

照射試験用熱膨張差型温度モニタ(TED)の 製作法の開発

1998年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-1393, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

照射試験用熱膨張差型温度モニタ（TED）の製作法の開発

野口 好一*¹, 小堀 高久*², 三代 敏正*²
高津戸裕司*¹, 宮川 俊一*¹

要 旨

本報告書は、高速実験炉「常陽」の照射試験において最も精度の良い、オフライン照射温度モニタの一つである熱膨張差型温度モニタ（TED：Thermal Expansion Difference Temperature Monitor）の製作法の開発についてまとめたものである。TEDは、ステンレス鋼またはニッケル合金材の金属容器内に、これらの材料よりも熱膨張率の大きいナトリウムを充填し金属球の蓋を抵抗溶接で密封したものである。これを炉内に装荷すると、ナトリウムの熱膨張により容器が変形しTEDの体積が増加する。この増加分と、炉外較正試験で予め求めたTEDの体積増加分と温度の相関式から照射中の最高温度を同定するものである。

TEDは、米国のアルゴンヌ国立研究所（ANL）で開発されたものであるが、同研究所での受注生産品であるため、入手時間や供給見通しに問題が生じていた。また、国内での調達先の調査の結果、同等のコストでも受注に応ずる国内メーカーもないことが分かった。このため、大洗工学センターの実験炉部照射課ではTED入手の確保のために平成4年度からTEDの内部製作法の開発に着手した。

開発にあたっては、当初ANLからの情報提供に基づき試作試験を試みたが、より高精度なモニタとするためにはナトリウム充填法や金属球の溶接法等の改良の必要が判明し、ナトリウム充填率を100%近くに上げるなど改善を行った。その結果、炉外試験での温度測定値のばらつきが米国製の半分の $\pm 5^{\circ}\text{C}$ となる大幅な改善結果を得ることができ、また、コスト的にもANLと同等であることを確認した。

このようにして国産化したTEDの照射装置への装着を平成8年に実施し、平成9年3月の「常陽」定格運転第30サイクルから使用を開始している。

* 1 大洗工学センター 実験炉部 照射課
* 2 検査開発(株)

Development of Fabrication Method for Thermal Expansion Difference Irradiation Temperature Monitor

Kouichi Noguchi *1 Takahisa Kobori*2 Toshimasa Miyo*2

Hiroshi Takatsudo*1 Shun-ichi Miyakawa*1

ABSTRACT

This report describes the development activities for the fabrication of the Thermal Expansion Difference irradiation temperature monitor (TED) at the Oarai Engineering Center (OEC)/PNC. TED is used for various irradiation tests in the experimental fast reactor JOYO. TED is the most accurate off-line temperature monitor used for irradiation examination.

The TED is composed of a metallic sphere lid and either a stainless steel or nickel alloy container. Once the container is filled with sodium, the metallic sphere lid is sealed by using a resistance weld. This capsule is then loaded into a reactor. Once a TED is loaded into the JOYO reactor, the sodium inside the metallic container increases as a result of thermal expansion. The TED identifies the peak irradiation temperature of the reactor based on a formula correlating temperature to increment values. This formula is established specifically for the particular TED being used during a calibration process performed when the TED is fabricated.

Initially the TED was developed by Argonne National Laboratory (ANL) in the United States, and was imported by PNC for use in the JOYO reactor. In 1992 PNC decided to fabricate TED domestically in order to ensure the stability of future supplies.

Based on technical information provided by ANL, PNC began fabrication of a TED on an experimental basis. In addition, PNC endeavored to make the domestically produced TED more efficient. This involved improving the techniques used in the sodium filling and the metallic sphere welding processes. These quality control efforts led to PNC's development of processes enabling the capsules to be filled with sodium to nearly 100%. As a result, the accuracy of the temperature dispersion in the out-pile calibration test was improved from $\pm 10^{\circ}\text{C}$ to $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

In 1996 the new domestically fabricated TED was attached to a JOYO irradiation rig. In March of 1997, irradiation of the rig was started on the 30th duty cycle operation, and should be continued by May of 1999.

* 1 Irradiation Section, Experimental Reactor Division, OEC.

* 2 Inspection Development Co, Ltd. ; working for Irradiation section,
Experimental Reactor Division, OEC

目 次

1. 概 要	1
2. TEDの構造及び仕様	3
2.1 TEDの原理及び構造	3
2.2 TEDの仕様	3
3. TED製造装置	5
3.1 ナトリウム充填装置	5
3.2 TED溶接装置	5
3.3 不活性ガス精製循環型グローブボックス	6
4. 試作試験－I	11
4.1 概 要	11
4.2 ナトリウム充填性試験	11
4.2.1 ナトリウム充填方法の概要	11
4.2.2 ナトリウム充填装置の機能試験	11
4.2.3 TED容器本体へのナトリウム充填性試験	12
4.3 抵抗溶接性試験	13
4.3.1 溶接方法の概要	13
4.3.2 溶接施行試験	13
4.4 TED健全性試験	15
4.4.1 加熱試験	15
4.4.2 試験体加熱試験－1	16
4.4.3 試験体加熱試験－2	18
4.4.4 加熱試験－1, 2のまとめ	18

5. 試作試験－Ⅱ	28
5.1 TED材質の検討	28
5.2 アニール材TED及び米国製TEDとの比較加熱試験	28
5.3 特性試験	28
5.4 装置改造	30
5.4.1 ナトリウム充填装置の改造	30
5.4.2 TED溶接装置の改造	34
6. 実機製作	44
6.1 ニッケル合金材（インコネル600）TEDの溶接施行試験	44
6.1.1 溶接条件の検討	44
6.1.2 溶接装置芯出し調整	45
6.1.3 電極の製作	45
6.1.4 ナトリウム充填後の溶接部の洗浄・加工方法の検討	45
6.2 ニッケル合金材TED容器本体へのナトリウム充填	46
6.3 ニッケル合金材TED容器本体と金属球の抵抗溶接	46
6.4 セッティング	46
6.5 炉外較正試験	47
6.5.1 較正試験概要	47
6.5.2 較正試験結果	47
6.5.3 体積測定方法の検討	47
7. まとめ	59
8. 謝辞	60
9. 参考文献	60

表リスト

表-1	TED製造開発経緯	2
表-2	ナトリウム充填操作方法	19
表-3	シリンダーゲージ圧力表	23
表-4	真空度確認結果	35
表-5	ナトリウム中の不純物濃度	36
表-6	ナトリウム充填温度・時間グラフ表	49
表-7	ナトリウム充填結果	50

図リスト

図-1	TED構造図	4
図-2	ナトリウム充填装置	7
図-3	TED溶接装置	8
図-4	TEDセット方法	24
図-5	体積測定結果	37
図-6	ナトリウム充填装置(改造後)	38
図-7	ヒーター及び熱電対取付位置	39
図-8	ナトリウム充填装置真空度確認	40
図-9	充填部切断方法の改善	41
図-10	溶接装置改造図	42
図-11	電極製作方法	51
図-12	溶接部洗浄・加工方法	52
図-13.1	TED・熱電対セット位置	53
図-13.2	較正試験装置	54
図-14	TED体積測定方法	55
図-15	較正曲線	56
図-16	TED体積測定方法の改善	57

写真リスト

添付写真-1	溶接装置用機器類	9
添付写真-2	不活性ガス精製循環型グローブボックス	10
添付写真-3	溶接部断面金相写真 (SUS材)	25
添付写真-4	加熱試験装置	26
添付写真-5	加熱後のTED (冷間加工材)	27
添付写真-6	アニール材TEDと米国製TEDの膨張比較	43
添付写真-7	溶接部断面金相写真 (ニッケル合金材)	58

1. 概要

照射による燃料や材料の特性は、照射中の燃料・材料温度によって大きく変化するため、照射試験においては、試料の温度を正確に測定することが重要である。熱膨張差型温度モニタ（TED）は、金属製容器内に熱膨張率の大きいナトリウムを充填した構造のオフライン温度モニタである。TEDは、米国のアルゴンヌ国立研究所（ANL）で開発されたものであるが、同研究所での受注製産品であるため入手時間や供給体制の問題が生じ「常陽」の照射試験に影響を及ぼすことが懸念された。

このため、TEDの安定供給の維持及び高精度化を図るために平成4年度からTEDの国産化に着手した。国産化にあたっては、ANLからの情報に基づきナトリウム充填装置、金属球の抵抗溶接装置を設計・製作し試作の準備を整えた。

試作試験－Iでは、TEDの材質に被覆管の照射実績があり、耐スエリング性に優れたSUS316相当ステンレス鋼20%冷間加工材を用いて、ナトリウム充填技術及び金属球の抵抗溶接技術を把握した。試作品は、加熱試験により約500℃から600℃の温度範囲内でTED容器胴と端栓溶接部の熱影響部が冷間加工の部分的軟化によりクリープ破損してしまうため、TEDの材質には冷間加工材が適さないことが判明した。（4.4.4参照）

試作試験－2では、TEDの材質にSUS316相当ステンレス鋼アニール材を使用し、TED容器胴と端栓溶接部の改善を図った。試作品は炉外較正試験により溶接部の破損は改善できたが、TEDの体積増加にばらつきが大きく製品としては使用不可能であった。体積増加のばらつき原因は、ナトリウムの充填量が米国製と比較すると少なく、また、ナトリウム充填量が一定していなかった。これらは、米国製とのナトリウム充填要領及び金属球の抵抗溶接方法等の製造方法の違いによるものであり、TEDの性能はナトリウムの充填量に影響されることが判明した。このため、製造方法の見直し改善及びナトリウム充填装置、抵抗溶接装置の改造を行い米国製の90%より高い95%のナトリウム充填量を得ることができた。

試作試験－I, IIにより、TEDの製造技術の見極めを得たため、平成7年9月から冷間加工なしで耐スエリング性のよいニッケル合金材（インコネル600）を使用したTED製品の製造を開始した。製品は90個製造し、そのうち数個を用いて炉外較正試験及び破損限界試験を実施した。その結果、製品の精度は温度測定値のばらつきが米国製の半分となる±5℃と大幅な改善を図ることができた。また、850℃でようやく容器本体が破損し、製品の温度測定範囲は350℃から800℃であることを確認した。

製品は、材料照射用反射体への装着が完了し、平成9年3月の「常陽」定格運転第30サイクルから使用を開始した。これらの経緯を工程表として表－1に示す。

表-1 TED製造開発経緯

年度 項目	平成4年度			平成5年度			平成6年度			平成7年度			平成8年度		
	4	9	3	4	9	3	4	9	3	4	9	3	4	9	3
1. 部材の製作 (SUS316相当材/スチールCW20%)	—————														
2. TED製造装置の製作 (1) ナトリウム充填装置 (2) TED溶接装置	————— —————														
3. 試作試験-I (SUS材) (1) ナトリウム充填性試験 (2) 抵抗溶接性試験 (3) TED健全性試験 (4) 試験結果まとめ		————— —————													
4. 試作試験-II (アニール材) (1) TED材質の検討及びアニール材TED部材の製作 (2) 組立性試験 (3) 特性試験 (4) ナトリウム充填装置改造 (5) TED溶接装置改造 (6) ナトリウム充填性試験 (7) 抵抗溶接性試験 (8) 校正試験 (9) 各製造装置整備				—————											
5. 実機製作 (ニッケル合金材) (1) 部材の製作 (2) TED容器本体へのナトリウム充填 (3) 抵抗溶接 (4) セッティング・体積測定 (5) 校正試験 (6) リグへの装着							—————								

2. TEDの構造及び仕様

2.1 TEDの原理及び構造

TEDは、ステンレス鋼またはニッケル合金の金属製容器内に、これらの材料よりも熱膨脹率の大きいナトリウムを充填し、金属球の蓋を抵抗溶接で密封したものである。^{*}これを炉内に装荷すると、ナトリウムの熱膨脹により容器が変形しTEDの体積が増加する。この増加分と炉外較正試験で予め求めたTEDの体積増加分と温度の相関式から照射最高温度を同定するものである。TEDの構造は、図-1に示すように上部端栓、TED容器胴、下部端栓、金属球、充填ナトリウムから構成される。TEDは、容器胴に上部端栓及び下部端栓をTIG溶接により取付け、TED容器本体内へナトリウムを充填した後に金属球を上部端栓に抵抗溶接で密封して製造する。

2.2 TEDの仕様

TEDの仕様を以下に示す。

(1) 材質

- 1) 上部端栓 SUS 316 ステンレス相当鋼及びニッケル合金
- 2) 下部端栓 SUS 316 ステンレス相当鋼及びニッケル合金
- 3) TED容器胴 SUS 316 ステンレス相当鋼及びニッケル合金
- 4) 金属球 SUS 316 ステンレス相当鋼及びニッケル合金

(2) 基準寸法

- 1) 全 長 30 mm
- 2) 寸 法 OD 4.42 mm × ID 4.16 mm × t 0.13 mm
- 3) ナトリウム入口部径 0.8 mm
- 4) 球 径 ϕ 1.6 mm

- (3) ナトリウム充填基準量 約0.3 g

* ANLでのTEDの開発経緯：

ANLでは当初、ナトリウムを密封しない蓋なしの熱膨脹によってあふれたナトリウムの量を測定する開放型のモニタを開発していた。このモニタの試験過程で、何らかの原因でナトリウムの流出孔が閉塞し、ナトリウムの熱膨脹によってTED試験試料の容器が塑性変形する失敗があった。ANLではこの現象に着目し、密封型のTEDの開発に方向転換した。これが、現在のTEDの原理着想の契機となった。

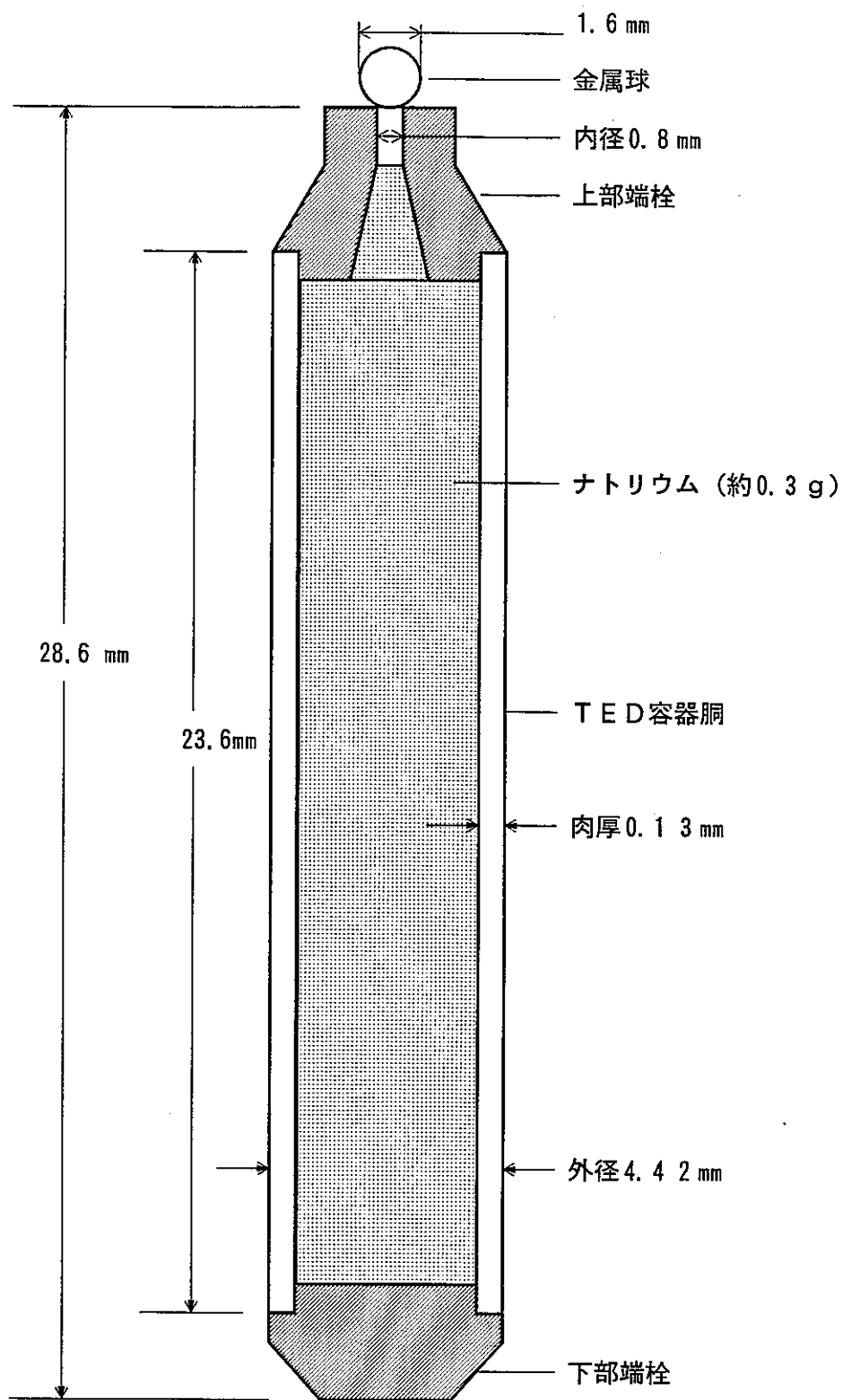


図-1 TED構造図

3. TED製造装置

TEDの製造に使用する主要装置は、ナトリウム充填装置、TED溶接装置、不活性ガス精製循環型グローブボックスであり、以下に個々の機器概要を示す。

3.1 ナトリウム充填装置

ナトリウム充填装置は、ナトリウムタンク、ナトリウム充填部、ヒーター、真空系及びガス系から構成される。ナトリウム充填装置を図-2に示す。

以下に、ナトリウム充填装置の概略仕様を示す。

(1) ナトリウムタンク

ナトリウムタンクの形状は円柱であり、寸法が $\phi 114.3\text{ mm} \times$ 高さ 180 mm のステンレス容器で貯容量 1 kg 以下のタンクである。タンクの外側をマイクロヒーターで包み最高温度 $200\text{ }^\circ\text{C}$ まで昇温できる構造である。

(2) ナトリウム充填部

ナトリウム充填部は、配管、継手、ベローズバルブ、充填用ホルダー等から構成され、充填部外部はマイクロヒーターにより最高 $500\text{ }^\circ\text{C}$ まで昇温できる構造である。充填ホルダーは、TED容器本体が最大 18 個まで装填ができる構造である。

また、充填ホルダーは、充填部に装脱着が可能な構造である。

(3) 真空系及びガス系

真空系及びガス系は、その系統内が $1 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ の真空度まで真空引きすることが可能であり、配管系統は $1 \times 10^{-7}\text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下までの漏洩量を保証することができる。ガス系統はナトリウムの酸化を極力防止するために高純度のヘリウムガスと真空ポンプを備えガス置換ができる構造である。

3.2 TED溶接装置

TED溶接装置は、TED容器本体固定治具、金属球と容器本体を抵抗溶接する溶接ヘッド、溶接条件をプログラミングするためのプログラムユニット及び作動スイッチであるウエルドチェッカー装置から構成される。TED溶接装置を図-3に示す。また、溶接装置用機器類を添付写真-1に示す。

3.3 不活性ガス精製循環型グローブボックス

不活性ガス精製循環型グローブボックスは、不活性ガス雰囲気グローブボックス、不活性ガス精製循環装置、真空ポンプ、酸素及び水素濃度計から構成される。

不活性ガス雰囲気グローブボックスは、グローブボックス本体、アンテナチャンバー部から構成されボックス内はヘリウムガス雰囲気である。不活性ガス精製循環型グローブボックスを添付写真-2に示す。

アンテナチャンバーはグローブボックス本体へ物品を搬入するためのチャンバーである。

不活性ガス精製循環装置はグローブボックスと連結された附帯装置で精製筒（A・B）、真空ポンプ、フォトリック、再生タイマー、再生ガスから構成され、ボックス内のヘリウムガスの酸素及び水分濃度を1ppm以下に常に維持するための装置である。

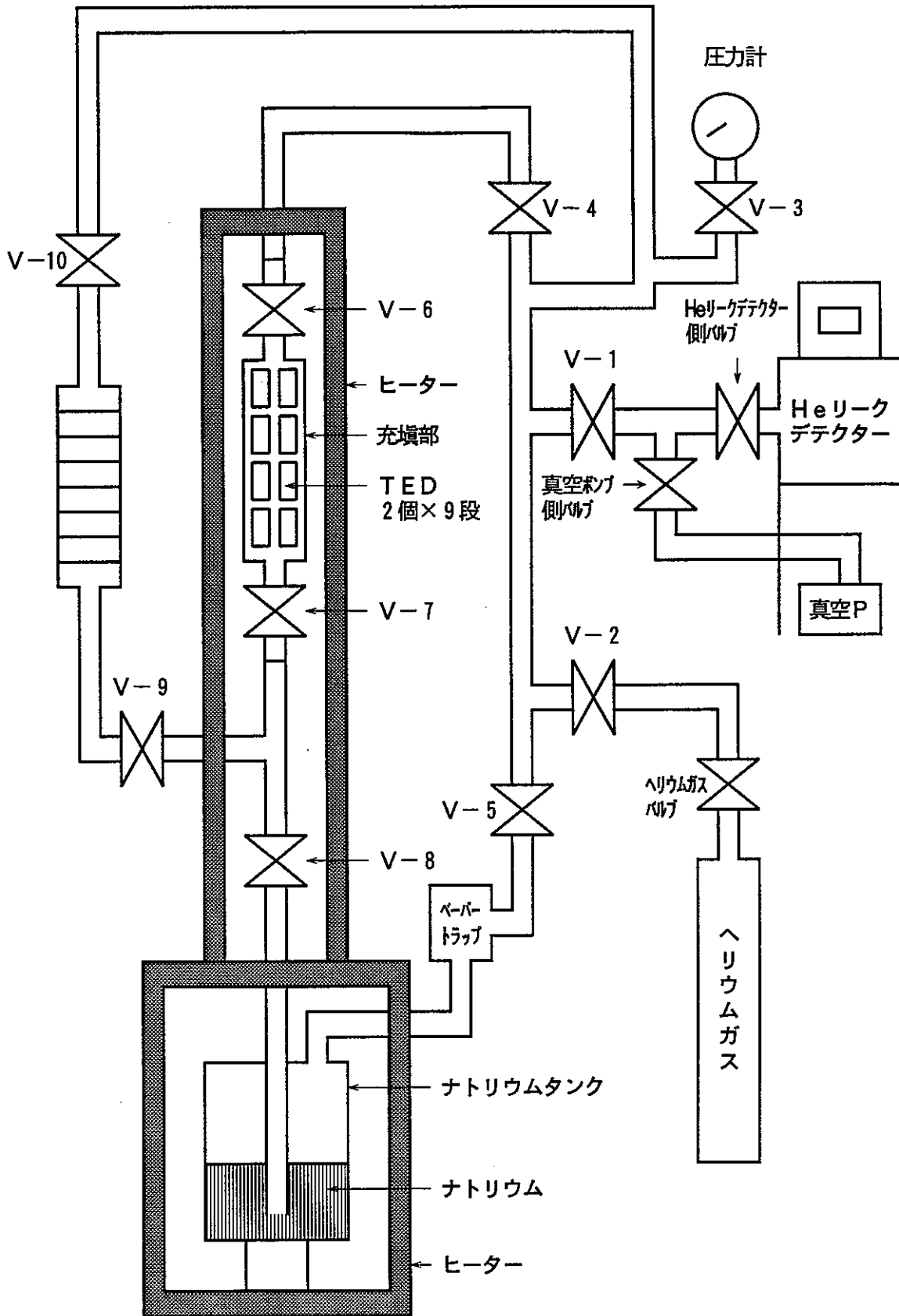


図-2 ナトリウム充填装置

溶接ヘッド

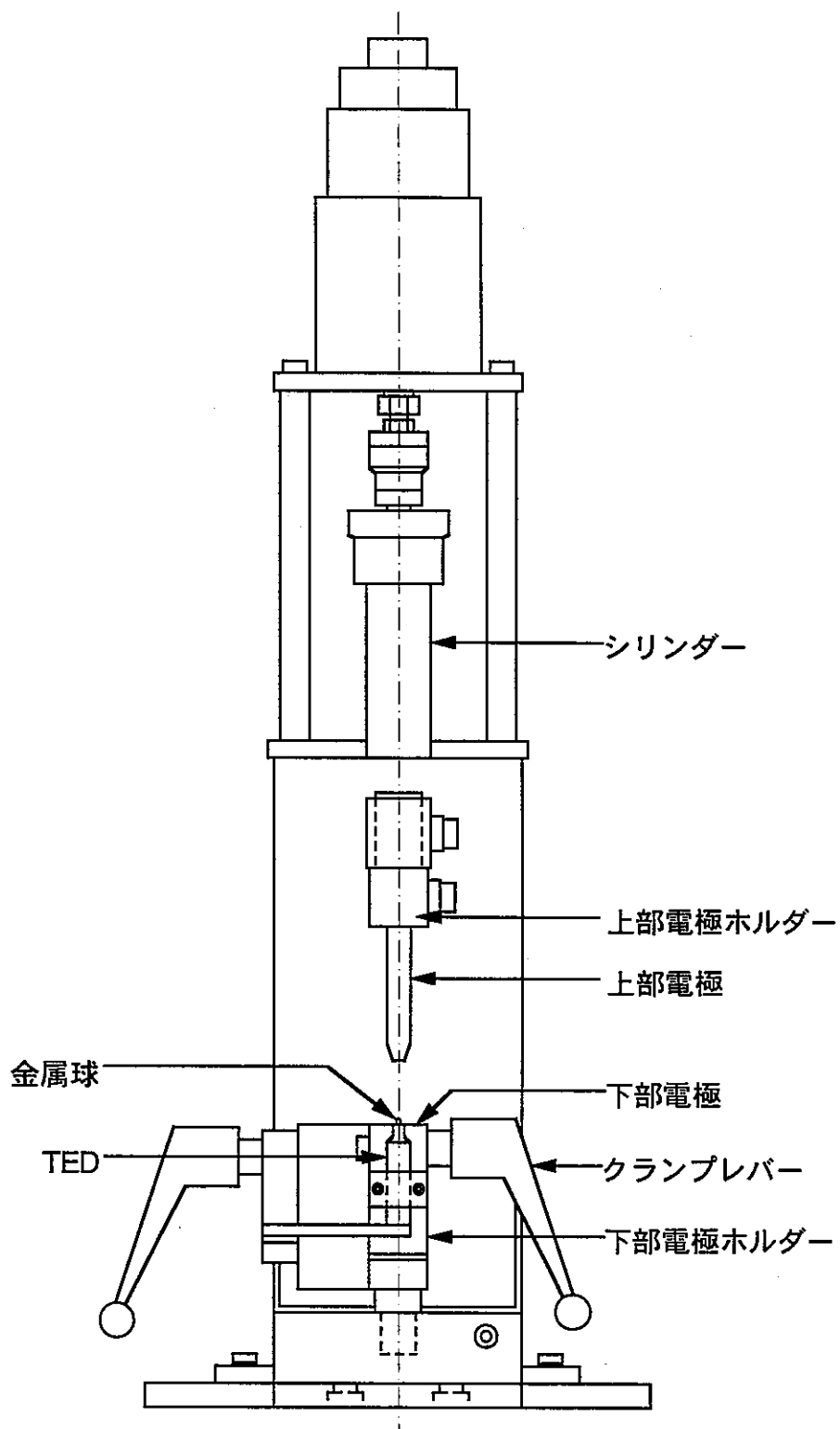
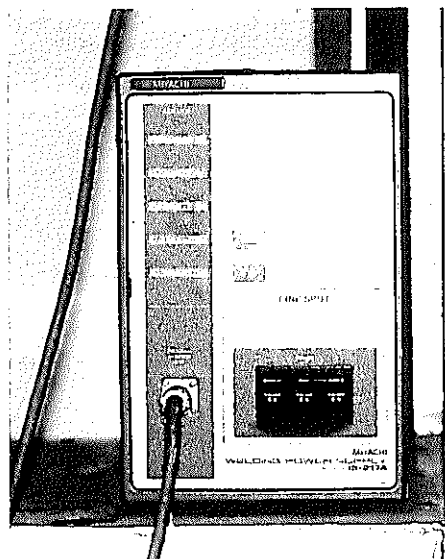
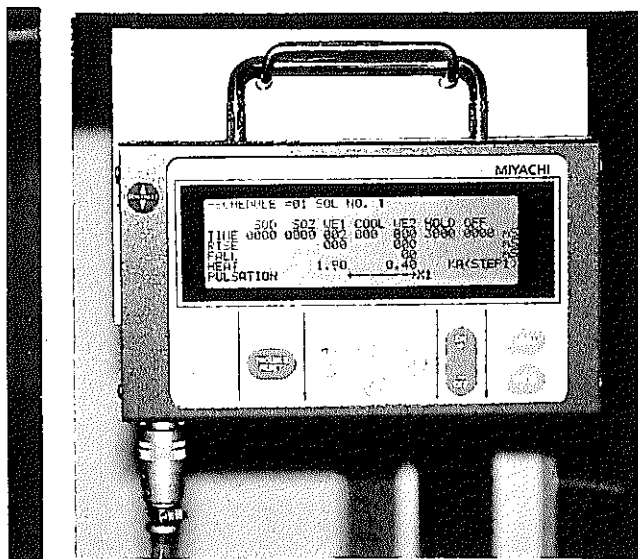


図-3 TED溶接装置

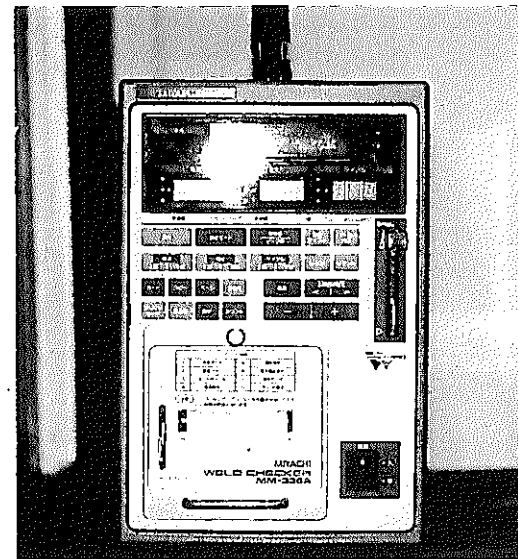
添付写真 - 1



インバーター抵抗溶接電源



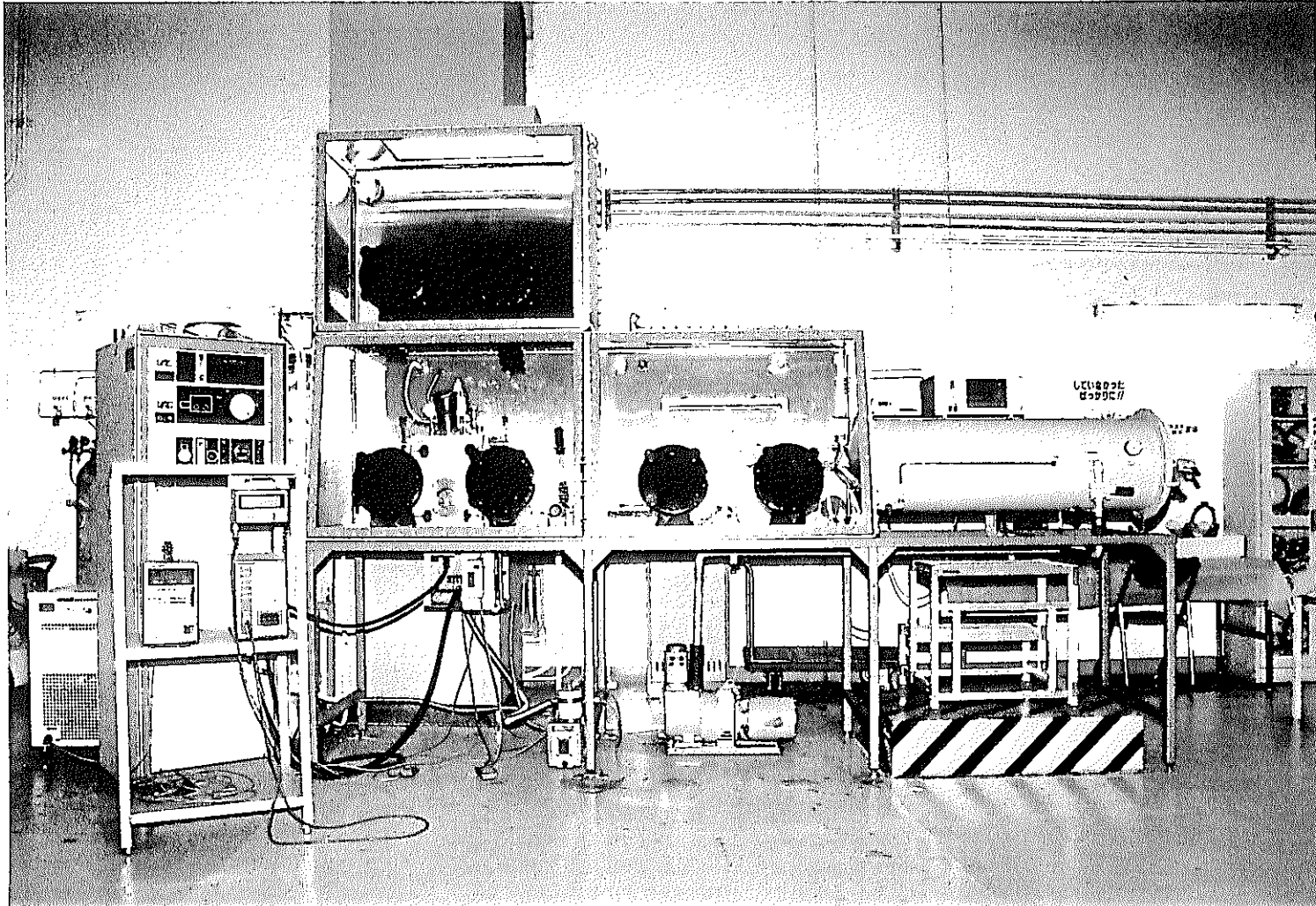
プログラムユニット



ウエルドチェッカー

溶接装置用機器類

添付写真 - 2



不活性ガス精製循環型グローブボックス

4. 試作試験－I

4.1 概要

試作試験－Iでは、SUS316相当ステンレス鋼20%冷間加工材を使用したTED部材を用いてナトリウム充填装置及び抵抗溶接装置の機能試験を行い、TED容器本体へのナトリウム充填量の把握、並びに金属球の抵抗溶接技術を確立した。

本試験では試作品の健全性及び性能を確認するための加熱試験を実施したところ、約500℃から600℃の温度範囲内で、容器胴と端栓溶接部の熱影響部で破損した。

4.2 ナトリウム充填性試験

4.2.1 ナトリウム充填方法の概要

TED容器本体へのナトリウム充填は、数個のTED容器本体を充填ホルダーに組み込み、充填部配管内にセットする。充填部は、ナトリウムの酸化、凝固を防ぐため配管系統内を予め真空脱ガス処理を行い、充填部及びナトリウムタンクの昇温を行う。昇温後、充填部を真空にしてナトリウムタンク内にヘリウムガスを加圧し、ナトリウムをタンク内から充填部へ汲み上げる。ナトリウムは充填部配管内、ホルダー内及びTED容器本体内に充填される。

ナトリウム充填後、充填部配管内の余剰ナトリウムを充填部上部からヘリウムガスを加圧してタンク内へドレンする。

4.2.2 ナトリウム充填装置の機能試験

(1) ナトリウム充填装置の昇温、制御特性確認試験

ナトリウム充填装置の加熱箇所はナトリウム充填部、ナトリウムタンク部であり、加熱部に取付けたマイクロヒーターにより昇温する。温度制御は、マイクロヒーターと熱電対により加熱部の温度を検出し、温度コントローラで制御を行う。ヒーターの出力と温度コントローラの制御特性を相関性確認試験において明確にし、ナトリウム充填部250℃以上、ナトリウムタンク部110℃以上の温度に維持するための制御性を確立した。

(2) ナトリウム充填性確認試験

ナトリウム充填性確認試験は、ナトリウム充填装置内の充填部へ1/4配管を取付け、表-2に示す方法でナトリウムタンクから充填部(1/4配管)へナトリウムを充填した。ナトリウム充填率の確認は、充填前と充填後の重量差により求めた結果、充填率は約80%であった。原因は、昇温前にタンクと充填部の仕切りバルブ(V-8)を「閉」にして配管内の真空排気を行うため、仕切りバルブのベローズ部にヘリウムガスが混入したものと考えられた。

このため、昇温前の配管内真空排気操作は、ナトリウムタンクと充填部の仕切りバルブ(V-8)を「開」に操作要領を変更した。変更後は、ナトリウム充填部へのナトリウム充填率は100%になった。

充填部へのナトリウム充填確認方法は、目視では不可能であるため充填操作中にナトリウムタンクと充填部との温度変化により確認する。さらに、充填部を装置から取外して重量測定により充填率を確認する。

(3) ナトリウムドレン性確認

充填部のナトリウムドレン方法は、タンクと充填部の内圧を同圧にしてナトリウムの自重とヘッド圧でドレンを試みたが不可能であった。このため、タンク内のガス抜きを行い充填部上部側よりヘリウムガス0.5 kg/cm²を加圧する方法に変更した。加圧法を変更した結果、充填部内のナトリウムはほぼ完全にタンク内へドレンすることが可能になった。

4.2.3 TED容器本体へのナトリウム充填性試験

TED容器本体へのナトリウム充填は図-4に示すように、ガイドに充填ホルダーをセットし、ホルダー内にTED容器本体を装填し組立てる。充填ホルダーを充填部配管内に9段セットし、TED容器本体へナトリウムを充填する。

当初、TED容器本体を10個(2個×5段)装填してナトリウムの充填性試験を実施したが、充填ホルダーの構造が複雑であるため、ドレン性が悪く、グローブボックス内での充填部の解体が困難であった。ナトリウムドレン性と解体性の向上を図るため、充填ホルダーへのTED容器本体の装填数を10個から4個に削減した。充填ホルダーへの装填本数を削減したことによりナトリウムドレン性及び解体性の改善を図ることができた。

TE D容器本体へのナトリウム充填量は、ナトリウム充填前後の重量差により確認する。また、TE Dの性能を考慮してTE D容器本体へのナトリウム充填目標容量0.29g（充填率97%）に対し、 0.27 ± 0.01 g（充填率90%）のナトリウムを充填できることを把握した。

4.3 抵抗溶接性試験

4.3.1 溶接方法の概要

TE D容器本体と金属球の抵抗溶接は、ヘリウムガス雰囲気中のグローブボックス内に設置した溶接装置にTE D容器本体をセットし、容器本体上部端栓に金属球を乗せて金属球を電極で押さえつける。

溶接条件（電流値、通電時間、軸荷重）をセットし、TE D容器本体上部端栓と金属球との抵抗溶接を行う。抵抗溶接は、TE D容器本体へ瞬間的に大電流を通電し、金属球に電流スパークが発生してスパーク熱により容器本体の溶接を行う。

4.3.2 溶接施行試験

溶接施行試験は、実機溶接部の健全性を非破壊検査のみで間接的に保証するために実施するものであり、実機と同一ロット・形状・寸法の試験体を用いて溶接条件を確立するために行う。

(1) 溶接条件の検討（SUS316相当ステンレス鋼20%冷間加工材）

TE D容器本体と金属球の抵抗溶接に係わる溶接条件の判定基準がないために米国製TE Dの金属球溶接部の断面金相試験を行い、その溶け込み状態を判定基準の目標として溶接条件の検討を進めた。

溶接機メーカーにおいて、本装置と同等装置での抵抗溶接実績である溶接条件を参考にして仮設条件を設定し、溶接性の確認を行った。

以下に、溶接条件表を示す。

条件項目	条件 - 1	条件 - 2	条件 - 3	条件 - 4	条件 - 5	条件 - 6	条件 - 7
電流値 (KA)	1.0	1.2	1.5	1.7	1.8	1.9	1.7
通電時間 (m/sec)	10	10	5	3	3	3	3
軸荷重* (kg)	6	6	6	6	6	6	8
溶接部外観	×	×	×	○	○	○	○
断面検査	×	×	×	×	×	×	○
再現性確認	×	×	×	×	×	×	○

*軸荷重の圧力は、6～30kgに無段調整でき、圧力調整は表-3のシリンダーゲージ圧力表を基にシリンダーゲージの圧力調整目盛で行う。

溶接時、電極をヘリウムガス圧力で降下させ、セットされた軸荷重に達したらマイクロスイッチの動作で溶接を行う。

(2) 溶接施行試験結果

各抵抗溶接条件における金属球溶接部の外観検査は、顕微鏡（約40倍）により確認した。また、試験試料の溶接部の断面金相試験を行い、米国製TEDの溶け込み状態と比較した。

各抵抗溶接条件結果を以下に示し、断面金相写真を添付写真-3に示す。

- 1) 条件-1から条件-3で溶接した結果は、溶接部外観は不良であり、溶接面（接触面）の変形が生じた。さらに、溶接部の断面金相を確認した結果、金属球の下部が融失し溶接部の溶け込み状態が不均一であった。
- 2) 条件-4から条件-6で溶接した結果は、溶接部外観は良好であるが溶接部の断面金相を確認した結果、溶接部の溶け込み状態が不足していた。
- 3) 条件-7で溶接した結果は、溶接部外観は良好であり、溶接ビード部も均一であった。ヘリウムリーク試験による漏洩も認められなかったため、条件-7による再現性試験を試験試料4個を用いて実施したが、断面金相により4個全ての溶け込み状態が不均一であり、再現性は得られなかった。原因は、TED容器本体と金属球を押しつける電極との芯づれが考えられたため、溶接装置の芯出し調整を実施した。

(3) ナトリウム充填後の溶接性確認試験

溶接装置の芯出し調整後、ナトリウムを充填したTED容器本体と金属球の溶接性確認を溶接条件－7で実施した。溶接結果は、溶接部外観は良好であり、溶接ビード部も均一であった。また、フェノールフタレン液によるアルカリ反応でのナトリウム漏洩も認められなかった。溶接再現性は、4個の試験試料について溶接を実施し、溶接結果は全て良好であった。

本試験により、ナトリウムを充填したTED容器本体と金属球との抵抗溶接条件を確立した。

(4) 溶接部の洗浄・加工方法の検討

TED容器本体と金属球の溶接前に、TED容器本体ナトリウム充填口に付着したナトリウムをアルコールで洗浄し乾燥後に溶接を行うが、ナトリウム充填口径が0.8mmと狭いため完全に付着ナトリウムの除去が不可能であり溶接歩留りが悪い。

このため、アルコールでの洗浄・乾燥後にナトリウム充填部の内面を細径ドリルで約0.5mm程度の面取り加工を施すことにより溶接面に付着したナトリウムを完全に除去することができた。

この結果、溶接精度を向上することができたとともに、溶接歩留りを少なくすることができた。

4.4 TED健全性試験

4.4.1 加熱試験

(1) 加熱試験の目的及び概要

ナトリウムを充填したTED容器本体と金属球を抵抗溶接した製品を加熱することにより溶接部及び加熱後の各部位の健全性、性能（膨張度）確認を目的として加熱試験を行った。

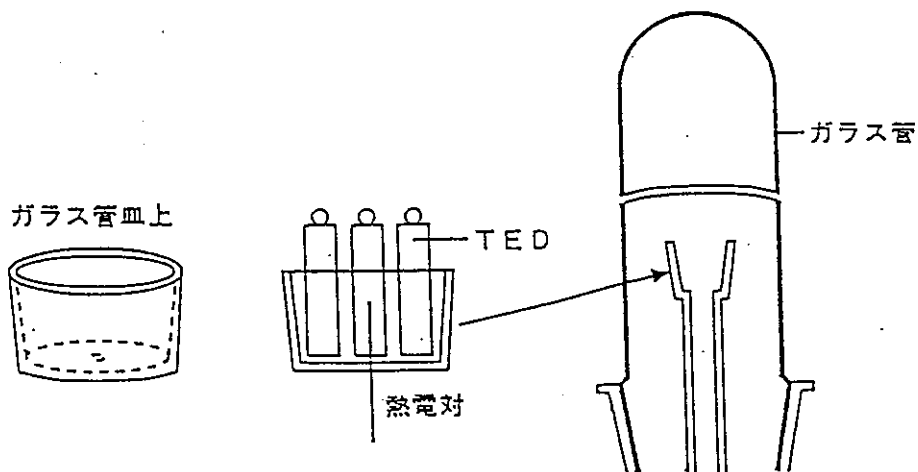
加熱試験装置は、石英ガラス管、赤外線加熱炉、温度コントローラ、冷却水ポンプ、真空及びガス系から構成される。石英ガラス管内に試験試料をセットし、石英ガラス管内をヘリウムガス雰囲気置換後、赤外線加熱炉により試験試料を昇温し、試験温度で1時間試験試料を加熱する。冷却後、石英ガラス管内より試験試料を取出し外観検査を行う。

加熱試験装置を添付写真－4に示す。

4.4.2 試験体加熱試験－1

下図に示すように、石英ガラス管内皿上に試験試料3個を装荷し、石英ガラス管内をヘリウムガス雰囲気置換して、試験温度を50℃/分の上昇率で800℃到達を目標に加熱試験－1を実施した。

試験温度を約500℃まで昇温したところ石英ガラス管内に白煙を確認したため、試験装置を停止し、冷却後、試験試料を取出して外観検査を実施した。



(1) 外観検査結果

- 1) 試験試料3個のうち2個が破損していた。破損箇所は2個ともにTED容器胴と下部端栓の溶接部付近であった。破損箇所を添付写真－5に示す。
- 2) TED容器本体と金属球の抵抗溶接部の異常は、3個ともに認められなかった。

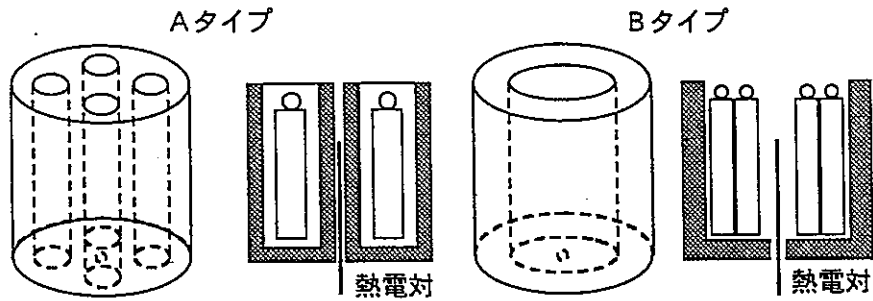
(2) 試験体加熱方法の検討

加熱試験－1において約500℃でTEDが破損した原因は、破損部位が同一箇所同一方向であることによりTEDを赤外線加熱炉で急激に直接輻射加熱したためにTEDの急激な内圧上昇による破損と考えられた。

このため、TEDを輻射緩衝体を介して加熱すること、さらに昇温方法の見直し検討を行った。

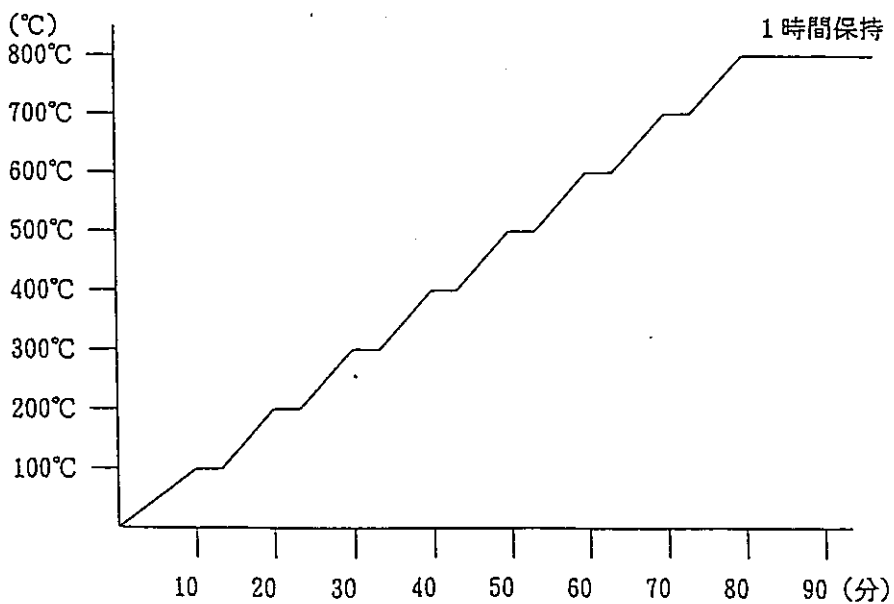
(3) 試験容器の製作

TEDを輻射緩衝体を介して加熱するために、下図に示す2種類の試験容器を輻射緩衝体として製作した。Aタイプ試験容器は、ステンレス鋼円柱にTEDが完全に収納できる深さの穴を周方向4箇所加工し、センターには熱電対用の穴加工を施した。Bタイプの試験容器は、ステンレス鋼円柱にTED4個が収納できる穴を加工し、センターには熱電対用の穴加工を施した。



(4) 加熱方法の検討

昇温方法は、50℃/分から石英ガラス管内の雰囲気温度が均一に昇温可能になるように下記に示すパターンへ変更した。

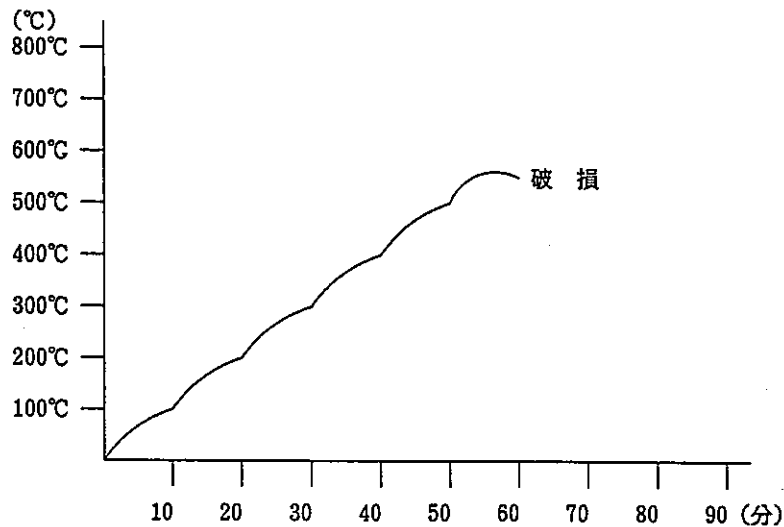


昇温速度：10℃/分

4.4.3 試験体加熱試験－2

Aタイプ試験容器及びBタイプ試験容器に4個の試験試料を装荷し、石英ガラス管内をヘリウムガス雰囲気置換後、試験温度を100℃/10分の上昇率で昇温したところ、約570℃で石英ガラス管内に白煙を確認したため、試験装置を停止した。冷却後、試験試料の外観検査を実施した。

また、Bタイプ試験容器での加熱試験も同じ結果であった。



(1) 外観検査結果

- 1) 8個の試験試料は全て加熱試験－1と同様に同部位（TED容器胴と下部端栓溶接部付近）で破損した。
- 2) 加熱後（膨張度）の外形状は、上部・下部端栓溶接部付近の容器胴部が局部的に膨らんでいた。
- 3) TED容器本体と金属球の抵抗溶接部は8個の試験試料ともに異常は認められなかった。

4.4.4 加熱試験－1, 2のまとめ

加熱試験－1, 2よりSUS316相当ステンレス鋼20%冷間加工材で製作したTEDは、試験方法に関係なく、約500℃から570℃の温度範囲内で容器胴と端栓溶接での熱影響部から破損することが判明した。

破損の原因は、冷間加工材の溶接部が溶接熱により焼鈍され、その部分の冷間加工が緩和して軟化し、クリープ歪が先行して破損したものと推定できる。

現TED構造（容器胴と端栓溶接）では、耐スエリング性に優れたSUS316相当ステンレス鋼20%冷間加工材は、TEDの材質としては適さないことが判明した。

表－２ ナトリウム充填操作方法

(1/4)

操 作 要 領	確 認 項 目
<p>1. 配管内真空引き</p> <p>① Heリークデテクター及び真空ポンプ「起動」</p> <p>② 全バルブ (V-1～V-10) が「閉」であること。</p> <p>③ 真空ポンプ側バルブ「開」</p> <p>④ バルブ操作 V-1 「開」</p> <p>⑤ バルブ操作 V-3 「開」</p> <p>⑥ バルブ操作 V-5 「開」</p> <p>⑦ バルブ操作 V-4 「開」</p> <p>⑧ バルブ操作 V-6 「開」</p> <p>⑨ バルブ操作 V-7 「開」</p> <p>⑩ バルブ操作 V-10 「開」</p> <p>⑪ バルブ操作 V-9 「開」</p> <p>⑫ Heリークデテクター側バルブ「開」</p> <p>⑬ 真空ポンプ側バルブ「閉」</p> <p>⑭ バルブ操作 V-8 「開」</p> <p>⑮ 真空度確認</p>	<p>・Heリークデテクターの操作要領による。</p> <p>・Heリークデテクターのグリーンゾーンに入らない時は増し締めを行う。</p>
<p>2. ガス導入</p> <p>① Heリークデテクター側バルブ「閉」</p> <p>② バルブ操作 V-1 「閉」</p> <p>③ バルブ操作 V-10 「閉」</p> <p>④ バルブ操作 V-8 「閉」</p> <p>⑤ バルブ操作 V-4 「閉」</p>	

操 作 要 領	確 認 項 目
⑥ Heガスポンベ元バルブ及びガスバルブ「開」 ⑦ バルブ操作 V-2 「開」 ⑧ バルブ操作 V-5 「閉」 ⑨ バルブ操作 V-2 「閉」	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス圧0.4 kg/cm² にセットする。
3. 充填系真空引き ① Heリークデテクター側バルブ 「開」 ② バルブ操作 V-1 「開」 ③ バルブ操作 V-4 「開」 ④ バルブ操作 V-10 「開」	<ul style="list-style-type: none"> ・徐々に「開」にする。 ・徐々に「開」にする。
4. 昇 温 ① 真空度確認 ② ヒーター SW 「ON」 ③ 昇温開始 ・タンク部温度 110℃以上に昇温 ・充填部温度 250℃以上に昇温 ・真空度 (Heリークデテクターのグリーンゾーン下限で一定保持されること。)	<ul style="list-style-type: none"> ・Heリークデテクターのグリーンゾーンに入らない時は増し締めを行う。
5. ナトリウム充填 ① 昇温温度を確認する。 ・タンク部温度 110℃以上 ・充填部温度 250℃以上 ② バルブ操作 V-6 「閉」 ③ バルブ操作 V-9 「閉」 ④ バルブ操作 V-1 「閉」	<ul style="list-style-type: none"> ・耐熱手袋を着用する。

操 作 要 領	確 認 項 目
⑤ バルブ操作 V-8 「開」 ⑥ ナトリウム充填開始	<ul style="list-style-type: none"> ・徐々に「開」にする。 ・耐熱手袋を着用する。
6. ドレン-1	<ul style="list-style-type: none"> ・充填部温度が下降する。 ・タンク部温度が上昇する。
① V-1とV-5を調整しながらタンク内のガス圧を0.2 kg/cm ² にする。 ② 調整後、V-1とV-5を「閉」にする。 ③ バルブ操作 V-2 「開」 ④ バルブ操作 V-2 「閉」 ⑤ バルブ操作 V-6 「開」 ⑥ バルブ操作 V-6 「閉」 ⑦ バルブ操作 V-7 「閉」 ⑧ バルブ操作 V-4 「閉」	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス圧を0.6 kg/cm²にする。 ・圧力計によりドレンされたことを確認する。(圧力計の指示が低下する。) ・耐熱手袋を着用する。
7. ドレン-2	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス圧を0.6 kg/cm²にする。 ・圧力計によりドレンされたことを確認する。(圧力計の指示が低下する。)
8. 降 温 ① バルブ操作 V-5 「開」 ② バルブ操作 V-4 「開」 ③ バルブ操作 V-6 「開」 ④ バルブ操作 V-7 「開」 ⑤ バルブ操作 V-2 「開」 ⑥ バルブ操作 V-2 「閉」	<ul style="list-style-type: none"> ・耐熱手袋を着用する。 ・耐熱手袋を着用する。 ・ガス圧を1 kg/cm²にする。

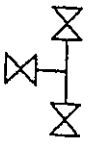
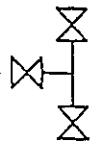
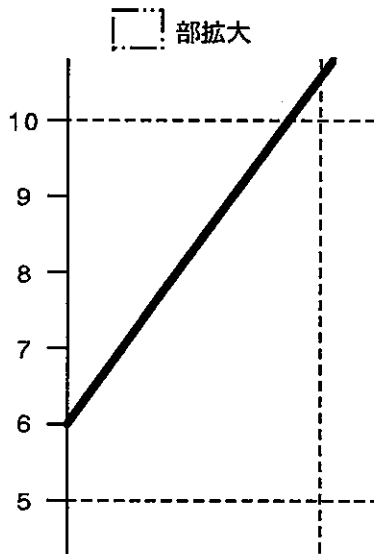
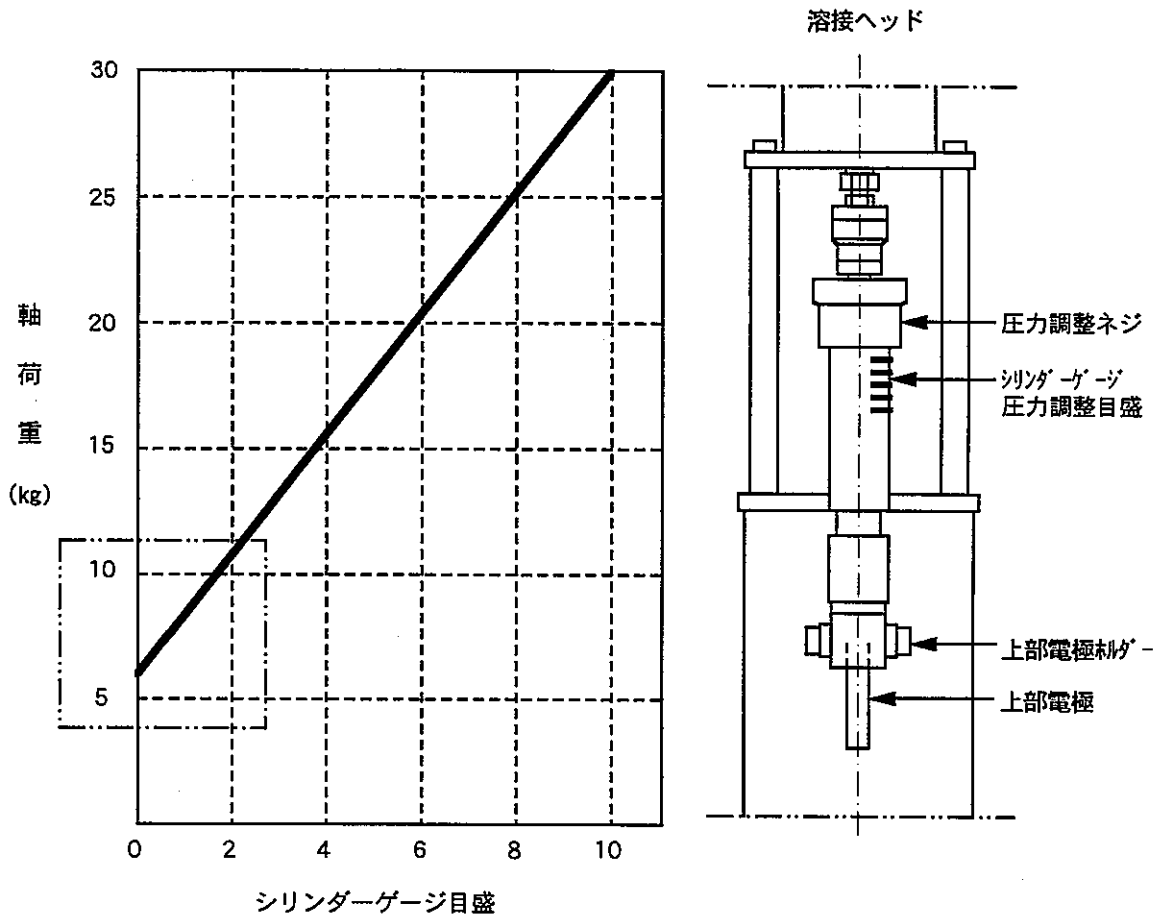
操 作 要 領	確 認 項 目
<p>⑦ バルブ操作 V-6 「閉」</p> <p>⑧ バルブ操作 V-7 「閉」</p> <p>⑨ バルブ操作 V-8 「閉」</p> <p>⑩ ヒーター SW 「OFF」</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・耐熱手袋を着用する。 ・耐熱手袋を着用する。 ・耐熱手袋を着用する。
<p>9. 充填部取外し</p> <p>① 充填部配管 V-6, V-7, V-9 間の配管を準備する。</p> <p>② V-6 上部に新しい配管を取り付ける。</p> <p>③ V-8 上部の  の部分をビニールシートで包む。</p> <p>④ V-4 を「開」にする。</p> <p>⑤ V-2 を「開」にする。</p> <p>⑥ ビニール内にガスを導入させる。</p> <p>⑦ ガスを拭きかけながら  部を取り替える。</p> <p>⑧ 装置内圧力を 0.6 kg/cm^2 のヘリウムガス中にする。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・バルブは「開」にしておく。

表-3 シリンダーゲージ圧力表



軸荷重の圧力調整は上記表を基に、溶接ヘッドの圧力調整ネジを回し、設定するシリンダーゲージの圧力調整目盛に合わせる。

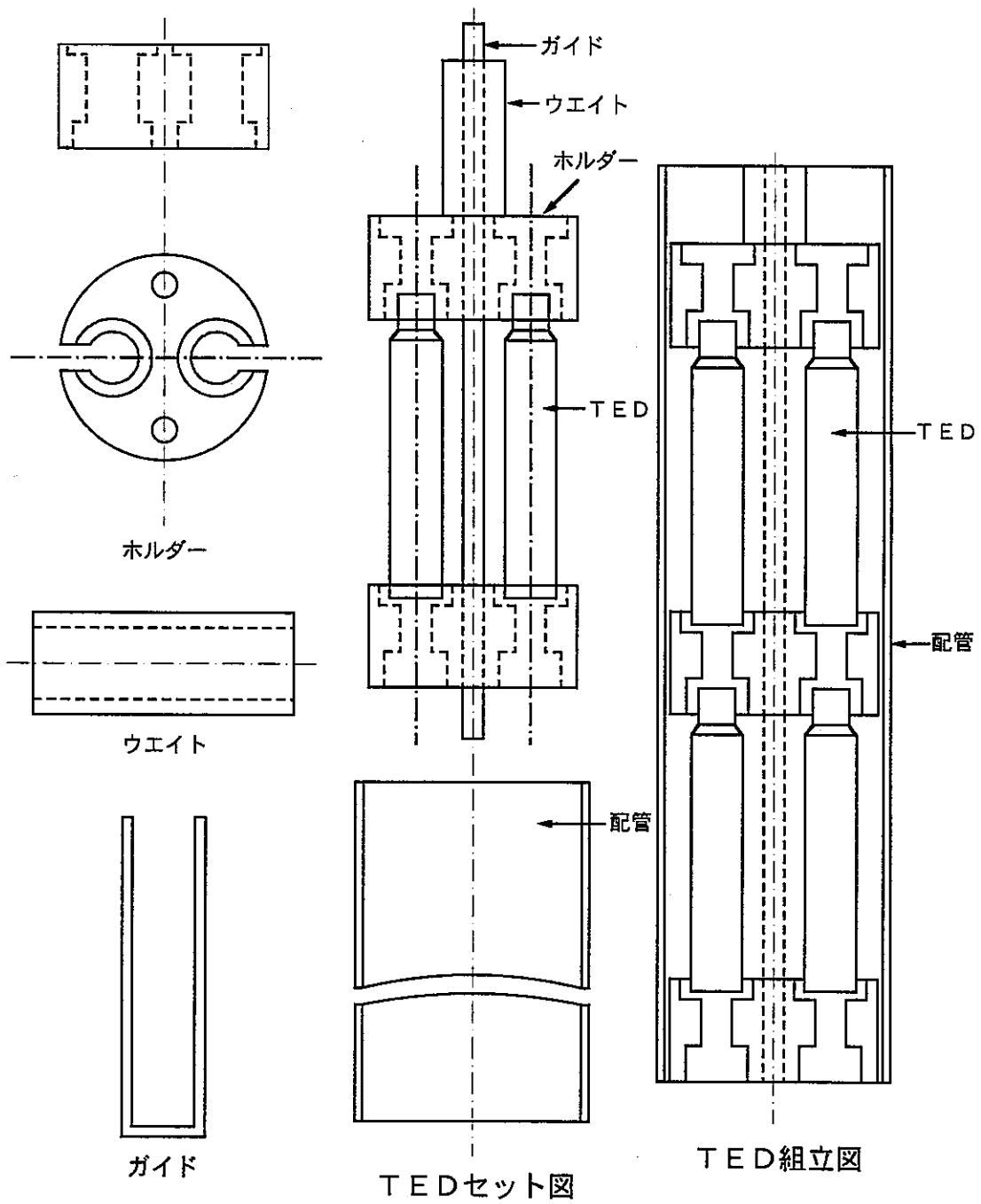
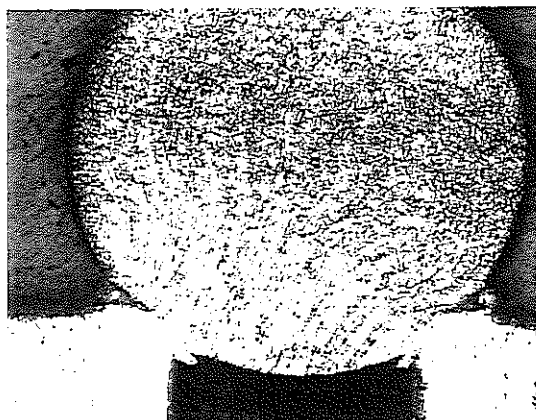
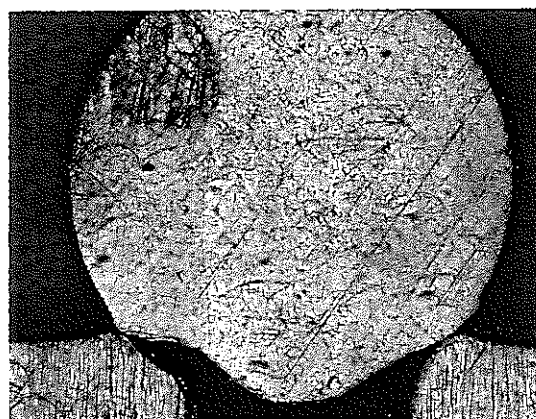


図-4 TEDセット方法

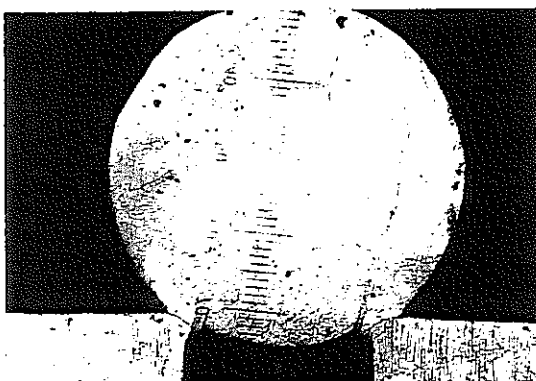
添付写真 - 3



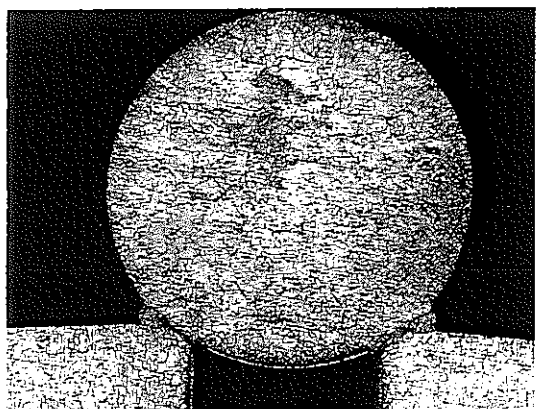
米国製 TED
断面金相写真



条件 - 1 ~ 条件 - 3
断面金相写真

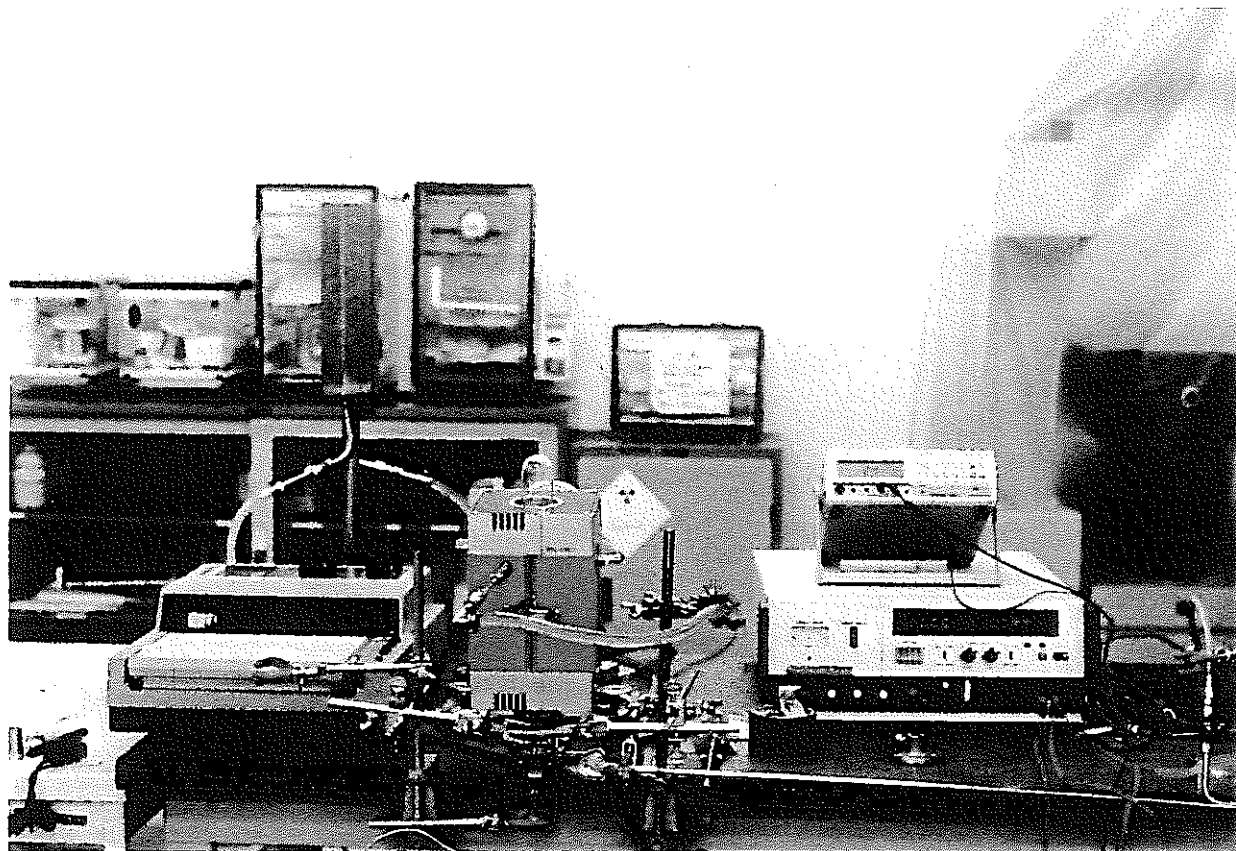


条件 - 4 ~ 条件 - 6
断面金相写真



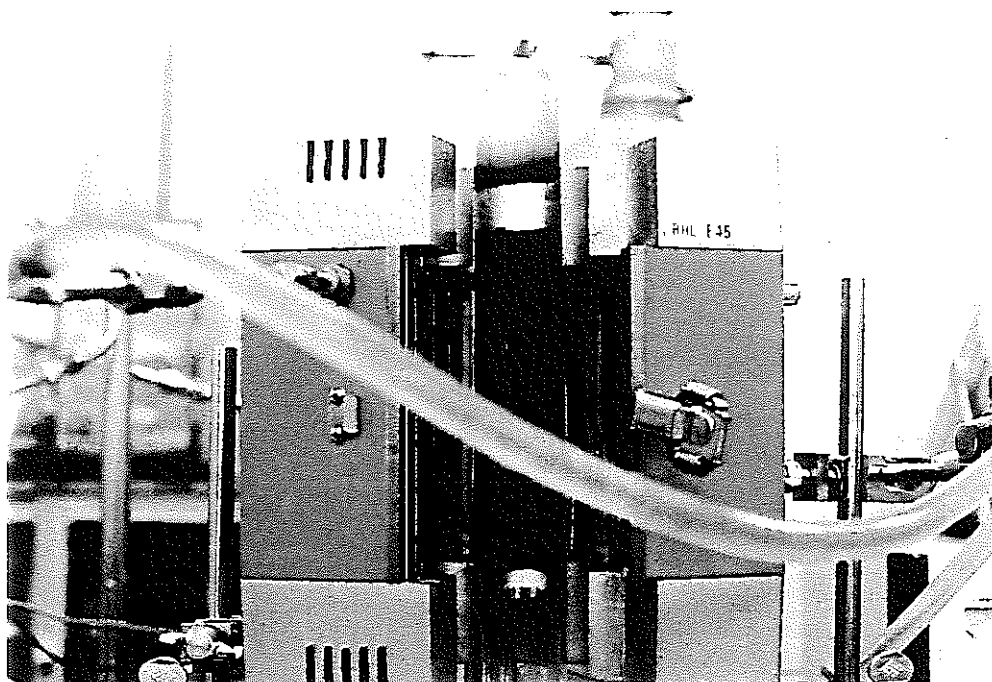
条件 - 7
断面金相写真

添付写真 - 4

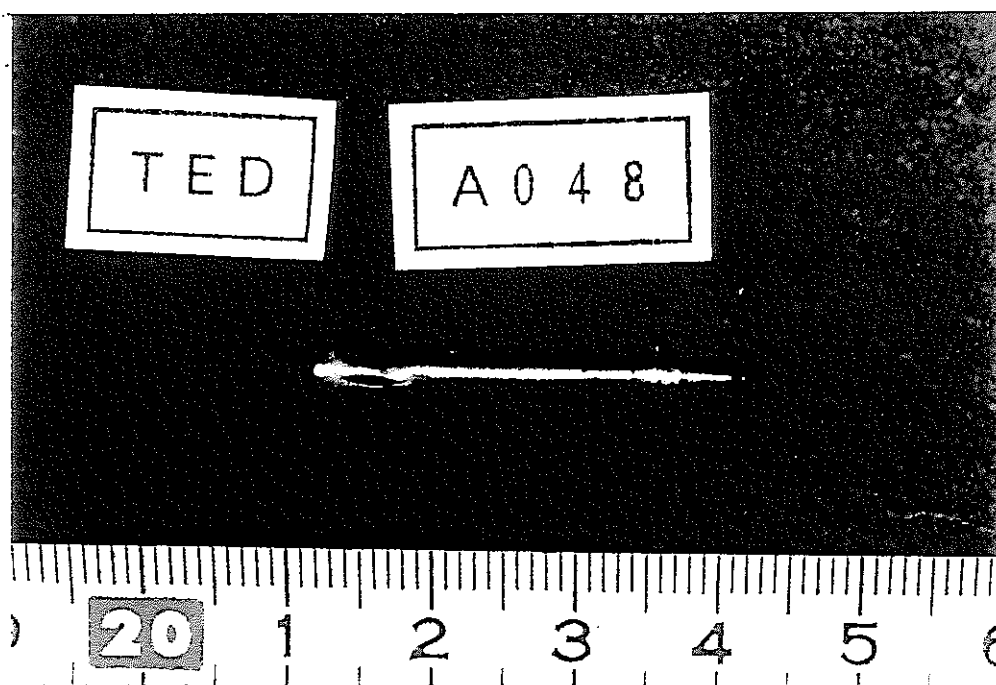


加熱試験装置

添付写真 - 5



加熱後のガラス管



加熱後のTED（冷間加工材）

5. 試作試験－Ⅱ

5.1 TED材質の検討

試作試験－Ⅰにより、TEDの材質には冷間加工材が適さないことが判明した。このため、SUS316相当ステンレス鋼20%冷間加工材で製作したTED部材を焼鈍して、冷間加工材をアニール材に変えた。

5.2 アニール材TED及び米国製TEDとの比較加熱試験

本加熱試験は、アニール材で試作したTEDの健全性及び膨張性について、米国製TEDとの比較試験を実施した。比較試験は、アニール材TED2個と米国製TED1個をステンレス製容器に装荷し、試験温度を800℃まで昇温後、15分間保持してTEDを自然冷却後に取出して外観検査を実施した。

(1) 試験結果

- 1) アニール材TED試作品は、溶接部付近の局部膨張及び破損はなく健全であった。
- 2) 膨張した形状は、米国製TEDとほぼ同形状であった。加熱後のTEDを添付写真－6に示す。
- 3) アルカリ反応による漏洩試験についても漏洩は認められなかった。

さらに、4個の試験試料を用いて健全性及び膨張性の再現性を確認するために再試験を実施したが、局部膨張及び破損もなく健全であった。

5.3 特性試験

(1) 特性試験の目的及び概要

アニール材TEDの試作品の性能について米国製TEDとの比較試験を行った。比較試験は、試作品5個、米国製5個の特性試験を（メーカーに依頼）実施した。

特性試験は、TEDをアルゴンガス雰囲気中で350℃から750℃まで50℃ステップで昇温し、そのステップの昇温後にTEDの体積測定を行う。

体積測定方法は、TEDの重量を空気中と液中（蒸留水）で電子天秤により測定し、空気中と液中との浮力と蒸留水の密度により体積を求める。測定は5回行い、最大値と最小値を除く3平均で測定する。

各温度における体積増加量の変化から校正曲線を求め、試作品5個と米国製5個の膨張率を比較するものである。

(2) 試験結果

膨張率の測定結果は図-5に示すように、米国製TEDでは膨張率増加のばらつきが少ないのに対して、試作品TEDは約500℃以下において膨張率増加のばらつきが見られた。

高温領域での膨張率変化は試作品、米国製ともほぼ同様である。試作品は、ナトリウム充填量のばらつきが大きく、TED内でのナトリウム膨張率のばらつきであると推定した。このため、米国製と試作品との製造方法についてANLからの情報に基づき比較検討を行った。

(3) 米国製TEDと試作品の製造方法の比較結果

項目 \ TED	米国製TED ニッケル合金 (インコネル600)	試作品 (SUS3167ニッケル材)
Na 充填温度	約650℃	約280℃
保持時間	充填後：1h保持	充填後：15分保持
密封溶接	真空中	Heガス雰囲気中
セッティング	350℃ 約1時間保持	—————

- 1) 米国製TEDは、TED容器本体へのナトリウム充填を高温（約650℃）で行い、さらに、ナトリウムとの濡れ性を良くするためにナトリウム中で約1時間保持していることが判明した。
- 2) TED容器本体と金属球との抵抗溶接を真空中で実施している。
- 3) 米国製TEDは、製品をヘリウムガス雰囲気中で一定温度まで昇温し、TED材質の塑性歪みを発生させるセッティングを行っている。

製造方法の比較検討結果により、ナトリウム充填方法及び金属球の抵抗溶接方法の見直しを行いナトリウム充填装置、抵抗溶接装置の改造を実施した。

5.4 装置改造

5.4.1 ナトリウム充填装置の改造

ナトリウム充填部の加熱方法をマイクロヒーターから電気炉に変更し、ナトリウムの充填を高温でできるように改造した。改造にともなう温度制御回路及びナトリウム充填ホルダーの構造変更も行った。改造後のナトリウム充填装置を図-6に示す。また、装置各部の熱電対取付け位置を図-7に示す。

(1) 装置改造点

- 1) ナトリウム充填部の温度を300℃～650℃の範囲で制御を可能に変更した。
- 2) ナトリウム充填部の制御回路を1回路から充填部、上部及び下部ヒーター部、ガスタンク部の4回路に変更した。
- 3) 上部及び下部ヒーター部の温度を200℃～300℃の範囲で制御を可能に変更した。
- 4) ナトリウム充填時の充填部の温度差を少なくするために充填ホルダーを6個×3段に変更した。
- 5) ガスタンクにヒーターを追加したことにより、充填部の余剰ナトリウムドレンを高温ガスで可能にした。

(2) ナトリウム充填方法の見直し検討

1) ナトリウム充填条件の検討

ナトリウム充填装置の改造後に、以下の条件でナトリウム充填試験を2回実施した。

① ナトリウム充填試験（1回目）

イ) ナトリウム充填条件

TEDセット数	:	6個×3段=18個
TEDセット状態	:	下向き
ナトリウム充填温度	:	充填部----- 650℃ Naタンク部 ----- 300℃ 上部・下部ヒーター部 ----- 300℃ ガスタンク部 ----- 300℃
充填前保持時間	:	充填温度到達後1時間保持（真空中）
充填時間	:	約10分→温度変化確認後1時間保持
降温	:	650℃→300℃
ドレン	:	自然落下→20分 加圧方法→3回、ドレンガス温度300℃

ロ) ナトリウム充填結果

外観検査 : ・表面に酸化膜が付着していた。

- ・表面の酸化膜を除去するため電解エッチングによりエッチング条件(液, 時間等)を変え何度も繰返し実施したが、エッチング条件を見出すことができず表面の酸化膜を除去することができなかった。

充填量確認 : ・表面に酸化膜が付着していたため重量測定は実施しなかったが、2段目、3段目のTEDは入口部までナトリウムが充填されてなかったが1段目のTEDには入口部までナトリウムが充填されていた。

② 充填試験2回目

1回目の試験結果から、各段におけるTED容器本体内のナトリウム充填量の確認と酸化膜の付着を防ぐため、ナトリウム充填試験を実施した。

イ) ナトリウム充填条件

TEDセット数	:	1段目→3個 2段目→3個 3段目→4個	} 計10個
TEDセット状態	:	上向き	
ナトリウム充填温度	:	充填部 -----	300℃
		Naタンク部 -----	300℃
		上部・下部ヒーター部 -----	300℃
		ガスタンク部 -----	300℃
充填前保持時間	:	充填温度到達後1時間保持(真空中)	
充填時間	:	約15分→温度変化確認後1時間保持	
充填部昇温	:	300℃→650℃到達後1時間保持	
降温	:	650℃→300℃	
ドレン	:	自然落下→20分	
		加圧方法→3回、ドレンガス温度300℃	

ロ) ナトリウム充填結果

外観検査 : ・表面への酸化物の付着は見られなかった。

充填量確認 : 1段目 ① 90.3%
② 92.6% → 入口部までナトリウム有
③ 87.2%
2段目 ① 87.4%
② 89.1%
③ 88.4%
3段目 ① 82.8%
② 90.5% → 入口部までナトリウム有
③ 87.0%
④ 90.4% → 入口部までナトリウム有

2回目の充填試験は、各段におけるTED容器本体内のナトリウム充填量の均一性と酸化物付着の除去を目的に行った。この結果、表面に酸化物等の付着は見られなかったが、ナトリウム充填量に均一性がなく各段ともばらつきがあった。

このため、ナトリウム充填前の真空保持時間及び650℃昇温後の保持時間を1時間延長し、充填試験を数回実施したが、充填量のばらつきは解消できなかった。

(3) ナトリウム充填量ばらつき調査

ナトリウム充填量のばらつきは、ナトリウム充填装置内の真空度の低下、ナトリウム純度の低下が原因と考えられた。このため、ナトリウム充填装置の真空度確認及びナトリウム純度分析を実施した。

1) ナトリウム充填装置真空度確認試験

① 真空度確認

ナトリウム充填装置内の真空度確認は、真空ポンプの真空度到達上限値を確認した後、各配管継手部を仕切り、各箇所の配管継手部までの真空度確認を行った。真空度確認は、下記に示す6箇所を実施した。真空度確認試験箇所を図-8に示す。

I. 真空ポンプの性能確認

II. ガスタンク部

III. ベーパートラップ部

IV. ナトリウム充填部

V. V-7, V-8, V-9の仕切りバルブ間

VI. 装置全系統

② 確認結果

各配管継手部の真空度確認をしたところ 5×10^{-1} Torrと悪いため、各配管継手部を全て交換し、真空度を 5×10^{-1} Torrから 8.5×10^{-2} Torrまで改善した。各配管継手部の真空度確認結果を表-4に示す。

2) ナトリウム純度分析

ナトリウム純度分析は、ナトリウムをサンプリング容器(約30g)に充填し、ナトリウム中の不純物である酸素、水素、カーボン、メタルについて濃度分析を行った。分析結果は、酸素濃度と水素濃度がやや上昇していたが、ナトリウム充填には影響がないことを確認した。ナトリウムの不純物濃度分析結果を表-5に示す。

また、サンプリング容器をグローブボックス内で切断したところ、容器中心部から上部にかけてナトリウムが充填されていないことが確認された。原因は、ナト

リウム充填後のドレン時に仕切りバルブ（V-8）からナトリウム液面間にガス溜まりが生じ、ナトリウムより先にガス溜まりのガスが容器内に入るためガス量分だけナトリウムが充填されないと考えられた。このため、TED容器本体内へのナトリウム充填量がばらつく原因であると考察された。

3) ナトリウム充填量ばらつき調査まとめ

ナトリウム充填装置の真空度確認により、TED容器本体へのナトリウム充填前に充填装置の真空度を確認し、真空度が低下している場合は、配管及び継手の交換が必要である。また、ナトリウムバルブ類の洗浄も必要である。

さらに、充填装置内の仕切りバルブV-8とナトリウムタンク内配管に溜まったガスを抜くために、仕切りバルブV-7と仕切りバルブV-8の間にサンプリング容器を取付けてガス抜きを実施した。TED容器本体内へのナトリウム充填前に充填装置内の真空度確認及び仕切りバルブV-8とナトリウムタンク配管のガス抜きを実施したところ、TED容器本体へのナトリウム充填量のばらつきは解消できた。

(4) 充填部切断方法の検討

TED容器本体内へのナトリウム充填終了後、充填装置から充填部を取外し、グローブボックス内に搬入し、充填部配管をパイプカッターで切断（上部・下部2箇所）して、充填ホルダーを配管内から引抜きホルダーを解体した後、TED容器本体を取出す。配管切断は、配管の片側をグリッププライヤーで固定しパイプカッターで切断するが、グローブボックス内作業であるため、切断にはかなりの力量・時間が必要である。また、配管の落下及びTED容器本体破損の危険性があり作業性が非常に悪い。さらに、配管切断部にバリが生じるためTEDの取出しの際にTED容器本体表面を傷つけてしまい製品にならないため、配管の切断方法を検討した。

1) 対策

- ① 充填部配管の切断位置内面に溝を機械加工し、切断時に生じるバリを溝内に収めるように配管構造を変更した。
- ② 充填部配管の安定性を改善するため、図-9に示す治具(A)を万力により固定し、治具(A)に治具(B)をボルトで固定し充填部配管の切断角度を調整可能な治具の製作を実施した。

2) 結果

- ① グローブボックス内における充填部配管の切断時間が大幅に短縮され、作業性が向上した。
- ② 充填部配管の落下及びTED容器本体破損の危険性が解消できた。
- ③ TED容器本体に傷を付けないで取出しが可能になったため、製品の歩留りが向上した。

5.4.2 TED溶接装置の改造

TED容器本体と金属球の抵抗溶接をヘリウムガス雰囲気から真空中溶接に変更するため、真空用溶接ヘッド及び真空チャンバーの製作を行い、抵抗溶接装置の改造を実施した。改造後のTED溶接装置を図-10に示す。

(1) 装置改造点

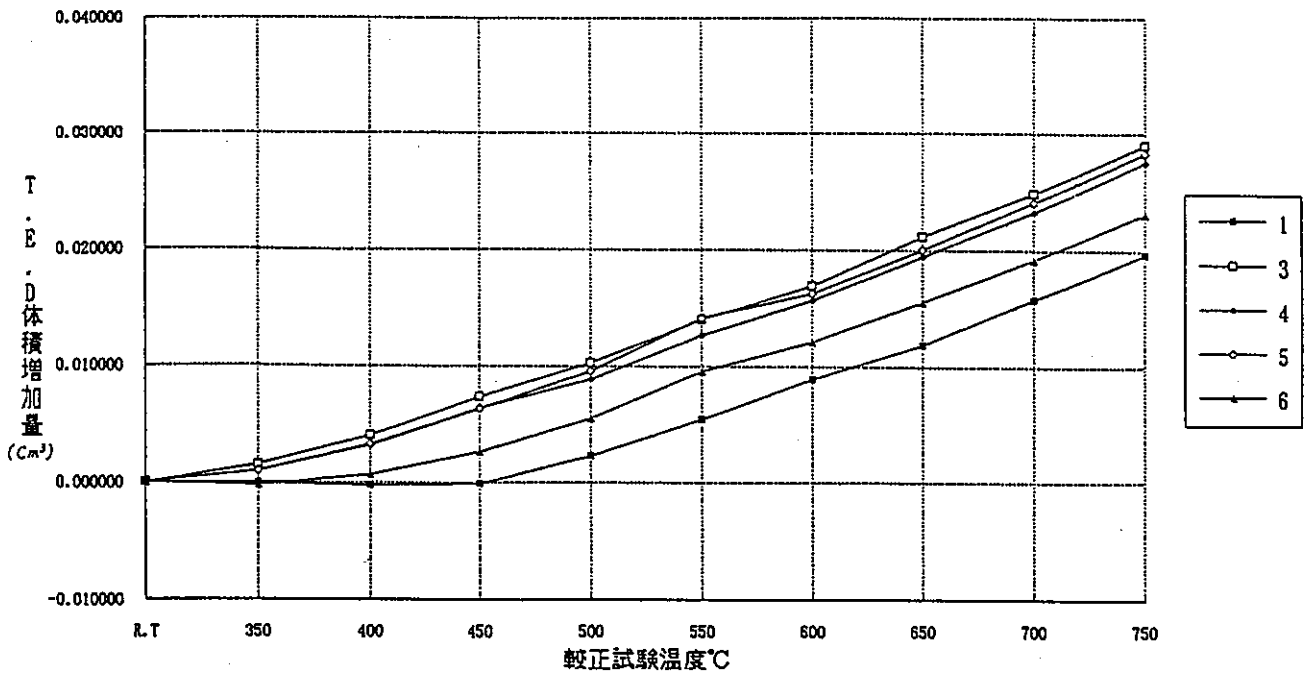
- 1) 真空チャンバーは、不活性ガス精製循環型グローブボックス内に据付け、チャンバー内に溶接ヘッドを内蔵するためチャンバー上部より溶接電極を駆動可能な構造とし、真空仕切弁及びリーク弁、連成計を取付け、上部には照明ポートを設けた。
- 2) 溶接ヘッドは、溶接ワーク部をチャンバー内に内蔵するため、ワーク駆動用シリンダーをチャンバーの外側に取付けてシリンダーロッドを延長した。
- 3) 真空排気ポンプは、不活性ガス精製循環型グローブボックスの外に設置しグローブボックス内の真空チャンバーとフレキシブルチューブで接続した。真空チャンバー内は約1.5 Torr以下に真空引きを可能にした。

表 - 4 真空度確認結果

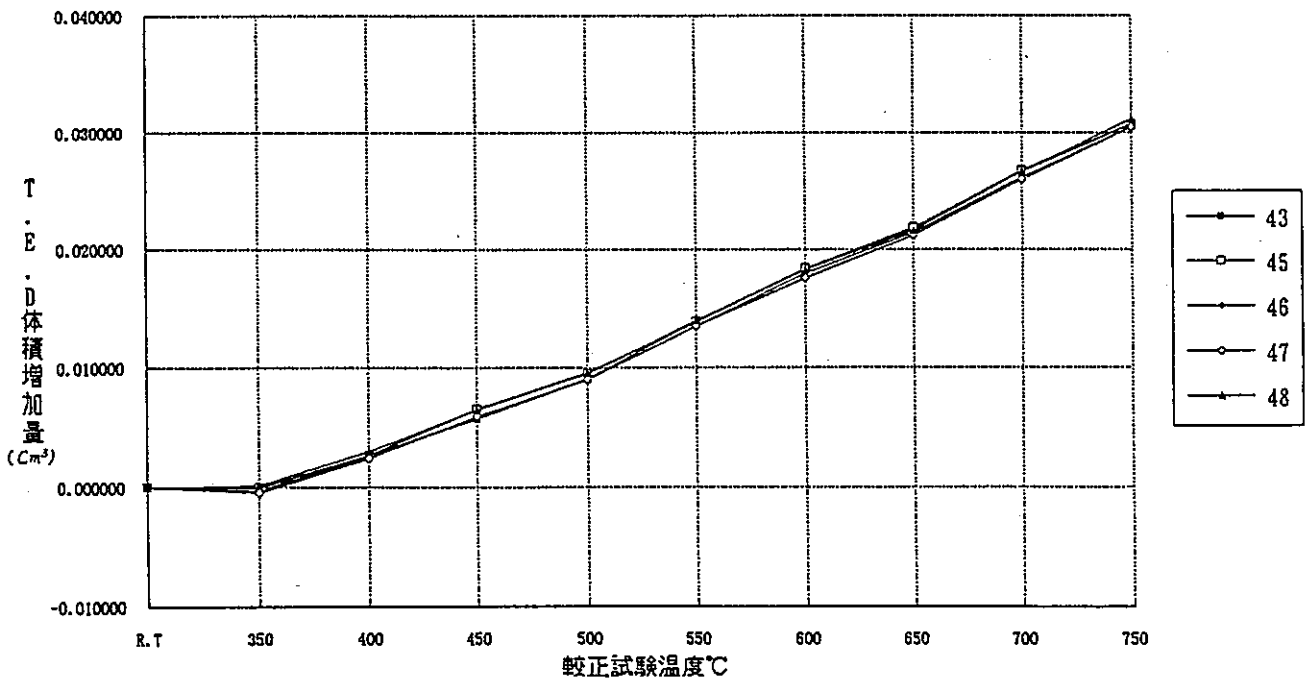
検査項目	測定箇所	測定時間	測定値	
			交換前	交換後
検査結果	①ガスタンク	1.5 H	交換前	9.0×10^{-1} Torr
			交換後	5.0×10^{-3} Torr
	②ベーパートラップ	1.0 H	交換前	3.0×10^{-2} Torr
			交換後	2.3×10^{-3} Torr
	③充填部	1.5 H	交換前	1.1×10^{-1} Torr
			交換後	5.0×10^{-3} Torr
	④バルブ7、8、9間部	1.5 H	交換前	5.0×10^{-1} Torr
			交換後	1.0×10^{-2} Torr
	⑤全系統	2.0 H	交換前	9.0×10^{-2} Torr
			交換後	5.4×10^{-3} Torr
	⑥真空ポンプ本体	2.0 H		1.7×10^{-3} Torr
	備考	・ 図-8を参照する。	・ デテクターの真空度表示メータが5 mpa 以下になってから測定する。	・ ピラニー真空計表示メータによる。

表 - 5 ナトリウム中の不純物濃度

元素名	TED用ナトリウム (ppm)	AMIR-5 照射キャプセル (ppm)	「JOYO」ナトリウム 購入基準 (ppm)	「JOYO」一次系 ナトリウム受入時 分析結果(ppm)
O	35	3.9	< 30	4.5
H	3.8	1.1	< 5	0.29
C	< 2	2.4	< 30	5.5
N	—	0.31	—	—
Cl	—	0.16	< 30	1.1
Fe	0.024	0.43	< 5	0.04
Ni	< 0.04	0.087	< 1	0.01
Cr	0.009	0.054	< 1	< 0.01



試作試験 I T E D



米國製 T E D

図 - 5 体積測定結果

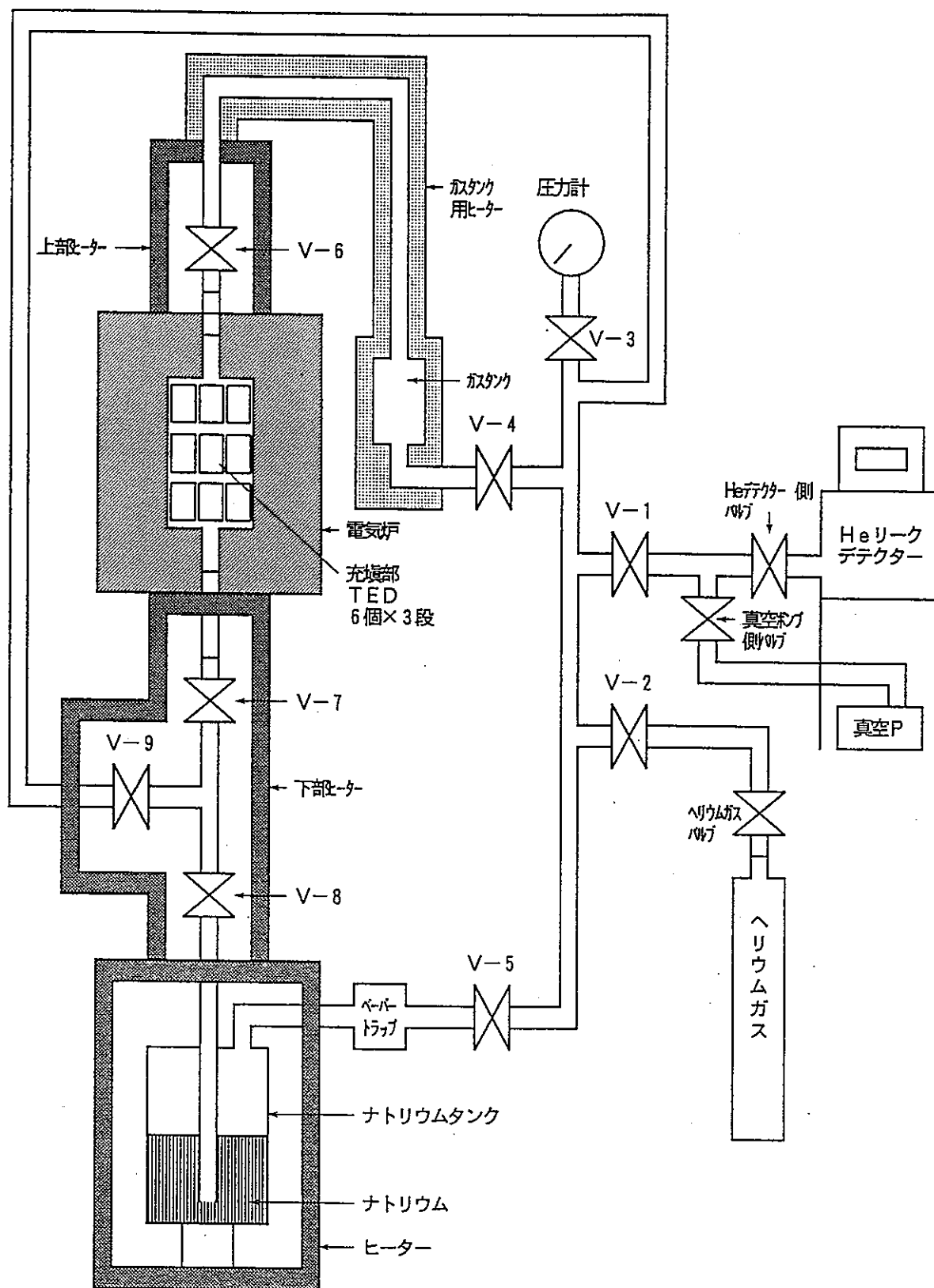


図-6 ナトリウム充填装置 (改造後)

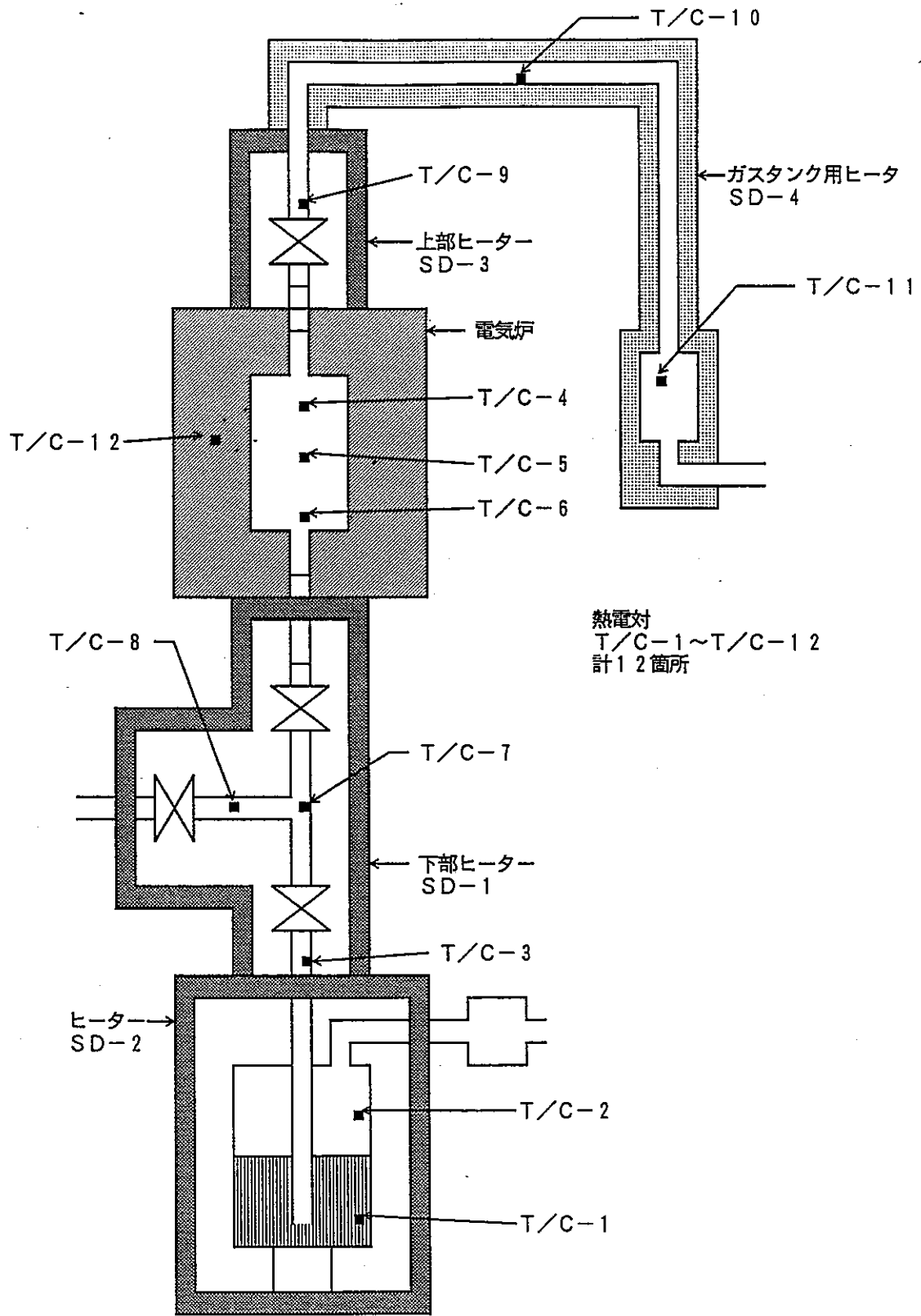


図-7 ヒーター及び熱電対取付位置

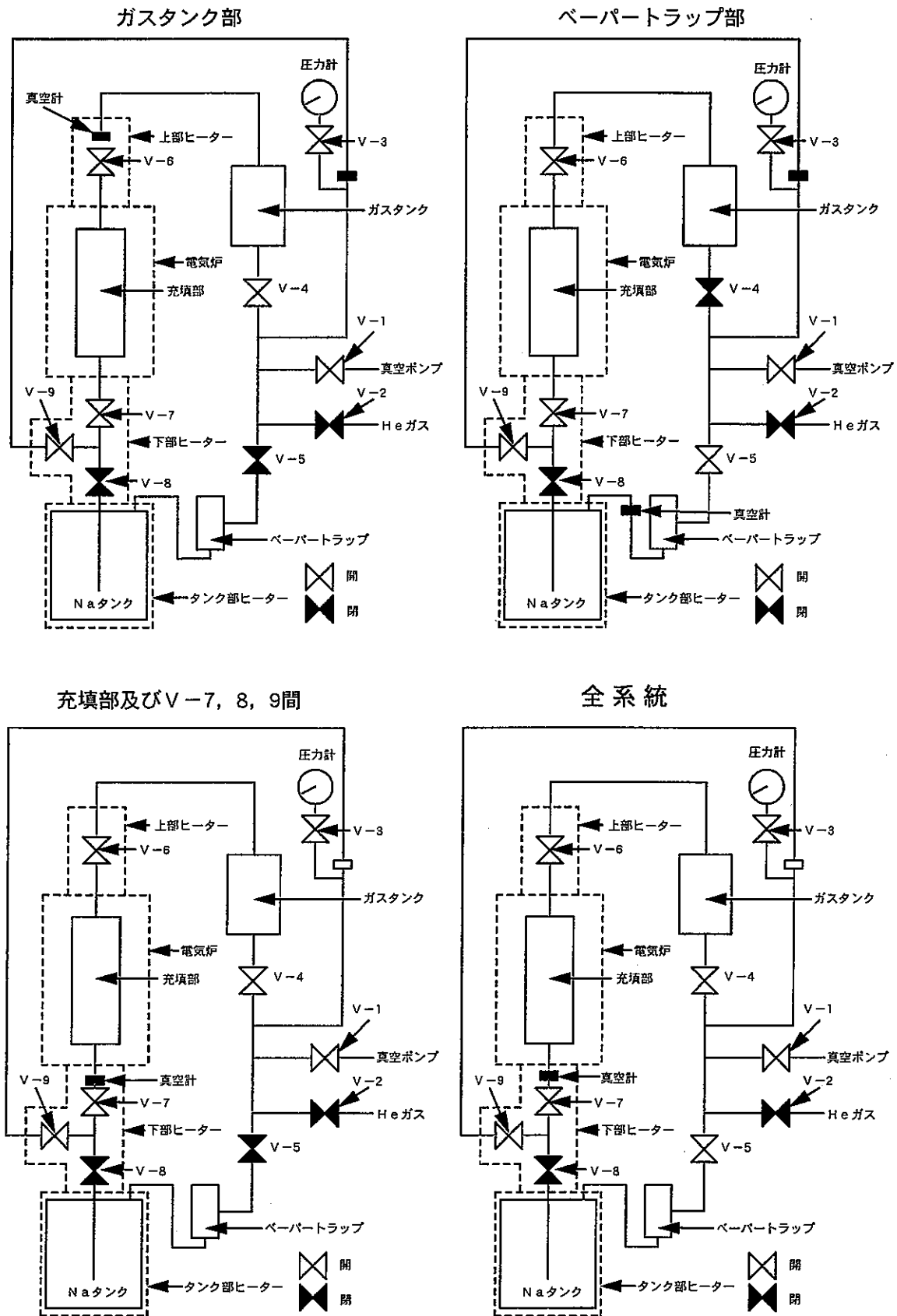


図-8 ナトリウム充填装置真空度確認

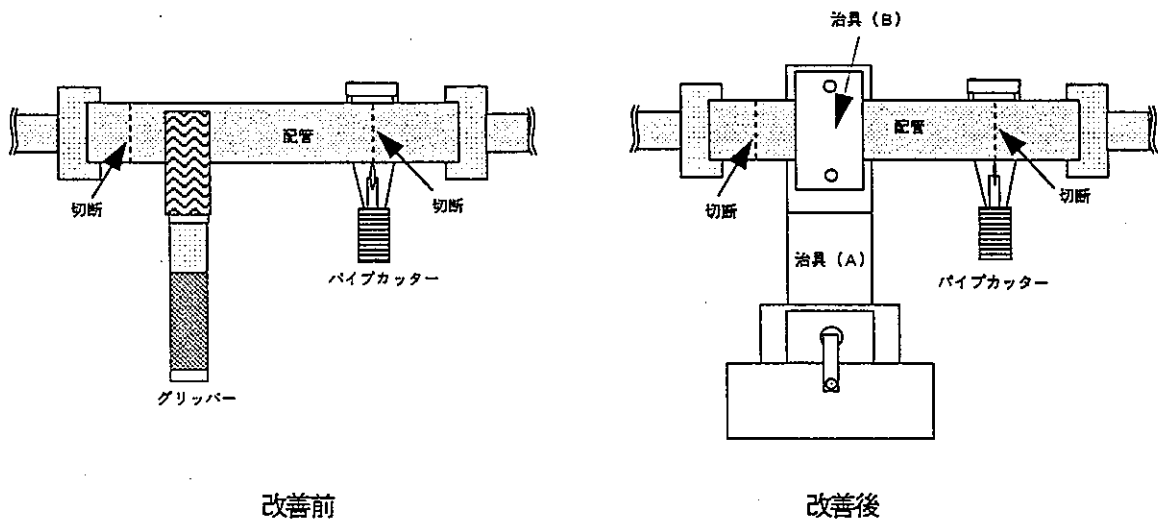
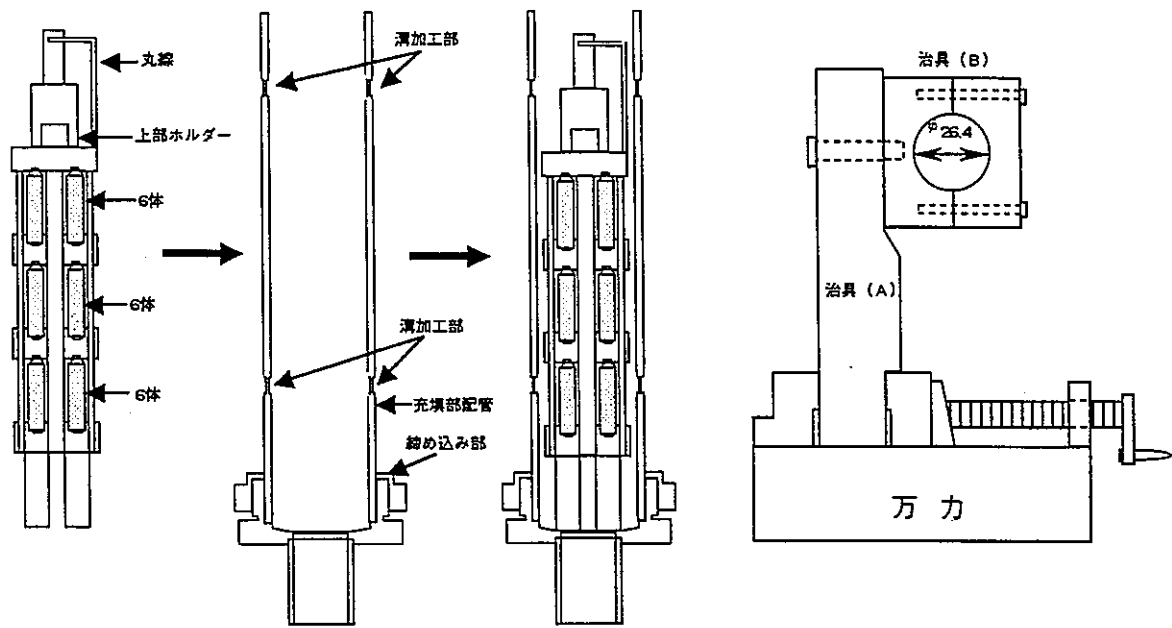


図 - 9 充填部切断方法の改善

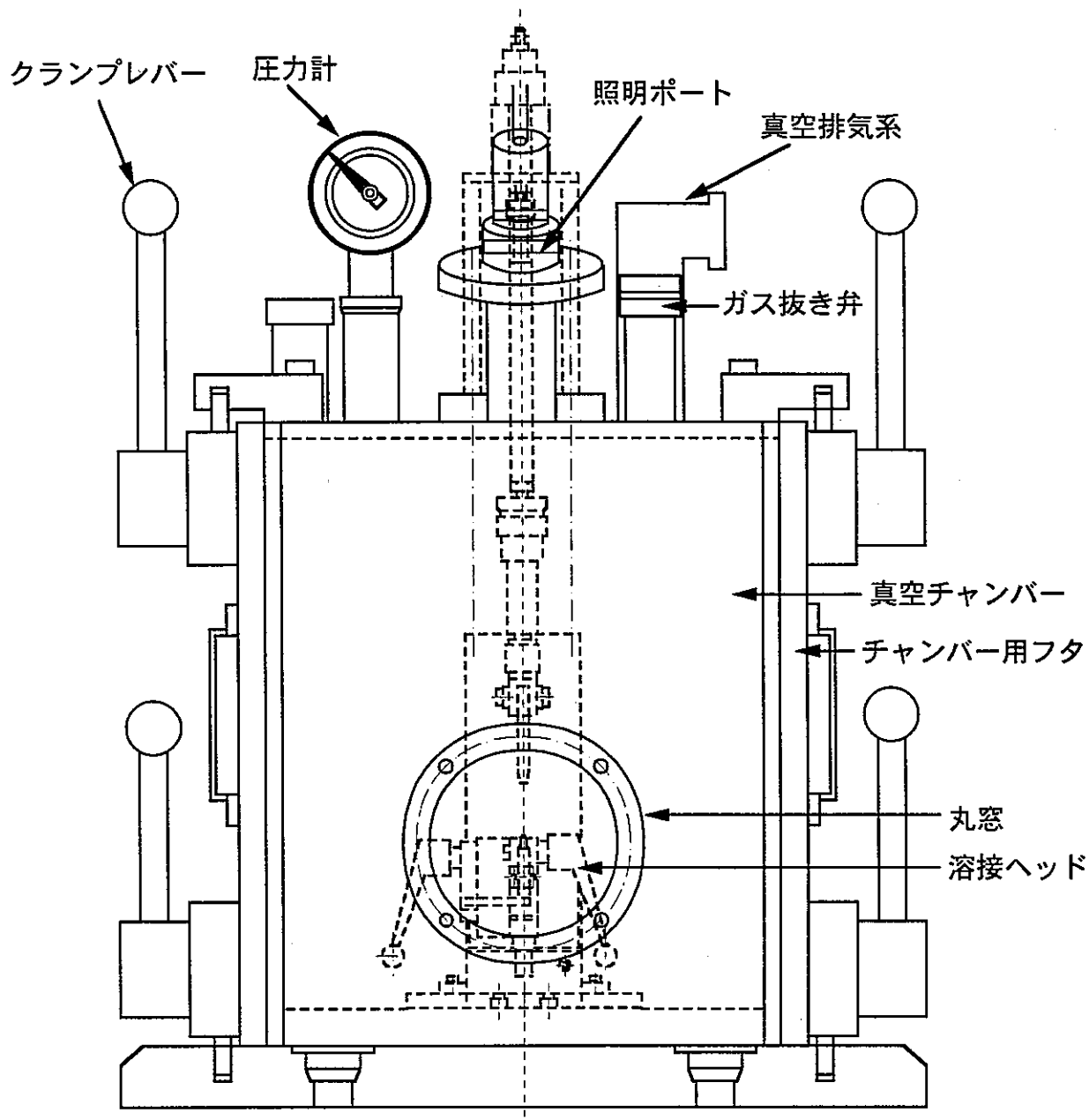
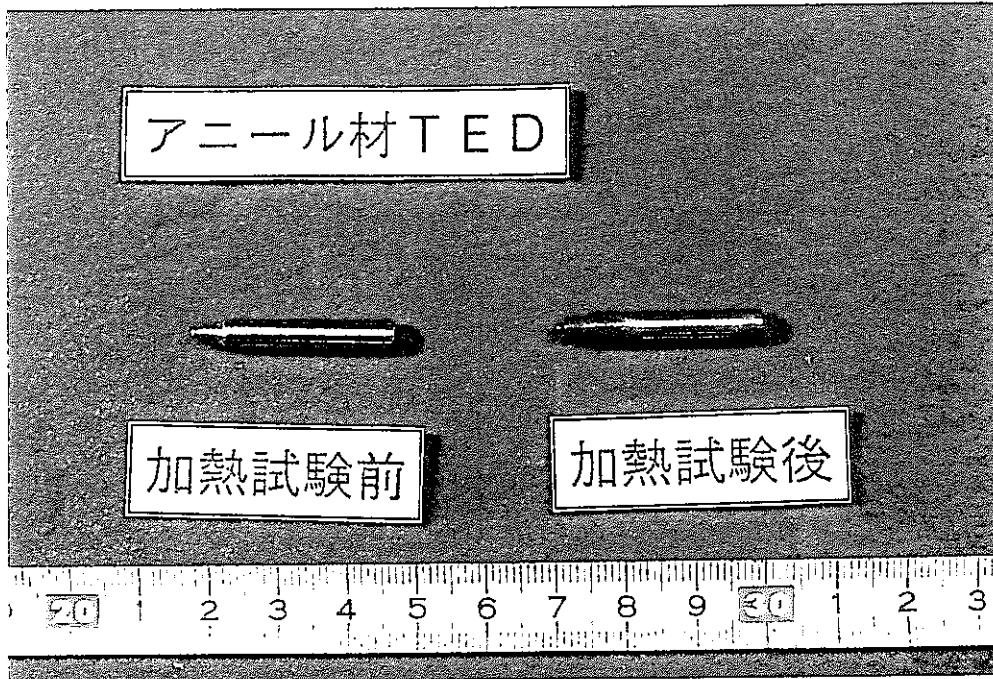


図-10 溶接装置改造図

添付写真 - 6



アニール材TED (加熱前、加熱後)



アニール材TEDと米国製TEDの膨脹比較

6. 実機製作

6.1 ニッケル合金材（インコネル600）TEDの溶接施行試験

6.1.1 溶接条件の検討

試作試験において、SUS材TED容器本体と金属球の抵抗溶接技術は確立していたが、改造後の溶接装置を用いてニッケル合金材TEDの溶接試験を実施した。

ニッケル合金は、SUS材と材質が異なるためにSUS材TEDの溶接条件（電流値、通電時間、軸荷重）をパラメータに振り溶接試験を実施した。以下に、溶接条件表を示す。

条件項目	条件-1	条件-2	条件-3	条件-4	条件-5	条件-6
電流値 (KA)	1.5	1.5	1.7	1.0	1.3	1.9
通電時間 (m/sec)	3	3	3	3	3	2
軸荷重 (kg)	8	10	10	6	6	10
溶接部外観	×	×	×	○	○	○
断面検査	×	×	×	×	×	○
再現性確認	×	×	×	×	×	○

(1) 試験結果

各抵抗溶接条件結果を以下に示し、断面金相写真を添付写真-7に示す。

- 条件-1から条件-3で溶接した結果は、溶接部外観は不良であり、溶接面（接触面）の変形が生じた。さらに、溶接部の断面金相を確認した結果、金属球の下部が融失し、溶接部の溶け込みが不均一であった。
- 条件-4から条件-5で溶接した結果は、溶接部外観は良好であるが、溶接部の断面金相を確認した結果、溶接部の溶け込み状態が不足していた。
- 条件-6で溶接した結果は、溶接部外観は良好であり、溶接ビード部も均一であった。ヘリウムリーク試験による漏洩も認められなかったため、条件-6による再現性試験を試験試料4個を用いて実施した。その結果、4個のうち2個の溶接状態が不均一であり、再現性は得られなかった。原因は、TED容器本体と金属球を押しつける電極との芯づれが考えられたため、溶接装置の芯出し調整を実施した。

6.1.2 溶接装置芯出し調整

溶接装置の芯出し調整を繰り返し行ったが、芯づれは解消できなかった。このため、再度、原因を検討したところSUS材の金属球に比べニッケル合金材金属球の方が直径で約0.1mm大きいことが判明した。SUS材の溶接に使用していた電極の金属球接触面が小さいため、ニッケル合金材金属球の芯出し調整は不可能であり、さらに、金属球上部面にも傷が付くものと考えられた。このため、ニッケル合金材金属球用電極の製作を行った。

6.1.3 電極の製作

電極の製作は、電極の端面中心部にセンター穴を加工し、電極を上部架台に取付ける。TED容器本体を下部架台にセットし、ニッケル合金材金属球をTED容器本体入口部に乗せ、上部圧力により上部電極を降下させ、金属球に電極の端面中心穴加工部を押し付け電極の先端を球面状に加工する。電極の材質は、クロム銅である。電極の製作方法を図-11に示す。

製作した電極を用いて試験試料4個の溶接試験を実施した結果、溶接性は全て良好であった。また、芯づれも解消され、溶接の再現性も得ることができた。

6.1.4 ナトリウム充填後の溶接部の洗浄・加工方法の検討

ナトリウム充填装置の改造及びナトリウム充填方法の変更により、TED容器本体内部へのナトリウム充填率は約95%以上が可能になった。ナトリウム充填量の増加に伴い金属球の抵抗溶接性を考慮し、ナトリウム充填後の溶接部の洗浄及びナトリウム入口面の面取り方法の改善を図った。溶接部の洗浄及び面取り加工は、以下に示す方法に改善した。TED容器本体入口部のナトリウム洗浄及び加工方法を図-12に示す。

- (1) 電子天秤により洗浄前のTED容器本体内部のナトリウム充填量の測定を行う。
- (2) アルコールによりTED容器本体ナトリウム入口部のナトリウムを除去する。
- (3) ナトリウム入口部のナトリウムの有無をルーペで確認する。
- (4) ナトリウム入口部内面を面取りリーマにより約0.3mmから0.5mm程度の面取り加工を行う。
- (5) 溶接部表面のバリをスクレーパーで削り取る。
- (6) 溶接部をアルコールにより洗浄し、溶接部をルーペで確認する。
- (7) 電子天秤によりTED容器本体内部のナトリウム充填量の測定を行う。

6.2 ニッケル合金材TED容器本体へのナトリウム充填

試作試験により、TED容器本体へのナトリウム充填技術を確立した。TED容器本体へのナトリウム充填率は95%以上である。このため、米国製TEDと同材質のニッケル合金材で製作したTED容器本体へのナトリウム充填を90個実施した。

(1) ナトリウム充填条件

TEDセット数	:	1段目→6個 2段目→6個 3段目→6個
ナトリウム充填温度	:	充填部 ----- 300℃ Naタンク部 ----- 300℃ 上部・下部ヒーター部 ----- 300℃ ガスタンク部 ----- 300℃
充填前保持時間	:	充填温度到達後3時間保持（真空中）
充填時間	:	温度変化確認後30分保持
充填部昇温	:	300℃→650℃到達後2時間保持
降温	:	650℃→300℃
ドレン	:	自然落下→20分 加圧方法→3回, ドレングス温度300℃

ナトリウム充填におけるナトリウム充填温度・時間グラフを表-6に示す。

(2) ナトリウム充填結果

ナトリウム充填量の確認は、TED容器本体の充填後重量から充填前重量を差引きして算出した。また、ニッケル合金材TED90個のナトリウム充填率は、95%以上が84個、94%以上が6個である。

ナトリウム充填結果を表-7に示す。

6.3 ニッケル合金材TED容器本体と金属球の抵抗溶接

ニッケル合金材TED90個の製品についてTED容器本体と金属球の抵抗溶接を実施した。製品の検査は、溶接部外観検査、重量測定、フェノールフタレン液によるアルカリ反応漏洩検査を行い、90個全て合格であった。

6.4 セッティング

試作試験により低温での体積増加のばらつきを無くすため、セッティングによって塑性歪みを与え、TEDの特性を整えることが必要であることが判明した。

セッティングはTED容器本体と金属球の抵抗溶接後、健全性試験に合格したTEDを充填ホルダーに組み込み、ナトリウム充填装置の充填部配管内にセットする。充填部配管

内をヘリウムガス雰囲気中にし「常陽」の第1次入口ナトリウム温度の350℃まで昇温し、1時間保持し熱処理を行う。熱処理後、充填部配管内よりTEDを取出し体積測定を行う。

6.5 炉外校正試験

6.5.1 校正試験概要

校正試験は、図-13.1に示す試験容器内にTEDをセットし、試験容器内をヘリウムガス雰囲気に置換後、各試験温度（350℃～850℃まで50℃ステップ）まで赤外線加熱炉によりTEDを昇温する（図-13.2参照）。各試験温度（誤差範囲±2.5℃）で1時間TEDを加熱し、降温後、TEDを試験容器から取外して体積測定を行い、温度と体積の変化から校正曲線を求める。TEDの体積測定方法は、図-14に示すように、測定治具とTEDの重量を空气中及び液中（純水200cc+界面活性剤2～3滴）で電子天秤により0.01mg単位まで測定する。測定手順は測定、超音波洗浄、乾燥を5回繰り返す。

6.5.2 校正試験結果

照射装置組立検査施設（IRAF）において、炉外校正試験装置の製作及び試験方法の検討を行い実施した。

TEDニッケル合金材を使用した製品の炉外校正試験は、5試料（充填率約94%～98%）を用いて行ったが、試験試料5個の内2個が850℃での加熱中に破損した。この結果、TEDニッケル合金材の使用範囲は350℃から800℃程度までが限度であることが確認できた。

なお、TEDの精度はナトリウム充填率95%以上の製品は±5℃であり、ナトリウム充填率94%では±10℃以内である。

各試験温度における校正曲線を図-15に示す。

6.5.3 体積測定方法の検討

(1) 測定方法

TEDの体積測定は、TEDの重量を空气中及び液中（純水）で測定し求める。重量測定方法は、測定治具とTEDを電子天秤により0.01mg単位まで測定し、重量測定、超音波洗浄、乾燥を5回繰り返す。

(2) 測定時の不具合

測定治具のピアノ線と風袋及びフックの接続部にくせがつき、ピアノ線に曲がりが生じるために2回目以降の測定時にはピアノ線にスプリング効果が生じ、測定値が1mg単位でばらつき、測定精度が非常に悪く測定時間も費やした。

(3) 測定方法の改善

重量測定時のばらつきをなくすため、測定治具のピアノ線と風袋及びフックの接続方法をハンダ付けに変更した。また、治具の洗浄時にピアノ線に曲がりが生じるため、どぶ漬洗浄から吊り下げ洗浄方法に改善した。さらに、測定治具を5個製作し治具とTEDをセットにして洗浄・乾燥の待ち時間を無くし、測定方法の合理化を図った。改善後の測定方法を図-16に示す。

(4) 改善結果

測定治具及び洗浄方法を改善したことにより、重量測定が0.01mg単位まで正確に測定可能になり、TEDの体積測定精度を向上することができた。また、測定治具を増やしローテーション方式にしたことにより、従来の2倍量の測定が可能になり作業効率の向上が図れた。

さらに、TEDの体積測定精度を上げることにより、照射試験では最も重要な照射温度を精度良く同定することができ照射精度の向上が図れた。

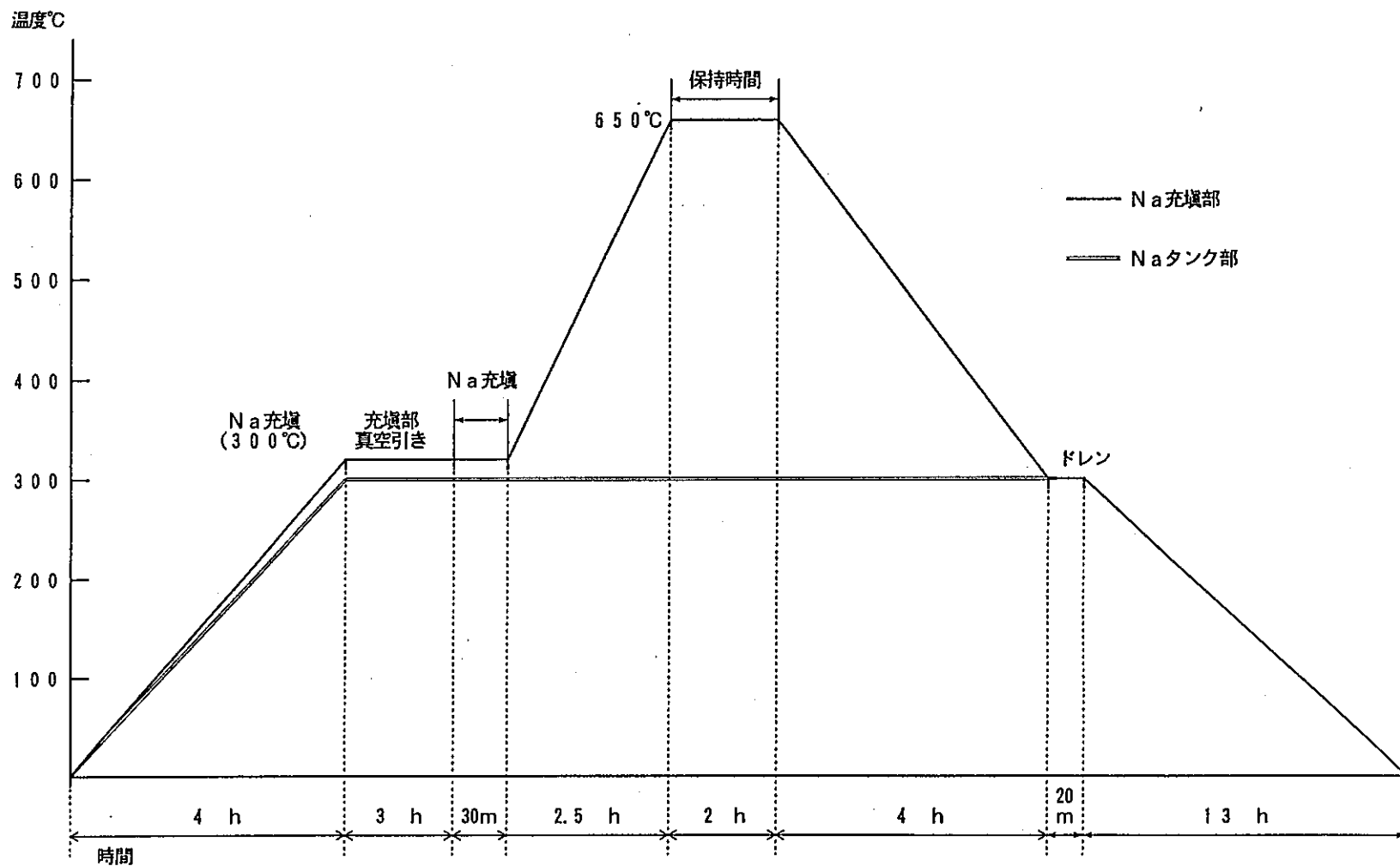
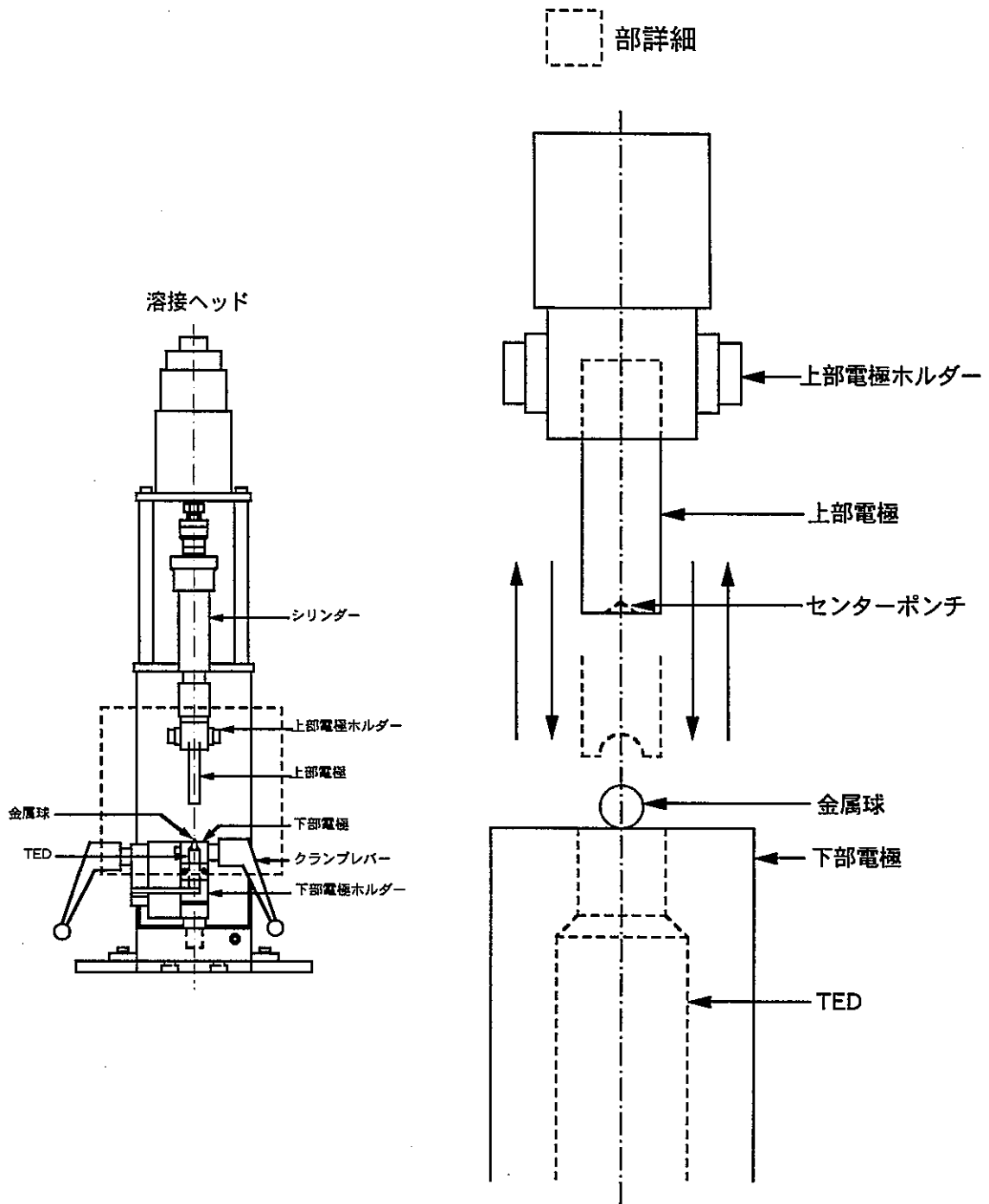


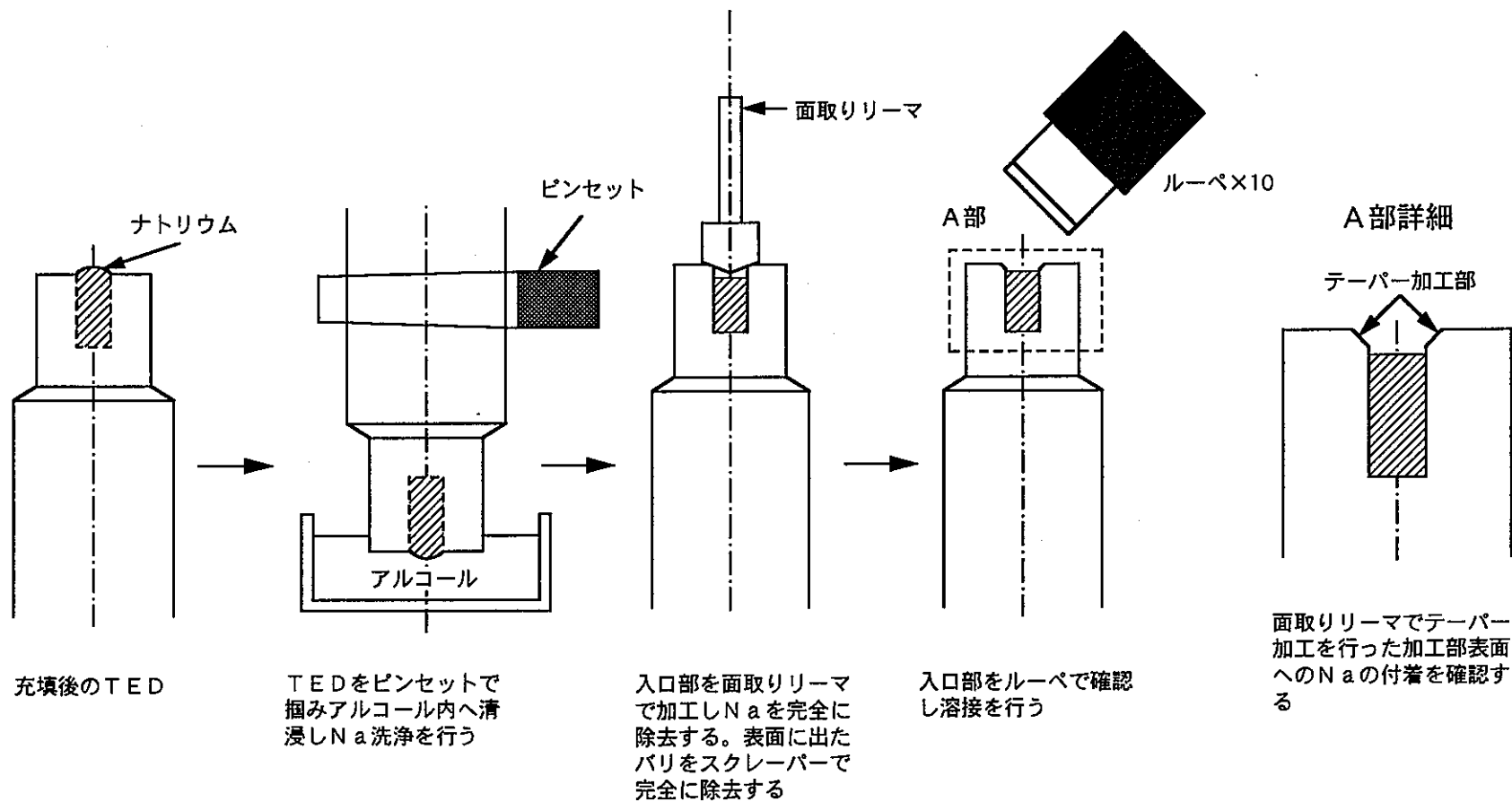
表-6 ナトリウム充填温度・時間グラフ表

表-7 ナトリウム充填結果

TED№	ナトリウム充填量 (g)	ナトリウム充填率 (%)	TED№	ナトリウム充填量 (g)	ナトリウム充填率 (%)
B056	0.29085	97.4	B106	0.28560	95.7
B058	0.28470	95.4	B108	0.28478	95.4
B059	0.28516	95.5	B109	0.28570	95.7
B061	0.28144	94.3	B110	0.28789	96.5
B063	0.28420	95.2	B111	0.29204	97.8
B064	0.29115	97.5	B112	0.28386	95.1
B065	0.29089	97.5	B113	0.28394	95.1
B071	0.28666	96.0	B114	0.28565	95.7
B072	0.28860	96.7	B115	0.28737	96.3
B073	0.28478	95.4	B116	0.28616	95.9
B074	0.28262	94.7	B117	0.29204	97.8
B075	0.28443	95.3	B118	0.29052	97.3
B076	0.29158	97.7	B119	0.28593	95.8
B078	0.28479	95.4	B120	0.28996	97.1
B079	0.28491	95.5	B121	0.29044	97.3
B081	0.29017	97.2	B123	0.28346	95.0
B082	0.28467	95.4	B124	0.28286	94.8
B083	0.28230	94.6	B125	0.28406	95.2
B084	0.29037	97.3	B126	0.28443	95.3
B087	0.28912	96.9	B127	0.28396	95.1
B088	0.29069	97.4	B128	0.29107	97.5
B089	0.28799	96.5	B129	0.28414	95.2
B090	0.28915	96.9	B130	0.28397	95.1
B091	0.29035	97.3	B131	0.28579	95.7
B093	0.28365	95.0	B132	0.28590	95.8
B094	0.28566	95.7	B133	0.28766	96.4
B095	0.28548	95.6	B134	0.28416	95.2
B096	0.29101	97.5	B135	0.28518	95.5
B097	0.29135	97.6	B136	0.28604	95.8
B098	0.28404	95.2	B137	0.29208	97.9
B099	0.28488	95.4	B138	0.28542	95.6
B100	0.28463	95.4	B139	0.28603	95.8
B101	0.28428	95.2	B140	0.29189	97.8
B102	0.28452	95.3	B141	0.28515	95.5
B103	0.29103	97.5	B142	0.28219	94.5
B104	0.28517	95.5	B143	0.28171	94.4
B105	0.28513	95.5			



図一 1 1 電極製作方法



図一12 溶接部洗浄・加工方法

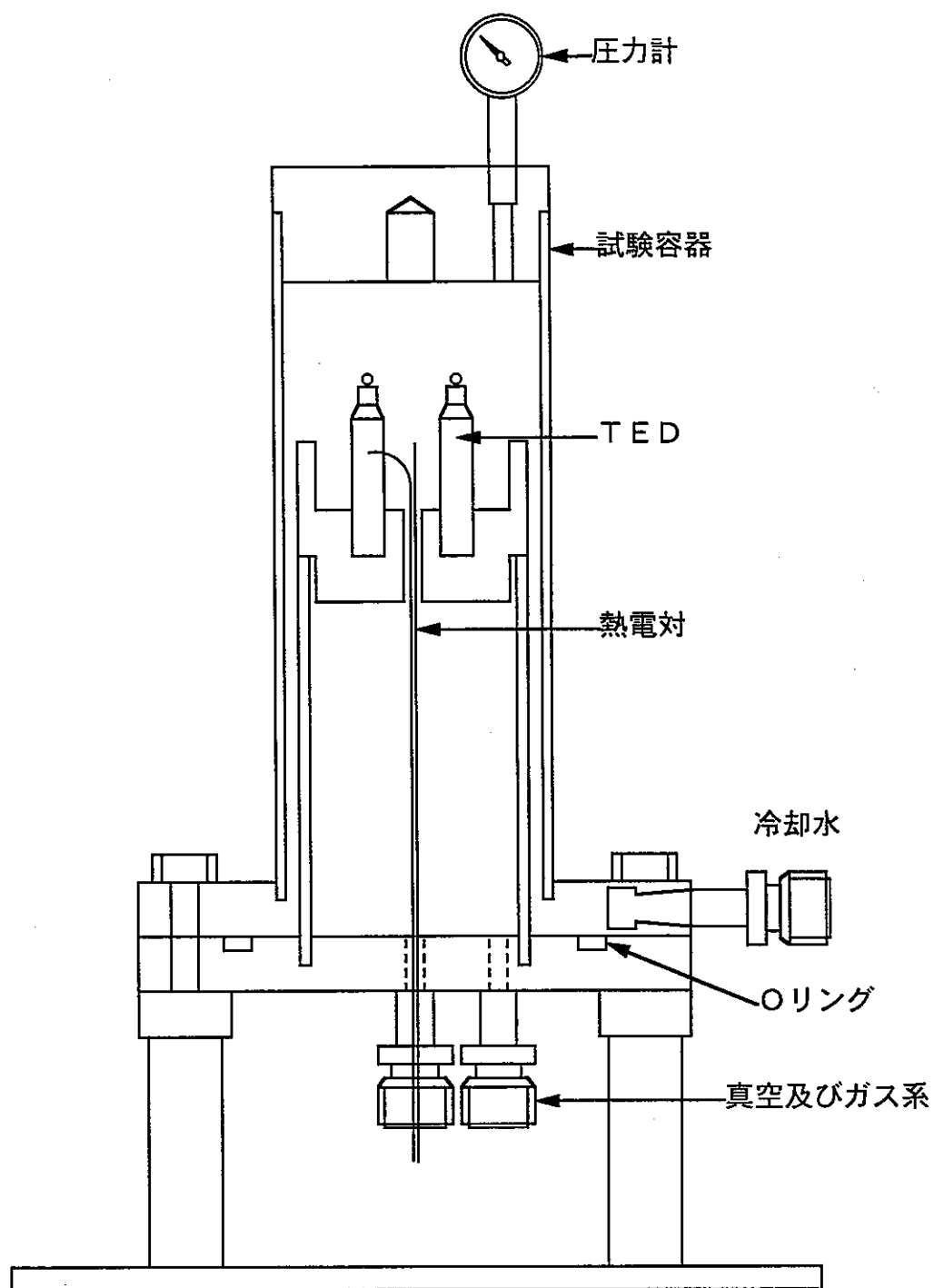


図-13.1 TED・熱電対セット位置

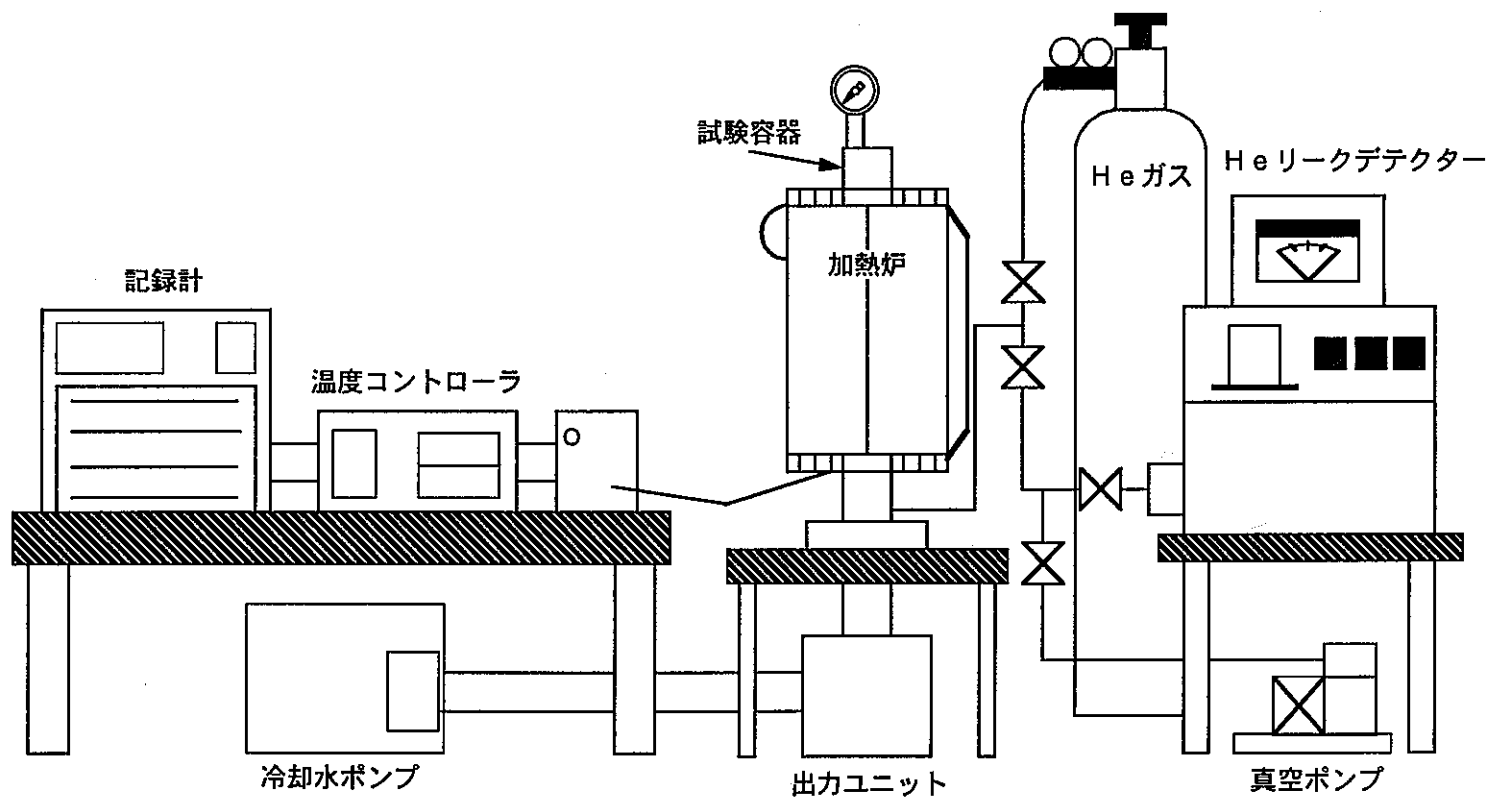
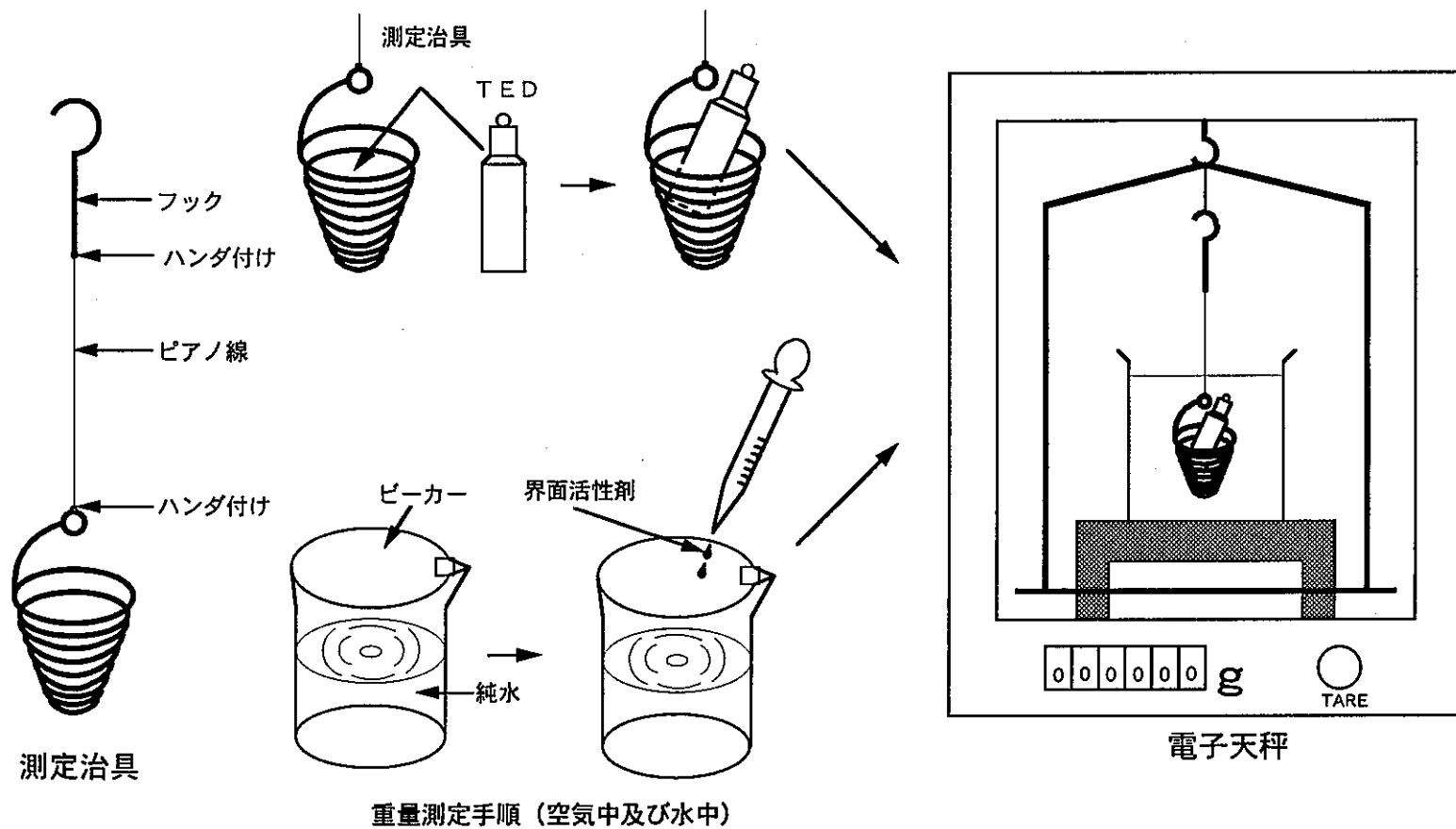


図-13.2 較正試験装置



図一14 TED体積測定方法

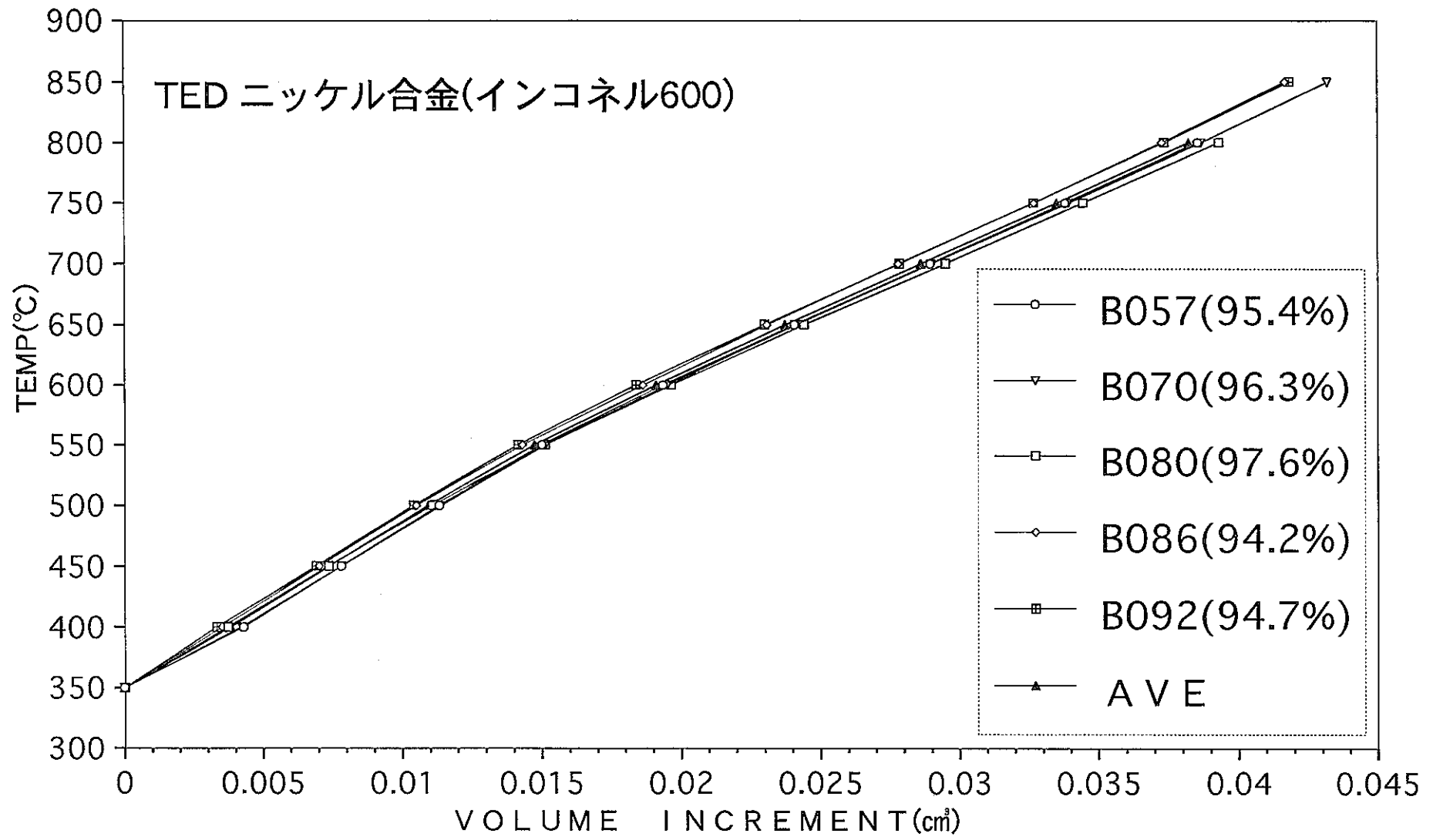


図-15 校正曲線

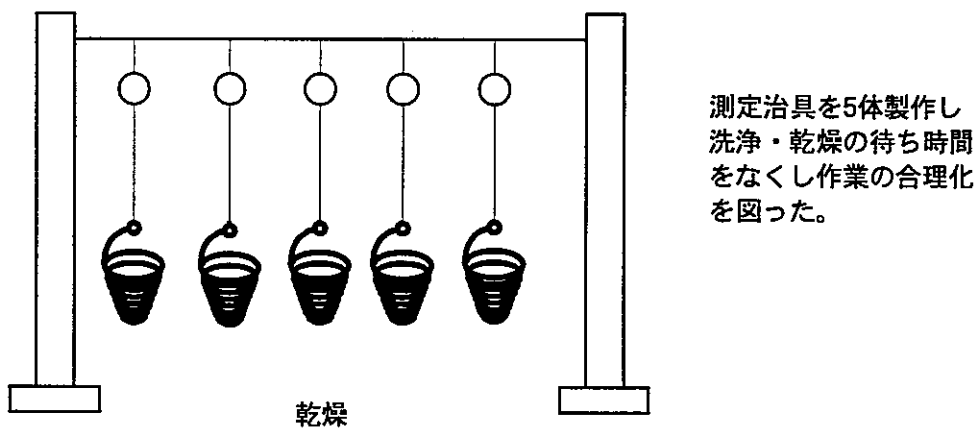
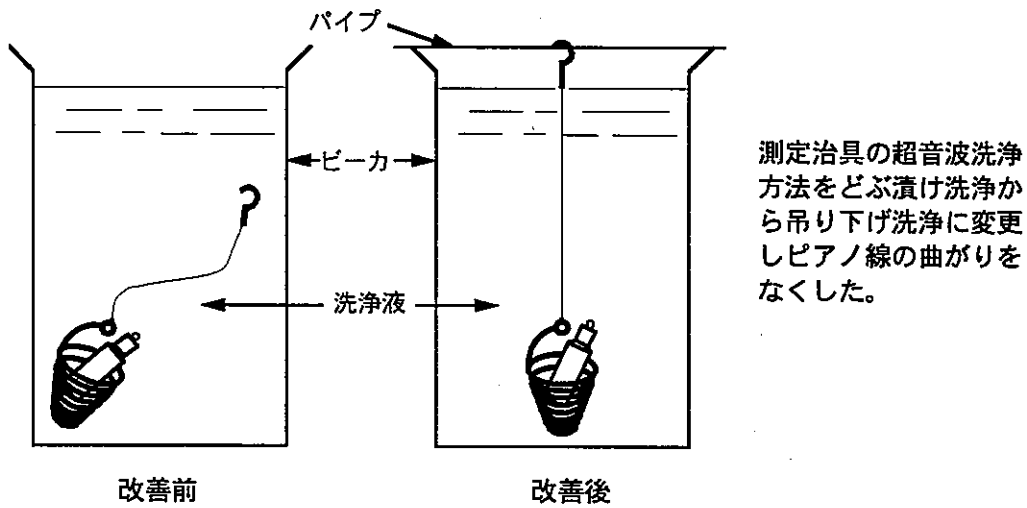
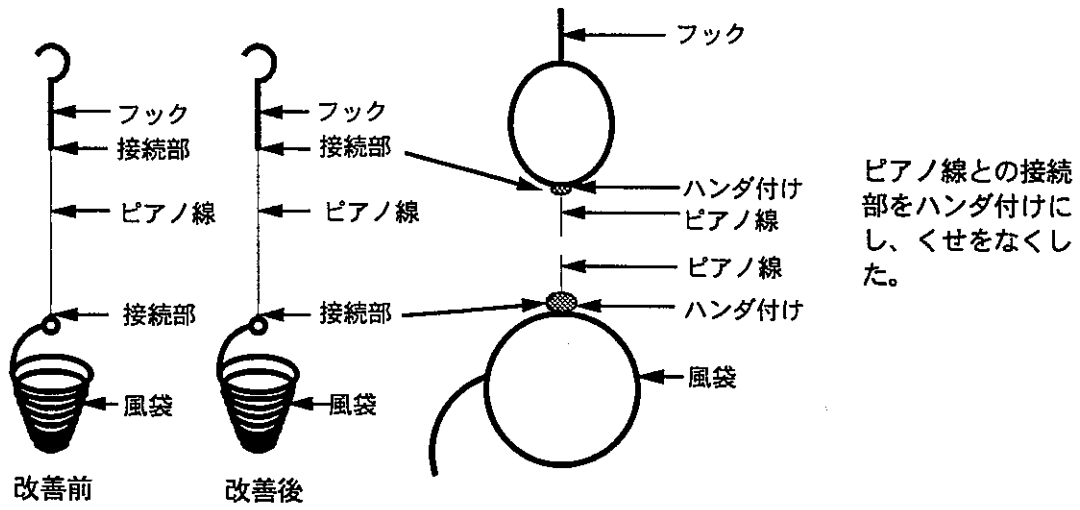
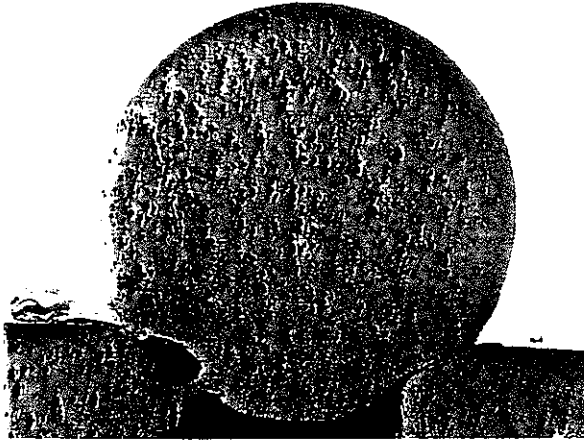
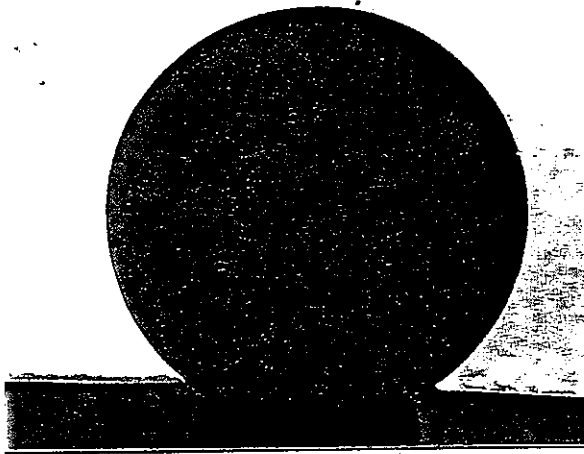


図-16 TED体積測定方法の改善

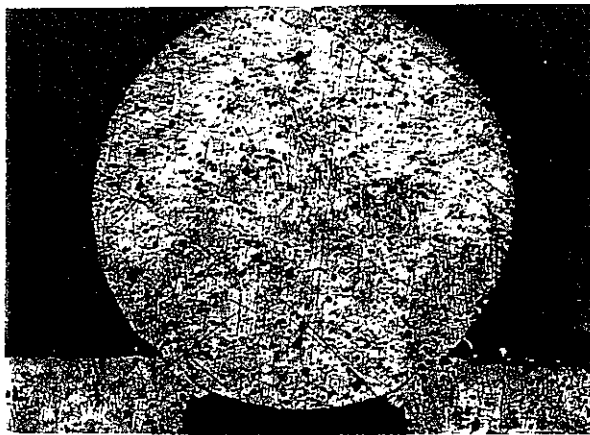
添付写真 - 7



条件 - 1, 2, 3
断面金相写真



条件 - 4, 5
断面金相写真



条件 - 6
断面金相写真

7. まとめ

TEDの安定供給の維持を主眼として、また、精度のさらなる向上を追求し、TEDの国産化に着手した。国産化にあたっては、当初ANLの情報に基づき試作試験を行ったが、失敗が多く試行錯誤を繰り返して細かな技術を開発し、ノウハウ化した。また、国産化するだけでなく、測定精度を向上させることも配慮し、ナトリウム充填率を可能な限り均一で100%近くまで上げるなどの品質管理努力を行った。TED製造技術の確立及び精度の向上において以下の改善を行った。

- (1) TEDの素材は、SUS316相当ステンレス鋼20%冷間加工材が炉外試験によりTEDの素材には適さないことが判明し、SUS316相当ステンレス鋼アニール材及びニッケル合金材（インコネル600）を選定した。
- (2) TEDの精度は、ナトリウム充填率で決まるため充填部配管内のガス抜き、充填装置内の真空度の向上及び高温でのナトリウム充填により、充填率を均一で100%近くまで上げることを可能にした。
- (3) TEDは、ナトリウム充填後に充填量の測定を行い、ナトリウム充填率が95%以上のものを製品とした。
- (4) 金属球の溶接は、ナトリウム充填率を上げると溶接部にまでナトリウムが充填されるため抵抗溶接は不可能であった。金属球の溶接は、TEDのナトリウム充填口まで充填されたナトリウムを面取り加工と洗浄により溶接を可能にした。
- (5) 製品は、「常陽」の1次冷却材入口ナトリウム温度の350℃で1時間ヘリウムガス雰囲気中で熱処理を行い、TEDの体積増加開始温度を整えた。

これらの改善の結果、炉外較正試験での温度測定結果のばらつきはナトリウム充填率が94%で±10℃、ナトリウム充填率が95%以上では±5℃となり、製品のナトリウム充填率は95%以上であるため、大幅な精度の向上も図ることができた。国産TED製造技術は、平成7年度の90個の生産をもって確立することができた。その第一期製作品が平成8年度で照射装置に装荷されて平成9年3月の「常陽」定格運転第30サイクルから照射試験に使用された。実際に使用された測定結果は、平成11年度に判明する予定である。

8. 謝 辞

照射試験用熱膨脹差型温度モニタ (TED) の製作法の開発にあたって、ナトリウム充填装置の設計及び製作は、(有)中島製作所に実施して頂き御指導、御協力を頂いた。

また、充填装置の設置場所及び製作に使用した廃ナトリウムの処理、充填ナトリウム中の不純物の分析は、実験炉部技術課分析グループの御指導、御協力を頂いた。

ここに深く感謝の意を表します。

9. 参考文献

- (1) Argonne National Laboratory : "Thermal Expansion Difference(TED) Temperature Monitor User's Manual Issue No3, May 1989.
- (2) 溶接学会編 : 溶接便覧 (改訂3版)