

8,000 kg 低 周 波 誘 導 炉

8,000 kg Low Frequency Induction Furnace

村 山 隆 男*
Takao Murayama

山 中 敬 二*
Keiji Yamanaka

後 藤 篤*
Atsushi Gotô

内 容 梗 概

鋳鉄溶解用 8,000 kg 低周波誘導炉が完成し稼動に入った。これはこの形式の炉としては記録的大容量品であり、その設計には種々の要素を取り入れた新しい設計法を採用したが、試運転の結果はほぼ設計値どおりの性能が得られることが確認された。本形式の炉は従来の様式の炉に比べて多くの特長を備えており、今後金属工業における新しい溶解設備としての普及が期待される。

1. 緒 言

低周波誘導炉中みぞ形のもは低融点の金属の溶解用として古くから実用されてきたが、鋳鉄などの高融点の金属の溶解もできるルツボ形低周波誘導炉は比較的歴史が浅く、本邦ではまだ数年前からごく一部において実用化されているに過ぎない。しかし最近はこの形式の炉の有する多くの特長が認められるようになり、日立製作所にも 500 kg～2,000 kg のルツボ形低周波誘導炉をすでに数基製作し、その操業実績においても優秀性が実証されている。

ルツボ形低周波誘導炉の特長としてはつぎのようなものがあげられる。

- (1) 金属自体の発熱によって溶解するので燃料などから不純物の混入がない。
- (2) 溶湯の温度を容易に調整することができる。
- (3) 強力なかくはん作用により成分は均一化され、その調整も容易である。
- (4) ダライ粉などの低級地金の溶解に適するので地金費が低減できる。
- (5) 操業が簡単で人手がかからない。
- (6) 燃料を使用しないので煙やじんあいの発生がない。

またとくに鋳鉄溶解について考えれば従来使用されているキューボラに比べカーボン量の調整が容易なこと、温度が自由に調節できることなどの大きな利点があり、特殊鋳鉄の溶解にはきわめて便利なものである。

なお低周波誘導炉は商用周波数の電源をそのまま使用するので高周波誘導炉のように発電機などが不要であるので設備費が安くなることが大きな特長である。

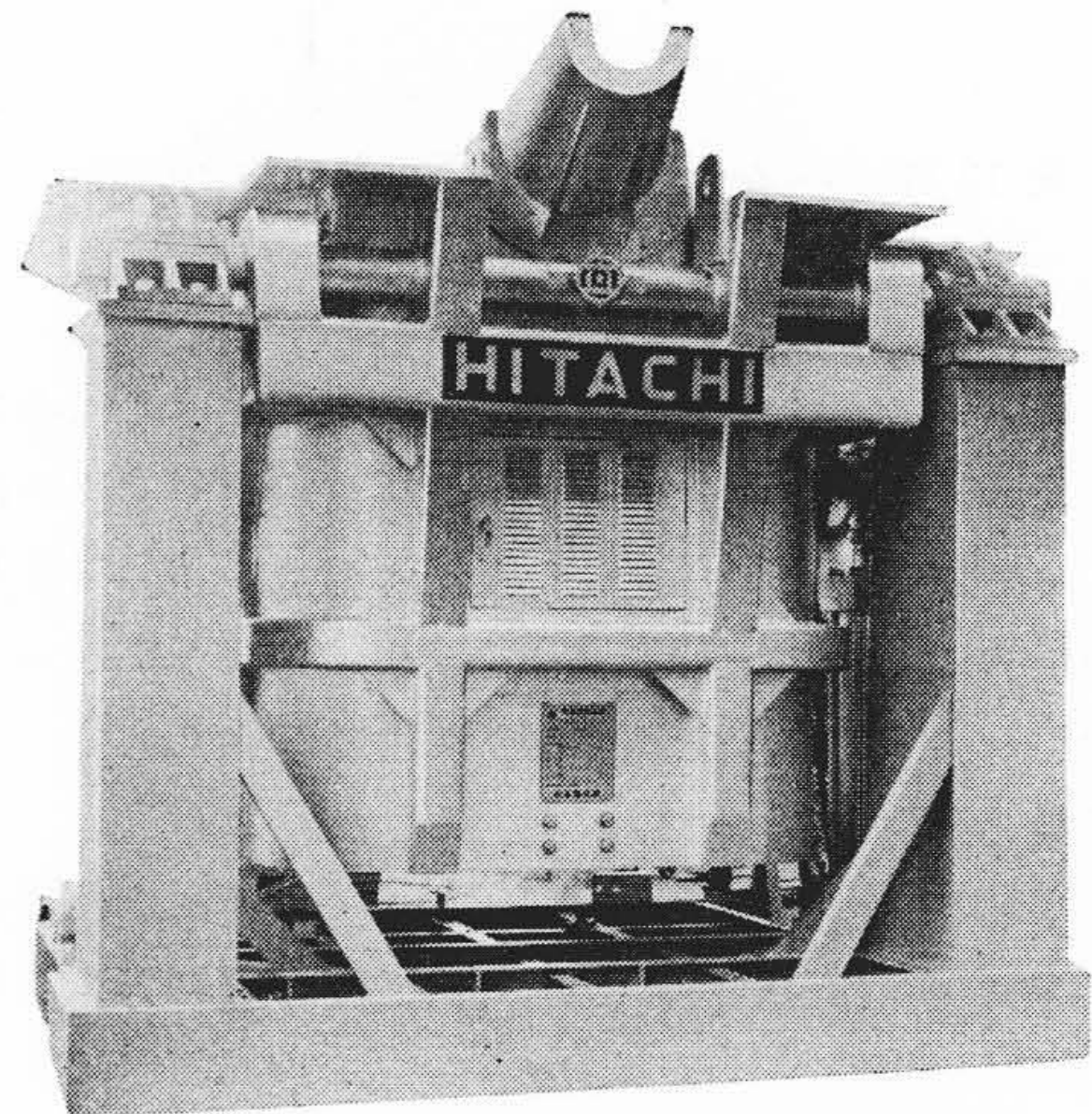
以上のような利点から最近ではさらに大容量のルツボ形低周波誘導炉が要望されるようになり、今回鋳鉄溶解用として溶解量 8,000 kg という大容量の低周波誘導炉を完成した。本炉は容量として本邦記録品であり、そのおもな仕様は下記のとおりである。

炉 容 量	8,000 kg
定 格 入 力	1,500 kW
定 格 電 圧	800 V
周 波 数	60～
溶 解 能 力	冷材より 1,450℃ まで毎時 2,500 kg 以上
最 高 温 度	1,650℃

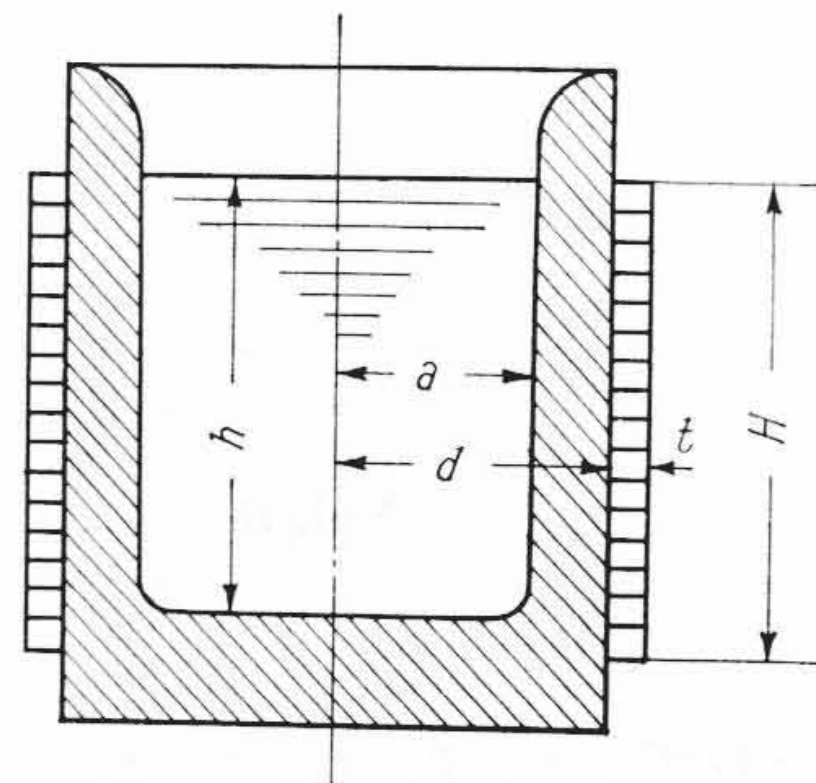
2. 低周波誘導炉の設計法について

低周波誘導炉の設計としては、まず与えられた溶解能力に対応する炉の入力を決定すること、次に、この入力を入れ得るように炉のコイルを設計し、このコイルのリアクタンスから力率調整に必要な

* 日立製作所国分工場



第 1 図 鋳鉄溶解用 8,000kg 低周波誘導炉



第 2 図 炉 体 内 部 寸 法

コンデサの容量を決定することが主要なことがらである。本章ではこれらの設計法について簡単に述べる。

前もって計算に使用する炉体主要寸法を下記のごとく定める。

- h : 溶解後の炉内容物の高さ (cm)
- a : 溶解後の炉内容物の平均半径 (cm)
- H : コイルの高さ (cm)
- d : コイルの内半径 (cm)
- t : コイルの半径方向の厚み (cm)
- N : コイルの総巻数

2.1 入 力 の 選 定

低周波誘導炉を用いて連続溶解するとき、必要な入力 P (kW) は次式で表わされる。

$$P = P_0 + P_L + P_c \text{ (kW)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで P_0 (kW) は溶解に必要な電力、 P_L (kW) は溶解物よりの熱損失、 P_c (kW) はコイル損失である。

溶解に必要な電力 P_0 は次式で表わされる。

$$P_0 = P_H \times P \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで P_H は溶解物 1 t 当たりの電力消費量 (kWh/t) で、 P は炉の所要溶解能力 (t/h) である。

溶解物よりの熱損失は連続溶解の場合、コイル冷却水へ伝導により逃げる熱量が主なものであり、溶解物が溶湯状態のとき最大となる。溶湯温度を θ_M (°C)、コイル冷却水温度を θ_W (°C) とすると、溶解物の熱損失は⁽¹⁾

$$P_L = 4.186 \times 10^{-3} \frac{2\pi H(\theta_M - \theta_W)}{\log \frac{d}{a} + \log \frac{d+t}{d}} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。 λ , λ' は炉壁およびコイル導体の熱伝導率 (cal/cm s °C) である。

コイル損失は、コイル抵抗と電流により定まる。コイルの実効抵抗を R' (Ω)、コイル電流を I (A) とすれば、コイル損失 P_C は

$$P_C = I^2 R' \times 10^{-3} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

ここで入力 P は (1) 式により求められるわけであるが、低周波誘導炉の場合は強力なくはん作用があるため、入力が制限されることに注意しなければならない。この点より鋳鉄溶解の場合は最大入力 $P_{\max}$ (kW) は、炉溶解量を W (T) とすると、(5) 式のようにになり、これが限界値となる。⁽²⁾

$$P_{\max} = 900 \times \left(\frac{W}{3} \right)^{0.75} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (5)$$

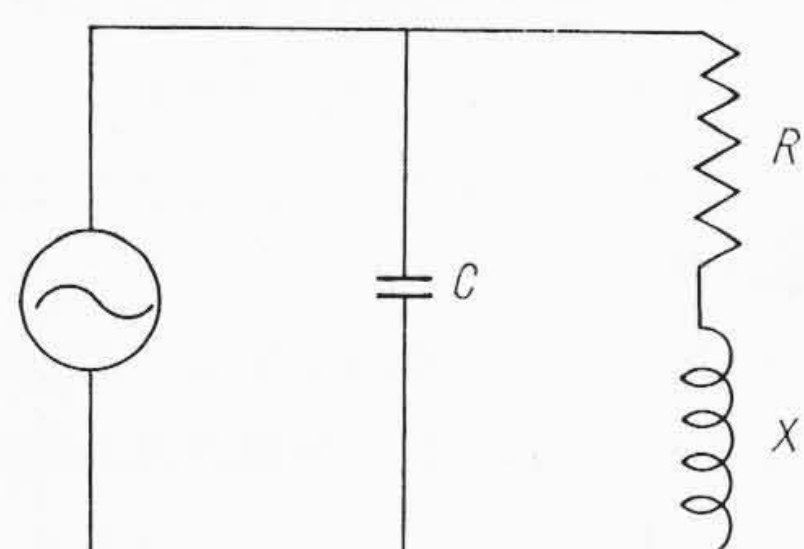
したがって、入力 P は常に $P_{\max}$ 以下になるように押える必要がある。

この 8,000 kg 炉について考えると、まず鋳鉄を冷材より溶解し 1,450°C に達するまでに必要な電力量は 1 t 当たり 350 kWh であり、溶解能力 2,500 kg/h を得るに必要な入力 875 kW となる。一方、溶湯よりの熱損失は溶湯温度 1,450°C、冷却水温度 65°C としたとき、炉壁の耐火物の熱伝導率を 0.155 cal/cm°C とすると 320 kW となり、コイル損失は次節に示すような算式により 300 kW となる。したがって求める炉入力としては約 1,500 kW という結果を得る。一方 (5) 式より 8,000 kg 炉における入力の限界値は 1,730 kW となる。よって本炉の入力は 1,500 kW と決定した。

2.2 炉インピーダンスの計算方法

炉インピーダンスは炉の入力や力率調整用コンデンサの容量を算出する基礎となるものである。その計算方法については高周波誘導炉や、高周波焼入装置の場合、種々の文献に報告されている^{(3)~(5)}。これらは大体、無限長のコイル内におかれた円筒導体に生ずる渦電流損に基づく計算式を基礎としているが、北村氏は有限長ソレノイド内におかれた無限長円筒導体に吸収される磁気エネルギー、渦電流損に基づく計算式を発表している^{(6)~(8)}。この方法は電流浸透深さが円筒導体半径に比し十分小さいときは成立するが、低周波誘導炉のような電流浸透深さが大きいものに適用するには問題がある。しかし従来の実績から検討を行なった結果、一部修正すればこの計算式にてかなり正確な結果が得られることがわかったので、これを採用することにした。

低周波誘導炉の等価回路を第 3 図に示す。等価回路に示される R ,



第 3 図
等 価 回 路

X はそれぞれ炉の抵抗およびリアクタンスで、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} R &= R' + R'' & (\Omega) \\ R' &= 8\pi^3 \times 10^{-9} \times f \frac{N^2}{H} d' \delta' & (\Omega) \\ R'' &= 8\pi^3 \times 10^{-9} \times f \frac{N^2}{H} \delta \frac{a}{d'} FK & (\Omega) \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= X' + X'' & (\Omega) \\ X' &= 8\pi^3 \times 10^{-9} \times f \frac{N^2}{H} d'^2 k & (\Omega) \\ X'' &= 8\pi^3 \times 10^{-9} \times f \frac{N^2}{H} \delta \frac{a}{d'} F' K & (\Omega) \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{f}} & (\text{cm}) \\ \delta' &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho' \times 10^9}{f}} & (\text{cm}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= \sqrt{2} \frac{b_{er} \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right) b_{er}' \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right) + b_{ei} \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right) b_{ei}' \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right)}{b_{er}^2 \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right) + b_{ei}^2 \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right)} \\ F' &= \sqrt{2} \frac{b_{er} \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right) b_{ei}' \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right) - b_{ei} \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right) b_{er}' \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right)}{b_{er}^2 \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right) + b_{ei}^2 \left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta} \right)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

$$d' = d \left(1 + \frac{\delta'}{2d} \right) \quad (\text{cm}) \quad \dots\dots (10)$$

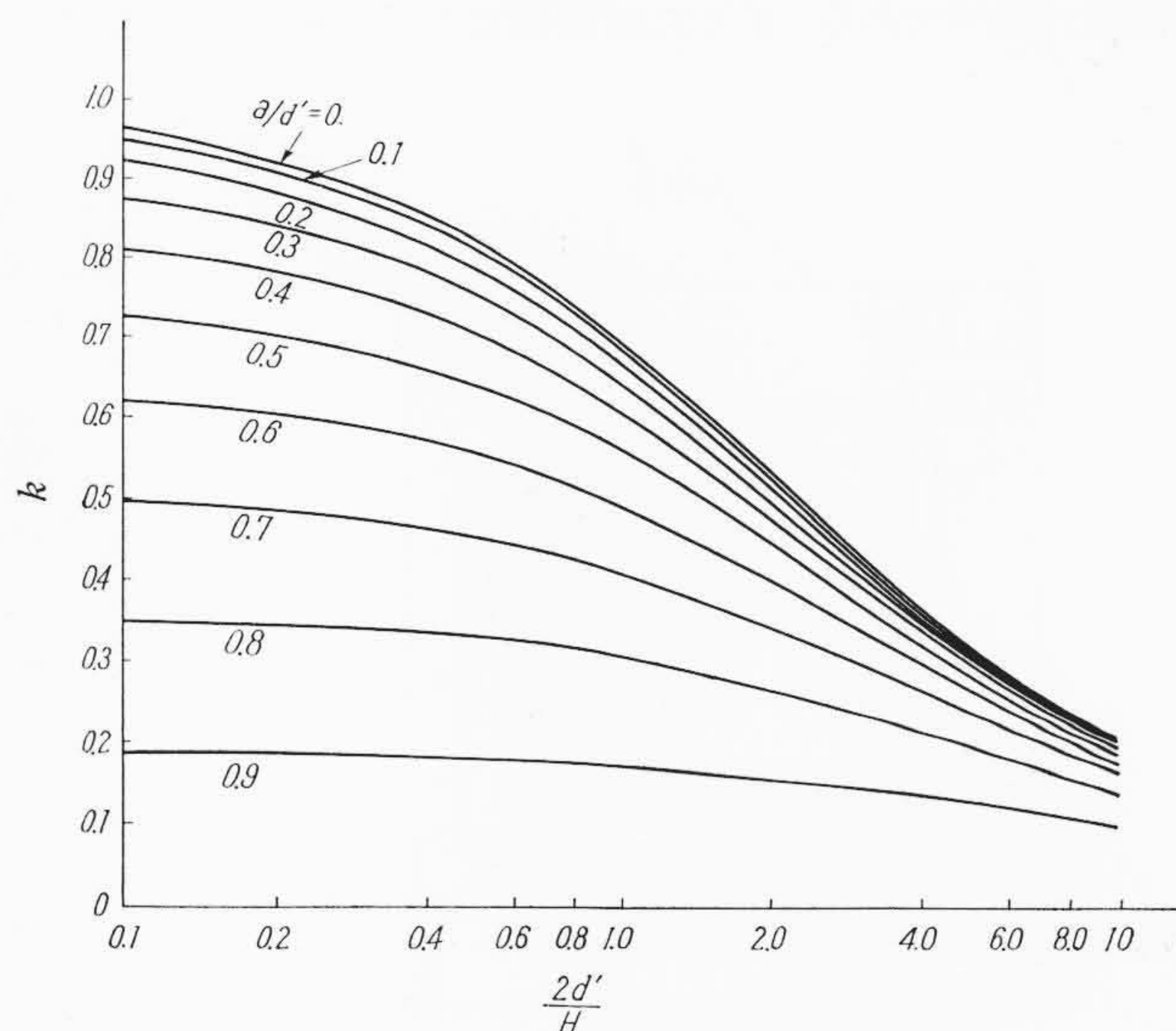
ここで ρ, ρ' は炉内容物およびコイル導体の固有抵抗 (Ω-cm) であり、 δ, δ' はそれぞれの電流浸透深さを表わす。また、 k, K はコイルおよびルツボの形状寸法によって定まる関数で、それぞれ第 4 図、第 5 図に示す。

(6), (7) 式からわかるように、炉の抵抗 R はコイル自身の実効抵抗 R' と炉内容物の実効抵抗 R'' の和であり、リアクタンス X はコイルと炉内容物間の磁束によって生ずるリアクタンス X' と炉内容物自身のリアクタンス X'' の和である。

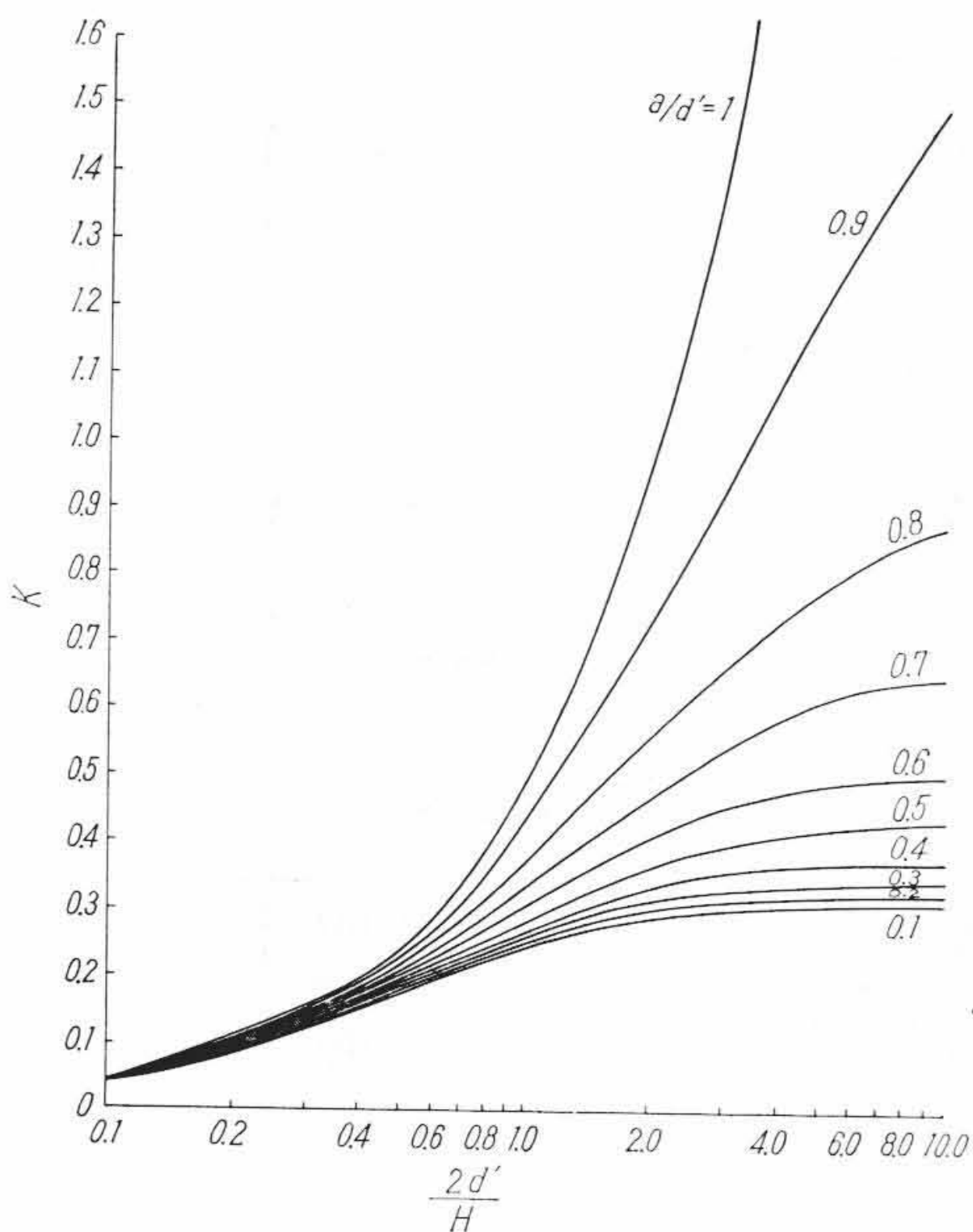
以上の方法により炉の抵抗 R とリアクタンス X が求められれば、炉のインピーダンス Z は

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\Omega) \quad \dots\dots (11)$$

で求められる。これらの結果より、炉の電流、入力、無効電力、コイル損失は次式で求められる。



第 4 図 k 曲 線 図



第 5 図 K 曲 線 図

$$\text{電流} \quad I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (\text{A}) \quad (12)$$

$$\text{入力} \quad P = I^2 R \times 10^{-3} = \frac{E^2 R \times 10^{-3}}{R^2 + X^2} \quad (\text{kW}) \quad (13)$$

$$\text{無効電力} \quad Q = I^2 X \times 10^{-3} = \frac{E^2 X \times 10^{-3}}{R^2 + X^2} \quad (\text{kVar}) \quad (14)$$

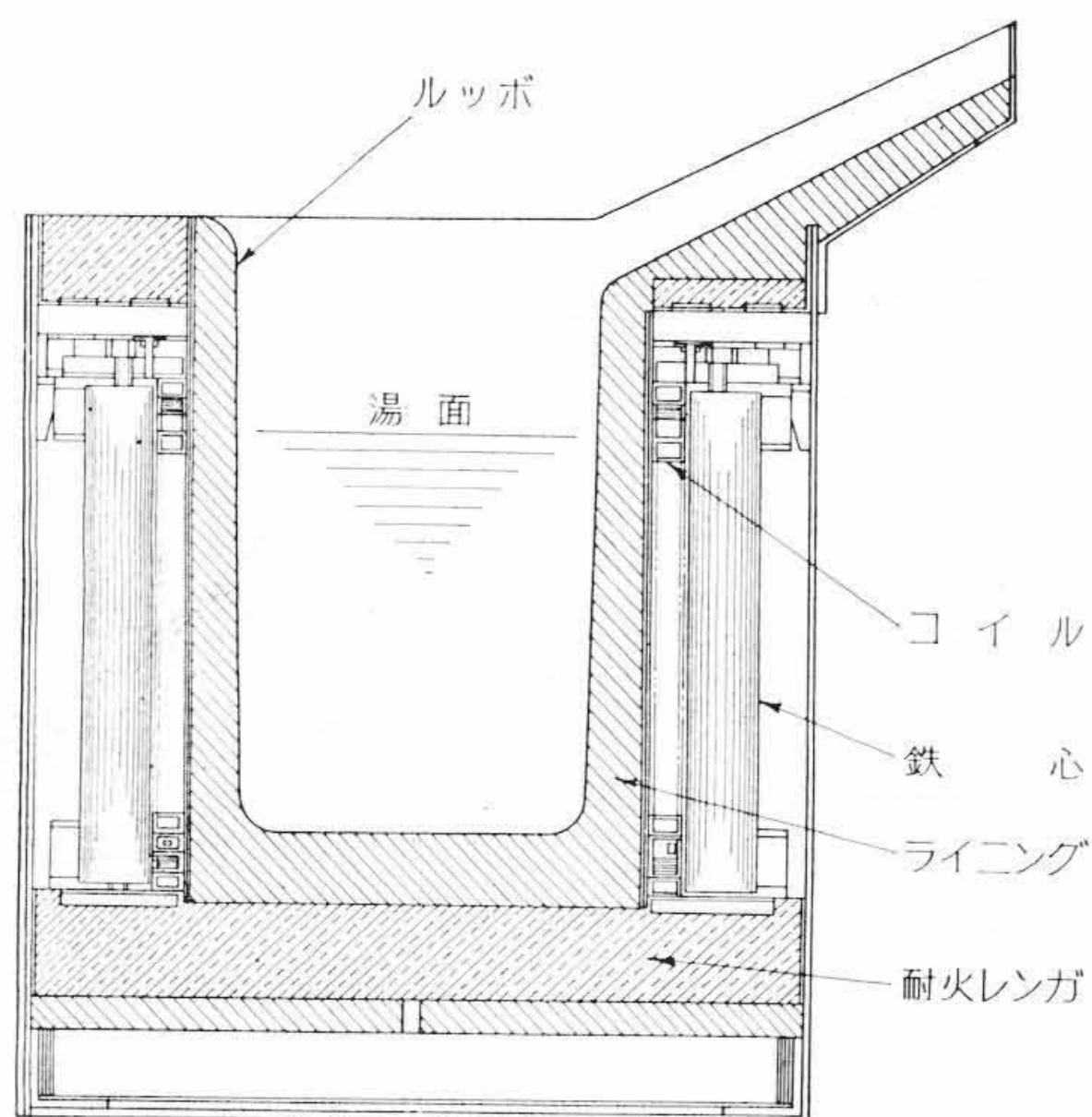
$$\text{コイル損失} \quad P_c = I^2 R' \times 10^{-3} = \frac{E^2 R' \times 10^{-3}}{R^2 + X^2} \quad (\text{kW}) \quad (15)$$

誘導炉自身は低力率のため、コンデンサを並列に接続して力率改善を行なう必要があるが、このコンデンサの必要容量は力率を 100% まで改善するには (14) 式で求められる無効電力に等しくなることが必要である。

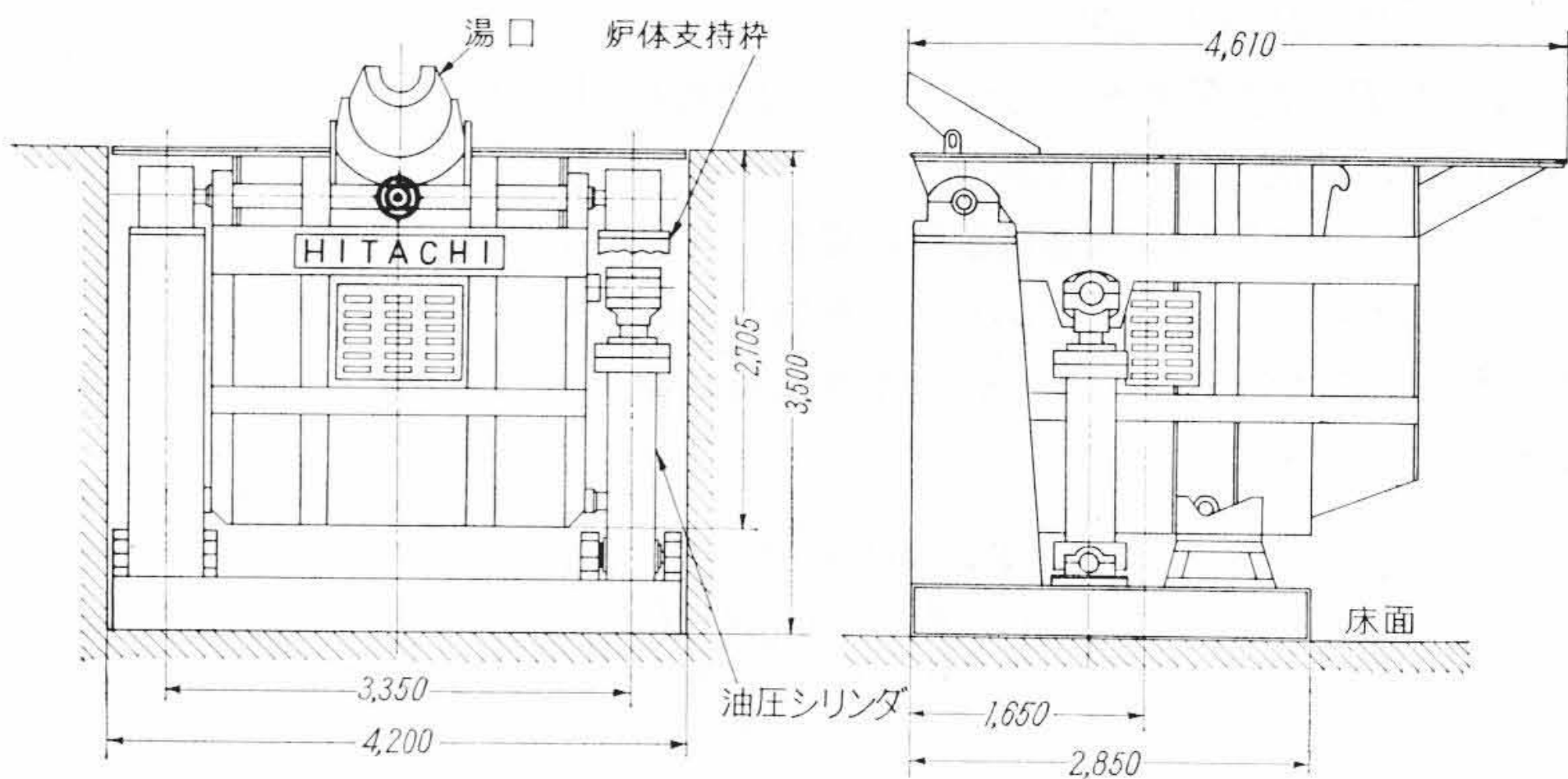
3. 炉 の 構 造

炉体内部の構造を第 6 図に示す。ルツボ形低周波誘導炉の構造は本質的には従来の高周波誘導炉と大きな相違はない⁽²⁾⁽⁹⁾。

コイルは内周部を厚肉とした特殊な断面形状をもった成形銅を巻いて作られている。これは低周波誘導炉の場合は高周波誘導炉に比べ必然的にコイル巻数が大となるため、従来高周波誘導炉に使用されていたような銅管コイルではコイル抵抗が大となり効率が低下するおそれがあり、これの対策として十分大きな断面積が得られるよう考慮したものである。とくに断面形状が非対称となっているの



第 6 図 8,000 kg 低周波誘導炉炉体内部構造



第 7 図 8,000 kg 低周波誘導炉寸法図

は、前項においても述べたように電流はコイル内側に集中して流れるため内側部のみ断面積を増したものである。また、冷却水通路は所定の水頭で十分な流量が得られるよう断面積が決定されている。

低周波誘導炉ではかくはん作用がきわめて大きい、これがあまり大きくなると不都合もあるので、ある程度このかくはん力を押えるためコイル面を湯面より若干下げることが一般に行なわれている。この場合上部のライニングはコイルにより冷されないためその寿命が短くなるおそれがある。本炉ではこの点を考慮してコイルは湯面上まで巻きライニングに対する冷却は十分行なえるようにしたが、電流を通ずるコイルは湯面下までとし上部コイルは電流を通さず、冷却専用とした。またコイルはルツボ内の 8,000 kg の溶湯の圧力に十分耐え得るよう機械的な強度を有している。

鉄心は成層された電気鉄板よりなりコイル周辺に配置されている。この鉄心はコイルにより発生する磁束の通路の一部となり、磁束が外部に漏れいして外わくその他を過熱することのないよう磁気遮へいの役割もしているわけである。

外わくは鋼板製一体溶接構造であり、とくに炉体傾動時に受ける大きな荷重に対して十分な安全性を有するよう製作されている。この点は完成後実際運転と同じ条件で傾動試験を行ない、炉体各部のひずみを実測しこの安全性を確認している。

炉体傾動装置としては油圧方式を採用した。炉体はその両側に備えた油圧シリンダにより押し上げられ湯口に近接して設けられた傾動軸を中心に回転運動をする。したがって傾動途中における湯口の移動は少ない利点がある。油圧ポンプ、制御弁などはコンパクトなキュービクルにまとめられ完全な防じん構造としてあり遠方操作により運転される。油圧ポンプなどは炉体 2 基に対して 2 組設けられ、切替弁により万一油圧ポンプに故障が生じて他方のポンプに切り替えて運転できるようになっている。

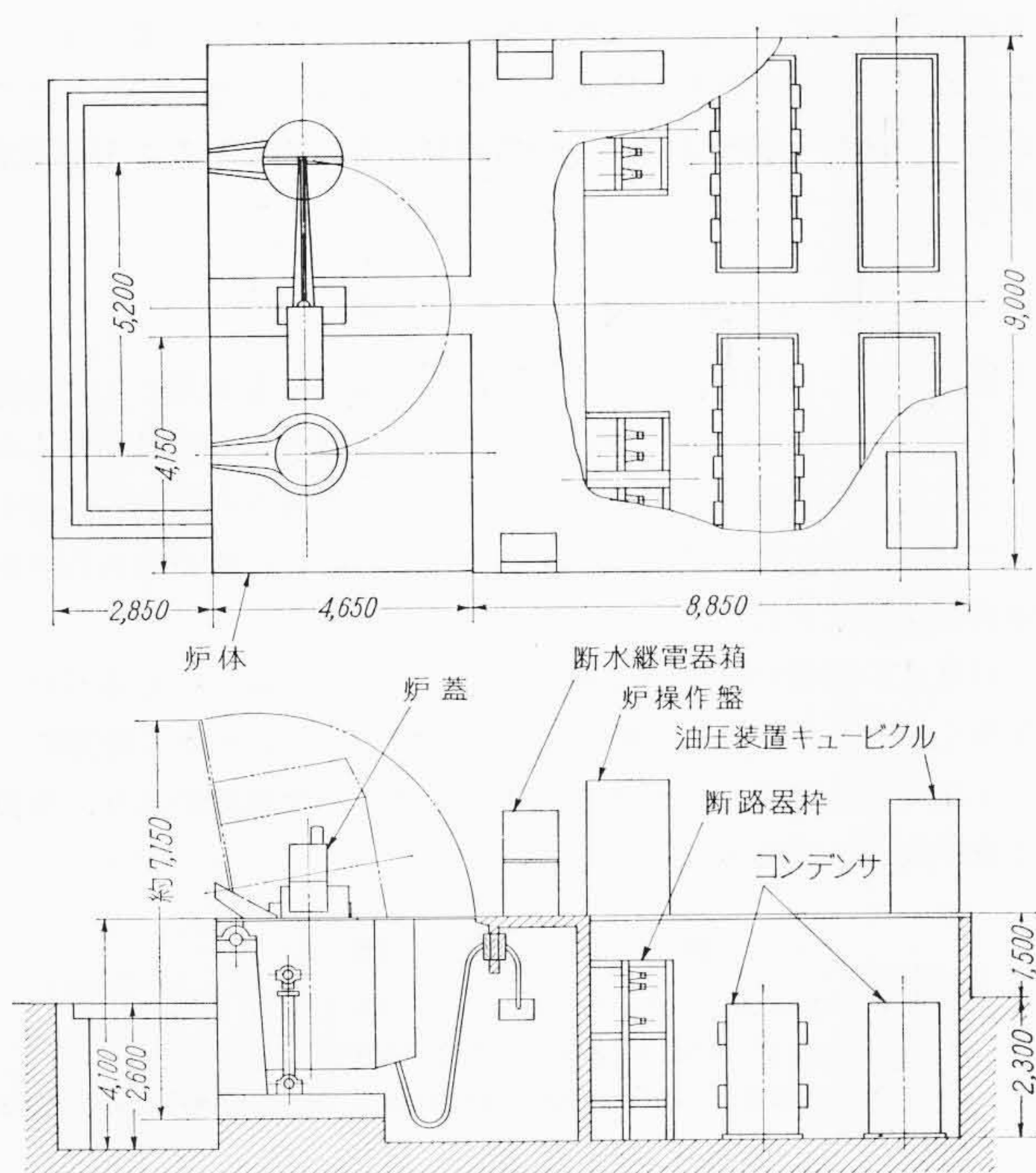
4. 電 源 装 置

8,000 kg 低周波誘導炉の設備全体配置図を第 8 図に、接続図を第 9 図に示した。

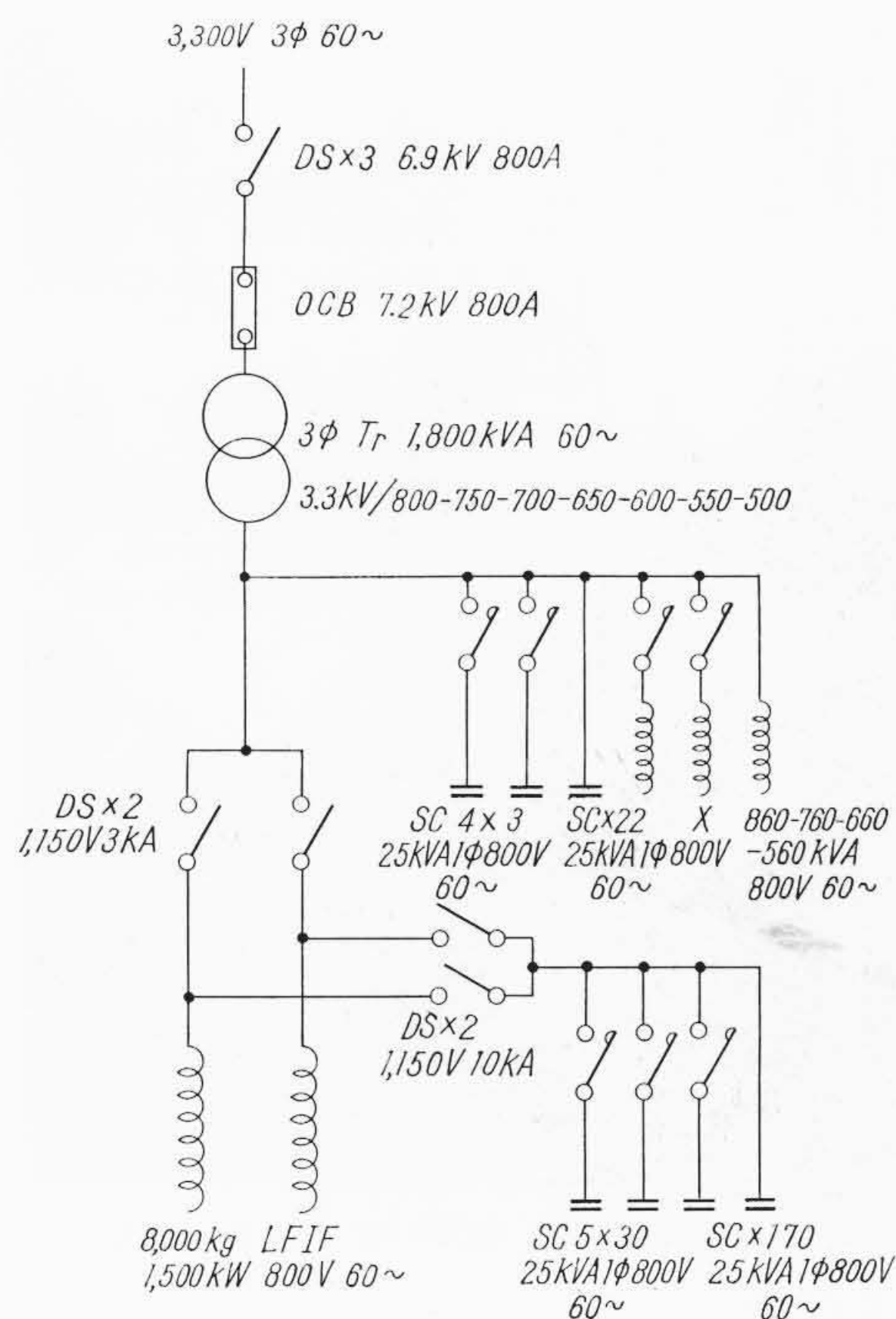
本設備は 2 炉 1 電源の方式であり炉体 2 基に対して 1 組の電源装置を有し切替開閉器によりいずれか一方の炉を運転する方式となっている。

電源変圧器は三相 1,800 kVA で、受電々圧の 3,300 V より炉の入力電圧まで降圧するもので二次電圧は炉の定格電圧 800 V より広範囲の電圧が取り出せるよう多数のタップを設けてある。とくに入力調整のため迅速かつ簡単に電圧が切り換えられるように負荷時タップ切換装置を備えている。

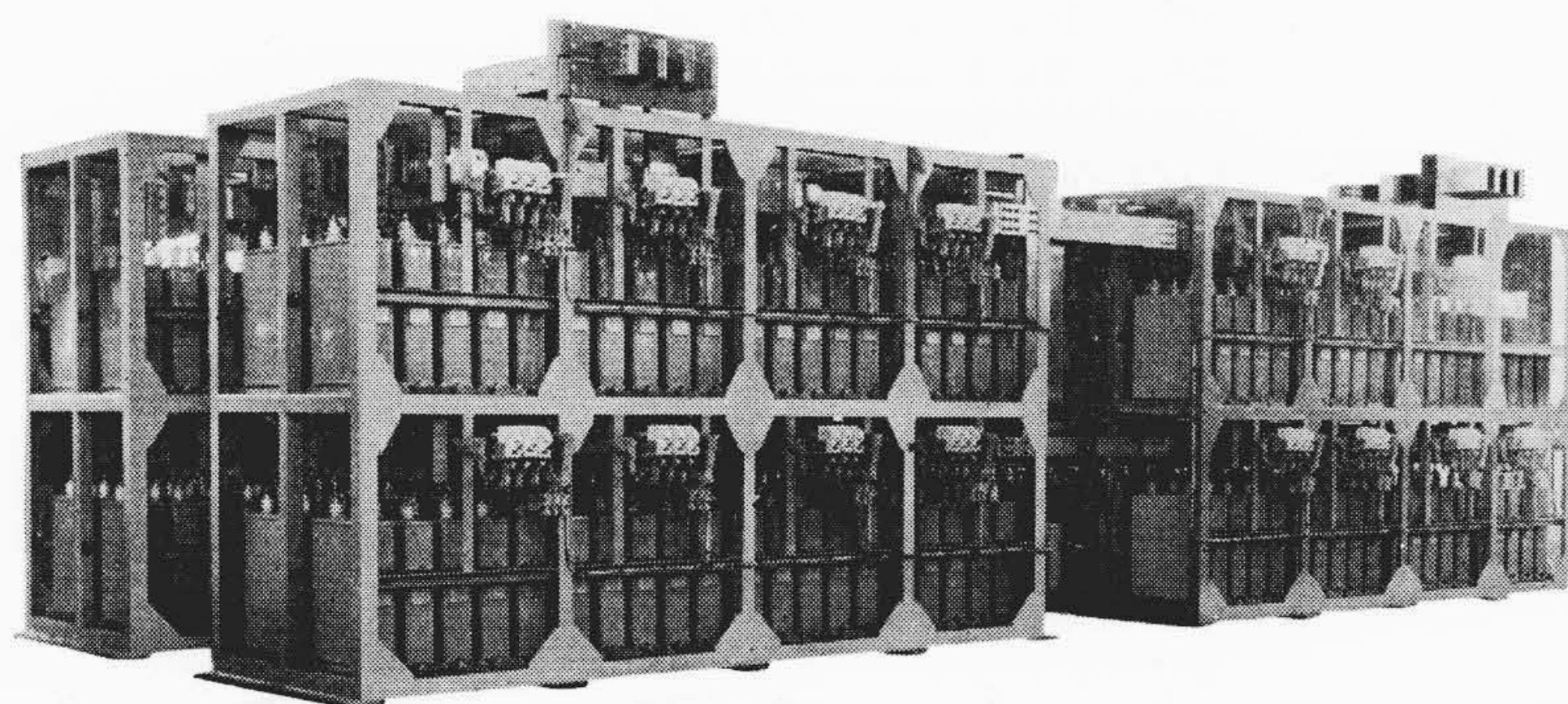
力率調整用コンデンサは全容量 8,000 kVA でこの約半分が固定分として常時そう入され、残りが約 30 群に分割されおのおのが電磁接触器によって炉の力率に応じて挿脱(そうだつ)されるようになって



第8図 8,000 kg 低周波誘導炉配置図



第9図 8,000 kg 低周波誘導炉接続図



第10図 力率調整用コンデンサ

ている。このコンデンサの挿脱は炉の力率の変化に応じて自動的に行なわれ、つねに力率100%近くで運転されるようになっている。

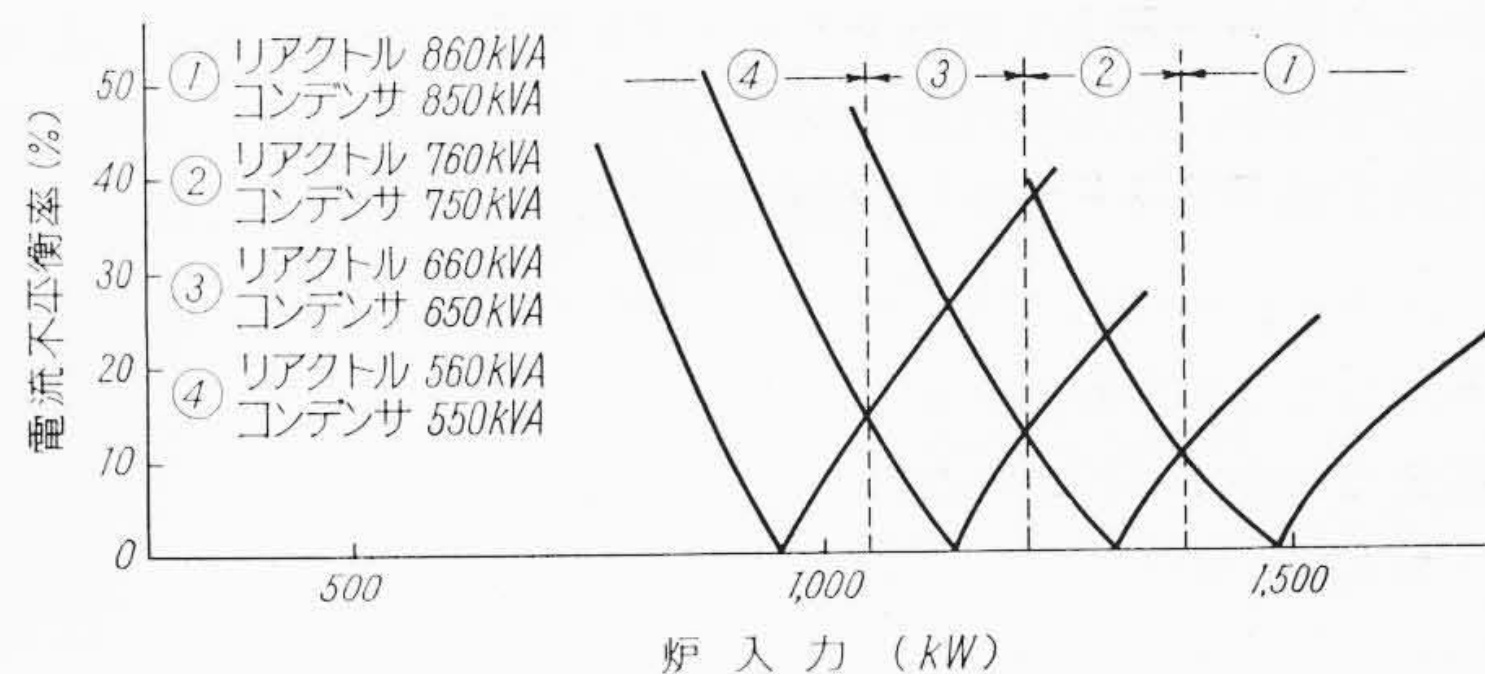
低周波誘導炉は単相負荷となるため三相平衡装置として他の二相に平衡用リアクトルおよび平衡用コンデンサを設けている。平衡用リアクトルは860-760-660-560 kVA、平衡用コンデンサは850-750-650-550 kVAといずれも可変容量としたが、これは炉入力が増大する初期などにおいて定格入力とならないことを考慮して、このような場合にもほぼ三相の平衡がとれるようにしたものである。第11図は定格電圧800Vにおける炉入力の変化と三相電流不平衡率との関係を示したもので炉入力が約900 kWから1,600 kWまで変化してもこの平衡装置の容量変更により三相電流不平衡率を約15%以内に押えることができる。

5. 溶解試験とその結果

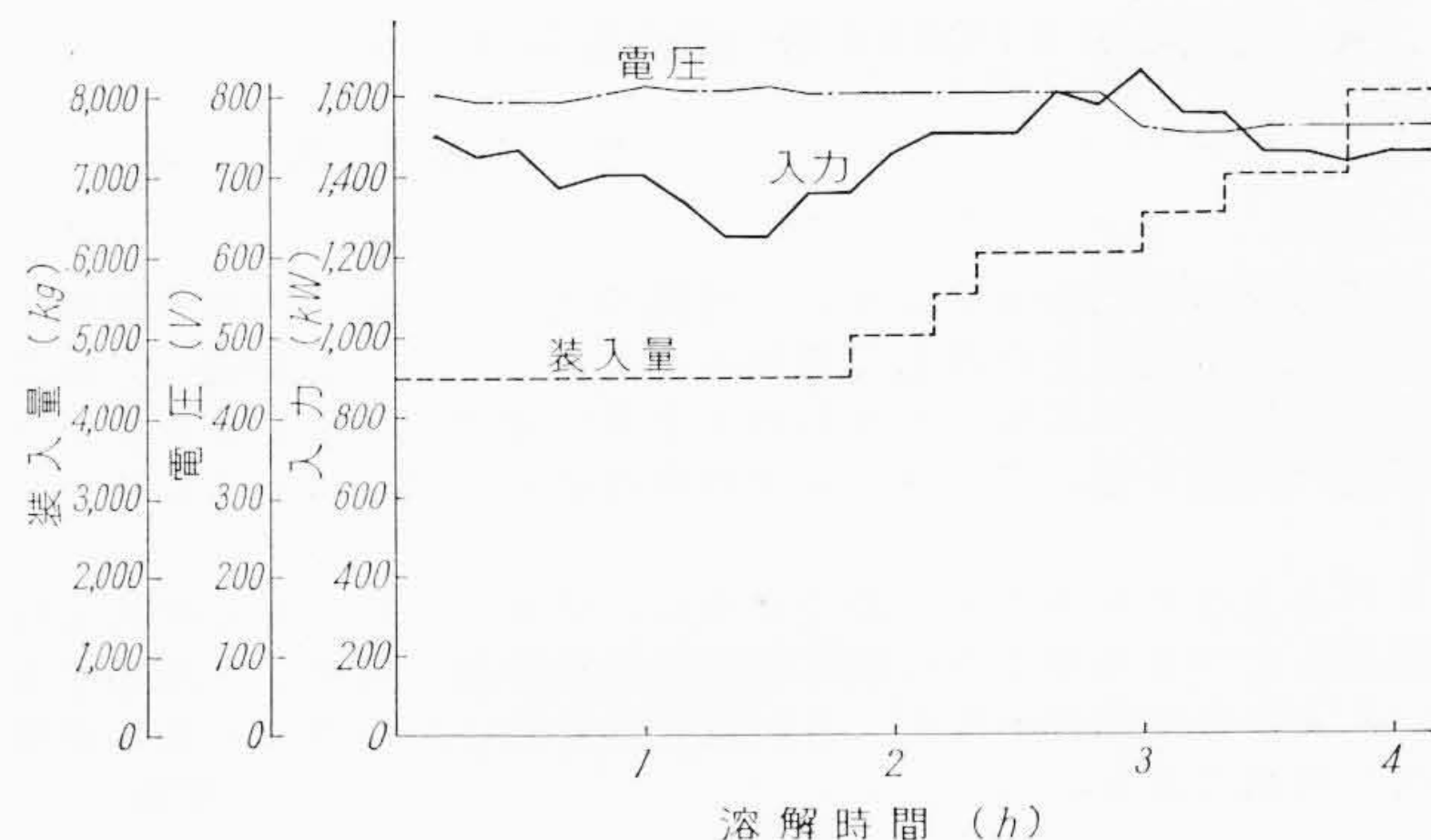
炉体は据付後ケイ砂によるライニングを施行し、これを十分乾燥したのち溶解試験を行なった。

ルツボ形低周波誘導炉は、従来溶解初期に電力がはいりにくいの欠点とされており、この対策として溶湯を使用する方法とスターティング・ブロックと称する大きな溶解金属の塊を使用する方法が提案されている。この溶解試験ではこのスターティング・ブロックを採用して全冷材より溶解を行なった。

すなわち、ほぼルツボ内径に近い径をもった円板状の鋳鉄塊（約

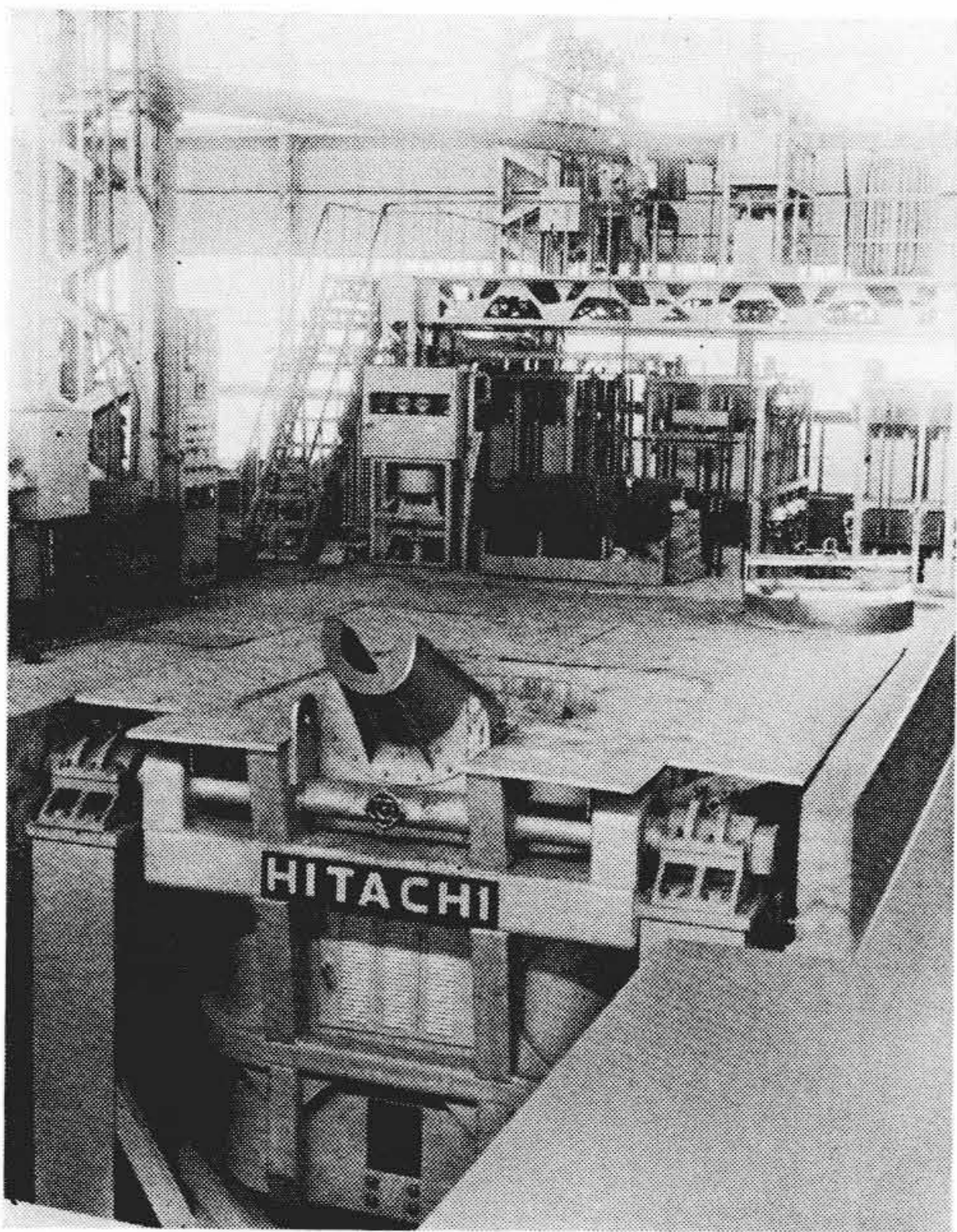


第11図 入力に対する三相電流不平衡率



第12図 溶解特性

2,000 kg) をスターティング・ブロックとしてそう入し、その上に鉄鉄インゴットなどを投入し冷材約4,500 kgにて通電を開始し、あとは溶けるにしたがって材料を追加投入することにした。この場合の通電時間と炉入力の変化のようすを示したのが第12図である。この溶解の様子は通電開始後約1時間30分でルツボ底部より溶湯がはじまり、約2時間30分で多量の溶湯ができて激しくかくはんされ、この状態で投入された材料がつぎつぎに迅速に溶解されている。約4時間で8,000kgの材料は完全に溶湯となり、温度は1,450°Cに達した。これに消費した電力量は4,730kWhであり、溶解量1,000kg



第 13 図 運転中の 8,000 kg 低周波誘導炉

当たりでは約 590 kWh となり全冷材からの溶解としては比較的すぐれた成績であり所期の性能を十分満足することが確認された。なおこの溶解試験は比較的ライニングが冷えている状態から行なったものであり、約 1/3 の残湯を利用して連続操作を行えば電力消費量は約 510kWh/t となり、大幅に低減することがわかった。

また、この炉によりドライ粉の溶解を行なったが、一度溶湯のできた後はドライ粉の溶解もきわめて容易であり、溶損も少なくこの形式の炉がドライ粉のようなものの溶解にも最適であることが実証された。

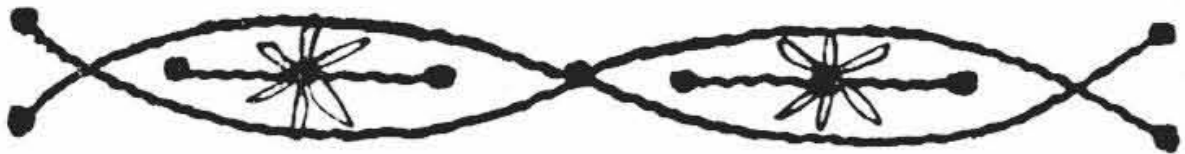
6. 結 言

今回完成した 8,000kg 低周波誘導炉は容量的にも本邦として記録的なものであり、またその溶解能力はこの容量としては最高のものである。なおその設計に当たってはあらかじめ種々の理論的検討を試みたが、溶解試験の結果、ほぼこの設計値に近い値が得られ性能の優秀性が確認された。

この形式の溶解炉はまだ比較的歴史は新しいが緒言にも述べたような多くの特長が次第に一般に認識されつつある。かかる時期にこのような大容量の炉が実用化されたことは大きな意義があり、今後の普及が大いに期待される。

参 考 文 献

- (1) A. J. Chapman: Heat Transfer., 44 (1960, Macmillan)
- (2) A. G. Allen: HIE Repots., 303 (1959)
- (3) P. G. Simpson: Induction Heating., 111 (1960, McGraw Hill)
- (4) G. H. Brown, C. N. Hoyler & R. A. Bierwirth: Theory and Application of Radio-Frequency Heating 91., (1947 D. Van Nostrand)
- (5) 谷崎: 日立評論 27, 436 (昭 19-4)
- (6) 北村: 電試彙 20, 302 (昭 31-4)
- (7) 北村: 電試彙 21, 410 (昭 31-6)
- (8) 北村: 電試彙 21, 257 (昭 32-4)
- (9) B. Demmig: HIE Reports., 308 (1959)



実用新案第 576654 号 (実公昭 37-10336)

新 案 の 紹 介



西 村 武

プ ル ス イ ッ チ の つ ま み

この考案は図面に示すように、外側の透明な電極と内側の電極との間に電気発光層を介在して電気ルミネセンスセルを形成し、両電極間に商用電圧を印加してきわめて小さい電力でまぶしさを生じない程度の発光を呈して、スイッチの存在位置を明示させるものである。

このようなプルスイッチのつまみは、従来、一般にある夜光塗料を混在したつまみのように消灯後比較的短時間で輝やきが減退するというような不都合がなく、また機械的に強いから寿命も長く実用に供し有効である。

(買場)

