

東海原子炉压力容器の焼鈍(I)計画

三 好 滋* 村 上 篤*
Shigeru Miyoshi Atsushi Murakami

Stress-relieving operation for Tokai Reactor Pressur Vessel (Part I, Planning)

Synopsis

The stress-relieving operation of the first 19 m diameter reactor pressure vessel at Tokai Nuclear Power Station have been completed in successfully on June 1963.

Prior to start this job, we have investigated about the mechanical properties and creep characteristics of Coltuf 28 material at high temperature, and tried to make the calculation of heater elements arrangement, these are necessary to keep the vessel in specified temperature range 540°C~590°C.

In this report, we will present the results of above discussions.

I. ま え が き

東海に建設中の原子力発電所用原子炉压力容器の焼鈍は昭和38年6月9日から開始され、6月14日23時温度保持に入り、15日午前10時これを終え冷却を開始し、6月26日最高温度点が150°Cに達したことにより、その作業を終了した。周到な準備の下に計画され準備されたこの作業は終始好調な操作をつづけ諸規格に要求された温度、および保持時間を完全に満足する結果が得られた。本報告においては東海炉に対して行なわれた焼鈍条件を設定するに当たっての基本的な考え方、焼鈍条件、加熱方法の検討などについて述べる。なお加熱設備、温度測定設備、保温設備についてはすでに他の機会に述べているのでここでは取りあげない。

II. 焼鈍の目的と特殊性

東海原子炉压力容器の球殻体は、球面状にホットプレスされた82mm~94mm板厚の鋼板を溶接により径19mの球状に製作したものである。したがってホットプレスや溶接により鋼板および溶接部に種々な応力が残っていることが当然考えられる。このような残留応力は将来原子炉が運転に入ってから新たに発生する応力とプラスされ、压力容器に次の影響を与える恐れがある。すなわち

1) 寸法的な変形をきたすこと

2) 脆性破壊への傾向を大きくすること

3) 疲労破壊への傾向を大きくすること

などである。一方、これらの影響は運転に入ってからばかりでなく、中間検査として圧力試験を行なう際の応力によっても同じ傾向が起り得るものと考えられる。このように残留応力の存在は压力容器の破壊への傾向を増大させるため、できるだけ低い値にしておかなければならない。理想的には存在しないことが一番よいが、これは不可能であるから、少なくとも後述する許容残留応力の値までは下げておくようにしなければならない。そしてその時期は圧力試験時の場合のことも考慮して、圧力試験前に行なっておかなければならない。これが今回の焼鈍の目的である。

一般に焼鈍の対象となる品物が小さな場合は加熱炉内に品物を持ち込んで行なうが、東海の压力容器の場合は対象物が大きいので、压力容器の内部に加熱源を設備して焼鈍を行なった。この点が今度の焼鈍の一つの特殊性である。このように压力容器自体を焼鈍炉として応力除去を行なうため、通常の炉内焼鈍のように、品物全部にわたっての温度を均一に保つこと、および温度制御をこまかく行なうことなどがきわめてむずかしくなり、次の因子による影響が焼鈍成否の重要な問題点となってくる。

1) 加熱速度および冷却速度

2) 压力容器各部の温度こう配

3) 加熱してはならない部分の温度こう配

4) 压力容器の静負荷荷重

* 東海建設事務所

5) 停電, 故障などの事故による不均一加熱による温度こう配および不適当な温度による加熱。

以上5項目の内第1)~4)項までは十分な計算と実験により予測し準備することができるが, 第5項については全く予測できないことがらであり, それだけに一番失敗の原因になりかねない。それならばいったい, これらの因子はどのような部分にどのように影響して焼鈍結果に現われてくるのであろうか。われわれはこれらの因子の影響についてふれながら東海炉に対して行なわれた焼鈍条件についての概要を説明する。

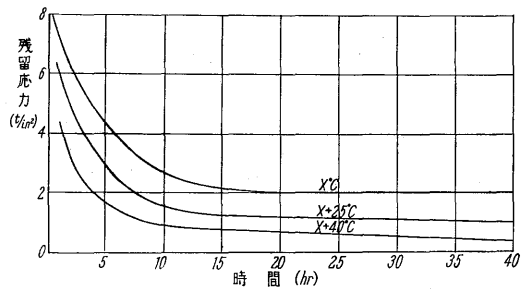
III. 焼鈍条件について

前述したように圧力容器焼鈍の目的は製造中に生じた残留応力を, 後になんらかの応力が発生して重畳した場合でも害を及ぼさない程度の低い値にまで下げることである。そのためには材料の高温におけるクリープ特性を利用し, 応力の弛緩を起こさせ望ましい応力レベルまで下げようとする。しかしながら弛緩される応力の値は物体が加熱される温度, 保持時間, 加熱速度などに密接な関係を持っており, 不均一な加熱, 不適当な加熱速度・冷却速度は逆に温度こう配を生じ, 新たな応力を発生させることが考えられる。それゆえこれらの関係を掌握し焼鈍に必要な温度, 保持時間, 加熱速度, 冷却速度, 温度こう配を決定するため次の4点についてあらかじめ充分検討しておく必要がある。

- 1) 材料のクリープ特性
- 2) 圧力容器自身の静荷重による影響
- 3) 加熱することによる材料の機械的性質の低下
- 4) 許容される残留応力の大きさ

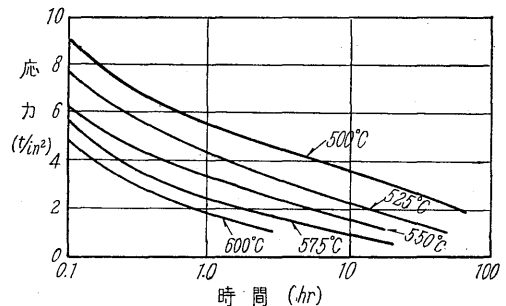
1. 圧力容器用材料のクリープ特性

一般に応力が加えられている材料を加熱した場合, 応力の弛緩は一次クリープ(第1期)および二次クリープ(第2期, 定常クリープ期間)の二つの過程により進行する。材料に加えられた応力のうち, ある一定値以上のもは一次クリープにおいて急速に弛緩し, それ以後の二次クリープにおいてはきわめて徐々にしか弛緩は進行しない。第1図は一次クリープ, 二次クリープの進行により応力の弛緩される状況を加熱温度の相異による影響とあわせて示したものである。すなわち X °C で図のような弛緩曲線が得られた材料について X+25°C, X+40°C で得られる弛緩曲線を同時に示したものである。図中一次クリープによる弛緩は X °C で 20 hr, X+25°C で 15 hr, X+45°C で 10 hr までと考えられる。クリープ速度は温度の5乗に比例して増大するので, 加熱温



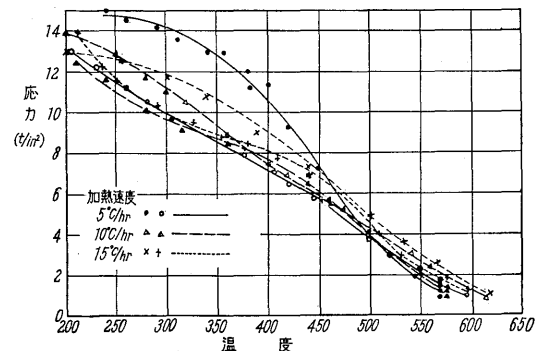
第1図 弛緩応力と温度, 時間との関係
Fig. 1. Stress relaxation vs. soaking temp. and time curves

度が低下するにしたがい, 一定の応力弛緩を得るために必要とする保持時間は長くなる。そして, ある温度以下ではどんなに長く時間をかけても一次クリープ以後有効な弛緩が起こらなくなる。(たとえば X °C の場合のように) このようなクリープによって生じる弛緩応力と温度, 時間との関係すなわち一定の応力レベルにまで応力の弛緩を起こさせるために必要とする温度および保持時間は, 材料固有の特性として決まってくる。現在東海炉に使用されている材料(Coltuf 28 低炭素高マンガンA 細粒化鋼)は, 通常のボイラ用鋼板や同じ組成の Si キ



第2図 Coltuf 28 材の応力弛緩曲線(定むずみで温度を一定に保った場合)

Fig. 2. Stress relaxation curves for coltuf 28 plate (Isothermal test)



第3図 Coltuf 28 材の応力弛緩曲線(定むずみで温度を変化させた場合)

Fig. 3. Stress relaxation curves for coltuf 28 plate (Anisothermal test)

ルド鋼に比べればクリープ特性としてかなり悪いものを使用している。このことは同じ板厚の他の板と比較した場合、他の板に必要とされる温度および保持時間よりもはるかに低い温度でかつ短時間のうちにクリープが起り、応力の弛緩が行なわれるためである。第2図、第3図に東海炉材料と同じ組成を有する Coltuf 28 材料について行なわれた応力弛緩試験の結果を示す。第2図に示したものは 0.15% のひずみで保持した材料を一定温度に保持した場合の応力の弛緩を示したものである。第3図は第2図の場合と同じように、0.15%のひずみを保持しながら常温より徐々に加熱して行った場合を示す。実験は加熱速度を3段階に変化させて行なっている。図中 400~450℃ までで降伏点近くの値から 6~8 t/in² まで低下しているが、この間では実際にクリープによる弛緩は起こっておらず、もっぱら降伏応力の低下およびヤング率の変化によるものである。この二つの因子は温度に依存して変化するもので、時間に依存するものでないゆえ、この温度以下での加熱速度はあまり影響を与えていない。450℃ 以上の部分になると、もっぱらクリープとヤング率の変化が起こっており、なかでも主な効果を示すクリープは応力、温度、時間の依存性があり、この領域では加熱速度の影響が見られ、一定応力までの弛緩は加熱速度がおそいほど低い温度でおこる。

以上第2図から定温保持に入ったときの温度と保持時間の関係が求められ、第3図からは加熱速度の限界が求められる。

2. 圧力容器自身の静荷重による影響

残留応力が一たびクリープによりある一定値まで除去されてしまうと、あといくら長い時間保持してもそれ以上の効果はえられず、かえって容器自体の静荷重による連続クリープが起こり、容器の変形が現われてくる。容器以外の部分でも圧力容器自身をささえている下部スカート（径 12.4m 高さ 3.56m 板厚 64mm のシリンダ状のもので球形圧力容器がこの上にささえられている）との溶接部付近は特に注意が必要で、下部スカートの一部が加熱されるため圧力容器の静荷重による変形を起こすおそれがあるし、また一方加熱速度が早すぎるとこのつなぎ目の付近に極端な温度差を生じ危険応力を生じる可能性がある。それゆえ、加熱速度をおそくし、できるだけ均一に加熱されるようにして、この部分に適当な温度こう配をもたせ、危険応力を生じないようにしなければならない。後に焼鈍のときの加熱速度が決定される時にも最もこの部分が考慮された。このような部分であるからもちろん冷却の際も温度差があまりはげしくならな

いように充分冷却速度を考えなければならない。この部分についてばかりでなく他の部分についても、東海炉の場合その加熱方法からいっても、大きさからいっても、いくら均一に加熱しようとしても部分的に温度差が生じるのはさけられないことはすでに指摘したとおりであるが、できるだけ少なくするようにしなければならない。と同時に冷却に際しても充分注意が必要である。もし冷却の際に大きな温度差を生じ、そのまま常温にまで下げた場合には、また新たな残留応力を生じることになる。これでは焼鈍を行なった意味が全然なくなるゆえ加熱、冷却速度、圧力容器各部の温度こう配などは常に注意してかんして行かなければならない。

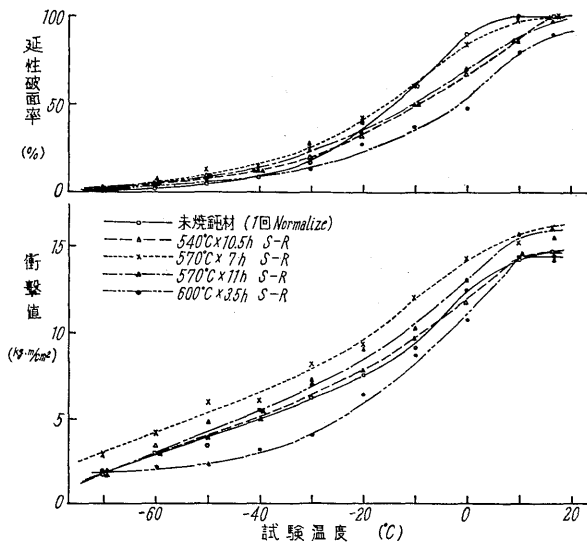
3. 熱履歴による材料の機械的性質への影響

前述したように圧力容器が大きなものであるだけに温度を完全に均一に保つことはむずかしい。これはもっぱら加熱設備関係の設計によって決まってくるものであるが、ひとたび加熱しだすと一部分を加熱したり冷却したりすることは不可能である。ゆえに万一低い温度のところできて長時間の温度保持が必要となった場合には、高い温度のところも同じように長い時間保持されなければならない。高温に長時間保持されることは材料の性質に悪い影響をもたらす、抗張力、降伏点の低下をもたらす、同時に Vノッチシャルピー衝撃値が低下することが考えられる。しかしいくら高温にさらすことが悪いといっても、さきにも述べたような応力弛緩の起こらないような低い温度であっては焼鈍の効果があがらない。ゆえに応力弛緩は充分に行なわれかつ金属材料の諸性質を

第1表 焼鈍処理が Coltuf 28 の機械的性質におよぼす影響

Table 1. Mechanical properties change of Coltuf 28 plate after S.R.

試料番号	熱 処 理	降伏点 (t/in ²)	抗張力 (t/in ²)	伸び (%)	収縮率 (%)
AON 1L	2 回 焼 準	17.2	28.0	39.0	68.8
2L	" "	17.2	28.0	39.0	67.8
1T	" "	17.4	28.0	38.0	66.8
2T	" "	17.2	28.0	39.0	68.8
AOSI 1L	0℃~525℃ 10℃/h 30 hrs 525℃				
	525℃~0℃ 5℃/h	14.8	27.2	40.0	68.2
2L	" "	16.6	27.6	39.0	65.8
1T	" "	15.8	27.4	40.0	66.4
2T	" "	17.0	27.2	39.0	65.6
AOS2 1L	0℃~575℃ 10℃/h				
	575℃~0℃ 5℃/h	14.6	26.6	40.0	69.0
2L	" "	16.0	26.6	41.0	68.8
2T	" "	15.2	26.8	40.0	68.8



第4図 Coltuf 28 鋼板の焼鈍処理と V シャルピー
衝撃値の関係
Fig. 4. Relationship between S.R. temperature and
V notch charpy value for coltuf 28 plate

悪化させない温度範囲，および時間を規定しなければならない．Coltuf 28材が600°C 付近までの温度に加熱された場合機械的性質がどの程度変るかについての一例を第1表および第4図に示す。

4. 許容される残留応力

以上述べた種々な因子を考慮して温度，時間を決定する場合にもっとも重要なことからは許容残留応力の値をいくりにするかということである．U.P.C. (United Power Company) としては $2\frac{1}{2}t/in^2$ が望ましいとしている。

すなわち圧力容器の設計応力は約 $7 t/in^2$ であり，降伏強度は $16 t/in^2$ である．ゆえに，降伏強度に対してはなお $9 t/in^2$ の余裕が残されているが，この中には応力集中とか疲労というような他の因子が含まれていないためこれらを $3 t/in^2$ と見るのが適切である．一方脆性破壊の見地からいえば，脆性破壊遷移温度は残留応力として $4 t/in^2$ が存在する場合には急速に上昇し破壊傾向を増大するし，また圧力試験の時のように外部応力が加わっている場合でも，ほぼ同じ値の範囲 ($3\sim 7 kg/cm^2$) で脆性破壊が起こりやすくなるといわれている．ゆえに最終的な残留応力はいかなる場合においても $4 t/in^2$ をこえてはならないと考える．その結果 $2\frac{1}{2} t/in^2$ を温度保持後の目標として考えるならばなお $1\frac{1}{2} t/in^2$ の余裕が残っていることになる。

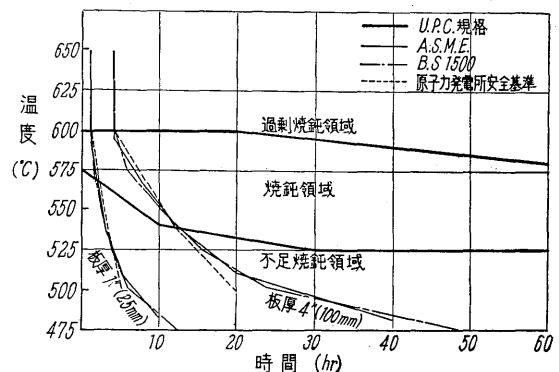
このような考えの下に決定された許容残留応力の値を用いて，1)において述べた応力弛緩曲線から各温度にお

ける必要最低保持時間が得られ，さらに2)3)で述べた項目の検討から許容すべき最高加熱温度および各部分において達せらるべき温度こう配が決定される．こうして求められた圧力容器応力除去焼鈍の主な条件は次のとおりである．なお第5図に温度と時間との関係を示す。

焼鈍温度範囲	540°C ~ 590°C
保持時間	10 hr
最高最低温度差	300°C 以上において 100°C 以下 300°C 以下において 150°C 以下
	保持時間中 50°C 以下
加熱速度	10°C/h

IV. 他の規格との比較

応力除去焼鈍に関する規格は各国それぞれ異なっている．いま温度と保持時間に関して日本における原子炉安全規準(第二次案)⁽⁸⁾，米国の ASME⁽⁹⁾，英国の BS 1500⁽¹⁰⁾ を比較して第5図に示す．これら3種の規格と今度行なわれた U.P.C. 規格との間の相異点をあげれば次のとおりである。



第5図 U.P.C. 規格と諸規格との温度—時間曲線の比較
Fig. 5. Comparison between U.P.C. specification
for S.R. condition and other standards

- 1) U.P.C. 規格では 525°C 以下の温度では望ましい焼鈍効果が得られないとして 525°C 以下の温度を焼鈍不能領域としているのに対し安全規準の最低温度は 500°C，BS 1500 では 475°C，ASME では 482°C まで規定している。
 - 2) U.P.C. 以外の規格では板厚によって各温度における必要保持時間をかえているのに対し U.P.C. 規格では板厚による変化はないものとして規定している。
- 以上2点が大きな相異であるが，このうちの第2項については定みずみ応力弛緩試験の補助として行なわれた Bend Bar Test によって板厚の差による応力弛緩への影響が認められなかったという研究成果にその基礎をおいている。

V. 加熱方法についての検討

Ⅲ章で規定された焼鈍を行なうに当たっての種々な条件を満足させるためには加熱方法がもっとも重要である。一般に、この種大形容器を焼鈍するための加熱方法としては、燃焼ガスを循環させる方法と、電熱加熱によるものに大別される。いずれの方法を採用するかは、容器の形状によって、決定されるべきもので、東海炉のようにほとんど完全な球形外殻を有し、内部にかなり複雑な構造を有しているものに対しては、燃焼ガスによる方法は、均一なガス循環が望めないこと、容器内の自然対流の影響が十分に掌握できないこと、燃焼ガスをクローズサイクルに循環させるには、高温ガス用のガス循環機を必要とすること（オープンサイクルで循環させると、燃料費の面で経済的でない）などの理由で、適当な方法とは考えられない。一方、電熱加熱方式の中にも、誘導加熱によるものと、電熱線加熱によるものが考えられるが、前者は、球形外殻と内部構造物を均一に加熱することが、技術的に非常に困難であるため、不可能と思われる。後者は、鋼構造体に対する放射熱を利用するため、電熱線の配置を適当に行なえば、均一な加熱ができること、加熱出力の制御が簡単に行なえること、設備が単純化されることなどの利点があげられる。ただし、容器内の自然対流の影響については、やはり十分に検討できないので、電熱線の配置や加熱設備にある程度余裕を見込む必要があり、これが経験的な要素を考慮しなければならない点である。⁽¹³⁾

上述の理由から、電熱線加熱による方法が今回の焼鈍に採用されたが、実際に計画を進めるためには、特に次の点が問題とされた。

- 1) 加熱速度と電熱線総出力の決定
- 2) 均一加熱を得るための電熱線配置

1) 項は容器にゆるされる最大加熱速度と、建設現場における受電容量に左右される。このうち最大加熱速度は、すでにのべたごとく主として球殻を支持している。下部スカートと球殻との溶接部にかかる熱応力を考慮して 10°C/h 以下に限定された。

また、2) 項の電熱線の配置と分割単位の決定に際しては、制御を容易にすること、温度分布が均一になること、経済的であることなどを勘案して計画された。

以下、上記の項目に対する検討内容を述べる。

1. 電熱線出力および保温材の決定のための熱計算

電熱線の最大出力は、温度上昇速度と熱損失より決定される。容器を保温材で覆った状態で容器内部より、一

定電力によって、加熱する場合の温度は次の式で表される。⁽¹⁴⁾

$$\theta = \frac{\int q_1 dt}{C} = (R_1 + R_2) q_2 \dots\dots\dots(1)$$

$$q_1 + q_2 = Q \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 θ ：容器温度

q_1 ：容器および保温材の加熱熱流

q_2 ：保温材表面よりの拡散熱流

Q ：加熱熱流

C ：容器熱容量

R_1 ：保温材熱抵抗

R_2 ：表面熱放散抵抗

保温方法を計画するに際して、熱特性（使用可能温度、熱伝率など）保温のための費用、作業性を考慮すべきことは当然であるが、冷却過程において、冷却速度が適正であることも非常に重要となってくる。すなわち、熱損失を少なくするために、保温効果を大にすることは、冷却速度を減少させ、冷却時間を必要以上に長くし、ひいては工程の遅延、費用の増大をまねく。熱特性および費用、作業性の点から、材料としては岩綿が最適とされ⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾たが、保温厚さの決定にあたっては、数回にわたる試算および英国 Hunterston 原子炉における焼鈍の例などを検討しその厚さを球殻部は 150mm、スカート部分はフィン効果による熱損失を減少させることと熱応力に対する配慮から 300mm、ダクト部分はコンクリート壁の過熱を防ぐため 300mm⁽¹⁷⁾とした。保温総面積は、1,667 m²、この内 1,130m² は球殻部となっている。

岩綿保温材の諸特性は

熱伝導率：0.04 + 0.00013 θ kcal/mh°C
(θ は平均温度)

密度：240kg/m³

最高使用温度：600°C

となっており、熱伝導率はもとより比熱も表面熱放射率も、温度によって変化するものであるが、ここでは、最大電力を求めるだけに限って、焼鈍温度の最高許容値 600°C 付近のみを考えて計算すると、次のとおりとなる。

$C = C_p M$ M ：容器重量 (1,355 ton)

C_p ：比熱 (0.142 kcal/kg°C)

$C = 1.925 \times 10^5$ kcal/°C

$R_1 = L/kA$ L ：保温厚さ、 A ：表面積、

k ：熱伝導率 = 0.079 kcal/mh°C

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1130 \times 0.079}{0.15} + \frac{537 \times 0.079}{0.3}$$

$R_1 = 1.36 \times 10^{-3}$ Ch/kcal

$$R_2 = 1/\alpha A \quad \alpha \text{ 表面熱伝達係数, } 10.5^\circ\text{C}^2\text{h/kcal}$$

$$R_2 = 0.057 \times 10^{-3} \text{C}^2\text{h/kcal}$$

これらの定数より容器温度 600°C 付近で 10°C/h の温度上昇を得るための熱流の値は

$$Q = 1.925 \times 10^6 + 4.23 \times 10^5 \text{kcal/h}$$

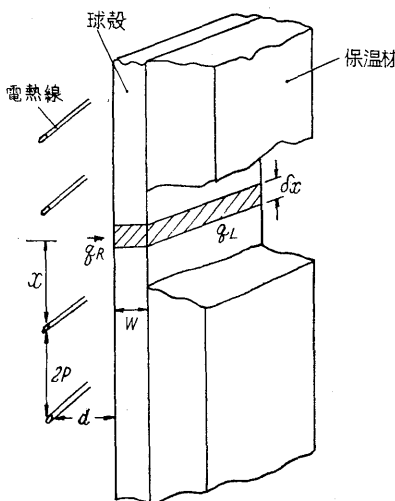
$$= 2.348 \times 10^6 \text{kcal/h} = 2.73 \text{MW}$$

この内、 $4.23 \times 10^5 \text{kcal}$ 、 492kW は 600°C における放散熱量となる。また冷却した場合の最大冷却速度は、冷却開始時点で、約 2.2°C となる。

以上より、電熱線総容量を、Net 2.7MW、設備および配線の損失(平均約 15%) および、均一加熱を得るための安全率を見込んで、設備容量 3.8MW の電熱線用電力設備が準備された。

2. 均一加熱を得るための電熱線配置

電熱線よりのふく射によって加熱される場合、容器の各部に与えられる熱は、電熱線から直接受ける放射熱と、容器自体の熱伝導によって他の部分から受ける熱とに別けることができる。電熱線を容器の内面に沿って、ある間隔をもって並行に配列する場合、容器面との距離が近いほど、また、電熱線の間隔が大きいほど、容器各部に対して放射熱による影響が強くなって、温度差が大になる恐れがある。しかし、電熱線の間隔を小さくすることは、経済的に好ましくないし、容器面からの距離を大にすることは、容器の構造から制限される。したがって、規定された温度差よりも充分低くなるような温度分布をもち、しかも、以上述べたような条件を満足する電熱線配置を定めなければならない。ここで第6図のように、内部より加熱され、外面は保温材で覆われている容器の球殻の単位幅の板で得られる温度分布について考えてみる。



第6図 名称電熱線と板との配置関係図
Fig. 6. Heater arrangement for plate

板の熱伝導の方程式は次のようにあらわされる。

$$kW \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_R - q_L = \rho c W \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{q_L - q_R}{kW} + \frac{\rho c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

ここで、 k : 熱伝導率、 ρ : 密度、 c : 比熱、 W : 容器の厚さ、 T : 温度、 t : 時間、 q_L : 単位面積単位時間当たり保温材を通して球殻から失われる熱量

q_R : 単位面積、単位時間当たりの内部のヒータから球殻が得る熱量

q_R は x と T の関数、 q_L も T の関数となる。

式(3)の近似解として、電熱線からの熱の供給が均一かつ板の温度も一様であるとする $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$ とおくことができる。すなわち

$$\frac{q_L - q_R}{kW} + \frac{\rho c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

となる

また球殻の単位面積当たりに供給される平均の放射熱 q_{Rm} は

$$q_{Rm} = \sigma \epsilon_1 \epsilon_2 \frac{\delta x}{2P} (T_1^4 - T_{2m}^4) \quad (4)$$

σ : スラフアンボルツマン定数

ϵ_1 : 球殻の熱放散係数

ϵ_2 : 電熱線の熱放散係数

T_1 : 電熱線温度

T_{2m} : 球殻の平均温度

$2P$: 電熱線間隔

一方、 δx の部分に与えられる熱 q_R は、平行に並んだ他の電熱線からの分との総和になるから

$$q_R = \sigma \epsilon_1 \epsilon_2 \delta x \cdot d^2 / 2 \cdot (T_1^4 - T_2^4) Cx \quad (5)$$

ここで T_2 : 球殻の温度

$$Cx = \sum_{n=0}^{\infty} \left[(2np + x)^2 + d^2 \right]^{-\frac{3}{2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[(2np - x)^2 + d^2 \right]^{-\frac{3}{2}}$$

式(3)の近似解より

$$\frac{q_{Lm} - q_{Rm}}{k \cdot W} + \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T_{2m}}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

式(3)より

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{q_L - q_R}{kW} + \frac{\rho c}{k} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad (7)$$

ところで、 q_L は q_R に対して比較的小さく、また、短時間経過後においては $\frac{\partial T_2}{\partial t}$ と $\frac{\partial T_{2m}}{\partial t}$ はほとんど等しいと考えられるから、式(7)は次のように変形できる。

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{q_{Rm} - q_R}{kW} \quad (8)$$

さらに計算を簡単にするため、 T_{2m} および T_2 は T_1

に比較して小さいので、これを無視すれば、

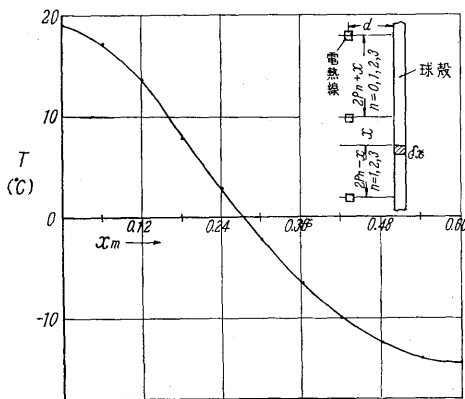
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{q_{Rm}}{kW} (1 - Pd^2cx) \dots\dots\dots(9)$$

P および d をそれぞれ 600 mm および 150 mm に
えらんだとすれば階差方程式にして次のように表わすこ
とができる。⁽¹⁹⁾

$$\Delta^2 T = T(x + \Delta x) + T(x - \Delta x) - 2Tx \\ = \frac{(\Delta x)^2 q_{Rm}}{kW} (1 - 0.0135 Cx)$$

ここで q_{Rm} を一定とし、すなわち一定入力で加熱す
るとして Δx を適ぎあたえて、Trial and error method
により計算すれば、球殻上の温度分布が検討できる。一
例として $\Delta x = 0.06$ m 電熱線出力 2.4 kW/m, $k = 38$
kcal/mh°C⁽²⁰⁾, $W = 0.08$ m とした場合の計算結果を第 7
図に示す。

第 7 図より、放射による加熱が温度分布にあてる影
響は電熱線の間隔が比較的大きくても、非常に少ないと
いえる。



第 7 図 熱電線位置からの距離による球殻温度変化
Fig. 7. Temperature distribution on vessel surface

この他自然対流による影響についても考慮しなけれ
ばならないが、数値的につかむことが困難なため英国
Hunterston の実績を基にして、容器下部には、相当の
割合で電熱線をおさめ、容器の赤道面下に総容量の 78%⁽²¹⁾

の電力を供給するようにした。

VI. む す び

以上東海炉の焼鈍を行なうに当たって、材料の面と加
熱設備の面から検討した諸項目について、その内容の概
略をのべた。実際に行なわれた焼鈍の結果およびその検
討については次回の“II 成績編”で報告する。

参考文献

- (1) 村上, 仲西 : FAPIG No. 28 (1963)
- (2) D.S. Wood : Symposium on the use of steels for reactor pressure circuits 1960 (Ivon St.Inst.)
- (3) D.F.T. Roberts, M.H.D. Blore, W.F. Ridgway : I.M.E. Rack, 113-119, Paper 63 (1963)
- (4) M.H.D. Blore, D.F.T. Roberts : G.E.C. Report No. 416, 1960.
- (5) 間庭, 三好 : FAPIG No. 25 (1963)
- (6) T.S. Robertson : J.I.S.I., 175 (1953)
- (7) H. Kihara, K. Masubuchi, K. Iida, H. Oba : I.I.W. Document X-218-59
- (8) 通商産業省原子力発電所安全基準委員会
原子力発電所安全基準 (第 1 次報告書) 昭和 36 年 4 月
- (9) ASME, Boiler and pressure vessel code XIII Unfired Pressure Vessel (1962)
- (10) B.S. 1500 : 1958 British standard for fusion welded pressure vessels.
- (11) *Op. cit* (3) D.F.T. Roberts.
- (12) D.F.T. Roberts, M.H.D. Blore : Brit. Weld. J. May 1962. 9. No. 5, 283
- (13) D.F. Hiller : G.E.C. Report, No. 601
- (14) 電熱工学 (電気学会)
- (15) 前島正一 : 保温保冷の設計とその選択 (化学装置 1960/3)
- (16) 渡辺常正 : 熱伝達と保温材
- (17) J.S. Moreland : G.E.C. Tech. Memo. No. 201
- (18) 栗野誠一, 葛岡常雄 : 伝熱工学
- (19) *Op cite* (18)
- (20) *Op cite* (19)
- (21) *Op cite* (13)



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