heating) インバータは、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を用いた20~50 kHz、2.5~20 kW の業務用厨房 (ちゅうぼう) 機器を中心とした加熱電源である。表3に標準シリーズの概略仕様を、また、図2に代表機種の外観を示す。富士電機の汎用 IH インバータは、幅広い容量範囲をシリーズ化しており、各種のニーズに対応できるようになっている。

3.2 特長

(1) 小形・高出力

主回路に2石ハーフブリッジ方式 (15 kW 以下) を採用し、パワーデバイスには小形で高出力を出せる IGBT を使用している。

(2) 高性能制御

富士電機独自の出力角制御 (4.3節参照) の採用により、多種の負荷に低出力域から高出力域まで円滑に運転できる安定した制御特性を有している。

図1 サイリスタインバータの基本回路構成

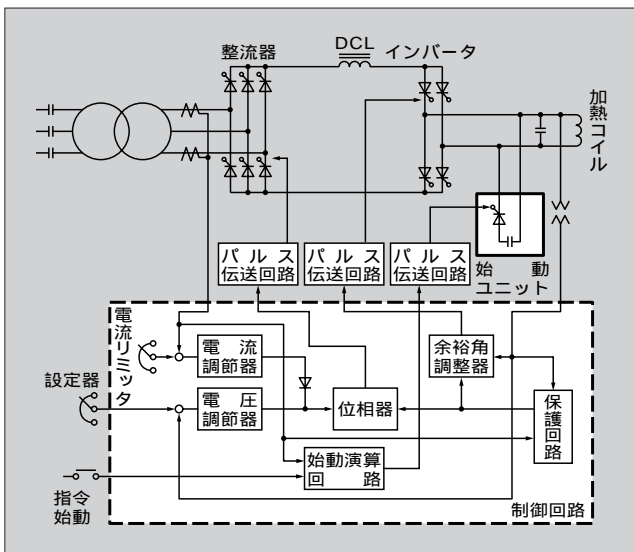


表3 標準概略仕様 (2.5~20kW)

項目	仕様						
形式	HFR 025R7A-7	HFR 030C9K-2UY	HFR 050C9K-2UY	HFR 070C7K-2	HFR 100C7K-2	HFR 150C7K-2	HFR200C7K-2 (新開発品)
交流入力	単相, 200/220V±10%	三相, 200~240V±10%		三相, 200/220V±10%			
出力周波数	20~50kHz						
加熱入力	2.5kW±10%	3kW±10%	5kW±10%	7kW±10%	10kW±10%	15kW±10%	20kW±10%
熱効率	86%以上	90%以上	92%以上				90%以上
質量	約5kg	約8.5kg		約13kg	約15kg	約18kg	約30kg
最適なベ直径	220mm (120~260mm可能)	260mm (220~450mm可能)		-			
冷却方式	開放・強制風冷	全閉・強制風冷					開放・強制風冷
形状など	ドロップインタイプ	自立据置きタイプ		(ワークコイルなし)			(ワークコイルなし) (共振コンデンサオプション)
主回路方式	ハーフブリッジ方式						フルブリッジ方式
種別	電圧形インバータ						
安全規格	Sマーク (認証番号: JQ10139-1)	-	UL197取得予定	-			

図2 インバータの外観



(a) HFR050C9K-2UY (5kW)

(b) HFR200C7K-2 (20kW)

3 kW, 5 kW 容量機種では16ビット CPU を搭載し、角制御をはじめインバータとして必要な運転、保護機能をすべてデジタル制御とし、さらに自動温度調節やパーソナルコンピュータとの通信など、さまざまなユーザー要求機能への対応を可能にしている。

(3) 多用途

小容量機 (2.5 ~ 5 kW) は、主に高出力電磁調理器として業務用厨房機器 (ガスこんろに替わる調理器全般、グリドル、ゆでめん器、フライヤ、中華レンジ、炊飯器など)、さらにレストラン、食堂などの客席テーブル用調理器などに使用されている。図3に電磁調理器 (厨房への応用例) の外観を示す。さらに中容量機 (7 ~ 15 kW) は、大形フライヤ、大形焼き物機といった食品工業機械や、熱応用機器 (プラスチック成形、乾燥、金属熱処理) などの産業分野にも広く応用されている。

3.3 高出力 20 kW IH インバータ

最近開発した20 kW IH インバータの仕様を表3に、外観を図2 bに示す。これは工業用熱融解装置や、業務用熱処理機 (食品加工、プラスチック減容、医療廃棄物・ごみ焼却など) への適用を狙って開発したものである。従来の7 ~ 15 kW 容量機と同様の設計思想のもとで開発しているが、主回路方式には、出力電圧が高くとれるフルブリッジ方式を採用している。

3.4 IH インバータの今後

高出力汎用 IH インバータは、熱効率、加熱速度、安全

図3 電磁調理器 (厨房への応用例)



(火を使用しない) 面で多くの利点をもっている。今後もさらにいろいろな分野で、応用・用途が広がり、IH インバータへの要求も多様化するものと考えられる。これらに対応する高機能、低価格、小形、高信頼性のインバータが必要とされ、また、加熱コイルやマッチングトランスを含む、システム最適化手法が望まれている。

4 MOSFET インバータ

4.1 標準系列と仕様

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) インバータは、従来の真空管式電源の置換えが可能で、高周波・高効率電源である。表4に MOSFET インバータの標準系列と仕様を示す。

4.2 特長

(1) 小形・高効率

従来は、周波数100 ~ 500 kHz の電源には真空管式が採用されてきたが、大容量 MOSFET 素子の開発により半導体式電源の製作が可能となり、真空管式電源との置換えが可能となった。その結果、真空管方式に比べて体積が約1/4の省スペースを達成し、変換効率も真空管式が約75%であるのに対し、本電源は96% (定格時) と高効率であり、省エネルギー化、生産性向上が図られている。

(2) 長寿命

真空管の寿命が1万時間程度であるのに対し、MOSFET の寿命は10万時間程度と長寿命である。

(3) 高入力力率

直流中間部の平滑コンデンサ容量を大幅に低減し、入力力率はほぼ1.0で良好である。

(4) 高速制御応答

MOSFET の高速動作と出力制御をインバータ側での位相制御で行うことにより、サイリスタインバータに比べ制御応答時間が1/10 (当社比) になっている。

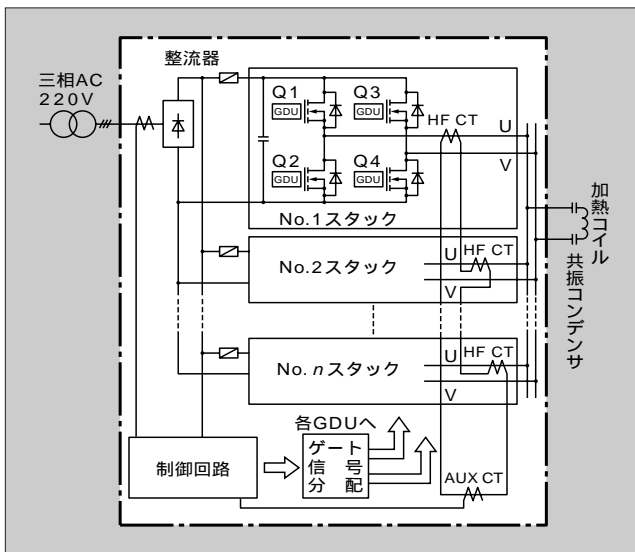
(5) 充実した保護機能

負荷回路の短絡や地絡などを瞬時に検出してゲートを遮

表4 MOSFETインバータの標準系列と仕様

項目	仕様										
交流入力	三相, 220V ± 10% (非接地電源)										
出力周波数	10 ~ 500kHz										
出力	20 kW	30 kW	50 kW	100 kW	200 kW	300 kW	400 kW	500 kW	600 kW	800 kW	1,000 kW
出力電圧	150V			300V							
出力調整範囲	5 ~ 100%										
出力制御方式	電力制御										
主回路方式	ハーフブリッジ方式			フルブリッジ方式							
冷却方式	水冷式 (純水循環方式)										
冷却水温	5 ~ 35										
種別	電圧形インバータ										

図4 MOSFETインバータの回路構成例



断するため、これらの事故から確実に素子を保護できる。

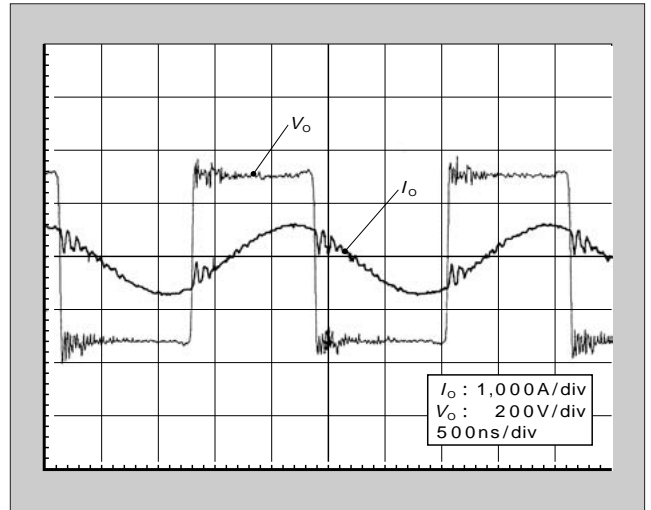
また、複数のインバータスタックの自己故障診断を自動的にを行い、不良のスタックを判別して表示する機能と電源の故障履歴を表示する機能を持たせ、故障箇所を事前に発見して被害の拡大防止を行っている。

4.3 回路構成および制御方式

(1) 回路構成

図4に回路構成例を示す。整流器は6相ダイオード整流器を使用しているが、ダイオード整流器の並列接続による12相整流方式も採用可能である。インバータ部は大電流、低インダクタンスを実現する富士電機独自の平形 MOSFET を用いている。回路は、単相フルブリッジ結線で構成した1ユニット100 kW 出力のインバータスタックを、複

図5 インバータ出力電圧・電流波形



数台並列接続して用いる。また、このほかにも小容量機用としてハーフブリッジ結線で構成した1ユニット75 kW までのインバータスタックも製品化している。

(2) 電流バランス

高周波では、並列接続されて各インバータスタックの構造的な非対称配置による電流バランスが特に問題となる。本インバータでは、各インバータスタックに組み込まれた高周波 CT の二次側を直列接続することにより、電流バランスが保たれる。この方式の採用でインバータユニットがコンパクト化されている。

(3) 制御方式

MOSFET インバータの制御は、出力電圧に対し電流が常に遅れ位相で運転される角制御方式を採用している。この方式は、入力整流器側に電圧制御機能を必要とせず、インバータの角のみで出力制御が可能のため、応答時間が従来の1/10以下と短い。この結果、負荷の急変などに対してもきわめて安定な制御が行える。図5は、角制御を行っているときのインバータ出力電圧・電流波形である。

4.4 MOSFET インバータの今後

電縫管溶接などの用途で、使いやすさやさらにコンパクトさを向上させるためには、負荷回路を含む、加熱装置全体としての総合効率向上と小形化が必要である。冷却能力を向上させた新形大容量インバータスタックを図6に示す。今後さらに大電流出力の可能なハーフブリッジなどの主回路構成、大容量平形 MOSFET などの開発を進める予定である。

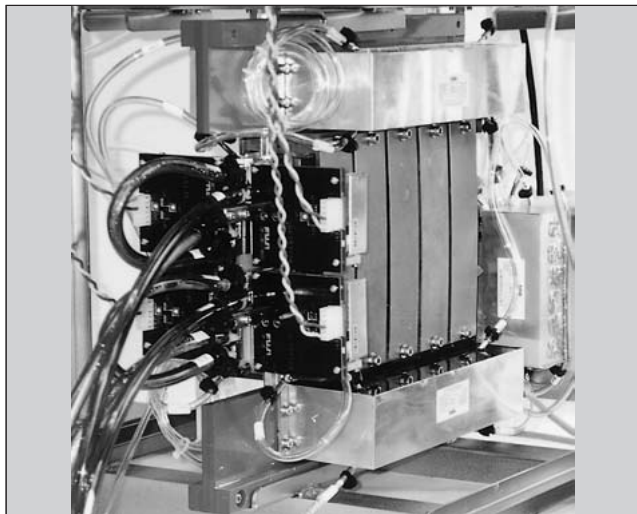
⑤ 電圧形と電流形⁽⁹⁾

1960年代にサイリスタがパワーエレクトロニクス分野で適用範囲を大幅に広げるなかで、これを用いたサイリスタインバータ技術は、電圧形、電流形ともに進歩し、それぞれ応用されてきた。現在、一般産業用では、サイリスタインバータは、デバイスの逆阻止能力を生かした電流形が主流であるが、高周波加熱分野では、今日も電圧形、電流

表5 数十kHz以上の高周波加熱電源方式の比較

インバータ方式	電圧形	電流形	
項目			
回路構成			
出力波形			
負荷共振回路	直列共振	並列共振	
素子	逆導通形素子	逆阻止形素子	
転流	オフで転流	オンで転流	
電圧	V_1 V_L , 負荷電圧大	インバータと負荷同一電圧	
電流	インバータと負荷同一電流	I_1 I_L , 負荷電流大	
特徴	制御性	インバータのみ制御	整流器とインバータ別々に制御要
	効率	優良	良
	入力高調波電流	ダイオード整流器で $\theta = 0^\circ$ のため、台形波電流でやや良	サイリスタ整流器の制御により、方形波電流
	入力力率	1.0	1.0以下, により変化
	部品数	少ない	多い
	質量	軽い	重い(平滑リアクトルあり)
素子の保護	短絡	過電流検出で保護	通常は過電流なし
	誤オフ	出力減衰, 素子破壊なし	素子過電圧で破壊
	誤オン	過電流検出により保護	出力減衰, 素子破壊なし
総合評価			

図6 新形大容量インバータスタック



形双方がシステムに応じて使われている。

1970年代から自己消弧能力のあるパワートランジスタ,

MOSFET, GTO (Gate Turn-Off thyristor), IGBTなどがインバータに応用され始めたが、これらによるインバータは主に電圧形が採用されている。これは、通常、自己消弧素子は逆阻止能力がないため電圧形インバータに適しているからである。

表5に自己消弧素子, すなわちトランジスタを応用した, サイリスタでは扱えない数十kHz以上の高周波インバータについて電圧形と電流形とを比較して示す。

電圧形と電流形とは、インバータが負荷に対して方形波状の電圧を供給するか、方形波状の電流を供給するかの違いである。負荷の共振回路には、直列共振と並列共振の違いがある。どちらも場合により整合変圧器が必要であり、一概には優劣は付けられない。

高周波用で電圧形の有利な点は、回路構成が簡素、高効率(リアクトル損失小)、入力高調波電流小、軽量(リアクトル不要)などがあげられる。これらは製品価格に反映されることになる。特にMOSFETの場合、素子内蔵ダイオードを有効に利用できることが、さらに電圧形を有利に

している。

数百 kHz に及ぶ高周波領域での制御性能と素子の保護についても、電圧形と電流形とで意見の分かれるところである。これらは、それぞれの負荷特性や運転方法などによるため、単純な比較はやはり困難であり、それぞれの負荷に合わせて選択されている。

⑥ あとがき

富士電機のサイリスタ、IGBT、MOSFET を適用した誘導加熱用高周波インバータの簡単な紹介をした。

今後さらに、需要家の要求にかなった小形、高効率、大容量で使いやすい高周波電源の製品化を進め、多様なご要望にこたえていきたいと考えている。

参考文献

(1) 藤井正昭ほか：誘導加熱用高周波インバータ，富士時報，

Vol.61，No.5，p.364-368（1988）

(2) 松永哲夫ほか：加熱用インバータ，富士時報，Vol.63，No.7，p.525-527（1990）

(3) 清光晋太郎・軽部邦彦：汎用加熱インバータ，富士時報，Vol.67，No.11，p.622-624（1994）

(4) 武藤達・松永哲夫：食品業界における「IH インバータ」の応用，富士時報，Vol.68，No.4，p.251-256（1995）

(5) 野村年弘ほか：MOSFET 式誘導加熱用インバータ，平成4年電気学会講演論文集，p.5-56-5-57（1992）

(6) 藤井正昭ほか：誘導加熱用 MOSFET 式高周波インバータ，富士時報，Vol.65，No.10，p.678-682（1992）

(7) 倉田巖ほか：MOSFET 式誘導加熱用 500 kHz インバータ，平成6年電気学会全国大会，Vol.576（1994）

(8) 倉田巖・久本正昭：誘導加熱用高周波インバータ，富士時報，Vol.68，No.4，p.234-241（1995）

(9) 粟谷宏治：誘導加熱装置と適用周波数，電熱，No.62，p.15-24（1992）

最近登録になった富士出願

〔特 許〕

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
2716051	可逆運転装置	田中 順造	2720564	超音波距離測定装置	美麗賢次郎
2716062	運動部材の原点復帰方式	久保山公道	2720565	永久電流スイッチ	時光富士雄 永友 寿美 笹川 雪夫 滝田 清
2718058	三相電圧形インバータの PWM 制御方法	柳瀬 孝雄 山添 勝 原 信			2720574
2718213	電子化パネルの設計システム	川崎紀久雄	2720587	照光押しボタンスイッチ	西尾 三男 田坂 成
2718239	固体高分子電解質型燃料電池発電装置	山本 修 大賀 俊輔	2720916	帯状材料の定張力制御方式	高橋 孝一 戸高 雄二
2718252	電源装置	鯉江 和裕	2720917	インバータの制御方式	佐久間 新
2718763	自己診断起動方式	鈴村 康成	2722415	半導体素子の製造方法	西村 武義
2718958	電解用サイリスタ整流装置	高橋 格	2722660	索引付順編成ファイルの管理方法	中村 光宏
2719036	非晶質光電変換装置およびその製造方法	吉田 隆	2722714	IC カードの読取り書込み装置	田中 敏美
2719039	CuInSe ₂ 系化合物薄膜の形成方法	大沢 通夫 井原 卓郎	2722759	回路遮断器の不足電圧引外し装置	古川 国幸 朝日 信夫 志塚 隆
2720521	固体レーザ装置	葛西 彪 新藤 義彦			
2720540	永久磁石形同期発電機の電圧調整装置	森安 正司			

亜鉛スクラップ鋼板リサイクル用新誘導溶解システム

中谷 正博(なかに たけひろ)

植村 浩(うえむら ひろし)

1 まえがき

近年の国内粗鋼生産量の停滞に対して、表面処理鋼板の生産量は図1に示すように、1980年以降の10年間でほぼ2倍に増加しており、またその大部分が亜鉛めっき鋼板の増加である。この結果、市中にも亜鉛めっき鋼板くずを主として、表面処理鋼板くずの発生が図2に示すように著しく増加しており、環境問題、省資源の観点から、このリサイクルに関心が寄せられている。

しかし、亜鉛めっき鋼板くずを従来の誘導炉で溶解すると、次のような重大な問題が発生し、リサイクル促進の阻害要因となっている。

- (1) 炉耐火物への亜鉛浸透による炉材寿命の低下
- (2) 誘導コイルへの亜鉛浸透による炉コイルの絶縁劣化および損傷
- (3) 酸化亜鉛蒸気の多量発生による溶解作業環境の汚染
- (4) 亜鉛などの不純物混入による鋳物品質の低下

さらに、鋳物の主原料である鋼板くず中に亜鉛めっき鋼板くずの混入が避けられない状況にあり、鋳物業界にとって深刻な問題となっている。これらの問題に対して、従来

では溶解前に真空下で予熱を行い、亜鉛をあらかじめ除去する方法などがあったが、省エネルギーの観点から好ましい対策とはいえなかった。

本稿にて紹介する新誘導溶解システムは、溶解原材料として60%以上の亜鉛めっき鋼板くずを、前処理することなくそのまま溶解できるとともに、鋳鉄溶解炉の主流となっている高周波誘導炉が持つ省エネルギー性を、そのまま維持しているなど、亜鉛めっき鋼板くずの溶解に対して数多くの特長を有している。

2 システム構成

このシステムは図3に示すように、特殊なつぼ形状とした誘導炉に、ガスバブリング、炉内減圧の機能を付加した構成としている。亜鉛めっき鋼板くずの溶解に対して、これらの機能が複合的に働くことで、溶湯中の亜鉛が効率的に除去される。

図1 表面処理鋼板の生産量推移

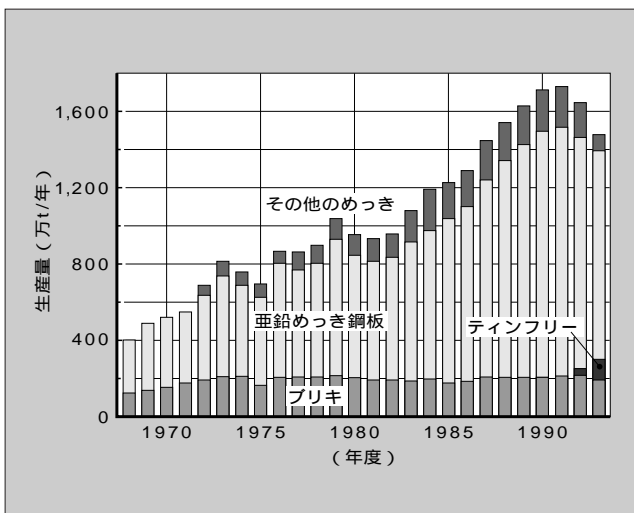
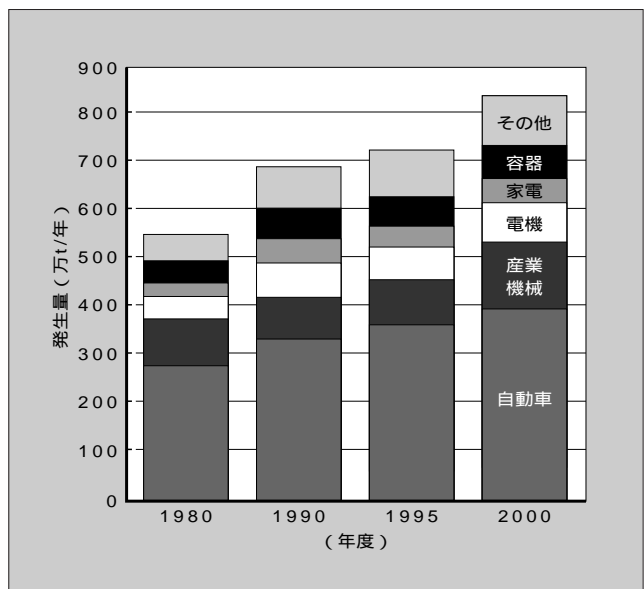


図2 市中表面処理鋼板くずの発生量推移推定



中谷 正博

誘導溶解炉および誘導加熱装置の設計業務に従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部設計グループリーダー。



植村 浩

誘導加熱製品のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部技術グループ主任。

図3 システム構成

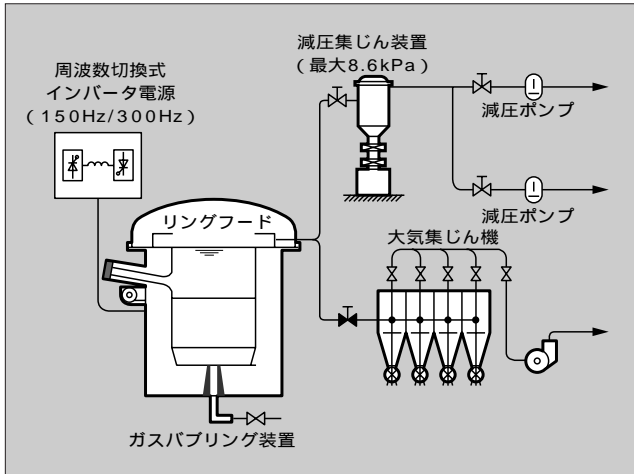


図4 炉断面図

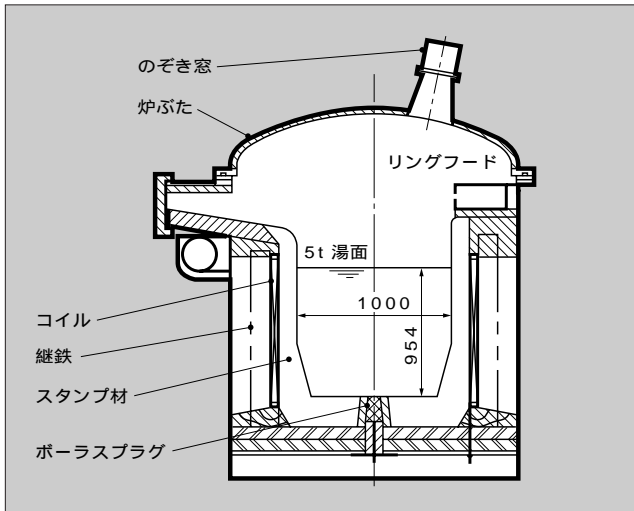
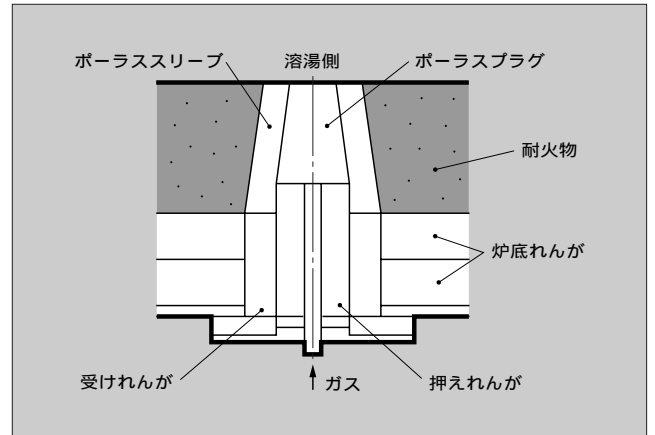


図5 誘導炉本体の外観



N99-2318-1

図6 ガスバブリングの構成



③ 各装置の概要と特徴

3.1 誘導炉本体

誘導炉本体は、図4の炉断面図、図5の外観に示すように、従来炉に対してつぼ径が大きく、湯面高さが低いへん平なるつぼ形状となっている。このへん平形状により、亜鉛めっき鋼板くずの溶解に対して優れた特徴を持つことになるが、その詳細については図章に述べる。

溶解時に多量発生するダストの集じんおよび炉内減圧時の排気は、リングフードから吸引する構成とし、材料投入などの炉ぶたを開放する作業においても、ダストの集じんが行えるようにして、作業環境の汚染を防止している。

3.2 ガスバブリング装置

ガスバブリング装置は、図6に示すようにポラスプラグ、ポラススリーブ、押えれんがをるつぼ底部に組み込んだ構成としている。ポラスプラグは、耐溶損性と低膨張特性を持たせるため特別な材質を使用して、これを高温焼成している。また、図7に示すようにすべてプレキャ

スト品を採用しているので、交換作業などを容易に行うことができる。

このプラグの耐久性として、実操業中の6t高周波誘導炉に組み込んで試験を行った結果、約6週間以上経過した後でも、継続使用が可能な状態であった。この結果から、実操業で使用するレベルの耐久性は十分にあると考える。

3.3 減圧集じん装置

減圧集じん装置は、乾式バグフィルタ式集じん機本体とルーツ式ドライ真空ポンプ、ダスト減容装置、減圧炉ぶたおよび集じん機制御盤で構成されており、その外観を図8に示す。

集じん機本体内の汜布に捕捉されたダストを、減容装置にて約50%以下に減容と同時に真空パックするので、捕集したダストが再び大気中へ飛散することなく、保存・運搬を容易に行うことができる。

図7 ガスバブリング装置の外観



図8 減圧集じん装置の外観

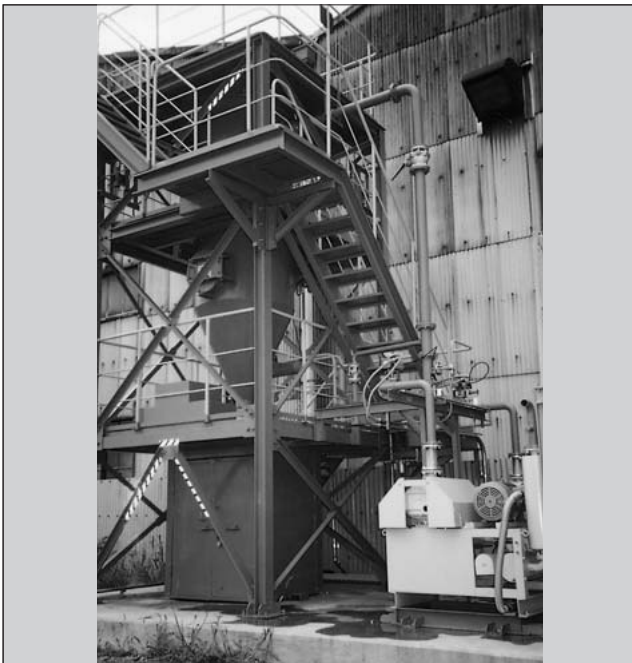


表1 共通試験条件

項目	条件
誘導炉の仕様	炉容量：5t，電力：1,200kW，周波数：300Hz， るつぼディメンジョン：溶湯高さ/るつぼ内径 = 0.95
溶解原材料の配合比率	亜鉛めっき鋼板くず：60%，銑鉄：26%， 鋼板くず：14%（亜鉛付着量：平均0.41wt%） 原材料中の亜鉛含有量：約0.25%
加炭，加ケイ材	ピッチコークスおよびFe-75%Si
溶湯種類	普通鑄鉄（FC250相当）
溶湯成分	CE値：3.8～4.1%，C値：3.2～3.5%， Si値：1.8～2.2%
保温温度	1,773±20K（1,500±20）
測定項目	溶湯保温状態にて各種溶湯操作を60分間行い，溶湯中の亜鉛，鉛およびアルミニウム含有量の経時変化を測定

表2 各種脱亜鉛機能による溶湯操作項目

溶湯操作項目	条件
大気通常	溶湯操作なし
溶湯かくはん	周波数150Hzに切換（大気下）
ガスバブリング	アルゴンガス60NL/min（大気下）
炉内減圧	炉内減圧16.6kPa { 125Torr } 減圧保温
総合組合せ	周波数150Hzに切換 アルゴンガス30NL/min 8.67kPa { 65Torr } 炉内減圧 の組合せ

4 評価試験

4.1 試験条件

このシステムの性能を確認するために行った評価試験の共通条件を表1に，各種の脱亜鉛機能別による溶湯操作項目を表2に示す（本稿では mass %を単に%と示す）。また，亜鉛だけでなく，鉛，アルミニウムの溶湯中からの除去効果も併せて確認した。

実験機では周波数を 300 Hz と 150 Hz の切換式として，溶湯保温時の低電力状態でも，周波数を 150 Hz に切り換えることで適度な溶湯かくはん運動が得られる構成とした。

4.2 試験結果および考察

4.2.1 各種溶湯操作方法の違いによる亜鉛除去効果の相違
各種溶湯操作方法の違いによる溶湯中の亜鉛含有量の経

時的変化を図9に，亜鉛の減少量について比較したものを表3に示す。溶湯操作を行うと，大気通常時（本稿では溶湯操作なしの保温を大気通常と称す）と溶湯かくはん時では直線的に亜鉛が減少するが，その他の操作では開始とともに急激に亜鉛を減少させることができる。図9から，溶湯操作前にすでに亜鉛含有量は 0.06 ~ 0.08 % と溶解，昇温の過程において約75%の亜鉛が減少している。

通常の溶解炉で亜鉛めっき鋼板くずを60%以上配合した材料を溶解して，溶湯中の亜鉛を 0.1 % 以下に除去することは難しいといわれていることから，へん平るつぼによる効果は高いといえる。

今回の溶湯操作による亜鉛の除去は，以下のメカニズムによるものと考える。

(1) 大気通常

大気圧下での純亜鉛の沸騰温度は図10⁽²⁾に示すように約 1,200 K であることから，今回の保温温度で亜鉛は沸騰し蒸発する。この蒸発により，溶湯中の亜鉛が酸化亜鉛系ダストとして大気中へ飛散したことによる。

(2) 溶湯かくはん

大気通常と比べて溶湯と大気との接触率が増加したことで，亜鉛の蒸発量が多くなったことによる。

(3) ガスバブリング

ガスバブリングにより溶湯中に気泡が発生する。亜鉛が沸騰することにより蒸発して，この気泡と一緒に除去されたことによる。

(4) 炉内減圧

図9 各種溶湯操作方法の違いによる亜鉛含有量の変化

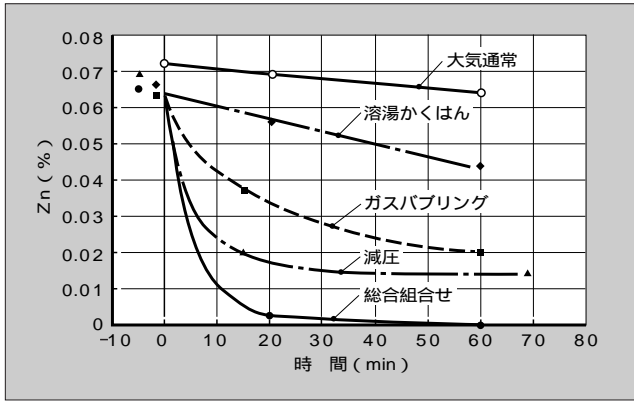
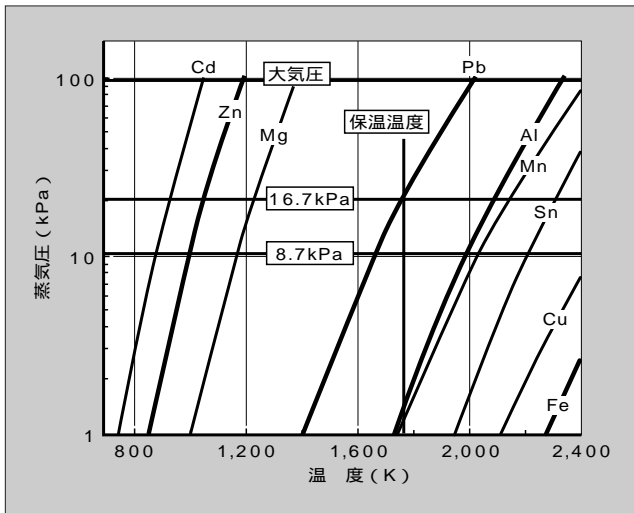


表3 各種溶湯操作方法の違いによる溶湯中亜鉛の減少量比較

溶湯操作項目	操作開始時Zn0 (%)	30分後Zn30 (%)	60分後Zn60 (%)	30分の減少率 (Zn0 - Zn30) / Zn0 × 100 (%)	60分の減少率 (Zn0 - Zn60) / Zn0 × 100 (%)
大気通常	0.072	0.067	0.064	7	11
溶湯かくはん	0.065	0.054	0.045	17	31
ガスバブリング	0.062	0.030	0.023	52	63
炉内減圧	0.067	0.017	0.015	75	78
総合組合せ	0.064	0.002	0.000	97	100

図10 各種純金属の蒸気圧



純亜鉛の沸騰温度は、減圧すると図10に示すように低下する。この沸騰温度の低下により、亜鉛の蒸発が促進されたことによる。

(5) 総合組合せ

上記1)~(4)の複合効果による。

鋳物の品質に与える亜鉛の影響としては、亜鉛含有量が0.02%を超えるとピンホールの発生が多くなるとの報告がある⁽³⁾。

しかし、溶湯かくはんを除いた溶湯操作を行えば、きわめて短時間のうちに、ピンホールが発生しないレベルにま

図11 各種溶湯操作方法の違いによる鉛含有量の変化

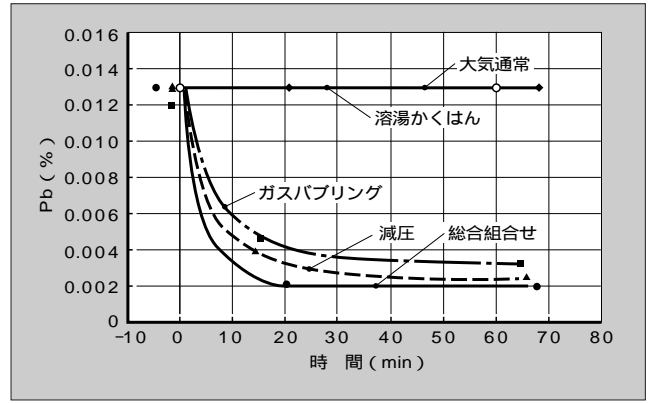


表4 各種溶湯操作方法の違いによる溶湯中鉛の減少量比較

溶湯操作項目	操作開始時Pb0 (%)	30分後Pb30 (%)	60分後Pb60 (%)	30分の減少率 (Pb0 - Pb30) / Pb0 × 100 (%)	60分の減少率 (Pb0 - Pb60) / Pb0 × 100 (%)
溶湯かくはん	0.013	0.013	0.013	0	0
ガスバブリング	0.012	0.004	0.004	64	64
炉内減圧	0.013	0.003	0.003	76	76
総合組合せ	0.013	0.002	0.002	85	85

で、溶湯中の亜鉛を除去することができる。

耐火物への影響としては、溶解後期の最終材料投入後の段階から減圧を行うと亜鉛の沸騰温度が低下して、溶湯温度の低い状態から亜鉛が沸騰により蒸発して、急激に除去することができる。このことから、従来の誘導炉と比べて、炉耐火物中への亜鉛の浸透度合いを格段に減少させることができると考える。

4.2.2 各種溶湯操作方法の違いによる鉛除去効果の相違

各種溶湯操作方法の違いによる溶湯中の鉛含有量の経時的变化を図11に、鉛の減少量についての比較を表4に示す。図11から、大気通常と溶湯かくはんでは鉛は減少しないが、ガスバブリング、炉内減圧、総合組合せを行うと亜鉛と同様に、溶湯操作開始とともに急速に減少している。

各種溶湯操作による鉛除去のメカニズムは、以下によるものと考えられる。

(1) 大気通常・溶湯かくはん

大気圧下での純鉛の沸騰温度は図10に示すように約2,000 Kと高い。このため、鉛は今回の実験における保温温度では、沸騰により蒸発しない。

(2) ガスバブリング

製鋼にて用いるバブリングによる精錬効果と同じように、気液界面に鉛が凝縮し、バブリングガスとともに大気へ除去されたことによる。

(3) 炉内減圧

純鉛の沸騰温度は図10に示すように、亜鉛と同じように減圧すると低下し、16.7 kPaでは約1,750 Kとなる。よって、今回の保温温度で溶湯中の鉛が沸騰により蒸発したことに

よる。

(4) 総合組合せ

炉内減圧値を 8.7 kPa としたことで純鉛の沸騰温度が 1,680 K とさらに低下して、鉛の蒸発が促進されたことと、ガスバブリングとの複合効果による。

鋳物の品質に与える鉛の影響としては、大形鋳物において鉛を 0.003 % 以上含むと異常黒鉛が生成されるとの報告がある⁽⁴⁾。

しかし、炉内減圧、総合組合せおよびガス量を増加させてガスバブリングを行えば、短時間のうちに異常黒鉛が生成されないレベルにまで、溶湯中の鉛を除去することができる。

4.2.3 各種溶湯操作方法の違いによるアルミニウム除去効果の相違

図12に各種溶湯操作方法の違いによる溶湯中のアルミニウム含有量の経時変化を示す。

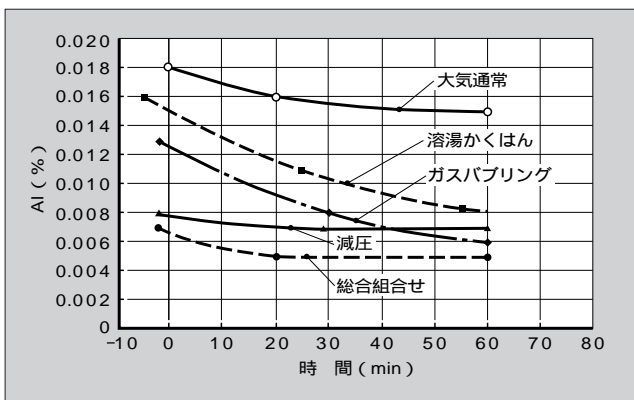
今回の試験では、溶解原材料中のアルミニウム含有量が規定できなかったため、溶湯操作開始前の含有量にばらつきが発生している。しかし、溶湯操作後の変化として、大気通常、溶湯かくはん、ガスバブリングはほぼ直線的に減少し、炉内減圧と総合組合せでは、溶湯操作開始の初期段階で多少は減少するが、その後はほとんど減少しない。

各種溶湯操作によるアルミニウム除去のメカニズムとして、純アルミニウムの沸騰温度は 8.7 kPa に減圧しても図10に示すように約 2,000 K と非常に高いため、今回の保温温度では沸騰による蒸発が起こらない。

また、大気中での溶湯かくはんおよびガスバブリング操作の効果が高いことから、アルミニウムは蒸発ではなく、大気との接触による酸化で除去されたものと考えられる。

鋳物の品質に与えるアルミニウムの影響としては、誘導炉で溶解した溶湯で鋳造を行った場合、材料中に約 3 ppm の水素が含まれ、この状態でアルミニウムを約 1 ppm 含むとピンホールの発生が始まるとの報告がある⁽⁵⁾。しかし、溶湯かくはん、ガスバブリングを行えば、溶湯中のアルミニウムを、ピンホールが発生しないレベルにまで除去することができる。

図 12 各種溶湯操作方法の違いによるアルミニウム含有量の変化



⑤ システムの特長

この誘導溶解システムの特長を機能別にまとめると、以下のようになる。

- (1) へん平形つぼによる特長
 - (a) 溶湯上部の表面積が大きく、溶湯流速が速くなるので亜鉛除去効果が高い。
 - (b) 間口が広いので大形の溶解原材料をそのまま投入できるため、作業効率が向上するとともに棚つり現象が起こりにくいので安全である。
 - (c) 溶湯静圧が低いので、炉耐火物への亜鉛の浸透が抑制できる。
- (2) 溶湯操作による特長
 - (a) 大きな亜鉛除去効果により、溶湯内の亜鉛を短時間のうちに激減させることができるので、炉耐火物への亜鉛の浸透が抑制される。
 - (b) 従来の誘導炉ではできなかった、鉛、アルミニウムの除去が可能である。
 - (c) 溶湯操作によるチル深さの変化に大きな差異がないことから、溶湯性状が極端に変化することはない。
- (3) 減圧集じん機による環境面の特長
 - (a) 高純度の酸化亜鉛系ダストが回収できると同時に、約50%まで減容して真空パックできるので、廃棄物としての取扱いが容易で、大気中への再飛散が防止できる。
 - (b) 実験機による測定では、炉運転中の粉じん量は日本衛生産業学会による許容濃度を下回り、騒音値は労働安全規則による第一管理区分値以下であることから、溶解作業現場の環境改善に貢献できる。
- (4) 経済面の特長
 - (a) 亜鉛めっき鋼板くずの多量溶解を可能としたことにより、溶解原材料費の低減ができる。
 - (b) 今後ますます増加が予想される表面処理鋼板くずのスクラップリサイクルの促進を通して、省資源・省エネルギーに貢献できる。

表 5 機能組合せ例とその効果

付帯装置・機能		基本タイプ (Basic)	Eタイプ (Economy)	Mタイプ (Medium)	Sタイプ (Special)	
炉容量		2 ~ 8 t				
付帯装置	偏平るつぼ					
	ガスバブリング装置	-		-		
	減圧集じん装置	-	-			
効果	亜鉛除去	目標残存量	0.06%程度	0.02%以下		
		所要溶湯保温操作時間	60分	35分程度	15分以内	10分以内
	鉛除去	目標残存量	-	0.003%以下		
		所要溶湯保温操作時間	-	40分程度	25分程度	10分程度

⑥ システムの機能組合せ

これまでこの誘導溶解システムの概要，評価試験の結果と考察および特長について紹介したが，評価試験にて得られた結果をもとに，亜鉛および鉛の除去を含めた機能組合せ例とその効果を表5に示す。

⑦ あとがき

この新誘導溶解システムは，中小企業事業団の委託研究により開発を行い，広範な視点での省エネルギー性，市中の表面処理鋼板くずのリサイクル促進，溶解コストの低減，溶解作業環境改善のほかに，これまでの誘導炉にはなかつ

た溶湯精錬の提供を可能としたものである。

このような優れた特徴を数多く有するこの誘導溶解システムが今後鉄鋼物産業界に広く普及し，同業界の発展に貢献できれば幸いである。

参考文献

- (1) 小山政夫：日本鉄鋼協会第28回白石記念講座（1995）
- (2) 日本科学会編：科学便覧——基礎編，p.111（1984）
- (3) 中江秀雄：最近の鉄鋼溶解法の動向と材質，鑄鍛造と熱処理，p.4-5（1989）
- (4) 菅野利猛・中田毅：ねずみ鉄の組織と機械的性質に及ぼす鉛の影響，鑄物，Vol.67，No.1，p.47，（1995）
- (5) 岩堀弘昭ほか：水素に起因する鉄鋼物のピンホール欠陥，第128回鑄造工学会全国公演大会テキスト，p.103（1996）

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
インバータ制御5章技術動向	富士電機総合研究所	藤田 光悦	電設工業，44，2（1998） 日本電設工業協会
誘導発電機用単独運転検出装置の開発	富士電機総合研究所 " " "	中沢 親志 深井 裕幸 千原 勲	コージェネレーション春/夏号 13，1（1998） 日本コージェネレーションセンター
熱電発電システムへの応用	富士電機総合研究所	東 泉	セラミックス，33，3（1998） 日本セラミックス協会
新しいPVの時代を開くフレキシブル太陽電池	富士電機総合研究所	市川 幸美	通産新報（1998-3-25） 通産新報社
リアプノフ関数利用による系統連系，自家発電システムの過渡安定度評価	社会システム事業部	比良 允幸	電気設備学会誌，18，4（1998） 電気設備学会
最近の太陽電池	富士電機総合研究所	市川 幸美	O Plus E，No.221（1998） 新技術コミュニケーションズ
Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter Using Two Internal Voltage-Points of DC Source	富士電機総合研究所	鳥羽 章夫	IEEE Transaction on IE，45，2（1998） IEEE
インバータサージの挙動解析	三重工場 富士電機総合研究所 " "	藤井 秀樹 芳賀 弘二 奥山 吉彦	電気学会誘電・絶縁材料研究会（1998-2）
ホログラムによるパッシブ形光スターカプラのポート間挿入損失の均等化	富士電機総合研究所 " " " " " " " "	小林 毅 松添 雄二 齋藤 哲哉 田口 正樹 辻 伸彦 佐野 安一	第45回応用物理学関係連合講演会（1998-3）
熱電変換素子の発電システムへの応用	富士電機総合研究所	東 泉	第45回応用物理学関係連合講演会（1998-3）
厚膜SOI上の高耐圧横型MOS点弧サイリスタ	松 本 工 場 " " "	島袋 浩 澄田 仁志 平林 温夫	第12回回路実装学術講演大会（1998-3）
高耐圧SOI横型IGBTのスイッチング時に発生する変位電流の評価	松 本 工 場 " "	澄田 仁志 平林 温夫	第7回日本オゾン協会年次研究講演会（1998-3）
Sn-Ag-X系はんだ接合部の考察	生産システム企画室 " " "	池見 和尚 渡邊 裕彦 松村 慶一	第12回回路実装学術講演大会（1998-3）
パースト波と方形波のイミュニティ耐量に及ぼす影響の一考察	生産システム企画室	渡辺 俊英	第7回日本オゾン協会年次研究講演会（1998-3）
下方注入式反応槽の水理特性及びガスホールドアップに関する検討	富士電機総合研究所 " " "	加藤 康弘 岩本 卓治 森岡 崇行	第7回日本オゾン協会年次研究講演会（1998-3）

省エネルギー形誘導溶解炉

加納 利行(かのう としゆき)

古城 靖彦(こじょう やすひこ)

① まえがき

誘導加熱の原理そのものである電磁誘導現象は、1831年にファラデーが発見して以来、およそ1世紀半を経ている。1970年代の高度成長期には、自動車、造船、鋳造などの各産業界の生産規模拡大に伴い、低周波誘導炉が多数設置されるようになった。さらに、オイルショックを契機にして、省エネルギー、省資源、あるいは合理化が進められるなかで、それまでの低周波誘導炉に代わって、高周波誘導炉が主流となり今日に至っている。

一方、地球の温暖化防止が叫ばれるなかCO₂排出抑制などの環境問題を考えるとき、キューボラや化石燃料を直接使用する他の溶解設備に代わって、クリーンエネルギーである電気を利用する誘導加熱が、さらに今後の社会ニーズにこたえる技術となるであろうことが考えられる。鋳造をはじめとする素形材分野はエネルギー多消費産業の代表である。誘導炉を使用する鋳造工場では、電力エネルギーの大半が溶解に消費されているため、鋳造工場の省エネルギーは溶解炉の省エネルギー性に左右されるといっても過言ではない。

富士電機では、1964年に誘導炉の第1号機を製作・納入して以来、技術の進歩、エレクトロニクスの発展に伴い、数々の記録品を生み出しながら、世の中の発展に貢献してきている。ちなみに、現在まで約1,700台の誘導炉の納入実績を誇っている。

本稿では、環境およびエネルギー面から見た高周波誘導炉の利点、ならびに富士電機の高周波誘導炉の最大の特長である高効率、省エネルギー性を中心に最近の誘導炉について述べる。

② 高周波誘導炉の特長

2.1 環境面での比較

鋳造工場における鋳鉄溶解設備の代表例である誘導炉とキューボラについての比較を行う。

鋳造工場におけるじんあいの発生量を表1⁽¹⁾に示す。コー

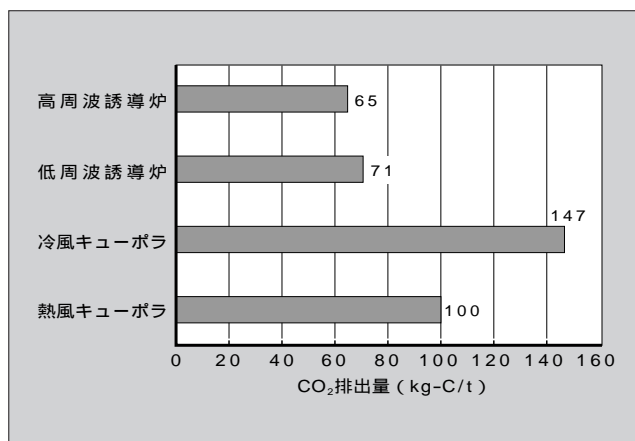
クスを燃料とするキューボラとは違い、誘導炉による溶解の場合は、使用される材料などへの付着物から発生するじんあいを除きエネルギー消費に伴うばいじんの発生はないため、キューボラに比較して非常に少ないじんあい発生量となっていることが理解できる。

一方、CO₂排出量に着目した場合でも、誘導炉はキューボラの147kg-C/tに対して、約1/2であることが分かる。図1は1tの鋳鉄を溶解する際に必要なエネルギーを算出して、炭素量に換算したものである。誘導炉の場合の排出量は、電気エネルギーから0.119kg-C/kWhとして算出しており、この発生分は発電所に帰属されるものである。キューボラからの発生量は、コークスが有する熱量から換算したものであり、これはすべて使用者側による発生分となる。したがって、CO₂排出量を工場単位で比較した場合には、誘導炉はキューボラに比して1/10以下になるといっても過言ではない。

表1 鋳鉄1tを製造する際の鋳造工場のじんあい発生量

溶解工程		その他の工程	
誘導炉	キューボラ	造型工程	はつり工程
0.06~1.0kg	8.0~15.0kg	0.5~6.0kg	0.5~1.0kg

図1 CO₂排出量の比較



加納 利行

誘導炉および誘導加熱装置のエンジニアリング業務、電気設計などに従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部技術グループ主査。



古城 靖彦

誘導炉のエンジニアリング業務、電気設計などに従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部技術グループ主任。

図2 消費エネルギーの比較

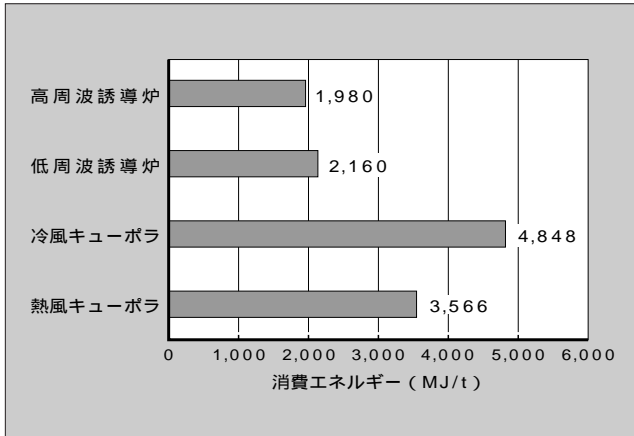


表2 運転周波数と溶解材料径の関係

周波数 (Hz)	最小材料径 (mm)	備考
50/60	240	スターティングブロックを使用すること、または残湯操業とすることが不可欠である。
150~240	140	スターティングブロックなしでは、冷材溶解に時間を要することがある。
300~500	76	小さなスクラップ形状でも、冷材溶解は容易に行える。
1,000~	31	冷材溶解は有利であるが、溶湯かくはん力が小さくなる。設備費用が割高となる。

2.2 消費エネルギー面での比較

図2に電気エネルギーおよびコークスの発熱量から算出したエネルギー消費量(3)の一例を示す。高周波誘導炉は他の溶解設備に比較して、省エネルギーに適していることが分かる。これは、炉容量に対して投入できる電力が大きくとれ、迅速な溶解が可能なることにある。言い換えれば、同一の溶解量に対して炉体からの放熱損失が小さくなることを意味するもので、周波数変換効率を加味しても、省エネルギーに効果があることを示している。

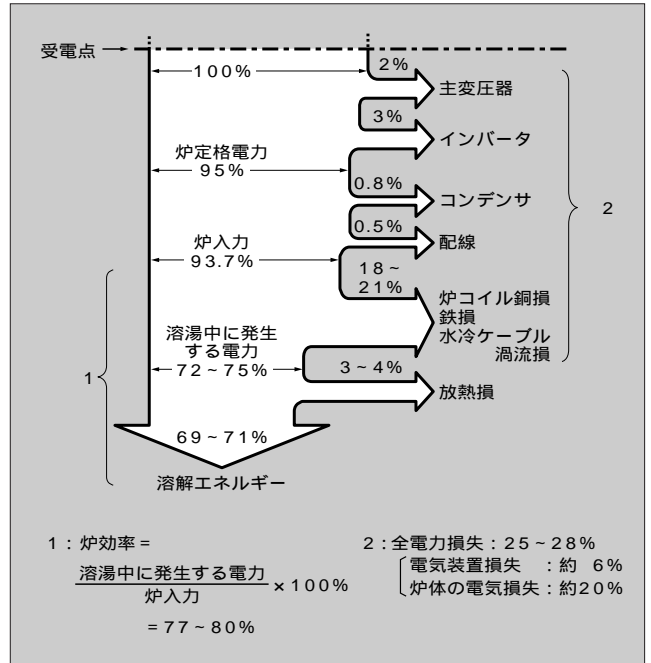
その主な理由は次のとおりである。

- (1) 炉体からの放熱損失が低減される。
- (2) ライニング昇温エネルギーが減少する。
- (3) 全量出湯溶解が可能であり、スターティングブロックが不要となる。

これらの効果を発揮するためには、運転周波数の選定が重要となる。周波数の決定には、溶解材料の大きさ、炉の大きさ、溶湯かくはん力、などが要素となるが、冷材時に効率よく電力吸収ができることが、省エネルギーのポイントとなる。富士電機ではこれらの点を考慮し、標準的な鑄鉄溶解における誘導炉の運転周波数を 300 ~ 500 Hz に設定している(表2参照)。

なお、高周波誘導炉が省エネルギー税制優遇対象機器としての適用を受ける場合は、運転周波数が 300 Hz 以上であることが、一つの条件となっていることも述べておく。

図3 高周波誘導炉のエネルギー収支



③ 高周波誘導炉の省エネルギー設計

誘導炉を溶解炉として使用する鑄造工場では、電力エネルギーの大半が溶解に消費されているため、溶解炉の省エネルギー性が重要なポイントとなる。富士電機では、高効率、省エネルギー性の向上のため、種々の特長を盛り込んだ誘導炉の開発、設計を行っているので、その一例を紹介する。

3.1 炉体構造

ここで重要なことは、「炉本体の電気効率をいかに向上させるか」ということである。図3は一般的な高周波誘導炉の溶解中における電力エネルギー収支である。溶湯中に発生する電力は72~75%であり、電源変圧器から炉体を含めた電力損失は25~28%である。このうち電源変圧器、インバータ、コンデンサなどのいわゆる電気装置での損失は6%程度であり、約20%が炉体の電気損失となっている。一般的に炉体の効率は炉入力に対する溶湯中に発生する電力の比率で表されるものであり、いかに炉体の構造が省エネルギー性のポイントになるかが分かる。

富士電機では、電磁界シミュレーションなどによる最適形状設計により、さらなる省エネルギーを追求している。

(1) コイル形状の最適設計

コイル導体形状は、一般的に丸形あるいは角形のもの採用されているが、富士電機の場合は異形銅管を採用している。この理由は、高周波・大電流の表皮効果を考えると、通電断面積が大きくとれ、その結果、効率が向上することによる。また、断面係数が大きくとれるので、コイル変形に対しても頑丈で有効な形状である。

(2) コイル配置の最適設計

図4 炉体コイル配置別発生損失の比較

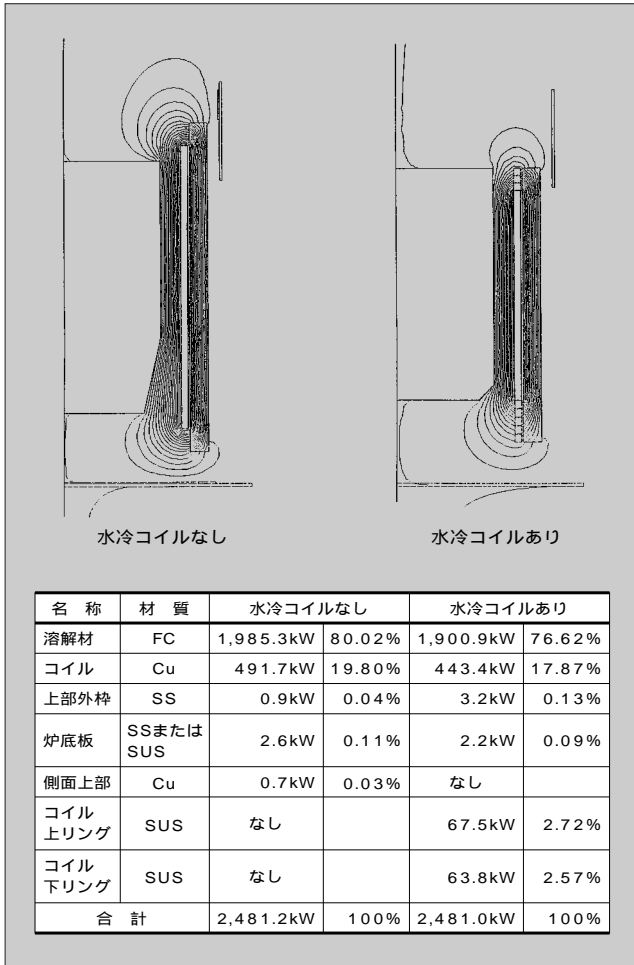
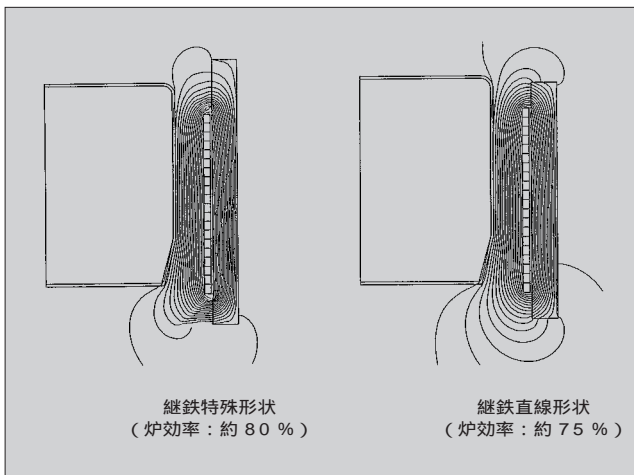


図5 炉体継鉄形状の比較

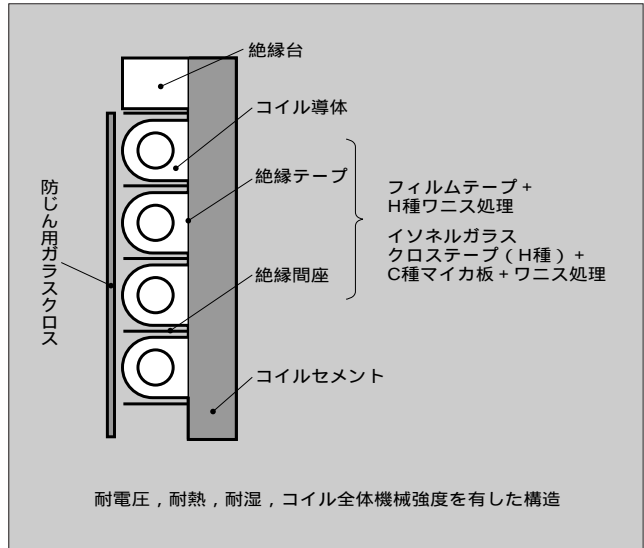


通電コイルの上方あるいは下方に冷却専用の水冷コイルを配置した場合には、磁束の通過によるエディーロスが発生することで効率は低下につながる。ただし、耐火物の寿命安定のためには、冷却効果が重要な要素となる。

富士電機の場合は、コイルの全高さを対向する溶湯高さより高くすることで、耐火物への冷却効果を発揮しながら、3%程度の効率向上を達成している(図4参照)。

(3) 継鉄構造の最適設計

図6 富士電機の炉コイル構造



継鉄をもたない高周波誘導炉では、漏れ磁束が避けられないため損失が大きく、周辺構造物の加熱が懸念されることになる。さらに、継鉄の有無だけでなくその配置と構造によっても効率が大きく左右されるので特筆しておく。図5にその一例を示す。

(4) 高電圧化

高周波・大電流の供給を考えると、炉コイルだけでなく配線損失も省エネルギー性のポイントとなる。高電圧化の妨げとなる誘導炉固有のじんあい、熱、湿度に対して十分な強度を有するテープ絶縁を採用することで、MW級の大容量機では3,000Vまでの高電圧化を実施し、 I^2R 損失の低減に配慮している(図6参照)。

3.2 電源構成

半導体デバイスを用いた高周波インバータは、主回路方式によって幾つかに分類されるが、富士電機では3kHz以下の低い周波数を使用する溶解炉に対しては、サイリスタによる電流形インバータを採用している。

この方式は、負荷回路の特性周波数に同期して動作する自制式インバータであり、溶解炉のように材料の形状や温度の変化による負荷インピーダンスの大幅な変動に対して安定した動作が可能である。

一方、高調波発生量について考える場合、コンデンサ平滑方式の電圧形サイリスタインバータに対し、リアクトル平滑方式の電流形サイリスタインバータ(6, 12, 24パルス変換装置)のほうが、高調波量が少ない点に注目しておきたい。MW級の大容量電源では、高調波対策設備まで含めた検討が重要となる(表3参照)。

電源側における省エネルギー対策は以下のとおりである。

(1) 大容量素子の採用

高電圧・大容量の高周波サイリスタの適用による回路構成の改善により、インバータ効率の向上と保守の簡素化を図っている。図7にその一例を示す。この結果、単一電源で6,000kW/3,000Vの出力が対応可能であり、並列接続

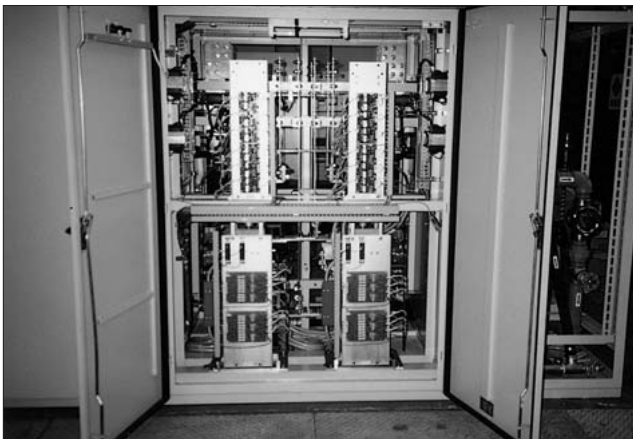
表3 電流回路別高調波発生量

(単位：%)

回数		5	7	11	13	17	19	23	25
三相ブリッジ	6パルス変換装置	17.5	11.0	4.5	3.0	1.5	1.25	0.75	0.75
	12パルス変換装置	2.0	1.5	4.5	3.0	0.2	0.15	0.75	0.75
	24パルス変換装置	2.0	1.5	1.0	0.75	0.2	0.15	0.75	0.75
三相ブリッジ(コンデンサ平滑)	リアクトルなし	65	41	8.5	7.7	4.3	3.1	2.6	1.8
	リアクトルあり(交流側)	38	14.5	7.4	3.4	3.2	1.9	1.7	1.3
	リアクトルあり(直流側)	30	13	8.4	5.0	4.7	3.2	3.0	2.2
	リアクトルあり(交・直流側)	28	9.1	7.2	4.1	3.2	2.4	1.6	1.4

三相ブリッジ..... 交流側リアクトル：3%
 (コンデンサ平滑) 直流側リアクトル：蓄積エネルギーが0.08～0.15ms相当
 (100%負荷換算)
 平滑コンデンサ：蓄積エネルギーが15～30ms相当
 (100%負荷換算)
 負荷：100%

図7 富士電機の大容量インバータ盤(4,000kW)



運転をすることで10 MW 級の高周波電源の実現も可能となる。

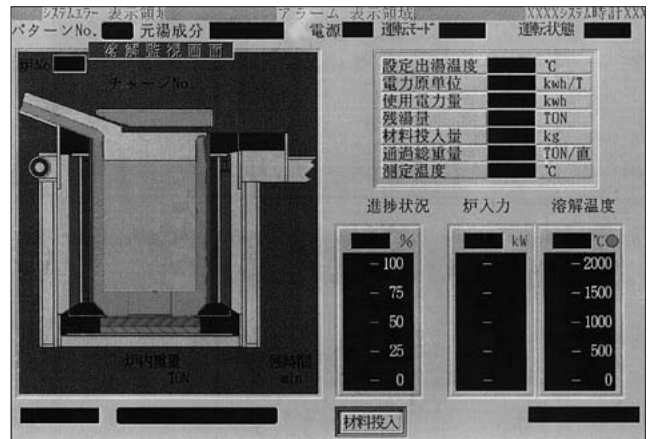
(2) マッチングトランスレスの採用

高電圧化された炉コイルとマッチングトランスがなくとも、整合できる高電圧出力のインバータを採用し、マッチングトランスを有する電源に比較し、1%以上の省エネルギー効果が期待できる。

(3) 出力制御機能

電流制限付きの出力電圧制御を標準としているが、定電力制御の対応も可能である。また、自動インピーダンスマッチング機能も組み込み可能となっている。この機能を付加した場合には、炉内のインピーダンスとインバータの運転状態から最適条件を演算し、自動的に負荷整合を調整することができる。これによれば、溶解初期から溶解完了まで、ほぼ100%の電力を投入することができる。したがって、

図8 監視システム制御画面



同一電力の装置に比較して、溶解時間が短縮されることで省エネルギーに寄与することになる。

4 インテリジェント化への対応

高周波誘導炉は、短時間での溶解が可能で省エネルギーに寄与できる設備であるが、反面、溶け落ち後の溶湯昇温時間も短く、一般的な高周波誘導炉では2～4分で約100の昇温となる。すなわち、ちょっとした测温ミスや運転ミスが過昇温を招くことになり、エネルギーを無駄に使用するだけでなく、溶湯が過昇温となると耐火物を急速に溶損させ、やがては湯漏れという危険な状況を招くことがある。

一方、過昇温した溶湯を逆に降温させることが難しく、1.5～2/minでしか温度降下しないため、無駄な時間を要したり、再度の成分調整作業が必要になってくる。

エネルギー的には、100の昇温に要する電力量は溶湯1tあたり約35kWhに相当する。そのため厳密な溶湯温度管理をすることで3%程度の省エネルギー効果が期待できるとともに、耐火物の寿命安定に寄与できるものである。

このため、誘導炉においても監視制御システムが必要不可欠なものになりつつある。

さらに、素材産業に対する若手就業者の不足が叫ばれて久しいが、自動化の遅れている溶解作業現場を魅力ある環境に変えるとともに、だれでも簡単に操作できることを目標にインテリジェント化に取り組んでいる。

図8にその機能を有する制御画面の一部を示す。これらは炉制御盤面に表示部が埋め込まれ、従来のメータ類の表示に比較し、格段に向上した情報内容を一目で得ることが可能である。主な機能は次のとおりである。

- (1) 溶解運転制御および運転監視
- (2) 自動シタおよび自動スタート機能
- (3) 運転履歴表示
- (4) 故障表示ガイダンス

さらに、機能向上を図った上位機種としてパーソナルコンピュータを使用した「誘導炉操業監視システム」も備えている。このクラスのシステムは、誘導炉の情報以外にも、

関連装置（材料供給装置，成分分析装置など）とのインタフェースも可能であり，工場全体の生産管理システムとのリンクも可能である。

5 あとがき

昨今，地球規模の環境保全が叫ばれているなか，工業炉に携わる者として，環境および省エネルギーの面から高周波誘導炉の特長について述べた。誘導炉は電気を利用するクリーン加熱であり，社会的課題にも十分貢献できる技術と考えている。また，高周波誘導炉は関連する技術（パワーエレクトロニクス，制御，情報機器など）の進歩により，その性能は発展していくと考えている。富士電機では豊富な経験と最新の技術を駆使し，より信頼性の高い，二-

ズに合った技術を提供していく所存である。

参考文献

- (1) ノイマン，F. ほか：エネルギー消費に関する環境への影響及び機構への影響からみた鋳鉄の溶解工程，VDI Berichte Nr. 1057（1993）
- (2) 北村寿宏ほか：鋳物条件としての鉄鋼スクラップの現状と今後の課題，鋳造工学，Vol.69，No.12（1997）
- (3) 松岡滋樹：スクラップを利用したシステム，炭酸ガス抑制と製鉄プロセスの未来，鉄鋼業における炭酸ガス抑制対策研究部会編（1993）
- (4) 日本電気協会：高調波抑制対策技術指針，JEAG 9702-1995

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
二次元搬送ユニット用マイクロアクチュエータ	富士電機総合研究所 " " " "	中澤 治雄 渡辺 泰正 森田 修 江戸 雅晴 米澤 栄一	東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会 (1998-3)
フレキシブル a-Si 太陽電池の高生産化技術開発	富士電機総合研究所	吉田 隆	第 35 回太陽エネルギー推進委員会第 10 回太陽光発電連絡会(1998-4)
建材一体型モジュールの性能・長期信頼性評価(建材対応フレキシブル)	富士電機総合研究所 " "	井原 卓郎 林 伸二 市川 幸美	日本能率協会 98 モーションエンジニアリングシンポジウム(1998-4)
PLC によるモーションコントロールシステムの構築事例	機器制御事業部	相田 忠勝	日本機械学会第 75 期通常総会講演会(1998-4)
円板状部材の運動解析シミュレーション	富士電機総合研究所 吹上工場	山本 健明 村田 進	電気化学会第 65 回大会(1998-4)
シールレス構造 SOFC の開発	富士電機総合研究所 " " " " "	角川 功明 新藤 義彦 後藤平四郎 岩崎 慎司 竹野入俊司 中原ゆかり 小関 和雄	日本機械学会第 32 回空気調和・冷凍連合講演会(1998-4)
溶射法により作製した電解質の特性 ---- 低温化を目指した SOFC の開発 ----	富士電機総合研究所 " "	竹野入俊司 角川 功明 小関 和雄	平成 10 年電気学会全国大会シンポジウム(1998-3)
冷蔵ショーケース・トータルシステム制御法の研究	富士電機総合研究所 富士電機ガイ・シー・アルテック " 富士電機冷機	中山 伸一 石山 修 酒井 克広 横田 璋浩	計測技術の発展状況
計測技術の発展状況	富士電機総合研究所	彦坂 知行	油入変圧器の劣化と判定基準
油入変圧器の劣化と判定基準	富士電機総合研究所	宮本 昌広	バイオセンサ及び光センサによる水の測定
バイオセンサ及び光センサによる水の測定	富士電機総合研究所	田中 良春	電気的ファストトランジェント/バースト・イミュニティ試験と方形波インパルスノイズ試験との比較
電気的ファストトランジェント/バースト・イミュニティ試験と方形波インパルスノイズ試験との比較	富士電機総合研究所	大澤 千春	超高速永久磁石形ドライブの構成
超高速永久磁石形ドライブの構成	富士電機総合研究所	針江 博史	水車発電機の技術動向
水車発電機の技術動向	エネルギー製作所	村岡 政義	最近の燃料電池発電システム技術の紹介
最近の燃料電池発電システム技術の紹介	技術開発室	久保田康幹	分散型燃料電池発電システムの運用形態
分散型燃料電池発電システムの運用形態	技術開発室	久保田康幹	

最近の電縫管溶接装置

倉田 巖(くらた いわお)

中村 清和(なかむら きよかず)

1 まえがき

富士電機は周波数 500 kHz, 出力 1,000 kW まで使用できる MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 高周波インバータを製品化し, これまでに電縫管溶接, 薄板加熱, 焼入れ, プラズマ発生用電源などに適用してきている。本稿では MOSFET 高周波インバータの適用例の一つである電縫管溶接装置の溶接原理, 回路構成および特長について述べる。

2 電縫管の溶接原理

2.1 電縫管の概要

電縫管とは帯状の金属板から製造されたパイプである。図 1 および図 2 に示すように, 帯状の金属板(帯板)をローラなどで円筒状(オープンパイプ)に整形し, オープンパイプの端部(Vエッジ端部)に電流を流してジュール熱を発生させ, 溶接温度にまで加熱する。次にオープンパイプの側面に圧力を加え, 加熱した部分を圧着(溶接)する。溶接によりはみ出した部分を削り取り, 必要に応じて再整形や焼なましを行い, 所定の長さで切断する。このようにして製造された電縫管は, ガス管, 水道管, 電線管, 各種構造物に用いられてきた。また, 最近では技術の進歩により品質が向上し, 従来は高価なシームレス管を使用していた

油井掘削管, ラインパイプ, ボイラ管などにも用いられるようになった。

効率よく溶接するためには, 電流を V エッジ端部のみに集中させて, 加熱される部位の幅を極力狭くする必要がある。このような条件を満たすため電流の持っている性質のうち, 表皮効果(導体の表面に電流が集中する効果)と近接効果(互いに反対向きに流れる電流は最も接近している場所に集中する効果)を利用する。これらの効果は周波数が高くなるほど顕著になるため, 電縫管の溶接は一般的に数百 kHz の高周波電流が用いられている。高周波電流を発生させる電源として, 従来は真空管を用いた発振器が主流であったが, 最近では半導体を用いた高効率(電源変換効率95%以上)な高周波インバータが登場し, 省エネルギー, 合理化に寄与している。

2.2 高周波電流の供給方法

V エッジ端部に高周波電流を供給する方法としては, 図 1 のように同心円状の加熱コイルにオープンパイプを通す誘導加熱法と, 図 2 のように接点(コンタクトチップ)を介して行う直接通電法の 2 種類が実用化されている。

両者の特長は次のとおりである。

(1) 誘導加熱法

非接触で溶接できるため, パイプ表面に多少の凹凸があっても溶接欠陥が発生せず, 小径, 薄肉寸法のパイプ

図 1 電縫管の溶接原理(誘導加熱法)

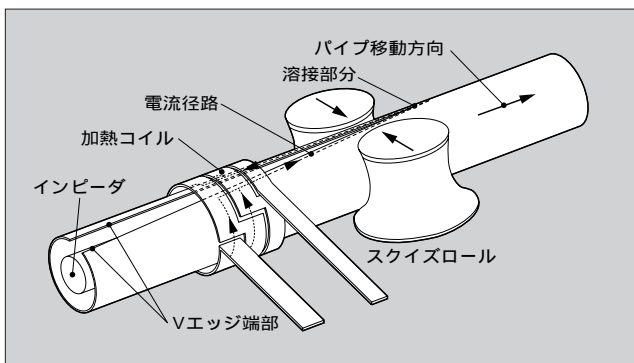
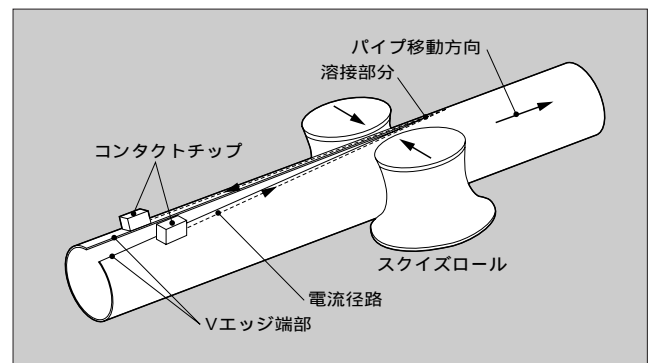


図 2 電縫管の溶接原理(直接通電法)



倉田 巖

誘導加熱用高周波インバータの開発に従事。現在, 富士電機ファーマス(株)エンジニアリング本部開発グループ主任。



中村 清和

誘導加熱用高周波インバータの設計, 開発に従事。現在, 富士電機ファーマス(株)エンジニアリング本部開発グループ主査。

図3 実際の溶接の様子

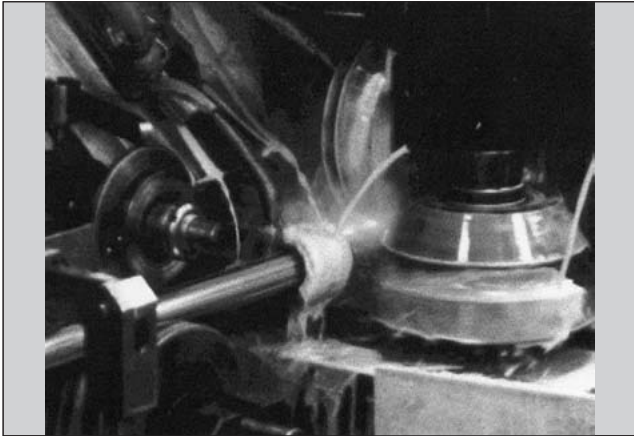
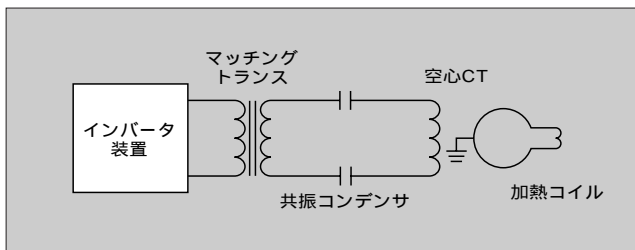


図4 電縫管溶接装置の回路構成例



を高速溶接できるが、溶接外形が大きくなると大容量の電源が必要になり、電力効率、溶接速度が低下する。

(2) 直接通電法

効率が誘導加熱法より高いため、比較的小容量の電源で大径管を溶接できるが、オープンパイプの表面の凹凸によりコンタクトチップが接触不良になり溶接欠陥が発生することがある。また、通電部の寸法制約から小径管溶接が難しい。

一般に小中径管の溶接には誘導加熱法、大径管の溶接には直接通電法がそれぞれ用いられている。誘導加熱法による実際の溶接の様子を図3に示す。

③ 電縫管溶接装置

3.1 現状の構成

富士電機の電縫管溶接装置の回路構成例を図4に示す。インバータに接続される整合回路は基本的に直列共振回路で構成されており、マッチングトランス (MTr) や空心の電流変成器 (空心 CT) を用いてインバータ出力と負荷 (オープンパイプ) との整合を調整している。インバータの入力電力に対する変換効率は95%以上であり、真空管発振器の変換効率約75%よりも高効率である。

3.2 富士電機の電縫管溶接装置の特長

- (1) 真空管発振器に比べ電源部分の寸法が約 1/4 と小形である。
- (2) 空心 CT および加熱コイル周辺が真空管方式とほぼ同一寸法になるので、リプレースが容易である。また、環

表1 400kW 400kHzインバータの仕様例

項目	仕様
運転周波数	400 ~ 500kHz
定格出力電圧	300V
定格出力電流	1,840A
定格出力電力	400kW
効率	95%以上
入力電源	三相, 225V, 480kVA
スタック構成	100kWフルブリッジ4並列
冷却水量	80 L/min
外形寸法 (幅×高さ×奥行)	1,400×1,950×1,300 (mm)

図5 400kW 400kHz インバータの外観



境が劣悪 (高温多湿で金属粉が多い) な加熱コイル周辺部から、インバータを遠ざけることができる。

- (3) インバータ出力電圧と出力電流の位相差を制御する制御方式を採用しているため、サイリスタ位相制御による電力制御よりも負荷インピーダンス変動に対して高速 (約10倍) に応答し、常に入力電力を一定にすることが可能である。したがって、溶接欠陥が発生しにくい。
- (4) 整流器に安価なダイオードを用いているため、サイリスタ整流器に必要なトリガ回路、平滑リアクトルなどが省略でき、インバータ装置が小形、低コストになる。
- (5) インバータ運転中に発生する加熱コイルの短絡、開放、接地および空心 CT 一次 - 二次間の短絡に対する半導体素子の保護機能を備えている。
- (6) 直流中間部の平滑コンデンサ容量を低減しても安定した出力が得られるよう新しい制御方式を採用することにより、受電側の力率は0.95 (定格時) ~ 0.91 (20%出力時) と広範囲の出力に対して高力率である。表1に400 kW 400 kHz インバータの仕様例、図5に外観を示す。

表2 真空管発振器とインバータの溶接能力の比較

パイプ サイズ (mm)	真空管発振器			インバータ			能力差 ($1 - k_i/k_m$) ×100 (%)
	ライン 速度 L_s (m/min)	入力 電力 P_{IN} (kW)	溶接 能力 k_i	ライン 速度 L_s (m/min)	入力 電力 P_{IN} (kW)	溶接 能力 k_m	
114.3 × 4.20	25.0	392	0.279	26.9	320	0.354	21.2
130.0 × 2.08	31.0	334	0.193	30.0	160	0.386	50.0
130.0 × 2.95	30.6	370	0.244	30.0	190	0.465	47.5
130.0 × 4.20	23.5	400	0.247	24.0	250	0.403	38.7
130.0 × 5.50	12.0	360	0.225	15.0	280	0.418	46.2
190.0 × 4.20	14.7	413	0.149	18.0	280	0.270	44.8
190.0 × 5.50	9.6	413	0.130	11.5	320	0.198	34.3

3.3 効率の比較

電縫管溶接では溶接能力を比較する指標として次式の k 値を用いる。なお、 k 値は大きいほど溶接能力が高い。

$$k = \frac{L_s \times t}{P_{IN}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

P_{IN} : 真空管発振器もしくはインバータへの入力電力 (kW)

L_s : ライン速度 (m/min)

t : 溶接する板の厚み (mm)

実際の操業データから真空管発振器とインバータの k 値を求めたものを表2に示す。パイプのサイズによりばらつきがあるが、インバータは真空管発振器よりも溶接能力が20~50%高い。

3.4 電縫管溶接における解析技術

電縫管溶接において空心CTおよび加熱コイルの形状は、溶接能力の良しあしを左右する大きな要因となる。これまでの空心CTや加熱コイルの設計は勘と経験に頼る部分が大きかったが、最近ではコンピュータの計算能力が飛躍的に向上したため渦電流、磁界や発生損失など、さまざまな解析ソフトウェアが登場し電縫管溶接の解析に用いられている。解析には有限要素法が多く用いられているが、この解析法を例えば電縫管の加熱コイル設計に適用した場合、Vエッジ端部に流れる渦電流の浸透深さが約10 μ mとパイプの長さに対し非常に小さいため、要素分割数が膨大(数百~数十×10¹²個)になり実用的ではない。そこで表面イン

図6 電縫管解析モデル

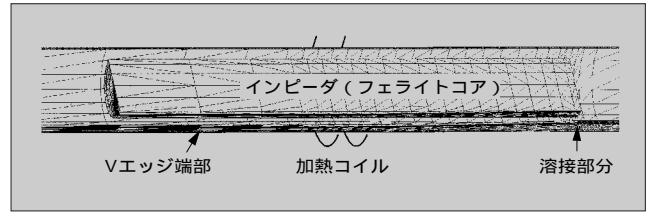
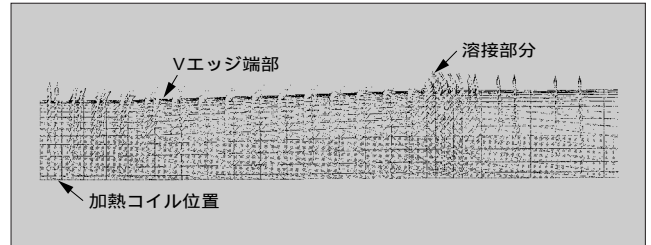


図7 渦電流の分布



ピーダンスの概念を導入した新しい解析ソフトウェアを開発した。この解析ソフトウェアは導体の表面のみを分割すればよく、また要素の大きさをある程度大きくすることができるため、要素分割数を大幅に減らすことができる。図6に解析に用いたモデル(加熱コイルから溶接点までを対称性を考慮して二分割したものを)、図7に解析結果(溶接点付近の渦電流分布とベクトル)をそれぞれ示す。現在、この解析ソフトウェアを実際の加熱コイル設計に適用し評価を行っている段階である。

4 あとがき

電縫管溶接の原理と富士電機の電縫管溶接装置について述べた。今後とも市場のニーズにマッチした、より高効率な製品を提供していく所存である。

最後に、解析ソフトウェアについてご指導いただいた福山大学工学部情報処理工学科坪井始教授に深謝する次第である。

参考文献

- (1) 竹本富蔵・中村清和：誘導加熱式電縫管溶接機，工業加熱，Vol.32，No.188，p.50-59 (1995)
- (2) 倉田巖・久本正昭：誘導加熱用高周波インバータ，富士時報，Vol.68，No.4，p.234-237 (1995)
- (3) 中村清和・倉田巖：誘導加熱におけるインバータ，省エネルギー，No.9，p.34-38 (1995)
- (4) Tsuboi, H. : Eddy Current Analysis for the Pipe Welding. Abstracts of the 7th Joint MMM-Intermag Conference. No.FE-04，p.264 (1998)

鉄鋼プロセスにおける誘導加熱の適用

池田 泰幸 (いけだ やすゆき)

岡山 栄 (おかやま さかえ)

安藤 孝一 (あんどう こういち)

① まえがき

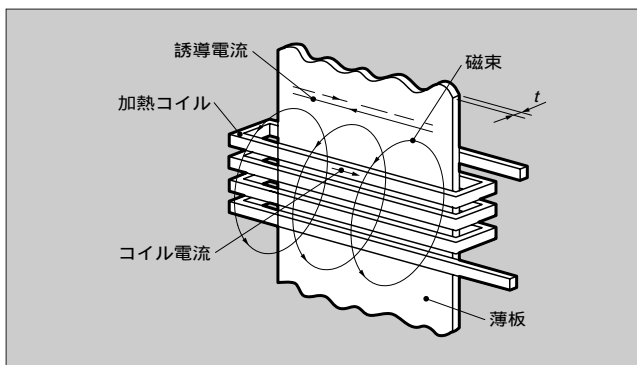
誘導加熱は他の加熱方法と比べ、省エネルギー性に優れている、急速加熱が可能である、温度制御性・応答性がよい、作業環境がよい、雰囲気制約がない、などの特長がある。鉄鋼プロセスラインでは、こういった誘導加熱の特長を最大限に活用した加熱、昇温、熱処理、溶解がなされている。

ここでは、鉄鋼プロセスにおける誘導加熱の適用例として、高周波インバータを使用した最近の薄板誘導加熱装置、熱間圧延プロセスに使用される粗バーヒータ、および製品の長寿命化のために表面処理鋼板のなかでも近年需要が増加しているガルバリウム(アルミニウム-亜鉛合金)めっき鋼板用誘導炉(ガルバリウムポット)について述べる。

② 薄板誘導加熱装置

薄板誘導加熱装置は、溶融亜鉛めっき鋼板の合金化炉、すずめっき鋼板のリフロー炉への適用やカラー塗装鋼板、深絞り飲料缶用材料の製造工程などへ適用されている。合金化炉やリフロー炉では塗膜密着性・溶接性の向上を、カラー塗装鋼板では塗料の乾燥・焼付けを、深絞り飲料缶用材料では特性の向上を目的として、誘導加熱装置がその特長を生かして使用されている。

図1 ソレノイド状加熱コイル



加熱温度は、その目的により 150 ~ 600 程度とさまざまである。

2.1 薄板誘導加熱装置の原理

薄板誘導加熱は、被加熱物である薄鋼板(以下、薄板と略す)の周囲に加熱コイルを巻き、これに交流電流を流すと電磁誘導作用により、薄板内部に誘導電流が流れる(図1参照)。この誘導電流によるジュール熱で薄板が加熱され、熱は薄板自身に発生するから急速で効率のよい加熱が可能となる。

薄板内部に誘起される電流は、表皮効果により薄板表面から内部に進むに従い指数関数的に減少する。電流密度が表面のその $1/e$ (0.368) 倍になる位置を電流の浸透深さと呼び、次式で表される。

$$= 5.03 \sqrt{t / (\mu \cdot f)} \text{ (cm)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

：被加熱物の比抵抗 ($\mu \cdot \text{cm}$)

μ : 被加熱物の比透磁率

f : 交流電流の周波数 (Hz)

一般的に薄板加熱装置では、薄板の板厚を t (cm) とすれば、 t/l が 2.25 より小さくなると加熱効率が急激に低下するため、 t/l 2.25 となるような高い周波数を選定する必要がある。

2.2 薄板誘導加熱装置と高周波電源

これまで、特に板厚 0.15 mm 以下の薄板は、50 kHz 以上の周波数でないと効率のよい加熱ができなかったため、板厚 0.15 mm 以下の薄板を加熱する場合には真空管式発振器を用いて誘導加熱されていた。

しかしながら、パワーエレクトロニクス的发展により、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 式高周波インバータが 500 kHz 領域まで適用できるようになったため、これまで真空管式発振器を用いて誘導加熱していた薄板も MOSFET を用いた高周波インバータで誘導加熱できるようになり、この結果、加熱効率が 30% 以上向上している。



池田 泰幸

誘導加熱装置の設計、エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部技術グループサブリーダー。



岡山 栄

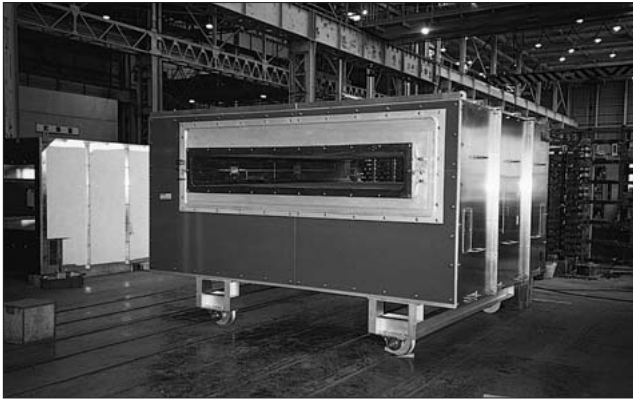
誘導加熱装置の設計業務に従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部設計グループ主査。



安藤 孝一

誘導加熱装置の設計業務に従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部設計グループ主任。

図2 薄板加熱装置



DK8595

図3 MOSFET 式高周波インバータ盤



N89-6060-4

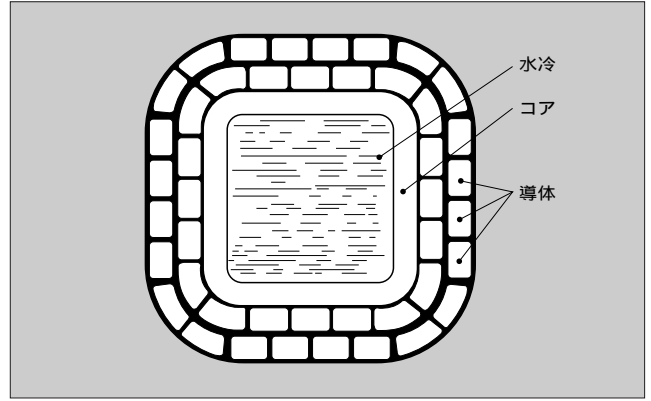
富士電機は半導体素子の開発・製作から誘導加熱装置の開発・設計・製造およびアフターサービスまで一貫した体制を敷いている。さらに MOSFET 素子を使用した出力周波数 50 kHz 以上の薄板加熱装置の開発にも早くから取り組んできた。そして1991年に初めて MOSFET 素子を使用した総出力 3,200 kW 薄板加熱装置を納入し、1995年には 0.1 mm という極薄板を加熱することができるインダクションリフロー炉を納入、稼働させている。図2に薄板加熱装置、図3に高周波インバータ盤を示す。

2.3 薄板誘導加熱装置の特長

富士電機の薄板誘導加熱装置の特長は、次のとおりである。

- (1) 加熱コイル内に耐熱中子を入れて薄板との接触によるコイル絶縁物の損傷を防止している。
- (2) 垂鉛粉、すず粉などのコイル付着による絶縁低下の防止をするため特殊テープを導体表面に巻くとともに、エアパージにより垂鉛粉、すず粉がコイル内に侵入しにくくしている。
- (3) 薄板の板厚ばかりでなく溶融状態の垂鉛あるいはすずめっき層の流動によるしま模様対策をも考慮した最適周波数を選定している。

図4 コンポジット水冷導体の断面図



2.4 インバータ盤のコンパクト化への取組み

合金化炉やリフロー炉の場合には、既存設備と置換えあるいは既存設備の中に追加設置するといったケースが多く、このためインバータ盤に寸法制限が課せられ、コンパクトな設計を要求されることが多い。このような要求にこたえるため、大容量インバータユニットの開発を進めている。

③ 粗バーヒータ

熱間圧延用粗バーヒータは粗圧延機と仕上圧延機との間に置かれ、圧延時あるいは搬送中に温度降下した粗バーを誘導加熱により効率よく加熱し、温度補償するものである。仕様の一例をあげれば、板幅が 600 ~ 1,900 mm、板厚が 20 ~ 60 mm の粗バーを40 程度、粗バーヒータで昇温するといった例がある。

富士電機の粗バーヒータの最大の特長は、省エネルギー性に優れていることである。すなわち、通常粗バーヒータの加熱効率は80%であるのに比し、富士電機のそれは85%以上あり、その最大のポイントは、加熱コイルの構造を、

- (1) 図4に示すようなコンポジット水冷導体を使用
 - (2) 多層巻き
- としていることにある。すなわち、コンポジット水冷導体を構成する銅製導体は渦電流損が発生しにくいように十分薄く、かつ1本1本の導体は他の導体から絶縁されており、このため表皮効果による電流通過断面積の低減を抑えている。また、多層巻きにすることによりコイル電圧を高くとり、その見返りとしてコイル電流を低減、すなわちジュール損失 I^2R を低減させている。

この粗バーヒータは電力密度が高くとれるため、外形寸法がコンパクトで既設の圧延ラインに設置するのに適している。

なお、富士電機は海外メーカーと共同で粗バーヒータを製作、販売している。

④ ガルバリウムポット

溶融垂鉛めっき鋼板は、家庭電気部品、建築材料、自動

表1 りつぼ形ポットの仕様

方式	りつぼ形コアレス方式(固定式)	
炉容	公称	45t
	炉内径	3,000mm
	炉入力	定格2,100kW
	冷却方式	水冷式
溶湯	種類	55%Al-Zn
	設定温度	605

車部品などに多く採用されている。しかし近年、より一層優れた耐久性を有する鋼板が要望されており、このような要求に対応するため、冷延鋼板の薄板に溶融アルミニウム-亜鉛合金めっきしたガルバリウム鋼板の需要が高まりつつある。ガルバリウム鋼板は従来の亜鉛めっき鋼板と比較して6~8倍の耐酸性を持ち、加工性、美観に優れた鋼板である。ガルバリウム鋼板製造用設備として、めっきライン用浴槽として、国内で初のりつぼ形ポットと溝形ポットを完成させたので、両ポットについて紹介する。

4.1 りつぼ形ポット

国内第1号機として45tガルバリウムメインポットを納入した。鑄鉄溶湯に換算すると約100tに相当するもので、国内において記録的な超大形のりつぼ形誘導炉である。

4.1.1 ポットの仕様と定格

りつぼ形ポットの仕様と定格を表1に示す。

4.1.2 ポットの構造

りつぼ形ポットの構造を図5、外観を図6に示す。寸法は直径5,500mm×高さ3,200mmとへん平形のりつぼ形誘導炉であり、炉体は分割輸送された後現地において本組立、据付けを行い、耐火物を施工して自力にてアルミニウム亜鉛を溶解して立ち上げた。本炉はコイル、コイル支持炉枠耐火物などで構成されている。

各部の特長について説明する。

(1) コイル

コイルは上コイル、中コイル、下コイルの三分割で構成され、各コイルにはおのおのの独立する低周波電源から電力が供給される。各コイルの投入電力を、パターン制御することにより湯運動が調整できる。電磁解析と流動解析を合わせたシミュレーションを行った結果、各コイルによるパターン制御で湯運動を広く調整できることが判明した。

その一例としては、操業中の電力制御には上・下コイルの電力を抑え、中コイルの電力で浴内温度管理することで、浴面の変動を抑え、製品のめっき部分にドロスが混入しないようにすることにより、めっきの品質が向上する。

一方、ガルバリウムポットとして問題となるのは、炉の底にたい積してくるドロスの処理であり、この問題の解決のため、メンテナンス時には上・中コイルの電力を抑え、下コイルの電力を上げることにより、ボトムにたい積したドロスを浴面に押し上げ、ドロス(酸化物)の除去を容易にした。

図5 りつぼ形ポットの構造

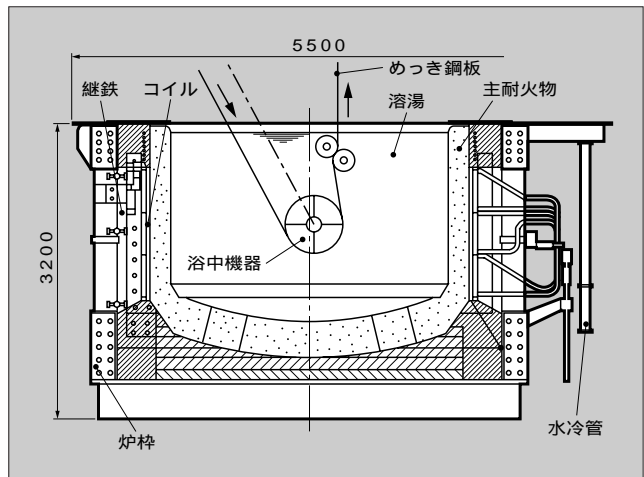
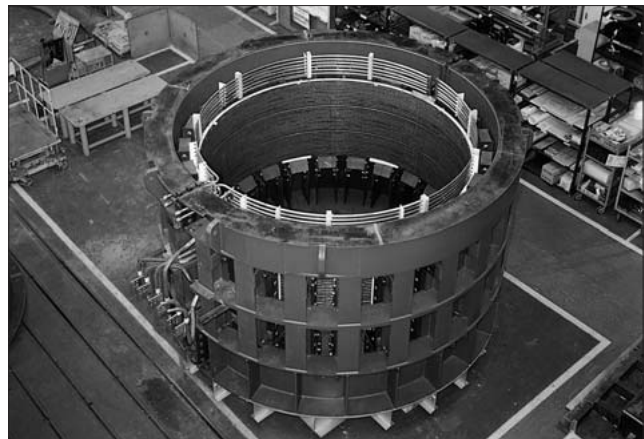


図6 りつぼ形ポットの外観



N89-6302-4

(2) 耐火物

炉内径が3,000mmで、りつぼ形誘導炉としては国内に例を見ない超大形炉であり、しかも保温される溶湯は、アルミニウムと亜鉛合金であるため耐火物の亀裂、侵食、溶湯の浸透を抑え、低温での焼結が可能な材料が不可欠である。これらを満足させるため、テーブルテストにて比較評価を行い、電融アルミナ(ドライ)スタンプ材を採用した。

4.1.3 操業結果

運転開始後、耐火物の亀裂や局部溶損、酸化物のたい積などもなく運転4年を経過した現在も順調に運転されている。溶湯のドロスのたい積も三分割コイルによる溶湯のかくはんによりほとんど見られない。

直径3,000mm×高さ2,100mmのりつぼの浴槽の各部溶湯温度差は当初目標値が5であったのに対して実機では通板中においても3以内ときわめて少ないことが検証された。このことは鋼板の品質確保に貢献している。

4.2 溝形ポット

国内第1号機として88tガルバリウムメインポットを納入した。鑄鉄溶湯に換算すると約250tに相当するもので、国内において大形の溝形誘導炉である。

4.2.1 ポットの仕様と定格

表2 溝形ポットの仕様

方式	溝形ポット	
炉容	公称	88t
	炉内寸法	2,700×4,500 (mm)
	炉入力	定格1,600kW
	冷却方式	水冷式
溶湯	種類	55%Al-Zn
	設定温度	610

図7 溝形ポットの断面図

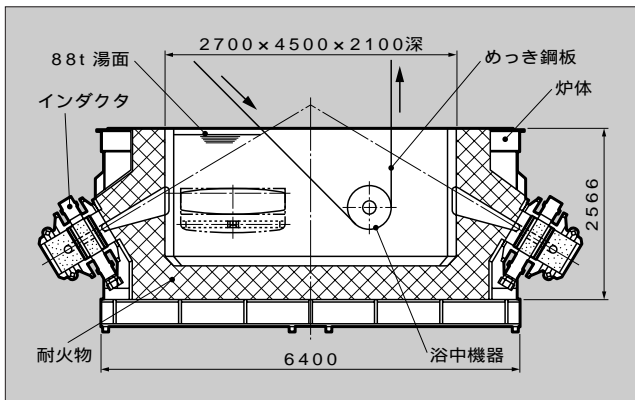
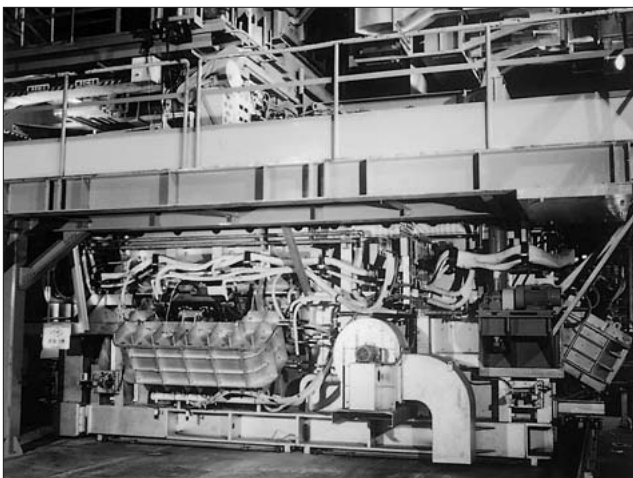


図8 溝形ポットの外観



溝形ポットの仕様と定格を表2, 構造を図7, 外観を図8に示す。

4.2.2 ポットの構造

寸法は6,400 mm × 4,600 mm × 高さ3,000 mmの直方体の溝形炉であり, 炉体は分割輸送された後現地において本組立, 据付けを行い, 耐火物を施工して, インダクタ部での自力溶解とパーナによる溶解の併用で立ち上げた。本炉は炉ふた, 炉体, インダクタ, 耐火物などで構成されている。

各部の特長について説明する。

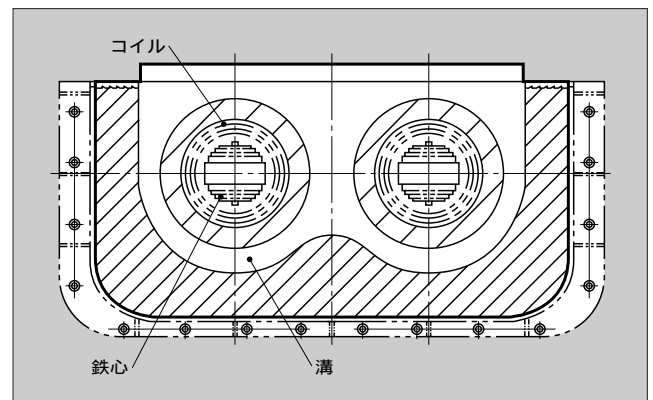
(1) 炉体

浴槽の寸法は4,500 mm × 2,700 mm × 深さ2,100 mmと非常に大きいので, 浴槽内温度の均一化とインダクタ溝部

表3 インダクタ長寿命化対策

ドロス付着による溝閉塞の制御	<ul style="list-style-type: none"> ○溝断面形状を円形とし, かつ断面積を増大して溝つまりを制御した。 ○溝断面形状および溝ループ形状とも円形として, 溶湯の流れをスムーズにした。 ○三次元電磁・流れ解析を行い, よどみがなく流動性の良い最適溝形状を決定した。
溶湯の浸透抑制	<ul style="list-style-type: none"> ○コイルダクト, インダクタケース, スロートをすべて水冷化して, 耐火物を冷却することで溶湯の浸透を制御した。
耐火物の選定	<ul style="list-style-type: none"> ○アルミニウム・亜鉛合金に対して耐浸透性, 耐食性に優れ実績のある耐火物を選定した。

図9 インダクタの断面図



へのドロスのたい積を抑える構造とするためインダクタの取付位置と台数を流動解析して決定した。また, 耐火物は熱膨張の吸収と亀裂抑制のため耐火れんがをメインにした築炉構成とした。

(2) インダクタ

浴槽内溶湯温度を管理する誘導加熱式の発熱部であり, コイル, 鉄心, コイルダクト, ケース, 耐火物などで構成されている。溝形ポットの問題点は一般的にインダクタの寿命が不安定であり, 現在世界で約25台操業されているが, 各社とも寿命延長化で苦労している。

その原因は,

- (a) 溶湯のドロス付着によるインダクタの溝の閉塞
- b) 耐火物中への溶湯の浸透

である。

これらの問題点を解決するために, 本炉には表3に示す対策を実施した。図9にインダクタの外観を示す。

(3) 溶湯温度管理

熱電対により浴槽内溶湯温度を測定し, 設定した管理温度になるように電力制御することにより, 浴槽内温度は±2以下となった。

(4) 管理システム

インダクタの寿命予測技術として, 溝状態図, インダクタ表面温度, 冷却水温度を常時監視, 自動記録してその傾向監視によって, 溝の状態(拡大または縮小)を推論するエキスパートシステムを構築しており, ビジュアル的に判断することができる。

4.2.3 操業結果

運転開始後3年を経過した現在もインダクタ溝の閉塞は発生しておらず、インダクタの寿命延長化が図られている。

4.3 りつぼ形と溝形の比較

りつぼ形、溝形の2種類のガルバリウムポットをほぼ同時期に開発し、2台とも順調に操業されている。どちらのポットを採用するかにあたっては、操業条件が大きなウエートを占める。浴内のドロスのたい積、温度分布、保守性を重視し、かつ中形炉であればるつぼ形が優位であるが、電気効率、亜鉛ポットとの併用および大形炉の場合には溝形が優位である。いずれの場合においても、従来炉に比し耐火物寿命の大幅な延長が可能である。

5 あとがき

鉄鋼プロセスにおける誘導加熱の適用例として薄板誘導加熱装置、粗バーヒータ、ガルバリウムポットについて述べた。

今後、鉄鋼プロセスにおいて製品のより一層の長寿命化あるいは省エネルギーのために誘導加熱の果たす役割はますます広がっていくものと思われる。富士電機は誘導加熱製品を提供することを通して、これらの動向にわずかばかりでも貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 高木圭治ほか：福山 No.2 CGL の設備と操業，NKK 技報，No.135，p.34-42（1991）
- (2) Electra：Electromagnetic Induction and Electric Conduction in Industry. Centre Français de l'Electricite（1997）
- (3) 日本鉄鋼連盟：Tekkohkai（1997-12）
- (4) 松本巖：薄鋼板への誘導加熱の応用，富士時報，Vol.63，No.5，p.319-321（1990）
- (5) 省エネルギーセンター編：エネルギー管理技術（電気管理編）（1980）

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
水中気泡内放電の研究 ---- 電極間に誘電体を挿入した場合 ----	公共システム事業部	酒井 英治	平成 10 年電気学会全国大会（1998-3）
SF ₆ ガス中インパルス破壊の火花遅れ	富士電機総合研究所 "	宮本 昌広 森田 公	
気体中誘電体薄膜を挟んだギャップの破壊位置特性	富士電機総合研究所 "	宮本 昌広 森田 公	
N ₂ + O ₂ 気体中不平等電界ギャップにおける放電特性	富士電機総合研究所	宮本 昌広	
MCS を用いた光源の逆探知計算法に関する基礎検討 ³⁾	富士電機総合研究所 "	甲斐 慎一 岩井 弘美 森田 公	
高圧回転機コイル用マイカテープの樹脂含浸性の検討	富士電機総合研究所 "	井上 誠一 竹田 政寛 芳賀 弘二	
高圧回転機コイルにおける部分放電発生位相の検討	富士電機総合研究所 "	楠 敏紀 小原 孝志	
代替フロン下で使用される回転機絶縁システム	富士電機総合研究所 "	辻村 輝雄 前田 昌男 芳賀 弘二	
新低圧モータ絶縁の開発	富士電機総合研究所 三重工場 鈴鹿工場	芳賀 弘二 藤井 秀樹 西岡 洋介	
プリント基板の沿面破壊電圧に及ぼす背後電極の影響	富士電機総合研究所 "	山田 昭治 岡本 健次	
測温抵抗体を用いたタービン発電機の部分放電測定	富士電機総合研究所 "	中山 昭伸 小原 孝志	
金属ベースプリント基板絶縁層の空間電荷の観測	富士電機総合研究所	岡本 健次	

廃棄物処理への誘導加熱の応用

喜田 清則(きだ きよりの)

和田 清美(わだ きよみ)

原田 満雄(はらだ みつお)

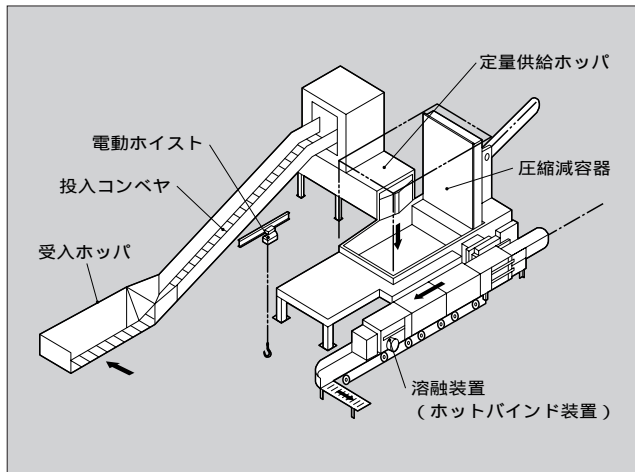
① まえがき

地球環境問題から廃棄物処理の在り方が厳しく問われる状況にある。処理プラントのプロセスおよびそれらを構成する機器の性能についても、より革新が望まれている。単に廃棄物の処理という局面からのみ考えることでは解決できない事柄が山積している。近年、ダイオキシンの有害性が特に問題になっている。これはダイオキシンがホルモン攪乱(かくらん)物質の一つであり、生命維持を危うくすることが判明したからである。また、地球温暖化対策として、CO₂の世界的な排出規制への取組みがある。今回は、それらの発生を抑制するプロセスおよび機器技術について述べる。

富士電機では1982年ごろから、廃棄物処理技術のなかで、特に高分子系廃棄物(プラスチックごみ)の処理が問題であることを指摘し、いろいろな開発を推進してきた。

本稿で取り上げる「ホットバインド」システムについては、1986年8月に1号機を建設して以来の効果について報告する。また、乾留式減容化装置については、開発の進捗(しんちよく)状況と将来展望を述べる。

図1 処理フロー



② ホットバインドシステム

2.1 設置目的, 原理および処理フロー

ホットバインドシステムについては、『富士時報』第68巻第3号(1995)にて詳細を報告のとおり、廃プラスチックごみをさいころ状に圧縮し、その表面を加熱溶融して冷却し、廃プラスチックごみの減容固化物を得るものである。システムの概要を図1に、ホットバインド装置を図2に示す。

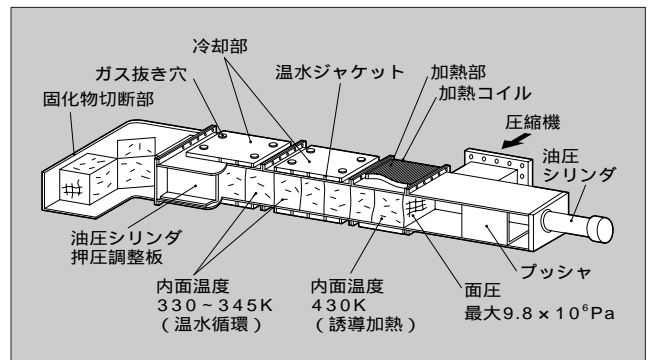
処理物は、受入ホッパ、投入コンベヤ、定量供給装置、油圧式三方向圧縮機を経て、ホットバインド装置部に送られ、容積比で約1/15に減容固化され排出される。

減容比は、油圧式三方向圧縮機の特性で決まる。処理工程を通じて、処理物の容積は次のように変化する。

処理物は圧縮工程で約1/20(かさ比重0.05~0.97)になる。次のホットバインド装置に乗り継ぐ工程で一度膨張するが、ホットバインド装置の横押部で再び約1/20になる。この状態で、誘導加熱装置を搭載した加熱部に送られる。圧縮され、強力なばね作用を生じているブロックの周囲を溶融する。溶融された処理物の一部が、ブロックの内面方向に浸透していく。この状態で次の冷却部に送られ、ブロックの周囲が固化される。

装置から送り出された後、ブロックは膨張し容積比約1/15になる。

図2 ホットバインド装置



喜田 清則

自治体向けリサイクル施設の計画、設計業務に従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部環境グループリーダー。



和田 清美

自治体向け廃棄物処理および産業廃棄物処理施設の企画、研究開発に従事。現在、富士電機(株)環境事業部技術部長。



原田 満雄

自治体向けリサイクル施設のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機(株)環境事業部技術部長。

表1 納入実績

自治体	地区	処理能力 (t/d)	ブロックの大きさ (mm)	納入年月
上尾市	埼玉	30	700×700	1986-8
磐田市	静岡	10	500×500	1989-3
安城市	愛知	30	700×700	1989-6
亀田市	新潟	5	400×400	1990-3
四街道市	千葉	10	500×500	1991-12
名取市	宮城	10	500×500	1995-3
帯広市	北海道	30	700×700	1997-3
島田市・榑原地区 市町村圏組合	静岡	10	500×500	1998-6 (予定)

トンネル内でブロックをより長時間滞留させることにより、固化ブロックを装置から送り出した後の膨張を抑えることができる。装置内での圧力バランスを考慮して、1サイクル 180秒で18ブロック(54分)滞留させることを標準としている。

設置効果として、当初は埋立ての前処理および搬送コストの低減を主な目的として建設されてきた。しかし近年、廃棄物処理技術において、問題視されているダイオキシン対策から、高分子系廃棄物の処理の在り方について論議されている。

富士電機では、当初から目的の一つとして、高分子系廃棄物の「備蓄」を考えてきた。すなわち近い将来、油化技術などが経済的に見合う時代まで、地中に保管することである。

地球規模のCO₂削減策からも、「備蓄」の意味合いを強気に訴える時期にきていると考える。

2.2 プラントの稼動状況

現在までに建設したプラントの内訳は、表1のとおりである。このなかで、1989年3月に竣工(しゅんこう)した静岡県磐田市向け埋立地前処理施設としてのホットバインド装置について、約9年間の稼動状況をデータを基に説明する。

(1) 施設の位置づけ

本施設は、分別収集された燃焼不適合物(不燃物)としての高分子系廃棄物の埋立て前処理施設として、図3に示すとおり管理形埋立地に隣接している。

収集地域から搬入された処理物は、処理棟でブロック化され、構内搬送のうえ埋立て処理されている。

(2) 処理物量の推移

施設稼動以来の処理物量は、年平均1,150t、1989年からの9年間で総量 10,350tである。

埋立て開始から現在(1998年2月)までの埋立て状態を図4の埋立地断面図に示す。

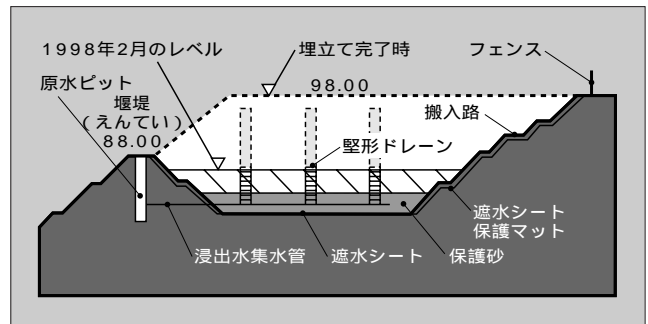
(3) 埋立て処理上の比較検討

一般的な埋立て処理の場合、かさ比重 0.05 ~ 0.07(t/m³)の状態では約1m厚に埋め立て、同厚さの盛土で覆い、土圧で圧縮しかさ比重を高めている。ホットバインド処理し

図3 施設の全景(1989年3月竣工時)



図4 埋立地断面図



埋め立てる場合は、1/15に減容し埋め立てるため、盛土の必要がない。

ブロックの表面がプラスチックの溶融層で覆われており、からず、野犬の害がなく、また、盛土を必要とせず、衛生的で経済的な埋立て管理を可能にしている。

ホットバインド処理による、埋立て効果の評価は難しいが、現時点での余剰年数は約30年が見込まれ、一般的な埋立てに比較して、約2.5倍の延命を可能としている。

2.3 ホットバインド処理ブロックの将来的価値

磐田市の埋立地は、高分子系資源物の塊である。

時代が変わり、石油資源の枯渇時代が到来する時代には貴重な資源といえる。

高分子系廃棄物の密度を高めてかつ空げきをより少なくした状態で埋立て処理されているため、きわめて高密度な格納といえる。

2.4 ホットバインド装置の用途拡大

高分子系廃棄物の埋立て前処理のほかに減容化比1/15のメリットを生かし、その用途は多方面に考えられる。ブロック化する場合、高分子系物質が質量比で30%程度あれば固化の性能は維持できる。

輸送コストの低減や貯蔵スペースの合理化、ハンドリングの容易さなどの特色から、次のような用途にも適する。

- (1) 一般廃棄物のなかで、かさ比重の低い不燃物類の一時貯留および長距離輸送(中継基地の合理化)
- (2) 産業廃棄物分野
 - (a) 高分子系廃材の一時貯留および搬送コスト改善を目的とした、固化ブロック化

図5 自己完結形リサイクルプラザの基本構成

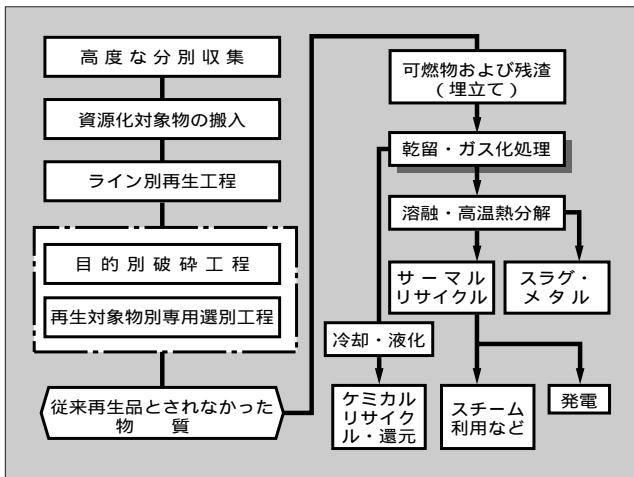


図6 実験装置

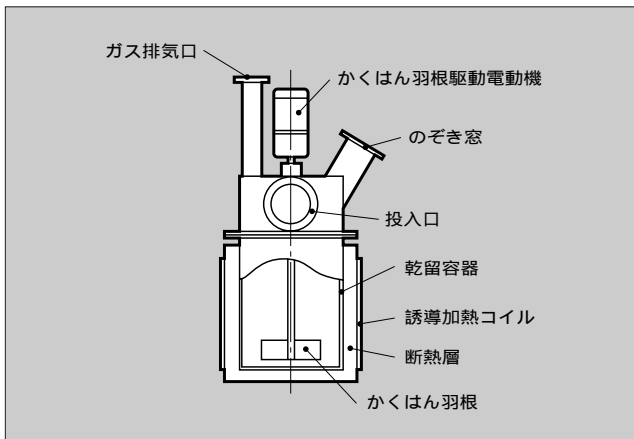


図7 乾留処理前



図8 乾留処理後



- b) 企業内での ISO14000 対応のために、管理された同一材質の部材（高分子系）流通の安定化を目的とした低寸法ブロック化
- c) 放射線低汚染廃棄物（高分子系および布類）の貯留・輸送および最終処理施設の合理化を図るために、発生場所での一次処理への応用
- d) 工事分野における廃棄物管理の合理化（電線類の廃棄物）など

このように限られた目的に使用する場合は、システム構成機器を省略し、三方向圧縮機とホットバインド装置だけでシステムを構成できる。

③ 乾留式減容装置

3.1 装置の使用目的

本装置は、一般廃棄物の資源化を図るために建設されている、粗大ごみ処理施設およびリサイクルプラザ施設に組み込むことを主な目的とするものである。

これらの施設は、粗大ごみや燃焼不適合物を処理し資源化を図る手段の一つとして数多く建設されているが、資源化不可能物としての土砂・がれきおよび高分子を主体とした可燃類が排出される。従来これらは、埋立て処理（土

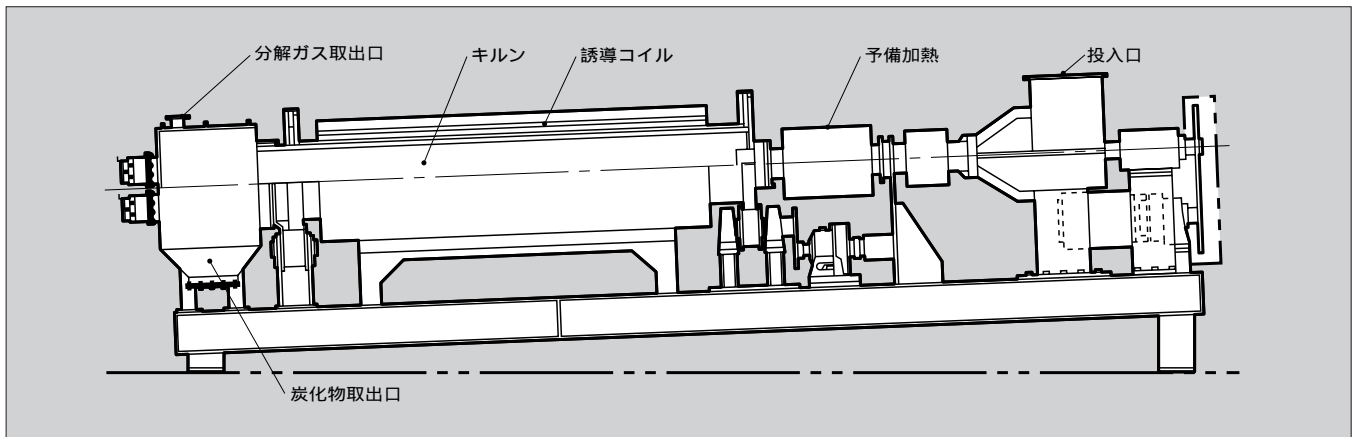
砂・がれき）および焼却処理（可燃物類）を行ってきた。しかしながら、埋立地の枯渇および建設難などから埋立て処理そのものを見直す時代となってきた。また、焼却処理により発生する焼却灰・飛灰の直接埋立て処理も、ダイオキシン対応などから問題視されている。

そこで図5に示すとおり、粗大ごみ処理施設およびリサイクルプラザからの排出物を誘導加熱方式の乾留装置で乾留、ガス化処理し無害化するものである。

3.2 装置の構造および原理

- (1) 図6はプロトタイプの実験装置である。誘導加熱装置内に装着される鋼製の発熱容器と、容器内には外部から連続的にかくはん作用を加えられる機構を付加している。また、発熱容器から乾留時に発生する分解ガスを排出する排気管を取り付けている。
- (2) 誘導加熱装置は、電源・制御装置と誘導加熱コイルを備えている。電源は商用周波数および高周波を選択できるが、本実験では高周波電源を採用した。
- (3) 乾留実験の処理対象物は、図7に示すリサイクルプラザからの排出物を選定した。組成は土砂・がれきおよび高分子系を主体とする可燃物である。
- (4) 処理対象物を加熱容器内に格納し、容器全体を誘導加熱装置内につり込み加熱した。加熱前に別途用意した、窒素置換装置から N₂ ガスを加熱容器内にパージし、加熱容器内を酸欠（酸素濃度 1% 以下）状態にした。乾留作用を安定させるための処置である。
- (5) かくはん機構を作動させながら、誘導加熱により乾留処理を実施した。乾留温度は 725 K を中心値とした。乾留ガスは別途設けた排ガス処理装置で高温熱分解を行った。

図9 実証試験機



- (6) 乾留処理後の状況を図8に示す。土砂・がれきは付着物が炭化し脱落した状態で、高分子系物を主とする可燃物は完全に炭化している。
- (7) 乾留処理後の減容積率および質量の減少率は体積比で約1/20、質量比で1/5の値を示している。土砂・がれき分については、質量の減少を期待できないために質量比の点で1/5程度にとどまっている。

3.3 誘導加熱方式の優位性

- (1) 制御、取扱いが容易である。
- (2) 加熱効率が良い。
- (3) ごみ発電および深夜電力の活用に適応できる。
- (4) 設備がシンプルである。
- (5) 加熱機構に消耗部がない。
- (6) リサイクルプラザ機器同様、操作に特別な資格を必要としない。
- (7) 乾留処理から熔融処理に移行する場合、炭化物を直接発熱体とすることができる。

3.4 本装置の効果

- (1) 粗大ごみおよびリサイクルプラザをクローズド化できる。
- (2) 資源化度をより向上できる。
- (3) エネルギーの有効利用が可能である。
- (4) 施設運用上の省力化が可能である。
- (5) 熔融装置との整合性の向上が可能である。
- (6) 他の処理装置への応用が可能である。

3.5 今後の展開

3.5.1 実証機的设计製作と実証試験

プロトタイプの実験機による基本的性能確認をもとに、実証試験機による確認を行っている。実証機の概要を図9に示す。

3.5.2 実証機の機能説明

実証機は処理物を圧縮する前処理部と、誘導加熱装置を備えた乾留装置部から構成されている。

処理物は圧縮部で、可燃物の場合、約1/20に減容化され

乾留部に供給される。このことにより、乾留部を小形化できる。圧縮機構はスクリー方式であり、乾留部を外気から遮断する機能も兼ねている。

乾留部は誘導コイルの内側に、ロータリキルン方式となっている。処理物は、ロータリキルン内をかくはんされながら進行する。

ロータリキルン部は、被乾留物の状況に合わせ、内部温度の制御を容易に行う目的として複数個の誘導加熱コイルにより加熱される。

乾留処理により発生した分解ガスは、ロータリキルン前方から排出する。また乾留物(炭化物)は、ロータリキルン前方下部のロータリバルブ部から排出される。

排出された分解ガスは、別途高温熱分解などにより処理しサーマルリサイクルを図っている。

3.6 乾留装置とダイオキシン対応

ダイオキシンの含まれた焼却灰や飛灰の処理方法の一つとして、乾留方式があることは広く知られている。焼却飛灰を酸欠(酸素1%以下の雰囲気)下で加熱して、ダイオキシンの脱塩素を図る装置を海外から技術導入している例もある。また、従来の焼却方式に変わり、乾留ガス化燃焼炉方式の例もある。これらは、ダイオキシン対策を主眼とするものと考えられる。

乾留装置の使用目的の一つとして、リサイクルプラザの残渣(ざんさ)を処理し資源化する以外にも、焼却灰、飛灰などのダイオキシンの発生が予測される場合に適用すると、顕著な効果を期待できる。

3.6.1 焼却灰・飛灰の処理および小規模焼却炉の代替

焼却灰および飛灰の処理としては、熔融方式が広く知られているが、熔融処理しなくても、埋立て処理が許される場合には乾留処理が注目される。ダイオキシン除去(脱塩素処理による無害化)を行い、かつ熱しゃく減量を改善した後に埋め立てる。この方法は熔融装置まで設置できない場合や、施設規模が比較的小さい(30t/d以下)焼却物処理を課題としている場合などに有効である。ダイオキシン対応から、小規模焼却炉の建設ができない場合で、かつ広域行政も地域の諸条件から不可能な場合に焼却炉に代わる

施設として最適である。

3.6.2 医療機関関係の感染性廃棄物の処理

特別管理産業廃棄物の処理については、医療機関内での感染性廃棄物処理方法として焼却・溶融・高圧蒸気滅菌・乾熱滅菌・煮沸（15分以上）・消毒処理が実施されている。このなかで、焼却処理がダイオキシン対応から（小規模バッチ運転などの場合）検討の対象となっている例もある。このようなケースにおいては、焼却処理を上回る減容比を確保できる。また、725 K 以上で乾留処理することにより焼却並みの効果も期待できる。焼却処理に比較してダイオキシンの発生の恐れがないので、病院の構内および建家内設置も容易である。

4 あとがき

ダイオキシン，CO₂ 対策から、焼却しない高分子系廃棄物の処理方法として注目されているホットバインドシステムについて、長期間にわたる評価の結果を述べた。

富士電機は、今後これらの経験を基に、減容化の効果を生かし、一般廃棄物以外の用途拡大をも図り、またその過程で機能面での多様化、およびシステムの標準化に努力している。

また、乾留装置に関しては開発段階であるが、ダイオキ

シン対策が不可欠となってきたごみ処理分野に、新しいシステムとして定着させることで、環境問題への貢献ができると考えている。

廃棄物処理の概念を根底から考え直す時期にあり、21世紀はごみゼロ社会の構築が課題といわれている。

これらにこたえるために、リサイクル面を重視した機器開発を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 和田清美：プラスチック破棄物の減容化「海外と日本の現況を比較する」, 月刊廃棄物, Vol.18, No.90, p.83-87 (1982)
- (2) プラスチック処理促進協技術開発委員会：プラスチックリッチごみ簡易減容固化技術の研究開発報告書 (1983-3)
- (3) 和田清美：都市ごみにおける廃プラスチックの減容術, 月刊廃棄物, Vol.10, No.106, p.150-155 (1984)
- (4) 和田清美：ホットバインド方式の新登場について, 月刊廃棄物, Vol.12, No.141, p.92-98 (1986)
- (5) 森田裕三：プラスチック処理施設の建設（津島市ほか11町村衛生組合の場合）, 月刊廃棄物, Vol.10, No.110, p.100-105 (1984)
- (6) 全国都市清掃会議：「ごみ処理に係るダイオキシン類の削減対策」関係資料収録集 (1997-1)

最近登録になった富士出願

〔特 許〕

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
2722782	鋼板の搬送制御装置	根本 成幸 上田 秀寿	2725453	ゲートターンオフサイリスタの製造方法	高橋 良和 古閑 文晴 柿木 秀昭
2722786	混圧抽気タービン	立野 政義			
2722793	開閉機器の動作診断装置	岩井 弘美 柴田 和郎 原田 信康	2725455	コーヒー抽出装置	小池 輝男
			2725713	信号伝送方法	高橋 洋一
2722794	低融点金属対策を施したるつぼ形誘導炉	大森 次治 川崎 道夫 林 静男	2726126	定周期タスク管理方法	斉藤 豊 井出 正人
			2727717	プログラマブルコントローラシステム	井城 元栄
2722839	自動販売機の氷売切制御装置	嘉住 周一 小池 輝男	2727738	配線用遮断器	登坂 浩明 小嶋明比古
2725431	カード併用紙幣識別装置	山懸 導	2727741	自動販売機の商品搬出扉装置	宇野 嘉夫 斎藤 喜一
2725432	定電流電源の制御回路	石田 紘一	2727756	自動販売機の制御装置	杉野 一彦
2725440	液体容器の接続切替装置	橘 幸正 前田政一郎 岩波 正夫	2728467	吸込側自吸室形の立軸ポンプ	古川 千城
			2728569	分布型触覚センサ	片野 智紀

アルミニウム缶リサイクル用ハイブリッド溶解システム

服部 英美 (はっとり ひでみ)

① まえがき

アルミニウムのリサイクル事業は、省エネルギー化などの観点から国をあげて進められており、アルミニウム飲料缶の回収率は70%を超すまでに至っている。

アルミニウムの再溶解法を大別すると、反射炉に代表される燃焼炉による溶解と、電気を使用した抵抗炉や誘導炉による溶解に分けられる。アルミニウムは溶解温度が低いので、ガス、重油などで十分に溶解が可能であることから、アルミニウム単体を大規模に溶解するためには燃料コストの安い反射炉での溶解が一般的である。一方、電気の利用による抵抗炉はダイカストの手元炉に多く使用され、誘導炉はその特長を生かしたドライ粉や薄スクラップ材、チップ材の溶解、特殊合金溶解、小バッチ溶解などに使われてきた。

誘導炉は自己かくはん作用があることから、チップ材、アルミニウム缶くずなどのかさ比重の小さな溶解材料を溶湯中に巻き込んで溶解するのに適しているが、エネルギーコスト的にみると反射炉に比し約2倍のランニングコストがかかること、設備のイニシャルコストが高いことなどの難点がある。アルミニウム缶リサイクル率が高まるにつれ、これをリサイクル可能とする安価な溶解法が求められ、反射炉での溶解が切望されてきた。しかし反射炉での溶解は、チップ材、アルミニウム缶くずなどのようにかさ比重の小さな材料では溶湯上に材料が浮いてしまうため、バーナ炎による酸化損失が多く溶解の歩留りが非常に悪くなる。そのため、現在では機械的かくはんにより溶湯中に巻き込ませる工夫をしたり、フォークリフトで直接溶湯中に押し込んだりして無理やり溶解させているのが現状である。この場合には、かくはん機の寿命、メンテナンス作業、作業性などにおいて問題が多い。

そこで今回、従来の反射炉では溶解が困難であったチップ材やアルミニウム缶くず材などを効率的に溶解することができ、溶解の歩留り向上や作業環境改善が可能な電磁力を応用した新たな溶解法、ガス・電気のハイブリッド溶解による「渦巻スター」を中部電力(株)、(株)宮本工業所

と共同開発した。

② ガス・電気のハイブリッド溶解法

アルミニウム缶くずを再溶解する際には、UBC材(使用済み飲料缶)をいったん前処理において、チップ状化および培焼による表面塗料の除去などが行われる。このチップ化された材料を反射炉に投入すると、アルミニウム溶湯表面に浮かんでしまいなかなか溶湯中に溶け込むことがない。今回開発した装置は、反射炉の側壁の一部に材料の投入口を設け、電磁力を利用して回転渦を発生させ、チップ材を渦中に押し込み、溶湯中に巻き込ませることを可能にしたものである。チップ材の溶湯中への巻き込みを電磁エネルギーにより行い、アルミニウム溶湯の昇温、溶解を従来どおりの反射炉のガス・重油エネルギーを使用することで、溶解に使用されるエネルギーコストを従来並みに抑えながら、チップ材の溶解をも可能にしたハイブリッド溶解法となっている。

③ 開発機の概要

3.1 原理

開発した渦巻スターの本体は図1に示すように、誘導コイルと鉄心で構成され、反射炉の側壁に設置して用いられる。誘導コイルには、交番電流を流し移動磁界を発生させる。このとき、溶湯には渦電流が誘導され、フレミングの左手の法則により周方向の推進力(電磁かくはん力)Fが発生する。推進力の大きさは式1で表される。

$$F = K \cdot \frac{\cdot f}{\cdot} \cdot B^2 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、

- B : 溶湯に作用する磁束密度
- : ポールピッチ
- f : 印加周波数
- : 溶湯の固有抵抗
- K : 形状係数



服部 英美

誘導炉、誘導加熱装置の設計に従事。現在、富士電機ファーンズ(株)エンジニアリング本部設計グループ主任。

この推進力によって溶湯には回転力が与えられ、渦状の流れを引き起こす。

渦巻スターラを用いたチップ材の溶解プロセスを以下に示す(図2参照)

- (1) 渦巻スターラで発生させた溶解室の溶湯の渦の中にチップ材を投入する。
- (2) チップ材は渦によって溶湯内部に巻き込まれ溶解する。
- (3) 溶解室中の溶湯は連通管を通して反射炉内へ移送される。

図3は溶解室中の渦の様子である。

図1 渦巻スターラの原理図

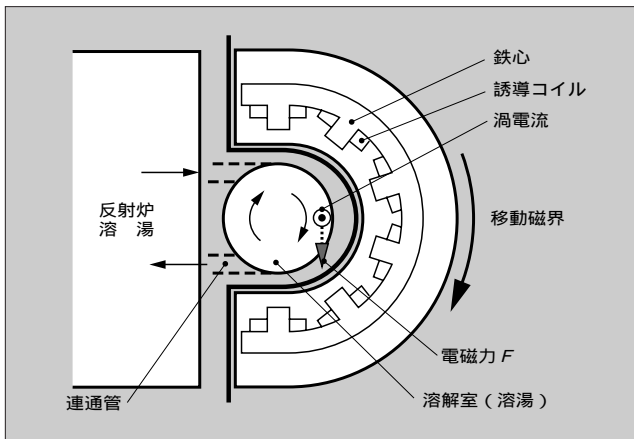


図2 渦巻スターラを用いたチップ材の処理概念図

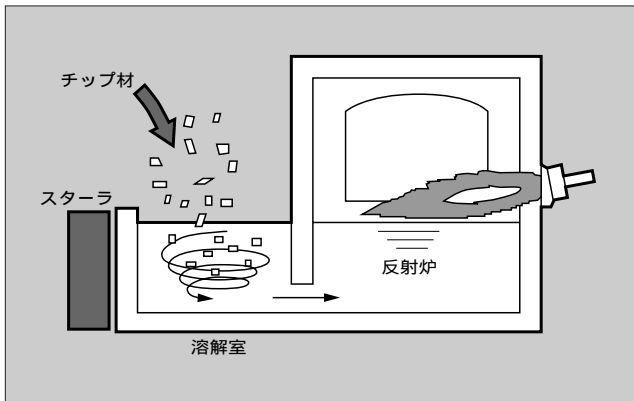


図3 溶湯のかくはん状況



3.2 開発機の概要

図4に開発機の外観を示す。装置は、誘導コイルと鉄心が入った渦巻スターラ本体とインバータ電源から構成されている。渦巻スターラ本体はメンテナンスを考慮して可動式とし、反射炉側壁から切り離すことができる。印加周波数は磁束が溶湯内に十分浸透し大きな電磁かくはん力(体積力)が得られるよう1~5Hzを選択した。

今回試作した開発機の仕様を表1に示す。

4 特長・効果

本溶解法は反射炉溶解に比べ、数々の特長を有している。

- (1) 反射炉では溶解ができなかったアルミニウムチップ材、薄物スクラップアルミニウム缶くずなどの溶解が効率よくできる。
- (2) 溶解速度が上がり溶解時間短縮となる。また、歩留りは誘導炉溶解と同等まで向上する。
- (3) ガス・重油エネルギーと電気エネルギーの良さをミックスしたハイブリッド溶解システムであり、省エネルギー設備である。
- (4) 電磁力で回転渦をつくり、渦中にチップ材を巻き込めるためメカニカル部分がなく、メンテナンスが簡単で破損や交換部品など不必要である。
- (5) 従来の反射炉にも改造して取り付けることが可能である。
- (6) 電磁力により反射炉内部に強制流ができるために、溶湯温度の均一化、溶湯成分の均一化が図られる。

図4 渦巻スターラ開発機の外観

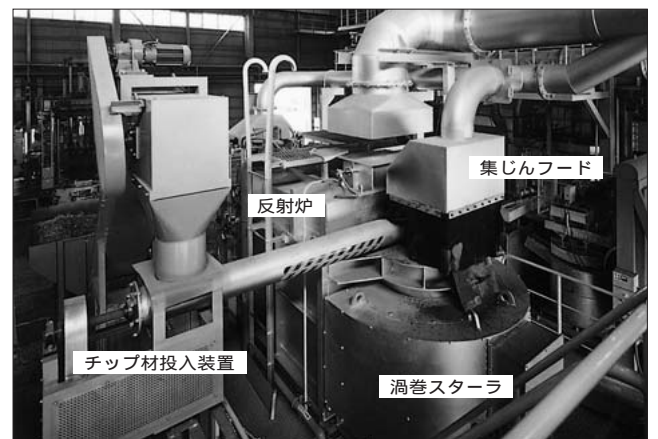


表1 開発機の仕様

渦巻スターラ部		電気仕様	
溶解室内径	800mm	コイル	2極三相
耐火物厚み	200mm	コイル電圧	440V
湯面高さ	600mm	コイル電流	520A
反射炉	20t	コイル周波数	1~5Hz
チップ材溶解能力	2t/h	実質容量	65kW

- (7) 溶湯のかくはん運転, 停止, 回転方向, 回転力などボリューム一つで簡単に調整でき操作性に優れている。
- (8) チップ材溶解と従来のインゴット溶解とが併用できる。さらに渦部を停止した従来と同様の使用も可能である。

5 解析検証

渦巻スターラに求められる性能はいうまでもなく強力なかくはん力であり, これは式1に示したように溶湯中の磁束密度の二乗に比例して大きくなる。したがって, いかに磁束を大きくできるかが設計時のポイントとなる。また, 渦巻スターラはチップ材の巻込みと溶解だけでなく, 反射炉内も含めた溶湯全体のかくはんも行わなければならない。反射炉内の溶湯のかくはんは, 湯の温度を均一にし, 製品の均質化など品質管理の面からも重要である。このかくはんには, 渦巻スターラの取付位置や溶湯が行き来する連通管の形状, 位置などが左右する。

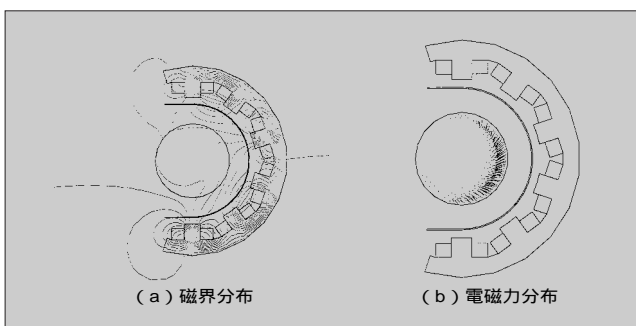
ここでは, 磁場や電磁力さらに溶湯全体のかくはんを考慮した設計を行えるツールを開発することを目的として, 渦巻スターラの電磁, 流体および熱現象をコンピュータを用いて数値的に解析する方法について検討した。

表2に解析検討に使用したソフトウェア名, 解析手法を示す。表に示す四つのプログラムを用いて, 設計に必要な種々の問題をコンピュータで検討することができる。なお, 磁界を解く二つのソフトウェアは電磁誘導用に特別に開発・改良したものであり, 温度や流れとの連成解析を行うことができる。

表2 解析ソフトウェアと検討事項

解析場	解析ソフトウェア名または手法	検討事項
磁界	有限要素法	スターラが発生する磁界と溶湯に働く電磁力
	電気ベクトルポテンシャル法 (板要素近似)	スターラのケース (鉄皮) に発生する熱損失 鉄皮に設けたスリットの効果
温度	ANSYS (Swanson Analysis Systems)	耐火物, 鉄皮の温度分布
流れ・温度	PHOENICS (CHAM)	スターラ内溶湯の渦巻き 連通管の形状と溶湯流れ スターラの取付位置とかくはんの効果

図5 二次元有限要素法を用いた磁界解析結果



5.1 解析検証結果

以下に解析結果の一例と, 実際の開発機を使った解析結果の精度評価を示す。

(1) 磁界解析

数値的に検討をする際には三次元解析のほうが望ましいが, 本ケースでは補正関数を用いることにより三次元問題を二次元問題に置き換えることができるので二次元解析で検討した。ここでは渦巻スターラの磁界解析において, 二次元解析 (有限要素法) を適用しその評価を行った。図5の (a) は磁界, (b) は電磁力の解析結果である。運転条件は, 周波数 5 Hz, 電流 520 A である。図6は測定値と解析値を比較したものである。二次元解析では, 上下端での漏れ磁束を考慮していないため実測よりも大きな値になっている。しかし, 中心に向かって磁束密度が減衰する様子 (分布) は同じであるので, 定量的な検討に用いることができる。

(2) 溶湯の流れ, 温度解析

渦巻スターラの反射炉への取付位置や連通管形状は, 流体解析ソフトウェアでかくはん状況を計算して検討した。今回は解析範囲を溶解室, 連通管, 反射炉と三つに分けてモデルを簡単にし検討した。さらに反射炉内の溶湯の温度分布の解析も行い, かくはん効果を温度分布でも評価した。

図7は反射炉内の溶湯流れの速度分布, 図8は反射炉内の温度分布の解析結果 (等温線) である。このように, 本

図6 磁界解析結果と実測の比較 (溶湯室が空の場合)

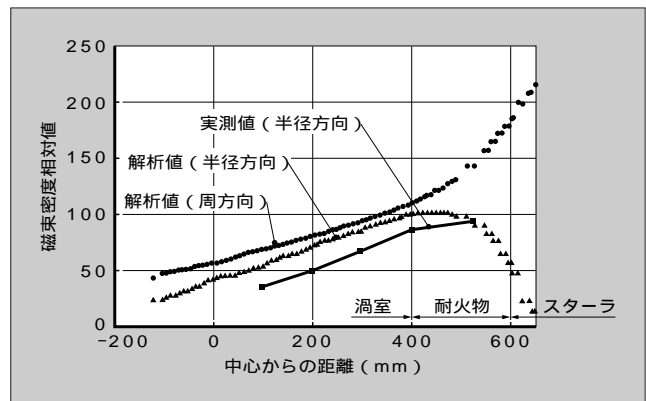


図7 反射炉内中層部の溶湯の流れ (斜視図)

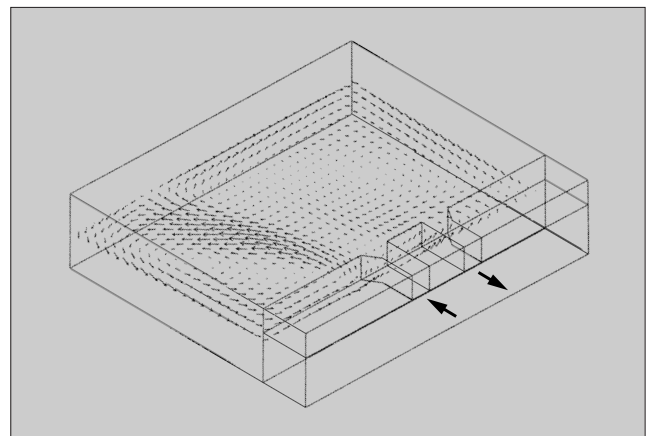
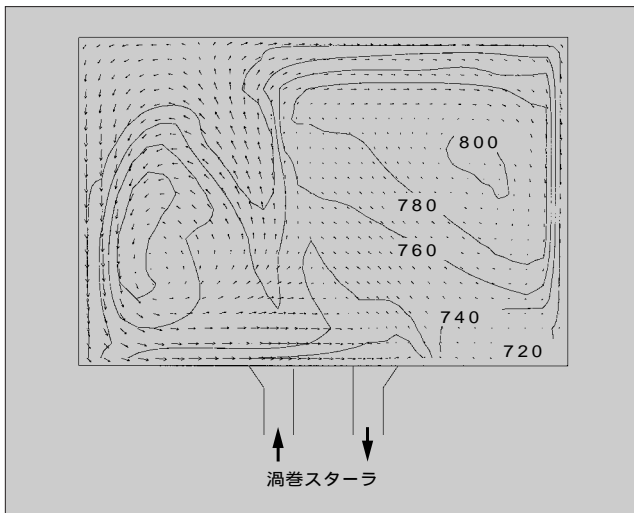


表3 渦巻スターラ用耐火物試験結果まとめ

分類		No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		品名など		メーカーA	メーカーB	メーカーC			メーカーD		メーカーE				
		種類		サンプルA1	サンプルB1	サンプルC1	サンプルC2	サンプルC3*	サンプルD1	サンプルD2	サンプルE1	サンプルE2	サンプルE3	サンプルE4	サンプルE5
耐摩耗性試験	回転ドラム法 (%/24h)	冷間	1回目	2.0	59.5	9.5	8.9	—	6.1	14.7	4.4	2.2	6.1	7.2	12.2
			2回目	2.2	74.2	9.2	10.7	—	8.6	19.2	4.0	2.4	7.8	6.7	11.6
		熱間	1回目	3.5	56.7 %/8h	7.0	8.1	—	5.8	11.2	4.8	2.9	7.7	7.1	5.8
			2回目	2.9	69.8	6.3	6.0	—	5.7	9.8	4.3	2.4	8.2	7.5	7.0
	吹付け法 (cm ³)	熱間のみ	1回目	3.3	17.6	2.7	3.3	1.8	3.6	2.9	2.8	2.1	—	—	—
			2回目	3.4	18.2	2.7	3.3	1.9	3.6	3.0	2.3	2.0	—	—	—
耐侵食性試験	1回目	材料溶解状態	半溶解	半溶解	半溶解	半溶解	—	ほぼ溶解	ほぼ溶解	半溶解	半溶解	半溶解	半溶解	半溶解	ほぼ溶解
		浸透状態	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	—	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし
	2回目	材料溶解状態	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解	—	—	—
		浸透状態	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	浸透なし	—	—	—

* : サンプルC3はサンプルC1の耐摩耗性強化品

図8 反射炉内湯面付近の溶湯速度分布と等温線



手法を用いると溶湯のかくはん状況をビジュアルに評価できる。温度や流れ解析の結果を定量的に確認することは溶湯の表面にスラグがあるため難しいが、反射炉表面に対する目視およびサーモビュア確認結果では溶湯の流れは解析とよく一致しており、設計ツールとしての有用性を確認できた。

5.2 耐火物薄肉化の検討

溶湯に働く力は渦巻スターラと溶湯間に介在する耐火物が薄いほど効率的であるため、耐火物を薄肉化するための耐火物材質の検討およびその材質の高温溶湯による耐摩耗性、寿命の評価を行った。

5.2.1 耐火物薄肉化による特性比較

前節の解析技術により、耐火物の薄肉化による渦巻スターラの特長変化を検討した結果を図9に示す。

耐火物厚さを 206 mm から 156 mm に薄肉化することにより反射炉鉄皮での損失が約22%減、溶湯への入力が約23%増の結果となっている。これは耐火物を薄肉化することにより、渦巻スターラの効率が向上することが本データからいえる。

5.2.2 耐火物の耐摩耗性・耐侵食性評価実験結果

(1) 試験内容

耐火物の薄肉化による耐火物寿命および最適耐火物の選定をするため、耐摩耗性試験、耐侵食性試験を行った。耐摩耗性試験については、回転ドラム式と吹付け法の2方法を実施した。

(2) 実験結果と考察

耐摩耗性試験、耐侵食性試験の結果は、表3、図10、図11のとおりである。

今回のそれぞれの試験結果により次のことがいえる。

- (a) サンプル B1 を除き、熱間摩耗性は回転ドラム式では、数値的には4倍の差、吹付け法では2倍の差が認められるものの、大きな差はないと考える。
- b) 侵食試験もサンプル B1 を除き、アルミニウムと耐火物の反応、損耗は認められない。
- (c) アルミニウムのはがれ性は、サンプル C2 が力を加えずに取れた以外は、材料表面にアルミニウムが食い込み、簡単に取れなかった。

この結果から、サンプル C2 を採用した。

また、誘導炉と渦巻スターラの摩耗性比較を行うため、それぞれの耐火物厚さ 100 mm のときの溶湯外周における流速、磁束密度、磁束浸透深さの比較を行った。

表4から、高周波誘導炉よりも流速が速く、物理的摩耗は若干大きくなるが、磁束密度が約1/6と小さく、浸透深さも10倍と大きいことにより、炉壁の溶湯接触部の局部過熱が少なくなるため、耐火物厚さを現状の200 mm から高

図9 耐火物の薄肉化による特性変化

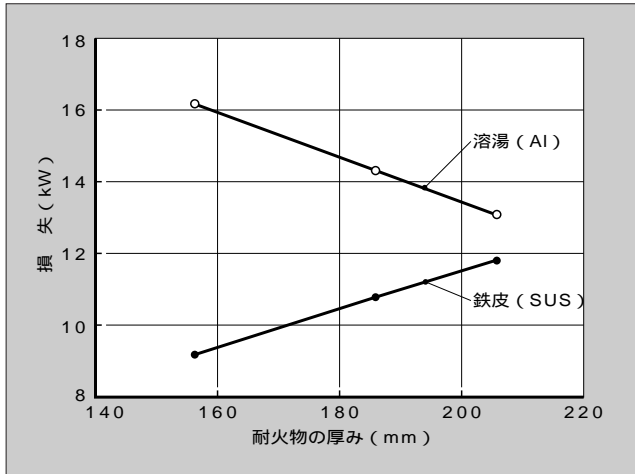
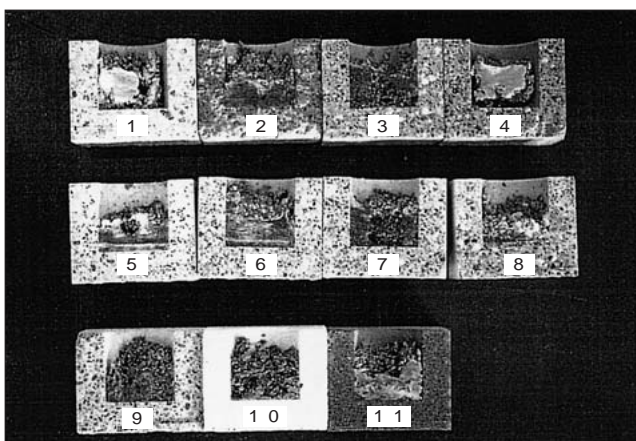


図10 耐摩耗性試験結果 (回転ドラム式)



図11 耐侵食性試験結果



周波誘導炉と同等の100mmにしても、耐火物寿命は低下しないと判断し、現在実機検証中である。その使用結果からは、溶損律速は物理的摩耗よりもアルミニウムの浸透、反応による稼働面の変質、構造スポール性などが主因になっている。

表4 誘導炉との比較

分類 項目	高周波誘導炉	スターラ
流速	2m/s	2.5m/s
磁束密度	0.3T { 3,000 Gs }	0.052T { 520 Gs }
浸透深さ	1.17cm (at 500Hz)	11.7cm (at 5Hz)

表5 実験操業条件と結果

溶解材料	アルミニウムチップ材 (前処理)
チップ材処理能力	2t/h
投入温度	室温
溶解歩留り	98%以上
溶解原単位	40 × 10 ⁴ kcal/t (リジエネバーナ)
反射炉容量	20t
炉内雰囲気温度	1,000
予熱空気温度	900 ~ 1,000
渦巻スターラ電気容量	65kW

⑥ 実験操業結果

本開発機における実験操業条件と結果を表5に示す。チップ材溶解に対する溶解歩留り改善効果は期待以上の値を示し、従来方法の90~92%に対し溶解歩留りが6%以上改善された値となり、渦巻スターラの電気容量を32.5kWh/tとすると、電気エネルギーコストよりも大きな改善効果を生み出す結果となる。

さらに、反射炉耐火物の薄肉化により渦巻スターラ本体の小形化が可能となり、イニシャルコストを低減できた。耐火物寿命評価については、今後実機により連続運転検証での確認をしていきたいと考えている。

⑦ あとがき

今後、アルミニウム缶のリサイクル率が向上するにつれ、そのリサイクルシステムが重要となってくるのは明らかであり、UBC材の直接溶解法、電気エネルギーコストの低減、小バッチ炉への対応などの課題を解決して、環境問題改善およびリサイクル業界への一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) アルミ製容器包装リサイクルハンドブック 98年度版, アルミ缶リサイクル協会
- (2) 池田泰幸: 渦巻スターラ, 富士時報, Vol.68, No.4, p.242-246 (1995)
- (3) 松尾孝ほか: 電磁力応用アルミ缶リサイクリングシステム, 第12回電熱大会予稿集, p.47-54 (1997)
- (4) 松尾孝ほか: 電磁力応用アルミ缶リサイクリングシステム, エレクトロヒート, No.98, p.8-13 (1998)

高周波インバータ式 ICP (誘導結合形熱プラズマ) トーチ

榊原 康史 (さかきばら やすし)

片桐 源一 (かたぎり げんいち)

1 まえがき

プラズマとは、固体、液体、気体に続く第四の状態といわれ、分子や原子が電離して電子とイオンが電気的中性に存在する状態である。近年、環境保全分野において廃棄物減容処理、有害物の無害・安定化の要求が高まっており、これにプラズマエネルギーの利用が注目されている。この分野で利用されるプラズマは熱プラズマと呼ばれる性質のもので、中性ガス分子の温度が電子やイオンの温度とほぼ同じ超高温電離気体である。

熱プラズマ発生の一つに高周波誘導結合による方法があり、このプラズマは高周波誘導結合形熱プラズマ (ICP: Inductively Coupled Plasma) と呼ばれ、その発生装置は ICP トーチと呼ばれる。一般に ICP は、数 MHz の周波数で駆動され、その大きさは直径で 6cm 程度である。ICP は、電極間アーク放電を利用する直流プラズマに比べ、エネルギー効率と出力熱量の点で劣っており、実用化のためにはこの問題の解決が不可欠である。そのためには、特に高周波電源の損失改善とプラズマサイズの拡大が必要である。

本稿では、ICP の低周波化による MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) インバータの適用とプラズマサイズの拡大について述べる。

2 ICP の原理

図 1 においてワークコイルに通電された高周波電流は、時間 t で交番する磁界を発生し、磁束密度 B の変化に従った式 1 で表される誘導電界 E を生じる。この電界により電子を加速すると、プラズマが加熱・維持される。プラズマへの供給エネルギーは、式 2 に示すプラズマ導電率と印加電界で決定されるが、導電体であるプラズマへの電界浸透は、式 3 に示す、周波数とプラズマの性質で決まる表皮深さ に依存する。

$$\text{ICP を加熱する電界の発生: } \text{rot } E = - \frac{B}{t} \dots\dots(1)$$

$$\text{プラズマへの供給電力: } P = E^2 \dots\dots(2)$$

$$\text{表皮深さ: } = \sqrt{\frac{2}{\mu}} \dots\dots(3)$$

μ : 透磁率

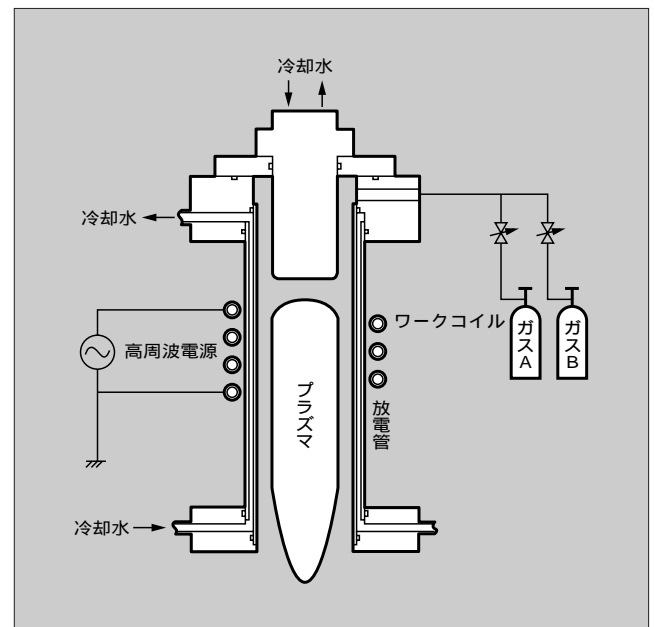
σ : 導電率

ICP は基本的に無電極でプラズマ生成が可能であり、直流プラズマと比較して電極材の損耗による汚染・寿命の問題を解消している。また、各種の反応性ガスを使用した酸化雰囲気や還元雰囲気の選択が自由である。

3 高効率・大出力化への指針

ICP は、直流プラズマに比べるとエネルギー効率が悪く、また熱出力も小さい。ICP のエネルギー損失としては、高周波電源の損失、誘導コイルのジュール損失、プラズマが

図 1 ICP トーチの基本構成



榊原 康史
スパッタ装置、ECR プラズマ装置など、放電プラズマ応用技術の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所応用装置研究所プロセス技術グループ副主任研究員。



片桐 源一
イオン注入装置、ECR プラズマ装置など、放電プラズマ応用技術の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所応用装置研究所プロセス技術グループ副主任研究員。

図2 プラズマ維持最小磁界強度の放電管直径依存性

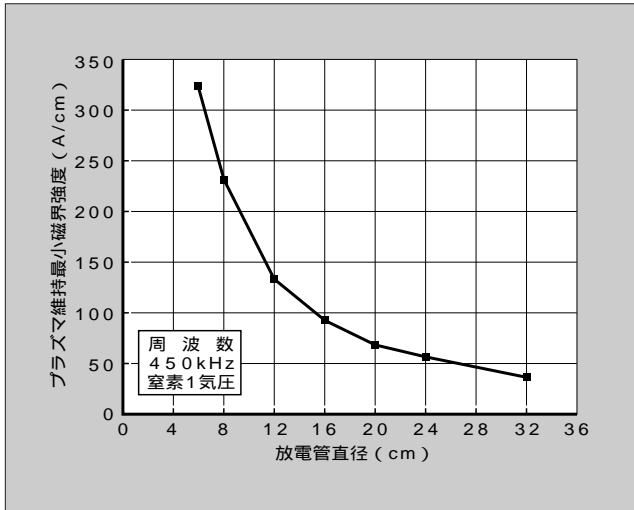
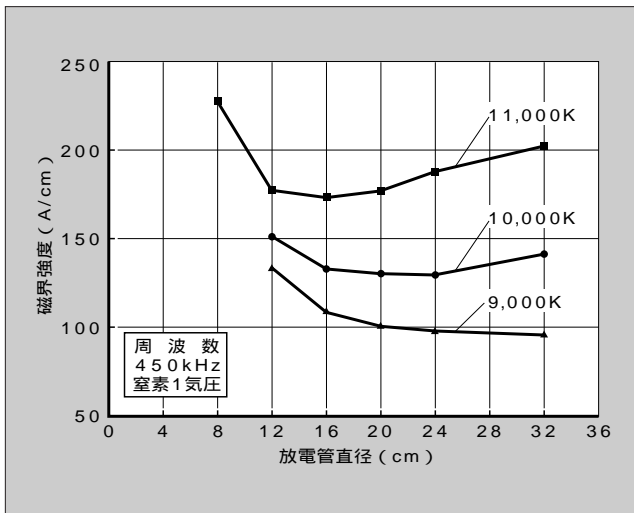


図3 各プラズマ温度を得る磁界強度の放電管直径依存性



ら放電管への熱伝導損失がある。高周波電源の損失は入力エネルギーの約50%を占める。これは、周波数が数 MHz 以上かつ容量が数十 kW 以上であるために、電源素子として真空管が用いられるためである。電源素子は損失の小さい半導体が望ましいが、このためには ICP 駆動周波数を MHz から数百 kHz 領域に下げる必要がある。さらに、誘導コイルのジュール損失は通電する電流値(すなわちプラズマ維持に必要な印加磁界強度)に依存し、放電管への熱伝導損失はプラズマ温度に依存する。これら二つの損失はプラズマの発生条件に依存しており、装置構成の最適化が必要である。

一方、熱出力の向上には、より大きなプラズマ口径が求められる。式3に示すように、周波数が低くなるにつれて電磁界の表皮深さが大きくなり、プラズマに浸透する加熱用誘導電流の流れる領域は大きくなる。すなわち、高周波電源として現在使用されている MHz 領域からより低い kHz 領域に移行することによって、より大きな口径のプラズマが発生できる可能性がある。このように、ICP の高効率・大出力化の指針は低周波化である。

4 数値解析によるトーチサイズの検討

数値解析は、プラズマを熱の発生とその移動ととらえ、空間におけるエネルギー保存式⁴⁾、質量保存式⁵⁾を簡単化のために円筒座標系の一次元問題とした。

$$C_p \frac{T}{t} = - C_p V_r \frac{T}{r} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) - W_{rad} + E^2 \dots (4)$$

$$\frac{1}{t} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r V_r) = 0 \dots (5)$$

ここで、

n : プラズマ密度

C_p : 比熱

T : プラズマ温度

V_r : r 方向の流速

λ : プラズマ熱伝導率

E : 電界強度

σ : プラズマ導電率

W_{rad} : 熱放射損

r : 半径

t : 時間

である。解析における周波数は、現在実用化されている MOSFET インバータの最大周波数に収まるよう 450 kHz とした。

図2は、窒素1気圧のプラズマを維持するのに必要な最小印加磁界強度の放電管直径依存性を示すものである。放電管の直径12 cm 付近を境に、直径が小さくなるとプラズマ維持磁界強度は急激に大きくなり、直径が大きくなると徐々に低下する。つまり放電管直径が小さい場合は、プラズマを維持するためにより大きな印加磁界強度が必要となり、これは、より大きな出力電流の電源を必要とし誘導コイル部のジュール損失も大きくなることを意味する。このことから周波数 450 kHz 下では、放電管直径を12 cm 以上にすることが望ましいと分かる。

一方、図3は窒素1気圧における 9,000 ~ 11,000 K の各プラズマ温度を得るために必要な印加磁界強度の放電管直径依存性である。管直径が小さいほど、同じプラズマ温度を得るためには大きな印加磁界強度が必要であり、この特性は先と同様である。しかし図3では、管直径が20 cm より大きい領域において、同じプラズマ温度を得るのに必要な磁界強度が大きくなっている。この傾向はプラズマ温度が高くなるほど顕著である。このように、周波数が 450 kHz では、最適な放電管直径は12 ~ 20 cm である。

これらの特性は、管直径 d と表皮深さ δ の比 d/δ で決定される。これを図4に従って説明する。まず d/δ が大きい場合 [図4の(1)] は、注入電力がプラズマ外周表面に集中し、プラズマ温度は外周が最も高くなる。このため、プラズマ外周表面から放電管への熱伝導によるエネルギー損失が大きくなる。このエネルギー損失分を補うため、所望のプラズマ温度を維持するのに必要な磁界強度は大きくなるのである。次に d/δ が小さい場合 [図4の(3)] は、注

図4 d/ によるプラズマ温度分布の変化

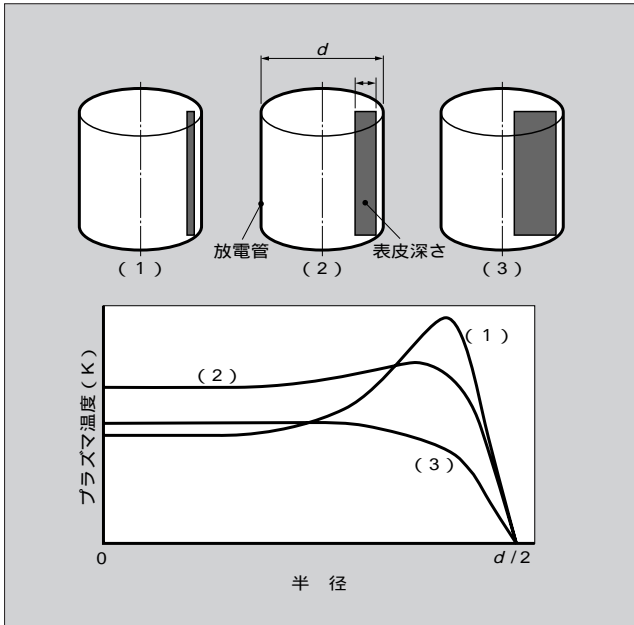


図5 試作 ICP トーチシステムの電気回路

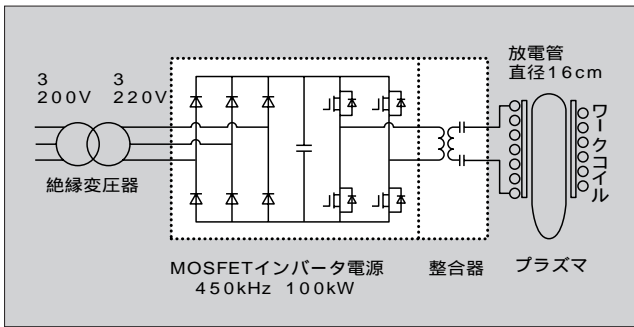


図6 アルゴンプラズマの発生状況



入電力がプラズマ全体に分散する。その結果、プラズマ温度は全体に低くなる。プラズマに注入される電力は式2に示したようにプラズマ自身の導電率にも依存しているので、プラズマ温度が上がらないとプラズマに電力が入りにくい。結果としてこのプラズマ温度の低さを補うために、所望のプラズマ温度を維持するのに必要な磁界強度が大き

図7 窒素プラズマ温度の磁界強度依存性

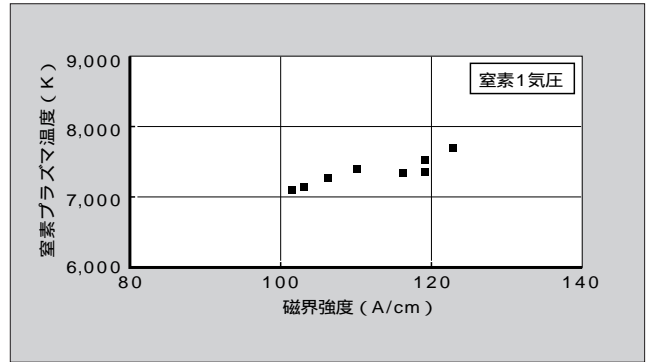
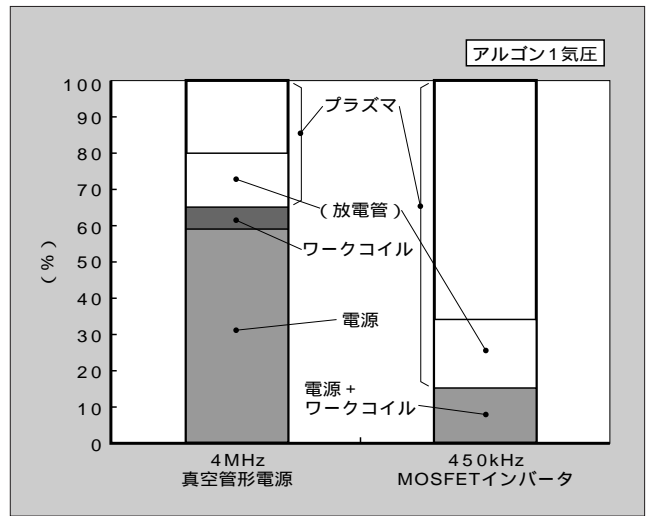


図8 試作 ICP トーチのエネルギー収支



くなる。

5 試作 ICP トーチの実験結果

数値解析により、MOSFET インバータ適用による低周波化を目的として放電管直径16 cm の ICP トーチを試作した。これは、従来の ICP 口径 6 cm に対し面積比で 7 倍の大きさである。仕様と実験回路を図5に示す。

この試作トーチにおいて、アルゴンプラズマおよび窒素プラズマの発生を大気圧下で確認した。アルゴンプラズマの発生状況を図6に示す。また、図7は窒素プラズマ温度の測定結果である。図7中の磁界強度およびプラズマ温度はコイル高さの中心値である。プラズマ温度は、励起原子発光スペクトルを用いた2線強度比法⁽³⁾により求めている。磁界強度を、図3に示した数値解析による結果と比較すると、ほぼ同等の磁界強度でプラズマが発生できていることが分かる。しかし、プラズマ温度自体は数値解析の結果に比べ低い。これは、解析モデルを一次元としたためで、実際のプラズマではZ軸方向への熱移動が発生するため温度が低下しているものと考えられる。今後はモデルの二次元化により、解析精度を向上していく予定である。

また、MOSFET インバータを用いた電源効率改善の効果を図るために、電源の入力からみたエネルギーを測定し、

これを従来の 4 MHz 真空管形電源を用いた場合の ICP トーチ⁽⁴⁾と比較した。各部の熱損失は冷却水流量と冷却水の温度上昇から求めている。図 8 にその測定結果を示す。プラズマへの投入エネルギー効率は、従来の 35% から 85% まで改善された。

⑥ あとがき

ICP の低周波化は、プラズマの大口径化と MOSFET インバータの適用を可能とした。これは、エネルギー効率が低いという ICP の欠点を克服するものであり、工業的利用への大きな前進である。さらなる ICP の低周波化が可能かどうかは今後の課題である。大口径化が進むにつれて、放電管の熱的強度、ガス流の対称性などの問題が発生すると考えられる。

一方、ICP 技術の応用展開としては、トーチ本体を含め

利用対象に合わせたシステム全体の最適化を図ることが重要である。今後、実用化に向けたプロセス開発を進めると同時に、応用システムの開発に注力していく。

最後に、ICP の検討を進めるにあたり、数値解析に多大なご支援をいただいた金沢大学工学部電気情報工学科作田忠裕教授に深謝する次第である。

参考文献

- (1) Yoshida, T. : The future of thermal plasma processing. Material Trans., JIM. Vol.31, No.1, p.1-11 (1990)
- (2) 片桐源一・榊原康史：廃棄物処理用 ICP トーチ，富士時報，Vol.70，No.8，p.441-444 (1997)
- (3) 山本学・村山精一：プラズマの分光計測，日本分光学会出版センター，p.117-119 (1995)
- (4) 榊原康史ほか：大気圧高周波誘導結合プラズマの熱収支，電気学会全国大会資料，p.4-464 (1997)

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
1,200 V MCCT における動特性解析	富士電機総合研究所 " " " "	岩穴 忠義 岩室 憲幸 原田 祐一 小野沢 勇一 関 康和	平成 10 年電気学会全国大会 (1998-3)
零ベクトルを利用した新形単相 ---- 三相高力率変換回路	富士電機総合研究所 "	伊東 淳一 藤田 光悦	
交流チョッパ技術に基づく多機能電源の諸特性	富士電機総合研究所 " 東京システム製作所	大熊 康浩 黒木 一男 山本 弘	
ソフトスイッチング回路と三巻線トランスを用いたコモンモード電流抑制方式	富士電機総合研究所	五十嵐征輝	
自励式直並列形電力系統補償装置の制御方法と性能検証	富士電機総合研究所 "	徳田 寛和 江口 直也	
直接変換方式による直列形電圧安定化装置の瞬時電圧低下補償動作	富士電機総合研究所 "	吉岡 康哉 小西 茂雄	
トルク制御系の応答を考慮した二慣性系に対する制御器の設計法	産業・計測システム事業部 "	西田 英幸 戸高 雄二	
MATLAB を利用した船舶用電気推進システム解析	富士ファコムシステム 交通・特機事業部	壹岐 浩幸 西山洋一郎	
光学濃度に対する電気集じん装置の影響	富士総合サービス 社会システム事業部	高橋 武男 高松 武史	
電気集じん装置における再飛散に対する界面活性剤の効果	富士総合サービス	高橋 武男	
2 段式電気集じん装置における集じん電極板上の粒子捕集状態	富士総合サービス 社会システム事業部 "	高橋 武男 川上 一美 高松 武史	
MOSFET インバータによる大口径誘導熱プラズマの発生	富士電機総合研究所 " " "	榊原 康史 片桐 源一 降矢 正保 虎口 信	
表皮効果を考慮したかご形誘導電動機のモデル	富士電機総合研究所	奥山 吉彦	

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
かご形誘導電動機の横流抵抗	鈴 鹿 工 場	篠崎 信行	平成 10 年電気学会全国大会 (1998-3)
PAM 方式極数変換誘導電動機のトルク特性	富士電機総合研究所 鈴 鹿 工 場	奥山 吉彦 篠崎 信行	
PWM インバータ駆動誘導電動機の電磁騒音	富士電機総合研究所	奥山 吉彦	
油入変圧器絶縁紙の測色による劣化診断	変電システム製作所 " " 富士電機総合研究所	西山 彰一 和田 元生 宮 良一 仲神 芳武	
変圧器短絡試験時の低電圧インパルス試験による評価方法	変電システム製作所 " "	松山 亮 和田 元生 中島 恵一	
三次元有限要素法による三相熱動過負荷継電器の熱伝導解析	吹 上 工 場	大上 聡克	
酸化物超電導並列導体における交流損失 2)	原子力・環境事業部 富士電機総合研究所	今野 雅行 能瀬 真一	
超伝導並列導体の電流分布 2)	原子力・環境事業部 富士電機総合研究所	今野 雅行 能瀬 真一	
700 系新幹線電車用主変換装置の開発	交通・特機事業部	井上 亮二	
電力系統シミュレータ用高調波負荷模擬装置の開発	富士電機総合研究所 "	勝野 徹 川田 信哉	
Continuation Power Flow の大規模系統解析への適用	富士電機総合研究所 "	福山 良和 中西 要祐	
放射状系統向け高速三相不平衡潮流計算プログラムの開発	富士電機総合研究所 " "	福山 良和 渡辺 拓也 中西 要祐	
確率潮流計算による分散電源導入評価の検討	富士電機総合研究所	中西 要祐	
河川状況変化を考慮したダム流入量予測	富士電機総合研究所 " "	飯坂 達也 松井 哲郎 植木 芳照	
負荷融通への ES と RTS によるハイブリッドシステムの適用	富士電機総合研究所 " "	藤田 超徹 福山 良和 中西 要祐	
電圧形変換方式による超電導エネルギー貯蔵システム用交直変換装置の高速制御	東京システム製作所 " 富士電機総合研究所 "	鵜澤 毅 鯉江 和裕 江口 直也 坊野 敬昭	
各種ガスの導電率、熱伝導率の特性比較	富士電機総合研究所 "	杉山 修一 岩井 弘美	
GIS 用新形制御装置の開発	変電システム製作所 " "	田之倉 一夫 飛山 良弘 隅 和憲	
蛍光ファイバ型部分放電検出器の長期性能評価	富士電機総合研究所 " 変電システム製作所	畠山 吉文 宮本 昌広 金子 英男	
半導体を用いた無誘導解消型電力限流器 ---- 限流器インピーダンスの対称性 ----	富士電機総合研究所 "	磯崎 優公 森田	
短絡試験用限流リアクトル	富士電機総合研究所 " 変電システム製作所 "	中島 昌俊 岩井 弘美 若月 貞男 大久保 堅司	
同期発電機用単独運転検出方式の検討 (変動式から補償方式への等価変換について)	富士電機総合研究所 " "	中沢 親志 深井 裕幸 千原 勲	
誘導発電機用単独運転検出方式の検討 (逆潮流連系なしの同期発電機混在の場合)	富士電機総合研究所 " "	中沢 親志 深井 裕幸 千原 勲	
有接点リレーにおけるバウンスに関する研究	富士電機総合研究所	鈴木 健司	

主要営業品目

電 機

電動機，可変速装置，誘導加熱装置，誘導炉，産業用電源装置，クリーンルームシステム，非常用電源装置，コンピュータ用電源装置，船用電気品，車両用電気品，変圧器，遮断器，ガス絶縁開閉装置，電力変換装置，原子力機器，火力機器，水力機器，発電機，新エネルギー発電システム，発電設備用保護・監視・制御装置，発電設備用コンピュータ制御装置，誘導電動機，ギヤードモータ，ブレーキモータ，ファン，ポンプ，ブロワ，電磁開閉器，操作・表示機器，制御リレー，タイマ，ガス関連機器，配線用遮断器，漏電遮断器，限流ヒューズ，高圧受配電機器，汎用モールド変圧器，電力制御機器，プログラマブルコントローラ，プログラマブル操作表示器，多重伝送システム，汎用インバータ，サーボシステム，加熱用インバータ，可変速電動機

制御・情報・電子デバイス

コンピュータ制御装置，運転訓練・系統解析シミュレータ，電力量計，放射線モニタリングシステム，保護・監視・制御装置，マイクロコントローラ，水処理装置，遠隔制御装置，オゾン処理システム，電気集じん機，FA システム，電話自動選択着信装置，レーザ応用装置，ビデオセンサ応用装置，工業計測制御機器，分析機器，放射線計測機器，OCR，磁気記録媒体，複写機・プリンタ用感光体，パワートランジスタ，サイリスタ，シリコン整流素子，集積回路，パワーハイブリッド IC，サージアブソーバ，半導体センサ，スイッチング電源

業務用民生機器ほか

自動販売機，コインメカニズム，紙幣識別装置，貨幣処理システム，飲料ディスペンサ，自動給茶機，冷凍冷蔵ショーケース，ホテルペンダシステム，カードシステム

富士時報 第 71 巻 第 5 号 平成 10 年 4 月 30 日 印刷
平成 10 年 5 月 10 日 発行
定価 525 円 (本体 500 円・送料別)

編集兼発行人 沢 邦 彦

発行所 富士電機株式会社内
「富士時報」編集部 〒100-8410 東京都千代田区有楽町一丁目 12 番 1 号
(新有楽町ビル)
電話 東京 (03) 3211 - 7111 (大代表)
〔編集室：電話 東京 (03) 3211 - 1168〕

印刷所 富士電機情報サービス株式会社 〒151-8520 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号
(新宿コヤマビル)
電話 東京 (03) 5388 - 8241

発売元 株式会社オーム社 〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地
電話 東京 (03) 3233 - 0641 (代表)
振替口座 東京 6 - 20018

富士時報論文抄録

誘導加熱の現状と展望

岡崎 金造 川崎 道夫
富士時報 Vol.71 No.5 p.249-254 (1998)

誘導加熱はその優れた特質から、現代生活を支える重要な要素技術として発展している。それは、優れた省エネルギー性と環境問題への貢献、生産性の向上の3本柱である。本稿では電気加熱のなかでの位置づけ、需要動向をふまえ各分野別技術動向について述べる。また、今までの富士電機の誘導加熱の取組みと、そのなかの解析技術、高周波電源、システム開発についても述べる。21世紀の技術革新を支えるためにはなくてはならない技術となっている。

工業電熱製品への解析技術の適用

貝沼 研吾 佐久間 政喜
富士時報 Vol.71 No.5 p.255-258 (1998)

近年、コンピュータを使った数値解析技術が電気製品の開発設計に盛んに用いられるようになってきた。富士電機の工業電熱製品においても、電磁界、熱、構造、流体などの場をコンピュータを用いてシミュレートし、仕様の決定や構造の最適化、開発期間の短縮などに役立っている。本稿では、誘導加熱および電磁力応用機器に適用したシミュレーションについて、代表的な解析手法と計算例を紹介する。

浮揚溶解装置 (CCLM) の進展

只野 英顕 貝沼 研吾
富士時報 Vol.71 No.5 p.259-263 (1998)

金属をるつぼ内で空中に浮かせて溶解する浮揚溶解装置について、これまでの進展を述べる。溶解量 kg 級の安定浮揚溶解に際して、二重電源励磁方式の採用、るつぼ底部形状の最適化を行った。工業化に向けて、るつぼ底部からの非接触出湯、溶解量 50 kg 級の大容量化を達成した。富士電機ではこれまでに浮揚溶解装置「CCLM」をシリーズ化したのをはじめ、さまざまな分野への適用を図るために、大容量 CCLM、連続鋳造 CCLM、高真空 CCLM などの新しい製品を創出している。これらの製品群について述べる。

浮揚溶解装置 (CCLM) の特長と溶解実績

篠倉 恒樹 武 達男
富士時報 Vol.71 No.5 p.264-267 (1998)

底部出湯式大容量浮揚溶解装置 (CCLM) による各種金属の溶解・出湯と材質評価を行い、その特長を実証した。浮揚溶解の原理、CCLM の基本構造と特長、他の溶解法との比較を述べ、製作した3種の実験装置 (2 kg 真空溶解, 50 kg 溶解, 連続鋳造) の外観と仕様を示した。溶解実績例は、高純度金属 Co と TiAl の非汚染溶解、アルミナ含有鉄の介在物除去による金属清浄化、Cu と Cr の均一混合溶解、50 kg の鋳鉄やステンレス鋼の溶解出湯、鉛および鋳鉄の丸棒連続鋳造などである。CCLM の応用分野についても言及した。

高周波誘導加熱電源

久本 正昭 伊藤 豊 野村 年弘
富士時報 Vol.71 No.5 p.268-273 (1998)

電力用半導体素子を応用した高周波誘導加熱装置は、クリーンで高効率そして制御性に富んだ加熱システムとして広く普及しつつある。富士電機では次の3種の加熱用インバータ系列を製作している。
(1) サイリスタインバータ (電流形) ~ 10 kHz, ~ 12 MW 水冷
(2) 汎用 IH インバータ (IGBT 電圧形) ~ 50 kHz, ~ 20 kW 風冷
(3) MOSFET インバータ (電圧形) ~ 500 kHz, ~ 1,000 kW 水冷
これらのインバータの特長、仕様、回路構成などについて述べるとともに、主回路の方式、電流形と電圧形について簡単に述べた。

亜鉛スクラップ鋼板リサイクル用新誘導溶解システム

中谷 正博 植村 浩
富士時報 Vol.71 No.5 p.274-279 (1998)

鋳鉄鋳物工場における溶解主原料である鋼板くず中に、亜鉛めっき鋼板くずの混入が避けられない状況になっている。しかし、亜鉛めっき鋼板くずを従来の誘導炉で溶解すると、亜鉛による耐火物の寿命低下、鋳物品質の低下、溶解作業環境の汚染など、多くの問題があった。これらの問題に対して開発したこの誘導溶解システムは、亜鉛めっき鋼板くずのリサイクル、省エネルギー溶解、溶湯性状の改善など、数多くの特長を有している。本稿では、このシステムの開発背景、装置構成、評価試験、特長などについて述べる。

省エネルギー形誘導溶解炉

加納 利行 古城 靖彦
富士時報 Vol.71 No.5 p.280-284 (1998)

地球規模での環境保全が叫ばれるなか、工業炉においても環境面および省エネルギー面での要求が高まっている。本稿では、環境ならびにエネルギーの両面から見た誘導炉の利点について述べる。また、富士電機の高周波誘導炉の最大の特長である高効率、省エネルギー性、ならびに独自の誘導炉技術についても述べる。

最近の電縫管溶接装置

倉田 巖 中村 清和
富士時報 Vol.71 No.5 p.285-287 (1998)

電縫管は、帯状の金属板を整形し溶接を行うことで製造される。電縫管溶接用電源として、従来は真空管を用いた数百 kHz の高周波発振器が適用されてきたが、発振器の効率が低く、省エネルギーおよび合理化の観点から電源の高効率化が望まれていた。富士電機は高周波 MOSFET インバータを適用した高効率な電縫管溶接装置を開発し、現在、実ラインで稼働している。本稿では電縫管の溶接原理、溶接装置の構成、真空管発振器との溶接能力比較について述べる。

Abstracts (Fuji Electric Journal)

Application of Numerical Analysis to Industrial Electrical Heating Products

Kengo Kainuma Masaki Sakuma
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.255-258 (1998)

Computer-based numerical analysis has recently come into frequent use for the development and design of electrical products. Fuji Electric utilizes simulation with computer for the electromagnetic field, heat flow, structure, and fluid flow of industrial induction heating products to optimize specifications and structures and reduce lead time. This paper introduces some typical examples of analytical techniques and calculation results in simulations applied to induction heating and electromagnetic-force-applied equipment.

Present Status and Prospects for Induction Heating

Kinzou Okazaki Michio Kawasaki
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.249-254 (1998)

Induction heating has been developed as a key technology supporting present-day living because of its superior characteristics. It reduces energy consumption, contributes to the protection of environment, and improves productivity. This paper describes its technical trends classified by application fields from the viewpoint of its position in electric heating and the trend of demand. Also it refers to Fuji Electric's achievements in induction heating technologies, particularly developments in numerical analysis, high-frequency power supply, and systems.

Metallurgical Advances in Cold Crucible Levitation Melting Equipment

Tsuneki Shinokura Tatsuo Take
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.264-267 (1998)

The features of the cold crucible levitation melting (CCLM) have been verified by melting various kinds of metals and alloys. The principle of levitation melting and tapping, the basic structure and features of CCLM, and comparison with other melting methods are described. The specifications and external views of the experimental instruments (for 2 kg high vacuum CCLM, 50 kg CCLM, and continuous casting CCLM) are shown. The metallurgical examples are the melting of Co, TiAl, Fe-Al₂O₃, and Cu-Cr alloys, the melting and tapping of cast iron and stainless steel, and the continuous casting of lead and gray iron. In addition, CCLM applications are referred to.

Recent Development of Levitation Melting Equipment

Hideaki Tadano Kengo Kainuma
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.259-263 (1998)

This paper describes the recent development of levitation melting equipment to melt metals floating in the air in a crucible. Aiming at stable levitation melting in the several kg class, (1) a duplex inverter configuration has been used and (2) the bottom shape of crucibles has been optimized. Aiming at industrialization, (1) noncontacting extraction of melt from the crucible bottom and (2) a large melt capacity in the 50 kg class have been attained. Fuji Electric completed a series of the cold crucible levitation melting "CCLM" and also has marketed new products for various fields such as large capacity CCLM, continuous casting equipment, and high vacuum CCLM.

New Induction Furnace for Galvanized Steel Scrap Melting

Masahiro Nakatani Hiroshi Uemura
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.274-279 (1998)

The mixing of galvanized steel scrap in steel scrap for main melt material in pig iron foundries has become unavoidable. The melting of galvanized steel scrap in a conventional furnace has caused many troubles due to zinc such as shorter refractory life, lower cast quality, and pollution in the working environment. The new induction furnace developed to solve these problems has many advantages of recycling galvanized steel scrap, energy-saving melting, and improved melt properties. This paper describes the background of the development, system configuration, evaluation tests, and features of the furnace.

High-Frequency Power Sources for Induction Heating

Masaaki Hisamoto Yutaka Itoh Toshihiro Nomura
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.268-273 (1998)

High-frequency induction heaters using power semiconductor devices are widely spreading due to the clean, highly efficient, and easily controllable heating. Fuji Electric produces the following three types of inverters for induction heating: (1) thyristor inverters (current source type) up to 10 kHz, up to 12 MW, water-cooled, (2) general-purpose IH inverters (IGBT voltage source type) up to 50 kHz, up to 20 kW, air-cooled, (3) MOSFET inverters (voltage source type) up to 500 kHz, up to 1 MW, water-cooled. This paper describes the features, specifications, and schematic circuits of these inverters and the brief comparison of the current and voltage source types for high-frequency induction heaters.

Recent Seam-Welding Equipment

Iwao Kurata Kiyokazu Nakamura
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.285-287 (1998)

Seam weld tubes are produced by tubing beltlike metal strips and seam-welding them. Formerly, seam welding power sources used a high-frequency vacuum-tube oscillator. The oscillator efficiency was low and a more efficient power source was desired from the viewpoint of energy saving and rationalization. Fuji Electric has developed a high-efficiency seam welding equipment using a high-frequency MOS FET inverter, which is in operation in an actual line. This paper describes the principle of seam welding, welder configuration, and the comparison of welding capacity with the vacuum oscillator.

Energy-Saving Induction Furnaces

Toshiyuki Kano Yasuhiko Kojo
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.280-284 (1998)

The global preservation of the environment is cried for, and also industrial furnaces are required to be improved in view of the environment and energy saving. This paper describes the advantages of induction furnaces from the viewpoint of the environment and energy. Then it refers to the high efficiency and low energy consumption, the greatest advantages of Fuji Electric's high-frequency induction furnace, and its original furnace technology.

鉄鋼プロセスにおける誘導加熱の適用

池田 泰幸 岡山 栄 安藤 孝一
富士時報 Vol.71 No.5 p.288-292 (1998)

鉄鋼プロセスラインでは、省エネルギー性に優れる、急速加熱が可能である、温度制御性・応答性がよいといった誘導加熱の特長を最大限に活用した加熱、昇温、熱処理、溶解がなされている。本稿では、鉄鋼プロセスにおける誘導加熱の適用例として、MOSFET式高周波インバータを使用し、0.1mmもの極薄板の加熱ができる最近の薄板誘導加熱装置、熱間圧延プロセスに使用される粗パーヒータおよび表面処理鋼板のなかでも近年需要が増加しているガルバリウムめっき鋼板用誘導炉（ガルバリウムポット）について述べる。

廃棄物処理への誘導加熱の応用

喜田 清則 和田 清美 原田 満雄
富士時報 Vol.71 No.5 p.293-297 (1998)

地球環境問題から廃棄物処理のありかたが厳しく問われる状況にある。近年、ダイオキシンの有害性が問題視され、焼却しない高分子系廃棄物の処理装置として、富士電機が開発したホットバンド方式の減容固化装置が注目されているので概要を述べる。また、粗大ごみ処理施設、リサイクルプラザ施設から、資源化物とともに排出される高分子系廃棄物を主体とした可燃物類を乾留処理し、無害化し排出するシステムを開発中である。乾留処理実験結果と、本システムの将来展望についても述べる。

アルミニウム缶リサイクル用ハイブリッド溶解システム

服部 英美
富士時報 Vol.71 No.5 p.298-302 (1998)

アルミニウムチップ材などの熱容量が小さく、表面積の大きい廃材は溶解歩留りが悪く、操業安全性が困難、作業環境が悪いといった問題点を多くかかえていた。今回、従来の反射炉では溶解が困難であるチップ材やアルミニウム缶くず材などを効率的に溶解することができ、溶解歩留り向上や作業環境改善が可能な電磁力を応用した、新たな溶解システム（ガス/電気のハイブリッド溶解システム）「渦巻スターラ」を共同で開発した。

高周波インバータ式 ICP（誘導結合形熱プラズマ）トーチ

榎原 康史 片桐 源一
富士時報 Vol.71 No.5 p.303-306 (1998)

廃棄物・有害物処理に利用される熱プラズマの発生装置に、ICPトーチがある。直流プラズマトーチと比較して、無電極でプラズマ生成できることが最大の特長である。しかし、ICPは数MHzの真空管式電源で駆動されるため電源のエネルギー損失が大きく、またプラズマサイズは半径で3cm程度である。富士電機では、電源に低損失のMOSFETインバータを適用した大口径のICPトーチを開発中である。本稿では、ICPの数値解析と試作トーチによるプラズマ発生の結果について述べる。

Application of Induction Heating to Waste Treatment

Kiyonori Kida Kiyomi Wada Mitsuo Harada
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.293-297 (1998)

Under the global environment at issue, the way of waste treatment is strictly inquired. Recently, harmful dioxin has become a problem, and the compressed waste hot-binder developed by Fuji Electric attracts attention as a treatment system for unburned high polymer waste. Fuji Electric is also developing a system in which flammables mainly composed of high polymer waste along with recyclable materials exhausted from large refuse treatment or recycling facilities are treated by dry distillation and made harmless for exhausting. The result of experimental dry distillation and future prospects for this system are also described.

Application of Induction Heating in Steel Works

Yasuyuki Ikeda Sakae Okayama Koichi Ando
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.288-292 (1998)

There are many applications of induction heating in steel works for the purpose of heating, increasing temperature, heat treatment and /or melting, which has the advantages such as energy saving, rapid heating, good controllability and responsiveness to temperature. As application examples of induction heating to steelworks processes, this paper cites a new strip induction heater which can also heat a very thin steel sheet (thickness : 0.1 mm) with a high-frequency MOSFET inverter, a sheet bar heater used in the hot rolling process, and a galvalume pot (an induction furnace for galvalume plated steel sheets increasing in demand among surface-treated steel sheets).

Inductively Coupled Plasma Torch Using a High-Frequency Inverter

Yasushi Sakakibara Genichi Katagiri
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.303-306 (1998)

An inductively coupled plasma (ICP) torch is a thermal plasma generator used for treating wastes and hazardous substances. When it is compared with a DC plasma torch, the most advantage is plasma generation without electrode. However, the ICP is driven by a vacuum-tube power source of several MHz, and so energy loss in the power source is large and the plasma size is approximately 3 cm in radius. Fuji Electric is developing an ICP torch with a large bore using a low-loss MOSFET inverter for the power source. This paper describes numerical analysis for the ICP and the result of plasma generation with a torch made on an experimental basis.

Hybrid Melting System for Recycling Aluminum Beverage Cans

Hidemi Hattori
Fuji Electric Journal Vol.71 No.5 p.298-302 (1998)

Aluminum wastes such as chips with small heat capacities and large surface areas had many problems such as the poor yield of melt, difficult safe operation, and pollution to the working environment. Recently, jointly with a foundry, Fuji Electric has developed a new melting system "electromagnetic vortex stirrer" (gas-electric hybrid melting system) utilizing electromagnetic force which can efficiently melt aluminum wastes such as chips and beverage cans that were difficult to melt with a conventional reverberatory furnace and also can improve the yield of melt and the working environment.

富士電機株式会社

本社事務所	☎03)3211-7111	〒100-8410 東京都千代田区有楽町一丁目12番1号(新有楽町ビル)
新宿別館	☎03)3375-7111	〒151-8520 東京都渋谷区代々木四丁目30番3号(新宿コヤマビル)
北海道支社	☎011)261-7231	〒060-0042 札幌市中央区大通西四丁目1番地(道銀ビル)
東北支社	☎022)225-5351	〒980-0811 仙台市青葉区一番町一丁目2番25号(仙台NSビル)
北陸支社	☎0764)41-1231	〒930-0004 富山市桜橋通3番1号(富山電気ビル)
中部支社	☎052)204-0290	〒460-0003 名古屋市中区錦一丁目19番24号(名古屋第一ビル)
関西支社	☎06)455-3800	〒553-0002 大阪市福島区鷺洲一丁目11番19号(富士電機大阪ビル)
中国支社	☎082)247-4231	〒730-0021 広島市中区胡町4番21号(朝日生命広島胡町ビル)
四国支社	☎087)851-9101	〒760-0017 高松市番町一丁目6番8号(高松興銀ビル)
九州支社	☎092)731-7111	〒810-0001 福岡市中央区天神二丁目12番1号(天神ビル)
北関東支店	☎0485)26-2200	〒360-0037 熊谷市筑波一丁目195番地(能見ビル)
首都圏北部支店	☎048)657-1231	〒330-0802 大宮市宮町一丁目38番1号(野村不動産大宮共同ビル)
首都圏東部支店	☎043)223-0701	〒260-0015 千葉市中央区富士見二丁目15番11号(日本生命千葉富士見ビル)
神奈川支店	☎045)325-5611	〒220-0004 横浜市西区北幸二丁目8番4号(横浜西口KNビル)
新潟支店	☎025)284-5314	〒950-0965 新潟市新光町16番地4(荏原新潟ビル)
長野システム支店	☎026)228-6731	〒380-0836 長野市南県町1002番地(陽光エースビル)
長野野支店	☎0263)36-6740	〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号(長野鋳物会館)
岡山支店	☎086)227-7500	〒700-0826 岡山市磨屋町3番10号(住友生命岡山ニューシティビル)
松山支店	☎089)933-9100	〒790-0878 松山市勝山町一丁目19番地3(青木第一ビル)
北見営業所	☎0157)22-5225	〒090-0831 北見市西富町163番地の30
釧路営業所	☎0154)22-4295	〒085-0032 釧路市新栄町8番13号
道東営業所	☎0155)24-2416	〒080-0803 帯広市東三條南十丁目15番地
青森営業所	☎0177)77-7802	〒030-0861 青森市長島二丁目25番3号(ニッセイ青森センタービル)
盛岡営業所	☎019)654-1741	〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通16番21号(住友生命盛岡駅前ビル)
秋田営業所	☎0188)24-3401	〒010-0962 秋田市八橋大畑一丁目5番16号
山形営業所	☎0236)41-2371	〒990-0057 山形市宮町一丁目10番12号
福島営業所	☎0249)32-0879	〒963-8004 郡山市中町1番22号(郡山大同生命ビル)
金沢営業所	☎076)221-9228	〒920-0031 金沢市広岡一丁目1番18号(伊藤忠金沢ビル)
福井営業所	☎0776)21-0605	〒910-0005 福井市大手二丁目7番15号(安田生命福井ビル)
山梨営業所	☎0552)22-4421	〒400-0858 甲府市相生一丁目1番21号(清田ビル)
松本営業所	☎0263)33-9141	〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号(長野鋳物会館)
岐阜営業所	☎058)251-7110	〒500-8868 岐阜市光明町三丁目1番地(太陽ビル)
静岡営業所	☎054)251-9532	〒420-0011 静岡市安西二丁目21番地(静岡木材会館)
浜松営業所	☎053)458-0380	〒430-0935 浜松市伝馬町312番地32(住友生命浜松伝馬町ビル)
豊田営業所	☎0565)29-5771	〒471-0835 豊田市曙町三丁目25番地1
和歌山営業所	☎0734)72-6445	〒640-8341 和歌山市黒田94番地24(鍋島ビル)
山陰営業所	☎0852)21-9666	〒690-0874 松江市中原町13番地
山口営業所	☎0836)21-3177	〒755-0043 宇部市相生町8番1号(宇部興産ビル)
徳島営業所	☎0886)55-3533	〒770-0832 徳島市寺島本町東二丁目5番地1(元木ビル)
高知営業所	☎0888)24-8122	〒780-0870 高知市本町四丁目1番16号(高知電気ビル別館)
小倉営業所	☎093)521-8084	〒802-0014 北九州市小倉北区砂津二丁目1番40号(富士電機小倉ビル)
長崎営業所	☎095)827-4657	〒850-0037 長崎市金屋町7番12号
熊本営業所	☎096)387-7351	〒862-0954 熊本市神水一丁目24番1号(城見ビル)
南九州営業所	☎099)224-8522	〒892-0846 鹿児島市加治屋町12番7号(日本生命鹿児島加治屋町ビル)
沖縄営業所	☎098)862-8625	〒900-0005 那覇市天久1131番地11(ダイオキビル)
エネルギー製作所	☎044)333-7111	〒210-0856 川崎市川崎区田辺新田1番1号
変電システム製作所	☎0436)42-8111	〒290-8511 市原市八幡海岸通7番地
東京システム製作所	☎042)583-6111	〒191-8502 日野市富士町1番地
神戸工場	☎078)991-2111	〒651-2271 神戸市西区高塚台四丁目1番地の1
鈴鹿工場	☎0593)83-8100	〒513-8633 鈴鹿市南玉垣町5520番地
松本工場	☎0263)25-7111	〒390-0821 松本市筑摩四丁目18番1号
山梨工場	☎0552)85-6111	〒400-0222 山梨県中巨摩郡白根町飯野221番地の1
吹上工場	☎0485)48-1111	〒369-0122 埼玉県北足立郡吹上町南一丁目5番45号
大田原工場	☎0287)22-7111	〒324-8510 大田原市中田原1043番地
三重工場	☎0593)30-1511	〒510-8631 四日市市富士町1番27号
(株)富士電機総合研究所	☎0468)56-1191	〒240-0194 横須賀市長坂二丁目2番1号
(株)エフ・エフ・シー	☎03)5351-0200	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目30番3号(新宿コヤマビル)

