

クロメル・アルメル型熱電対のドリフト現象

1980年8月

動力炉・核燃料開発事業団

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。

〒311-13 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 O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

クロメル・アルメル型熱電対のドリフト現象

鈴木利明^{*}，奈良義彦^{*}

要 旨

クロメル・アルメル型熱電対における熱起電力のドリフトは熱電対素線の酸化による材質変化によるものと考えられており、その酸化の程度は熱電対を使用している雰囲気温度の違いにより異ってくる。熱電対を用いて温度測定を行う場合、熱電対はそれ自身に温度勾配がつくことは避けられず、温度の違いにより酸化の程度が異なることから素線材質の不均一なものになっていく。

常陽の冷却系で使用されたクロメル・アルメル型熱電対の熱起電力がドリフトしていることは既に報告したが、前述の現象の裏付けを得るために冷却系で使用した熱電対の詳細な試験を実施し、次の結果を得た。

- 1) 原子炉出口部で使用した熱電対の熱起電力ドリフト量は原子炉入口部に比べて大きい。
- 2) 1本の熱電対において高温に曝されている先端部の熱起電力ドリフト量は低温である端子側のドリフト量にくらべて大きい。

* 大洗工学センター高速実験炉部 技 術 課

Drift of Sheathed Chromel/Alumel Thermocouples

Toshiaki Suzuki*, Yoshihiko Nara*

Abstract

The drift of the output signal from sheathed chromel/alumel thermocouples is believed to result from corrosion of the thermoelectric conductors by diffused air. The extent of the drift depends on the maximum temperature and the period of time that the thermocouple is exposed to the elevated temperature. During use as temperature sensors, it is inevitable that temperature gradients exist along the length of the thermocouple itself. These gradients result in nonuniform thermoelectric properties of the conductors which also affects their output.

The drift observed in the sheathed chromel/alumel thermocouple which are used in the JOYO reactor has previously been reported. Additional tests and investigations were conducted to confirm the above phenomenon and to measure their effects. The results of these investigations are summarized as follows :

- 1) The drift of the thermocouple which is mounted in the reactor outlet pipeline is larger than the drift of the thermocouple which is mounted in the reactor inlet line.
- 2) Drift of the thermocouple head portion, which is exposed to high temperature, is larger than the drift of the thermocouple end portion which is exposed to room temperature.

* Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division,
O-arai Engineering Center, PNC.

List of Figures

- Fig. 2-1 Generation of Emfs in Thermoelectric Circuits
- Fig. 4-1 Test Equipment
- Fig. 5-1 Calibration Point of Thermocouple
- Fig. 7-1 Calibration Result of New Thermocouple at Freezing
 Temperature of Pure Lead
- Fig. 7-2 Drift of Old Thermocouples Calibrated at Freezing
 Temperature of Pure Lead
- Fig. 7-3 Transition of Pure Lead Axial Temperature
 Distribution shown by Temperature Difference (1/2)
- Fig. 7-4 Transition of Pure Lead Axial Temperature
 Distribution shown by Temperature Difference (2/2)
- Fig. 7-5 Transition of Temperature Profile of Quarz Guide Tube

List of Table

- Table 3-1 List of Examined Thermocouple
- Table 6-1 Calibration Result of New Thermocouples
at Freezing Temperature of Pure Lead
- Table 6-2 Drift of Old Thermocouples at Freezing
Temperature of Pure Lead
- Table 7-1 Transition of Thermo Electro Motive Force
during Pure Lead Freezing
- Table 7-2 Transition of Pure Lead Axial Temperature
Distribution shown by Temperature Difference
- Table 7-3 Transition of Pure Lead Axial Temperature
Distribution
- Table 7-4 Transition of Quarz Guide Tube Axial Temperature
Distribution shown by Temperature Difference
- Table 7-5 Transition of Quarz Guide Tube Axial Temperature
Distribution

目 次

1. 緒 言	1
2. 熱起電力の基礎理論	2
2.1 熱電回路での熱起電力の発生は局所的である	2
2.2 均質な熱電対における熱起電力の重ね合せ	2
2.3 不均質な熱電対における熱起電力の重ね合せ	2
2.4 熱起電力のドリフト	3
3. 試験対象熱電対	4
4. 試験装置	5
4.1 温度定点装置	5
4.2 計測装置	5
5. 試験方法	7
6. 試験結果	8
7. 検 討	9
7.1 熱起電力ドリフト量の軸方向分布	9
7.2 定点較正法についての考察	9
8. 結 言	11
9. 参考文献	12

1. 緒 言

クロメル・アルメル型熱電対における熱起電力のドリフトは熱電対素線の酸化による材質変化によるものと考えられており、その酸化の程度は熱電対を使用している雰囲気温度の違いにより異ってくる。配管内を流れるナトリウム温度を熱電対で測定する場合、熱電対自身は高温のナトリウムに曝される部分、保温材の部分、および外部雰囲気部分というように温度勾配がつき、各々の部分で酸化の程度が異なることから材質の不均一な熱電対になっていく。新しい熱電対は材質が均一であるため熱起電力は熱電対のどの部分をとっても一定であり、配管に対する熱電対の挿入長さに拘らず同一の熱起電力が得られるが、材質が不均一となった熱電対においては、場所により同一温度に対する熱起電力が異なるため、配管に対する挿入長が違う場合、熱起電力も異った値を示すことになる。従って一度高温雰囲気で使用した熱電対を校正する場合、金属中に挿入する長さの違いにより較正值が異ってくる可能性がある。

本報告書は高温雰囲気で使用したCA熱電対について前述の現象を検証するために実施した試験結果について報告するものである。

2. 熱起電力の基礎理論

2.1 熱電回路での熱起電力の発生は局所的である

熱電回路における熱起電力の発生について正しく理解するためには、熱電対で発生する熱起電力が異種金属の接触によるものであるという通常概念をより厳密な物理現象としてとらえる必要がある。Fig.2-1④は炉の温度を熱電対で計測している状態を示している。炉内の温度はTで一様であり、その両端部分は急激な温度勾配がついている。炉の内側にあるターミナルKとL間の熱起電力は零である。一方炉の外側にあるターミナルMとN間の熱起電力は端子PとQの間の熱起電力と同じであり、その熱起電力は通常零ではないことが経験上知られている。このことは実際に測定可能な電圧E、すなわち E_x および E_y は2本の素線のターミナルK、LとターミナルM、Nの間、いかえると温度勾配の間で発生することを示している。回路の他の部分は最終的な電圧信号になら関係を持たず、従って熱電対のホットジャンクションは熱電材料間の電気的な連続性を保つためだけのものである。ある温度勾配における熱起電力の発生は素線中の自由電子のエネルギー平衡状態のバランスがくずれるためである。

2.2 均質な熱電対における熱起電力の重ね合せ

いま熱電的に均質な熱電対がある温度勾配 $T_0 \rightarrow T$ 中に置かれているとする。2.1節で述べたようにこの温度勾配により熱起電力Eが発生する。Fig.2-1⑤において E_1 は熱電対が $T_0 \rightarrow T_1$ の温度勾配に置かれた時発生する熱起電力である。 $T_0 \rightarrow T_2$ なる温度勾配に熱電対を置いた場合、 $T_2 > T_1$ とすると熱電対には当然 $T_0 \rightarrow T_1$ の温度勾配が存在し、熱起電力 E_1 は端子P、Qにおける最終熱起電力の一部として発生する。 E_2 は温度勾配 $T_1 \rightarrow T_2$ により発生する。 E_1 および E_2 は較正曲線より与えられる。Fig.2-1⑥は均質な熱電対において、隣接した温度勾配により発生する熱起電力は重ね合せが可能であることを示している。

2.3 不均質な熱電対における熱起電力の重ね合せ

均質な熱電対の場合と同様に既知の温度勾配中に不均質な熱電対を置いた場合に発生する熱起電力Eについて評価を行う。Fig.2-1⑦に示すように温度勾配のついている部分をa、b、c、……の小さな部分に分割する。a、b、c各々の温度勾配に対する熱起電力 E_1 、 E_2 、 E_3 は各々の較正曲線より求められる。すなわち端子P、Q間の最終的な熱起電力Eは次式で求められる。

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

温度勾配 $T_0 \rightarrow T_3$ に対する均質な熱電対の熱起電力を E_0 とすると一般には $E \approx E_0$ となる。

2.4 熱起電力のドリフト

Fig. 2-1©において標準の校正曲線による熱起電力 E_0 と不均質な熱電対による実際の熱起電力 E の差がドリフト量となる。また図からも明らかなように T_3 という同一温度に対し T_3 から T_0 までの温度勾配が異なる場合は E_1, E_2, E_3 が違ったものとなり最終的な熱起電力 E も当然違ってくる。これはドリフト量が温度だけでなく、温度勾配にも依存することを示している。

なお本章は参考文献(2)の DRIFT OF SHEATHED CHROMEL/ALUMEL THERMOCOUPLES ASSOCIATED WITH CORROSION OF SENSITIVE BY DIFFUSED AIR より抜粋したものである。

3. 試験対象熱電対

試験の対象とした熱電対は原子炉入口(A)・(B), 原子炉出口(B)および主冷却器(1A)出口に取付けられていた既設の熱電対(建設時に取付けられたもので1979年3月に性能試験用の熱電対と交換された)4体と75MW出力上昇試験で原子炉入口(A)・(B)および原子炉出口(B)に使用された性能試験用の熱電対3体, そしてこれら既使用の熱電対との比較を行うための未使用の性能試験用熱電対3体の合計10体である。Table 3-1に各熱電対の設置場所と仕様を示す。既設熱電対はシース外径3.2φ, 0.75級のCA熱電対で, 性能試験用の熱電対はシース外径0.5φ, 0.4級のCA熱電対である。

4. 試 験 装 置

試験装置は温度定点装置と計測装置に分けられ、各々の構成は次のとおりである。

4.1 温度定点装置

(1) 電気炉（西村工業製）

炉内寸法 50 φ × 310 (mm)

ヒータ容量 1.8 kw

使用最高温度 1150 ℃

(2) スライダック（東京精電製）

使用電圧 100 V

定格電流 20 A

(3) 黒鉛坩堝

寸 法 40^{O/D} × 30^{I/D} × 230^H (mm)

材 質 黒鉛

(4) 保護管

寸 法 13^{O/D} × 11^{I/D} × 350^H (mm)

材 質 石英

(5) 黒鉛粉末

電気炉と坩堝の間隙に充填材として使用

(6) 較正用金属

鉛 (純度：99.9999%)

温度定点装置の概要を Fig.4-1 に示す。

4.2 計測装置

(1) デジタル式温度記録計（千野製作所製）

型 式 PROCOS-VII

入 力 直流電圧

出力表示 mV又は℃

測定確度 ± 0.02 mV又は± 1.8 ℃

(2) 零度補償器（小松エレクトロニクス製）

型 式 Zero-Con

基準温度安定精度 雰囲気温度 20℃ において 0℃ ~ 0.02℃

(3) デジタルマルチ温度計（横河電機製）

型 式 : Type 2572

入 力 : 直流電圧

出力表示 : mV 又は V

測定確度 : $\pm 5 \mu\text{V}$

5. 試 験 方 法

試験は4章に示した温度定点装置とデジタル温度記録計(PROCOS-VII)を用い、鉛点(融点: 327.5℃)で実施した。較正はFig. 5-1に示すように熱電対のウェルとして使用している石英管を坩堝の底から15mmずつ引抜くことにより熱電対が一定温度に曝されている長さを変化させ、熱電対の軸方向6点で実施した。

デジタル温度記録計の較正は被試験体の熱電対1体を選び、デジタルマルチ温度計と零度補償器を用いて鉛点の温度を計測し、この計測値と記録計による計測値の差を記録計の誤差とした。

6. 試 験 結 果

試験を行った熱電対は一度使用したものが7体、新しいものが3体である。新しい熱電対は Table 6-1 に示すように軸方向の違いによる温度差は製造番号 47299 と 47281 の熱電対が 0.2℃、製造番号 47282 の熱電対が 0.4℃となっている。

使用した熱電対の結果を Table 6-2 に示す。TE31.1-7A(A)はプラントの建設時に取付けられ、1979年3月まで使用(但し50MW出力上昇試験時は別の熱電対と交換された)したものであり、3章で述べたように周囲温度 200℃～250℃で約2年間、約370℃で約90日間使用されたものであるが軸方向の最大温度差は0.8℃である。TE31.1-8B(A)はTE31.1-7A(A)と同じ条件で使用されたもので軸方向の最大温度差は0.6℃である。TE31.1-1B(A)はナトリウム温度が200℃～250℃で約2年間、約435℃で約90日間使用されたものであり、軸方向の最大温度差は0.8℃である。TE31.2-2A・1(IRO 526-K-1-1)は前出の熱電対と同様にプラント建設時から1979年3月まで使用されたものであり、周囲温度 200℃～250℃で約2年半、約350℃で約7ヶ月間で使用した。軸方向の最大温度差は1.0℃である。TE31.1-7AX, 7BX および TE31.1-1BXは75MW出力上昇試験期間中(1979年4月～11月)に使用された。TE31.1-7AX(47273)とTE31.1-7BXは周囲温度 200℃～370℃で使用され、軸方向の最大温度差は各々0.4℃と0.7℃である。TE31.1-1BX(47279)は周囲温度 200℃～467℃で使用され、軸方向の最大温度差は1.9℃である。

温度定点装置が熱電対の較正装置としての機能を十分に果すことは前報(PNC SN941 79-240)で述べたが、今回は前回よりも電気炉を大きく、金属量を多くした為同じ熱電対 No.47299 を用いて両装置の比較を行った。前回使用した装置による較正結果は327.2℃、今回使用した装置による較正結果は326.8℃～327.1℃(軸方向の温度分布による)であり、前回のデータと今回のデータは補正なしで比較できることが確認された。較正時の計測器としては PROCOS-VII を使用したがその鉛点(327.5℃)における指示誤差は-0.3℃であった。PROCOS-VII の較正は熱電対1体を選び、マルチ温度計と零度補償器を用いて鉛点で計測を行い、この計測値と PROCOS-VII の計測値の差を前述の誤差とした。なお PROCOS-VII の較正に使用した計器の確度は±0.15℃である。

7. 検 討

7.1 熱起電力ドリフト量の軸方向分布

Fig. 7-1 と Fig. 7-2 は横軸に熱電対の融解金属中への挿入長を、縦軸に熱電対の指示温度と基準温度の差を示したものである。Fig. 7-1 に示す新しい熱電対はほとんど温度変化が無いのに対し Fig. 7-2 の使用後の熱電対は各々異った傾向を示している。TE31.1-7AX, TE31.1-7BX および TE31.1-1BX は 75MW 上昇試験期間中に使用されたものであるが融解金属中への挿入長が短くなるほど発起電力は正側にドリフトする傾向を示しており、これは 1 次主配管に挿入された状態で高温ナトリウムに曝されている部分の発電対素線の酸化の進度が温度の低い部分より大きいことを示している。原子炉入口部に設置した 7AX, 7BX に対し、原子炉出口部に設置した 1BX はドリフト量が多く、約 3 倍となっている。このことは素線の酸化の進度が周囲温度に大きく依存しており、温度が高ければ進度も大きく、熱起電力のドリフト量も大きくなることを示している。なお前出の熱電対 3 本は新しい熱電対 3 本と同一のロットから製作されたものであり、Fig. 7-1 の新しい熱電対の特性と比較すれば熱起電力のドリフト傾向は明らかである。他の 4 本の熱電対は使用前の特性が明らかでないため定量的に論ずることは出来ず、Fig. 7-2 に傾向を示すに止める。

今回の試験結果から高温雰囲気で使用された CA 熱電対の熱起電力はドリフトし、しかもそのドリフト量が 1 本の熱電対の計測する位置によって異なることが明らかになった。このことは一度使用した熱電対を校正し、その校正値を補正值として再度プラントで使用することには問題があることを示している。つまり前述の理由からプラントでの計測状態における熱起電力ドリフト量の補正值を求めるにはプラントに取付けた状態とまったく同じ状態を校正装置で作り出さなければならず、それはまず不可能であることから正確な補正值を求めることは事実上無理である。しかしながらプラントで使用している時に等温となっている熱電対の長さ、校正装置において等温となる長さを同じにすれば、両者の間で異なるのは温度勾配のつく部分だけとなり、定量的に示すことは出来ないが比較的良い補正值が得られるものと考えられる。

7.2 定点較正法についての考察

2.4 節において測定温度 T_3 と常温 T_0 間の温度勾配が異ると最終的な熱起電力 E も異った値を示すという考え方を明らかにした。本試験に使用した定点装置においては前述の T_3 が金属の凝固温度に相当し、 T_0 が室温となるわけであるが、凝固中の金属温度と、金属温度と室温との温度勾配は定常となっていることが望ましい。金属凝固中の金属部分と温度勾配部分の温度分布を求めるために、金属の部分においては 15mm 間隔に、金属より上の部分においては 25mm 間隔に CA 熱電対 (シース外径 0.5mm, 0.75 級) を石英管 (ウエル) 中に配置し、測定を行った。Fig. 7-3 と Fig. 7-4 は金属凝固中の金属内各点の温度が時間とともに変化する様子を凝固開

始時の温度を基準とし、その基準との差で表わしたものである。凝固の開始は各点ともほぼ同時であるが時間の経過とともに金属の上部、下部の温度が低下を始める。最も一定温度保持時間が長いのは坩堝の底から約 60mm の点であり、約 10 分間である。Fig. 7-5 は金属と温度勾配部を含めた石英管中の温度が時間とともに変化する様子を示したものであるが、金属から上方の部分は時間の経過とともに温度が低下し、定常となっていないことが示されている。このような温度勾配の変化は熱起電力に影響を与えるはずである。一方、今回実施した較正試験において金属凝固中の熱起電力変化は最大で 0.2℃ であり、この変化は前述の温度勾配の変化によるものと考えられる。Table 7-1 に較正温度における各熱電対の熱起電力変化を示す。温度定点装置においては融解金属の量に限りがある（今回の試験で使用した金属は 985g である）ため、金属の凝固中に系全体が熱的な平衡状態に到達するのは難しく、仮に平衡状態を実現しようとするれば使用する金属の量を多くし、金属が一定温度に保持される時間を長くしなければならない。従って素材の材質が均一な新しい熱電対については温度勾配が変化しても問題とはならないが一度使用し、材質的に不均一になった熱電対については温度勾配の変化により熱起電力も変化するため、金属の凝固温度（定点）に対し唯一の較正温度を求めることは不可能と考えられる。但し温度勾配の変化による較正值への影響は前述のとうり 0.2℃ 程度であり、結果に大きな影響を与えるものではない。

8. 結 言

CA 熱電対の熱起電力ドリフト現象についてはすでに報告した(高速実験炉「常陽」75 MW 性能試験報告書:冷却系熱電対較正結果, PNC SN941 79-240)が, 今回は熱電対のドリフトについてさらに詳細な調査を行い, 下記の結果を得た。

- (1) 熱電対を高温雰囲気で使用した場合, 熱起電力にドリフトが生じ, それは雰囲気温度が高いほど大きくなる。
- (2) 熱電対を配管等に挿入して使用する場合, 熱電対自身に温度分布がつくことは避けられない。素線の酸化の程度は雰囲気温度の違いにより異ると考えられ, 1本の熱電対におけるドリフト量が場所により異り高温に曝される先端部は端子側に対しドリフト量は大きくなっている。
- (3) 高温雰囲気で使用し熱起電力がドリフトしている熱電対を取外して較正を行い, 較正值を補正值として, 再度熱電対をプラントに取付けて使用する場合, 較正方法として較正装置の金属中に挿入する熱電対の長さを, 実際の配管に挿入されている長さに合わせることを望ましい。
- (4) 温度定点装置においては融解金属の量すなわち熱源に限りがあるため金属の凝固中に系全体が熱的平衡状態に到達するのは難しく, 金属温度と室温の間の温度勾配が変化する。素線の材質が均一な新しい熱電対については温度勾配が変化しても問題とはならないが, 一度使用し, 材質的に不均一となった熱電対については温度勾配の変化により熱起電力も変化するはずである。今回実施した較正試験において確認されたこの温度変化による影響は0.2℃である。

9. 参 考 文 献

- (1) 鈴木利明，土井基尾，石川真：高速実験炉「常陽」75MW性能試験報告書 冷却系熱電対較正結果 PNC SN941 79-240
- (2) F. MATHIEU, R. MEIER, G. VANMASSENHOVE, M. DELCON, A. DEDEYNE :
DRIFT OF SHEATHED CHOMEL/ALUMEL THERMOCOUPLES ASSOCIATED WITH
CORROSION OF SENSITIVE WIRES BY DIFFUSED AIR

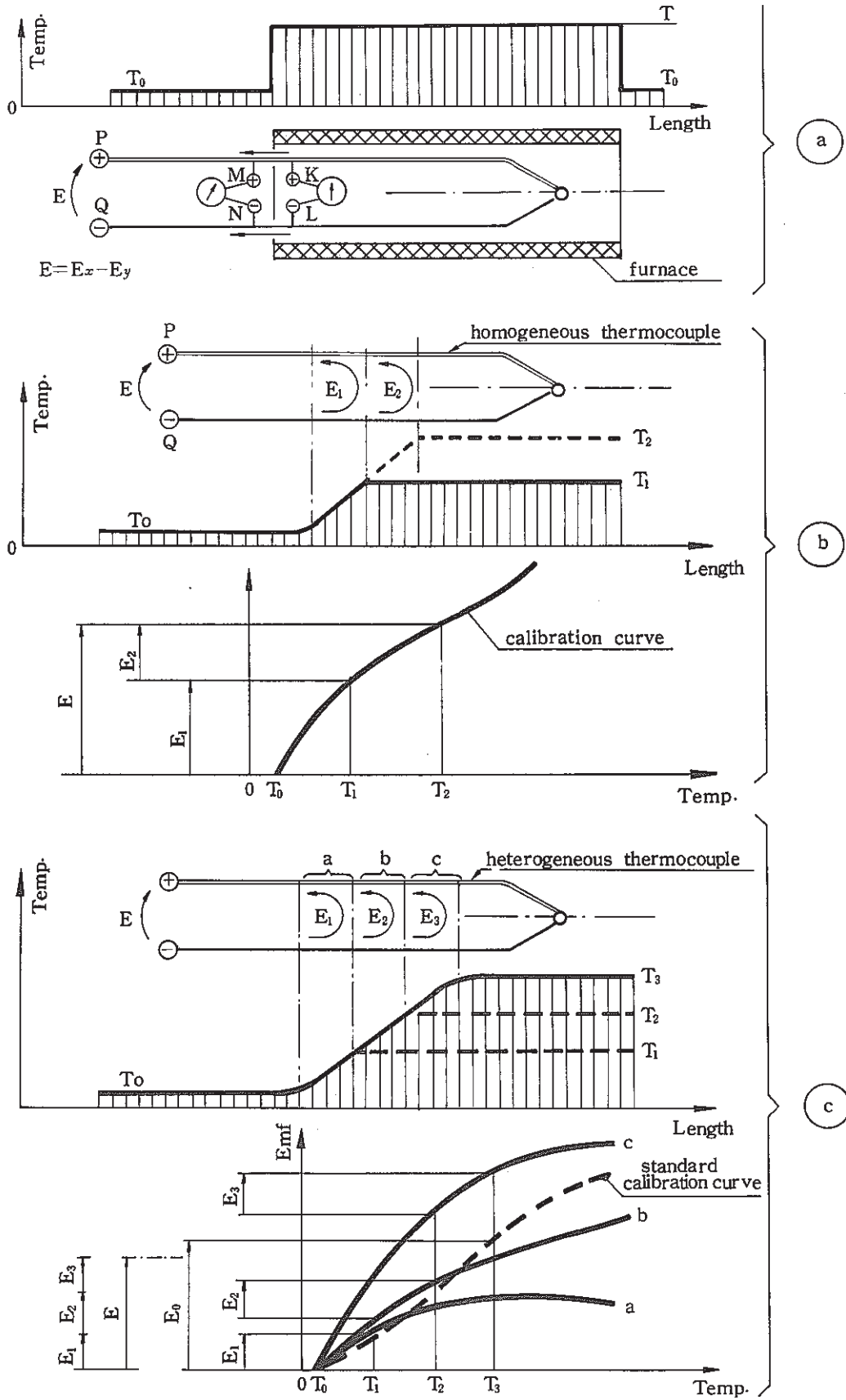


Fig. 2-1 Generation of emfs in thermoelectric circuits.

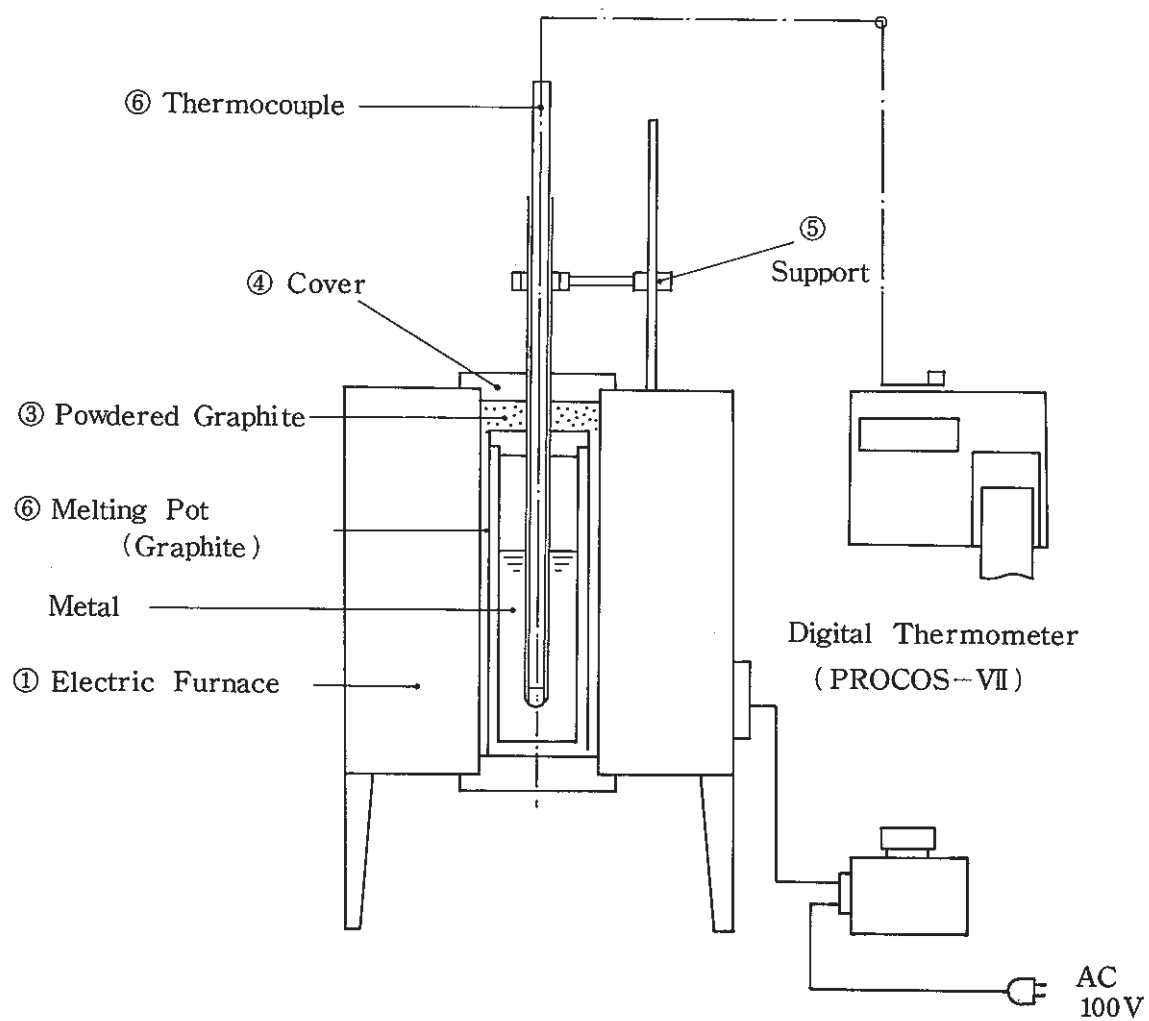


Fig.4-1 Test Equipment

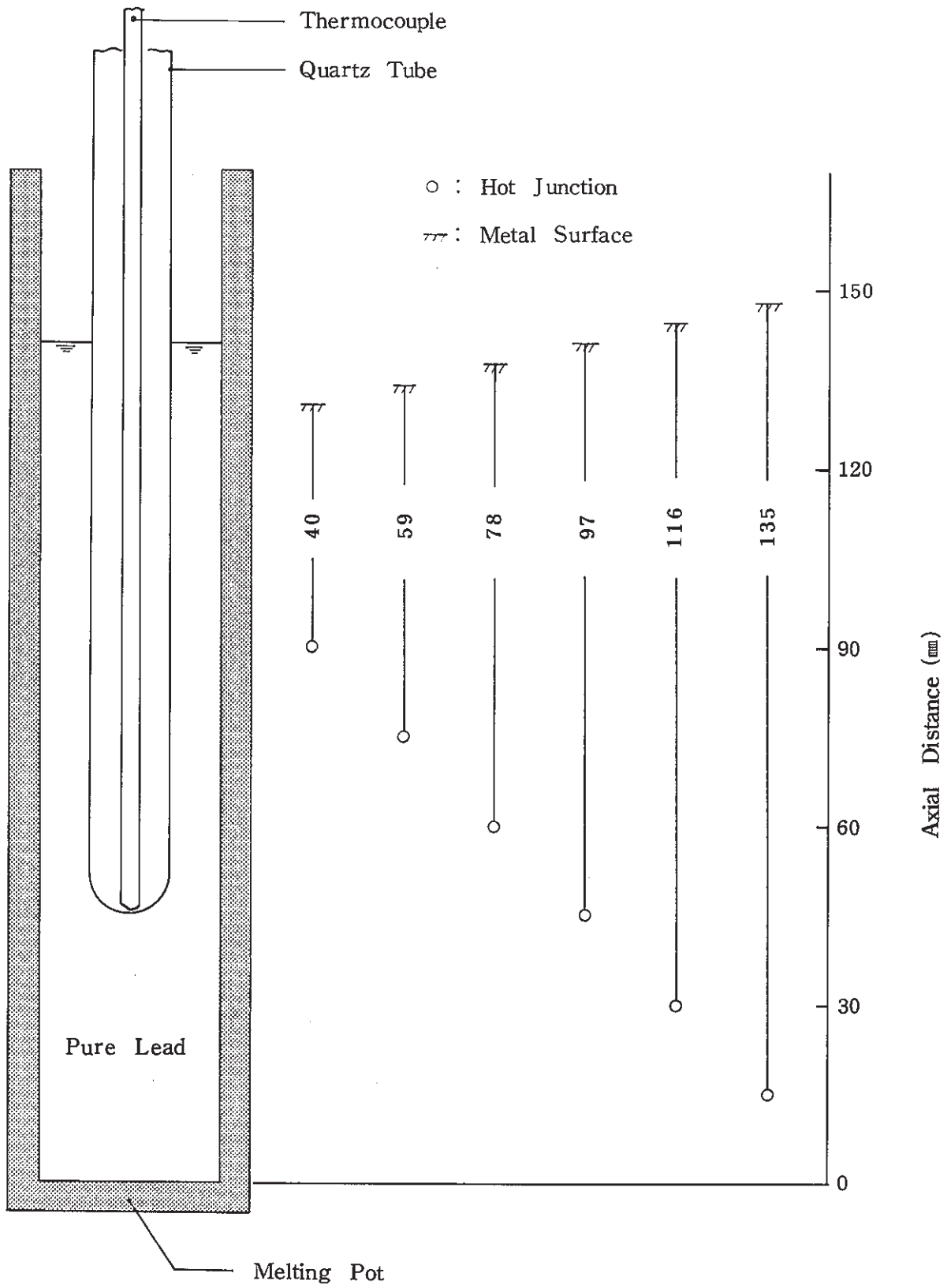


Fig. 5-1 Calibration Point of Thermocouple

Note;

Date; April, 1980

○ # 47299

△ # 47281

□ # 47282

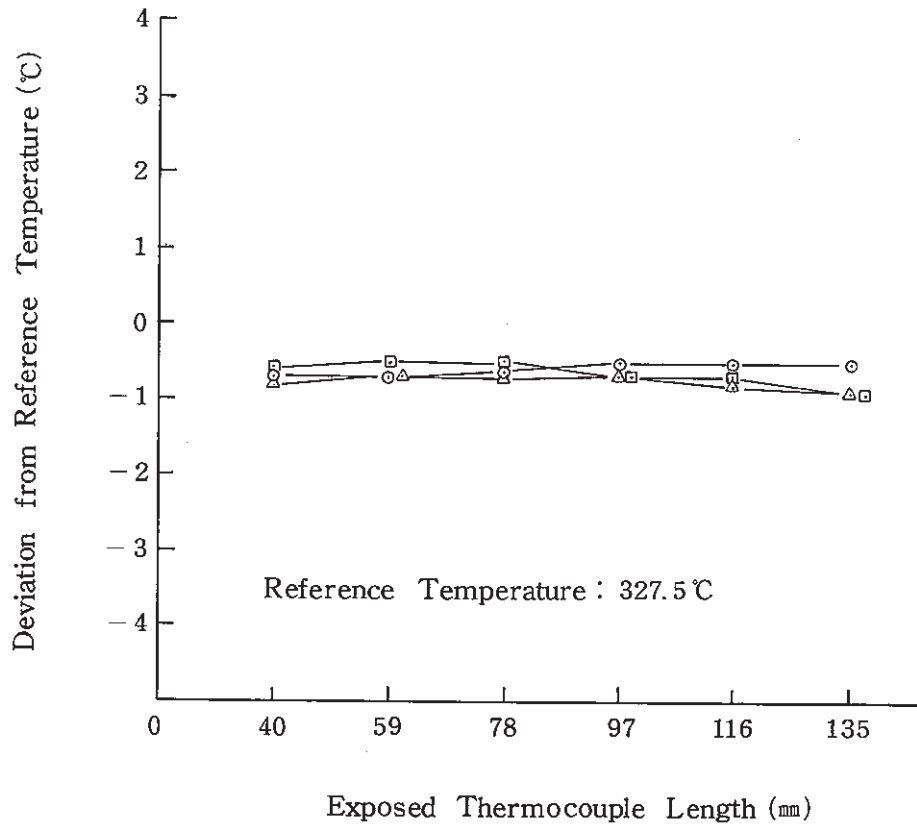


Fig. 7-1 Calibration Result of New Thermocouple at Freezing Temperature of Pure Lead

Date: April, 1980

Note:

- Reactor Inlet (A) TE 31.1-7A (A)
- △ " (B) TE 31.1-8B (A)
- Reactor Outlet (B) TE 31.1-1B (A)
- ▽ DHX (1A) Outlet TE 31.2-2A-1 (IRO 526K-1-1)
- ☆ Reactor Inlet (A) TE 31.1-7AX (47273)
- ⊗ " (B) TE 31.1-7BX (47275)
- ◇ Reactor Outlet (B) TE 31.1-1BX (47279)

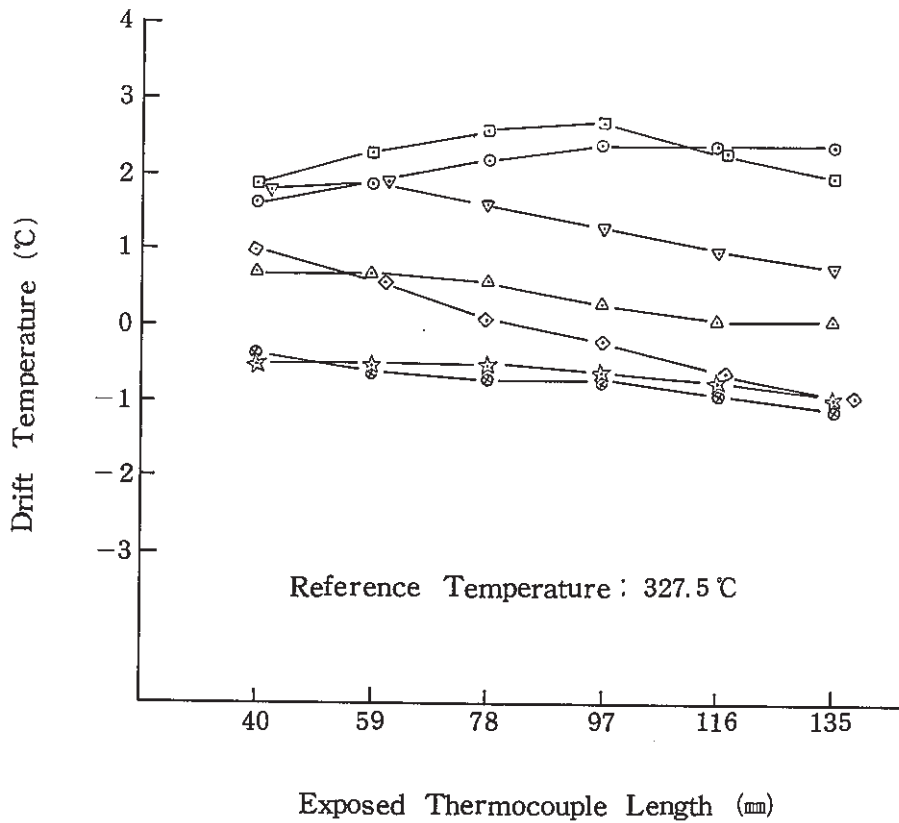


Fig. 7-2 Drift of Old Thermocouples at Freezing Temperature of Pure Lead

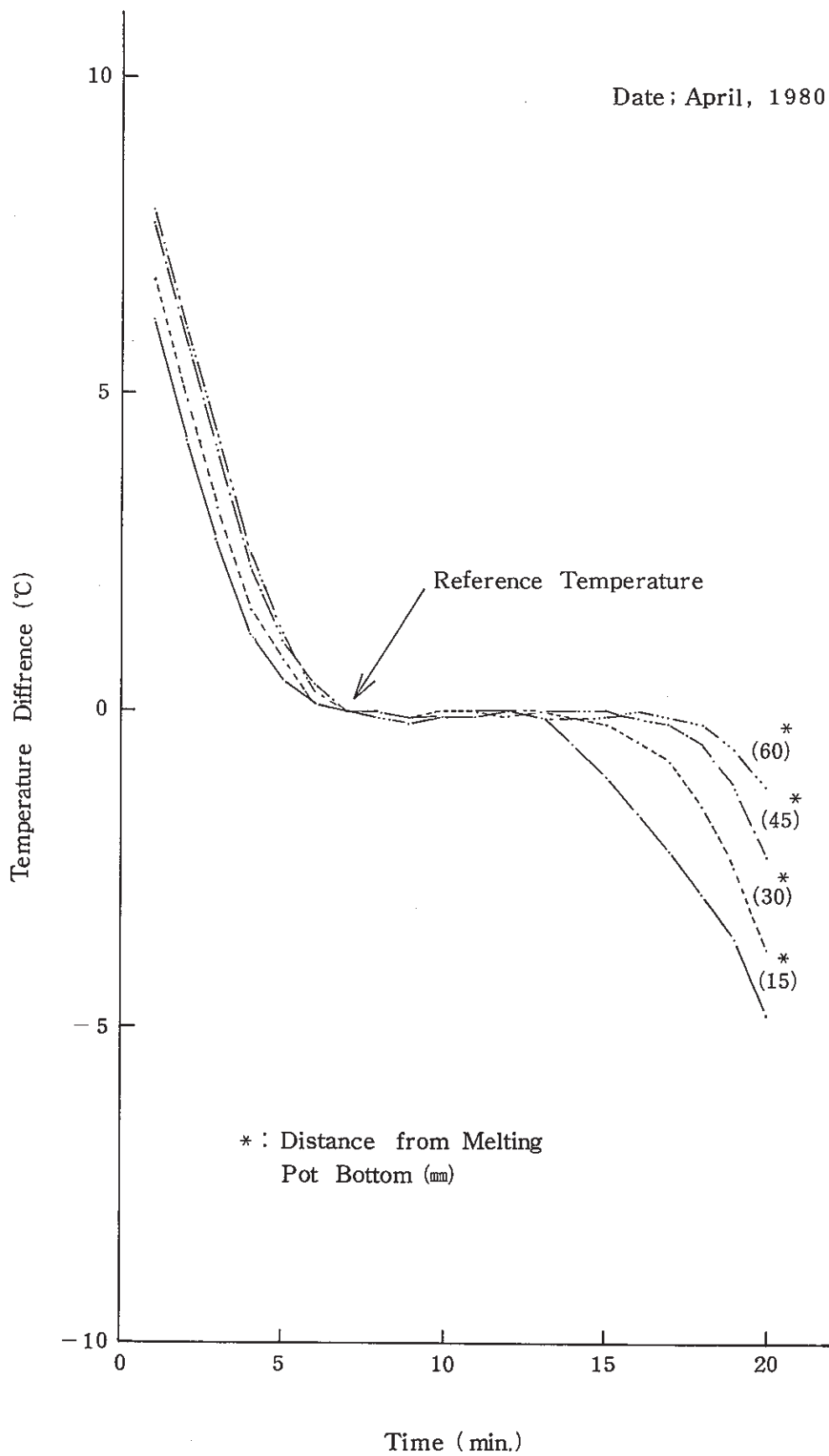


Fig. 7-3 Transition of Pure Lead Axial Temperature Distribution shown by Temperature Difference (1/2).

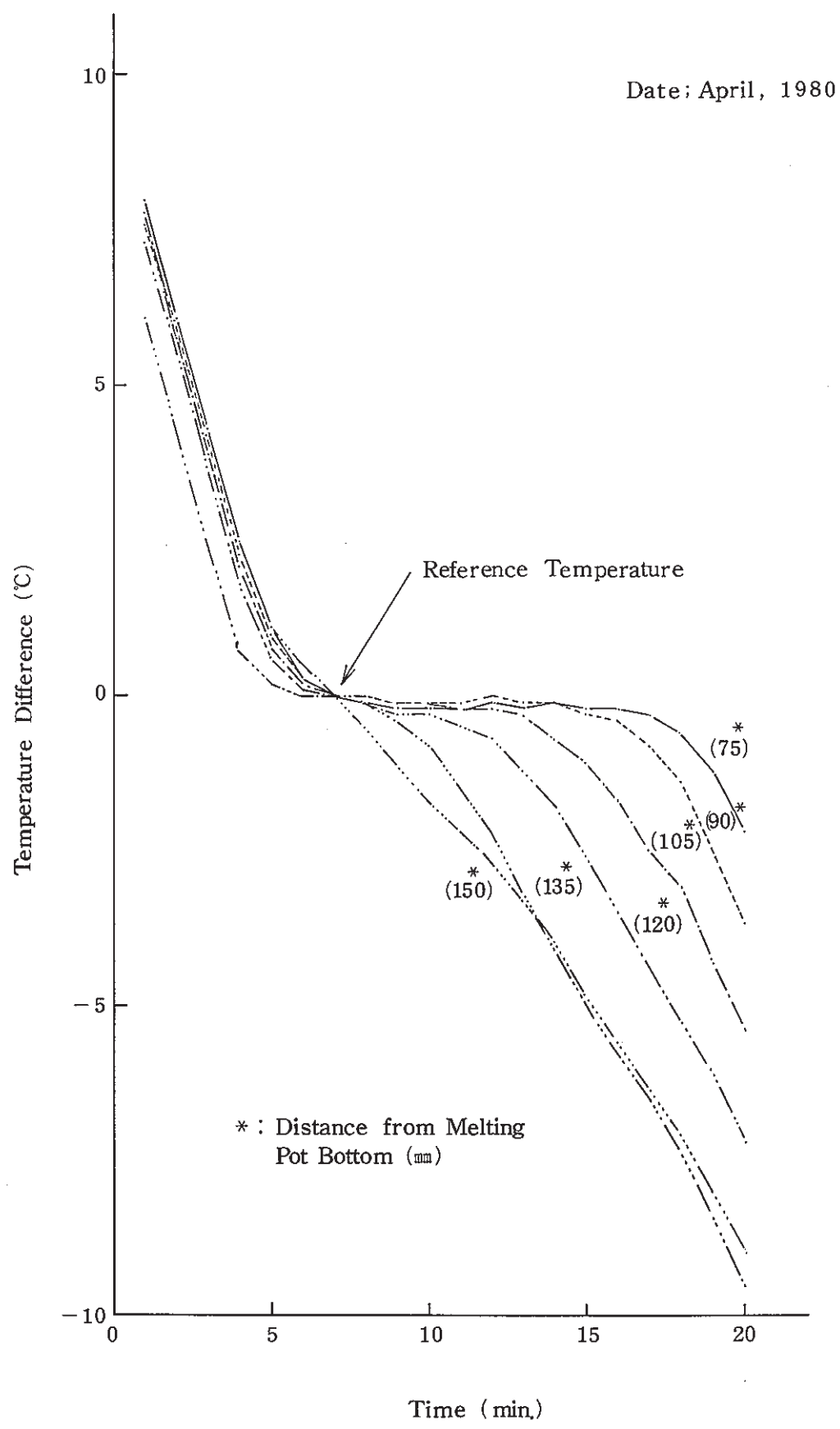


Fig. 7-4 Transition of Pure Lead Axial Temperature Distribution shown by Temperature Difference (2/2).

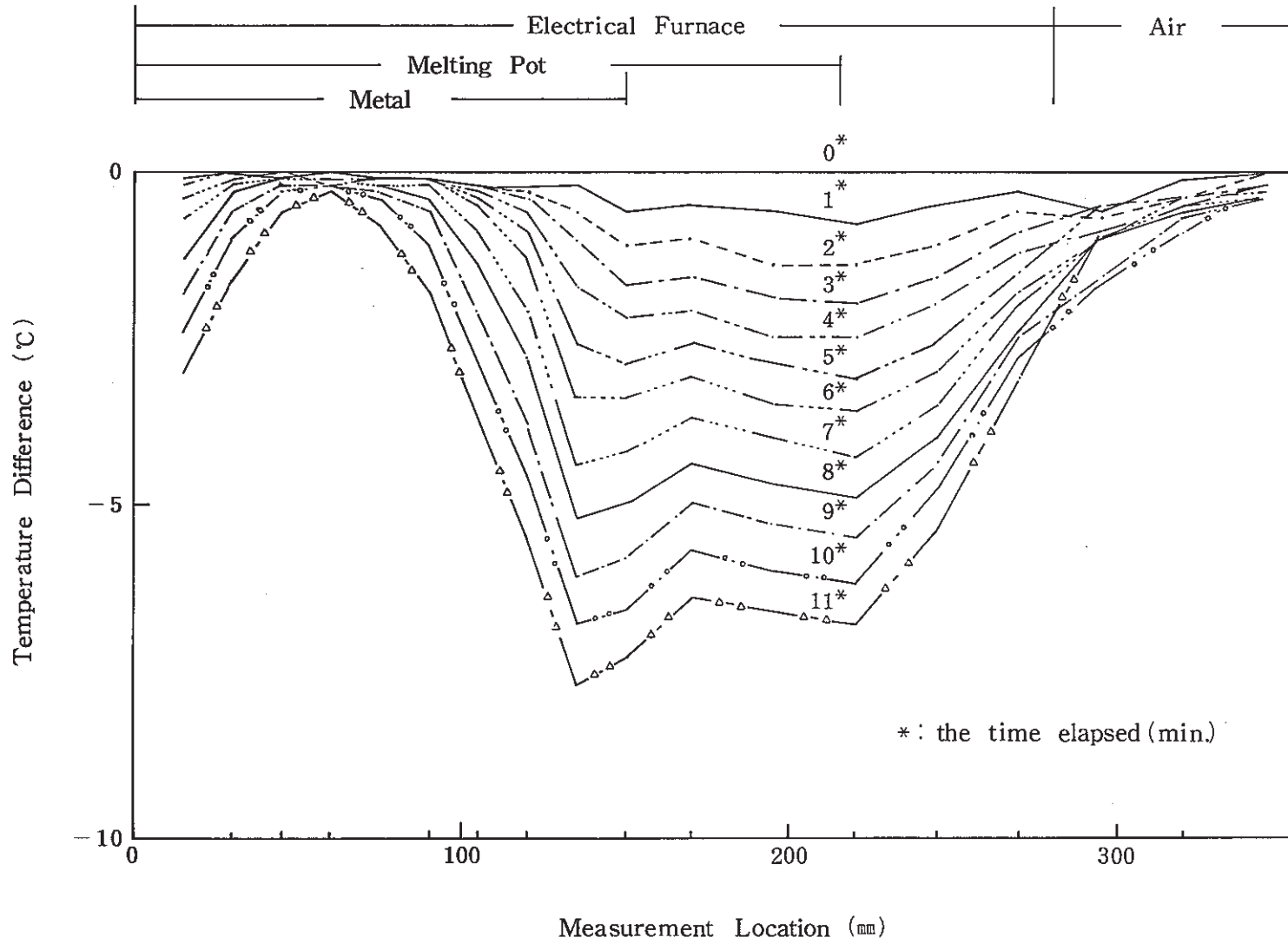


Fig. 7-5 Transition of Temperature Profile of Quarz Guide Tube

Table 3-1 List of Examined Thermocouple

Location and Tag. No. of Thermocouple	Serial No.	Type	Class	Remarks
Reactor Inlet (A) TE31.1-7A (A)	-	K Chromel-Alumel	0.75	Used for 50MW Operation
Reactor Inlet (B) TE31.1-8B (A)	-	"	"	"
Reactor Outlet (B) TE31.1-1B (A)	-	"	"	"
DHX (1A) Outlet TE31.2-2A.1	IRO 526- K-1-1	"	"	"
Reactor Inlet (A) TE31.1-7AX	47273	"	0.4	Used for 75MW start-up Test
Reactor Inlet (B) TE31.1-7BX	47275	"	"	"
Reactor Outlet (B) TE31.1-1BX	47279	"	"	"
New Thermocouple	47299	"	"	Not Used
"	47281	"	"	"
"	47282	"	"	"

Table 6-1 Calibration Result of New Thermocouples at Freezing Temperature of Pure Lead

Reference Temperature : 327.5 °C

Location and Sensor No	Serial Number	Exposed Length* (mm)					
		40	59	78	97	116	135
New Thermocouple	47299	326.8	326.8	326.9	327.0	327.0	327.0
		- 0.7	- 0.7	- 0.6	- 0.5	- 0.5	- 0.5
"	47281	326.7	326.8	326.8	326.8	326.7	326.6
		- 0.8	- 0.7	- 0.7	- 0.7	- 0.8	- 0.9
"	47282	326.9	327.0	327.0	326.8	326.8	326.6
		- 0.6	- 0.5	- 0.5	- 0.7	- 0.7	- 0.9

Unit : °C

* Thermocouple Length Exposed by Freezing Temperature

Table 6-2 Drift of old Thermocouples Calibrated at Freezing Temperature of Pure Lead

Reference Temperature : 327.5 °C

Location and Sensor No	Serial Number	Exposed Length*	40	59	78	97	116	135
		(mm)						
Reactor Inlet (A)	-	-	329.1	329.4	329.7	329.9	329.9	329.9
TE31.1-7A (A)			+ 1.6	+ 1.9	+ 2.2	+ 2.4	+ 2.4	+ 2.4
Reactor Inlet (B)	-	-	328.2	328.2	328.1	327.8	327.6	327.6
TE 31.1-8B (A)			+ 0.7	+ 0.7	+ 0.6	+ 0.3	+ 0.1	+ 0.1
Reactor Outlet (B)	-	-	329.4	329.8	330.1	330.2	329.8	329.5
TE31.1-1B (A)			+ 1.9	+ 2.3	+ 2.6	+ 2.7	+ 2.3	+ 2.0
DHX(1A) Outlet	IRO 526-	K-1-1	329.3	329.4	329.1	328.8	328.5	328.3
TE 31.2-2A·1			+ 1.8	+ 1.9	+ 1.6	+ 1.3	+ 1.0	+ 0.8
Reactor Inlet (A)	47273	-	327.0	327.0	327.0	326.9	326.8	326.6
TE 31.1-7AX			- 0.5	- 0.5	- 0.5	- 0.6	- 0.7	- 0.9
Reactor Inlet (B)	47275	-	327.1	326.9	326.8	326.8	326.6	326.4
TE 31.1-7BX			- 0.4	- 0.6	- 0.7	- 0.7	- 0.9	- 1.1
Reactor Outlet (B)	47279	-	328.5	328.1	327.6	327.3	326.9	326.6
TE31.1-1BX			+ 1.0	+ 0.6	+ 0.1	- 0.2	- 0.6	- 0.9

Unit : °C

* Thermocouple Length Exposed by Freezing Temperature

Table 7-1 Transition of Thermoelectro Motive Force during Pure Lead Freezing

Unit : °C

T/C No. \ Time (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TE 31.1 - 7 A (A)	329.8	329.8	329.8	329.8	329.9	329.9	330.0	329.9	330.0	330.0	329.9	-
TE 31.1 - 8 B (A)	327.8	327.7	327.8	327.7	327.8	327.7	327.8	327.8	327.8	327.8	327.8	-
TE 31.1 - 1 B (A)	330.0	330.0	330.0	330.0	330.0	330.1	330.1	330.2	330.2	330.2	330.2	330.2
TE 31.2 - 2A-1	328.8	328.8	328.8	328.7	328.8	328.8	328.8	328.9	328.9	328.9	328.8	-
TE 31.1 - 7 AX	326.6	326.8	326.8	326.8	326.8	326.9	326.9	326.9	326.9	327.0	326.9	-
TE 31.1 - 7 BX	326.6	326.6	326.7	326.7	326.8	326.8	326.8	326.8	326.8	-	-	-
TE 31.1 - 1 BX	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.3	327.3	327.3	327.3	327.3	327.3
# 47299	326.8	326.8	326.8	326.8	326.8	326.9	327.0	327.0	327.0	327.0	327.0	327.0
# 47281	326.8	326.8	326.7	326.8	326.7	326.8	326.7	326.7	326.7	326.7	-	-
# 47282	326.9	326.8	326.8	326.9	326.8	326.8	326.8	326.8	326.8	326.8	-	-

Table 7-2 Transition of Pure Lead Axial Temperature Distribution shown by Temperature Difference

Unit : °C

* Distance (mm) \ Time (min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	6.2	4.3	2.6	1.2	0.5	0.1	0	0	-0.1	-0.1
30	6.8	4.9	3.2	1.6	0.8	0.1	0	0	-0.1	0
45	7.7	5.9	4.1	2.3	1.1	0.4	0	0	-0.1	0
60	7.9	6.0	4.3	2.5	1.2	0.3	0	-0.1	-0.2	-0.1
75	8.0	6.1	4.3	2.5	1.1	0.3	0	-0.1	-0.2	-0.2
90	7.6	6.0	4.2	2.3	1.0	0.3	0	0	-0.1	-0.1
105	7.8	5.7	3.9	2.1	0.8	0.2	0	0	-0.1	-0.1
120	7.3	5.5	3.7	1.8	0.6	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.3
135	6.1	4.3	2.4	0.7	0.2	0	0	-0.1	-0.4	-0.8
150	7.8	6.0	4.3	2.4	1.1	0.5	0	-0.5	-1.1	-1.7

* Distance (mm) \ Time (min)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
15	-0.1	0	-0.1	-0.5	-1.0	-1.6	-2.2	-2.9	-3.6	-4.8
30	0	0	0	-0.1	-0.2	-0.5	-0.8	-1.5	-2.5	-3.8
45	0	0.1	0	0	0	-0.1	-0.2	-0.5	-1.2	-2.3
60	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.1	0	-0.1	-0.2	-0.6	-1.2
75	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.6	-1.2	-2.2
90	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.3	-0.4	-0.8	-1.4	-2.5	-3.7
105	-0.2	-0.2	-0.3	-0.7	-1.1	-1.7	-2.5	-3.1	-4.3	-5.4
120	-0.5	-0.7	-1.2	-1.8	-2.6	-3.5	-4.4	-5.3	-6.1	-7.2
135	-1.5	-2.2	-3.2	-4.1	-5.0	-5.8	-6.6	-7.4	-8.4	-9.5
150	-2.2	-2.7	-3.3	-4.0	-4.9	-5.6	-6.4	-7.1	-8.0	-9.0

* Distance from Melting Pot Bottom

Table 7-3 Transition of Pure Lead Axial Temperature Distribution

Unit : °C

* Distance(mm) \ Time(min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	333.1	331.2	329.5	328.1	327.4	327.0	326.9	326.9	326.8	326.8
30	333.2	331.3	329.6	328.0	327.2	326.5	326.4	326.4	326.3	326.4
45	334.1	332.3	330.5	328.7	327.5	326.8	326.4	326.4	326.3	326.4
60	334.5	332.6	330.9	329.1	327.8	326.9	326.6	326.5	326.4	326.5
75	334.4	332.5	330.7	328.9	327.5	326.7	326.4	326.3	326.2	326.2
90	334.2	332.4	330.6	328.7	327.4	326.7	326.4	326.4	326.3	326.3
105	334.2	332.3	330.5	328.7	327.4	326.8	326.6	326.6	326.5	326.5
120	333.5	331.7	329.9	328.0	326.8	326.3	326.2	326.1	325.9	325.9
135	332.2	330.4	328.5	326.8	326.3	326.1	326.1	326.0	325.7	325.3
150	330.9	329.1	327.4	325.5	324.2	323.6	323.1	322.6	322.0	321.4

* Distance(mm) \ Time(min)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
15	326.8	326.9	326.8	326.4	325.9	325.3	324.7	324.0	323.3	322.1
30	326.4	326.4	326.4	326.3	326.2	325.9	325.6	324.9	323.9	322.6
45	326.4	326.5	326.4	326.4	326.4	326.3	326.2	325.9	325.2	324.1
60	326.5	326.6	326.5	326.5	326.5	326.6	326.5	326.3	325.9	325.3
75	326.2	326.3	326.2	326.3	326.2	326.2	326.1	325.8	325.2	324.2
90	326.3	326.4	326.3	326.3	326.1	326.0	325.6	325.0	323.9	322.7
105	326.4	326.4	326.3	325.9	325.5	324.9	324.1	323.3	322.2	321.1
120	325.7	325.5	325.0	324.4	323.6	322.7	321.8	320.9	320.1	319.0
135	324.6	323.9	322.9	322.0	321.1	320.3	319.6	318.7	317.7	316.6
150	320.9	320.4	319.8	319.1	318.2	317.5	316.7	316.0	315.1	314.1

* Distance from Melting Pot Bottom

Table 7-4 Transition of Quarz Tube Axial Temperature Distribution shown by Temperature Difference (Reference Temperature is at Time Zero.)

Unit : °C

Time (min) Distance (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.4	-0.7	-1.3	-1.8	-2.4	-3.0
30	0	0	0	0	0	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.6	-1.0	-1.6
45	0	-0.1	0	0	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.6
60	0	0	-0.2	-0.1	-0.1	0	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3
75	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.8
90	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	-0.6	-1.1	-1.8
105	0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.9	-1.4	-2.1	-2.9	-3.7
120	0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.3	-2.1	-2.8	-3.8	-4.6	-5.5
135	0	-0.2	-0.6	-1.0	-1.7	-2.6	-3.4	-4.4	-5.2	-6.1	-6.8	-7.7
150	0	-0.6	-1.1	-1.7	-2.2	-2.9	-3.4	-4.2	-5.0	-5.8	-6.6	-7.3
170	0	-0.5	-1.0	-1.6	-2.1	-2.6	-3.1	-3.7	-4.4	-5.0	-5.7	-6.4
195	0	-0.6	-1.4	-1.9	-2.5	-2.9	-3.5	-4.0	-4.7	-5.3	-6.0	-6.6
220	0	-0.8	-1.4	-2.0	-2.5	-3.1	-3.6	-4.3	-4.9	-5.5	-6.2	-6.8
245	0	-0.5	-1.1	-1.6	-2.0	-2.6	-3.0	-3.5	-4.0	-4.4	-4.8	-5.4
270	0	-0.3	-0.6	-0.9	-1.2	-1.5	-1.8	-2.0	-2.4	-2.5	-2.8	-3.1
295	0	-0.6	-0.7	-0.5	-0.9	-0.5	-1.0	-1.0	-1.0	-1.6	-1.7	-0.9
320	0	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.9	-0.7
345	0	0	0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2

* Distance from Melting Pot Boltom

Table 7-5 Transition of Quarz Tube Axial Temperature Distribution

Unit : °C

* Distance (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	327.0	326.9	326.9	326.9	326.8	326.8	326.6	326.3	325.7	325.2	324.6	324.0
30	326.4	326.4	326.4	326.4	326.4	326.4	326.3	326.2	326.1	325.8	325.4	324.8
45	326.4	326.3	326.4	326.4	326.4	326.4	326.4	326.4	326.3	326.2	326.1	325.8
60	326.6	326.4	326.5	326.5	326.6	326.6	326.6	326.5	326.5	326.4	326.4	326.3
75	326.4	326.3	326.3	326.3	326.3	326.3	326.3	326.2	326.2	326.1	326.0	325.6
90	326.5	326.4	326.4	326.4	326.4	326.4	326.4	326.3	326.1	325.9	325.4	324.7
105	326.8	326.6	326.6	326.6	326.5	326.4	326.3	325.9	325.4	324.7	323.9	323.1
120	326.3	326.1	326.0	325.9	325.7	325.4	325.0	324.2	323.5	322.5	321.7	320.8
135	326.3	326.1	325.7	325.3	324.6	323.7	322.9	321.9	321.1	320.2	319.5	318.6
150	323.3	322.7	322.2	321.6	321.1	320.4	319.9	319.1	318.3	317.5	316.7	316.0
170	319.1	318.6	318.1	317.5	317.0	316.5	316.0	315.4	314.7	314.1	313.4	312.7
195	307.5	306.9	306.1	305.6	305.0	304.6	304.0	303.5	302.8	302.2	301.5	300.9
220	280.2	279.4	278.8	278.2	277.7	277.1	276.6	275.9	275.3	274.7	274.0	273.4
245	184.0	183.5	182.9	182.4	182.0	181.4	181.0	180.5	180.0	179.6	179.2	178.6
270	129.4	129.1	128.8	128.5	128.2	127.9	127.6	127.4	127.0	126.9	126.6	126.3
295	84.2	83.6	83.5	83.7	83.3	83.7	83.2	83.2	83.2	82.6	82.5	83.3
320	59.1	59.0	58.8	58.7	58.6	58.7	58.7	58.6	58.5	58.4	58.2	58.4
345	42.4	42.4	42.4	42.2	42.2	42.2	42.1	42.0	42.0	42.0	42.2	42.2

* Distance from Melting Pot Bottom