

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

溶接部局部熱処理装置の開発

「その1 装置の設計・製作と基本特性評価試験」

1991年8月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

転
い

複製,
て下さ

溶接部局部熱処理装置の開発

「その1 装置の設計・製作と基本特性評価試験」



報告者 西山 元邦*¹ 平子 一仁*²
関 正之*¹ 飛田 典幸*¹
長井 修一朗*¹ 上村 勝一郎*¹
豊島 光男*¹ 井坂 和彦*²
葛木 浩一*³

要 旨

期間 平成元年4月～平成3年6月

(目的)

高強度フェライト／マルテンサイト鋼製被覆管（以下『高強度F／M鋼製被覆管』と称す。）は、日米共同研究に基づき平成4年度から高速増殖炉 実験炉「常陽」のB型特殊燃料集合体としての燃料照射試験が予定されている。ところが高強度F／M鋼製被覆管材は燃料要素加工時の溶接により溶接部近傍が焼入硬化し、延性、じん性等が劣る。そこで溶接後の熱処理が行える装置を新たに開発し、B型特殊燃料集合体の製造に反映させる事が必要となった。

(方法)

溶接部の局部熱処理を行うために装置の設計、製作を行い、装置の基本特性を把握するための性能試験及び熱処理試験を実施した。

(結果)

- (1) 規定真空度（ 1×10^{-3} Pa）までの到達時間は、約45分であった。
- (2) プログラムのコントロール機構（昇温、保持、降温）が設定通りに作動することを確認した。
- (3) 放射温度計の感知温度は、放射温度計の当たる部分の形状の変化によって大きく変わってしまう。
- (4) 本装置による試料の熱処理において、溶接による焼入れ硬化部の最高硬さは600Hvであったのに対し、熱処理後の溶接部近傍硬さは280～320Hvまで軟化している事を確認した。（母材硬さは265Hv）
- (5) 高周波誘導加熱による溶接部の局部を熱処理する方法を採用し、加熱幅は約5mmに限定でき、且つ、熱処理時間は50分／本と短時間でこなえた。

(結論)

上記の結果から本装置の性能を総合して評価すると、概ね当初の設計性能を満足するものであり、溶接部の熱処理は可能であると判断できる。但し溶接部の形状及び光沢の違いにより熱処理温度にバラツキが生じるため、これらの温度制御の方法の確立と熱処理温度と鋼の焼き戻し硬さの関係の明確化が今後の課題と思われる。

* 1 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室
* 2 原子力技術(株)
* 3 再処理工場 化学処理二課

目 次

	頁
I. はじめに	1
II. 装置の製作仕様	2
1. 熱処理の必要性	2
2. 加熱方式の検討	6
3. 高周波誘導加熱の理論	6
4. 周波数の選定	7
5. 真空容器と排気能力の設定	8
6. 溶接部局部熱処理装置の発注仕様	8
III. 溶接部局部熱処理装置の製作	10
1. 装置概要	10
2. 装置構成品の性能仕様	12
3. 本装置におけるノイズ対策	23
4. 熱処理の工程フロー	24
IV. 装置性能試験	25
1. 真空排気試験	25
2. 加熱試験	25
3. 試料の設定位置試験	30
4. 放射温度計の温度測定位置試験	32
5. 円周方向の温度分布試験	33
6. 真空チャンバーの表面温度の確認	34
7. 装置性能試験まとめ	34
V. 試料熱処理能力の確認	36
1. 熱処理試験	36
2. 試料熱処理試験のまとめ	36
VI. ま と め	43
VII. 今後の課題	44

Ⅷ. 参考文献	45
別添 1 補足説明試料（装置の加熱能力と冷却能力の算定）	46

図リスト

	頁
図-1 溶着金属の組織状態図 (シェフラー)	3
図-2 12Crステンレス鋼の焼戻しによる機械的性質の変化	5
図-3 誘導加熱の原理	7
図-4 溶接部局部熱処理装置概略図	11
図-5 溶接部熱処理装置のシステム概略図	16
図-6 溶接部熱処理装置冷却水系統図	20
図-7 冷し金構造図	21
図-8 コイル構造図	22
図-9 燃料ピンの熱処理工程フロー	24
図-10 加熱部温度の測定方法	26
図-11 加熱試験結果 ($\phi 6.5\text{mm}$)	27
図-12 加熱試験結果 ($\phi 6.86\text{mm}$)	28
図-13 加熱試験結果 ($\phi 7.5\text{mm}$)	29
図-14 試料の設定位置試験の方法	31
図-15 放射温度計の温度測定位置試験の方法	32
図-16 円周方向の温度分布試験の方法	33
図-17 熱処理試験温度記録チャート ($\phi 6.5\text{mm}$)	37
図-18 熱処理試験温度記録チャート ($\phi 6.86\text{mm}$)	38
図-19 熱処理試験温度記録チャート ($\phi 7.5\text{mm}$)	39
図-20 熱処理試験後の試料硬さ ($\phi 6.5\text{mm}$)	40
図-21 熱処理試験後の試料硬さ ($\phi 6.86\text{mm}$)	41
図-22 熱処理試験後の試料硬さ ($\phi 7.5\text{mm}$)	42
〔付録〕	
図-23 燃料棒の熱処理部のモデル	47
図-24 熱伝導で温度が変化する燃料棒被覆管部分の長さ δ	48

図-25	誘導加熱装置出力Eを変化した場合の熱処理部の 温度上昇曲線（計算値）	51
図-26	検討した冷却形態	53
図-27	HEATING-Ⅲ熱伝導計算で用いた要素分解	55
図-28	熱処理部の冷却曲線	56
図-29	冷し金冷却時間の冷却速度の調整	58

表リスト

	頁
表-1 高強度 F / M 網製被覆管の硬さ測定結果	2
表-2 高強度 F / M 網製被覆管の化学成分	3
表-3 溶接部局部熱処理装置の発注仕様一覧	9
表-4 高周波電源部性能仕様	13
表-5 放射温度計の性能仕様	15
表-6 プログラムコントローラーのプログラム仕様	17
表-7 油回転ポンプと油拡散ポンプの性能仕様	18
表-8 規定真空度になるまでの時間	25
表-9 熱電対の性能試験データ	26
表-10 試料の設定位置の試験結果	31
表-11 放射温度計の温度測定位置試験結果	32
表-12 円周方向の温度分布の試験結果	34

写真リスト

	頁
写真-1 溶接部局部熱処理装置	10
写真-2 高周波電源	12
写真-3 放射温度計	14
写真-4 冷し金	23

1. はじめに

高強度フェライト／マルテンサイト鋼製被覆管材（以下「高強度F／M鋼製被覆管材」と称す。）は、耐照射スエリング性に優れている事から高速炉炉心材料としての使用が検討されておりこの材料の照射特性を確認する目的から、日米共同研究に基づき、平成4年度から高速増殖炉 実験炉「常陽」のB型特殊燃料集合体を用いて照射試験（B8照射試験）が予定されている。

しかし、高強度F／M鋼製被覆管材は、端栓溶接の際に溶接部近傍が急速に冷却される事により焼入れ硬化を引き起こし、延性、じん性等の機械的強度が低下する事が分かっている。¹⁾この機械的強度を母材なみに回復させるには、溶接部近傍を再加熱する必要がある。平成元年4月から高周波を用いた溶接部局部熱処理装置の開発に着手した。

本報告書は、溶接部局部熱処理装置の設計、製作の内容と装置の基本特性を把握するための装置性能試験及び熱処理能力を確認するための熱処理試験について記し、それらの結果と今後の課題について検討を加えたものである。

II. 装置の製作仕様

1. 熱処理の必要性

高強度 F / M 鋼製被覆管の溶接後の溶接部近傍の最高硬さの測定結果を表 - 1 に示す。
各鋼種とも溶接後の硬さは母材よりも著しく増加している事がわかる。

表 - 1 高強度 F / M 鋼製被覆管の硬さ測定結果

鋼の種類	61FS	61FSF	61FK
母材硬さ (Hv)	265	235	265
溶接後最高硬さ (Hv)	660	600	400

高強度 F / M 鋼の溶接部近傍の硬さが増加したのは、溶接時の入熱によりマルテンサイトの組織が析出したためである。マルテンサイトは、適量の C を含む材料をオーステナイトの状態から A₁ 変態を阻止し急冷した場合に現れる組織であり、これはフェライト中に C 原子が過飽和に固溶した非常に硬いものである。^{2) 3)}

溶接金属がどのように変態するかについては、材料を構成する化学成分よりその概略を確認する事ができる。それは、図 - 1 に示すシェフラーの状態図⁴⁾に表 - 2 の高強度 F / M 鋼の化学成分をニッケル当量とクローム当量に分解し、計算した結果をシェフラーの状態図と照合することにより、いずれの鋼種とも溶接金属部の組織はフェライトとマルテンサイトの二相のステンレス鋼になることが分かる。

表-2 高強度 F/M 鋼製被覆管の化学成分

鋼種	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb
61FS	0.090	0.08	0.52	0.001	0.32	11.09	0.51	1.86	0.22	0.050
61FSF	0.120	0.06	0.68	0.001	0.86	11.15	0.12	2.11	0.20	0.050
61FK	0.044	0.05	0.63	0.009	0.45	11.08	1.94	-	0.24	0.051

鋼種	S	Co	N	B	Fe
61FS	0.002	≦0.01	0.047	-	BAR
61FSF	0.002	≦0.01	0.045	0.021	BAR
61FK	0.002	≦0.01	0.061	-	BAR

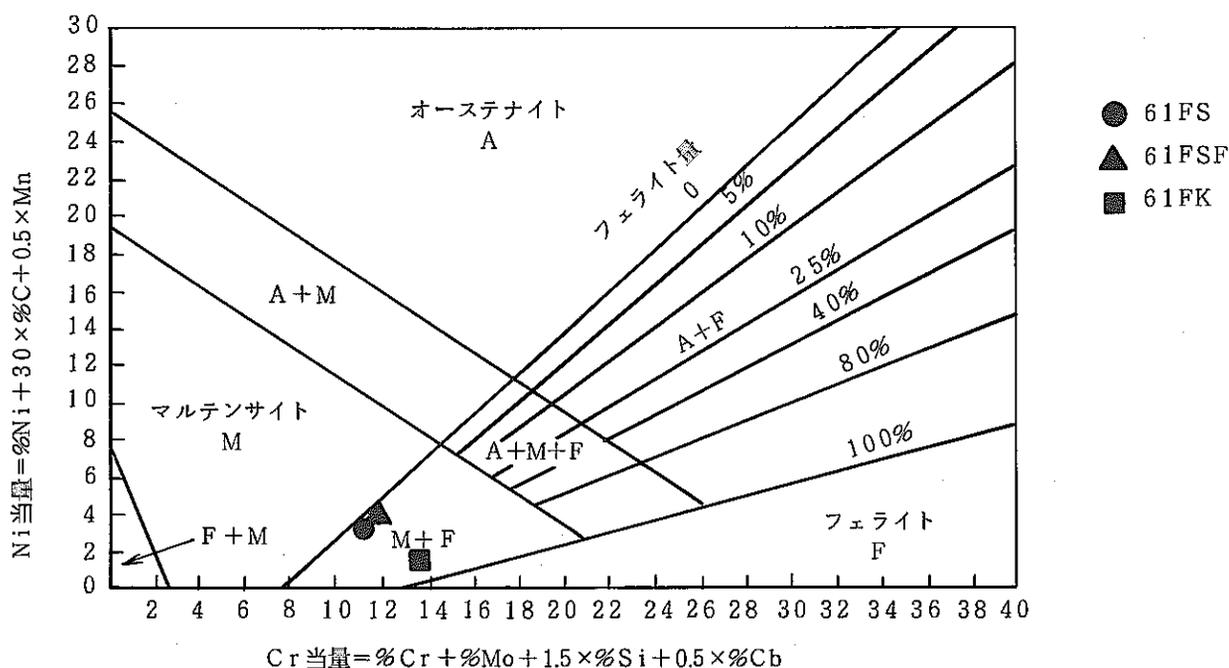


図-1 溶着金属の組織状態図〔シェフラー〕⁴⁾

この様に、溶接時にマルテンサイトが析出して焼入れ硬化を引き起こす材料は、じん性、延性等の機械的性質が衰えるため、それらを改質する目的から焼き戻しを行う必要がある。

次に熱処理条件について記述する。

焼き戻しを行う上で、硬度軟化の度合は、焼き戻し温度と時間に依存する。図-2には高強度F/M鋼と似た挙動を持つ12Crステンレス鋼(SUS-410)の焼き戻しによる機械的性質の変化を示す。⁴⁾ 図-2において、材料の硬さが450Hv以上になるとその時の衝撃値は著しく低下している事が分かる。高強度F/M鋼の溶接部近傍の硬さは、先程表-1で示した様に600Hv以上に達している部分があり、これを母材と同等の硬さ(250Hv)まで軟化する熱処理条件をこの図から判断すると、焼き戻し温度は750℃、焼き戻し時間は10分(図中の点線上の熱処理条件)以上となる。

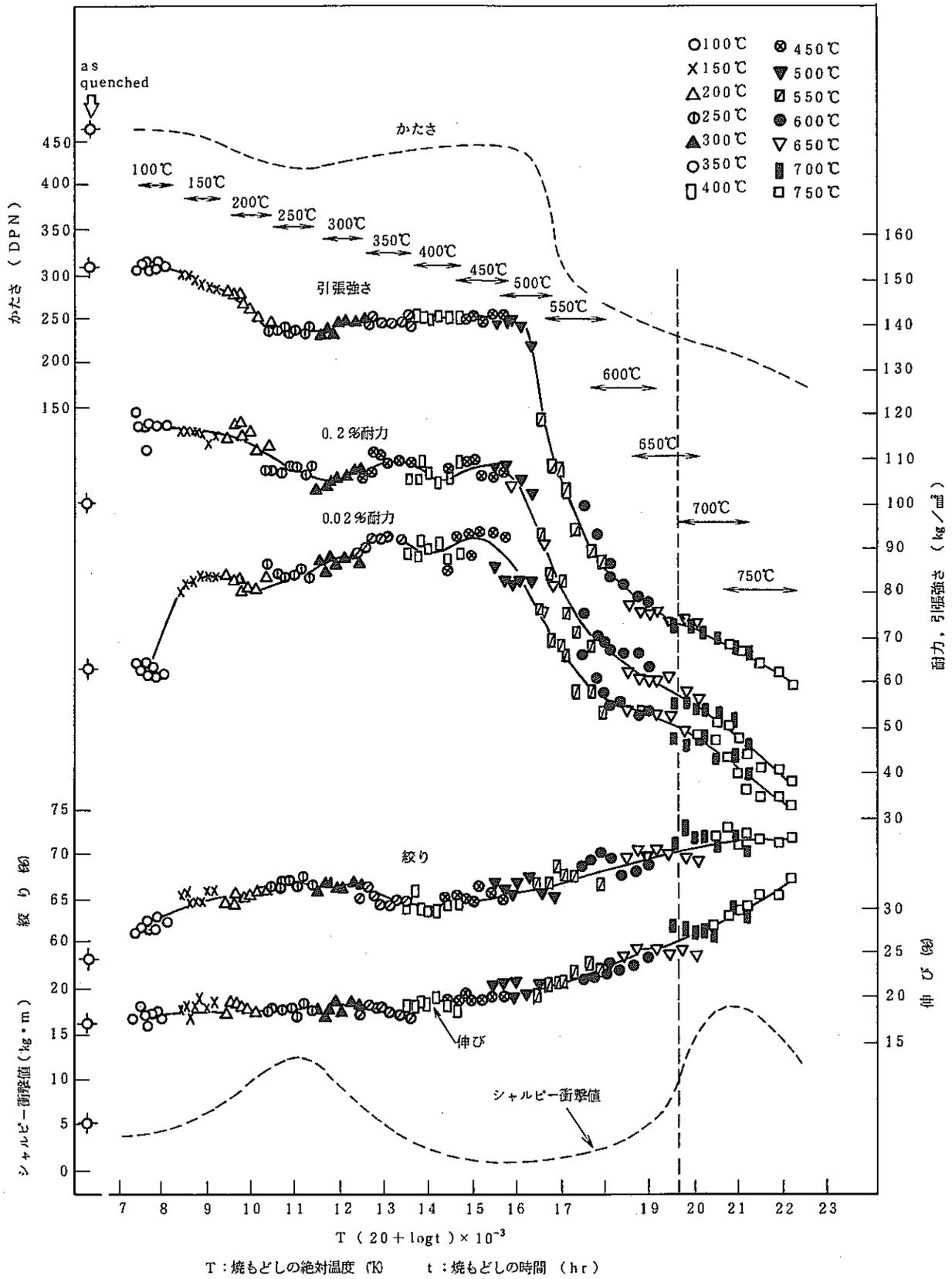


図-2 12Crステンレス鋼の焼戻しによる機械的性質の変化⁴⁾

2. 加熱方式の検討

加熱方式は、熱源により燃焼加熱と電気加熱に大別される。電気加熱は、重油やガスを燃して熱を得る燃焼加熱に比べ以下のような長所がある。

- 1) 必要な箇所に必要なときに必要な加熱を行う事ができるので、高温、高効率、高速な加熱が容易である。
- 2) 酸素を必要としない加熱であるため、種々の雰囲気または真空中で容易に加熱を行うことができる。
- 3) 燃焼加熱は、雰囲気温度の制御によって行うが、電気加熱では加熱材自体の温度を精密温度調整、自動制御、遠隔操作することが容易である。

上記のように電気加熱は、燃焼加熱と比べて作業性が良く、小物の熱処理、精密熱処理に適している。この様な特徴を有する電気加熱方式には、抵抗加熱、アークプラズマ加熱、電磁波加熱及び誘導加熱がある。^{5) 6)}

今回の熱処理作業では、局部の連続加熱が容易で小物の熱処理に適し、且つ設備が小規模で収まる事から高周波誘導加熱を用いる事にした。

3. 高周波誘導加熱の理論

誘導加熱は、コイルを用いて、被加熱物と適当な隙間（エアーギャップ）を保ち、加熱するというものである。誘導加熱の原理は、図-3の様に金属円柱の周りにソレノイド状にコイルを巻き交流電流を流すと、電磁誘導により金属円柱中に誘導電流が発生しこれによるジュール熱で金属円柱が発熱するというものである。⁵⁾

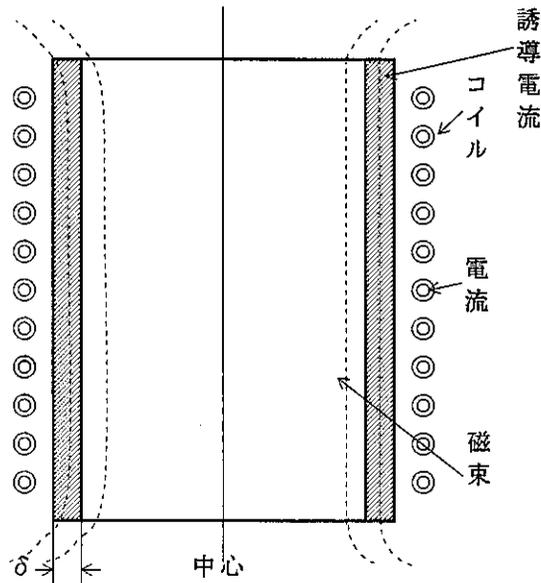


図-3 誘導加熱の原理

4. 周波数の選定

ここで、誘導加熱に用いる高周波について述べる。

高周波とは、60Hzを超える周波数を全て言い、誘導加熱に用いられる周波数は、100 Hz～450KHzと広い範囲を持ち、電源周波数は被加熱物の加熱効率と被加熱物を流れる電流の浸透深さに関係してくる。

被加熱物（金属円柱）中に発生する電力は、電源周波数が高くなるにつれて大きくなるため、加熱効率を良くするためには、できるだけ高周波を用いる事が望ましい。そして、電磁誘導により被加熱物（金属円柱）中に発生した電流帯の幅は、電流の浸透深さ δ と呼ばれ（図-3参照）、電源周波数が高くなる従って小さくなる。例えば、電源周波数を高くして誘導電流を被加熱物の表面に集中して流せば、被加熱物の表面のみを加熱する事ができ、その反対に電源周波数を低くすれば被加熱物の中心部分まで加熱する事ができる。

しかし、今回行う熱処理では、IIの2項から求めたように加熱時間が約10分と比較的長い時間であり、しかも被加熱物の径が小さいので、電源周波数が高く、誘導電流が表面付近に集中して流れても温度伝播により被加熱物全体を均一に加熱する事が可能とな

る。

よって上記の事から電源周波数はできるだけ高い周波数を用いる事が望ましいが、「電波管理法の高周波利用設備に関する規定」において高周波電源の周波数は450kHz以下と規制されているため、今回装置に用いる高周波は450kHz以下とした。

5. 真空容器と排気能力の設定

大気中において材料を加熱、溶解すると酸化を起こし材料の機械的特性に大きな影響を与える。酸化を防ぐためには、雰囲気中の酸素濃度を少なくすれば良いが、その手段としてはAr、Heガス等の不活性ガス雰囲気内又は真空中で作業を行う等の方法がある。

ガス置換による酸素濃度の低下は、比較的容易に行う事が可能であるが、不活性ガス雰囲気中で高周波加熱を行うと、コイルと被加熱物との間で放電を引き起こす可能性があるため今回は真空中での加熱を行う事にした。

真空度の設定は、市販のガスと同等の酸素濃度となる真空度にする必要があると考え、市販の99.999% Ar・Heガスの場合は酸素含有量が約0.5ppm位であるので、今回は酸素含有量が0.2ppm以下となる 1×10^{-3} Pa以上の真空度で加熱を行う事にした。⁷⁾

6. 溶接部局部熱処理装置の発注仕様

これまでにIIで述べた事柄を踏まえて、表-3に示す溶接部局部熱処理装置の発注仕様を決定した。

表 - 3 溶接部局部熱処理装置の発注仕様一覧

<p>1. 加熱機構</p> <p>(1) 構造</p> <p>(2) 高周波周波数</p> <p>(3) 熱処理範囲</p> <p>(4) 熱処理する試料（被覆管）の径</p> <p>(5) 熱処理温度</p> <p>(6) 制御装置</p>	<p>高周波誘導加熱によって、局部加熱ができるものとする。</p> <p>450 KHz 以下</p> <p>5 mm 以下</p> <p>（熱処理部は、燃料ピンの溶接金属部及び熱影響部とする。）</p> <p>φ6.5mm, φ6.86mm, φ7.5mmのもの。</p> <p>最高1000℃</p> <p>昇温速度, 保持時間, 冷却速度を任意に設定できるものとする。</p>
<p>2. 試料の冷却機構</p> <p>(1) 構造</p> <p>(2) 冷却範囲</p>	<p>冷し金による冷却方法を用いる。</p> <p>局部熱処理範囲（約5mm）の端から被覆管部, 端栓部を冷却する。</p>
<p>3. 真空排気能力</p> <p>(1) 到達真空度</p> <p>(2) 到達時間</p>	<p>$1 \times 10^{-3} \text{Pa}$（真空度については、ピラニー真空計及び電離真空計にて測定できることとする。）</p> <p>60分以内</p>
<p>4. その他</p> <p>(1) 安全機構</p>	<p>異常加熱, 断水, 水漏れ, 過電流等運転上危険と考えられる事柄については安全対策を実施。</p>

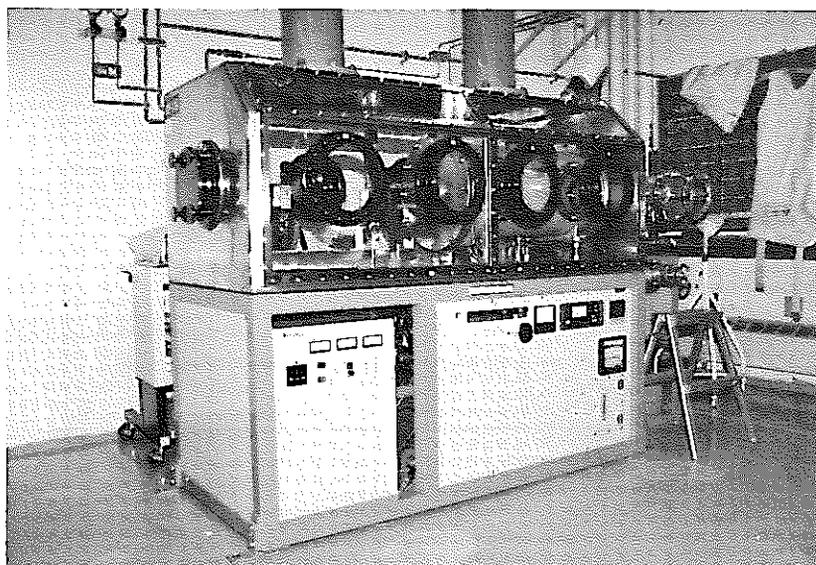
Ⅲ．溶接部局部熱処理装置の製作

1. 装置概要

溶接による焼入れ硬化部の局部熱処理を行うため、Ⅱの製作仕様を基に製作された本装置は、高周波電源部、操作系、真空容器、真空排気装置、水循環系、誘導加熱コイル、試料の冷し金及びオープンポートボックスから構成される。

装置の熱処理温度は、最高1000℃まで設定でき被加熱物の昇温及び降温は、プログラムコントローラーによる自動運転が可能である。

本装置の外観を写真－1，概略図を図－4に示す。



写真－1 溶接部局部熱処理装置

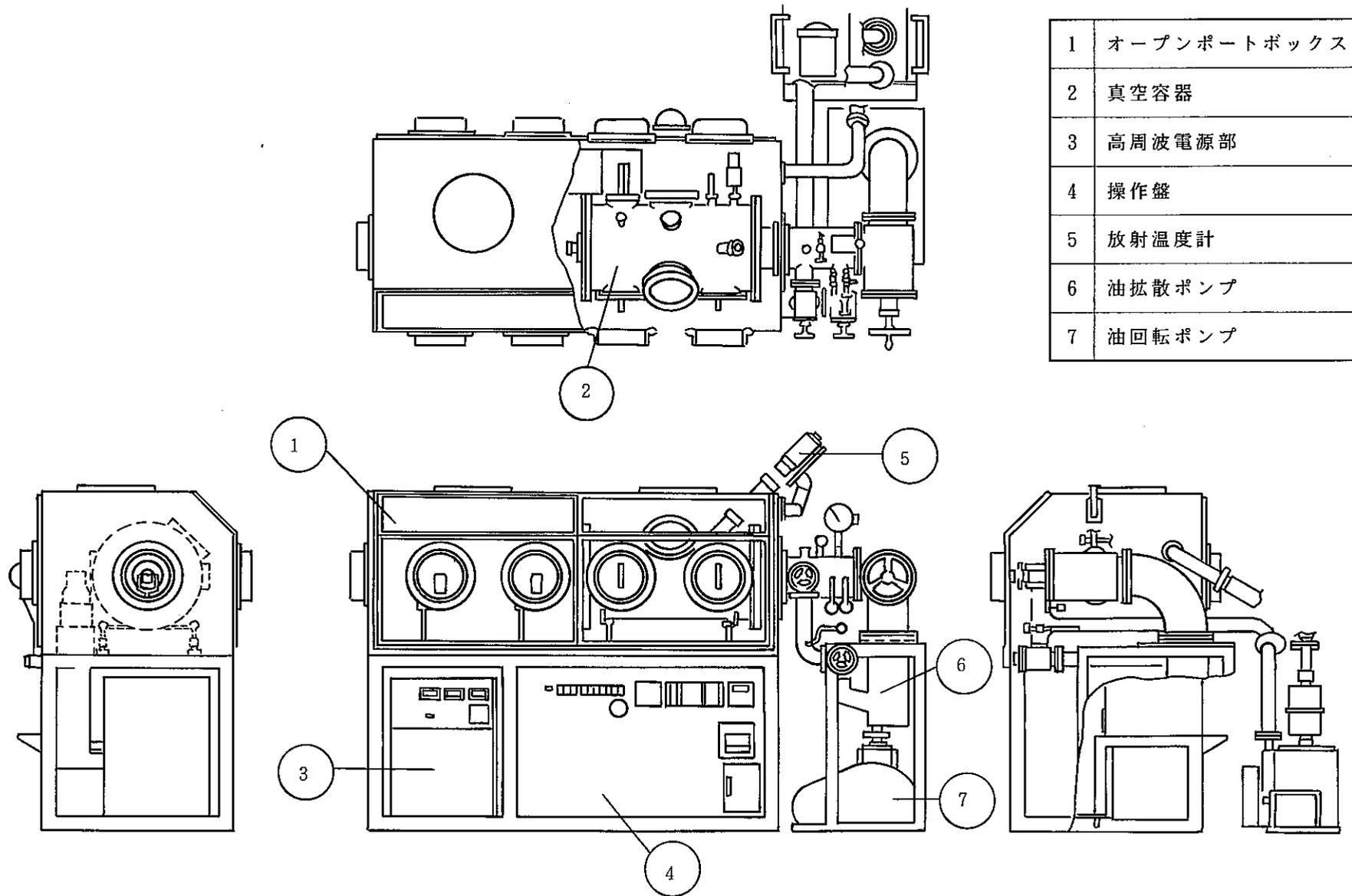


図 - 4 溶接部局部熱処理装置概略図

2. 装置構成品の性能仕様

装置を構成する機器の性能仕様及び構成部品の概略を以下に述べる。

(1) 高周波電源部

Ⅱの4項で述べた事柄を踏まえて高周波電源の周波数は、約400kHz（240～440kHzの間で動作可）とした。

この高周波電源は出力2.5kWで、特徴として誘導加熱に最適な回路方式と半導体素子を用いることで、小型、軽量化を実現している。

その性能仕様を表-4に記すとともに写真を写真-2に示す。

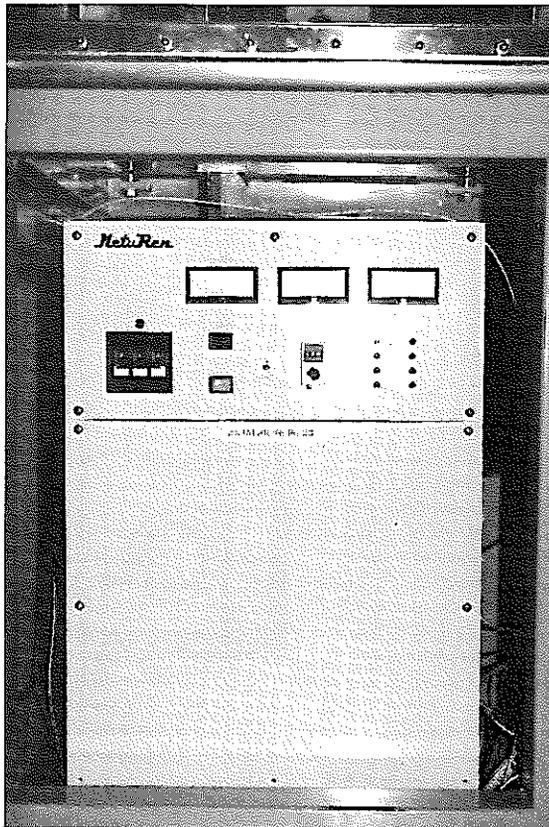


写真-2 高周波電源

表-4 高周波電源部性能仕様

電 源	3相 200V 50/60Hz 約3kVA
接 地	第3種接地
周 波 数	約400kHz(240~440kHz間で動作可能)
出力電力	2.5kW(1~100%連続可変)
出力制御	出力電流一定制御方式
出力安定度	±2%以内
モ ニ タ ー	a. 直流電流(A 表示 FS: 20) b. 直流電圧(V 表示 FS: 300) c. 周波数計(kHz 表示 FS: 500)
整合方式	トランスとコンデンサを用いた直列共振方式
冷却方式	水冷方式

また、高周波電源の保護回路部の保護動作は以下の様になっている。

・ V O L T A G E

- a. 高周波出力電圧が規定値以上で動作する。(600V)

・ C U R R E N T

- a. 高周波出力電流が規定値以上で動作する。
b. 商用入力電流が規定値以上で動作する。(12A)

・ H I G H F R E Q U E N C Y

- a. 発振周波数が規定値以上になると動作する。(440kHz)

・ L O W F R E Q U E N C Y

- a. 発振周波数が規定値以下になると動作する。(240kHz)

・ T E M P E R A T U R E

- a. インバータ部、半導体素子放熱板の温度が50℃以上になると動作する。

・ W A T E R

a. 冷却水，水量が規定値以下になると動作する。(3 ℓ / min)

(2) 操作系

操作系は，加熱部の温度を管理するための放射温度計，昇温及び降温を自動で行うためのプログラムコントローラー，操作盤から構成されている。

図-5に本装置のシステム概略図を示す。

① 放射温度計

放射温度計は，昇温及び降温を制御するプログラムコントローラー側へ入力されており加熱部の温度を管理している。その写真を写真-3に，性能仕様を表-5に示す。

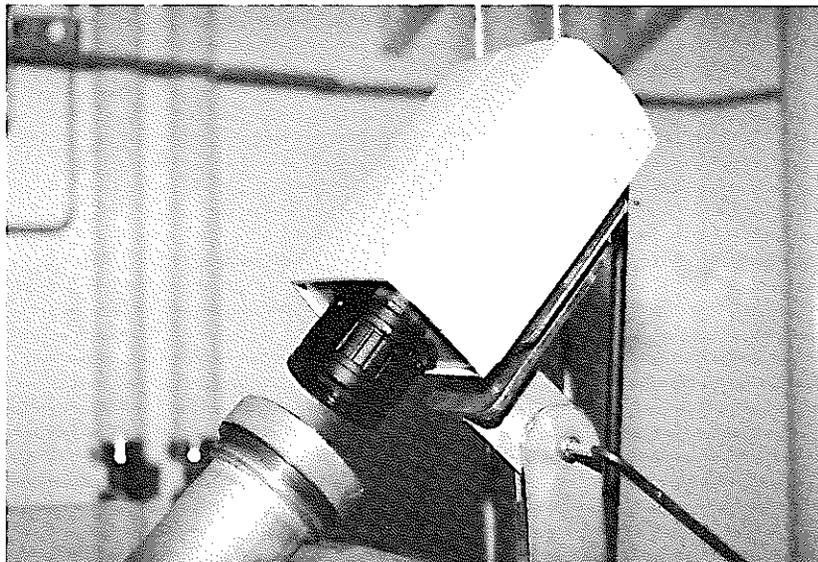


写真-3 放射温度計

表-5 放射温度計の性能仕様

測定方式	広帯域放射温度計
検出素子	P b S
測定波長	2 μ m
測定範囲	400 ~ 1200 $^{\circ}$ C
測定精度	500 $^{\circ}$ C未満 \pm 3 $^{\circ}$ C 500 $^{\circ}$ C以上1000 $^{\circ}$ C未満 \pm 5 $^{\circ}$ C 1000 $^{\circ}$ C以上 測定値の \pm 0.5%
分解能	1 $^{\circ}$ C
応答時間	約0.2秒(95%応答)但し変圧器出力

また、放射温度計で感知した加熱部の温度を記録するためにフルスケール1200 $^{\circ}$ C、紙送り速さ20mm/minのチャート器を接続している。

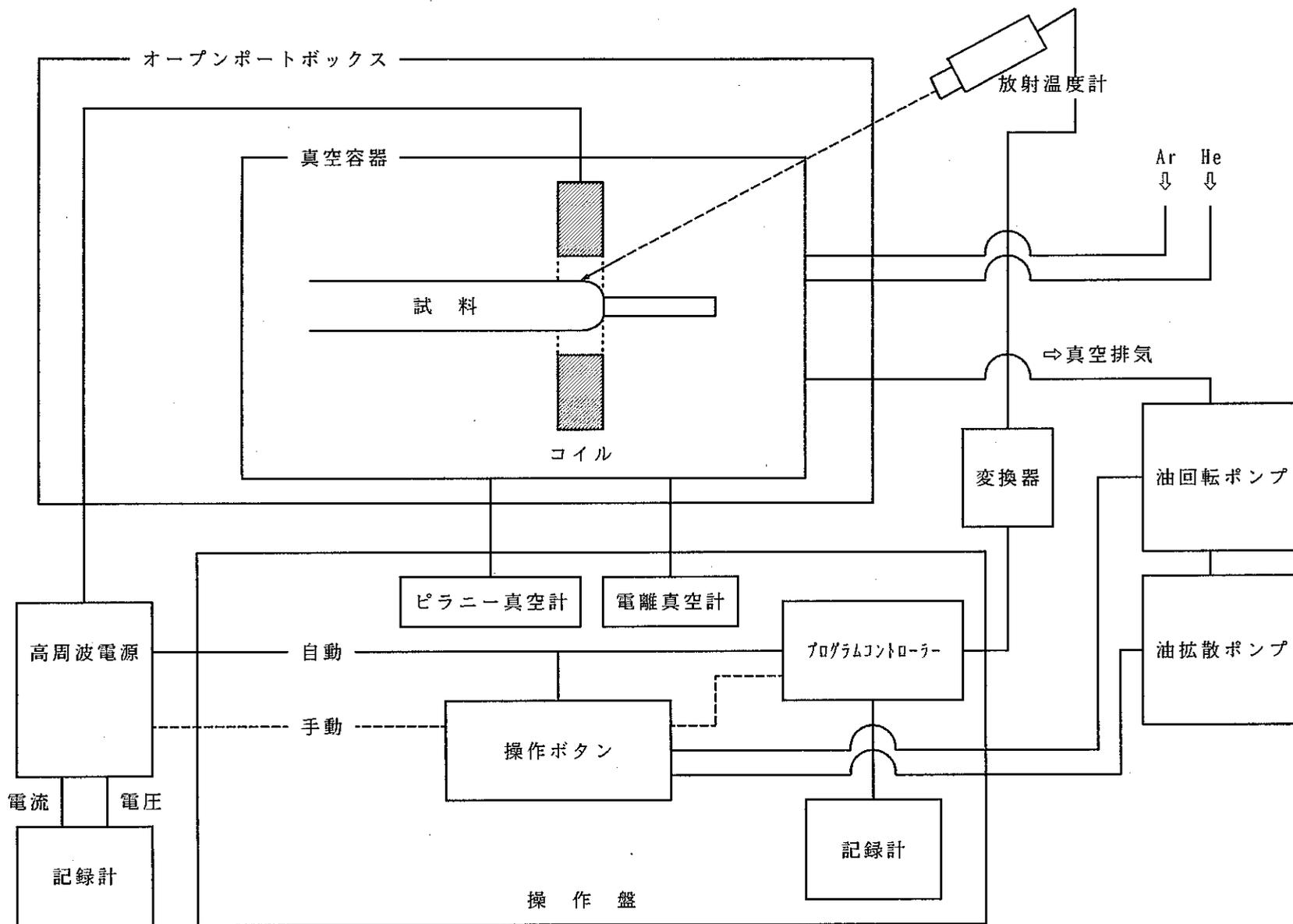


図-5 溶接部熱処理装置のシステム概略図

② プログラムコントローラー

加熱部の昇温及び降温を自動的に管理するプログラムコントローラーのプログラム仕様を表-6に示す。

表-6 プログラムコントローラーのプログラム仕様

プログラムパターンステップ数	最大19ステップ/1パターン
プログラムパターン数	最大19パターン
プログラムパターン繰返し	最大9999回
プログラムステップ繰返し	最大99回
設定範囲	温度 400～1200℃ 直流電流 4～20mA 時間 0～999時間59分 (設定分解能1分)
スタート温度	400℃
選択パラメーター	定数 (8種) アラーム (8種×4点) 出力リミッタ (上・下限8種) 出力変化量リミット (8種) 実温度補償 (8種) 待時間アラーム (8種) センサ補正 (8種) タイムシグナル (8種及びオールOFF オールONの10種)

③ 操作盤

・スイッチ類

操作盤は冷却装置、油回転ポンプ、油拡散ポンプ、ピラニー真空計、電離真空計及び、自動で加熱を行う場合のON、OFFスイッチから構成される。手動で加熱を行う場合の加熱スイッチは、高周波電源部本体にある。

・アラーム類（安全機構）

アラームは冷却水異常，加熱異常，高周波電源異常を知らせるものであり，異常が発生した時これらのランプが点灯すると同時にブザーが吹鳴する。（高周波異常のアラームは，電源部保護回路に接続している。）

(3) 真空系

真空容器は，スペースを取らぬ様なるべくコンパクトなものとし，作業用ハッチ，監視用の覗窓，放射温度計用の覗窓，燃料ピンをチャックする導入シールが設けられている。また，導入シール部は用いる被覆管の径に合わせてφ6.5，φ6.86，φ7.5の3種類のものがある。

また，真空排気には，油回転ポンプと油拡散ポンプを用いている。表-7にそれぞれの性能仕様を示す。

表-7 油回転ポンプと油拡散ポンプの性能仕様

	油 回 転 ポ ン プ	油 拡 散 ポ ン プ
排気速度 (ℓ/min)	600	1200
到達真空度 (Pa)	7×10^{-2}	2.6×10^{-5}
回 転 数 (rpm)	600	—
所要電力 (kW)	0.75	1.0
油 量 (ℓ)	6	0.34
冷却水 (ℓ/m)	—	3.0
重 量 (kg)	7.7	16.3

(4) 水循環系

図-6の冷却水系統図に示す様に，油拡散ポンプ，高周波電源部の冷却水は，建屋側の給排設備に直結されており，容器内のコイル，冷し金の冷却水は，貯水タンク内に一旦貯められそこから循環している。

(5) コイル, 冷し金

図-7にコイル, 図-8に冷し金の構造図及び写真-4に冷し金の写真を示す。コイルの材質には1020銅を用い, 形状は加熱幅を小さくするためワンターンのものを用いている。そして, 冷し金の材質には, 無酸素銅を用い, 被覆管をはさむ溝は管との密着度を高め冷却効率を増すためぎりぎりの寸法で製作した。

また, コイルは用いる3種類の被覆管径 ($\phi 6.5$, $\phi 6.86$, $\phi 7.5$) に合わせ, 内径が $\phi 8.0$, $\phi 8.5$, $\phi 9.0$ のものがあり, 冷し金も同様に溝の径が $\phi 6.5$, $\phi 6.86$, $\phi 7.5$ のものがある。

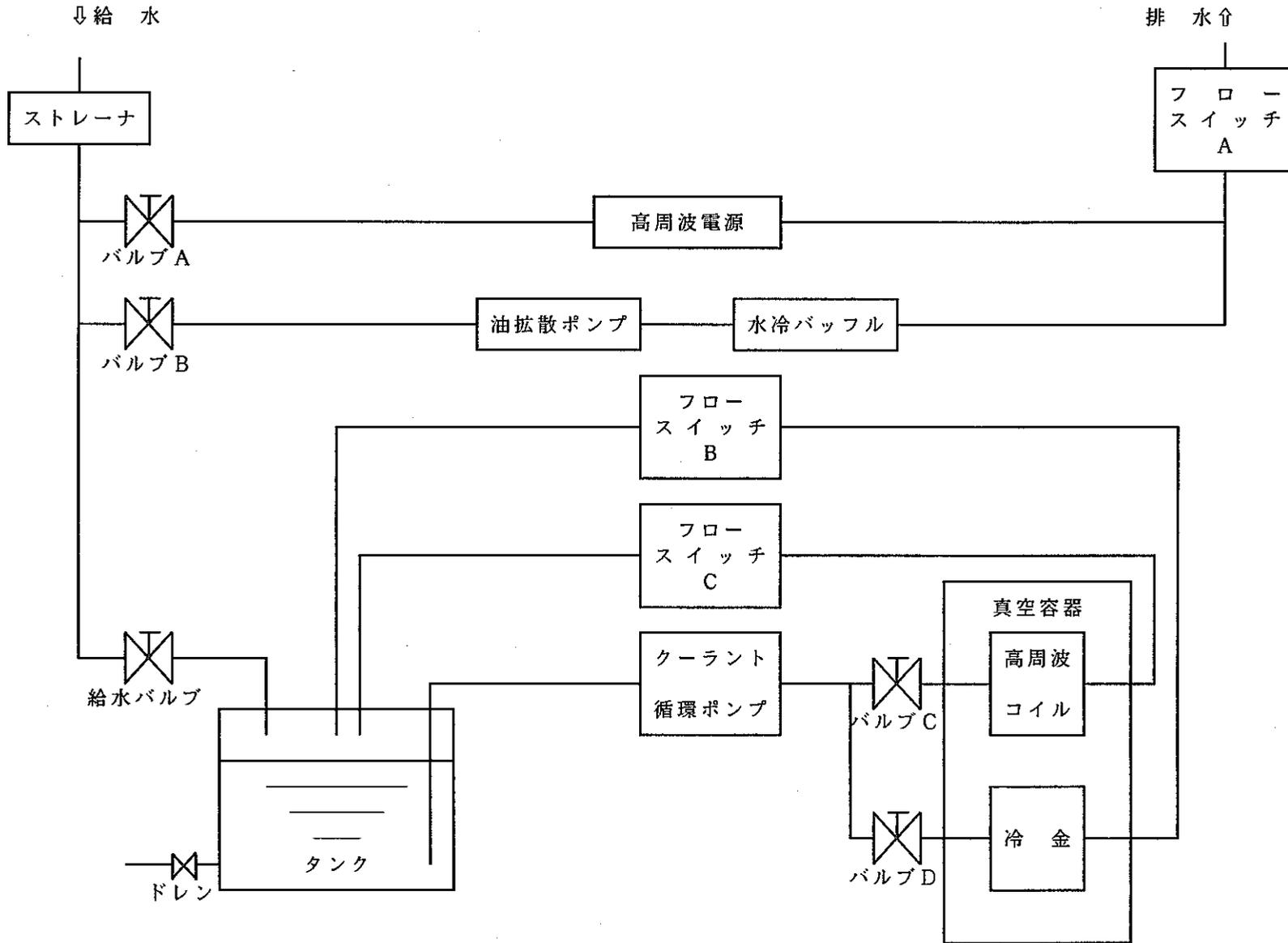


図-6 溶接部熱処理装置冷却水系統図

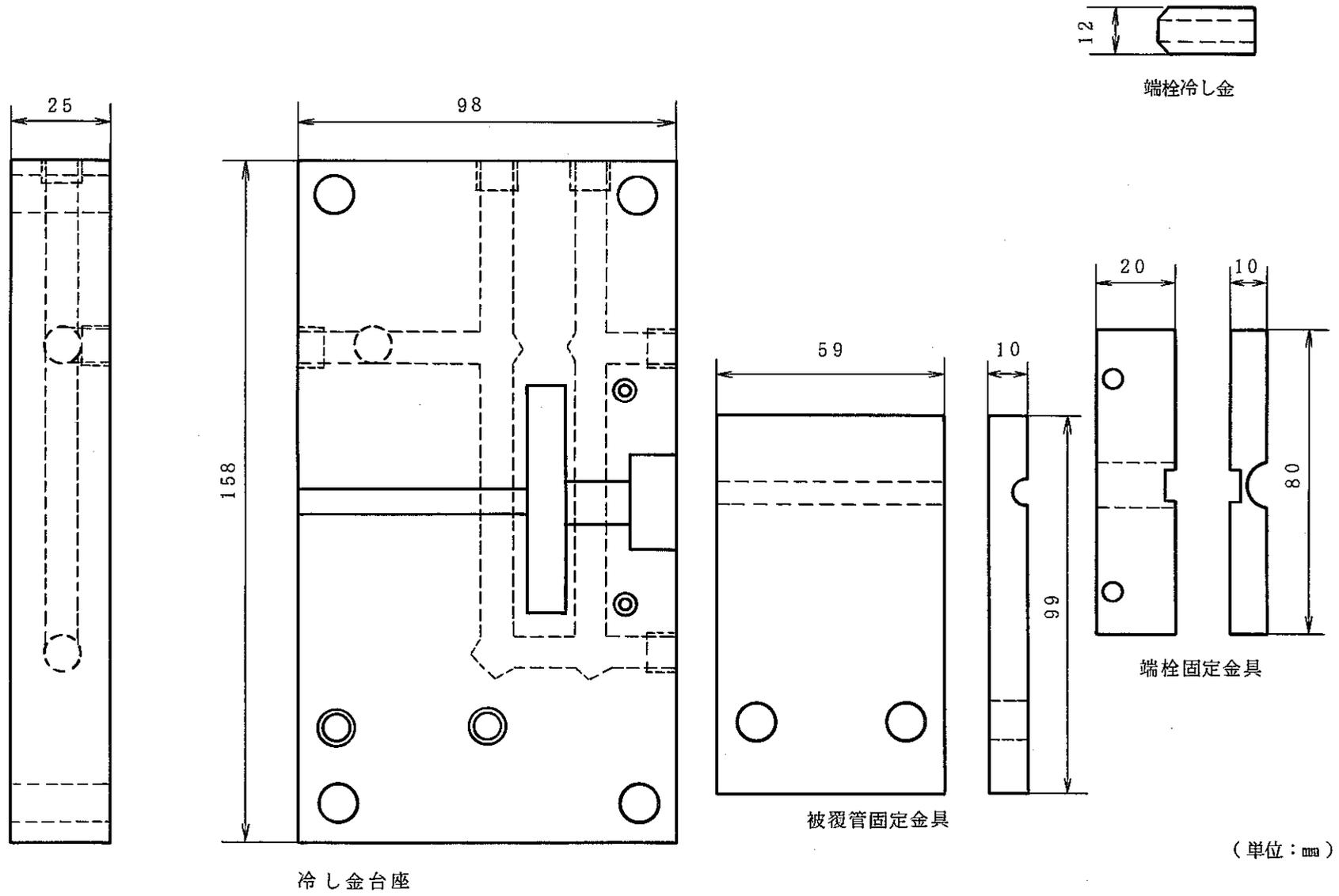
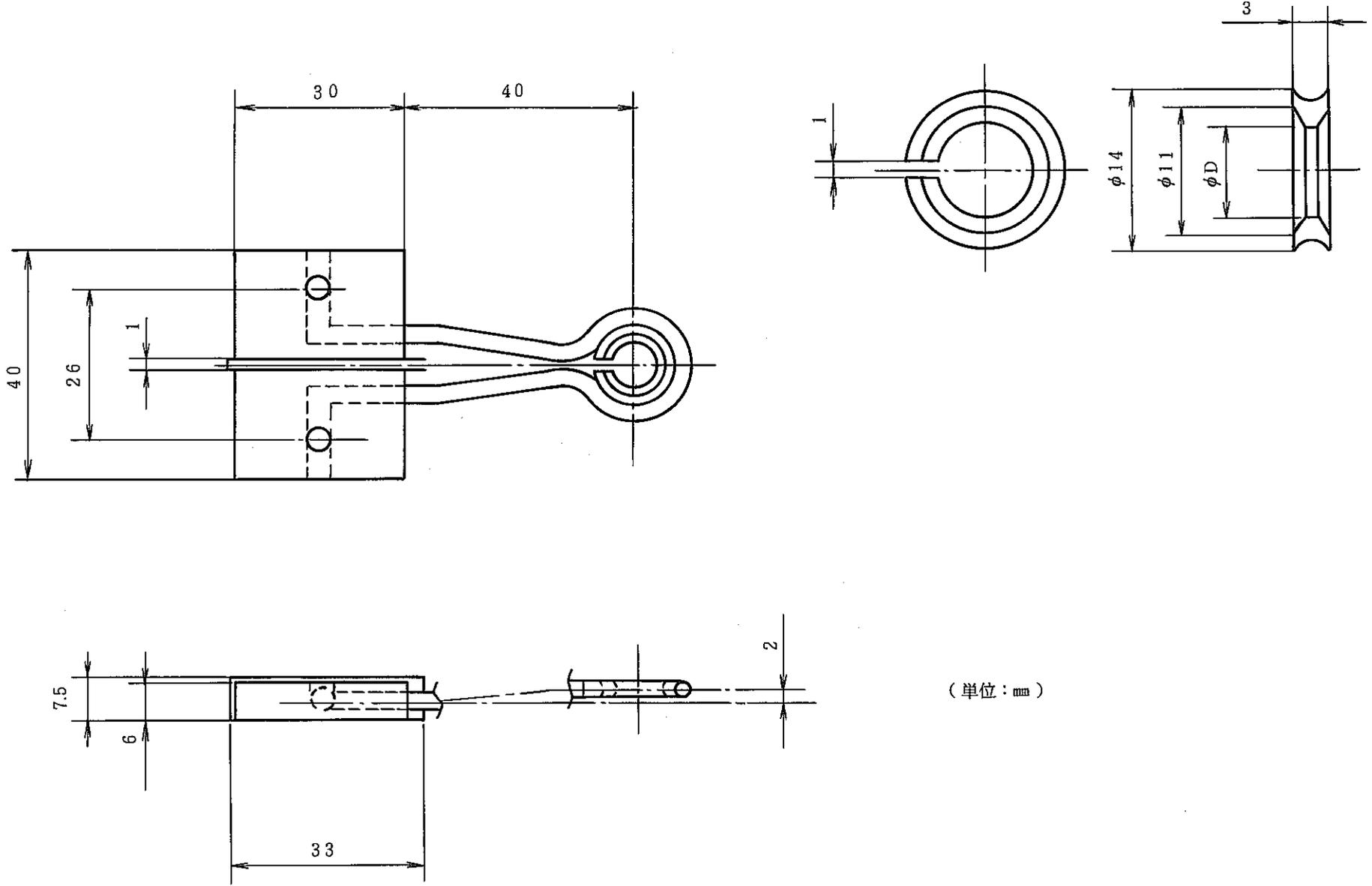


图-7 冷し金構造図



(単位: mm)

図-8 コイル構造図

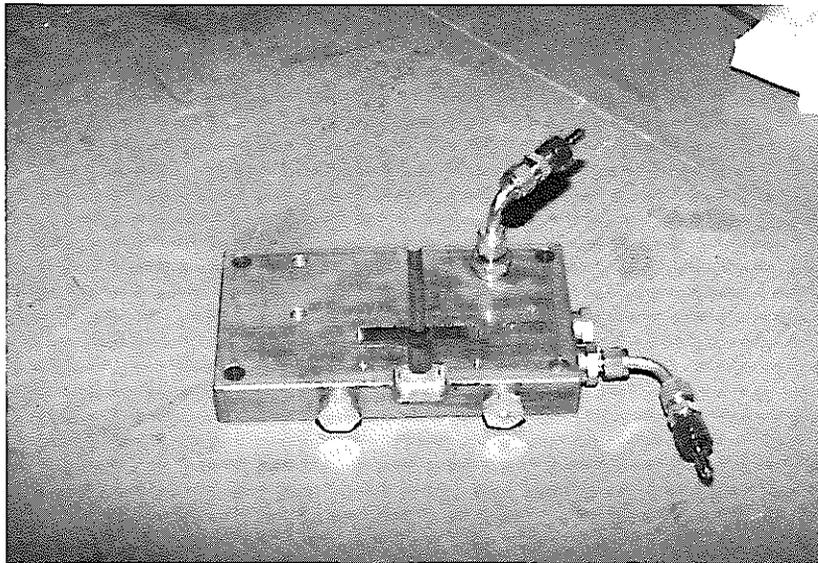


写真-4 冷し金

(6) オープンポートボックス

照射用の燃料ピンの熱処理を行う時のために装置は、写真-1の様なオープンポートボックス内に納められる。このオープンポートボックスは、内容積をできる限り小さくし、内蔵物の荷重に十分耐えうる構造とした。

3. 本装置におけるノイズ対策

一般に高周波を用いる装置の場合、高周波発振機より発生するノイズが周辺機器に影響を及ぼさないよう十分な配慮をする必要がある。本装置の場合も高周波発振器の出力の抑制、アース線の分離等により設計段階においてその対策を行った。

しかし、装置の試験中に変換器抵抗の故障とフロースイッチの誤動作というアクシデントに見舞われた。これらの原因を調査した結果、熱処理用コイルと試料の接触、もしくはそのギャップの減少によりスパーク電流が発生した事、又それにより高周波電源と本体操作盤の間にループ電流が発生した事が原因であると推察された。

そこでこれらの対策として

- (1) コイルと試料間に異常電流が流れた場合、高周波電源を切る保護回路を設ける。
- (2) 高周波電源と本体操作盤のループ電流を切る為に、高周波電源のアース線を分離単

独化する。
の二点を実施しノイズ対策を万全とした。

4. 熱処理の工程フロー

今回製作した溶接部局部熱処理装置による燃料ピンの熱処理工程フローを図-9に示す。尚、燃料ピンの熱処理は、上部、下部両側の端栓溶接部について行う。

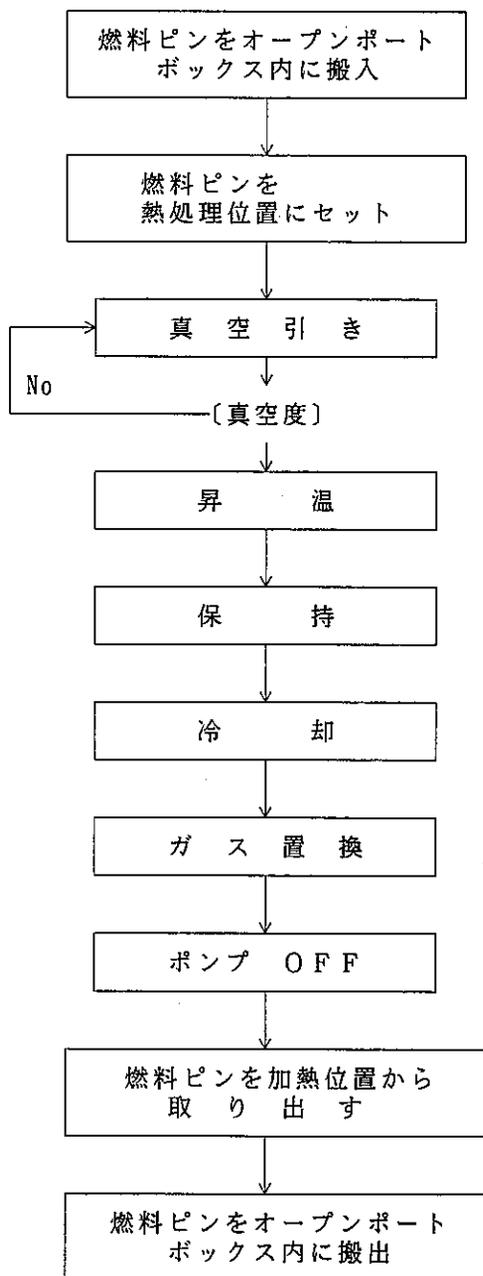


図-9 燃料ピンの熱処理工程フロー

IV. 装置性能試験

1. 真空排気試験

真空チャンバーの試料導入シール機構部に被覆管（φ6.5, φ6.86, φ7.5）を取り付けそれぞれ規定時間内（60分以内）で、規定真空度（ $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ ）になることを確認した。その結果を表-8に示す。

表-8 規定真空度になるまでの時間

シール部被覆管の径 (mm)	$1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ になるまでの時間 (分)
6.5	45
6.86	40
7.5	42

表-8の結果から、被覆管の径がどの場合も60分以内に規定真空度に達しているため、真空排気系の性能は設計時の目標を満足するものである事が確認できた。

2. 加熱試験

装置の加熱試験においては、プログラムのコントロール機構（昇温、保持、降温）が確実に作動するかどうか、又放射温度計により実際熱処理部にかかっている温度を正確に測定できるかどうかの確認を行った。

加熱位置には、熱電対を取り付けた被覆管（φ6.5, φ6.86, φ7.5）をセットし、プログラムコントローラーには、各温度3分間の保持時間で、100℃おきに500℃から1000℃まで昇温して、次に1000℃から700℃まで降温するというプログラムを入力し試験を行った。尚、各温度における保持時間が0分、1分、2分、3分の時の温度の保持状態も確認した。

加熱部の温度測定は、図-10の様に被覆管に取り付けた熱電対と放射温度計により行い、放射温度計の放射率は熱電対で測定した加熱部の温度が800℃の時に校正した。図

-11, 12, 13に, 加熱試験の結果をグラフにしたものを示す。

また, 表-9には試験で用いた熱電対の性能試験データを示す。

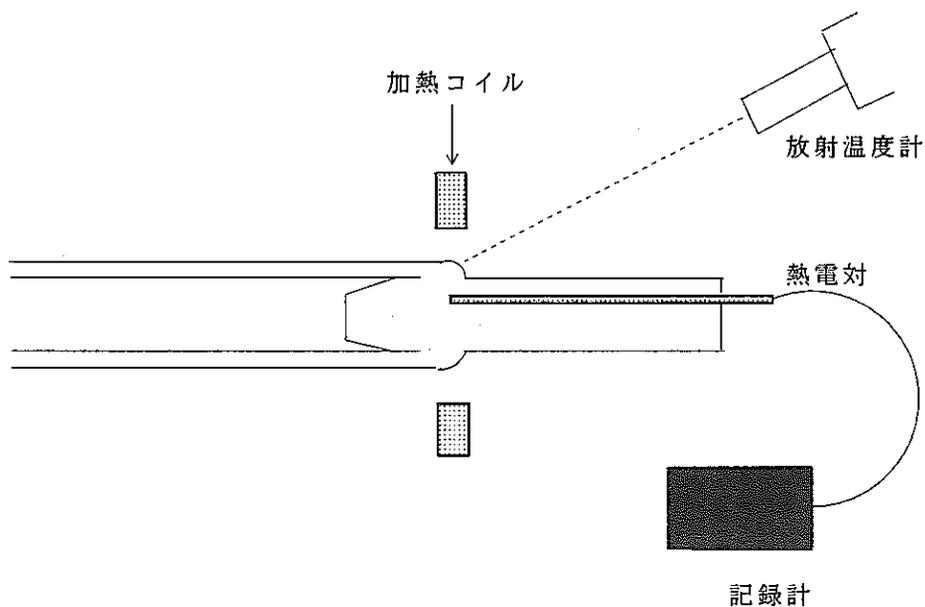


図-10 加熱部温度の測定方法

表-9 熱電対の性能試験データ

測定温度	600℃		700℃		800℃	
	基準値 (mV)	許容差 (℃)	基準値 (mV)	許容差 (℃)	基準値 (mV)	許容差 (℃)
	24.962	±4.5	29.128	±5.2	33.277	±6.0
熱電対	測定値 (mV)	誤差 (℃)	測定値 (mV)	誤差 (℃)	測定値 (mV)	誤差 (℃)
	24.861	-1.0	29.074	-1.3	33.228	-1.2

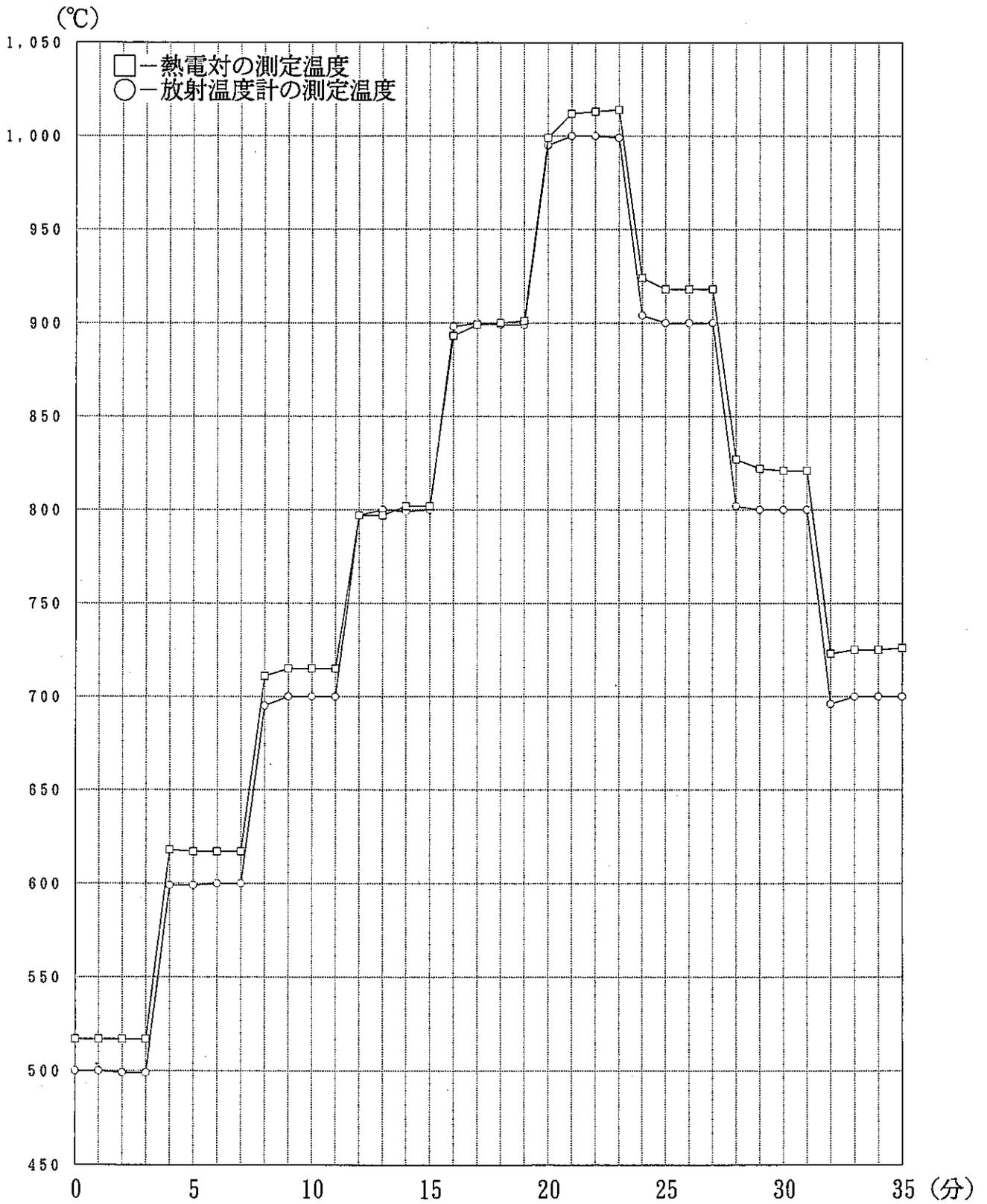


図-11 加熱試験結果 (φ6.5mm)

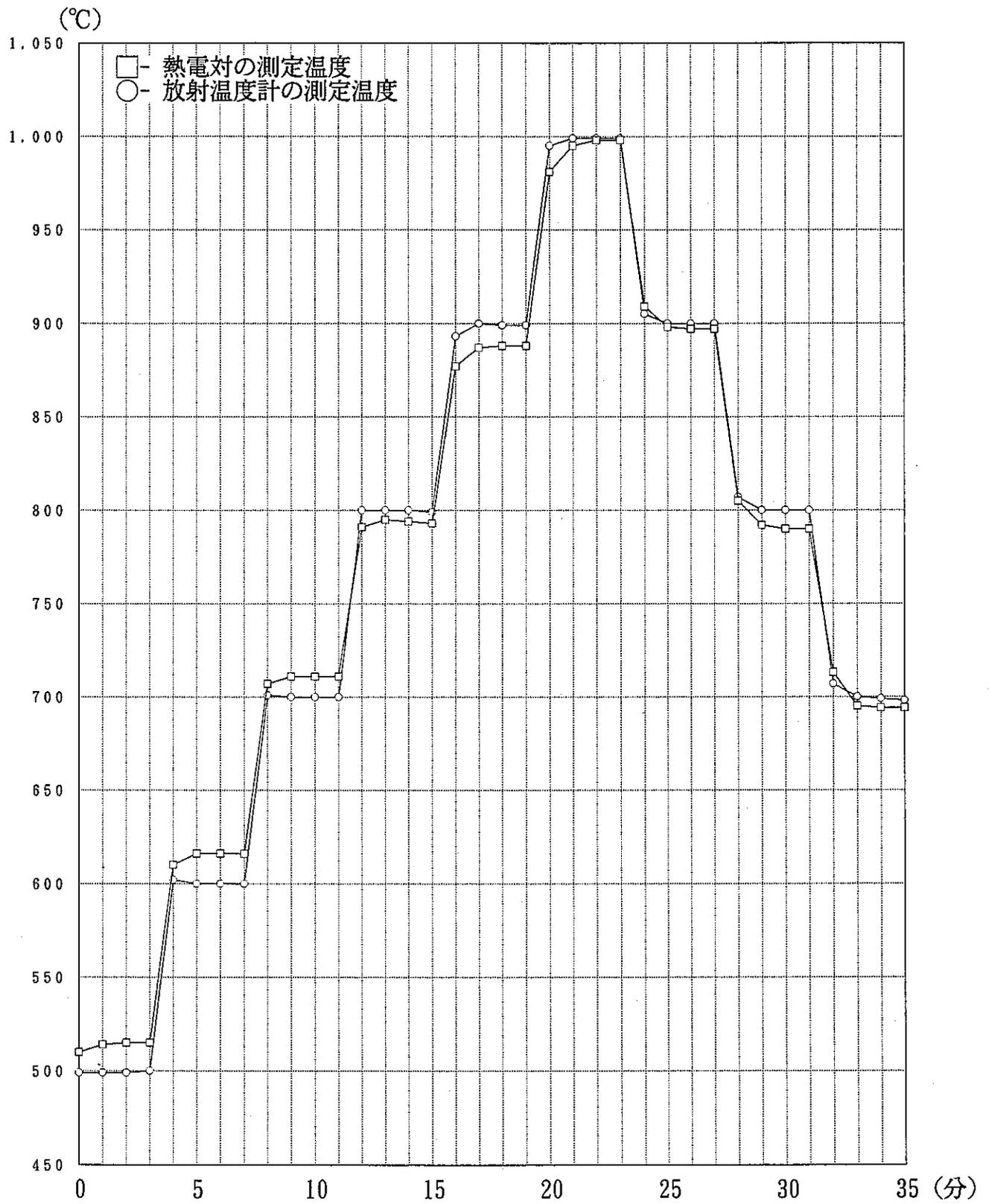


図-12 加熱試験結果 (φ6.86mm)

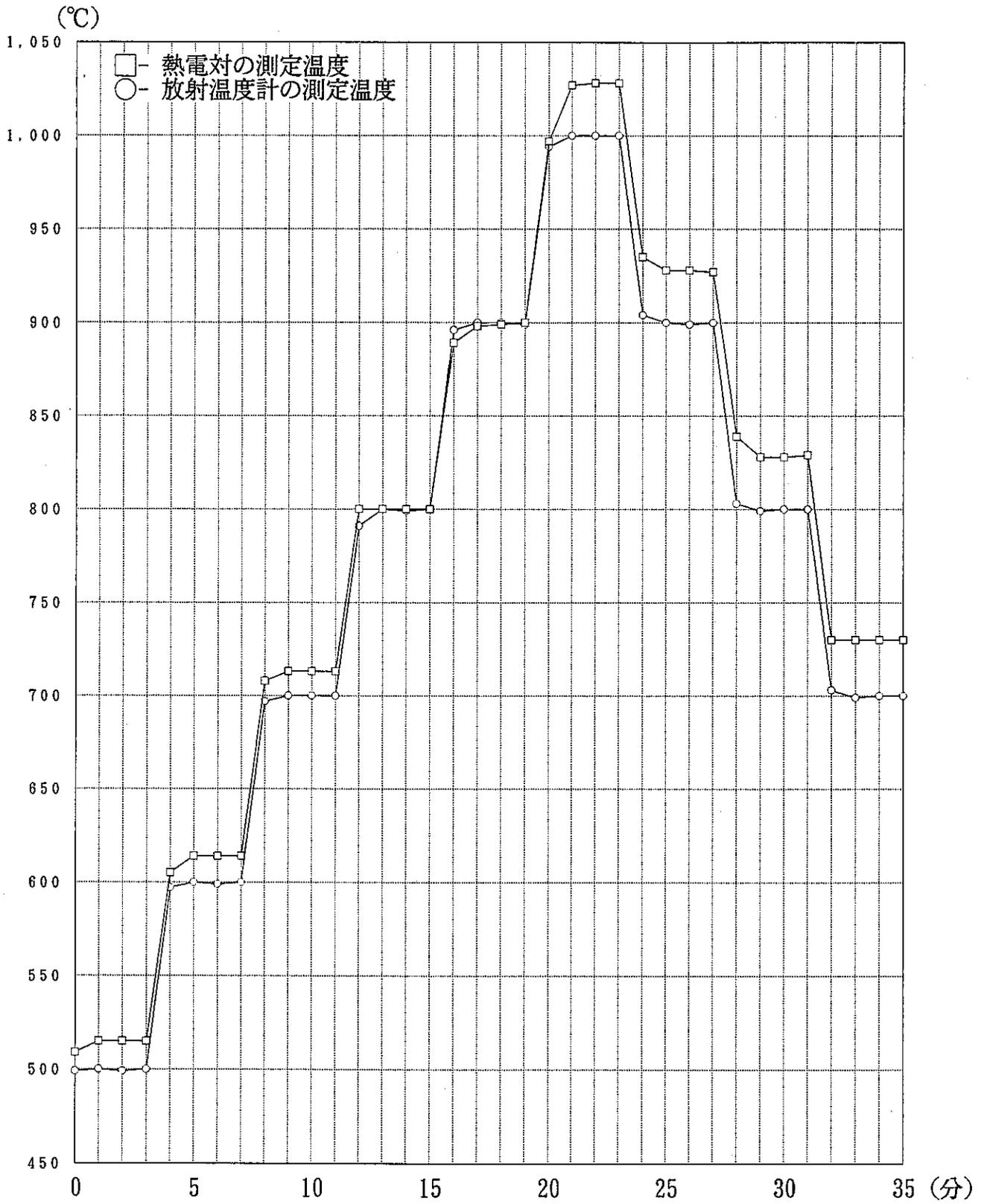


図-13 加熱試験結果 (φ7.5mm)

この試験において、放射温度計の測定温度は、プログラムで設定された加熱温度に対し、最大で9℃のずれを生じるが、3分間保持した後の測定値の誤差は、どの設定温度に対しても1℃以内の差しかなく、ほぼ設定値通りの温度変化を示していることから、プログラムは設定通りに作動している事が確認できた。

次に、図-11, 12, 13において放射温度計と熱電対の温度の読みについて見てみる。これによると、放射温度計は一点校正式（放射温度計の放射率は熱処理温度が800℃の時に校正してある）である為、その校正した温度以外においては、放射温度計と熱電対の間で測定温度のバラツキが見られる。

また、降温時においては放射温度計と熱電対の測定温度の間で、バラツキが大きくなる。この原因については、1000℃もの高温の加熱により、金属の表面状態に微妙な変化が現れ放射温度計の感知温度に影響を与える事が考えられる。（実際の熱処理においては、約800℃程度の温度で加熱するためこのような影響はない。）

これらの事から、昇温段階において放射温度計の放射率を合わせた温度においては、その温度を放射温度計の測定精度内の誤差（±5℃）で読みとれるが、それ以外の温度においては、放射温度計の測定温度に誤差を生じてしまう事が分かった。

3. 試料の設定位置試験

本試験は、試料を加熱コイルに設定する場合どの程度の設定誤差で制御すればよいかという事を確認する試験である。試験は、図-14の様に長さ方向（X方向）をパラメータにとり、被覆管のビード部の中心がコイルの中心にくる部分を原点（0点）とし、そこから±1mm, +2mmの位置に被覆間をノギスで測定しながら移動し、その時の温度を図-10と同様に被覆管に取り付けた熱電対により読み取った。尚、試験条件は、IIの1項、図-2より算出した750℃とし、放射温度計の校正も750℃により行った。又、被覆管を移動した際、加熱出力に変化が出ないように放射温度計のセット位置を溶接ビード部の中心になるよう調整した。

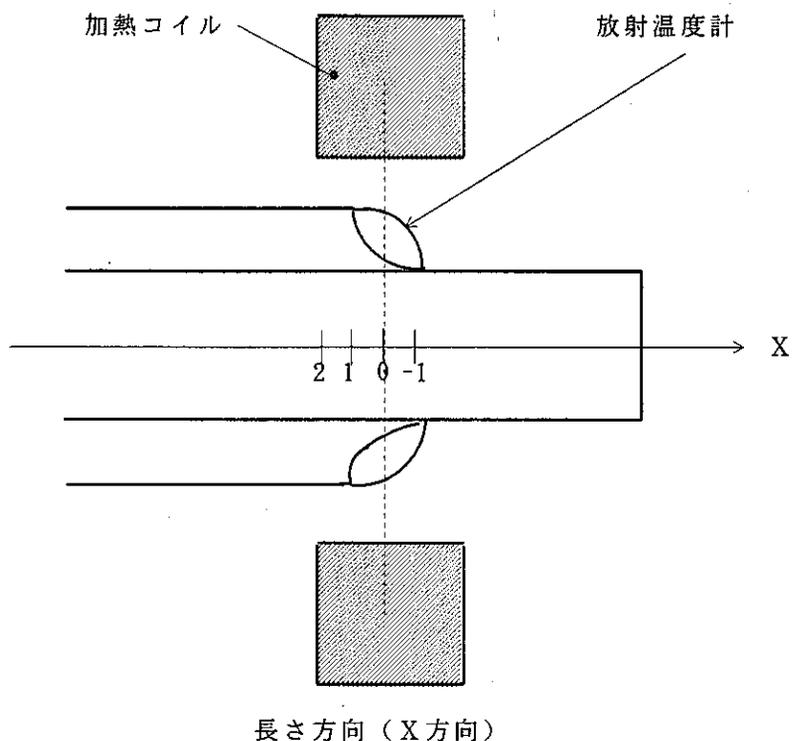


図-14 試料の設定位置試験の方法

表-10 試料の設定位置試験結果

設定位置 (mm)	- 1	0	1	2
放射温度計 (°C)	750	750	750	750
熱電対 (°C)	782	750	757	762

各設定位置において、放射温度計と熱電対の測定温度に差が見られたが、この原因については、コイルに対する試料の設定位置を変えることにより、コイルと被覆管のギャップが変化し、熱処理部にかかるパワーに違いが出て温度差を生じるという事が考えられる。又、- 1 mmの位置において放射温度計と熱電対の測定温度の間に32°Cの大きな差が見られた。これは、放射温度計の視野範囲にコイルの一部が入ってしまったためこのように放射温度計の感知温度が低くなったと思われる。

4. 放射温度計の温度測定位置試験

本試験は、試料に対する放射温度計の温度測定位置の設定誤差が、放射温度計の感知温度にどの程度影響を及ぼすのかを確認する試験である。放射温度計の温度測定位置は、図-15の様に設定し、加熱温度は、IVの3項と同様の750℃とし、加熱部温度の測定は①の位置で試料が750℃の状態で作成した放射温度計と熱電対により行った。

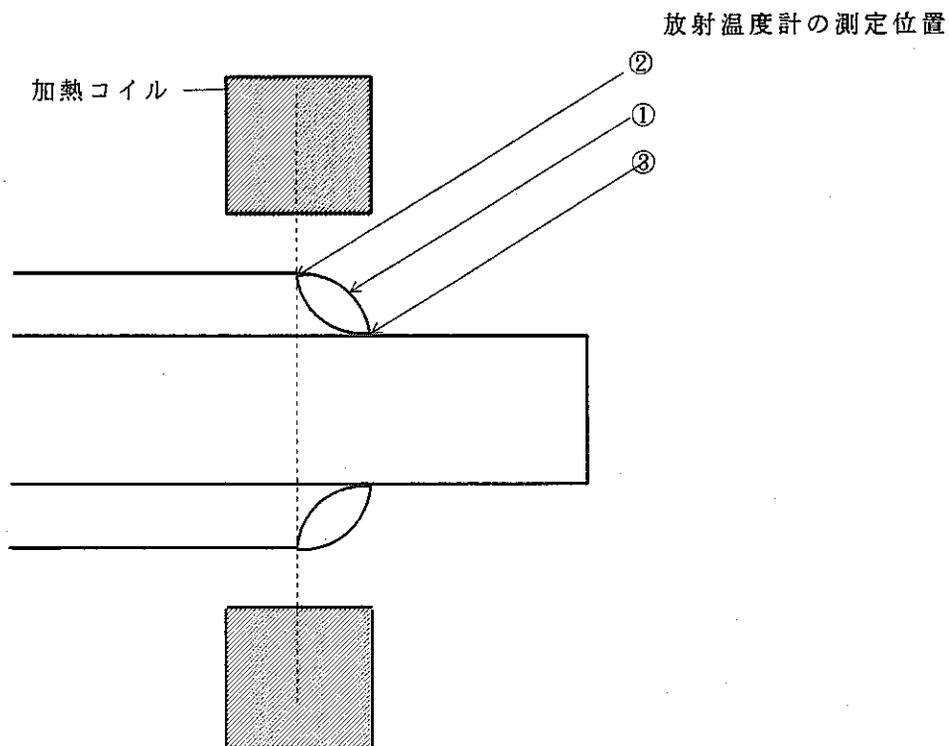


図-15 放射温度計の温度測定位置試験の方法

表-11 放射温度計の温度測定位置試験結果

設 定 位 置	①	②	③
放射温度計 (°C)	750	750	750
熱電対 (°C)	748	763	733

この試験において、放射温度計と熱電対の測定温度の間に最大17℃の温度差が見られた。これは、放射温度計の当たる部分の形状の変化によって放射温度計の感知温度が大きく変わってしまう事を意味する。(②の位置では放射率が低く、加熱部に設定温度よりより高い温度がかかり、③の位置では放射率が高いため低い温度がかかると思われる。)

5. 円周方向の温度分布試験

熱処理時に被覆管の円周方向の温度分布がどの様になるのかを図-16の様に被覆管に取りつけた熱電対が真上にくる位置を原点(0°)とし、その位置から約90°間隔で目視にて試料を回転し、熱電対による温度測定により確認した。尚、加熱温度はIVの3項と同様の750℃とし実施し、表-12にはその結果を示す。

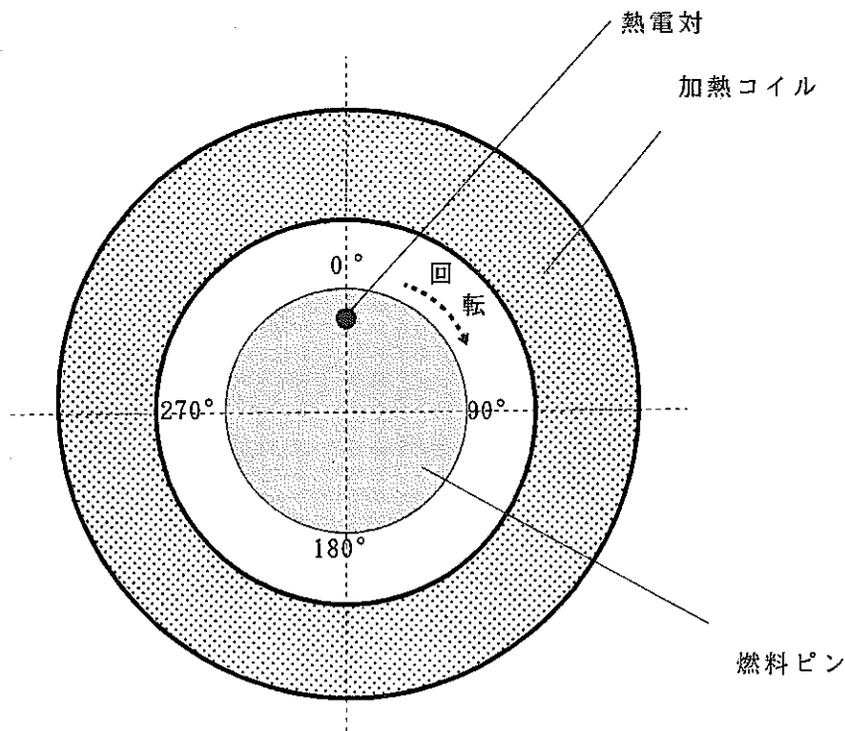


図-16 円周方向の温度分布試験の方法

表-12 円周方向の温度分布の試験結果

設定位置 (°)	0	90	180	270
放射温度計 (°C)	750	750	750	750
熱電対 (°C)	750	752	753	753

この結果から、実際に熱処理部にかかる温度（熱電対の測定温度）は、設定温度に対してどの位置でも、3℃以内の誤差範囲に納まっている事が確認され、試料の円周方向の温度分布は、ほぼ均一になっている事が分かった。

6. 真空チャンバーの表面温度の確認

真空チャンバーに接触温度計を取り付け、その表面温度の測定を行った。その結果、表面温度は、ほぼ室温と同じ22℃となり、誘導加熱による真空チャンバーへの温度影響は、ほとんどない事が確認された。

7. 装置性能試験まとめ

性能試験で、装置の真空度及び加熱時の試料の温度分布は、当初の設計通りになっている事が確認された。ところが、以下の事柄については問題があったため、それらについて考察した。

(1) 加熱試験において、昇温時の熱処理温度（放射率を校正した温度）は放射温度計によりその測定誤差（±5℃）内で測定できたが、昇温時の800℃以外の温度及び降温時の各温度では放射温度計の測定精度を上回る誤差を生じた。

しかし、実際の熱処理においては、熱処理する温度のみを正確に測定できれば良く、この様な放射温度計の測定誤差は問題とならない。

(2) 試料のコイルへの設定位置の違いにより熱処理部にかかる温度に差が生じた。

これは試料の各設定位置により、試料とコイルのギャップが変化する事によると思われる。又、放射温度計の測定位置の違いによっても熱処理部にかかる温度に最大17℃の差が見られた。これは放射温度計の当たる位置によってその表面の形状が大きく変

わってしまうことが原因であると思われる。これらの事から、コイルへの試料の設定においては熱処理部がコイルの中心にくる様に、又、放射温度計の温度測定位置の設定はビード部の中心にあたる様十分注意して行う必要がある。さらに、放射温度計の温度測定位置を定量的に把握できる様な改良が必要であると思われる。

- (3) 放射温度計の感知温度に影響を及ぼすと思われるのが溶接ビード部の形状や光沢の違いである。⁸⁾ 材質が同じであっても、試料によって溶接ビード部の形状や光沢は微妙に異なるため、これらが放射温度計の測定温度にどの程度影響してくるのか、また影響があった場合それらをどの様に保証して行くか今後の検討が必要である。

V. 試料熱処理能力の確認

1. 熱処理試験

溶接部局部熱処理装置により、高強度F/M鋼製の端栓と被覆管を溶接した試料の熱処理を行い、溶接部の硬さがどの程度軟化するかを確認した。熱処理条件は、Ⅱの2項で述べた様に熱処理温度750℃、保持時間10分で行った。また熱処理試験は、被覆管の径φ6.5、φ6.86、φ7.5の3種類について実施した。その際の熱処理部温度の記録チャートを図-17、18、19に、ビッカース硬さ測定データを図-20、21、22に示す。尚、この試験に用いた材料は、61FK材（母材硬さ 265Hv）である。

その結果、熱処理以前の最高硬さは600Hvであったのに対し、熱処理後の溶接部近傍硬さは、熱処理する被覆管径の違いにより差はあるが各試料共280~320Hvの硬さまで軟化しており焼き戻しによる大幅な硬度の軟化が見られ、本装置は材料の焼入れ硬化部の焼き戻しを行うのに十分な熱処理能力を有する事が確認された。

また、熱処理時の材料の加熱幅は、目視で約5mm程度であり、試料1本当りの熱処理時間は約50分であった。

2. 試料熱処理試験のまとめ

試料の熱処理試験において、本装置は試料の熱処理を行うのに十分な熱処理能力がある事を確認したが、今回行った熱処理試験の熱処理条件は、参考資料における計算値から導いたものであるため、今後の熱処理試験において、焼入れ硬化部を母材と同等の硬さまで焼き戻すのに最適な熱処理条件を見い出すと共に、その条件の下での焼き戻しの信頼性を確認してゆく事が課題である。

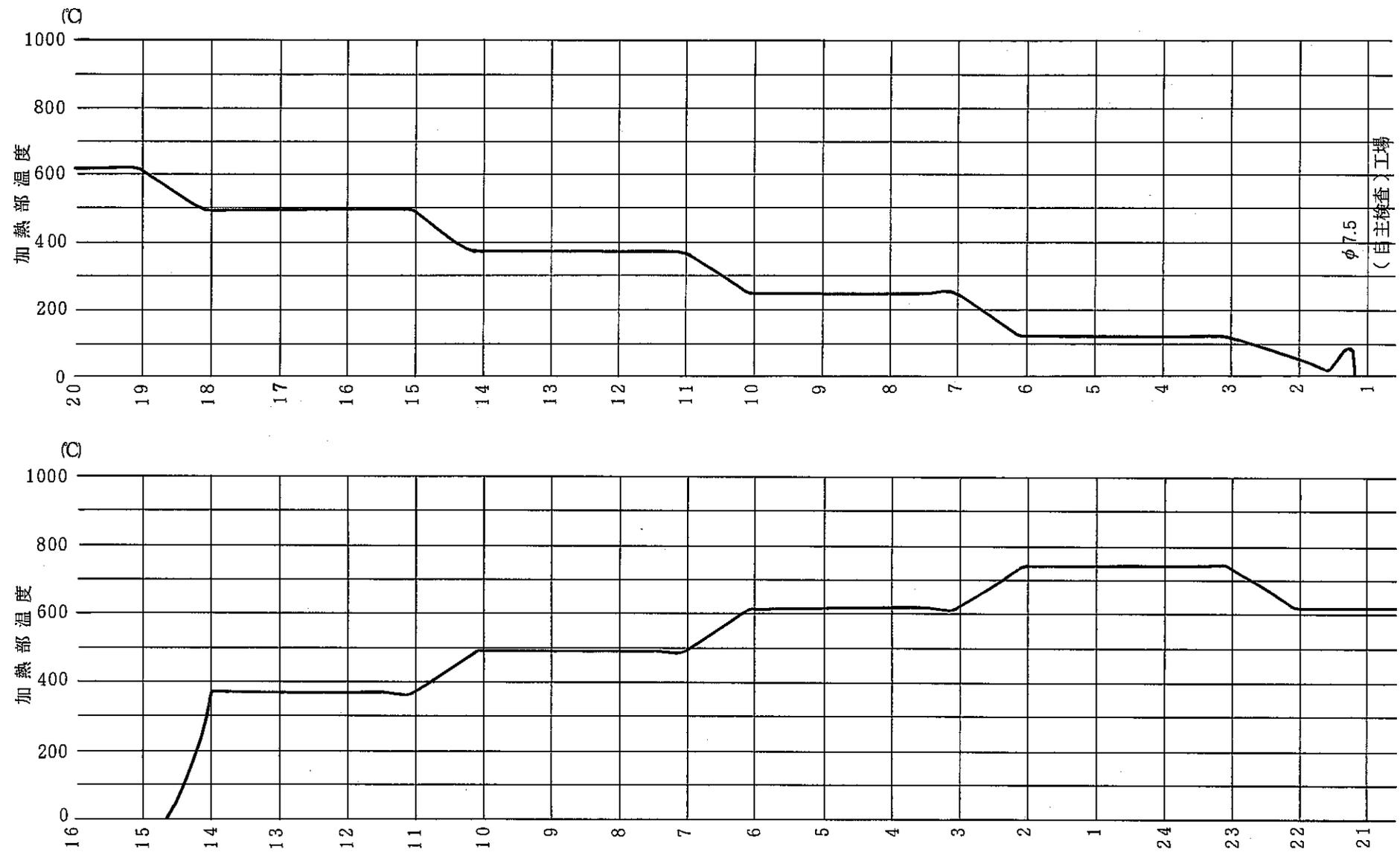


図-17 熱処理試験温度記録チャート (φ6.5mm)

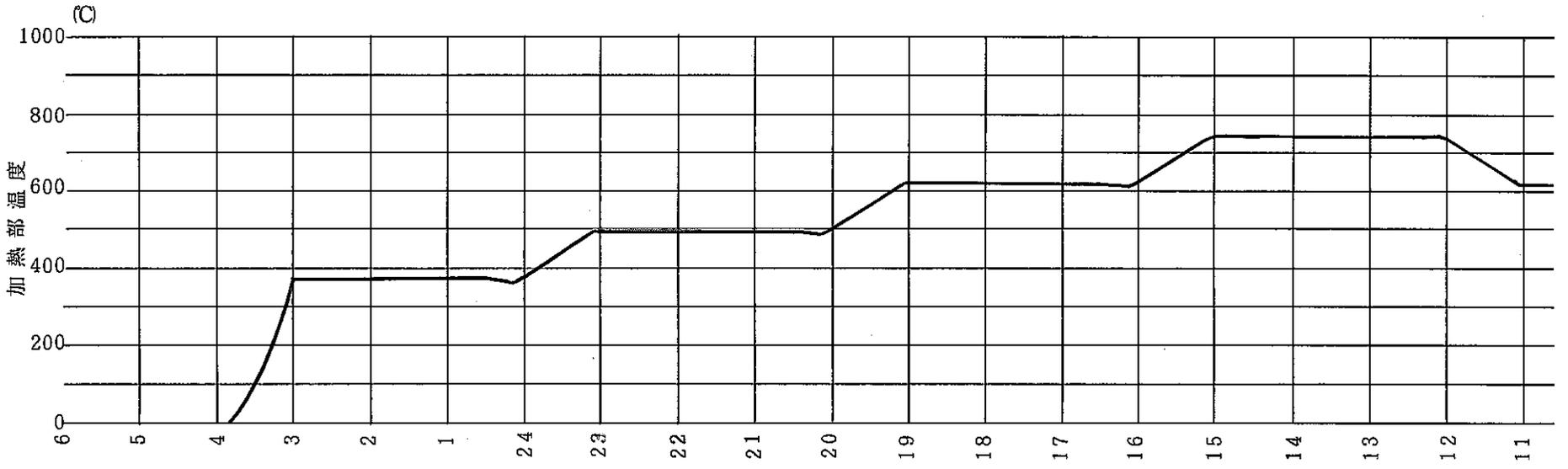
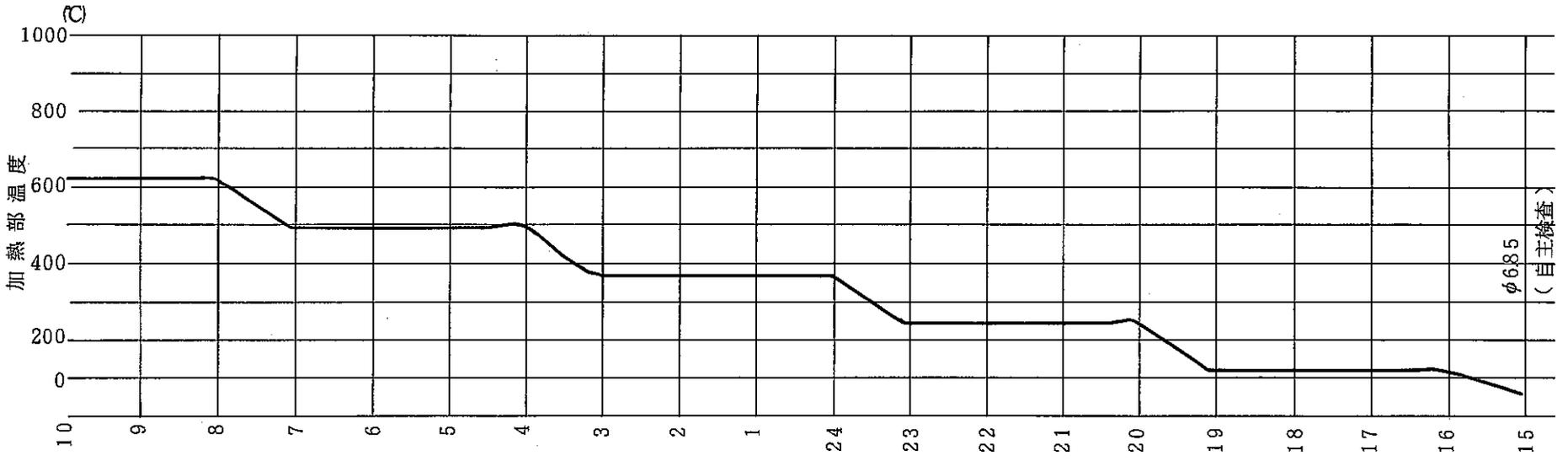


図-18 熱処理試験温度記録チャート (φ6.86mm)

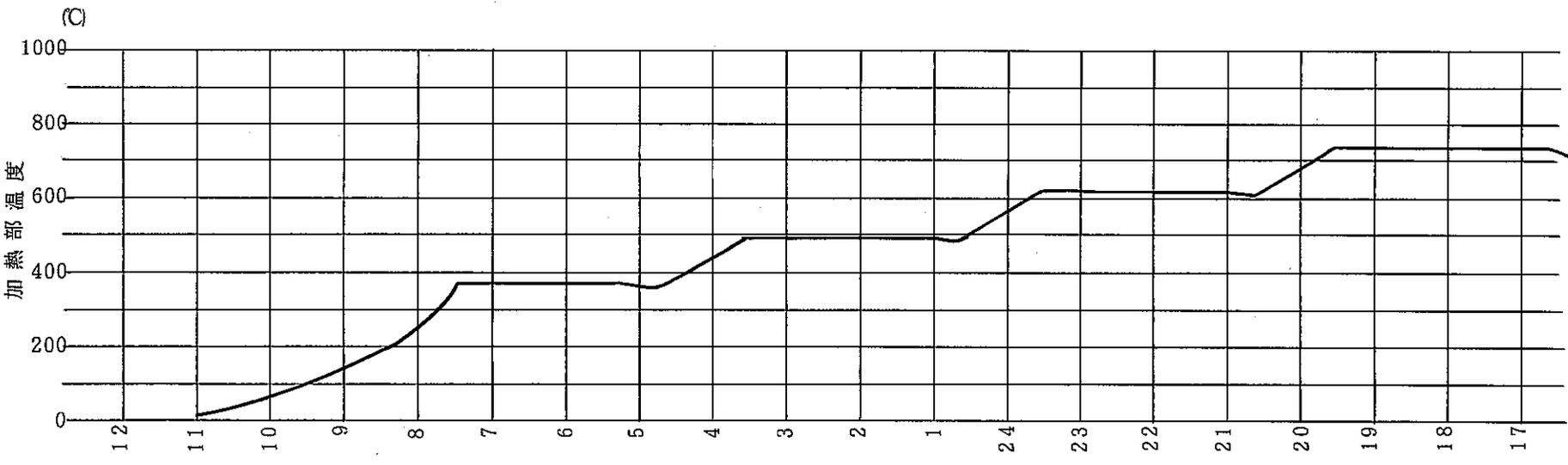
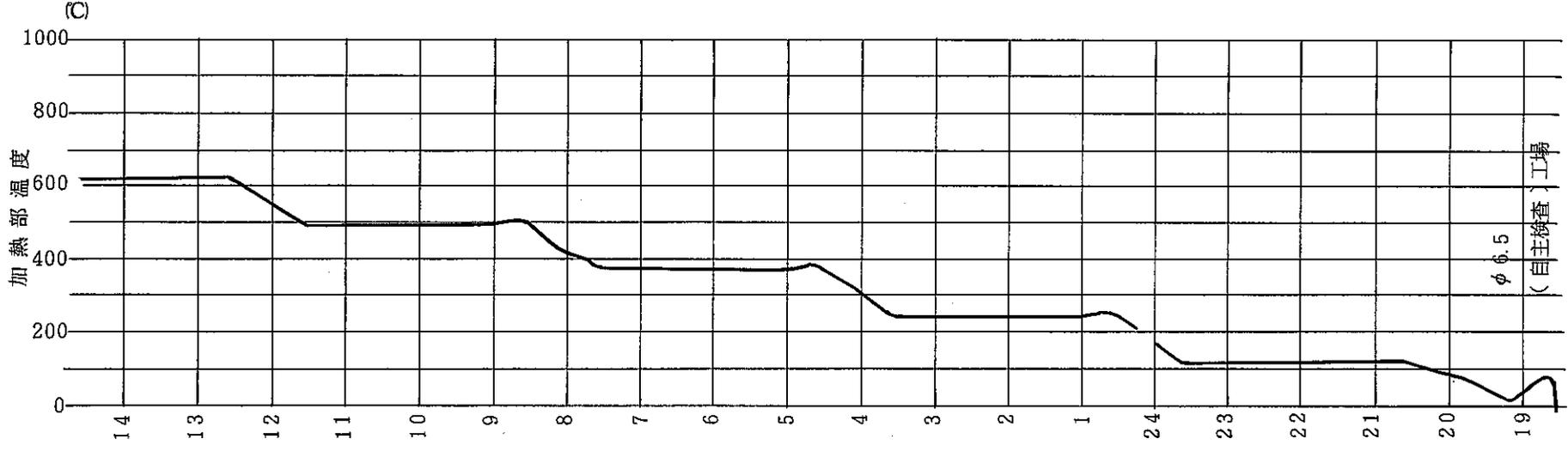


図-19 熱処理試験温度記録チャート (φ 7.5mm)

熱処理試験

高強度 F / M 鋼

熱処理条件	
熱処理温度	750℃
保持時間	10分
冷却時間	急冷
被覆管径	φ 6.5 mm
コイル内径	φ 8 mm

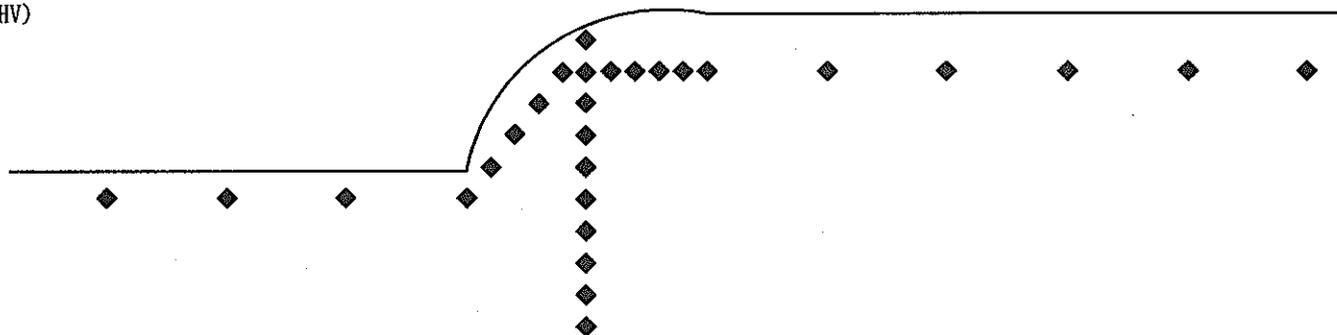
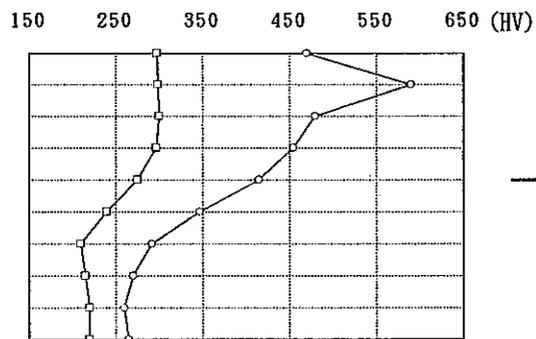
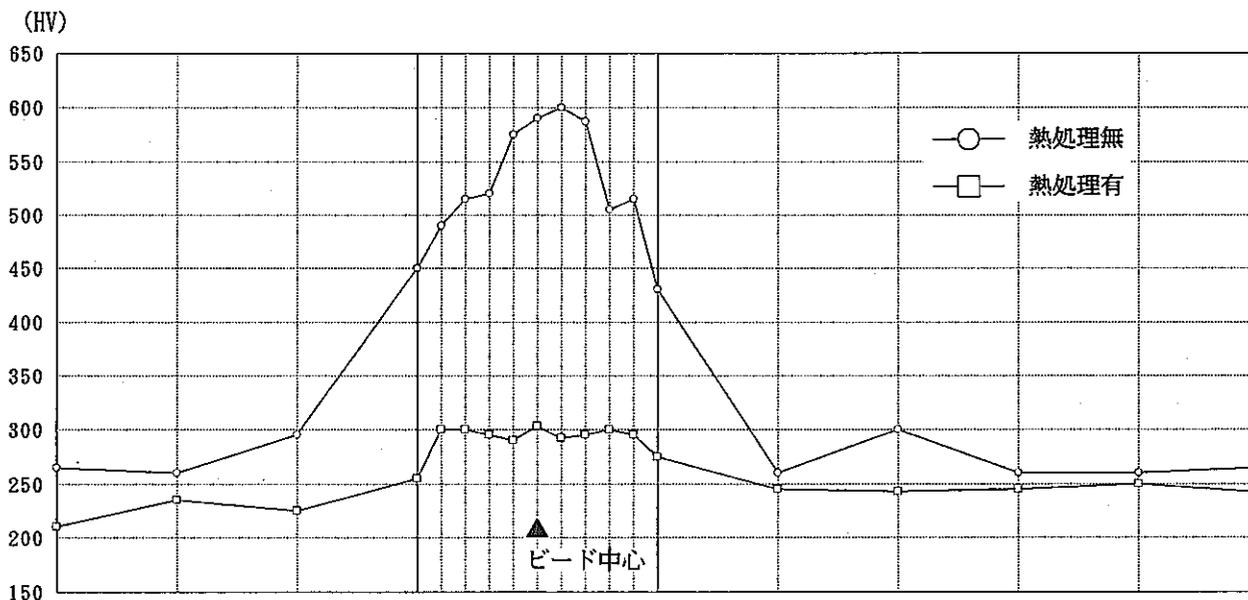


図-20 熱処理試験後の試料硬さ (φ 6.5mm)

熱処理試験

高強度 F / M 鋼

熱処理条件	
熱処理温度	750℃
保持時間	10分
冷却時間	急冷
被覆管径	φ6.86mm
コイル内径	φ8.5mm

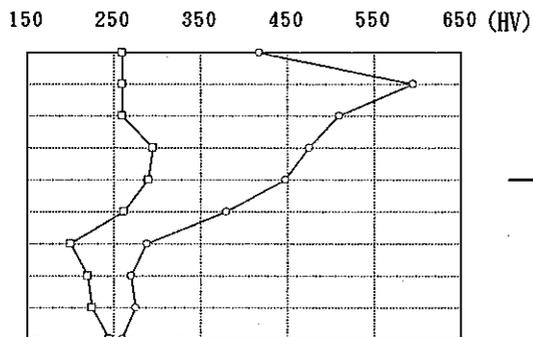
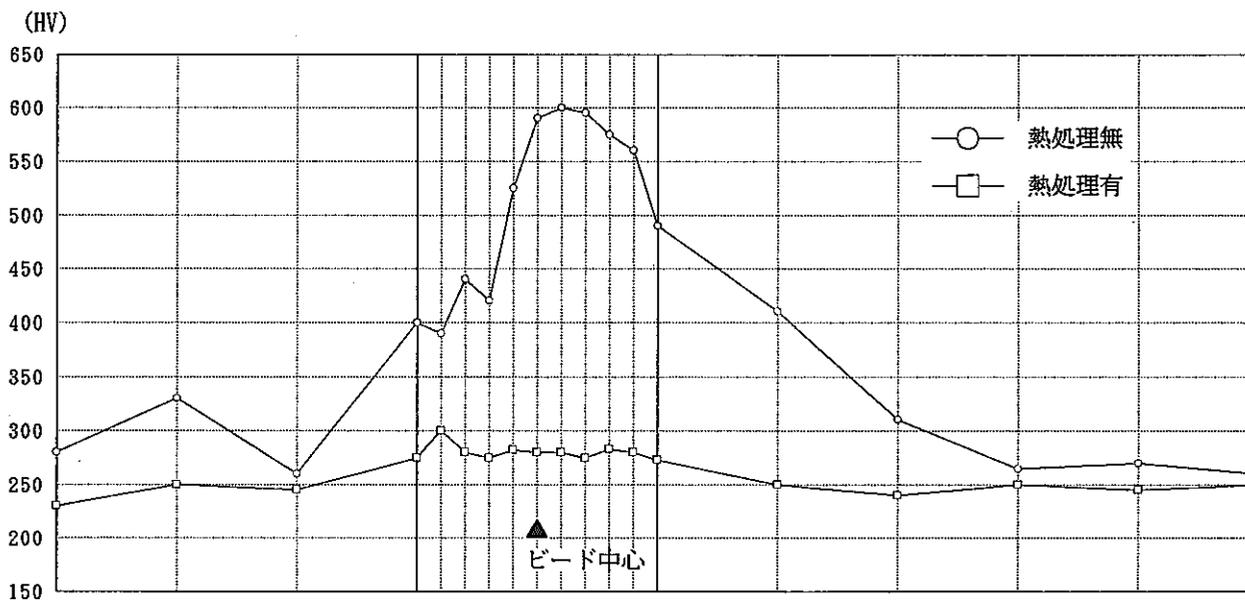


図-21 熱処理試験後の試料硬さ (φ6.86mm)

熱処理試験

高強度 F / M 鋼

熱処理条件	
熱処理温度	750℃
保持時間	10分
冷却時間	急冷
被覆管径	φ7.5mm
コイル内径	φ9mm

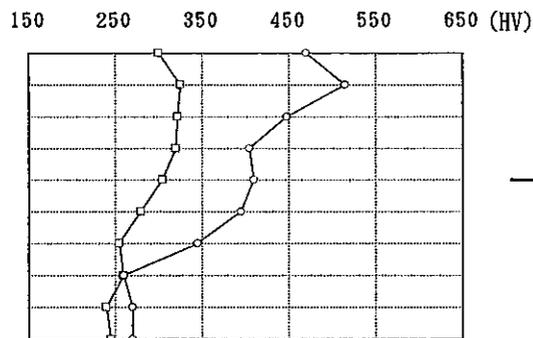
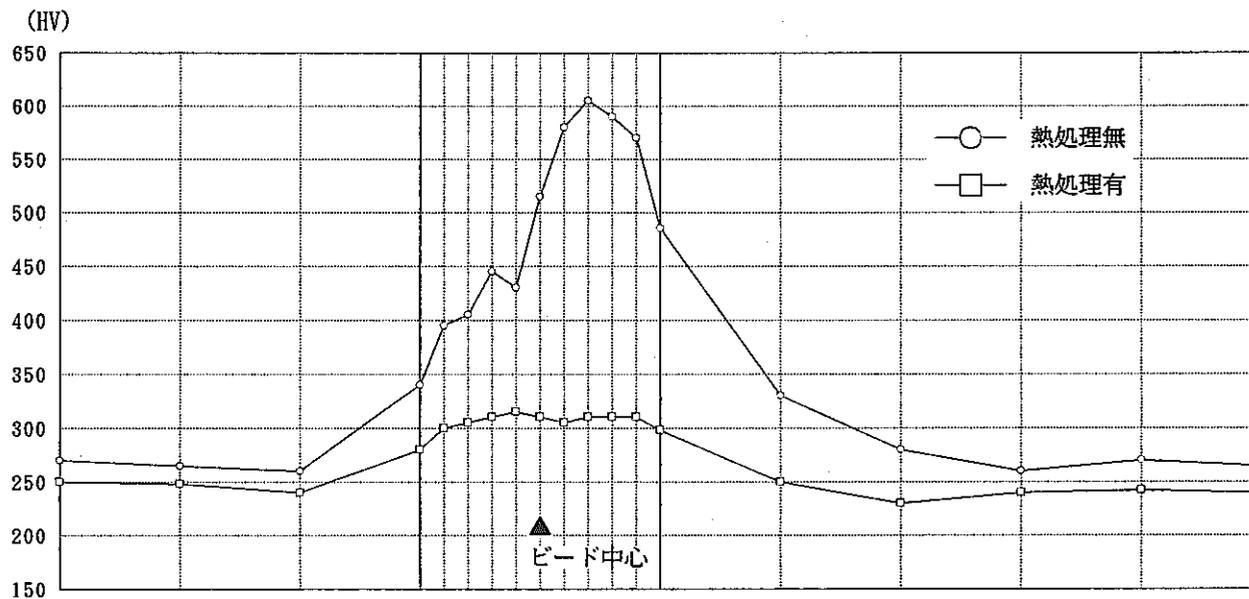


図-22 熱処理試験後の試料硬さ (φ7.5mm)

VI. ま と め

1. 装置性能試験

- (1) 真空排気能力は、設計値通りのものであった。
- (2) プログラムのコントロール機構（昇温、保持、降温）が、設定通りに作動することを確認した。
- (3) 放射温度計の放射率を校正した位置（放射温度計の校正は熱処理する温度で行う）で試料と放射温度計を固定しておいた場合には、放射温度計により熱処理部の温度をその測定誤差（±5℃）内で測定できた。
- (4) 加熱コイルに試料をセットする際、中心位置から約2mm程度ずらした場合は、熱処理部にかかる温度に10℃以上の誤差を生じた。
- (5) 放射温度計の感知温度は、放射温度計の当たる部分の形状の変化によって大きく変わる。
- (6) 4項及び5項より試料セット位置及び放射温度計のセット位置は、十分な注意が必要である。
- (7) 試料の円周方向の温度分布は、ほぼ均一な状態であった。
- (8) 試料加熱時の、真空チャンバーへの温度影響は殆ど無い事が確認された。

2. 熱処理試験

- (1) 溶接による焼入れ硬化部の最高硬さが600Hvであったのに対し、熱処理後の溶接部近傍硬さは、各試料共280~320Hvの硬さまで軟化しており、焼き戻しによる大幅な硬度低下が見られた。（熱処理に用いた材料は、母材硬さが265Hvの61FK材）
これより本装置は、材料の焼入れ硬化部の焼き戻しを行うのに十分な熱処理能力を有する事を確認した。
- (2) 熱処理時の試料の加熱幅は、約5mmで行える事を確認した。
- (3) 試料1本当りの熱処理時間は、約50分程度で行える。

VII. 今後の課題

1. 溶接ビード部の形状、光沢の違いによる放射温度計の測定温度誤差の把握と可能な限り誤差を少なくする測温方法の確立。
2. 1項における測定温度誤差の熱処理への影響の確認とその保証方法の検討。
3. 鋼の焼入れ硬化部を焼き戻すのに最適な熱処理条件を確立するために焼き戻し温度と機械的強度の関係を明確にするための試験の実施。
4. 最終的に決定した熱処理条件の信頼性の確認。

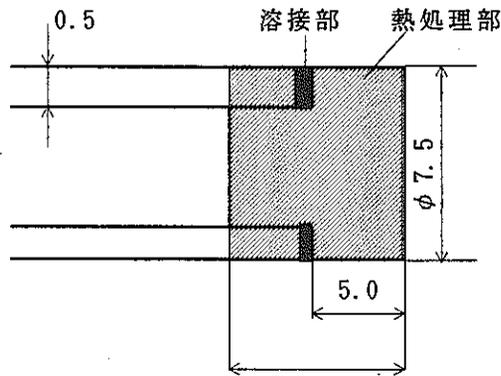
VIII. 参 考 文 献

- 1) 動力炉核燃料開発事業団委託研究成果報告書：フェライト系炉心材料（ラッパ管）の溶接施工法に関する試験研究（1989）
- 2) 日本金属学会編：金属便覧（丸善，1982）
- 3) 日本鉄鋼協会編：鋼の熱処理改訂5版（丸善，1969）
- 4) 長谷川正義監修：ステンレス鋼便覧（日刊工業新聞社，1975）
- 5) 電気学会編：新版電気工学ハンドブック（電気学会，1988）
- 6) 技能教育研究会編：技能指導熱処理作業（工学図書，1971）
- 7) 野田保・奥谷剛・斉藤弥八：真空技術マニュアル（産業図書，1980）
- 8) 計測技術研究会：新しい温度測定技術の開発と精度維持管理資料集（経営開発センター出版部，1980）

補足説明資料

1. 加熱能力の算定

誘導加熱される燃料棒の熱処理部のモデルを図-23に示す。



単位：mm

図-23 燃料棒の熱処理部のモデル

誘導加熱装置は、この熱処理部の温度を常温から1000℃近くまで、数10秒のオーダーで加熱できる能力を有すれば良いものとした。誘導加熱時の熱処理部の温度上昇は次式であらわされる。

$$C_p \cdot M \frac{dT}{dt} = Q_i - Q_{Los} \quad \dots \quad 1)$$

C_p : 燃料棒材の比熱 (Kcal/kg℃)

M : 熱処理部の質量 (kg)

T : 熱処理部の温度 (℃)

t : 加熱時間 (s)

Q_i : 誘導加熱による発熱量 (Kcal/s)

Q_{Los} : ふく射による放熱損失 (Kcal/s)

ここで、以下の仮定を置いている。

- ・熱処理部は小さく、加熱時の温度分布を特に問題としないので、一点集中定数原として取り扱う。(熱処理部形状：直径7.5mm 長さ：10.0mmの円柱とする。)
- ・真空中に置かれているため、熱処理部からの放熱は、ふく射によるもののみとする。(熱伝導による温度変化部は、熱容量側に入れて計算する。)

今、計算条件として、以下の値を用いる。

熱処理部直径 $D = 7.5$ (mm)

熱処理部長さ $l = 10.0$ (mm)

被覆管肉厚 $d = 0.5$ (mm)

熱処理部密度 $\rho = 7800$ (kg/m³)

熱処理部比熱 $C_p = 0.11$ (Kcal/kg°C)

ステファン・ボルツマン定数 $\sigma = 4.88 \times 10^{-8}$

周囲の温度 $T_x = 20$ (°C)

熱処理部初期温度 $T_0 = 20$ (°C)

熱処理部最高温度 $T_{MAX} = 1000$ (°C)

さて、ここでまず熱処理部から燃料棒へ熱伝導で伝わる熱量について考える。(図-24参照)

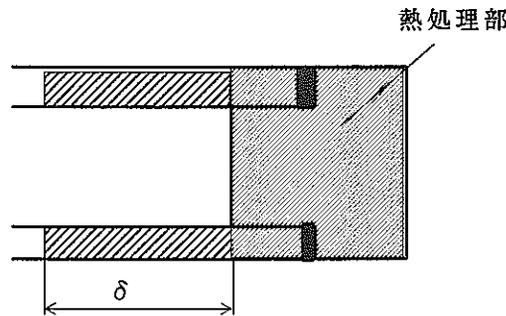


図-24 熱伝導で温度が変化する燃料棒被覆管部分の長さ δ

加熱時間中(10~数10秒)に熱伝導で温度が変化する燃料棒被覆管部分の長さ δ は次式で表される。

$$\delta = (12\alpha t)^{1/2} \dots 2)$$

α : 温度伝はん率 (m²/s)

t : 加熱時間 (s)

温度変化する領域の被覆管の質量 M_c は

$$M_c = \rho \pi D d \delta$$

で表され、これを熱処理部質量に加えて、熱容量を増加させ、熱伝導の効果を表すものとする。すなわち、

$$C_p M = C_p \rho (\pi / 4 \cdot D^2 l + \pi D d \delta) \quad \dots \quad 3)$$

次に、誘導加熱装置の必要能力を計算する。

(1) ふく射による放熱損失

ふく射による放熱損失は、被加熱部温度が最大値の1000℃になっていると仮定して計算する。すなわち、加熱開始時における被加熱部温度が1000℃より低い状況でも1000℃の場合の放熱量を採用する。

$$Q_{\text{Los}} = \sigma A [(T_{\text{MAX}} + 273)^4 - (T_x + 273)^4]$$

ここで、 A はふく射による放熱面積で、以下のように求まる。

$$\begin{aligned} A &= \pi / 4 \cdot D^2 + \pi D (1 + \delta) \\ &= \pi / 4 \cdot (0.0075)^2 + \pi \times 0.0075 \times [0.01 + (12 \times 4.4 \times 10^{-6} \times 10)^{1/2}] \\ &= 8.21 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned} Q_{\text{Los}} &= 1.36 \times 10^{-11} \times 8.21 \times 10^{-4} \times [(1000 + 273)^4 - (20 + 273)^4] \\ &= 0.0292 \text{ (Kcal/s)} \\ &= 105 \text{ (Kcal/H)} \\ &= 0.122 \text{ (Kw)} \end{aligned}$$

(2) 熱容量

3) 式により

$$\begin{aligned} C_p M &= C_p \rho (\pi / 4 \cdot D^2 l + \pi D d \delta) \\ &= 7800 \times 0.11 \times [\pi / 4 \cdot (0.0075)^2 \times 0.01 + \pi \times 0.0075 \times 50 \times 10^{-4} \\ &\quad \times (12 \times 4.4 \times 10^{-6} \times 10)^{1/2}] \\ &= 6.12 \times 10^{-4} \text{ (Kcal/}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

(3) 昇温に必要な発熱量

1) 式により

$$C_p \cdot M \frac{dT}{dt} = Q_i - Q_{\text{Los}}$$

$$C_p \cdot M \frac{T_{\text{MAX}} - T_0}{t} = Q_i - Q_{\text{Los}}$$

$$Q_i = Q_{\text{Los}} + C_p \cdot M \frac{T_{\text{MAX}} - T_0}{t}$$

$$= 0.0292 + 6.12 \times 10^{-4} (1000 - 20) / 10$$

$$= 0.0892 \text{ (Kcal/s)}$$

$$= 321 \text{ (Kcal/h)}$$

$$= 0.373 \text{ (KW)}$$

(4) 誘導加熱装置の能力(出力)

誘導加熱による発熱量 Q_i は、ステンレス鋼の場合、誘導加熱装置出力 E の60%程度である。すなわち、

$$Q_i = 0.6 E$$

$$E = Q_i / 0.6$$

$$= 0.373 / 0.6$$

$$= 0.622 \text{ (KW)}$$

余裕をみて、誘導加熱装置の出力として、約1KW有れば、10秒間で1000℃まで熱処理部の温度を上昇させることができる。

(5) 誘導加熱装置出力に対する熱処理部の温度上昇

前節の1)式を用いて、誘導加熱装置出力 E に対する燃料棒熱処理部の温度上昇を計算する。1)非線形常微分方程式ゆえ数値計算により解を求めた。その結果を図-25に示す。約0.4Kwの出力で、10秒間に1000℃迄上がる事が分かる。(前節では簡単な手計算の結果を示したので、数値計算とは必ずしも一致しない。)

本試験からも、約1Kwの加熱能力が有れば十分と考えられる。

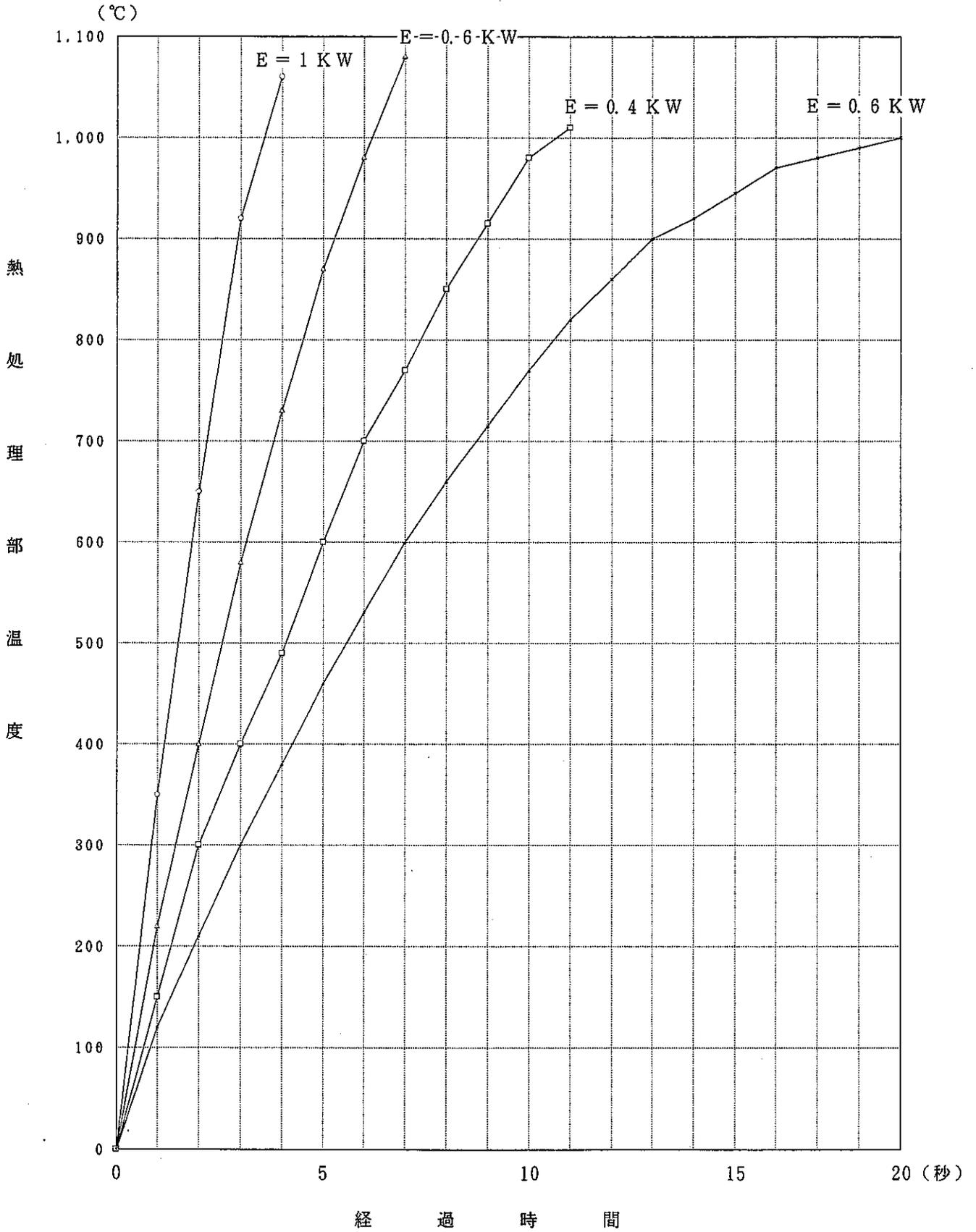


図-25 誘導加熱装置出力Eを変化した場合の熱処理部の温度上昇曲線 (計算値)

2. 冷却能力の算定

(1) 燃料ピン溶接部の誘導加熱後の冷却について、以下に検討する。

冷却方法として、

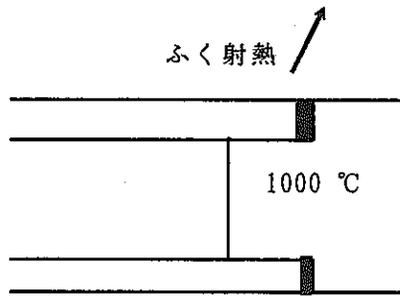
- ① 不活性ガス（Ar）等を加熱部に吹き付けるガス冷却法
- ② 冷し金を燃料棒に接触させる接触冷却法

等が考えられる。これらの方法を用いた場合の冷却曲線について、計算により検討する。

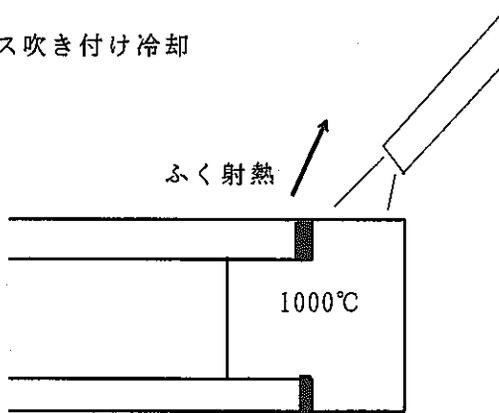
(2) 計算モデル

冷却計算に用いた燃料ピン端部のモデルは、図-23と同様のものである。また、図-26には検討した冷却方法の模式図を示す。

①放射冷却のみ



②放射冷却+アルゴンガス吹き付け冷却



③放射冷却+冷し金

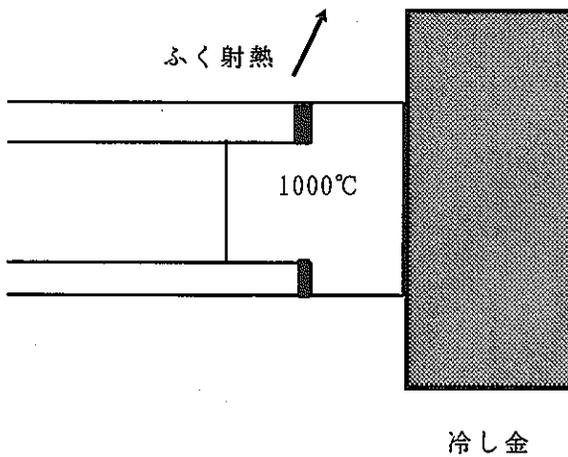


図-26 検討した冷却形態

①は、熱処理部を1000℃まで加熱した後、真空中にそのまま放置した状態を示す。
この時は、加熱部から周囲物体へ熱放射により自然冷却する。

②は、ノズルより不活性ガス（Ar）を加熱部に吹き付け強制空冷する場合で、この時の伝熱形態としては、熱ふく射とガスの対流熱伝達が共存する。

③は、端栓の側面に冷し金（銅）を接触させて冷却する場合で、この時は、熱伝導とふく射により冷却される。

(3) 冷却能の計算

計算は、熱伝導解析コード、HEATING-IIIを用いて実施した。（図-27参照）
計算条件として、以下の事柄を仮定した。

- ・燃料ピンの被覆管、端栓とも、材質は、SUS304として熱物性値は次の値を用いた。

密度 (Kg/m ³)	7800
比熱 (Kcal/Kg℃)	0.11
熱伝導率 (Kcal/mh℃)	14

- ・熱処理部は初期において1000℃一様に保たれているものとする。
- ・燃料棒表面の熱放射率は0.7とする。
- ・Arガス冷却時のガス冷却熱伝達率は、平均値として約50Kcal/mh℃と仮定する。
- ・冷し金としては、銅を用いる。冷しがねが端栓側面に接触したときの接触抵抗は無いものとする。
- ・冷し金の温度上昇は、計算上10℃程度なので、常温より10℃高い30℃温度一定の冷し金とした。

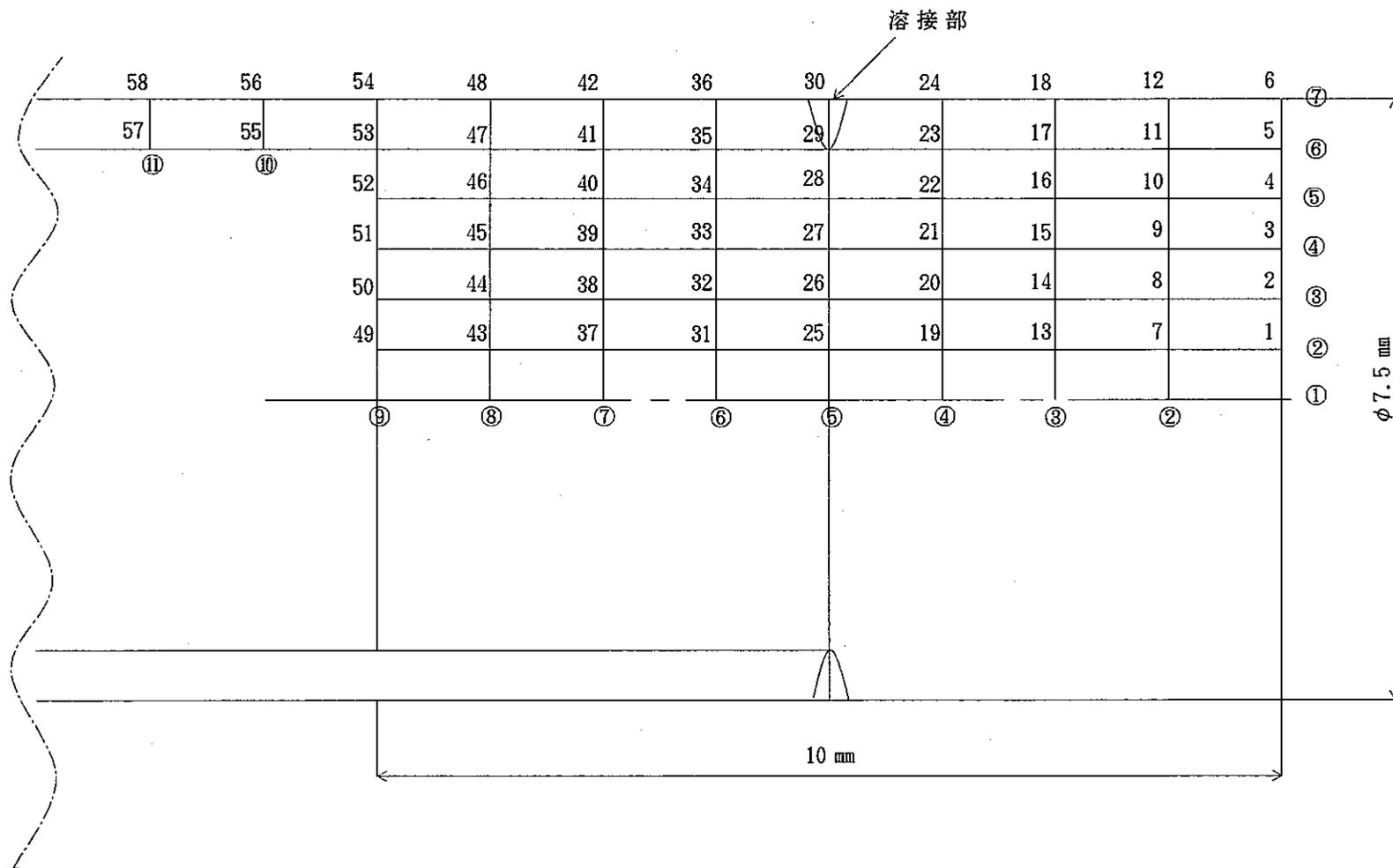


図-27 HEATING-Ⅲ熱伝導計算で用いた要素分解
(メッシュの座標番号と接点番号)

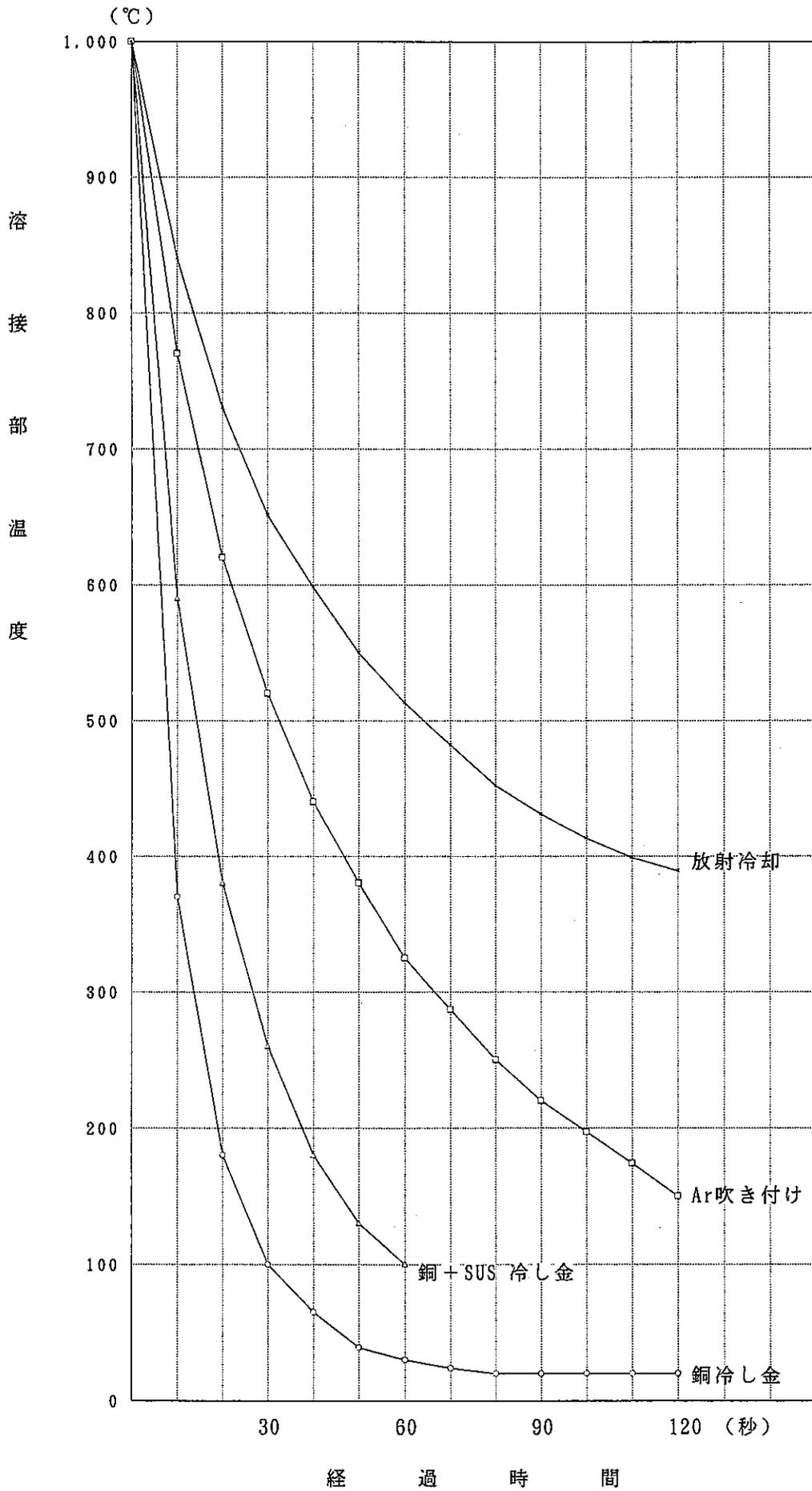


図-28 熱処理部冷却曲線

－冷し金の上昇温度の計算－

熱処理部の熱容量

$$\begin{aligned} Q &= (\pi / 4 \cdot D^2 l) \cdot \rho C_p \cdot T \\ &= \pi / 4 \times 0.0075^2 \times 0.01 \times 7800 \times 0.11 \times 1000 \\ &= 0.379 \text{ (Kcal)} \end{aligned}$$

冷し金の重量M〔直径d：50mm，厚さl：20mm，密度ρ：8900kg/m³の銅ブロック〕

$$\begin{aligned} M &= (\pi / 4 \cdot d^2 l) \rho \\ &= \pi / 4 \times 0.05^2 \times 0.02 \times 8900 \\ &= 0.35 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

熱処理部の熱がすべて銅ブロックに移行した時の温度上昇ΔT

$$\begin{aligned} \Delta T &= Q / C_p M \\ &= 0.379 / 0.11 \times 0.35 \\ &= 9.8 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

(4) 計算結果

各冷却法により熱処理部を冷却した場合の，溶接部温度の時間的变化を図-28に示す。①の放射冷却のみでは，冷却開始後2分経過しても，溶接部温度は，400℃までしか下がらない。②のArガス冷却を使うと，約150℃まで下がる。③の冷し金による冷却では約30秒で100℃まで冷却でき，この方法が除熱に最も有効であることがわかる。

(5) 冷し金冷却時の冷却速度の調整

冷し金による冷却を行う場合，冷却速度の調整として

- ① 冷し金との接触面積を変える。
- ② 冷し金との接触時間を変える。
- ③ 冷し金の材質を変える。

等が考えられる。

冷し金の冷却速度を変える方法の一つとして，銅の冷し金の表面に熱伝導率の異なった金属を貼り付ける方法が考えられる。例えば，図-29の如く，肉厚5mmのSUS材を貼って熱伝導率を変化させ，冷却速度を遅くすることができる。この場合の冷却曲

線を図-28に示す。

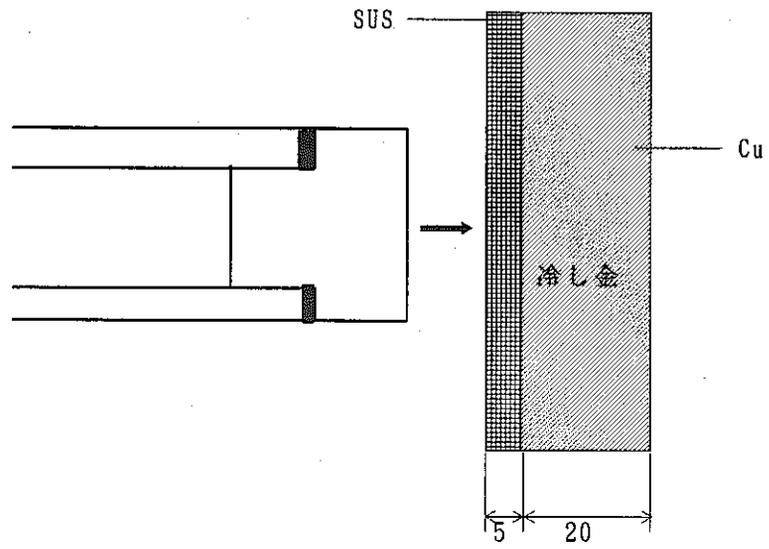


図-29 冷し金冷却時間の冷却速度の調整