

高速実験炉「常陽」75MW性能試験報告書

冷却系熱電対校正結果

1979年12月

動力炉・核燃料開発事業団

高速実験炉「常陽」75MW性能試験報告書

冷却系熱電対校正結果

鈴木利明^{*}、土井基^電、石川^電

要旨

常陽の1次系および2次系の冷却材温度測定にはCA熱電対が用いられている。75MW出力上昇試験において冷却材温度を正確に求めるために検出器、補償導線および計測器を含めた温度計測系としての校正を純金属の冷却特性を利用した温度定点法により実施した。使用した金属は純度99.999%の鉛と99.999%の亜鉛である。

原子炉出入口、IHX2次側出入口に設置されている熱電対(0.4級)は出力上昇試験用に製作した新しいものであるが、出力上昇試験前における基準値に対する熱起電力の差は亜鉛点(4196度)で-0.3度~+0.6度であった。出力上昇試験後にこれらの熱電対について再度校正を実施したところ7体の内2体は正側に、2体は負側にドリフトしていることが明らかになった。残りの3体についてはドリフトはみられなかった。主冷却器出入口の熱電対は6体の内1体を除いて据付時に設置されたものであるが、それらの亜鉛点におけるドリフト量は出力上昇試験開始前に+3.9度~+6.0度であった。

CA熱電対の熱起電力ドリフト現象についてはすでに計測、金属材料、原子力などの研究分野ですでに研究、調査が行われ、確認されている。これらの研究結果および今回の校正結果からみて、正確な温度を長期間にわたって得る場合はCA熱電対は必ずしも適切ではなく、また使用する場合は定期的な校正が必要と考えられる。

* 大洗工学センター高速実験炉部 原子炉第2課

** 大洗工学センター高速実験炉部 技 術 課

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)

of the drift of the thermocouples. These calibration results indicate that chromel/alumel thermocouples are not suitable for long-term use where accurate measurements are required; and if they must be used, periodic calibration is necessary.

PNC TN941 79-240

Dec., 1979

JOYO 75MWt START-UP TEST REPORT

Calibration of Chromel/Alumel Thermocouples Used for
Primary and Secondary Cooling Systems

by

Toshiaki Suzuki*, Motoo Doi**, and Makoto Isikawa**

ABSTRACT

Thermocouples were used to measure the temperature of the sodium in the primary and secondary cooling systems of the JOYO Experimental Fast Reactor during the 75 MW start-up test. The temperature measurement systems (which consist of the thermocouple, the compensating lead wires, and the digital recorder) were calibrated by an electrical furnace using the melting temperature of a pure metal as a reference.

New thermocouples were fabricated for the 75 MW start-up test, and were installed in the reactor vessel and the IHX inlet and outlet lines. Prior to the 75 MW start-up test, calibrations indicated differences from -0.3°C to $+0.6^{\circ}\text{C}$ from the standard reference of the freezing point of pure zinc (419.6°C). After the start-up tests, it was found that two thermocouples drifted in the positive direction, two thermocouples drifted in the negative direction, and the remaining three thermocouples did not drift.

The thermocouples used in the DHX inlet and outlet sodium lines were in use for over three years, except for the one in the A loop DHX outlet which was changed to a new one prior to the 75 MW start-up test. All of the old thermocouples used in the DHXs drifted in a positive direction from $+3.9^{\circ}\text{C}$ to $+6.0^{\circ}\text{C}$ at the pure zinc reference temperature (based on pre-test calibrations).

Reasons for the drift of the chromel/alumel thermocouples were investigated in the areas of a measurement, a metallic material and a atomic energy. These investigations established the definite occurrence

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

** Reactor Technology Section, same as above.

目 次

1. 緒 言	1
2. 定点校正法	2
3. 試験対象熱電対	3
4. 試験装置	4
4.1 温度定点装置	4
4.2 計測装置	4
5. 試験方法	6
5.1 温度計測系の校正	6
5.2 熱電対単体の校正	6
6. 試験結果	7
6.1 温度計測系の校正	7
6.2 熱電対単体の校正	8
7. 検 討	10
8. 結 言	12
9. 参考文献	13
10. 附 録	14

List of Tables

- Table 3.1-1 List of Calibrated Thermocouples
- Table 4.2-1 Instruments Used for Calibration
- Table 6.1-1 Calibration Results of Reactor Inlet and Outlet Thermocouples
- Table 6.1-2 Calibration Results of IHX Secondary Inlet and Outlet Thermocouples
- Table 6.1-3 Calibration Results of DHX Inlet and Outlet Thermocouples
- Table 6.1-4 Calibration Results of Reactor Inlet and Outlet, IHX Inlet and Outlet Thermocouples after 75 MW Start-up Test
- Table 6.1-5 Calibration Results of DHX Inlet and Outlet Thermocouples after 75 MW Start-up Test
- Table 6.1-6 Comparing Calibration Results of Reactor Inlet and Outlet, IHX Inlet and Outlet Thermocouples before Test with Ones after Test
- Table 6.1-7 Comparing Calibration Results of DHX Inlet and Outlet Thermocouples before Test with Ones after Test
- Table 6.2-1 Calibration Results of Used Thermocouples
- Table 6.2-2 Calibration Results of Digital Recorder (PROCOS-VII)
- Table 7.1-1 Comparing Calibration Results of Reactor Inlet and Outlet, IHX Inlet and Outlet Thermocouples measured Using E-60T with Using PROCOS-VII

List of Figures

- Fig. 2.1-1 Cooling Curve of Pure Metal
- Fig. 2.1-2 Electric Furnace for Calibration
- Fig. 2.1-3 Cooling and Heating Curve of Pure Zinc
- Fig. 3.1-1 Locations of Thermocouples
- Fig. 4.1-1 Test Equipment
- Fig. 5.1-1 Example of Heating and Cooling Curve of Pure Lead (Pb)
- Fig. 5.1-2 Example of Heating and Cooling Curve of Pure Zinc (Zn)
- Fig. 5.1-3 Calibration System
- Fig. 6.2-1 Calibration Results of Used Thermocouples

1. 緒 言

常陽の50MW出力上昇試験において冷却系の冷却材温度を正確に求めようとする場合は高精度のデジタルマルチ温度計 (YEW製 Type 2572) を用いて補償導線の端末部にて測定を行った。しかしながらこの方法では測定器自身の精度は良くなるが熱電対自身についてはその製品のクラスが0.75級であれば起電力の誤差も $\pm 0.75\%$ 以内ということで、温度の絶対値を正確に求めることは出来なかった。

75MWの出力上昇試験においては10℃毎に検定した0.4級の熱電対を用いることにより温度の絶対値をより正確に求めることが可能となったがその正確さを増すためには検出器から計測器までの補償導線および計測器が熱起電力に与える影響を定量的に把握する必要がある。

本報告書は純金属の融解特性を利用した温度定置装置を用いて75MW出力上昇試験開始前および試験終了後に実施した熱電対、補償導線および計測器の全てを含んだ計測系としての校正結果ならびにこれらの校正から確認された熱起電力のドリフト現象について調べるために行った既使用熱電対の校正結果について報告する。

2. 定比較正法

純金属を一定の条件下に液相から冷却した場合、凝固が起ると液相と固相の二相系となるため、自由度は0となり、凝固が始ってから終るまでFig. 2.1-1に示すように温度は変化しない。

定比較正法はこの純金属の冷却特性を利用したもので、錫(231.9℃)、鉛(327.5℃)、亜鉛(419.6℃)、アンチモン(630.7℃)などの純金属(純度99.99%以上)を酸化しないように黒鉛の坩堝に密閉し、例えばFig. 2.1-2に示すような電気炉の中に入れ加熱する。融解した温度から10℃ぐらい高い温度から徐々に冷却して凝固させる。融解または凝固するときはある時間一定の温度になっており、融解にくらべて凝固が精度よく校正できるため、通常は凝固点を使う。Fig. 2.1-3に亜鉛の冷却・加熱曲線の例を示す。

3. 試験対象熱電対

試験の対象となった熱電対は原子炉入口(A)・(B)、原子炉出力(B)、主中間熱交換器(A)・(B)の2次側出入口にそれぞれ設置した性能試験用のCA熱電対7体と主冷却器(A)、(B)の入口、同(1A)、(2A)、(1B)、(2B)の出口に設置されている既設のCA熱電対6体の計13体である。試験用の熱電対はシース外径0.5φの熱電対2本をチューブの中に入れ固定したもので熱電対の等級は0.4級である。既設の熱電対はシース外径3.2φ、等級は0.75級である。Table 3.1-1とFig. 3.1-1に熱電対の設置場所を示す。

単体での校正を行った熱電対は性能試験用の熱電対と交換するために取外した原子炉入口(A)・(B)、原子炉出口(B)に取付けられていた既設の熱電対3体(シース外径3.2φ、0.75級、ダブルエレメント)と主冷却器(1A)出口に取付けられていた既設の熱電対(シース外径3.2φ、0.75級、シングルエレメント)1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(仕様は前述のとうり)1体の計5体である。

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 35φ × 230 mm
 - ヒータ容量 1.5 KW
 - 使用最高温度 1150 °C
- (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 28φ/D × 21L/D × 180H (mm)
 - 材質 黒鉛
- (4) 保護管
 - i) 石英管
 - 寸法 9φ/D × 7L/D × 300H (mm)
 - ii) 炭焼管
 - 寸法 10φ/D × 6L/D × 300H (mm)
- (5) 黒鉛粉末
 - 電気炉と坩堝の間隙に充填材として使用。
- (6) 校正用金属
 - 錫 (純度: 99.999%)
 - 鉛 (純度: 99.9999%)
 - 亜鉛 (純度: 99.999%)
 - アンチモン (純度: 99.9999%)

温度定点装置の概要を Fig. 4.1-1 に示す。

4.2 計測装置

計測には次に示す計測器を目的に応じて組合せて使用した。組合せを Table 4.2-1 に示す。

- (1) デジタル式温度記録計 (江藤電気製)

- 型式 E-60 T
 - 入力 直流電圧
 - 出力表示 mV 又は C
 - 測定精度 ± 0.01 mV
- (2) デジタル式温度記録計 (千野製作所製)
- 型式 PROCOS-V II
 - 入力 直流電圧
 - 出力表示 mV 又は C
 - 測定精度 ± 0.02 mV 又は ± 1.8 °C
- (3) 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 °C において 0 °C ~ 0.02 °C
- (4) デジタルマルチメータ (タケダ管理研製)
- 型式 TR-6856
 - 入力 直流電圧
 - 出力表示 mV 又は V
 - 測定精度 ± 2.5 μV

5. 試験方法

5.1 温度計測系の校正

50MW出力上昇試験において1次系および2次系の冷却材温度を正確に求める場合は高精度のデジタルマルチ温度計（VEW製Type 2572）を用いて補償導線の端末部にて測定を行っているがこの方法では測定に時間がかかり、各信号の同時測定も出来ないため、中央制御室にデジタル式の温度記録計（E-60 T：江藤電気製）を設置し、この記録計に各部の温度信号を接続した。

校正は熱電対の取付けられている現場に温度定点点装置（電気炉、坩堝、等）を挿込み、熱電対を電気炉の中にセットされた坩堝に挿入し、金属の溶融、凝固の様子を現場および中央制御室に設置したデジタル記録計で計測することにより行った。使用した金属は鉛（融点は327.5℃）と亜鉛（融点は419.6℃）であり、これら金属の融点と計測された熱起電力の差が、計測系の誤差となるわけである。校正に使用する金属の定点は融解時と凝固時に得られるがFig. 5.1-1とFig. 5.1-2の融解・凝固曲線でも示されているとより融点に比べて凝固点のほうが安定しているため校正には凝固点を使用する。Fig. 5.1-3に校正システムの概略図を示す。また附録に詳細な校正手順を示す。

5.2 熱電対単体の校正

測定室に温度定点点装置とデジタル式温度記録計（PROCOS-V 11）を設置し、5.1項と同様な方法で校正を行った。使用金属は錫（231.9℃）、鉛（327.5℃）、亜鉛（419.6℃）、アンチモン（630.7℃）の4種類である。本項では計測系の誤差は含めないため、各校正点においてデジタル式温度記録計の校正を行った。

記録計の校正は熱電対を1体選び、高精度デジタルマルチメータと零度補償器を用いて各校正点の温度を計測し、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

6.1 温度計測系の校正

校正は出力上昇試験前と実施後の2回行った。実施前は1979年3月、実施後は1979年10月～11月である。以下に校正結果について述べる。

- (1) 原子炉入口(A)
試験実施前の基準値に対する差は鉛点（327.5℃）で-0.1℃、亜鉛点（419.6℃）で-0.3℃、実施後は鉛点が-0.5℃、亜鉛点が-0.6℃であり大きな変化はみられない。
- (2) 原子炉入口(B)
試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+0.4℃、亜鉛点で-0.1℃であり、実施後は鉛点、亜鉛点とも0.0℃で大きな変化はみられない。
- (3) 原子炉出口(B)
試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+0.2℃、亜鉛点で+0.1℃であり、実施後は鉛点で+1.4℃、亜鉛点で+1.3℃で、熱起電力は正側にドリフトしている。
- (4) IHX(A) 2次側入口
試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+1.1℃、亜鉛点で+0.6℃であり、実施後は鉛点で0.0℃、亜鉛点が-0.6℃で、熱起電力は負側にドリフトしている。
- (5) IHX(B) 2次側入口
試験実施前の基準値に対する差は鉛点で-0.1℃、亜鉛点で-0.3℃であり、実施後は鉛点で-0.3℃、亜鉛点が-0.6℃で、熱起電力に大きな変化はみられない。
- (6) IHX(A) 2次側出口
試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+0.7℃、亜鉛点で+0.4℃であり、実施後は鉛点で+0.5℃、亜鉛点が-0.6℃で、熱起電力は亜鉛点で負側にドリフトしている。
- (7) IHX(B) 2次側出口
試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+0.5℃、亜鉛点で+0.6℃であり、実施後は鉛点で+2.1℃、亜鉛点が+2.3℃で、熱起電力は正側にドリフトしている。
- (8) 主冷却器(A)入口
試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+5.1℃、亜鉛点で+5.3℃であり、実施後は鉛点で+5.0℃、亜鉛点が+4.8℃である。主冷却器入口については試験実施前は主冷却器建家電気室（S402）661盤の端子部でPROCOS-V 11により測定を行い、試験実施後は中央制御室で、E-60 Tにより測定を行った為、熱起電力の比較をすることはできない。
- (9) 主冷却器(B)入口

試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+4.9℃、亜鉛点で+6.0℃であり、実施後は鉛点で+3.8℃、亜鉛点で+4.8℃である。測定の方法は(8)項と同様である。

(10) 主冷却器(1A)出口

主冷却器(1A)出口の熱電対は校正を行う為に配管より引抜いた際、熱電対内部に損傷を与えた恐れがあった為、新しい熱電対と交換した。試験実施前の校正は時間の制約上、鉛点だけに於いて実施した。基準値との差は+1.6℃である。試験実施後の差は鉛点で+2.1℃、亜鉛点で+2.0℃であり、熱起電力はわずかに正側にドリフトしている。

(11) 主冷却器(2A)出口

試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+3.8℃、亜鉛点で+3.9℃であり、試験実施後は鉛点で+3.6℃、亜鉛点で+4.1℃で、熱起電力に大きな変化はみられない。

(12) 主冷却器(1B)出口

試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+4.0℃、亜鉛点で+4.6℃であり、試験実施後は鉛点で+3.1℃、亜鉛点で+4.1℃で、熱起電力はわずかに負側にドリフトしている。

(13) 主冷却器(2B)出口

試験実施前の基準値に対する差は鉛点で+3.8℃、亜鉛点で+3.9℃であり、試験実施後は鉛点で+3.1℃、亜鉛点で+3.2℃で、熱起電力はわずかに負側にドリフトしている。

(14) 主冷却器(A)出口合流点

主冷却器出口合流点は試験実施前は計測対象外としていた為、校正を行わなかった。試験実施後の基準値に対する差は鉛点で+4.1℃、亜鉛点で+5.1℃である。

(15) 主冷却器(B)出口合流点

試験実施後の基準値に対する差は鉛点で+2.1℃、亜鉛点で+3.0℃である。校正を行った11本の熱電対の試験実施前と実施後における熱起電力の変化は、変化無しが4本、正側にドリフトしたものが8本、負側にドリフトしたものが4本である。

Table 6.1-1, Table 6.1-2, Table 6.1-3 に試験実施前の校正結果を示す。原子炉出入口、IHX 2次側出入口については2本ずつ熱電対が取付けられており、各々の校正結果を記した。

Table 6.1-4, Table 6.1-5 に試験実施後の校正結果を示す。原子炉出入口、IHX 2次側出入口については2本の内ディジタル式温度記録計に入力した熱電対の校正結果を示した。Table 6.1-7, Table 6.1-8 に試験実施前と実施後の校正結果の比較を示す。

6.2 熱電対単体の校正

出力上昇試験実施前に行った主冷却器出入口部の熱電対の校正結果からこれまで使用してきた熱電対の熱起電力が正側にドリフトしていることが判明した為、性能試験用の熱電対と交換するために取外した原子炉入口(A)・(B)、原子炉出口(B)、新品の熱電対と交換した主冷却器出力(1A)、そしてこれらの既使用の熱電対と比較するために未使用のCCA熱電対(IHX 2次側出入口部)に使用

用した熱電対と同仕様の製品)の5体について単体の校正を行った。

校正は錫、鉛、亜鉛、アンチモンの4点で行った。Fig. 6.2-1 に各熱電対の熱起電力を示すが、最も大きくドリフトしていたのは原子炉出口(B)に取付けられていた熱電対でアンチモン点で基準値に対し+5.1℃、錫点で+1.7℃であった。この原子炉出口(B)と原子炉入口(A)、主冷却器出口(1A)側に取付けられていた熱電対は正側にドリフトした上に、温度が高くなるとドリフト量も大きくなる傾向を示している。原子炉入口(B)に取付けられていた熱電対は温度の高低に依存せず基準値に対し+1.5℃~+1.9℃となっている。未使用の熱電対は錫点で基準値に対し+0.8℃、アンチモン点で0.0℃~+0.2℃と真く一致しており、温度が高くなると基準値との差は小さくなる傾向を示している。Table 6.2-1 に校正結果を示す。原子炉出入口部の熱電対はダブルジャンクションであり、両方の結果はほぼ一致している。

単体の校正で使用したディジタル式温度記録計の誤差は錫、鉛、アンチモン点で-0.4℃、亜鉛点で-0.5℃であった。Table 6.2-2 に校正結果を示す。

7. 検 討

(1) 温度定点装置

温度定点装置について精度を確認するために性能試験用の新しい熱電対を用いて鉛点における計測を3日に分けて計5回実施した。計測値は基準値に対し $+0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $+0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、これは計測器 (PROCOS-V11) の精度内である。また指示温度の妥当性を確認するために測温抵抗体 (Pt 100 Ω , 0.5 級) による鉛点での計測を行い、基準値に対する差 $+0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ を得た。

以上の結果から温度定点装置は精度および確度とも満足すべきものであり、修正用装置として使用できることが確認された。

(2) 校正値の信頼性

校正値の信頼性は金属凝固点における温床の安定状態に依存し、この温度が一定であれば校正はきわめて信頼性の高いものとなる。出力上昇試験前の校正において原子炉出入口、IHX 2次側出入口の各熱電対の凝固点における温度変動は $30\text{ }\mu\text{V}$ (約 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) 以内であり、主冷却器出入口の熱電対の凝固点における温度変動は $10\text{ }\mu\text{V}$ (約 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) 以内であった。出力上昇試験実施後の校正では原子炉出入口とIHX 2次側出入口の熱電対に $50\sim 60\text{ }\mu\text{V}$ (最大はIHX(B)入口の鉛点で $120\text{ }\mu\text{V}$) の温度変動がみられた。これらの変動はデジタル式温度記録計 (E-60 T) の入力端子箱における雑音に起因すると考えられた為、別の記録計 (PROCOS-V11) で熱起電力の同時測定を行った。PROCOS-V11による測定値の変動は $10\text{ }\mu\text{V}$ 以内であった。校正値は金属の冷却曲線より最も妥当とみなされる値とし、PROCOS-V11によるデータは参考にとどめた。校正値とPROCOS-V11による計測値の差は原子炉出入口の熱電対で $30\text{ }\mu\text{V}$ 以内、IHX 2次側出入口の熱電対では鉛点で $30\text{ }\mu\text{V}$ 以内、亜鉛点で $70\text{ }\mu\text{V}$ 以内であった。Table 7.1-1に校正値とPROCOS-V11による計測値の比較を示す。主冷却器出入口の熱電対については主冷却器(A)入口を除いて温度変動は $30\text{ }\mu\text{V}$ 以内であった。

(3) 熱起電力の経年変化

CA熱電対の経年変化についてはこれまでにも素線の表面処理状態により正側にも負側にもドリフトし得ることが報告されている。

今回校正を行った新しい熱電対8体についてドリフトの傾向をみると、正側にドリフトしたものが3体、負側にドリフトしたものが2体、変化の無いものが3体となっている。

主冷却器出口部の熱電対は昭和48年に製作されたものであるが性能試験前後で3本のうち2本が負側にドリフトしている。これは一旦正側にドリフトしていた熱起電力のドリフトの量が減少したことを示している。この傾向は単体試験を行った熱電対についても現われており、3月に行った校正結果と5月に行った校正結果では鉛点で約 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ドリフト量が減少している。但し新しい熱

電対については3月と5月の校正結果は $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内で一致しており、装置による誤差ではないことを確認している。

校正結果を各々の熱電対の等級と比較してみると0.4級の性能試験用の熱電対は7体中1体 (IHX(B)出口) が規格を外れており、既設の熱電対 (0.75級) は8体の内6体が規格を外れてい

る。
以上の結果からみて長期間 (数年間) 使用した熱電対はそのほとんどが熱起電力にドリフトを起しており、又新しい熱電対でも高々半年間の使用で規格を越えてしまうものがあることはCA熱電対を選択する場合、その使用目的を十分に検討する必要があることを示している。

9. 参 考 文 献

- (1) 河野充：熱電対材料とその金属学的諸問題，日本金属学会会報第14巻第12号（1975）
- (2) 吉田武知代：クロメル-アルメル熱電対の不可避誤差と対策，化学工学第41巻第8号（1977）
- (3) 小山田六郎，安藤弘栄，大島裕之助，野村正之：クロメル-アルメル熱電対に関する調査 JAERI - memo 7112（1977）
- (4) M.B. Herskovitz, K.R. Carr, C.A. Mossman, H.H. Hubbell, Jr.
LONG TERM DRIFT OF COMMERCIAL SHEATHED CHROMEL/ALUMEL THERMOCOUPLES
AT 1600 °F ORNL-TM-3802

8. 結 言

今回実施した一連の校正は75MW出力上昇試験において主冷却系の冷却材温度についてより正確な値を得るためのものであるが，その過程でこれまで設備に取付けて使用してきた熱電対の熱起電力が正側にドリフト（最大で約5℃）していることが明らかになり，また50MW出力上昇試験において原子炉出入口，IHX2次側出入口に取付けた新しい熱電対も半年間使用しただけで正側にドリフトする傾向を示していた為，当初，校正は出力上昇試験前だけ実施する予定であったのを変更して出力上昇試験終了後に再度実施した。

校正結果については次のように要約される。

- (1) 原子炉出入口，IHX2次側出入口に取付けた新しい熱電対は出力上昇試験の実施前後で7体の内2体が正側に，2体が負側に熱起電力がドリフトしており，残りの3体には変化はみられない。正側にドリフトした2体の内1体は0.4級の規格を外れている。
- (2) 主冷却器出入口に取付けられている既設の熱電対8体（但し主冷却器（1A）出口は新しい熱電対）は全て正側に熱起電力はドリフトしており，その内6体は0.75級の規格を外れている。また主冷却器出口の熱電対4体の内2体は熱起電力が出力上昇試験前とくらべて試験後のほうがわずかに減少している。

CA熱電対の熱起電力ドリフト現象についてはすでに計測，金属材料など他の分野において研究，調査が行われており，ドリフトの原因は主にクロメル線の酸化による劣化が原因であり，素線の表面処理の良し悪しでドリフトは正側にも負側にも起り得るとの考えが示されている。現在，常陽も含めて大洗工学センタ内の高速炉関係の施設で使用されている熱電対はほとんどがCA熱電対であるがこのドリフト現象を承知の上で使用している施設は少ないものと考えられ，CA熱電対の特性について関係者に周知させることが必要かつ重要である。

今回得られた校正結果にもとずき1次冷却系および2次冷却系の主な熱電対はすべて交換した。今後1年毎に校正を行い，規格を外れたものについては交換することが望ましい。また今後建設されるプラントについては計測の目的を明確にし，目的に合った検出器を選定することが必要である。例えば原子炉出入口温度などのように重要な計測点については熱起電力のドリフト量の少ない熱電対を選択するとともに測温抵抗体など種類の異った検出器を併用することも考慮すべきである。

* 熱電対材料とその金属学的諸問題，河野充，日本金属学会会報第14巻第12号（1975）

10. 附 録

10.1 校正作業手順

現 場	制 御 室
<p>準備 (1)</p> <p>4.1 項で述べた温度定点点装 2 組を現場に運び床面に設置する。</p> <p>設置場所：格内 R 205, R 206 R 410, R 501 主冷 S 403, S 419 S 505, S 512</p> <p>1ヶ所に 2 組とも設置する。</p> <p>2 電気炉 (Fig. 5.1-1-①) に掛焼 (Fig. 5.1-1-②) を挿入する。掛焼には予め金属 (鉛と垂鉛) と石英管がセットされている。</p> <p>3 掛焼の上部に粉末黒鉛を (Fig. 5.1-1-③) 入れる。</p> <p>4 保護管を通して蓋 (Fig. 5.1-1-④) をする。</p> <p>5 保護管を固定金具 (Fig. 5.1-1-⑤) で固定する。保護管 (石英管) は割れ易いため十分注意して固定する。</p> <p>6 Fig. 5.1-1 に示すように電気炉-スライダック-AC 100V 電源の接続を行う。</p>	<p>準備</p> <p>1. 計測器の設置</p> <p>(1) 原子炉出入口温度および主冷却器出口温度</p> <p>中央制御室にデジタル温度計 (E-60 T) と零度補償器を設置し, Fig. 5.1-1 に示すとうり盤と計測器間の配線を行う。配線には CA 系線 (0.65φ) を使用する。</p> <p>信号取出端子番号</p> <p>原子炉入口(A) K 002-03 A (421 盤)</p> <p>" 入口(B) K 002-03 A (")</p> <p>" 出力(B) K 002-01 B (")</p> <p>主冷却器出口(1A) X 5-A07 (432 盤)</p> <p>" (2A) X 5-A08 (")</p> <p>" (1B) X 5-A09 (")</p> <p>" (2B) X 5-A10 (")</p> <p>(2) IHX 2 次側出入口温度</p> <p>計算機室にデジタル温度計 (E-60 T) と零度補償器を設置し, 中継端子盤と計測器間の配線を行う。</p> <p>信号取出端子番号</p> <p>IHX(A) 入口 X 4-79, 80 X 4-76, 77</p> <p>IHX(A) 出口 X 4-73, 74 X 4-70, 71</p> <p>IHX(B) 入口 X 4-65, 66 X 4-62, 63</p> <p>IHX(B) 出口 X 4-58, 60 X 4-55, 57</p>
<p>準備 (2)</p> <p>(1) 原子炉出入口温度および IHX 出入口温度</p> <p>1. 既設の熱電対をウェルから引抜き端子部で補償導線と切離す。</p> <p>2. 補償導線端子部に CA 系線 (ガラスワール被覆) を接続し, CA 系線の反対側の端子に性能試験で使用する「速応性熱電対」を接続する。</p>	<p>熱電対 (CA) CA 系線 補償導線</p>

現 場	制 御 室
<p>3. 熱電対は計算機用と熱出力計用の 2 本あるため中央制御室と連絡をとり, 接続された熱電対の Tag, No. と制御室盤内の補償導線端子番号の記録を行う。</p>	<p>(1) 主冷却器入口温度</p> <p>主冷却器室 (S402) にデジタル温度計 (PROCOS-V11) を設置し, 盤と計測器間の配線を行う。</p> <p>信号取出端子番号</p> <p>主冷却器入口(A) X 6-E.1, E2 (66 盤)</p> <p>" (B) X 6-E.1, E2 (")</p> <p>2. 計測開始 30 分前に電源を投入しウォーミングアップを行う。</p>
<p>4. 熱電対を電気炉にセットされている保護管に挿入する。</p> <p>5. 搬入済のデジタル温度計 (PROCOS-V11) を熱電対に接続する。(Fig. 5.1-1 参照)</p> <p>温度計は計測 30 分前に電源を投入し, ウォーミングアップを行う。</p> <p>(2) 主冷却器出入口温度</p> <p>1. 既設の熱電対をウェルから引抜き端子部で補償導線と切離す。</p> <p>2. 補償導線端子部に CA 系線を接続し, CA 系線の反対側の端子に引抜いた熱電対を接続する。</p> <p>3. 熱電対を電気炉にセットされている保護管に挿入する。</p> <p>4. Fig. 5.1-1 に示すとうりデジタル温度計 (PROCOS-V11) を熱電対に接続する。温度計は計測開始 30 分前に電源を投入し, ウォーミングアップを行う。</p>	<p>熱電対</p> <p>電気炉</p> <p>CA 系線</p> <p>クリップ</p> <p>T/C</p> <p>制御室</p> <p>PROCOS-V11</p> <p>別 図</p>

現 場	制 御 室
<p>試験</p> <p>1. デジタル温度計の設定を次のとおり行う。 FUNCTIONスイッチは「SET」 TIME ……時刻(例えば9:03)を設定 INT ……測定間隔0005を設定 GROUP ……101を設定 RANGE ……12・1を設定 REPEAT ……01を設定</p> <p>2. 設定の内容をLISTを押して確認する。</p> <p>3. FUNCTIONスイッチを「RUN」にし、「REQ」を押して温度の初期値を印字させる。</p> <p>4. 電気炉に接続されているスライダック電圧を次のとおり設定する。 鉛 ……30 V 亜鉛 ……35 V</p> <p>5. 金属が下記に示す温度まで上昇したらデジタル温度計の「INT」を0001に設定する。 鉛 ……約310 C 亜鉛 ……約410 C</p> <p>6. 金属が下記に示す温度まで上昇したらスライダック電圧を15 Vに設定する。 鉛 ……約335 C 亜鉛 ……約425 C</p> <p>7. 金属の温度が下り、金属の凝固点で温度が一定となった時点で定点の計測を行う。</p> <p>8. 熱電対1本の校正を行う場合は計測終了後スライダック電圧をOVとする。 熱電対2本の校正を行う場合は1本目の熱電対の計測が終了した後、保護管に挿入された熱電対を交換する。 スライダックの電圧を4項に示すとうり設定し、6～7項の作業を繰り返す。 計測終了後スライダック電圧をOVとする。</p>	<p>試験</p> <p>(イ) 原子炉出入口、IHX出入口、主冷却器出口温度</p> <p>1. デジタル温度計(E-60 T)の設定を次のとおり行う。 端子台 INPUT ……VOLTに設定 他は任意</p> <p>計測器</p> <p>SPECIAL CH ……10M, CH: 00 MAIN CH ……5M, FIRST: 00 LAST: 01 * POWER ……ON CLOCK SET ……RUN CHANNEL STEP ……AUTO SCAN START ……AUTO</p> <p>注: 主冷却器の場合はT/Cが1本のため00とする。</p> <p>2. SPECIAL CH.を15Cに設定し、温度の初期値を印字させる。</p> <p>3. 金属の凝固点で温度が一定となった時点で定点の計測を行う。 鉛凝固点 ……13.343 mV 亜鉛凝固点 ……17.220 mV</p> <p>(ロ) 主冷却器入口温度</p> <p>1. デジタル温度計(PROCOS-V11)の設定を次のとおり行う。 FUNCTION ……SET TIME ……時刻 INT ……0005 (5分間隔) GROUP ……101 RANGE ……12・1 REPEAT ……01</p> <p>2. FUNCTIONを「RUN」にし、「LIST」を押して内容を確認する。</p> <p>3. 「REQ」を押して温度の初期値を印字させる。</p>

現 場	制 御 室
<p>後 始 末</p> <p>1. 試験終了後、熱電対を保護管より引抜く。 2. 熱電対と補償導線をつないでいるCA素線を取外す。 3. 熱電対を配管のウェル内に挿入する。 4. 熱電対と補償導線を接続する。 5. 電気炉、デジタル温度計等試験装置一式を次の計測個所に移動する。</p>	<p>4. 金属の凝固点で温度が一定となった時点で定点の計測を行う。</p> <p>後 始 末</p> <p>1. 計測器一式を次の計測個所に移動する。</p>

Table 3.1-1 List of Calibrated Thermocouples

Locations of T/C	Tag Number	Locations of Terminal		Fabrication Number of T/C	Type of T/C	
		Pannel Number	Terminal Number			
Primary Loop	Reactor Inlet (A)	421	K002-03A	47273	Type K	
		---	---	47274	Chromoel-Alumel	
	Reactor Inlet (B)	421	K002-03B	47275	"	
		---	---	47276	"	
	Reactor Outlet (A)	421	K002-01A	---	"	
		---	---	---	"	
	Reactor Outlet (B)	421	K002-01B	47279	"	
		---	---	47280	"	
	IHX Inlet (A)	TE31.2-4AX	---	X4-79, 80	47286	"
			---	X4-76, 77	47285	"
IHX Inlet (B)	TE31.2-4BX	---	X4-65, 66	47287	"	
		---	X4-62, 63	47288	"	
IHX Outlet(A)	TE31.2-5AX	---	X4-73, 74	47290	"	
		---	X4-70, 71	47289	"	
IHX Outlet(B)	TE31.2-5BX	---	X4-58, 60	47291	"	
		---	X4-56, 57	47292	"	
DHX Inlet (A)	TE31.2-1A	661	X6-IR0526-E1, E2	IR0526-K3-1-1	"	
		661	X6-IR0526-E1, E2	IR0526-K3-1-2	"	
DHX Outlet(LA)	TE31.2-2A.1	432	X5-A07	16654	"	
		432	X5-A08	IR0526-KI-1-2	"	
DHX Outlet(2A)	TE31.2-2A.2	432	X5-A09	IR0526-KJ-1-3	"	
		432	X5-A10	IR0526-KI-1-4	"	

Table 4.2-1 Instruments Used for Calibration

Instruments	Purpose	Calibration of		Calibration of Thermocouples	Calibration of Digital Thermometer (PROCOS-VII)
		Instrumentation	System		
Digital Thermo-meter (F-60T)	Digital Thermo-meter (PROCOS-VII)	(1) *	(2) **	○	○
Digital Multi-meter (TR-6856)	Digital Thermo-meter (PROCOS-VII)	○	○	○	○
Cold Junction of Zero deg. C	Digital Multi-meter (TR-6856)	○	○	○	○

* Locations of Thermocouples are as follows: Reactor Inlet & Outlet, IHX Inlet & Outlet and DHX Outlet

** Locations of Thermocouples are DHX Inlet

Table 6.1-1 Calibration Results of Reactor Inlet and Outlet Thermocouples

Unit : °C

Location and Sensor No.	Metals Used for Calibration Serial No.	Lead (327.5 °C)		Zinc (419.6 °C)	
		Observed Value	Observed-Standard	Observed Value	Observed-Standard
Reactor Inlet (A) TE 31.1-7AX	47273	327.4	- 0.1	419.3	- 0.3
"	47274	327.7	+ 0.2	420.0	+ 0.4
Reactor Inlet (B) TE 31.1-7BX	47275	327.9	+ 0.4	419.5	- 0.1
"	47276	327.9	+ 0.4	419.3	- 0.3
Reactor Outlet (B) TE 31.1-1BX	47279	327.7	+ 0.2	419.7	+ 0.1
"	47280	327.7	+ 0.2	419.7	+ 0.1

Table 6.1-2 Calibration Results of IHX Secondary Inlet and Outlet Thermocouples

Unit : °C

Location and Sensor No.	Metals Used for Calibration Serial No.	Lead (327.5 °C)		Zinc (419.6 °C)	
		Observed Value	Observed-Standard	Observed Value	Observed-Standard
IHX (A) Inlet TE 31.2-4AX	47285	327.7	+ 0.2	419.7	+ 0.1
"	47286	328.6	+ 1.1	420.2	+ 0.6
IHX (B) Inlet TE 31.2-4BX	47287	327.4	- 0.1	419.3	- 0.3
"	47288	327.9	+ 0.4	420.0	+ 0.4
IHX (A) Outlet TE 31.2-5AX	47289	327.7	+ 0.2	420.0	+ 0.4
"	47290	328.2	+ 0.7	420.0	+ 0.4
IHX (B) Outlet TE 31.2-5BX	47291	328.0	+ 0.5	420.2	+ 0.6
"	47292	328.4	+ 0.9	420.0	+ 0.4

Table 6.1-3 Calibration Results of DHX Inlet and Outlet Thermocouples

Unit : °C

Location and Sensor No.	Metals Used for Calibration Serial No.	Lead (327.5 °C)		Zinc (419.6 °C)	
		Observed Value	Observed-Standard	Observed Value	Observed-Standard
DHX (A) Inlet TE 31.2-1A	IR0526-K3-1-1	332.6	+ 5.1	424.9	+ 5.3
DHX (B) Inlet TE 31.2-1B	IR0526-K3-1-2	332.4	+ 4.9	425.6	+ 6.0
DHX (1A) Outlet TE 31.2-2A-1	16654	329.1	+ 1.6	—	—
DHX (2A) Outlet TE 31.2-2A-2	IR0526-K1-1-2	331.3	+ 3.8	423.5	+ 3.9
DHX (1B) Outlet TE 31.2-2B-1	IR0526-K1-1-3	331.5	+ 4.0	424.2	+ 4.6
DHX (2B) Outlet TE 31.2-2B-2	IR0526-K1-1-4	331.3	+ 3.8	423.5	+ 3.9

Table 6.1-4 Calibration Results of Reactor Inlet and Outlet, IHX Inlet and Outlet Thermocouples after 75 MW Start-up Test

Unit : °C

Location and Sensor No.	Metals Used for Calibration Serial No.	Lead (327.5 °C)		Zinc (419.6 °C)	
		Observed Value	Observed-Standard	Observed Value	Observed-Standard
Reactor Inlet (A) TE 31.1-7AX	47273	327.0	- 0.5	419.0	- 0.6
Reactor Inlet (B) TE 31.1-7BX	47275	327.5	0.0	419.6	0.0
Reactor Outlet (B) TE 31.1-1BX	47279	328.9	+ 1.4	420.9	+ 1.3
IHX (A) Inlet TE 31.2-4AX	47286	327.5	0.0	419.0	- 0.6
IHX (B) Inlet TE 31.2-4BX	47287	327.2	- 0.3	419.0	- 0.6
IHX (A) Outlet TE 31.2-5AX	47290	328.0	+ 0.5	419.0	- 0.6
IHX (B) Outlet TE 31.2-5BX	47291	329.6	+ 2.1	421.9	+ 2.3

Table 6.1-5 Calibration Results of DHX Inlet and Outlet Thermocouples after
75 MW Start-up Test

Unit : °C

Location and Sensor No.	Metals Used for Calibration Serial No.	Lead (327.5 °C)		Zinc (419.6 °C)	
		Observed Value	Observed-Standard	Observed Value	Observed-Standard
DHX (A) Inlet TE 31.2-1A	IR0526-K3-1-1	332.5	+ 5.0	424.7	+ 5.1
DHX (B) Inlet TE 31.2-1B	IR0526-K3-1-2	331.3	+ 3.8	424.4	+ 4.8
DHX (1A) Outlet TE 31.2-2A-1	16654	329.6	+ 2.1	421.6	+ 2.0
DHX (2A) Outlet TE 31.2-2A-2	IR0526-K1-1-2	331.1	+ 3.6	423.7	+ 4.1
DHX (1B) Outlet TE 31.2-2B-1	IR0526-K1-1-3	330.6	+ 3.1	423.7	+ 4.1
DHX (2B) Outlet TE 31.2-2B-2	IR0526-K1-1-4	330.6	+ 3.1	422.8	+ 3.2
DHX (A) Outlet TE 31.2-3A	—	331.6	+ 4.1	424.7	+ 5.1
DHX (B) Outlet TE 31.2-3B	—	329.6	+ 2.1	422.6	+ 3.0

Table 6.1-6 Comparing Calibration Results of Reactor Inlet and Outlet, IHX Inlet and
Outlet Thermocouples before Test with Ones after Test

Unit : °C

Location and Sensor No.	Metals Used for Calibration Serial No.	Lead (327.5 °C)		Zinc (419.6 °C)	
		Before Test	After Test	Before Test	After Test
Reactor Inlet (A) TE 31.1-7AX	47273	- 0.1	- 0.5	- 0.3	- 0.6
Reactor Inlet (B) Te 31.1-7BX	47275	+ 0.4	0.0	- 0.1	0.0
Reactor Outlet (B) TE 31.1-1BX	47279	+ 0.2	+ 1.4	+ 0.1	+ 1.3
IHX (A) Inlet TE 31.2-4AX	47286	+ 1.1	0.0	+ 0.6	- 0.6
IHX (B) Inlet TE 31.2-4BX	47287	- 0.1	- 0.3	- 0.3	- 0.6
IHX (A) Outlet TE 31.2-5AX	47290	+ 0.7	+ 0.5	+ 0.4	- 0.6
IHX (B) Outlet TE 31.2-5BX	47291	+ 0.5	+ 2.1	+ 0.6	+ 2.3

Table 6.1-7 Comparing Calibration Results of DHX Inlet and Outlet Thermocouples before Test with Ones after Test

Unit : °C

Location and Sensor No.	Metals Used for Calibration Serial No.	Lead (327.5 °C)		Zinc (419.6 °C)	
		Before Test	After Test	Before Test	After Test
DHX (A) Inlet TE 31.2-1A	IR0526-K3-1-1	+ 5.1	+ 5.0	+ 5.3	+ 5.1
DHX (B) Inlet TE 31.2-1B	IR0526-K3-1-2	+ 4.9	+ 3.8	+ 6.0	+ 4.8
DHX (1A) Outlet TE 31.2-2A-1	16654	+ 1.6	+ 2.1	-	+ 2.0
DHX (2A) Outlet TE 31.2-2A-2	IR0526-K1-1-2	+ 3.8	+ 3.6	+ 3.9	+ 4.1
DHX (1B) Outlet TE 31.2-2B-1	IR0526-K1-1-3	+ 4.0	+ 3.1	+ 4.6	+ 4.1
DHX (2B) Outlet TE 31.2-2B-2	IR0526-K1-1-4	+ 3.8	+ 3.1	+ 3.9	+ 3.2

- 26 -

PNC TN941 79-240

Table 6.2-1 Calibration Results of Used Thermocouples

Locations of T/C	Metals Used for Calibration Serial No.	Tin (Sn)	Lead (Pb)	Zinc (Zn)	Antimony (Sb)	Remarks
		231.9 °C	327.5 °C	419.6 °C	630.7 °C	
Reactor Inlet (A) TE 31.1-7A (A)	—	233.9	329.8	422.3	634.1	
		+ 2.0	+ 2.3	+ 2.7	+ 3.4	
" (b)	—	234.0	330.0	422.6	634.7	
		+ 2.1	+ 2.5	+ 3.0	+ 4.0	
Reactor Inlet (B) TE 31.1-8B (A)	—	233.8	329.0	421.3	632.4	
		+ 1.9	+ 1.5	+ 1.7	+ 1.7	
" (B)	—	233.8	329.0	421.3	632.4	
		+ 1.9	+ 1.5	+ 1.7	+ 1.7	
Reactor Outlet (B) TE 31.1-1B (A)	—	233.6	329.9	423.0	635.8	
		+ 1.7	+ 2.4	+ 3.4	+ 5.1	
" (B)	—	233.6	329.8	422.8	635.7	
		+ 1.7	+ 2.3	+ 3.2	+ 5.0	
DHX (1A) Outlet TE 31.2-2A.1	IR0526-K-1-1	234.3	329.9	422.3	634.2	
		+ 2.4	+ 2.4	+ 2.7	+ 3.5	
Not Used (Reference T/C)	47299	232.7	327.9	420.0	630.9	
		+ 0.8	+ 0.4	+ 0.4	+ 0.2	
"	47300	232.7	327.8	419.7	630.7	
		+ 0.8	+ 0.3	+ 0.1	+ 0.0	

- 27 -

PNC TN941 79-240

Table 6.2-2 Calibration Results of Digital Recorder (PROCOS-VII)

Metals Used for Calibration Instruments	Tin (Sn)	Lead (Pb)	Zinc (Zn)	Antimony (Sb)
		231.9 °C	327.5 °C	419.6 °C
Digital Recorder (PROCOS-VII)	233.2 °C	327.4 °C	419.3 °C	630.3 °C
Digital Multimeter (TR-6856) with Zero Point Generator	9.485 mV	13.365 mV	17.234 mV	26.207 mV
	233.6 °C	327.8 °C	419.8 °C	630.7 °C
Differences	- 0.4 °C	- 0.4 °C	- 0.5 °C	- 0.4 °C

Table 7.1-1 Comparing Calibration Results of Reactor Inlet and Outlet, IHX Inlet and Outlet Thermocouples Measured Using E-60 T with Using PROCOS-VII

Location and Sensor No.	Metals Used for Calibration Serial No.	Lead (327.5 °C)		Zinc (419.6 °C)	
		Measured with PROCOS-VII	Measured with E-60 T	Measured with PROCOS-VII	Measured with E-60 T
Reactor Inlet (A) TE 31.1-7AX	47273	- 0.8	- 0.5	- 0.6	- 0.6
Reactor Inlet (B) TE 31.1-7BX	47275	0.0	0.0	- 0.3	0.0
Reactor Outlet (B) TE 31.1-1BX	47279	+ 1.4	+ 1.4	+ 1.0	+ 1.3
IHX (A) Inlet TE 31.2-4AX	47286	- 0.3	0.0	0.0	- 0.6
IHX (B) Inlet TE 31.2-4BX	47287	- 0.5	- 0.3	- 1.3	- 0.6
IHX (A) Outlet TE 31.2-5AX	47290	+ 0.2	+ 0.5	- 0.2	- 0.6
IHX (B) Outlet TE 31.2-5BX	47291	+ 2.0	+ 2.1	+ 2.3	+ 2.3

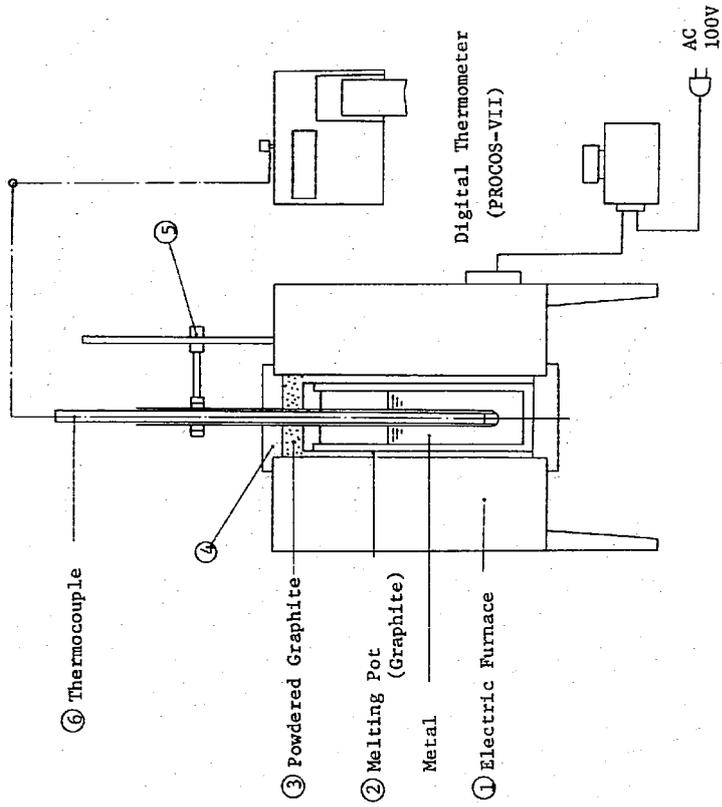


Fig. 4.1-1 Test Equipment

The Date : Feb.23, 1979
 Material : Lead (Pb)
 Melting Point of Pb : 327.5 °C
 Heater Voltage during Heating : 30V
 Heater Voltage during Cooling : 15V

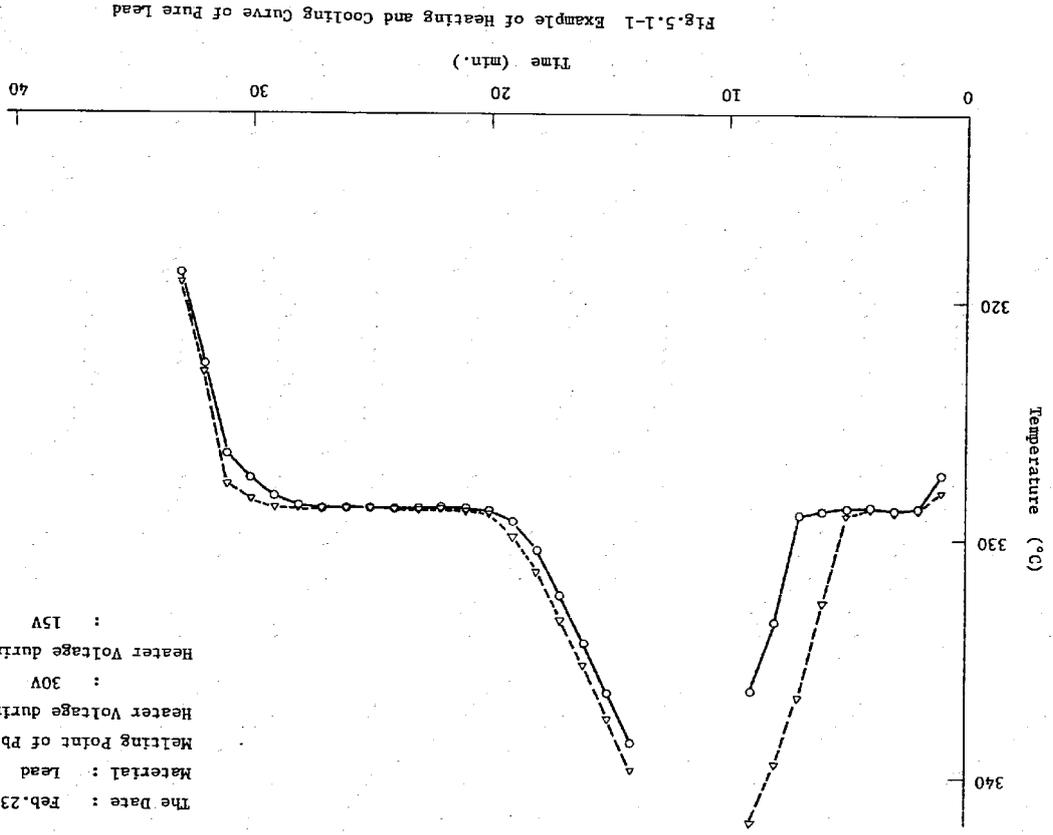


Fig.5.1-1 Example of Heating and Cooling Curve of Pure Lead

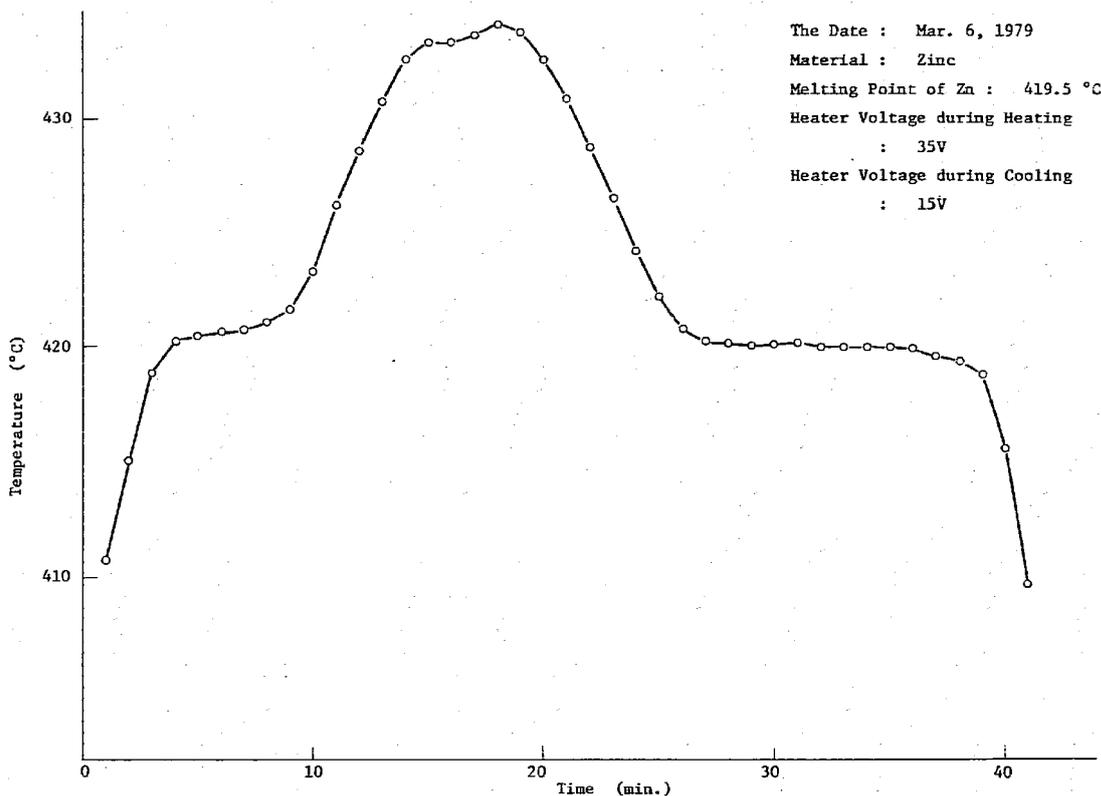


Fig.5.1-2 Example of Heating and Cooling Curve of Pure Zinc

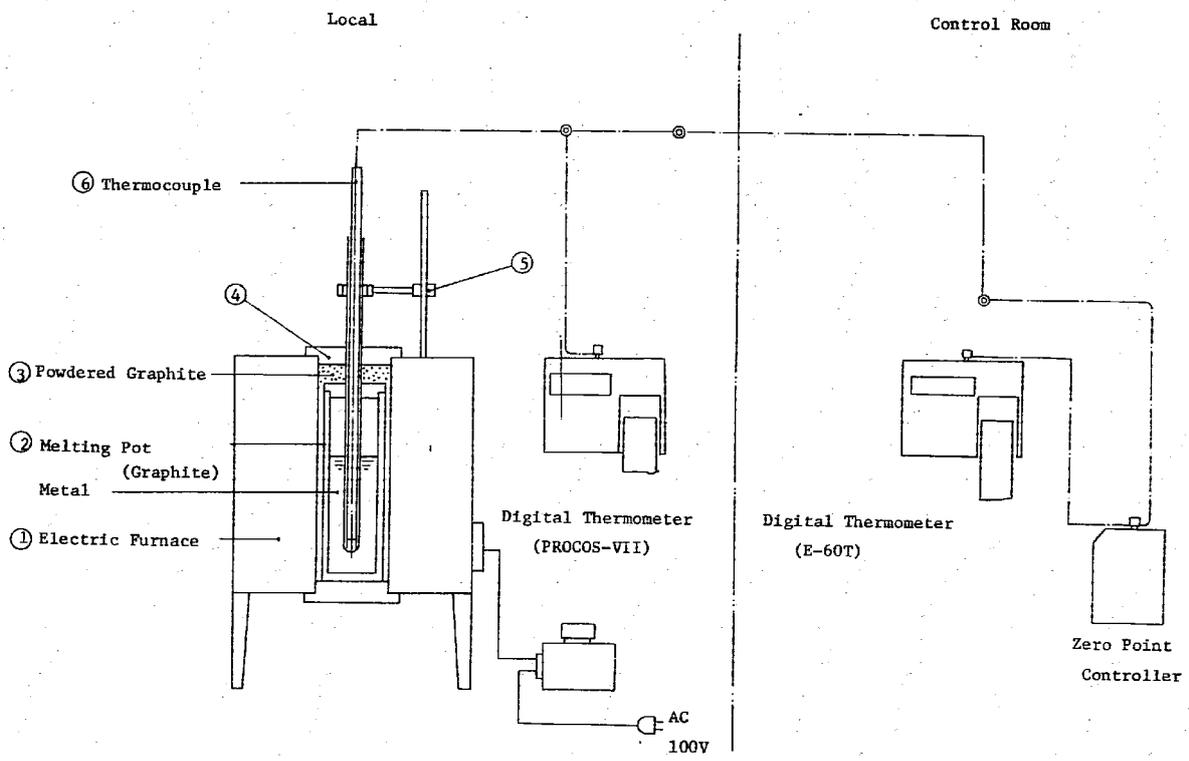


Fig.5.1-3 Calibration System

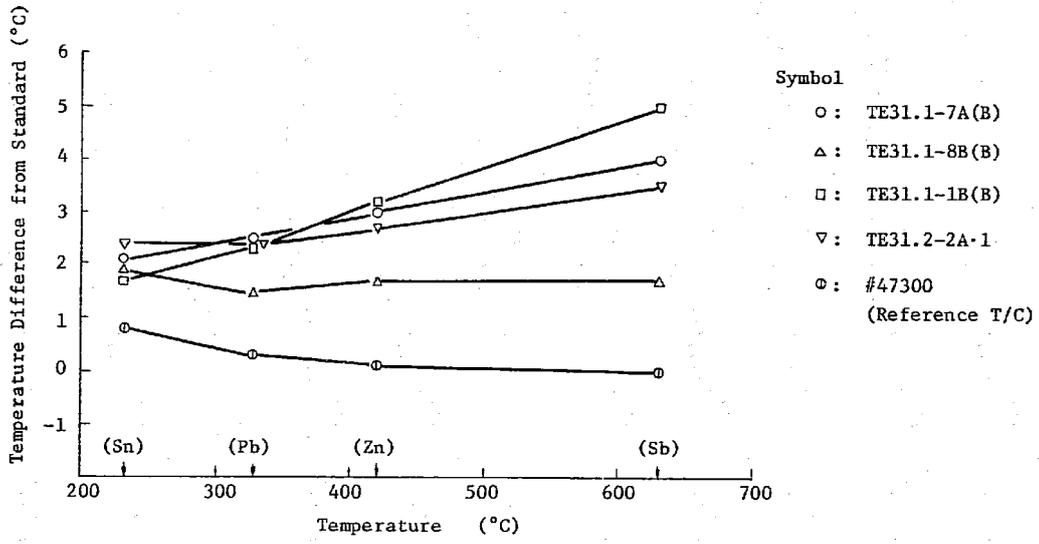


Fig. 6.2-1 Calibration Results of Used Thermocouples