

〔連載〕

現場で役立つ省エネの基礎

〔第10回〕

産業用電気加熱－誘導加熱の省エネ その1 熱加工

今回から3回にわたり産業用電気加熱について現場で役立つ省エネの基礎を紹介する。初回は誘導加熱による熱加工について、ビレットヒータを例に紹介する。 (編集部)

1. はじめに

産業用途の電気による加熱技術の種類には抵抗加熱、アーク・プラズマ加熱、誘導加熱、誘電加熱、赤外加熱、電子ビーム加熱、レーザー加熱など被加熱物に熱を発生させる技術がある。また、ヒートポンプを使って熱を再利用する加熱技術の発達も著しく、それを含めた電気による加熱技術を総称して“エレクトロヒート”と呼んでいる(図-1)。

今回から全3回にわたる本シリーズではエレクトロヒートのうちの「誘導加熱」と「赤外加熱」に関する省エネを解説する。

2. 産業用誘導加熱の概要

2.1 誘導加熱の特徴

誘導加熱は、加熱コイルを用いた電磁誘導により被加熱物に電流を流すことによってジュール熱を発生させて加熱

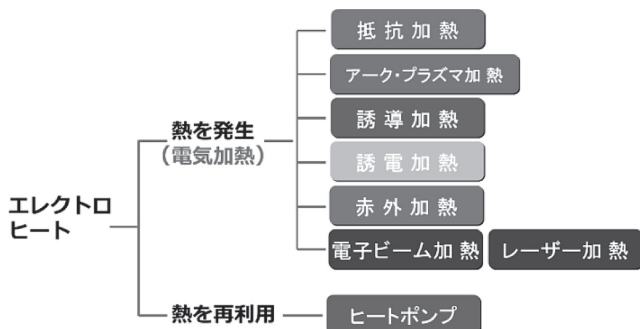


図-1 エレクトロヒートの種類

一般社団法人日本エレクトロヒートセンター
技術委員会 誘導加熱技術部会

する技術で、次のような優れた特徴があり、用途は広範囲にわたっている。

(1) 直接加熱

被加熱物自体が発熱するため、燃焼などの間接加熱よりもエネルギー変換効率が高く、エネルギーコストの低減が可能。

(2) 非接触加熱

被加熱物と加熱コイルは接点がないため、接触による加熱物への影響がない。このことは、真空中での加熱方式としても好適となる。

(3) 表皮効果による表面加熱

高い周波数を用いることで被加熱物の表層にのみ電流を流すことができ、表面だけの加熱が可能。

(4) 高電力密度

被加熱物の単位面積当たりの電力密度を高くできるため、急速加熱が容易である。

(5) 選択加熱が可能

被加熱物の形状に対して適切な加熱コイルを用いることにより、加熱したい部分のみの加熱が可能。

(6) 制御性が良好

加熱制御の応答が早いため、自動制御を導入したラインへの組み込みが容易。

(7) 均温加熱が可能

適切な周波数、電力、加熱時間を調整することで被加熱物全体を均一な温度に加熱することが可能。

(8) 環境の改善

加熱に燃焼を必要としないため安全で清潔な加熱で、作

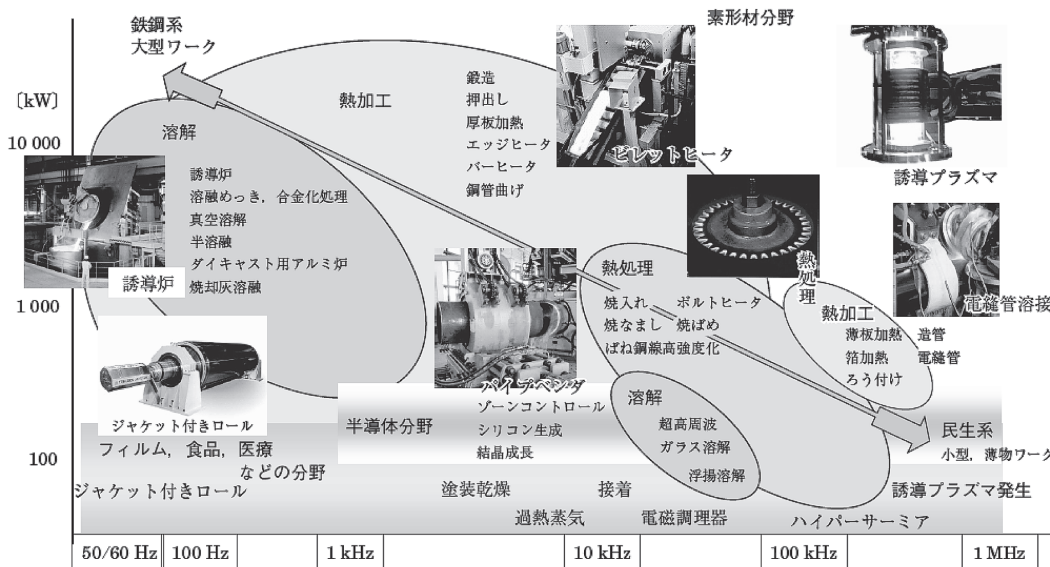


図-2 誘導加熱の用途マップ¹⁾

業環境が改善できる。

また、燃焼排出ガスも無いので二酸化炭素 (CO₂)、窒素酸化物 (NO_x)、硫黄酸化物 (SO_x) の排出もなく、環境を汚染しない。

2.2 誘導加熱の用途

誘導加熱の主な用途は下記の3用途である

- ① 鋳造などで用いられる「溶解」
- ② 鍛造や溶接などの「熱加工」
- ③ 機械部品の焼入れなどの「熱処理」

これらの3用途は長期間にわたり研究され利用技術の開発が進んでいる。その他にも多くの用途があり、それらを合わせて、図-2に「誘導加熱の用途マップ」として示す。

3. 熱加工の省エネ

3.1 熱加工機

熱加工の用途は、鉄、非鉄などの素材産業、自動車、産

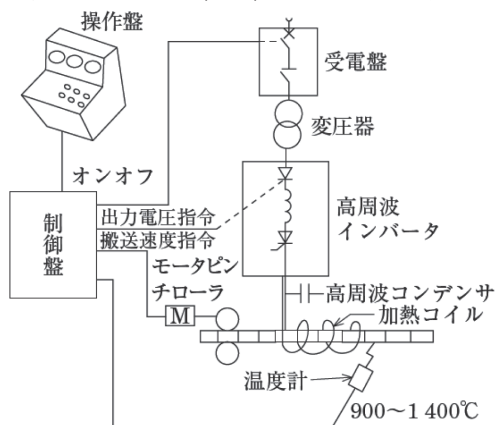


図-3 ビレットヒータの構成¹⁾

業機械などの機械製造産業、さらには食品製造産業などにも広がっている。なかでも自動車部品、農機具、工具などの部品の多くが鍛造により生産されるが、その際の素材加熱手段として誘導加熱装置が用いられている。

鍛造用誘導加熱装置の代表機種であるビレットヒータとバーヒータの構成を図-3に、概観写真を図-4および図-5に示す。両者は被加熱物の形状は違うが、使用目的および機器構成はほぼ同じである。

ビレットヒータおよびバーヒータは、被加熱物にジュール熱を発生させるための交番磁界を与える加熱コイル、加熱を効率的に行うために高周波電力を供給する高周波インバータ、受電機器、被加熱物を加熱コイル内に搬入するための搬送設備、搬送速度とインバータの出力を設定するための操作盤と制御機器を収めた制御盤から構成されている。

省エネの基本としては、被加熱物の材質、形状と大きさ、

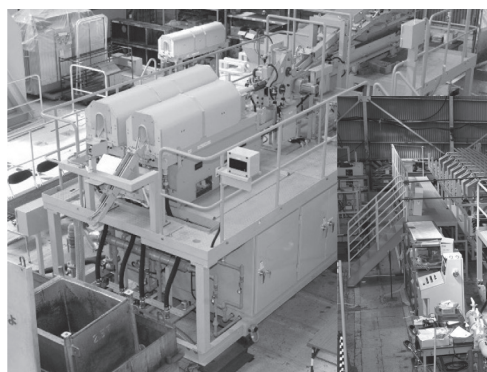


図-4 ビレットヒータ概観¹⁾

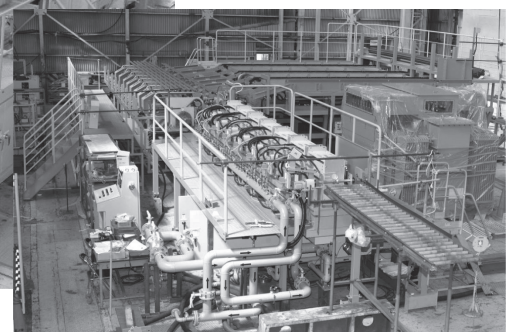


図-5 バーヒータ概観¹⁾

昇温温度と処理速度などに最適になるようにシステムを設計することである。

3.2 運転と保守による省エネ

ここではビレットヒータを例に解説する。

1) 運転

(a) 効率的な電力消費

図-6に標準的なビレットヒータのエネルギーフローを示す。図中の加熱正味電力が材料の加熱に使われる正味の電力である。

電流形インバータの場合、電力の調整はインバータの出力電圧を変更することで行う。その場合、加熱コイルの消費電力 P_C は式 (1) のとおりとなる。さらに、被加熱物に発生する電力 P_W は式 (2) のとおりとなる。

$$P_C = \frac{V_C^2}{Z_C} \cdot \text{COS}\phi_C \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

- P_C ; 加熱コイルの消費電力
- V_C ; コイル電圧
- Z_C ; コイルのインピーダンス
- $\text{COS}\phi_C$; コイル力率

$$P_W = \eta_C \cdot P_C \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

- P_W ; 被加熱物に発生する電力
- η_C ; コイル効率

加熱コイルのインピーダンス Z_C 、コイル力率 $\text{COS}\phi_C$ 、およびコイル効率 η_C はコイル内を貫通するビレットサイズで異なる。したがって、加熱コイルの消費電力は負荷条件によって異なる。

通常、インバータの定格出力電圧でコイル電圧 V_C の最

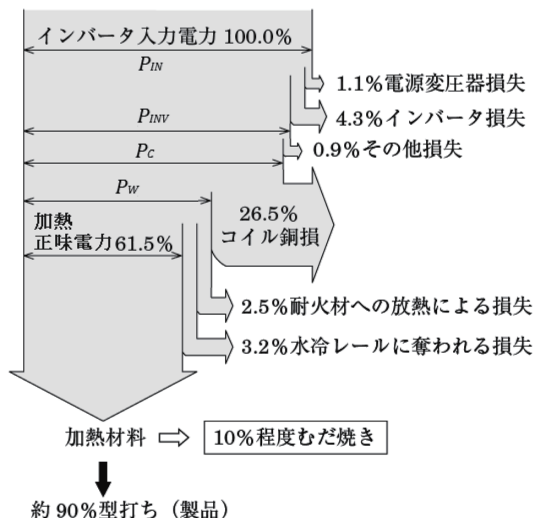


図-6 ビレットヒータのエネルギーフロー図¹⁾

大値が決まってしまうことに運転上の注意を払う必要がある。

同一コイルで加熱する場合、ワークサイズが小さくなればなるほど処理量は低下する。これは、最適コイルに対してエアギャップが増えるため、式 (1) のコイル力率 $\text{COS}\phi_C$ が小さくなりインバータの出力電力は比例して低下する。また、式 (2) のコイル効率 η_C も低下する。

被加熱物に発生する電力 P_W は、この加熱コイルの消費電力とコイル効率の積で決まり、処理量はほぼこの値に比例する。系全体での消費電力 P_{IN} は、インバータの出力電力 P_{INV} にインバータの変換効率 0.96~0.97 (周波数によって異なる) および受電変圧器の変換効率 0.985 を考慮して求める (式 (3))。ここで、インバータ出力とコイル入力の間で生じる損失が小さい場合には $P_C \doteq P_{INV}$ と見なすことができる。

$$P_{IN} = \frac{P_{INV}}{(0.96 \times 0.985)} \dots\dots\dots (3)$$

電源の入力端における電力 P_{IN} を積算した電力量をその時の処理量で除したものが電力原単位と呼ばれるものである。つまり、単位質量あたりの加熱に要する電力量という定義である。電力原単位は効率の低減に反比例して大きくなる。

一例を図-7に示すが、処理量の低下にはインバータ出力電力の低下の方が大きく効く。

つまり、ビレットヒータの場合、ワーク (被加熱物) サイズと材質に適切なコイルラインを用いることが効率的である。

運転時に注意すべき点は、処理量を任意に下げて運転できないことである。インバータの出力電圧は約 30% (低負荷対策を実施すれば約 20%) まで下げられる。したがって電力は約 9% まで絞ることができ、処理量も理論上は 9% 近くまで絞ることが可能である。しかし実際にはビレ

番号	コイルサイズ	ワークサイズ	消費電力比	コイル効率比	処理量比	入力点電力原単位比
1	φ44 用	φ44	1	1	1	1
2	φ44 用	φ42	0.926	0.985	0.912	1.018
3	φ44 用	φ40	0.857	0.97	0.831	1.037
4	φ44 用	φ38	0.793	0.952	0.755	1.06
5	φ44 用	φ36	0.733	0.933	0.684	1.084
6	φ44 用	φ34	0.678	0.91	0.616	1.117
7	φ44 用	φ30	0.571	0.857	0.489	1.196

図-7 ワークサイズと各定数低減率¹⁾

ットヒータの場合、被加熱材の表面—中心間の温度差を小さくして取り出す必要がある。そのため、入口から出口に向って昇温パターンをゆるやかにして、最終コイルでは保温に近い状態で加熱している。

処理量を絞ると、同じ温度で取り出すためには出力を絞る必要があるが、あまり絞りすぎると熱放散損失のほうが供給電力を上回り、コイル出口では温度が下がって取り出すことになる。したがって、加熱特性上の理由で放熱量のいちばん多い最終出口コイルの供給電力と放熱量が同じになるインバータ出力までしか電力を絞ることができない。この下限値は個々の設計で異なるが、通常1電源方式の場合、定格処理量の60%程度である。

(b) むだ焼き材料の削減

むだ焼き材料とは、ビレットヒータにより加熱したが、昇温不足や後段設備のライン停止などの事情により鍛造されずに排出される材料のことを指す。

現状鍛造前加熱では加熱開始時や、後段設備の短時間停止（一般にチョコ停と呼ばれる）後の復帰時に所定の熱加工に至らず、むだ焼き材の発生という課題があり、発生量は全加熱材の10%程度に相当する（図-6の「むだ焼き」）。

むだ焼き材料の発生には電力的な損失のみならず、排出材の冷却スペースの確保や昇温待ち時間（手待ち時間）の発生、材料の移動・再投入のための人員が必要になるなど様々なロスを含んでおり、近年では起動時の耐火材温度補償制御や微速送り保温制御等が実用化されているので、活用することでむだ焼きの削減を図ることができる場合もある。

2) 保守によるロス削減

図-8 にビレットヒータの加熱コイル断面例を示す。

一般に誘導加熱装置の消耗品は、コイルを材料温度から保護するための耐火材と断熱材のみとってよい。他には、材料の搬送やコイルの移動に用いる機械部分の消耗品がある。ビレットヒータのコイル保護の耐火材は耐火セメントが主流であったが、最近は交換が容易な耐火チューブが使われることが多い。長期間使っているとヒートショック

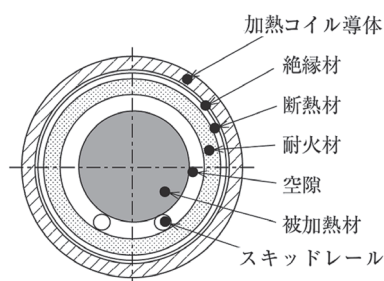


図-8 ビレットヒータの加熱コイル断面図¹⁾

クによるひび割れが発生する。そのまま放置しておくとも地絡の発生により電源を遮断させることになりロスとなる。

したがって、適切な点検を行い、ひび割れの発生を発見した場合はすぐにセメントのコテ塗りなどで補修する必要がある。地絡検出がない場合でも、コイルターン間の短絡に到った場合にはコイルを解体して絶縁物からオーバーホールすることとなり、大きなロスにつながる。

機械部分の消耗は、ワークに推進力を与えるピンチローラのローラ磨耗とコイル内でワークが摺動するスキッドレールの磨耗がある。スキッドレールは無垢のSUS棒やSUS板でできた無水冷タイプが採用される場合もあるが、寿命の点でSUS製の水冷パイプにステライトを肉盛り耐摩耗性を向上したものが主に使用されている。機械部分に関しても、運転中に異常に至ると大きなロスになってしまうので、適切な点検項目や時期を定め計画的に保守をすることが必要である。

4. まとめ

産業用誘導加熱機器の概要と特徴を紹介するとともに、誘導加熱による「熱加工」の省エネ運用に関してビレットヒータを例に解説した。適切な要求仕様に対して最適な設計をしたシステムを導入して最適な運転をすることと、無駄が生じないためのあらかじめの保守を怠らないことが省エネ・高効率運用に必須であるが、これは“電気加熱—誘導加熱”に限ったことではない。

次回は、誘導加熱による「溶解」の省エネ運用を解説する。

最後に、日本エレクトロヒートセンターは電気加熱を導入することで大幅な省エネ、CO₂排出量削減、生産性向上などを達成した事例を多数収集してホームページで紹介しているので、ぜひ参考にしてほしい。トップページから「導入事例・製品情報」に進むと様々な形でまとめた事例が閲覧できる。

トップページ <https://www.jeh-center.org>

<参考文献>

- 1) 日本エレクトロヒートセンター編，新訂版エレクトロヒートハンドブック，オーム社刊（2019）
- 2) 渡邊敏之，誘導加熱システムの省エネルギー，エレクトロヒート，No.186（2012）
- 3) 谷野守彦，誘導加熱の基礎知識，エレクトロヒート，No.122（2002）
- 4) 川中啓二 他，特集；誘導加熱技術—産業における応用—，エレクトロヒート，No.227（2019）

〔連載〕

現場で役立つ省エネの基礎

〔第11回〕

産業用電気加熱—誘導加熱の省エネ その2 溶解

前号から産業用電気加熱の現場で役立つ省エネの基礎を紹介している。2回目の今回は、誘導加熱による「溶解」について紹介する。
(編集部)

1. はじめに

産業用途の電気による加熱技術の種類には抵抗加熱、アーク・プラズマ加熱、誘導加熱、誘電加熱、赤外加熱、電子ビーム加熱、レーザー加熱などがある（詳細は前号を参照）。

前回から3回のシリーズで「電気加熱」の省エネを紹介している。前回は誘導加熱による熱加工の省エネを解説した。今回は誘導加熱のその2として「溶解」について解説する。

2. 産業用誘導加熱の概要

産業の加熱用途において誘導加熱は、「直接加熱」「非接触加熱」「表皮効果による表面加熱」「高密度電流による急速加熱」など、優れた特徴があり、特徴を生かし産業の広範囲な用途に用いられている（詳細は前号を参照）。

3. 溶解の省エネ

3.1 溶解炉

電気を利用した溶解炉には、アーク炉、プラズマ炉、誘導炉、抵抗炉等があるが、この中で誘導炉は、誘導加熱を利用して金属を溶解したり、溶けた金属（これを溶湯という）を所定の温度に保持したり、昇温や成分の調整などをする装置である。

誘導炉は、円筒状に巻かれたコイルの内側に耐火物で形成されたるつぼ形の溶解室で金属を加熱溶解するるつぼ形誘導炉と、発熱部として溶解室に連結された1ターン形状の溶湯環（これを二次溝という）を持つ溝形誘導炉に大

一般社団法人日本エレクトロヒートセンター
技術委員会 誘導加熱技術部会

別される。るつぼ形誘導炉の基本構成と炉本体の外観を図-1、2に、溝形誘導炉本体の構成を図-3に示す。

るつぼ形誘導炉はさらに低周波誘導炉と高周波誘導炉に分類され、これら3種の炉の主要な特徴を図-4に示す。用途や材質のみならず操業条件や操業形態を考慮して炉を導入する必要がある、運転特性などを十分把握したうえで操業することが生産性向上のために重要である。

3.2 運転と保守による省エネ

1) 負荷率の向上と電気・熱損失の削減

大電力を使用する誘導炉設備では、設備ロスの低減と操業ロスの低減が省エネの有効な手段となる。一般的な鋳鉄用高周波誘導炉のエネルギー収支の例を図-5に、誘導炉の溶解能力とその電力原単位を式（1）、（2）に示す。

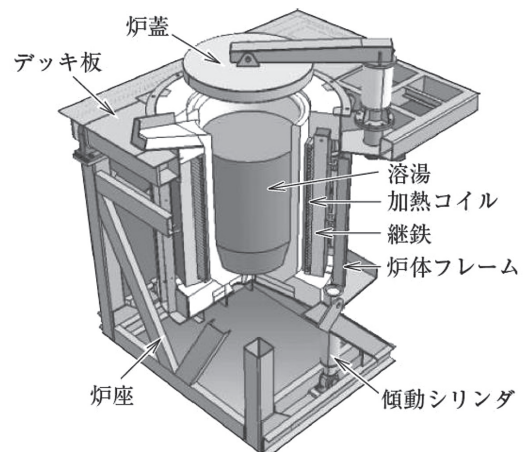


図-1 るつぼ形誘導炉本体の基本構成¹⁾



図-2 るつぼ形誘導炉本体の外観¹⁾

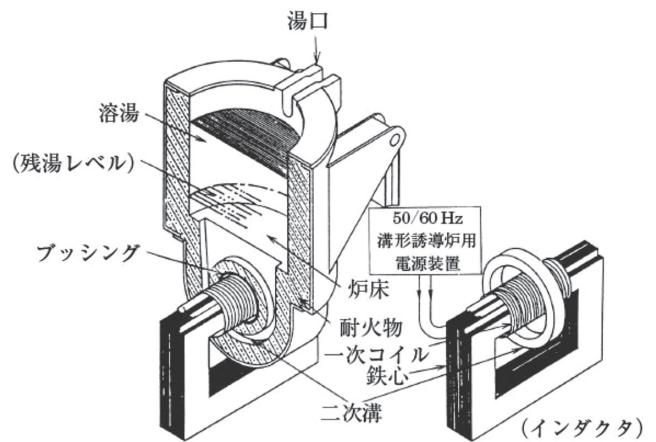


図-3 溝形誘導炉本体の基本構成¹⁾

項目	るつぼ形誘導炉		溝形誘導炉
	低周波誘導炉	高周波誘導炉	
周波数 [Hz]	50/60Hz	150 ~ 10 000Hz	50/60Hz
用途	溶解・保持・昇温	溶解	溶解・保持・昇温
攪拌力	強	中～強	弱
電力密度	中	高	低
溶解速度	中	速い	遅い
電気効率 [%]	76 ~ 80	74 ~ 80	95 ~ 97
総合効率 [%]	65 ~ 71	67 ~ 73	75 ~ 85
成分変動	中～やや多い	少	少
成分調整	容易	容易	やや困難
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・スターティングブロックが必要 ・小片からの起動が可能 ・残湯が不要 ・炉は空にして休止 	<ul style="list-style-type: none"> ・小片からの起動が可能 ・残湯は不要 ・炉は空にして休止 	<ul style="list-style-type: none"> ・起動時溶湯が必要 ・常に残湯が必要 ・炉は空にできない ・構造がやや複雑

図-4 各種誘導炉の用途と特徴¹⁾

$$M = \frac{(Pr \cdot \eta_e \cdot \alpha) - L_H}{Q_{nm} + Q_{nr}} \quad \dots \quad (1)$$

$$Q = \frac{\frac{Pr}{\eta_p} \cdot \eta_e \cdot \alpha}{M} \quad \dots \quad (2)$$

ただし、

- M : 溶解能力 [t/h]
- Pr : 炉の定格電力炉入力 [kW]
- η_e : 誘導炉のコイル効率
- η_p : 入力側電源機器の電気効率
- α : 溶解過程での負荷率 (平均電力 / 定格電力)
- L_H : 溶解過程の平均熱損失 [kW]
- Q_{nm} : 溶解材料の正味電力原単位 [kWh/t]
- Q_{nr} : 炉溶解量 1t 当たり換算の耐火断熱材蓄熱損失 [kWh/t]
- Q : 電力原単位 [kWh/t]

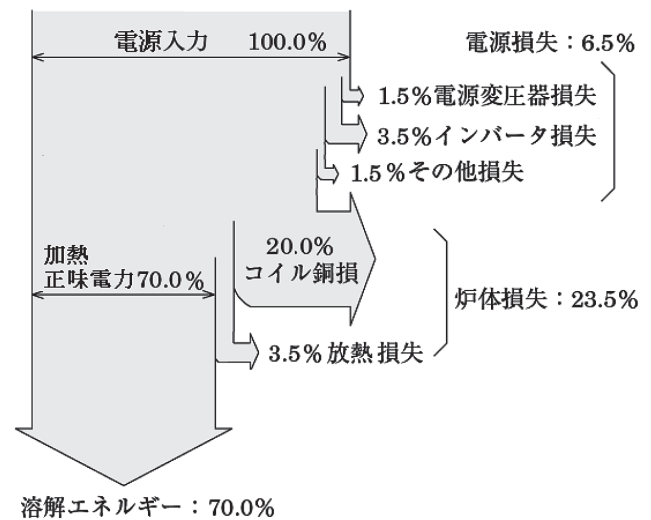


図-5 高周波誘導炉エネルギーフロー図¹⁾

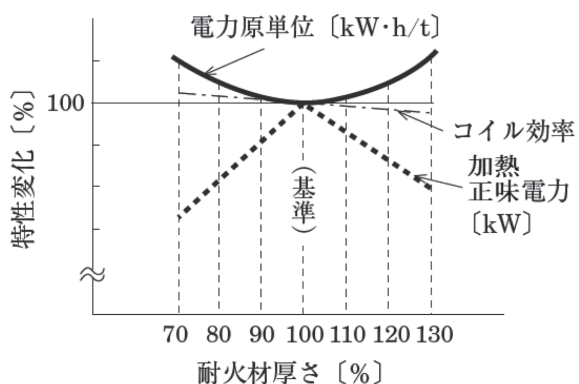


図-6 耐火材厚さと炉特性関連図¹⁾

式 (1), (2) から, 誘導炉操業における上手な運転 (省エネルギー操業) の概念としては, 次の①~③に示すとおりにまとめられる。

- ①できるだけ定格電力に 100% 近づけた状態で溶解すること。
- ②炉の熱容量と熱損失を小さくすること。すなわち, 耐火断熱性に優れたライニング材を選定するとともに, 炉内からの放熱エネルギーを低減するために, 操業中に蓋を開けている時間を短縮, 炉内状況に応じた集じん風量の適正制御, および出湯温度の適正化 (過昇温防止) などに注意する。
- ③溶解過程の負荷率をできる限り 1.0 に近づけた操業努力をすること。すなわち, 溶解原材料の装入方法にも配慮が必要である。また, スラグオフや测温, 成分分析と成分調整のための時間, 出湯待ちのロスタイムなどを削減するなどの操業の改善を行うこと。

また, 図-6 に耐火材厚さの変化と炉の特性の関連の一例を示す。電源出力の電圧および電流が 100% の場合を基準にすると, 耐火材厚さが最適な厚さをはずれることにより電力原単位が増えてくるのがわかる。

耐火物が損耗して薄くなったり, スラグが付着・堆積して厚くなったりしたような状態で溶解すると, 電力原単位を悪化させる。一般的に炉壁耐火材の厚みが ±20% 変化したとすれば, そのときの電力原単位は約 4 ~ 5% 程度悪くなる。したがって, 炉内反応でスラグなどが付着しないような溶解原材料の選定や操炉, 浸食部の部分補修などが省エネに有効である。

2) 保護装置

誘導炉は高温溶湯を扱い, 大電力で操業するため, 適切な監視, 検知, 保護をすることで効率的な省エネ操業維持ができる。

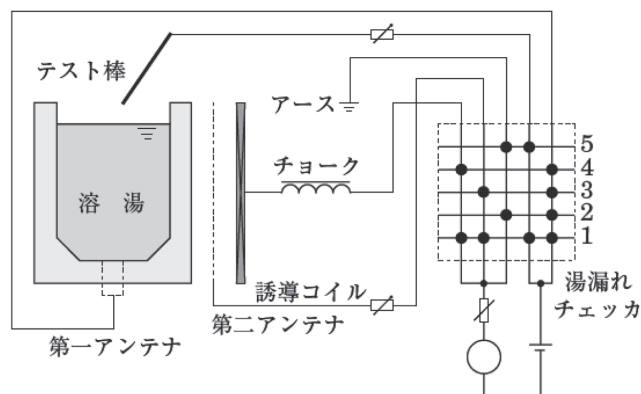


図-7 直接式湯漏れ検出装置¹⁾

万一の事故に備え, 感電, 湯漏れ, 過熱などの保護や, 停電, 断水などに対する非常用装置が必要である。なかでも誘導炉特有の保護装置である湯漏れ検出装置は, 誘導炉設備の安全・安定・安心操業において極めて重要な保護装置である。

湯漏れ検出装置は, 耐火物の摩耗や損傷による湯漏れ, 活性金属や低粘性金属 (銅, 亜鉛, 鉛など) の浸透による回路の地絡事故を予知するもので, 使用されている検知方法には次のものがある。

- ①耐火物壁の消耗によるインピーダンス変化により検知する方法
- ②溶湯と誘導コイル間の抵抗の変化を測定して検知する方法
- ③検出網の埋設により溶湯などの浸透や湯漏れを検知する方法

特に③の検知方法は直接式湯漏れ検出装置といわれ, 図-7 に示すように炉底から溶湯に接触させた電極 (第一アンテナ), コイルと耐火物の間に貼り付けられた検出網 (第二アンテナ) との間に直流電圧を印加し, 溶湯が耐火物内に浸透したり漏れたりして検出網と電極間短絡したときの短絡電流を検出して誘導炉の異常を検知するとともに, 溶湯を常にアース電位に接地することにより操炉作業者の感電防止を図っている。

3) 運転監視と自動化

電気を使用する誘導加熱はその制御性の良さから, 省力化・合理化・省エネ操業のための各種自動化ができる。

- ①溶解運転監視
- ②自動シッター運転
- ③自動予熱運転
- ④デマンド制御運転

これら①~③の自動制御は, 炉内の溶湯重量と消費電力

量をプログラマブルコントローラで監視することにより、溶解の進捗監視や電力設定の自動化を図っているものである。タッチ式の画面表示器が制御盤に装備され、各種自動運転モードの状況監視、自動運転のためのパラメータ入力、異常発生時の故障箇所表示やトラブルシューティングなどのガイダンス表示を装備するものが増えている（図-8）。

4) 保守によるロス削減

(a) 溶解室耐火物への付着物

溶解室の内壁に付着物が堆積し、付着物が異常溶損したり、堆積した付着物中に巻き込まれたメタルが誘導加熱されて耐火物が局部的に浸食されたり、付着物の堆積により炉内径が狭くなって効率が低下するとともに炉容量が減るなどのケースがある。

鋳鉄溶解の場合の付着物は、耐火材自身のシリカの他に、カルシア、マグネシア、酸化鉄などである。加ケイ材として使用されるフェロシリコンにアルミが含まれている場合にはそれが酸化し、ライニング材のシリカと親和性の高いアルミナとなることで炉壁に付着することがある。

したがって、アルミニウム含有量の少ないフェロシリコンの使用、毎日の炉内点検と早めの同一耐火物による部分補修などが、寿命向上には勿論、効率的省エネ操業継続の重要なファクターとなる。

(b) 冷却水回路

誘導炉設備における循環式冷却水回路では、効率の良い操業継続のために冷却水回路の適切なメンテナンスが必須である。

水質を管理することはもちろん、冷却水が冷却塔を介して循環している間に水中溶存塩類が濃縮されたり、大気中のじんあいなどが混入して冷却水を汚染したりすることによる、誘導コイルおよび冷却水配管内でのスケール障害、腐食障害、スライム障害の発生に注意する必要がある。これらの障害が発生すると、正常な状態で運転することができなくなるだけでなく、管路閉塞によるコイル導体の電氣的溶損などのトラブルに至ることがある。したがって、冷却水回路の定期的な高圧水による洗浄または化学洗浄方法によるクリーニングを実施することが必要である。

なお、冷却水の水質については日本冷凍空調工業会などで基準が示されている。

4. まとめ

今回は、誘導加熱による「溶解」の省エネ運用に関して解説した。前回のビレットヒータと同様、適切な要求仕様

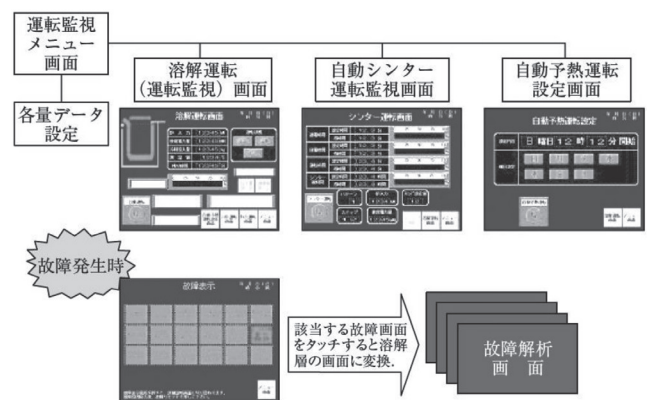


図-8 溶解運転監視画面例¹⁾

に対して最適な設計をしたシステムを導入して最適な運転をすること、無駄が生じないためのあらかじめの保守を怠らないことが省エネ・高効率運用に必須である。もう一点、100%操業、100%耐火物厚さなどが最適と示したように、「大は小を兼ねない」という考え方がポイントである。

この2回にわたった誘導加熱の省エネ解説では従来からの省エネ運用について述べたが、昨今は、高効率炉体、高効率電源、監視や制御の高度化技術の開発が進んでおり、さらにはIoT技術を活用した操業支援サービスも提供されているので、これらの最新技術にも注目されたい。

次回「電気加熱」シリーズの最終回は「赤外加熱」について解説する。

最後に、前回は紹介したが、日本エレクトロヒートセンターは、電気加熱を導入することで大幅な省エネ、CO₂排出量削減、生産性向上などを達成した事例を多数収集してホームページで紹介しているので、ぜひ参考にしてほしい。

下記 URL から入って「導入事例・製品情報」に進むと様々な形でまとめた事例が閲覧できる。

トップページ；<https://www.jeh-center.org>

<参考文献>

- 1) 日本エレクトロヒートセンター編、新訂版エレクトロヒートハンドブック、オーム社刊（2019）
- 2) 渡邊敏之、誘導加熱システムの省エネルギー対策、エレクトロヒート、No.186（2012）
- 3) 谷野守彦、誘導加熱の基礎知識、エレクトロヒート、No.122（2002）
- 4) 川中啓二 他、特集；誘導加熱—産業における応用—、エレクトロヒート、No.227（2019）
- 5) 古城靖彦、誘導炉の省エネについて、エレクトロヒート、No.130（2003）
- 6) 富士電機ホームページ IoT技術／るつば形誘導炉
https://www.fujielectric.co.jp/products/ihsys/products/melt/f-melt_ilot.html