

大形熔接構造物の誘導加熱法

Investigation of Induction Heating on Welded Structure

鳥山 忠次* 妹島 五彦* 石原 政男*
Tadatsugi Toriyama Itsuhiko Sejima Masao Ishihara

内 容 梗 概

最近熔接界のすう勢として熔接構造物の予熱、後熱および局部焼鈍などに誘導加熱法を応用することが普及してきた。装置としては一般に 50～ または 60～ の低周波誘導加熱装置が用いられているが、大形熔接構造物や複雑な構造物に対しては通常 50 または 75 kVA の容量の装置を数台並列に接続して使用せねばならない。この不便を解消する一つのところみとして今回日立高圧気中配電箱が開閉ひん度に耐える特性を利用し、これを誘導加熱装置に改造し大形熔接構造物の局部焼鈍に適用して成功をおさめた。本報告は大形熔接構造物に対する応用例を概説したものである。

1. 緒 言

最近機器の大形化や材料の高級化に伴い熔接作業にあたって予熱、後熱、および焼鈍作業に誘導加熱法を応用することが普及し始めた。工場内で熔接する場合は重油炉や電気炉で構造物全体を加熱することもできるし、直接ニクロム線を熔接物の周囲に巻いて加熱したり、ガス焰で加熱することもできる。しかし熔接物が大形になって組立現場や据付けの現地で直接熔接して焼鈍せねばならないとか複雑な構造物に組立ててしまったのち、その一部分だけを熔接したり局部焼鈍する場合などには誘導加熱を適用すれば比較的簡単にしかも十分効果をあげることができる。すなわち誘導加熱法は(1)加熱装置が簡単で取扱いが現場向きである。(2)どんな構造物も比較的容易に加熱できるなどの特長を有するので今後ますます普及するであろう。筆者らはこの方法の実用化にあたり種々の実験研究と検討を積み重ねてきたが、ここにそのいったんを紹介し合わせて大形熔接構造物へ適用した二、三の実例について概説する。

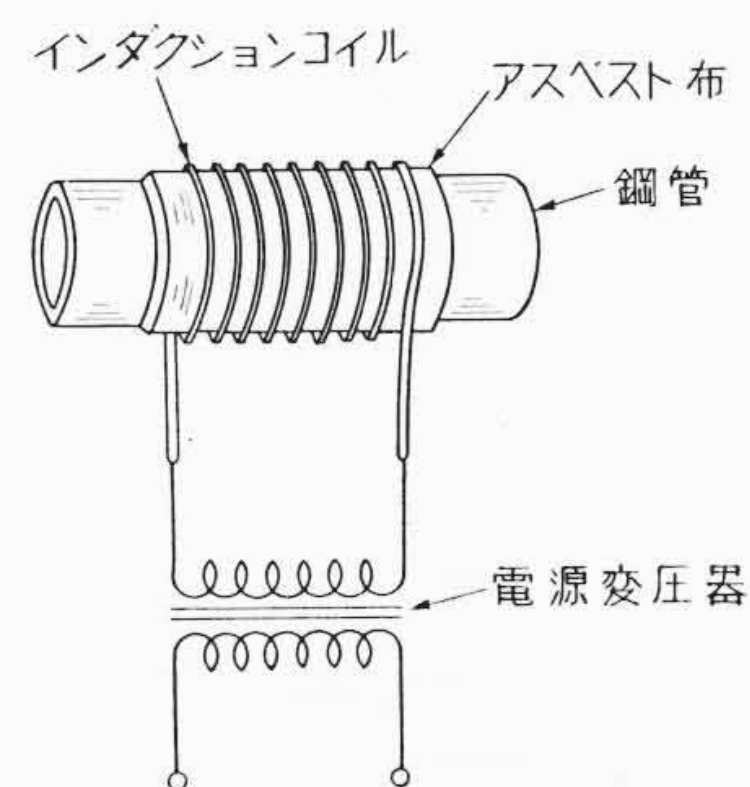
2. 誘導加熱法の基礎的考察

高周波電源を用いて金属を加熱するといわれる表皮作用といって熱は表面部分のみに集中発生することは高周波焼入れなどの応用で周知のことであるが、ここで取り上げる 50～ あるいは 60～ の場合でもやはり熱は表面に近い部分に発生する。しかし熱の集中する部分すなわち「浸透深さ」は鋼材の種々の物理的性質によって左右され、温度上昇とともに電源の力率やそのほかの電氣的諸量も変化する。これら誘導加熱の基礎理論については大阪大学安藤教授などの研究が報告⁽¹⁾されており、筆者らもこれを参考にして種々の実験を行い理論値と実験値および実物における実測値の比較検討を行った。以下誘導加熱の基礎理論についてまず簡単に説明する。

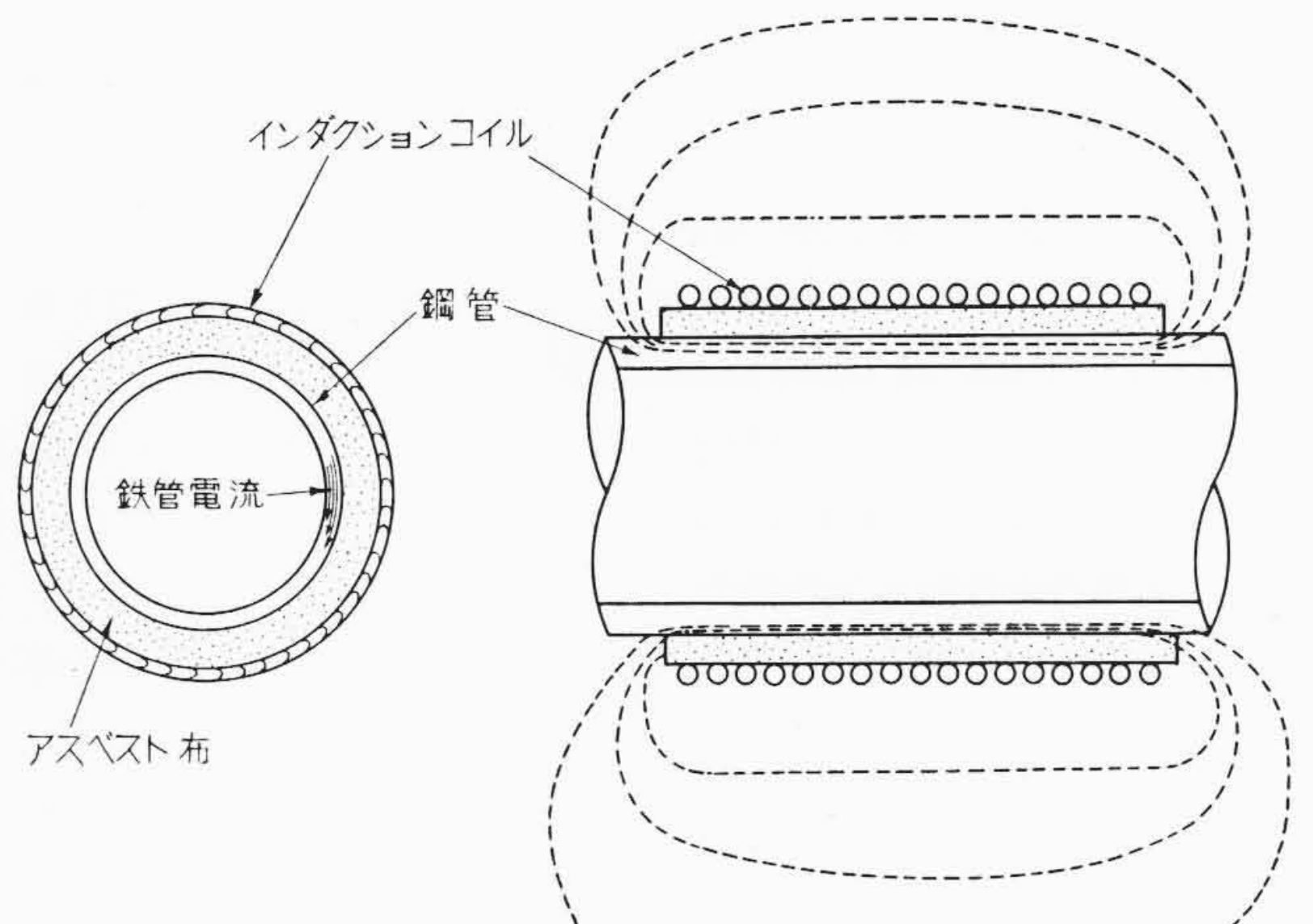
2.1 誘導加熱の原理

第1図に示すように鋼管の周囲をアスベスト布で熱絶縁し円周方向に誘導コイルを巻きつけこの両端を電源変圧器に接続する。コイルに電流が流れると第2図に示すように交番磁束を生じ、この磁束の時間的变化により鋼管内部に電圧を誘起する。鋼管にはこの誘起電圧により円周方向に誘導電流を生じ鋼管抵抗 (R_p) との関係からジュールの法則により毎秒 $0.24 I^2 R_p$ Cal の熱を発生する。誘導加熱はこの発熱を加熱に利用するものでちょうど普通の変圧器において一次コイルを誘導コイルとし鉄心と二次コイルを鋼管と考えたものとまったく同じ現象である。変圧器では渦電流による鉄心の発熱を防止するために絶縁した硅素鋼板を積層してあるのに対して誘導加熱ではこの渦電流を有効に使用するわけである。

* 日立製作所日立工場



第1図 誘導加熱の原理



第2図 誘導加熱の断面

2.2 浸透深さ⁽¹⁾

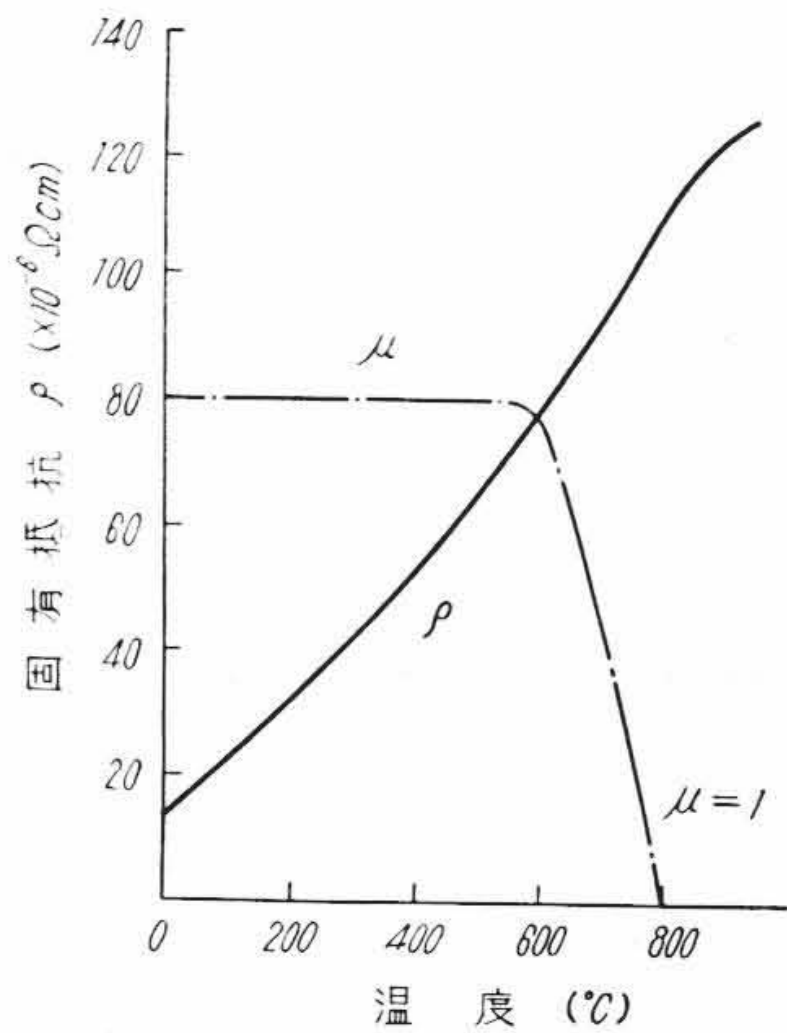
浸透深さは誘導加熱の適用にあたって最も重要な要因であり(1)式で表わされるように導磁率(μ)固有抵抗(ρ)および周波数(f)によって定まる。たとえば軟鋼の場合について計算すると $\mu=40$ $f=50\sim$ $\rho=9.4$ ($\mu\Omega\text{cm}$) $=9.4 \times 10^3$ ($e \cdot m \cdot u$) として

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} = 0.35(\text{cm}) \dots\dots\dots (1)$$

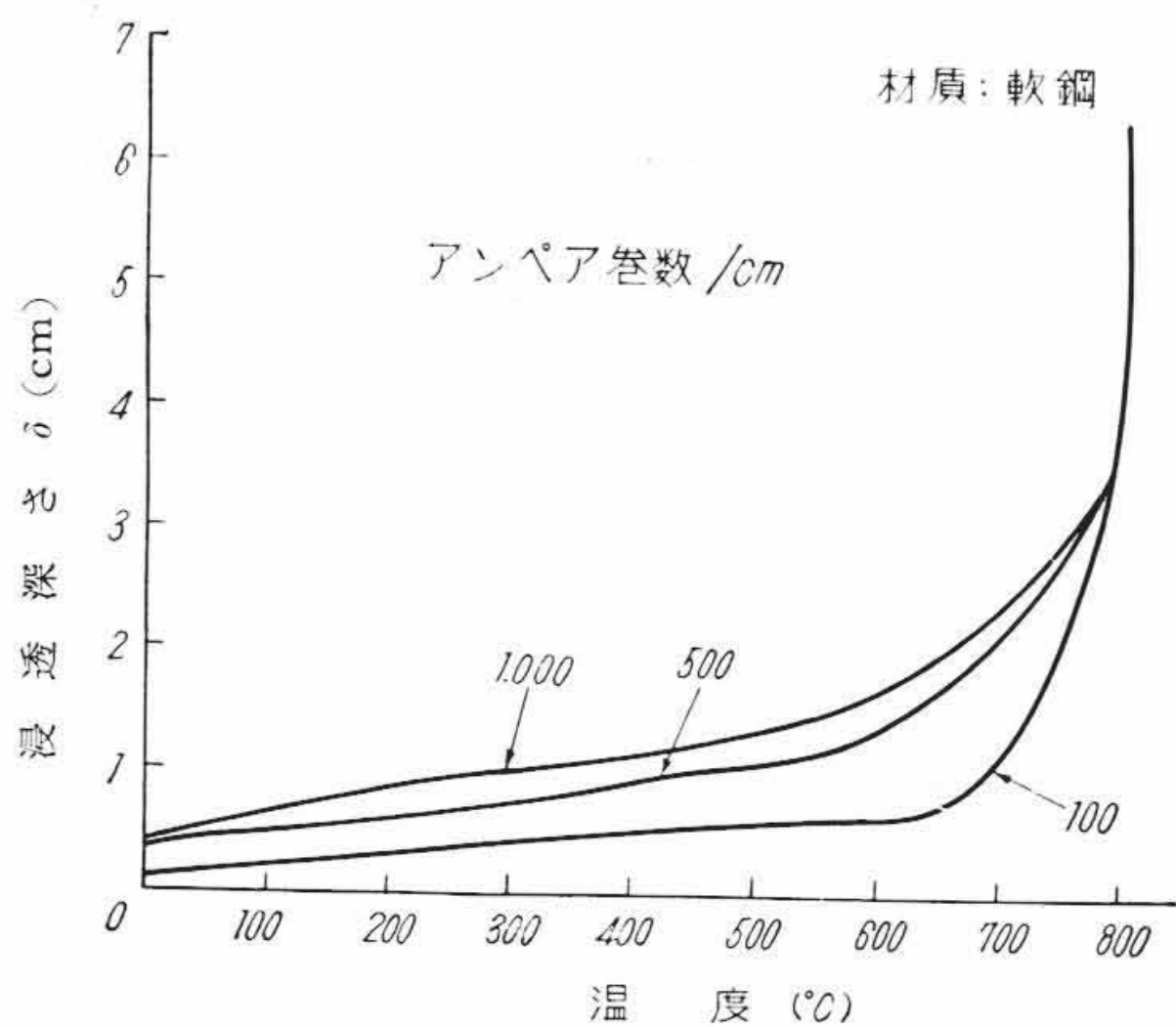
となる。

浸透深さ(δ)は ρ , μ , f の関数であり μ は磁界の強さ H により定まり $\mu-H$ の関係は材料によって定まる。 H は誘導コイル電流 I_c (A) と単位長さの巻数 (n) とから鋼管の表面について

$$H = \frac{4\pi}{10} \cdot n \cdot I_c (\text{エルステッド}) \dots\dots\dots (2)$$



第 3 図 固有抵抗および導磁率の温度による変化



第 4 図 浸透深さの温度による変化

で与えられる。鋼管の内部ではこの磁界は鋼管電流によってうち消され内部に進むにしたがって H は小となり μ は増大する。温度上昇による μ の変化は第 3 図の点線で示すように 600°C 付近まではほとんど認められず磁気変態点以上になると急激に減少する。固有抵抗は第 3 図の実線に示すように温度上昇とともにほぼ直線的に増加する。以上の関係を種々の単位長さ当りのアンペア巻数について浸透深さを示した結果が第 4 図である。

2.3 加熱物の種類と加熱条件

軟鋼のほかに不銹鋼、アルミニウム、銅およびそれらの合金を対象とする場合はこれらの各種金属の電気的磁気的性質が異なっているので電源周波数や電源容量などの加熱条件をそれぞれの場合に応じて選定する必要がある。たとえば浸透深さは第 1 表に示すように軟鋼ニッケル合金などは浸透深さは小さく、18-8 不銹鋼や銅は大きい。したがって軟鋼と同じ程度の発熱分布となるように表皮作用をもたせようとするには高い周波数の電源を用いなければならない。

3. 誘導加熱装置の構造および性能

3.1 一般の誘導加熱装置

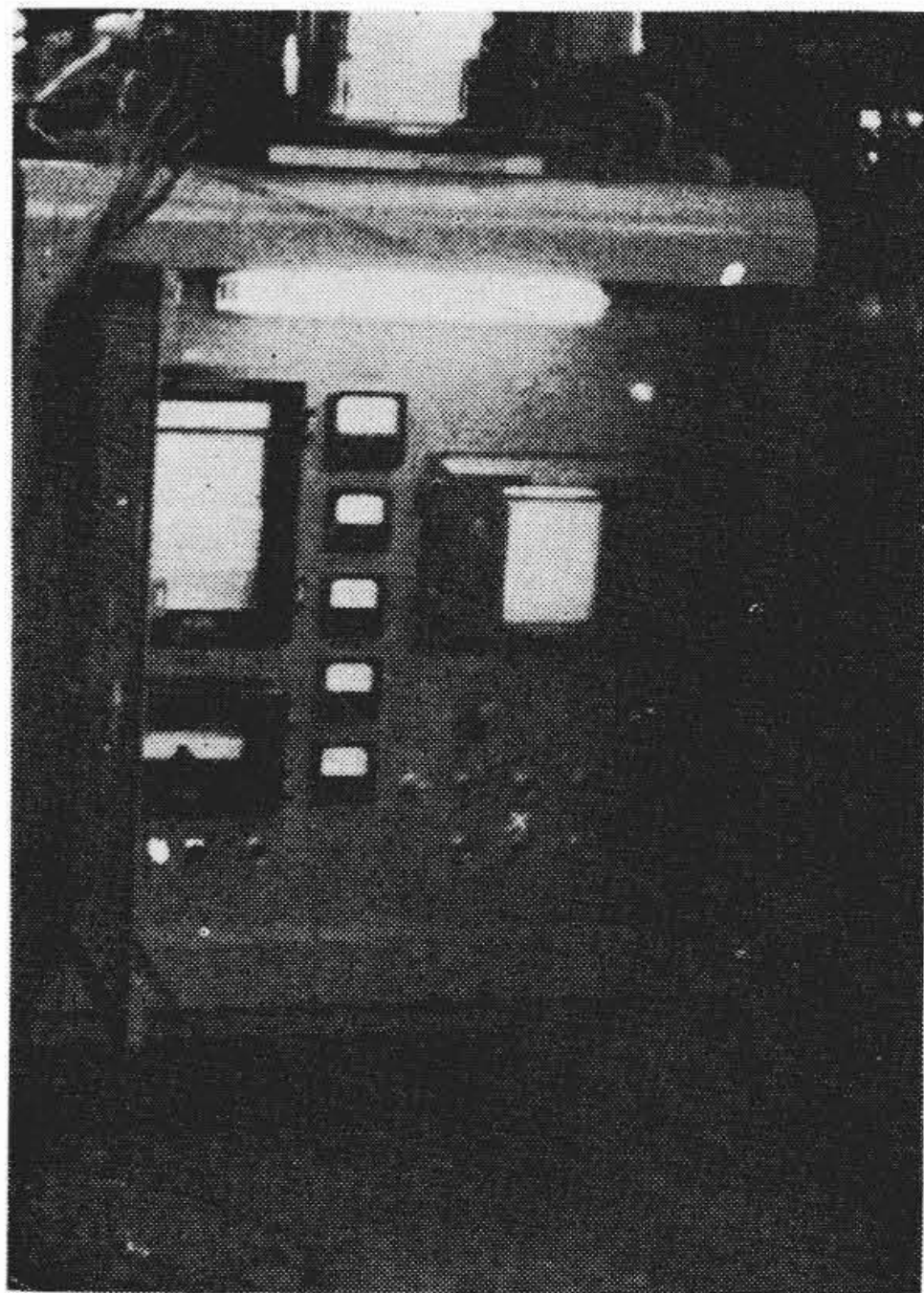
現在一般に市販されているものは主として O 社、D 社などの熔接機メーカーで製作されているもので、容量は 50 kVA または 75 kVA が普通である。たとえば O 社製のものでは主体は電圧調整用変圧器と加熱用変圧器で、前者は単巻変圧器で電圧調整用タップをもっている。加熱用変圧器の一次側電流が電磁開閉器の開閉により自動制御される。制御用電源は内蔵された鉄共振形自動電圧調整器により一定値に保たれている。第 5 図および第 6 図に O 社および D 社製の 75 kVA 誘導加熱装置を示す。

3.2 誘導加熱の制御方式

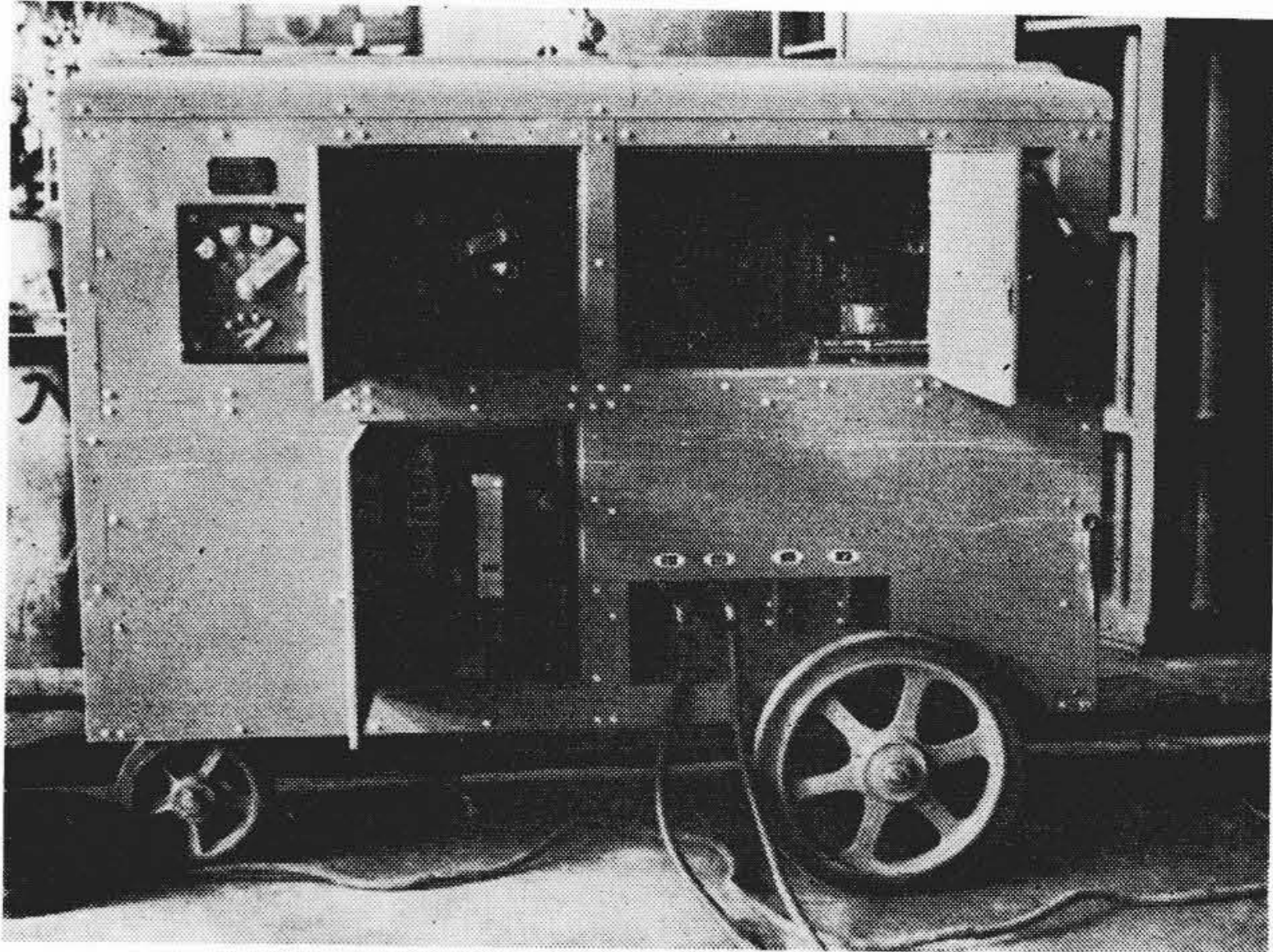
第 7 図に示すような加熱冷却の条件で焼鈍する場合、その時間的

第 1 表 各種金属の加熱特性

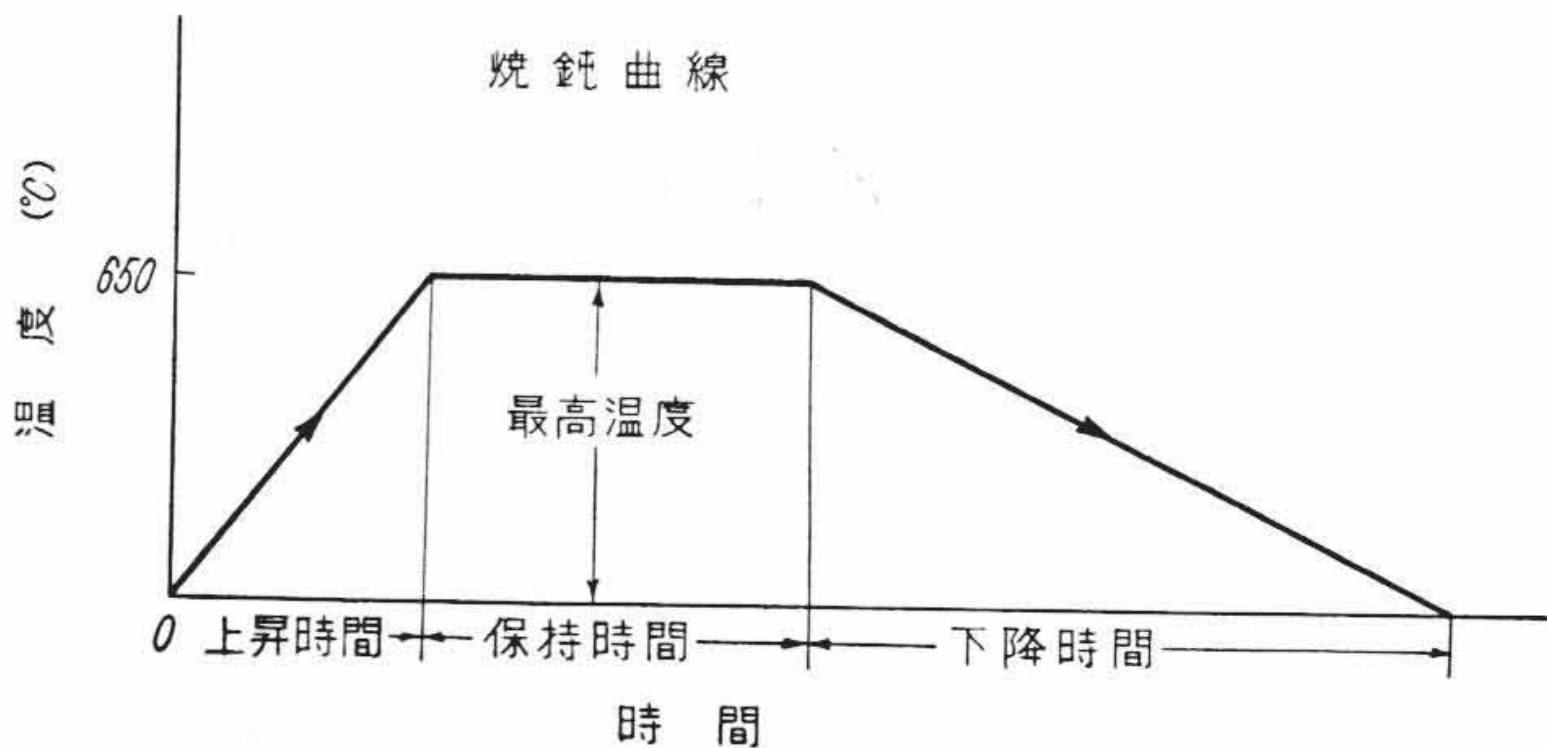
金属の種類	常温での浸透深さ (cm)	等価周波数 (Hz)	発生電力化 (%)	温度上昇速度比 (%)
軟 鋼	0.65	60	100	100
18-8 不銹鋼	5.25	3,900	330	280
黄 銅	1.60	370	30	30
アルミニウム	1.05	160	10	20
銅	0.85	100	10	10
ニ ッ ケ ル	0.44	30	40	40



第 5 図 O 社製 75 kVA 誘導加熱装置

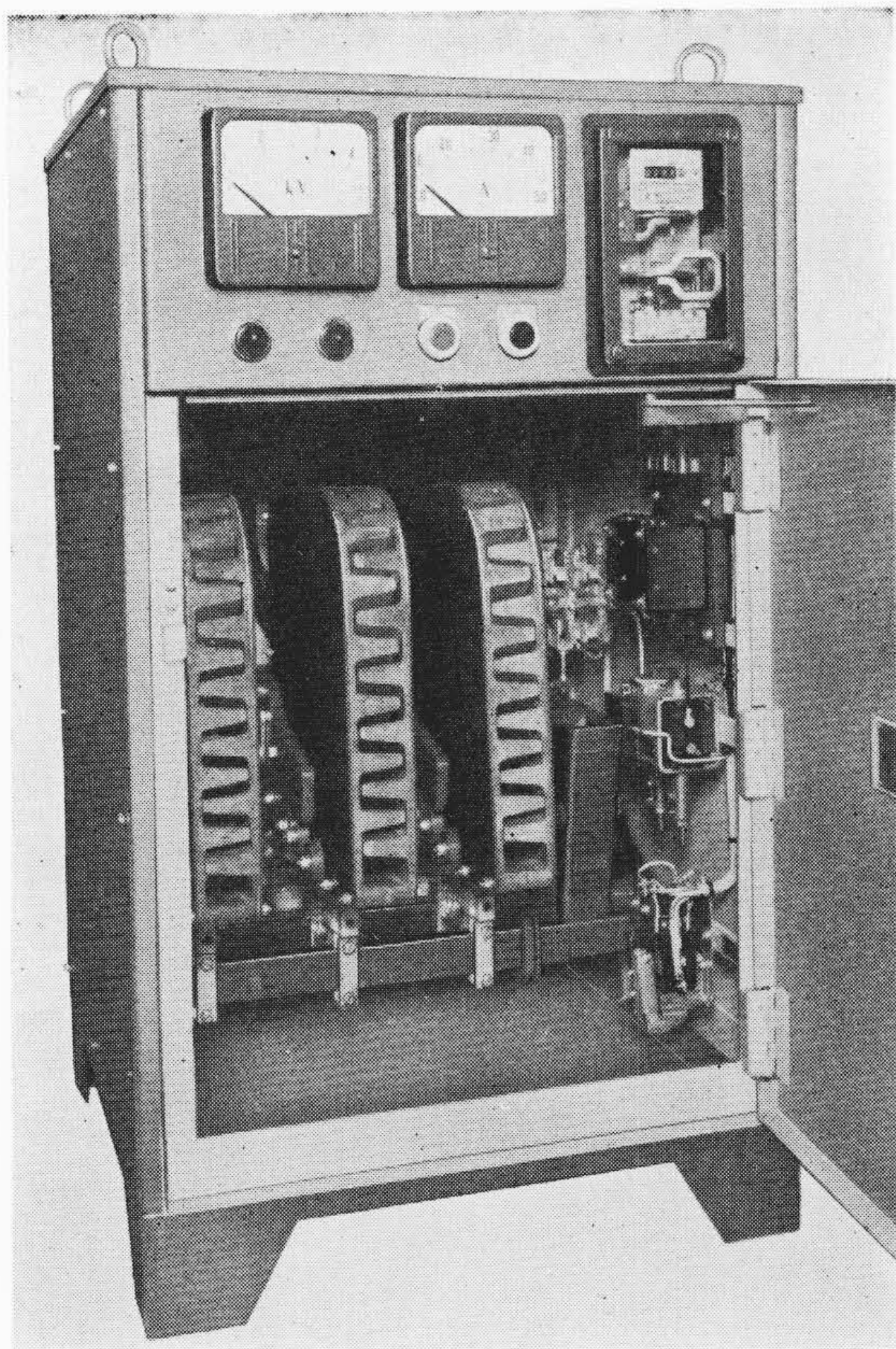


第 6 図 D 社製 75 kVA 誘導加熱装置

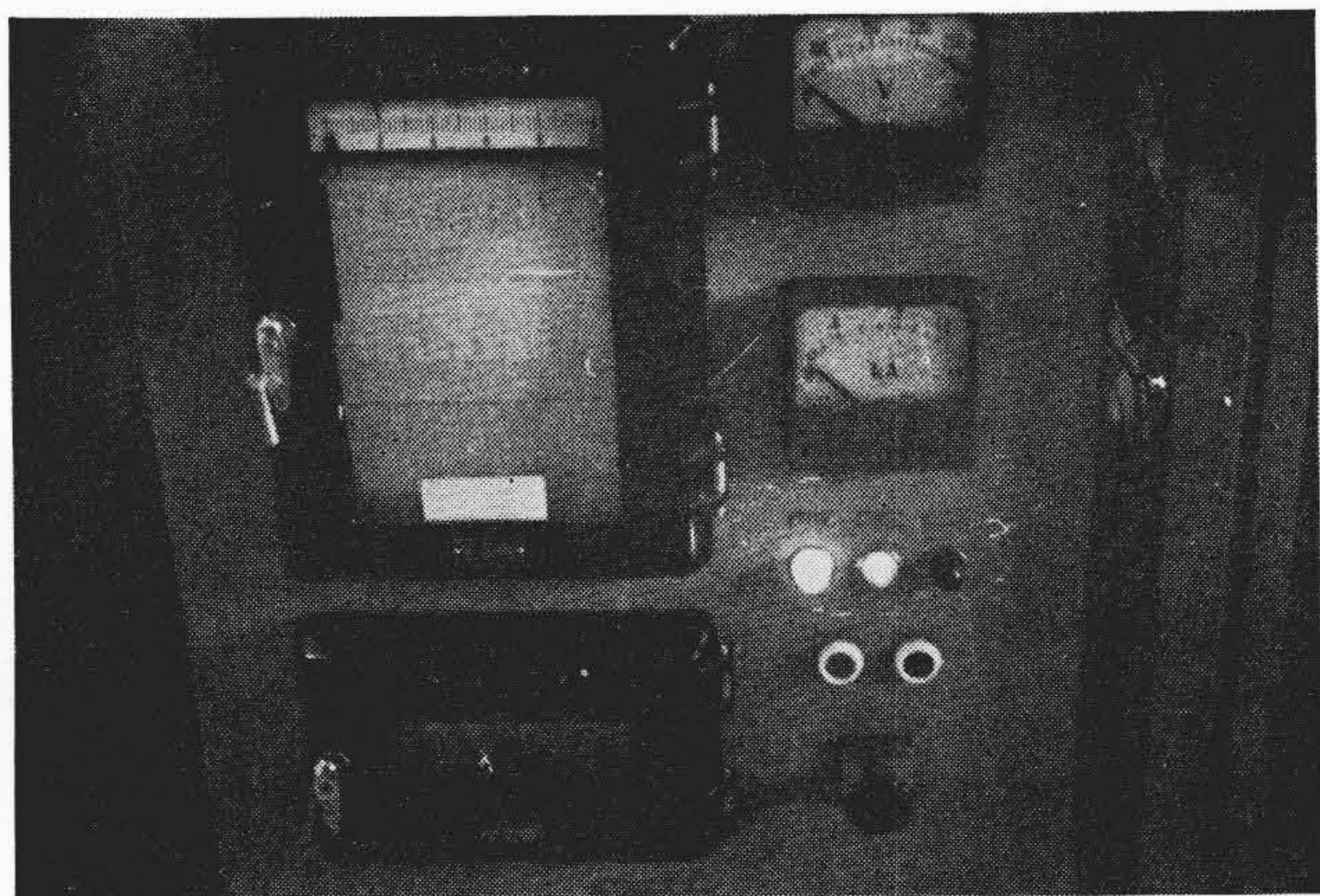


第 7 図 温度プログラム・サイクル

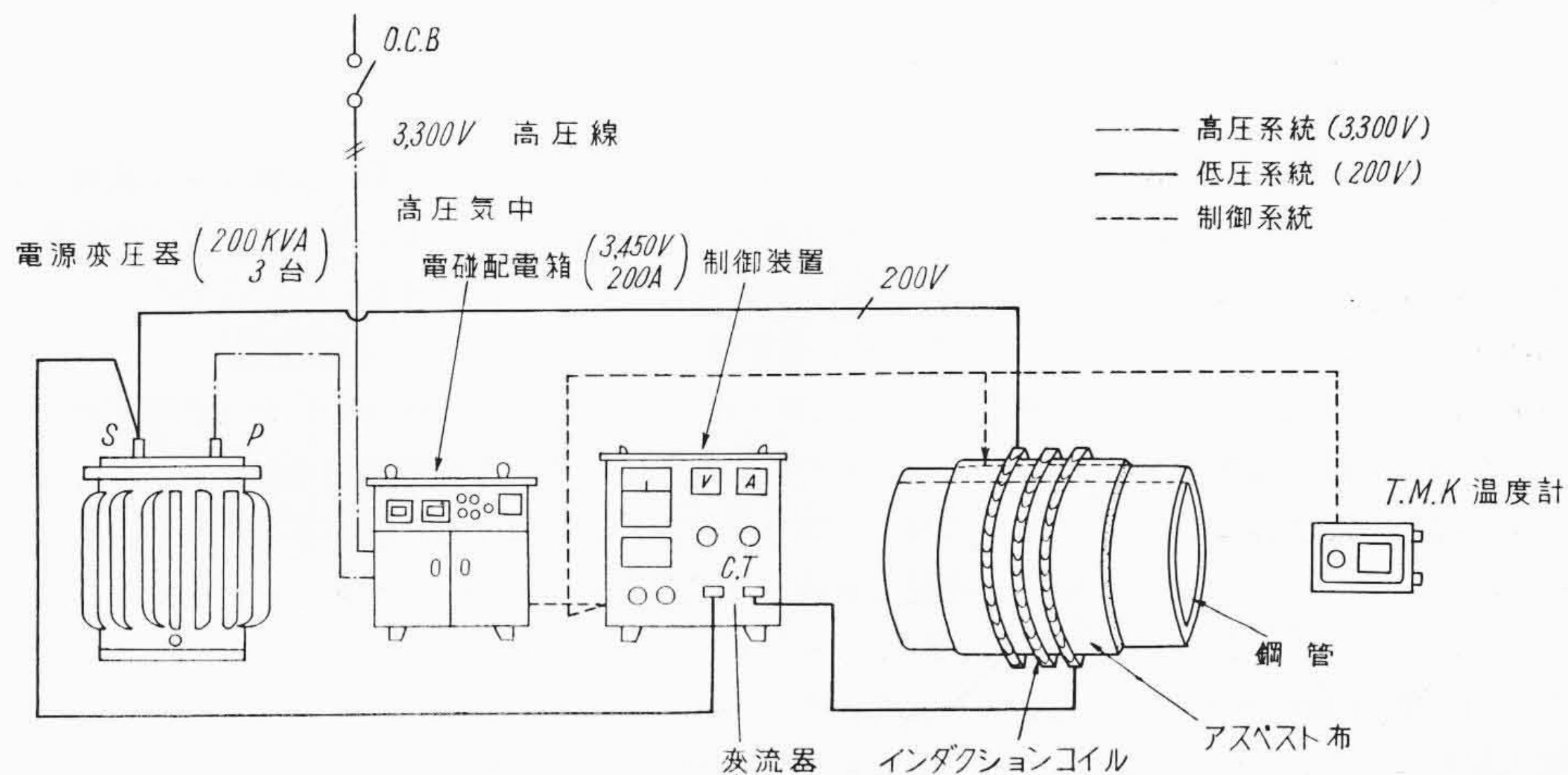
計画を自動的に行うための装置がプログラム制御装置であり、誘導加熱を自動的に行う場合必要である。プログラム設定機構としては電気的に電子管式プログラム調節計を使用する方式と電気パルス式のプログラム調節計を使用する方法の二方式が主として採用されている。これらの方式にもそれぞれ一長一短があって優劣はつけにくいので使用条件によってそれぞれの特長を生かすことが大切であ



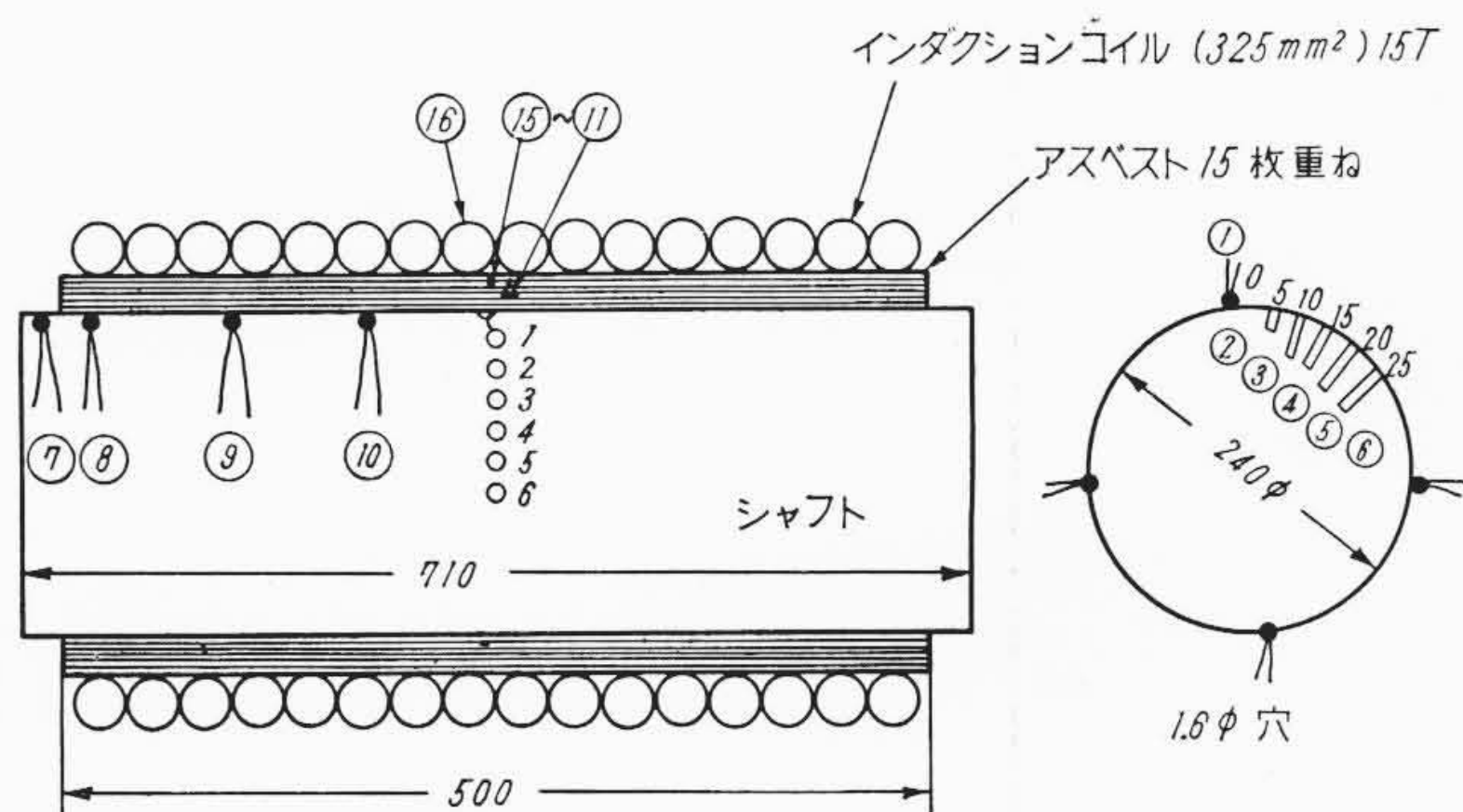
第8図(a) 高圧気中電磁配電箱内部外観



第8図(b) 高圧気中電磁配電箱制御装置



第9図 高圧気中電磁配電箱による誘導加熱系統図



第10図 丸鋼による基礎実験

る。たとえばD社の誘導加熱装置は温度上昇率調整, 温度下降率調整, 最高温度調整, 温度保持時間調整などプログラム調節機構を日立製作所電子管式温度調節計(E. O. I)に追跡させることにより継電装置, 電磁開閉器の ON-OFF 動作により所定の温度サイクルをうるものである。

3.3 高圧気中電磁配電箱とその制御装置

筆者らが扱う製品は比較的大形でしかも複雑な熔接構造物が多く, 誘導加熱装置として市販の 50~75 kVA の装置を数台並列運転することは容量的にも問題があり不便でもあるので, これにかわる方式として高圧側(3,300V)で ON-OFF 制御する方式を採用し, 日立高圧気中電磁配電箱(H. MGS)を誘導加熱用に改造した。本品は元来は高圧電動機の起動運転用として使用されるものであるが, これに用いた高圧気中電磁接触器の定格電流は 200A で高ひん度の開閉機械的寿命 500 万回以上, 電気的寿命 50 万回以上に耐える高性能のものである。誘導加熱は温度自動制御の必要性からその開閉ひん度は大であり, H. MGS の特長が遺憾なく発揮される。これに電子管式自動プログラム方式の温度調節計を主体とした制御装置を合わせて大形製品の誘導加熱に適用して種々効果をあげている。第8図に高圧気中電磁配電箱とその制御装置を示す。第9図はこれを使用した場合の結線の一例を示す。

4. 丸鋼による基礎実験

第10図に示すような直径 240 mmφ 長さ 710 mm の丸鋼にアスベスト布を 11 回巻きつけ丸鋼の中央部に間隔 10 mm で深さ 5, 10, 15, 20 および 25 mm の測定孔を作り熱電対を接続して加熱実験を実施した。

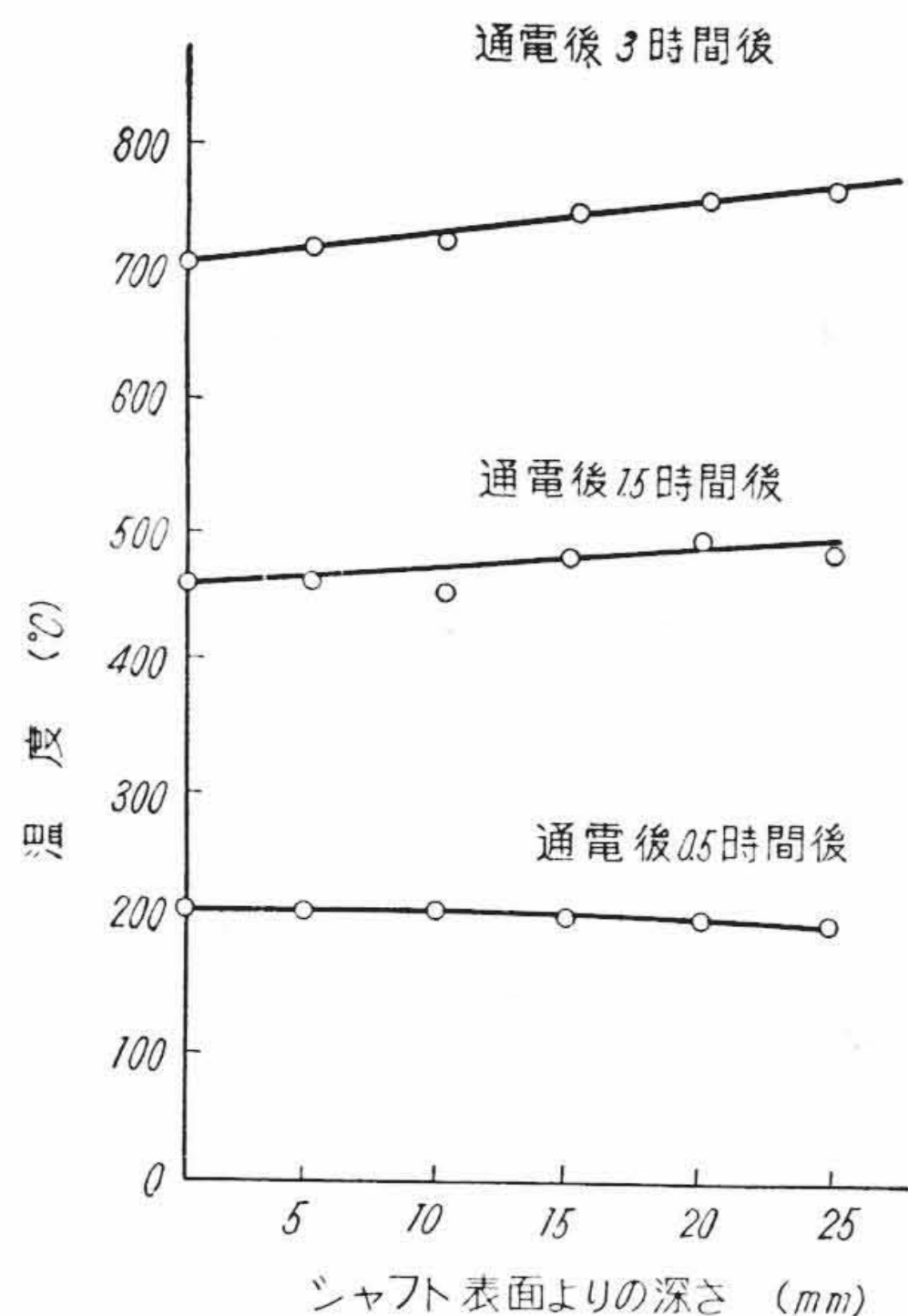
4.1 丸鋼の径方向の温度分布

75 kVA 誘導加熱装置を使用し電流 900 A を流し, 150 分で 650°C に上昇した。通電時間の経過にともなう厚さ方向の温度分布は第11

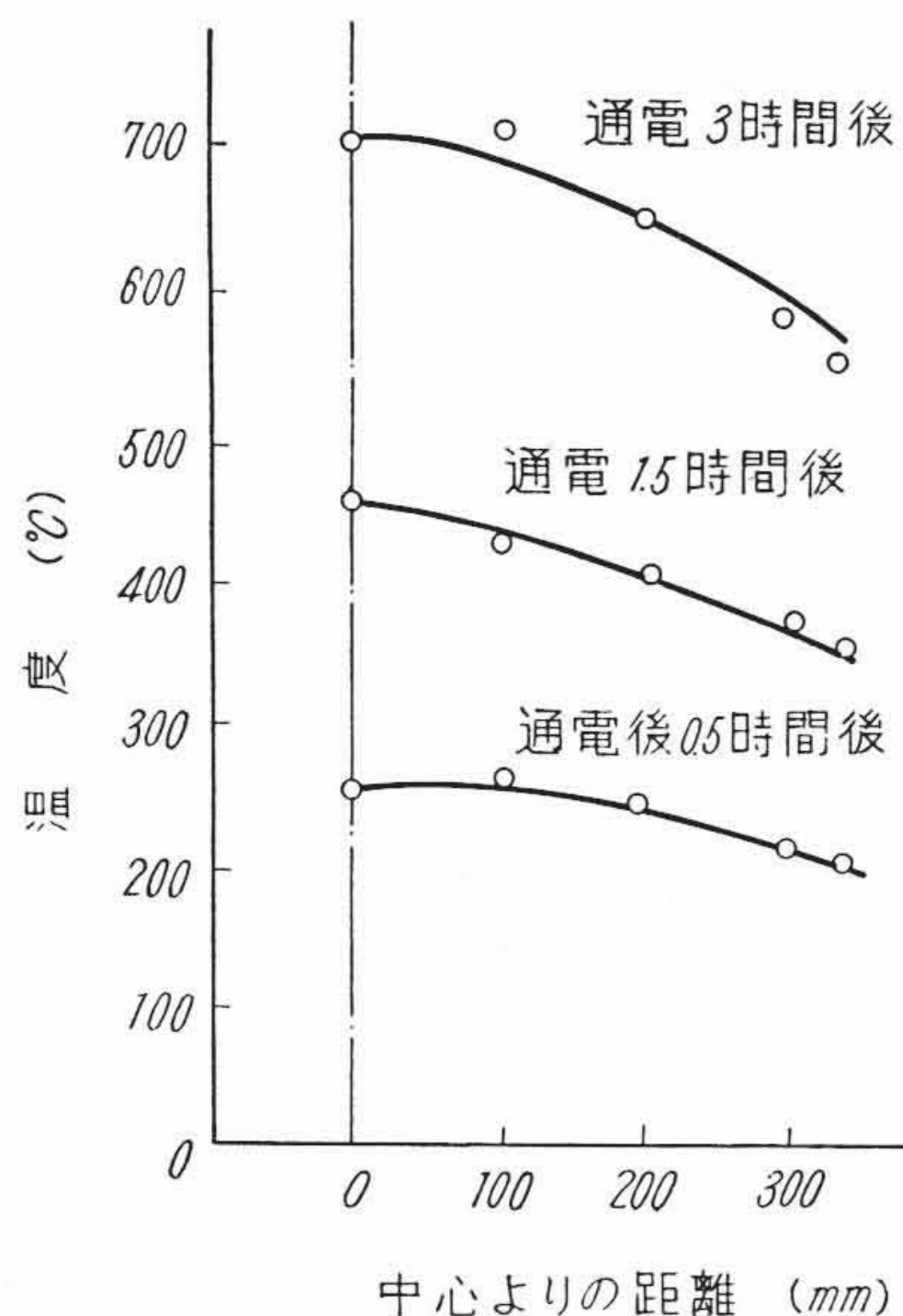
図のとおりで通電初期においては厚み方向の温度差はないが 700°C においては深さが増すにしたがい温度は高くなり, 表面はアスベスト布を通じて熱放散されるためやや低くなっているが十分熱が浸透していることがわかった。

4.2 長手方向の温度分布

長手方向の温度分布を丸鋼表面において測定した結果は第12図に示すとおりである。温度分布は丸鋼中央部が高く, 温度上昇にしたがって温度こう配が急になり平衡部の幅はせまくなる。コイルを密着して巻きつければ約 300 mm の幅が±10°Cの範囲におさまる。高温部において温度こう配が急に



第 11 図 丸鋼の肉厚方向の温度分布



第 12 図 丸鋼の表面長手方向の温度分布

なるのは丸鋼の両端が熱絶縁されていないためと考えられる。

4.3 円周方向の温度分布

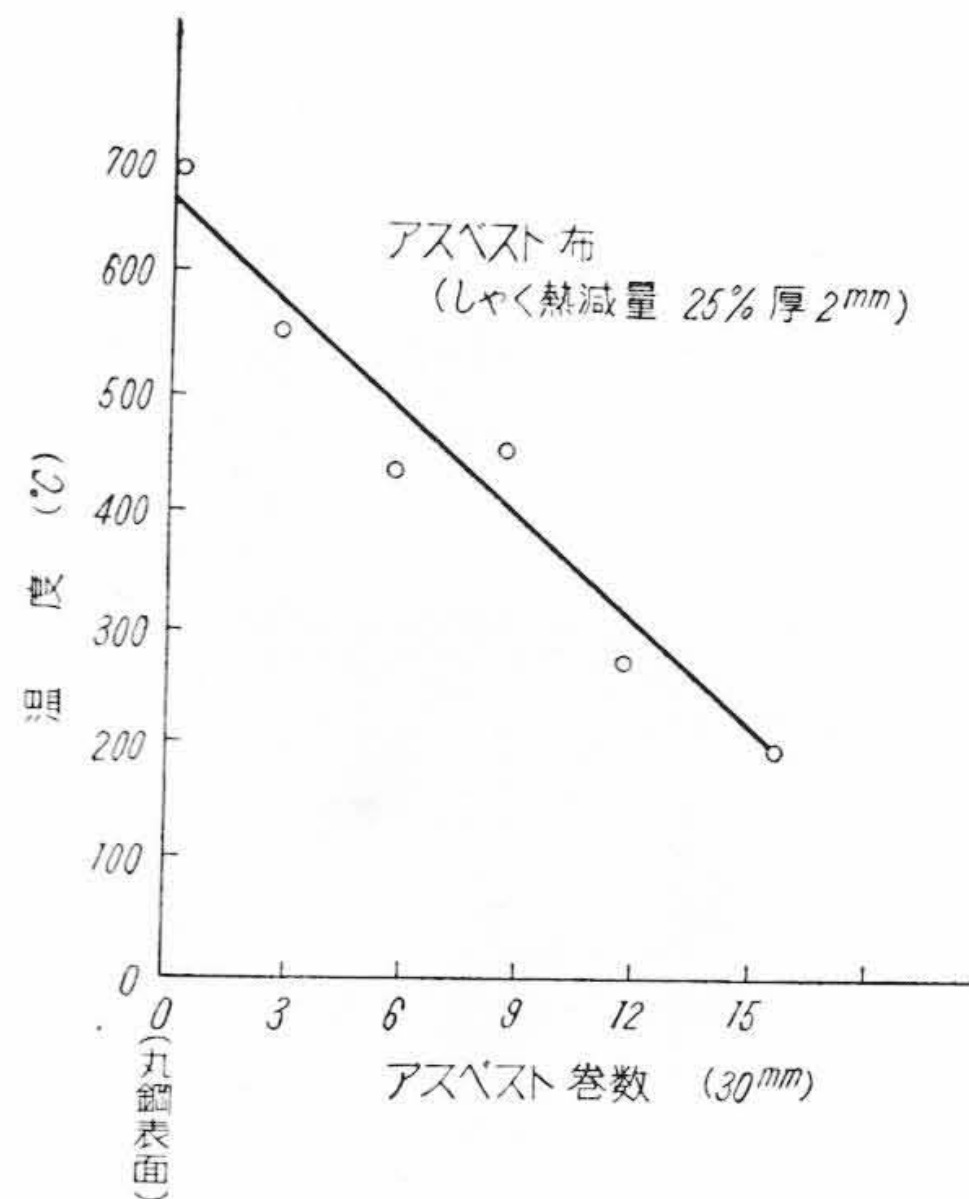
第 10 図に示すように温度測定位置を丸鋼中央部にして上部① 下部② 右部③ 左部④の 4 点につき測定した結果は、左右が約 20°C 高いがほとんど、どの位置も温度差がない。これはアスベストの厚みが 15 巻(約 30mm)と十分熱しゃへいがあったためと考えられる。

4.4 アスベスト熱絶縁と温度との関係

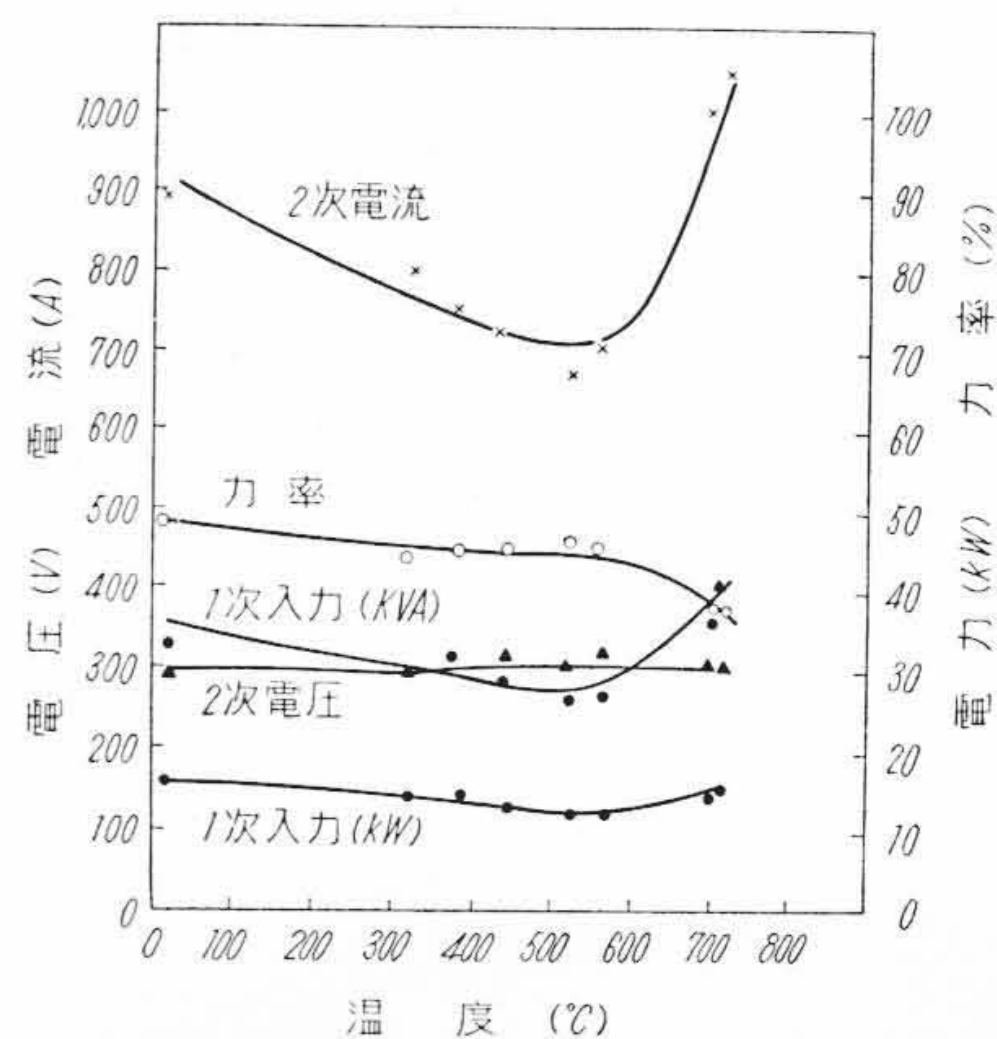
アスベストの熱絶縁を十分に発生する加熱電力を有効に使うことはきわめて大切なことであるが、一方熱絶縁を十分にするとコイルと丸鋼との表面のすきまが大となり電気入力を多く必要とする。またコイルの側から考察すればアスベスト外周は十分低温であることが要求される。前述の実験結果からアスベスト絶縁と温度分布の関係を示すと第 13 図のようになり、ほぼ直線的に降下していることがわかる。

4.5 温度変化に伴う電気諸量の変化

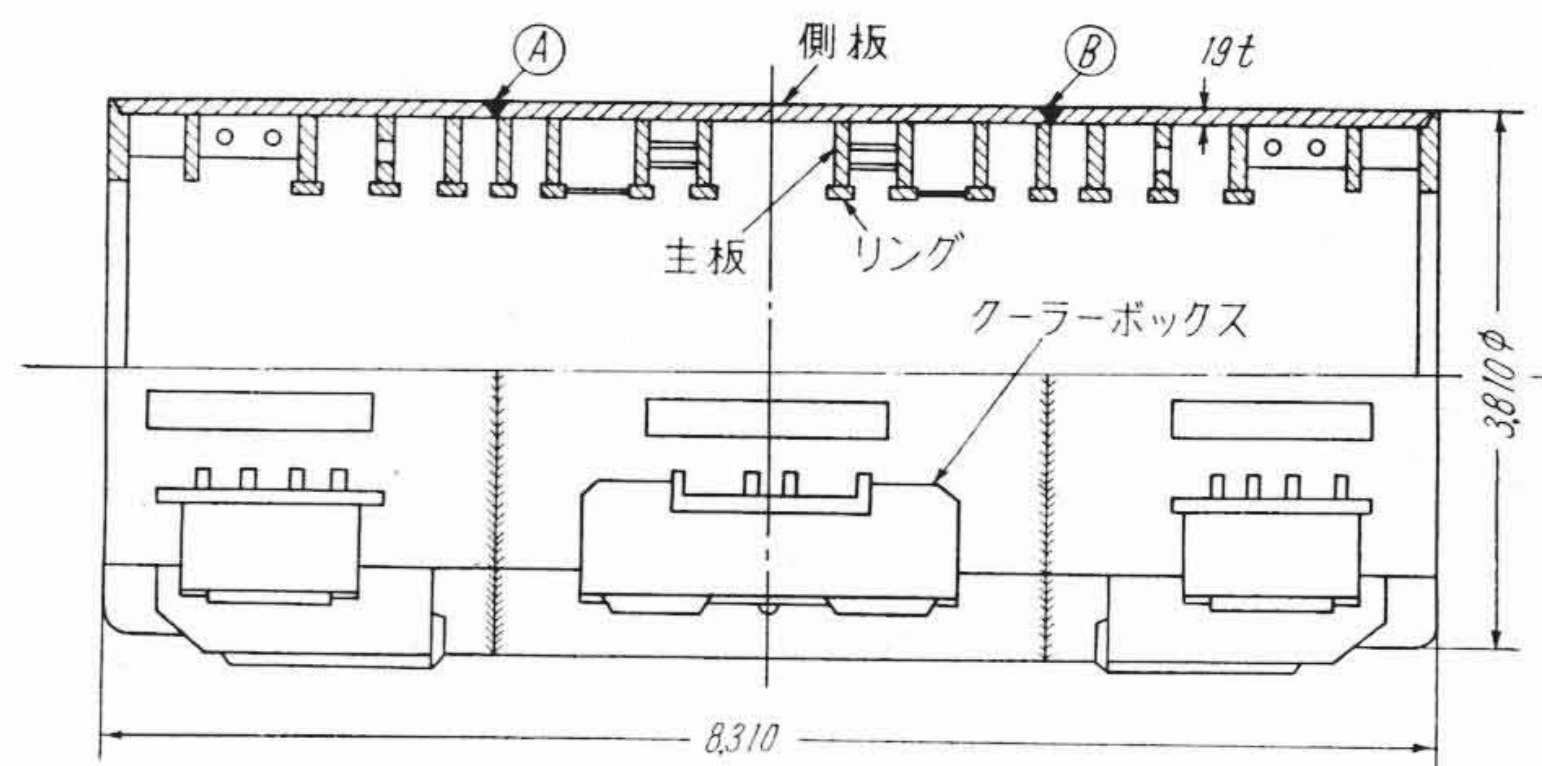
以上の基礎実験における電気諸量の変化の一例を第 14 図に示す。この図からわかるように 600°C 付近より電流は急激に増加しているし、また力率も悪い。これはアスベストの厚みが大であり、コイルと



第 13 図 アスベスト布の巻数と保温との関係



第 14 図 温度上昇に伴う電気諸量の変化



第 15 図 ステータフレームの概略寸法

丸鋼表面の間隙が大きく影響したためと思われる。

5. 大形熔接構造物への応用例

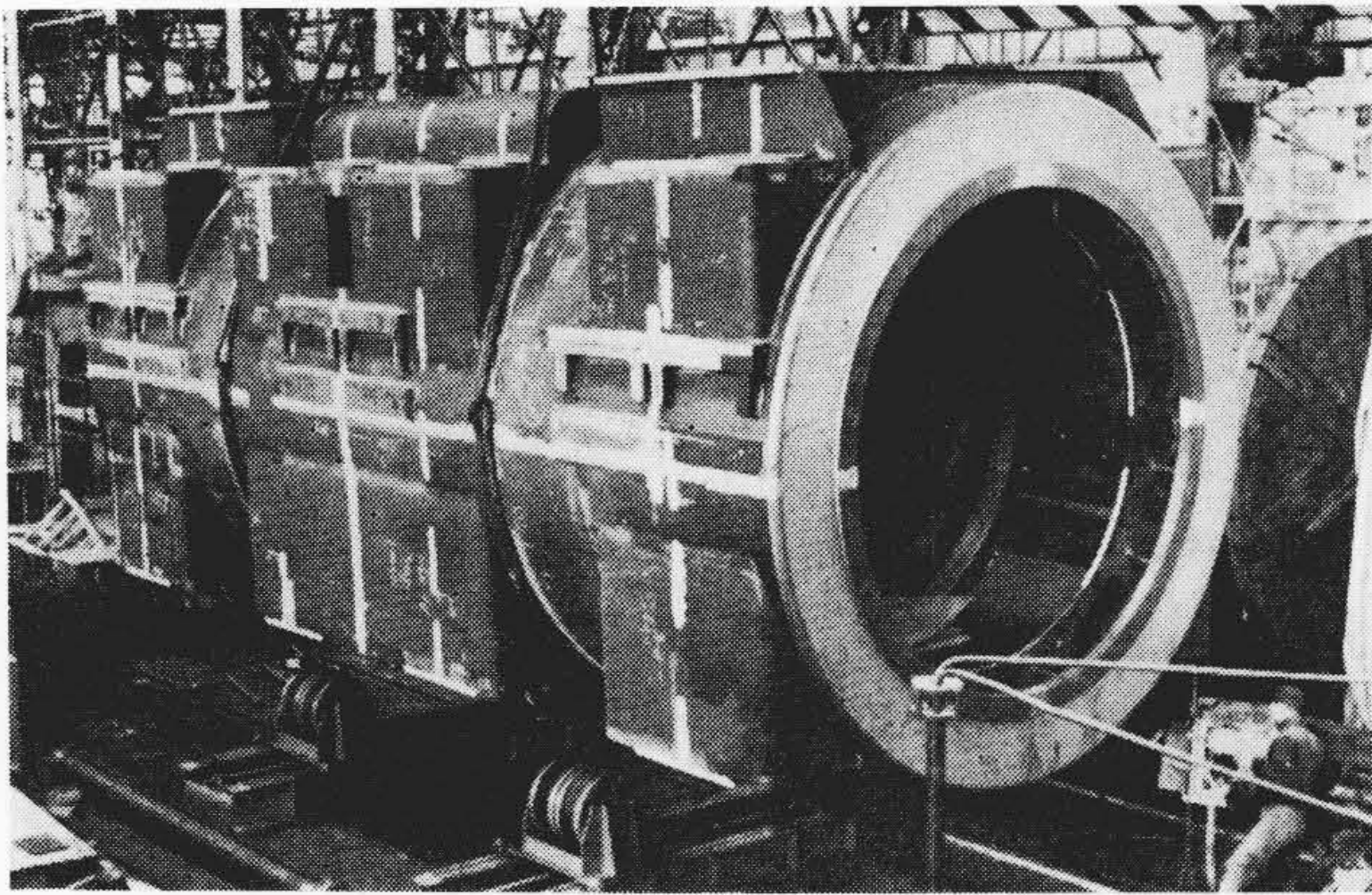
前述したように誘導加熱法を熔接部の予熱、後熱および焼鈍作業に応用することは各方面で実施されているが筆者らが行った作業について二、三の大形記録品の概要を説明する。

5.1 タービン発電機ステータフレームの局部焼鈍

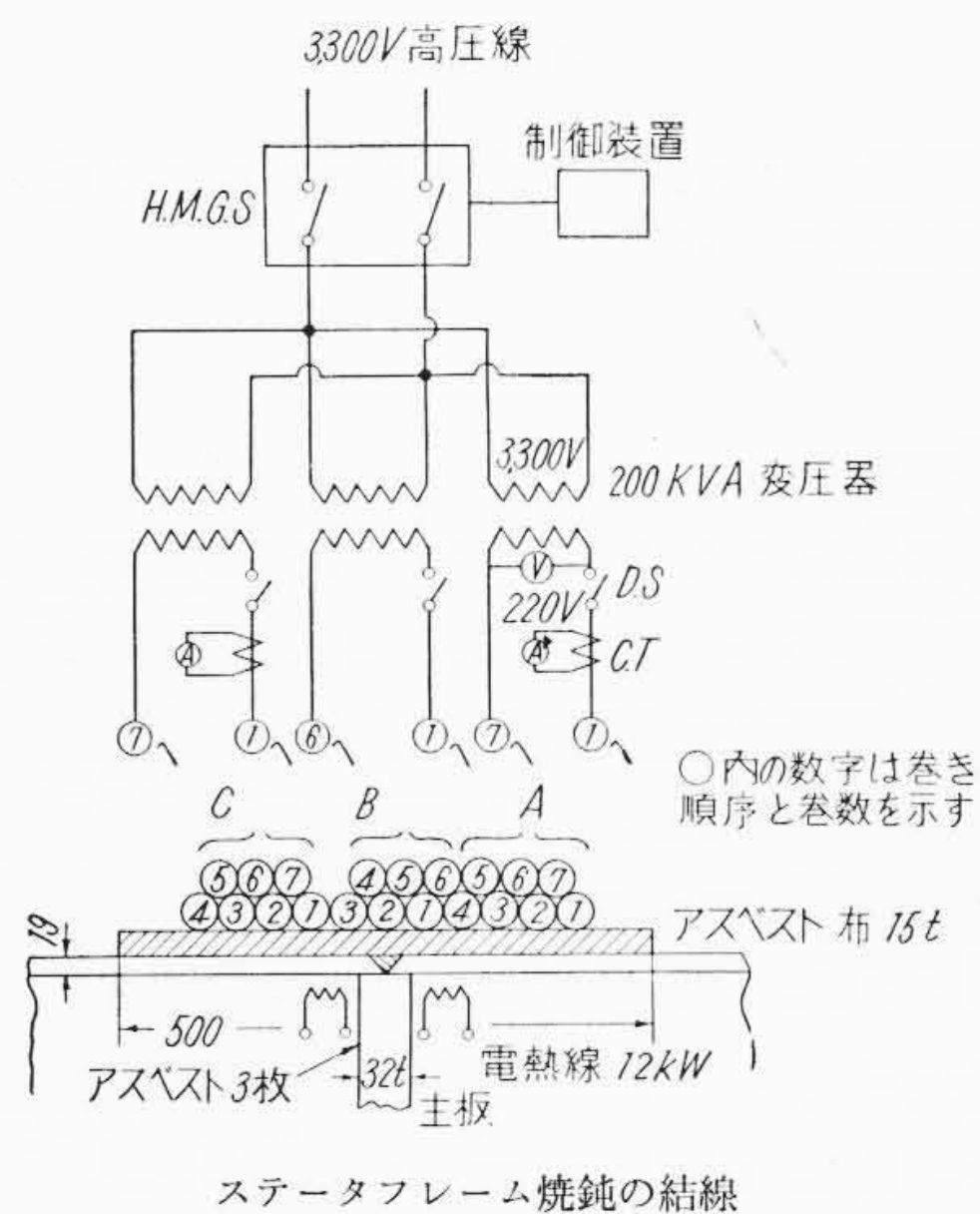
第 15 図は仙台第 2 火力発電所納 224,000 kVA ターボ発電機のステータフレームの概略寸法を示す。熔接工場ですみず 3 分割して製作し組立工場の一部を機械加工して組立て、④⑤部を熔接し熔接完了後局部焼鈍を実施した。熔接完了後のステータフレームの外観を第 16 図に示す。

(1) 誘導加熱の方法

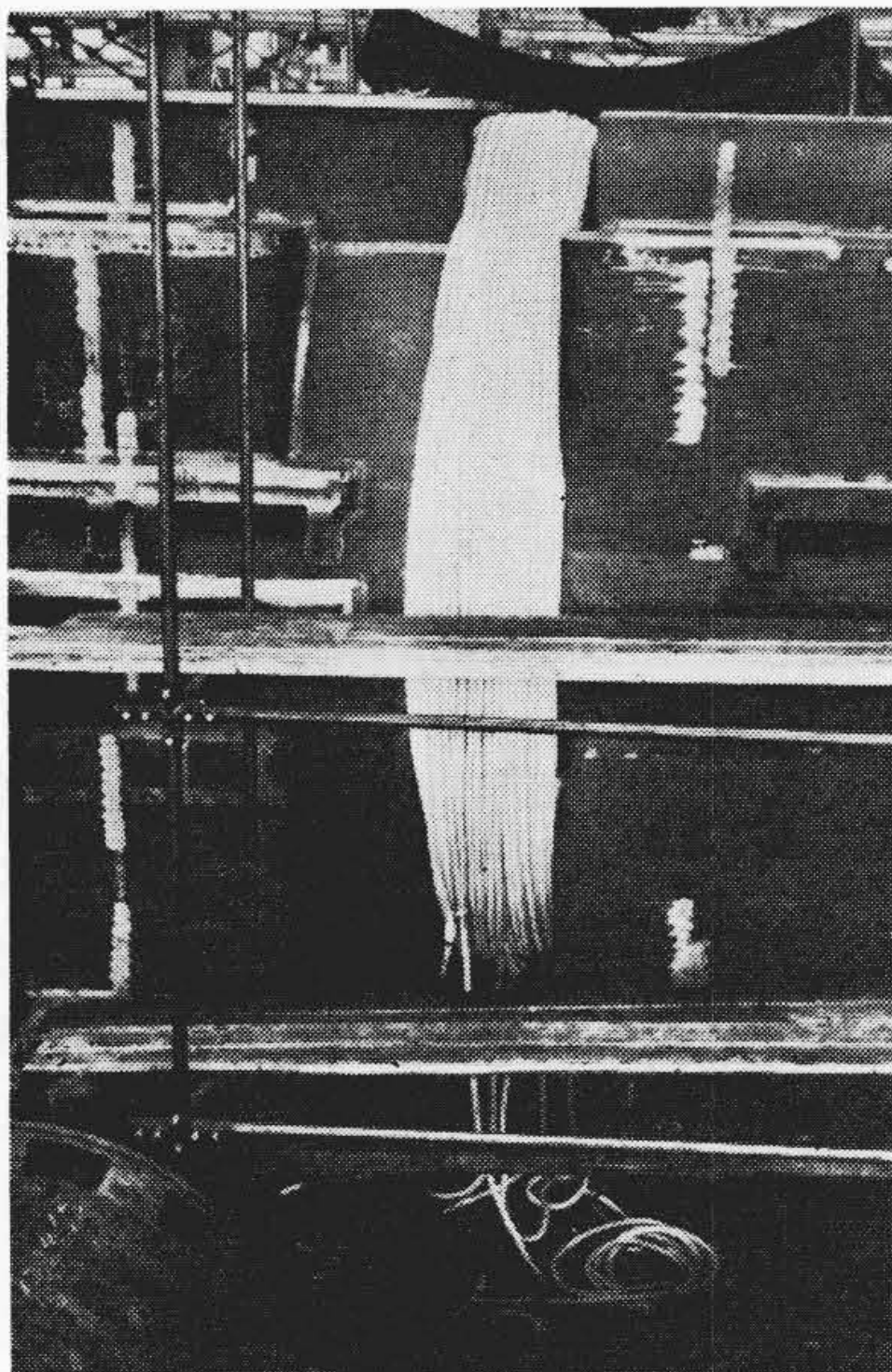
焼鈍計画により 200 kVA 変圧器 3 台より負荷することとし第 9 図に示す系統により実施した。すなわち変圧器の一次高圧側に



第16図 熔接完了後のステータフレームの外観

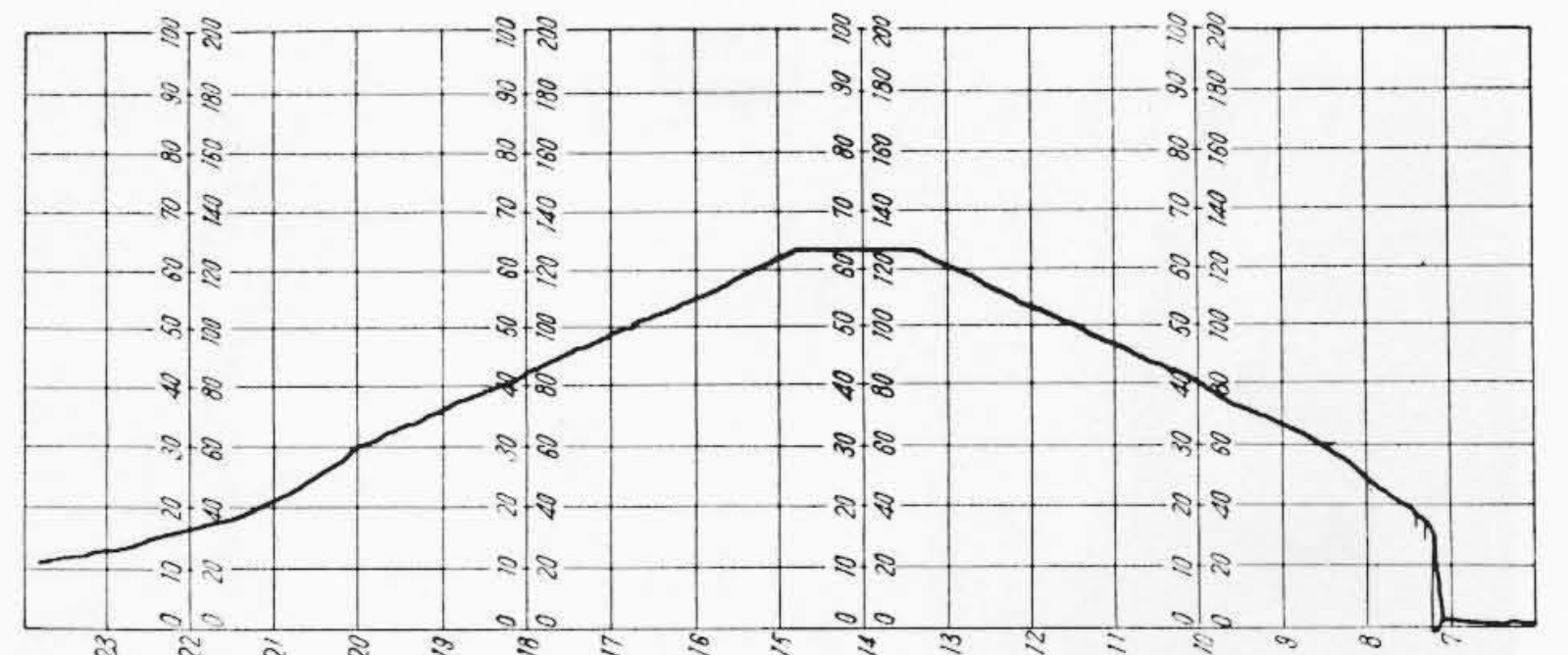


第17図(a) 電気接続図

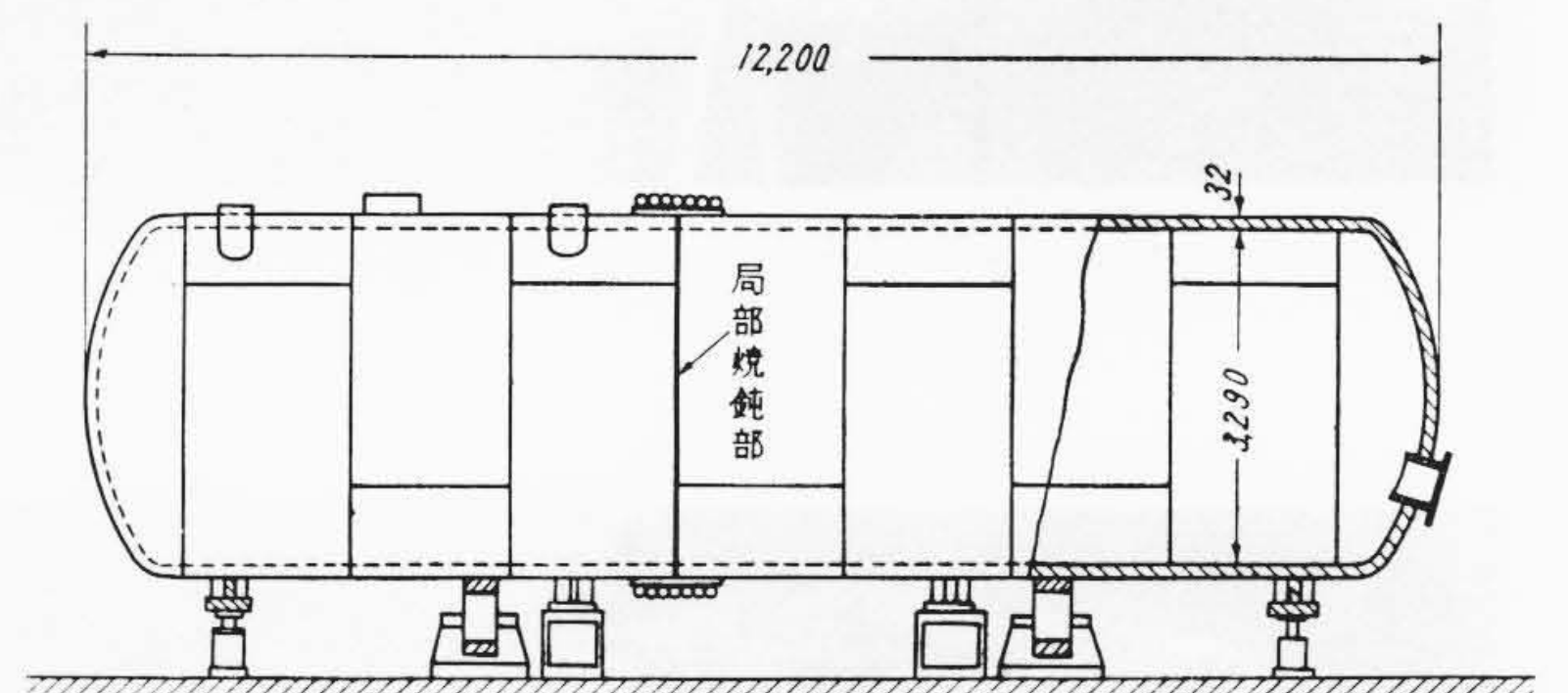


第17図(b) インダクションコイルの巻付状況

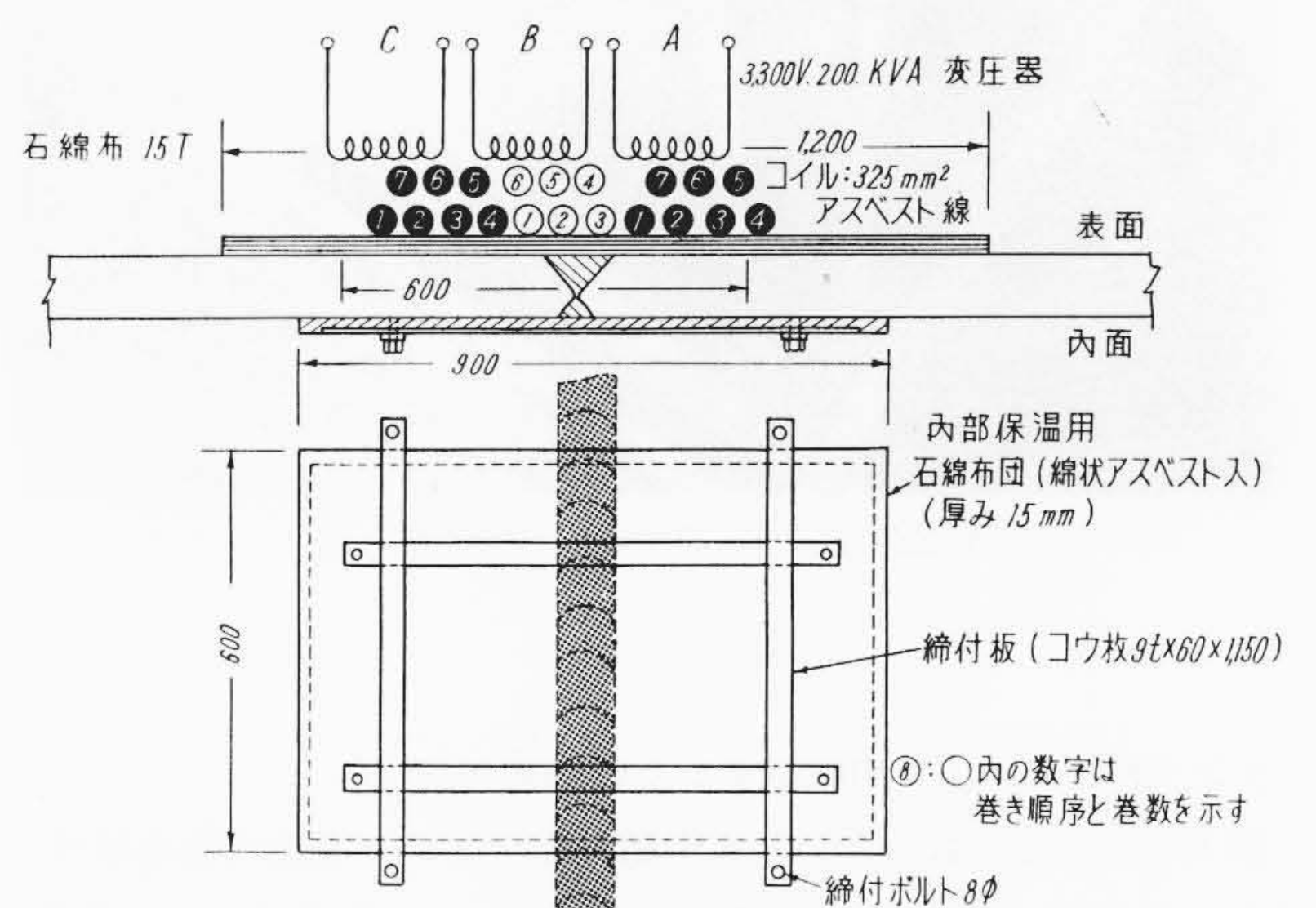
高圧気中電磁配電箱を配して制御した。制御装置は加熱部の温度を検出し、プログラム制御する。また各部の温度は日立 T. M. K 6 点式温度計によって測定した。熱絶縁にはアスベスト布を使用し、幅 600 mm に 15 回巻きつけ、その上にコイルを 20 回巻きつけた。第 17 図はそのコイル巻付け状況を示す。また内部の保温にはニクロム線式電熱体を張り熱の放散を防止した。



第18図 焼鈍曲線



第19図 仙台第2火力発電所納脱気タンク



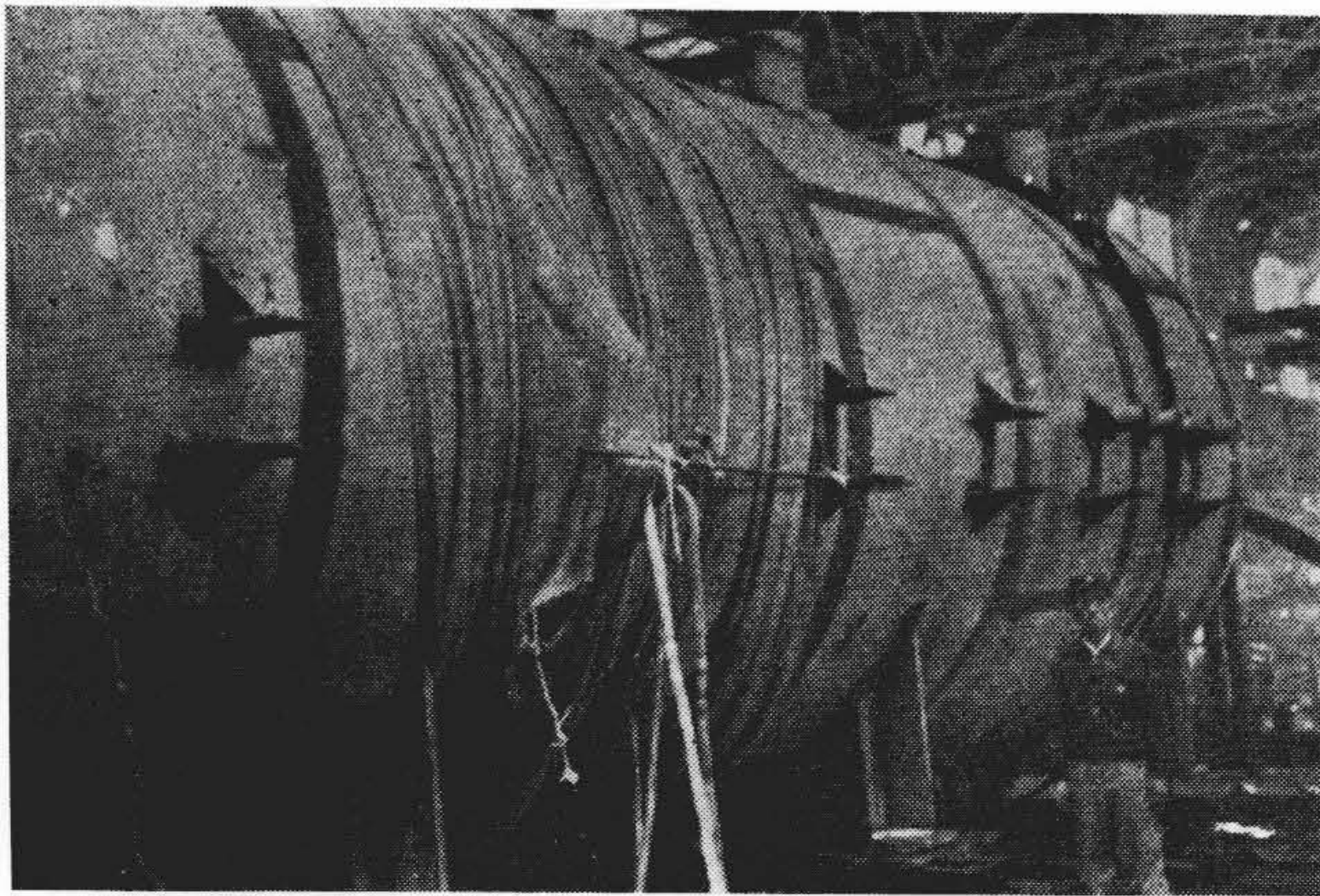
第20図 コイルの巻き方と保温

(2) 焼鈍曲線 第 18 図に焼鈍曲線を示す。所定の温度サイクルの焼鈍曲線をうることができた。

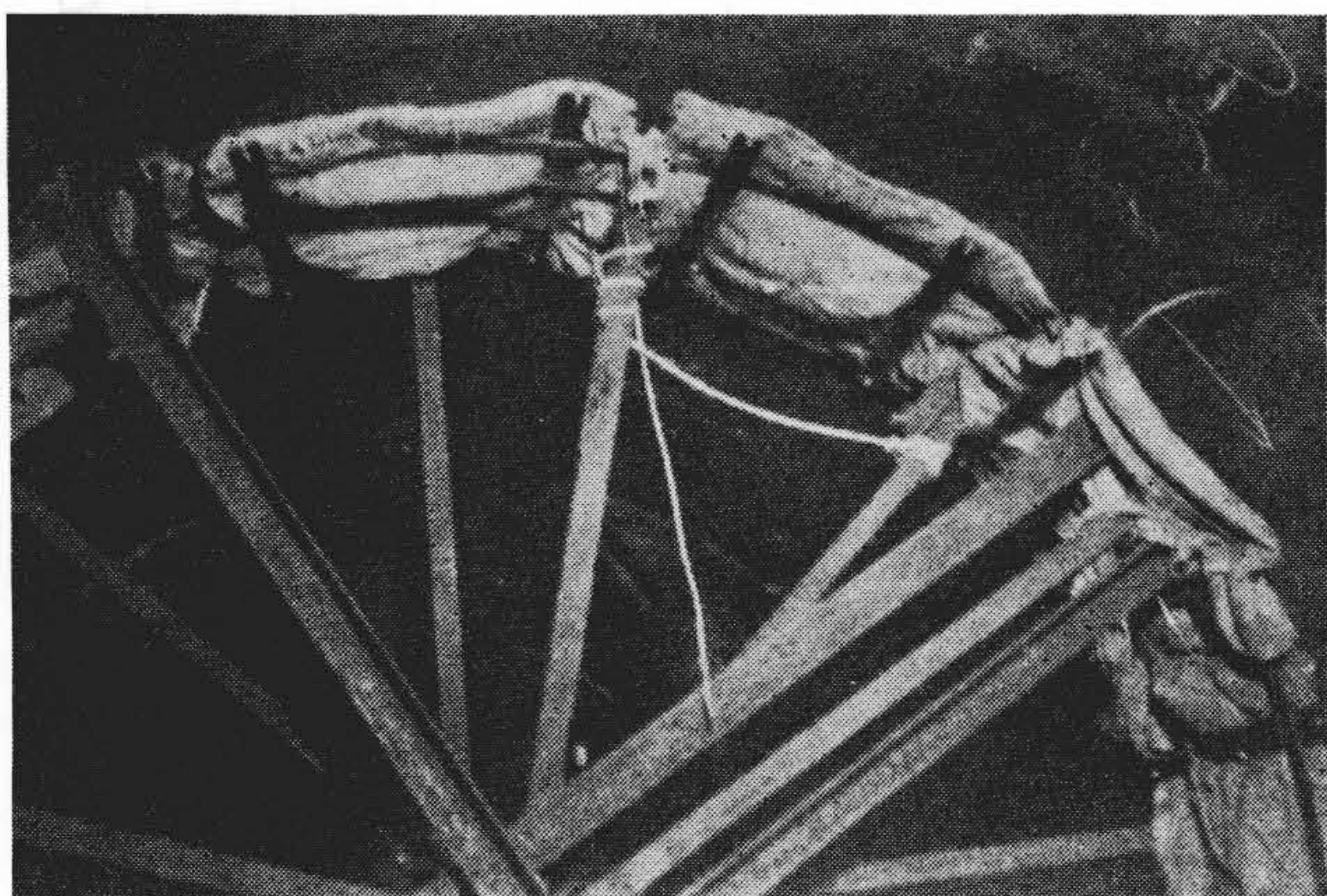
(3) 熔接部の残留応力の測定

局部焼鈍の効果を確認するため熔接部で焼鈍前後の残留応力をグナートひずみ計によって測定した。その結果は熔接のままであったものが焼鈍後では 6 kg/mm^2 以下に減少していることが確認された。

(4) 電気諸量 通電初期の電気入力 は 513 kVA であったものが 625°C の最高温度時では 364 kVA と約 30% 入力が増加している。高圧一次側の電流は $3,300 \text{ V}$ において初め 155 A , 625°C では 110 A であり同様に約 30% 減少している。各コイルの電流は初め平均 760 A 流れたが 625°C では 510 A に減少している。制御装置の断続周期は平均 2 分程度であり、通電率は通電初期において 50%, 625°C においては 80% である。これから放熱電力を計算すると約 170 kW である。温度上昇にともなう電気諸量の変化は上記のようにほぼ指数関数的に減少するが、保持が完了して温度下降に向うとほぼ同じ履歴を得て回復することがわかる。この種の大形構造物では基礎実験にみられたように高温における磁気飽和によるインダクションコイル電流の増加はあまり認められない。



第 21 図 インダクションコイルの巻付状況



第 22 図 内部保温状況

5.2 蒸気タービン用脱気タンクの局部焼鈍

第 19 図は仙台第 2 火力発電所納脱気タンクの概略方法を示す。すなわち全長 12,200 mm, 外径 3,354 mm ϕ , 板厚 32 mm の超大形タンクで図示のように円周接手 8 箇所て熔接される構造になっている。この製作は中央部で 2 分割したものを別々に製作し最後に中央部を熔接し局部焼鈍する方法を採用した。本作業にあたっては (1) と同様高圧気中電磁配電箱を応用した方式を採用した。

(a) 焼鈍条件

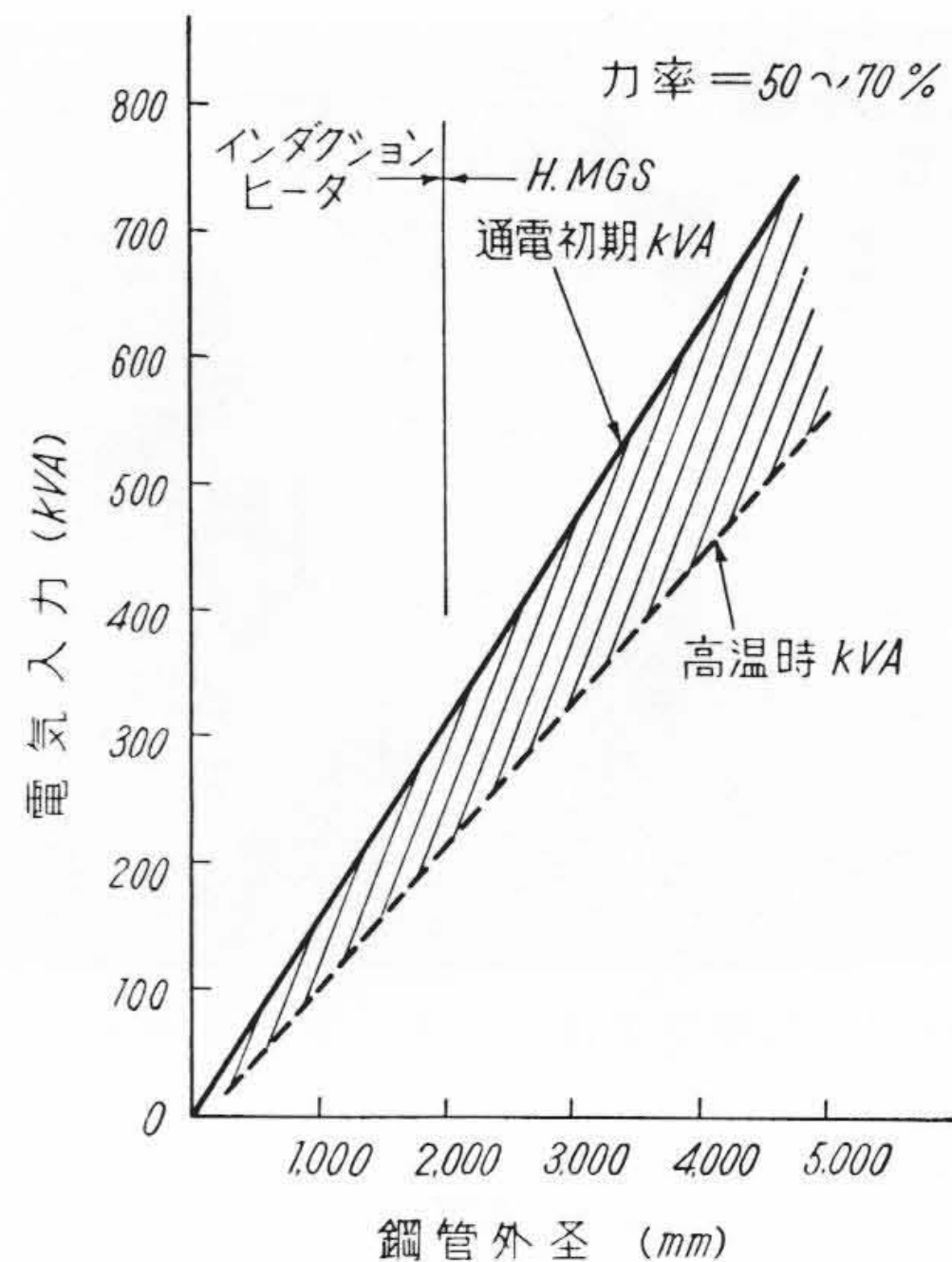
焼鈍条件は発電用ボイラ基準により規定された条件に設定した。

(b) コイルの巻き付けと保温

コイルの巻き方は全巻数 20 巻を第 20 図に示すように A. B. C の 3 群に分けそれぞれ 200 kVA の変圧器二次側に接続した。保温は外部を 15 巻アスベスト布でおおい内部は綿状アスベスト入石綿布団を締付板で押える方式を採用した。第 21 図および第 22 図にその模様を示す。

(c) 焼鈍曲線

ステータフレーム焼鈍作業と同様、300°C まで手動、300°C より 100°C/h の上昇速度で 625°C 2 時間 保持、100°C/h の放冷速度で 300°C まで自動制御を行い、所定の焼鈍曲線をうることができた。本方式で鋼管の内外部の温度差を 50°C 以下におさえることができた。



第 23 図 厚肉鋼管の誘導加熱における電気入力と鋼管外径の関係

(d) 電気諸量

通電初期の電気入力 は 680 kVA で 625°C の最高温度における電気入力 は 460 kVA, 使用電力量は 1,170 kWh である。インダクションコイル電流は通電初期、各コイルの平均電流は 970 A で 625°C の最高温度時には 630 A に減少している。各コイル間電流の不均衡は 100~200 A 以下で、コイルの巻き方を第 17, 20 図のごとくブロックに別集めて各コイルの相互誘導をできるだけ少なくするよう各コイルをつかねる方式は効果があることがわかった。なお力率は 50~60% の範囲にある。

5.3 熔接部の予熱および後熱への応用

高炭素鋼, 低合金鋼, あるいは 13Cr 鋼のような材料の熔接に際しては構造物全体をある温度以上に予熱するとか、熔接中ある規定温度を保持しかつ熔接直後すぐ後熱に移る場合などに誘導加熱を応用して効果をあげている。たとえば水車ランナの肉盛作業とかタービンバルブケーシングの予熱後熱および減速歯車の熔接への応用などはその顕著な例である。

6. 結 言

以上数例をあげて誘導加熱の実際について概説したが、本法は今後大いに普及しかつそれにともない装置も方法も改善発達するであろう。今後ますます大形機器の現地熔接が増加するすう勢にあるとき、誘導加熱法は積極的に活用さるべきであり、筆者などが今回完成した高圧気中電磁配電箱を利用した誘導加熱方式は第 23 図に示すように大形熔接構造物の焼鈍装置として簡単に安価なものが得られ、現地熔接の方法として非常に有効であると確信する。

最後に本研究にあたり終始ご指導を賜った日立製作所日立工場芳川部長、平川課長に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 安藤, 上山: 誘導加熱による熔接水圧鉄管の焼鈍 (1) (2) (3) 熔接界 Vol. 17 No. 2, 3, 4
- (2) 山内, 中井: ペンストクの縦熔接継手の残留応力緩和法 日造技報 Vol. 16 No. 2 1955
- (3) 上山: 誘導加熱法について: 大電技報 Vol. 1, 2 1958
- (4) 柱, ほか: 厚板熔接部の高周波誘導加熱による局所なましの研究 機械学会誌 Vol. 62 No. 483 1959