

JAERI-M

6985

再冠水実験のための熱電対取付法の検討

1977年3月

杉本 純

この報告書は、日本原子力研究所がJAERI-Mレポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

再冠水実験のための熱電対取付法の検討

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

杉 本 純

(1977年2月1日受理)

再冠水実験における発熱体表面温度測定用熱電対の取付法について検討した。

各種の熱電対取付法をテストした結果、再冠水実験で従来用いられてきた取付法はクエンチ時刻を正しく評価できない場合があることが判明した。

熱電対先端部・リード線共に流路内にはない取付方式を試みてほぼ良好な結果を得た。

今後の再冠水実験でそのような取付方式を採用してゆくことを提案した。

Study on Thermocouple Attachment
in Reflood Experiments

Jun SUGIMOTO

Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI

(Received February 1, 1977)

The method of thermocouple attachment to a heater rods has been studied for surface temperature measurement in reflood experiments.

The method used as far in JAERI's reflood experiments had some possibilities of not estimating exactly the quench times.

Various attachment method have been tested and some proved to be effective in the respect.

目 次

第1章 序 論	1
第2章 熱電対取付法の問題点	2
2.1 再冠水実験の熱電対取付法	2
2.2 再冠水実験における熱電対取付法の問題点	3
第3章 熱電対取付法比較実験	9
3.1 実験の目的	9
3.2 テスト部	9
3.3 実験方法	13
3.4 実験条件	15
第4章 実験結果と検討	16
4.1 温度応答特性	16
4.2 A, Bタイプの検討	18
4.3 C, Dタイプの検討	25
4.4 テストピン(Ⅱ)の結果	26
第5章 考 察	29
第6章 結 論	33
謝 辞	33
参考文献	34

第1章 序 論

軽水路の一次系統破断による冷却材喪失事故（LOCA）時の主な過程には、ブローダウン過程と再冠水過程とがある。ブローダウン過程における炉心冷却材の放出の後、崩壊熱により過熱された炉心が緊急炉心冷却系（ECCS）によって最終的に冷却されてゆく過程が再冠水過程である。

再冠水過程における安全解析コード開発の一環として、原研では1974年より再冠水実験が開始され、現在まで数シリーズの実験が行われている。

Fig. 1.1 に再冠水実験で得られた模擬燃料棒被覆管の表面温度の一般的な応答を模式的に示す。横軸は再冠水開始以降の時刻である。模擬燃料棒は徐々に冷却されてある時刻で温度上昇は止まり、温度降下に転ずる。この点はターンアラウンド（turnaround）点と呼ばれている。さらに時間が経過するとゆるやかに温度降下を続けていた状態から急速な温度降下を示す。この点はクエンチ（quench）点と呼ばれている。クエンチ点の厳密な定義はいまだ確立されていないが、本報告では温度降下途中の変曲点をクエンチ点としている。クエンチ時刻を問題とする限りでは、降下途中の他の点を取っても大きな差異はないと考えられる。ターンアラウンド点は燃料被覆管の最高温度を示し、またクエンチ点は十分な冷却がその時点以降保障されることを示しているの

で、安全解析上重要な点となる。

原研における再冠水実験では、模擬燃料棒被覆管表面温度の計測には熱電対を使用している。実験データの解析によれば、熱電対が正しく表面温度を示していないと思われる例があった。その原因として、熱電対の取付法が不適切である可能性が指摘された。

そこで、再冠水実験で用いられた熱電対の取付法を他の取付法と実験により比較し、あわせて再冠水実験に適する熱電対取付法の開発を試みた。

本報告は、再冠水実験における熱電対取付法の問題点と、熱電対取付法の比較実験の結果について述べたものである。

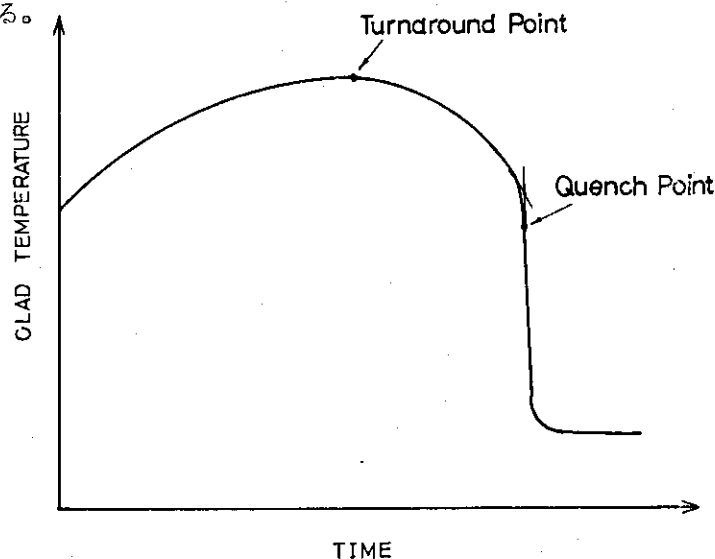


Fig. 1.1 Typical Clad Temperature Behavior in Reflood Experiment

第2章 熱電対取付法の問題点

原研における再冠水実験は1974年より開始され、現在までにシリーズ1, シリーズ2A, シリーズ2B (合せてシリーズ2), シリーズ3, シリーズ4の各実験が行われている。本章では主に再冠水実験シリーズ1, 2, 3で用いられた表面温度測定用熱電対の取付法と、解析結果から得られたその問題点について概説する。

2.1 再冠水実験の熱電対取付法

再冠水実験で使用されている模擬燃料棒 (以下発熱体と呼ぶ) は中空の円筒であり、発熱方式は直流による直接通電表皮発熱である。発熱体の表面温度測定には、シース径0.5mmの非接地型CA熱電対が用いられている。Fig. 2.1に再冠水実験シリーズ1, 2におけるテスト部を示す。発熱体は4本×4本の正方格子に組まれている。発熱体表面温度測定用の熱電対は、同図に見るように、発熱体表面にスポット溶接により取付けられている。熱電対のリード線は適当な長さ毎に押え板により、発熱体表面に沿って固定され発熱体下方に導かれるようになっている。

Fig. 2.2は再冠水実験シリーズ3におけるテスト部と熱電対取付法を示したものである。熱電対先端部はシース径の約半分をクラッド内に埋め込まれ、プラズマ溶接により固定されている。その写真をFig. 2.3に示す。

発熱体1本당りに取付けられている熱電対の数は、1本または7本であり、後者の発熱体の下方位置では熱電対リード線が1束になって発熱体表面に固定されている。この様子を示したものがFig. 2.4である。

再冠水実験における熱電対取付方法の主な特徴は次の通りである。

- (1) 熱電対先端部が発熱体表面にあり、表面温度の直接測定を意図している。
- (2) シース径が0.5mmと細く温度応答時定数が小さい。
- (3) 熱電対リード線が流路内にある。

2.2 再冠水実験における熱電対取付法の問題点

再冠水実験における熱電対取付では

- (1) スポット溶接、あるいはプラズマ溶接により発熱体との接触を良くし
- (2) シース径0.5mmの極細・低熱容量のものを選び、発熱体の発熱分布を大きくくずさないように配慮がなされている。再冠水現象自体は非常に過渡的なものであり、実験中に微少な液滴が飛散することが観測されており、この点での配慮も必要になってきた。

データ例

Fig. 2.5に再冠水実験シリーズ2Aで得られた発熱体表面温度応答データの一例を示す。再冠水

実験シリーズ1, 2A, 2B で得られた発熱体表面温度データに時析見られる、一見特異的かと思われる現象を以下に挙げてみる。同図(a), (b), (c) から、

- (a) 高温時(300°C以上)の温度応答に下向きスパイクが見られる。
- (b) クエンチ途中で、温度応答が一時停滞、または再上昇する。
- (c) クエンチ後の温度応答が、飽和温度以上を示したり、時に小さきみな上向きのスパイクで振動したりする。

これらの現象が真に模擬燃料棒表面の温度応答であるとは考えにくい面があるので、流路内にある熱電対が液滴を感じたり、液塊を捕足したりしていることが想像された。

Fig 2.6 は再冠水実験 RUN 2007 (シリーズ2A) と RUN 3004 (同3) の、それぞれの熱電対位置におけるクエンチ時刻をプロットしたものを示す。(以下このような図をクエンチエンベロープと呼ぶ) 同図点線で示されているような現象がシリーズ2Aで見られる。すなわち、

- (d) 発熱体の高さ位置によらずに、ある時刻でほとんど同時にクエンチを示す。

この現象はシリーズ2A実験では一般的であった⁽²⁾。しかし、上方と下方とで同時にクエンチ、すなわち冷却水がその部分に供給され続けるということは考えにくい。少くとも米国 W. H. 社の再冠水 FLECHT 実験⁽³⁾ではそのような現象は見られず、クエンチは下方よりほぼ順である。また熱電対の取付法を改良した RUN 3004 でも(d) のようなことは見られない。(d) の起きる時刻が、注入された冷却水が上方に飛散する時刻とほぼ一致していることから、この同時クエンチの現象もやはり熱電対による液滴・液塊捕捉の可能性が指摘される。ただし、少くとも発熱体最上部では飛散液滴の連続的な供給による、再附着型のクエンチ⁽⁴⁾である可能性は大きい。

Fig 2.7(a), (b) はシリーズ2A, 3実験における、同一高さ(中央部)における異なった発熱体のクエンチ時刻をその発熱体名(A~F)で示したものである。同図から次のことが言える。

- (e) C, D ロッド発熱体は他のロッドに比べて一般に早くクエンチする。

この現象はその原因として、再冠水テスト部流路外管の熱効果やスペーサグリッドの影響も考えられるが、C, D ロッドが早く冷却されることから、Fig 2.4 に示した熱電対リード線(あるいは押え板)によるフィン効果、毛細管効果が有力である。シリーズ3における方がクエンチ時刻のバラツキの程度が小さいのは熱電対取付法が改良された効果と考えられる。

まとめ

再冠水実験で得られた温度応答では時析、特異的な現象が見られる。その原因には以下のものが考えられる。

- (1) 熱電対先端部による飛散液滴・液塊の捕捉。
- (2) 熱電対リード線あるいは押え板によるフィン効果、あるいは毛細管現象
- (3) スペーサグリッド、流路外管等の熱電対以外の影響

いずれにしても、冷却が促進される方向にあり、クエンチ時刻を小さ目に見積ってしまう可能性がある。

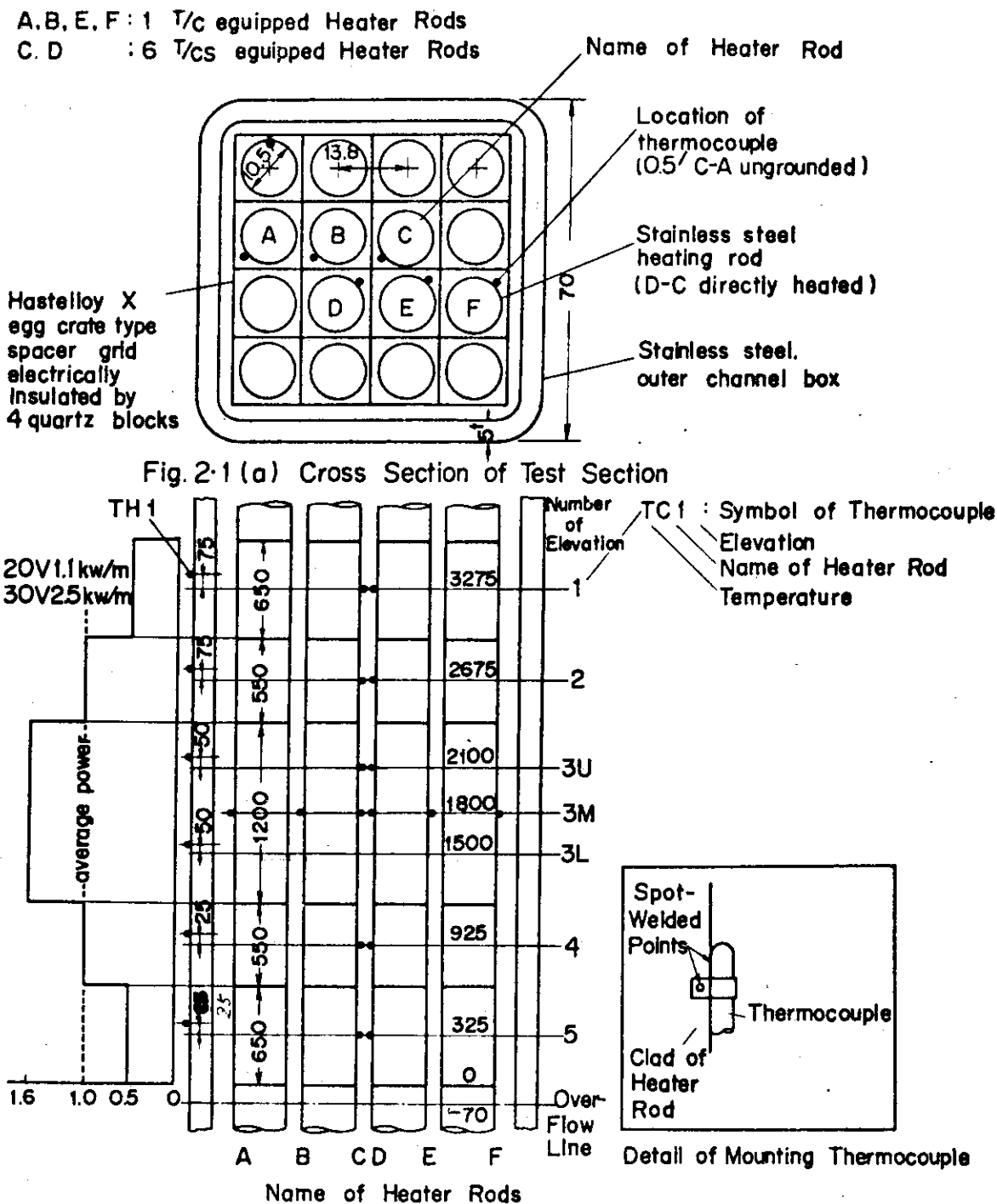


Fig. 2.1 Location of Thermocouple and Power Distribution of Heater Rods, and Location of Thermocouple of Outer Channel Box (Reflow Experiment Series 2)

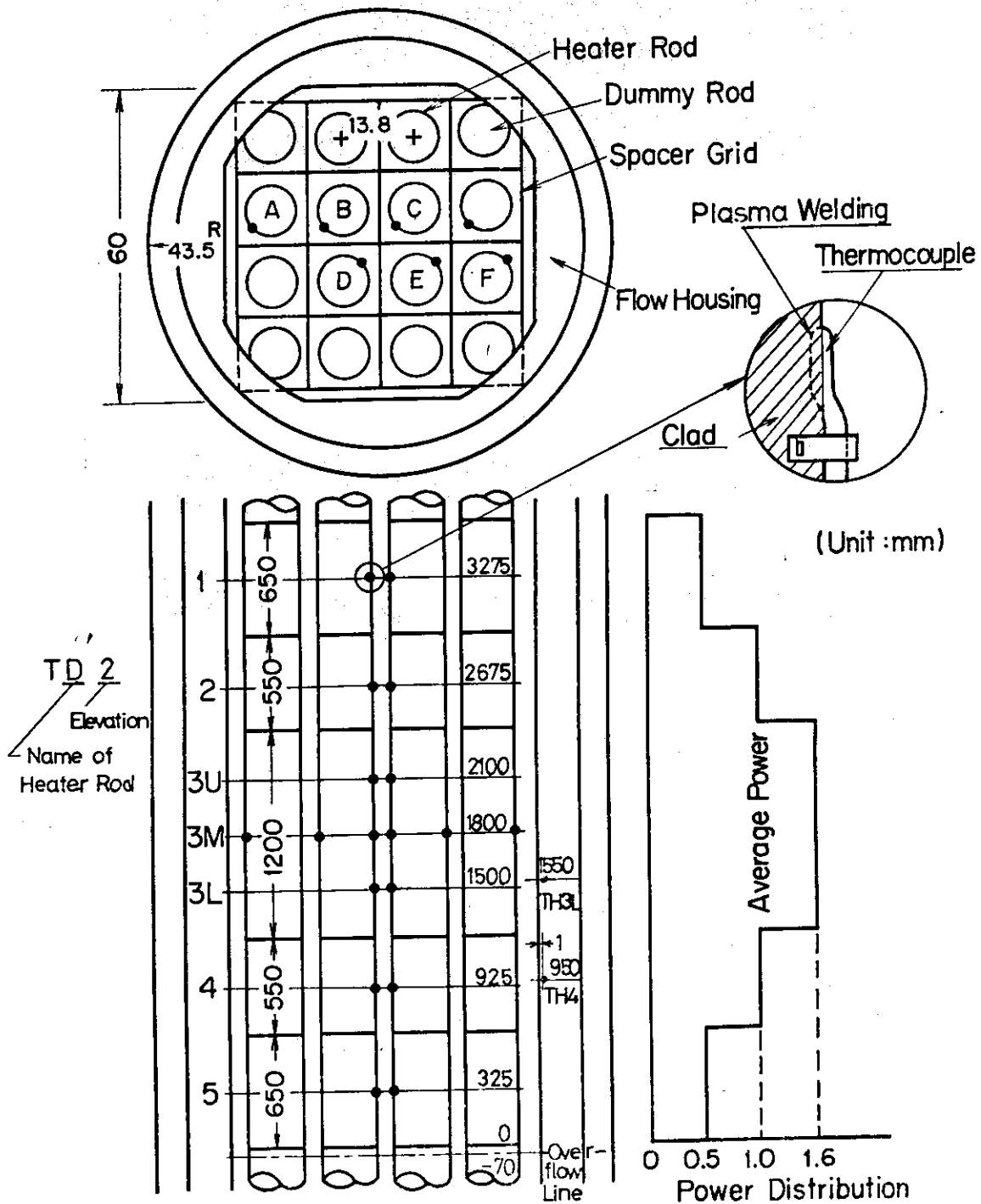


Fig. 2.2 Crosssection of Test Channel and Location of Thermocouples (Reflow Experiment Series 3)

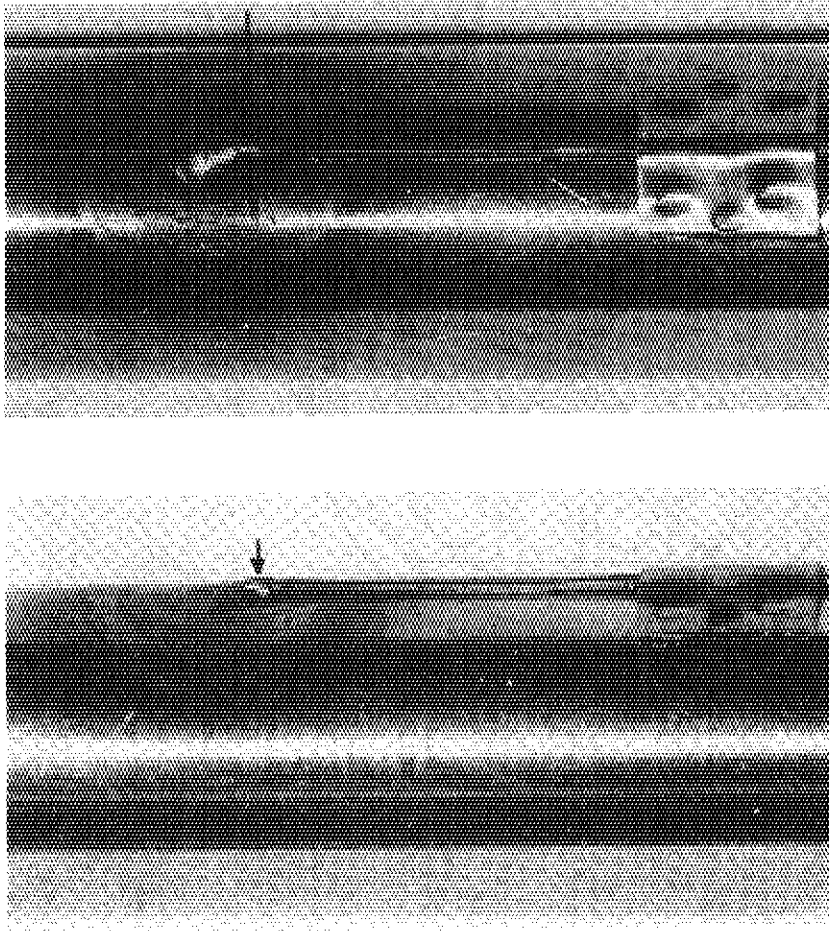


Fig. 2.3 Heater Rod Thermocouple
(↓ indicates end of thermocouple)

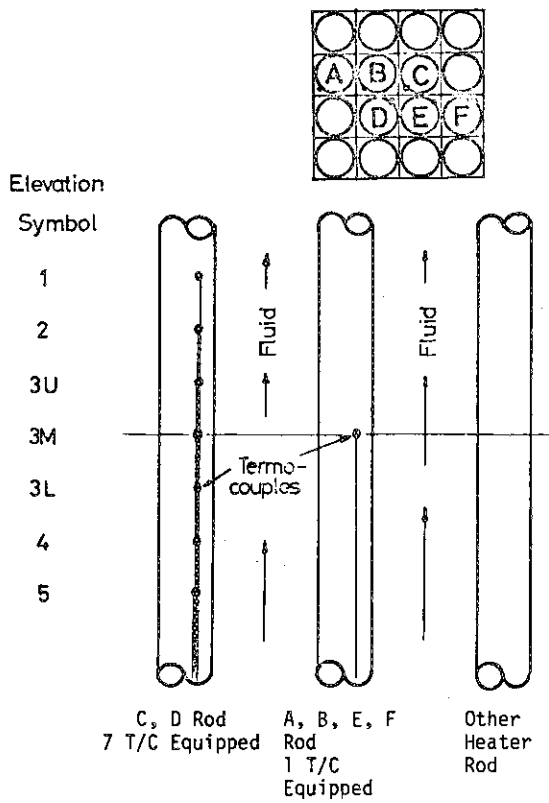


Fig. 2.4 Thermocouples Arrangement
in Reflood Experiment

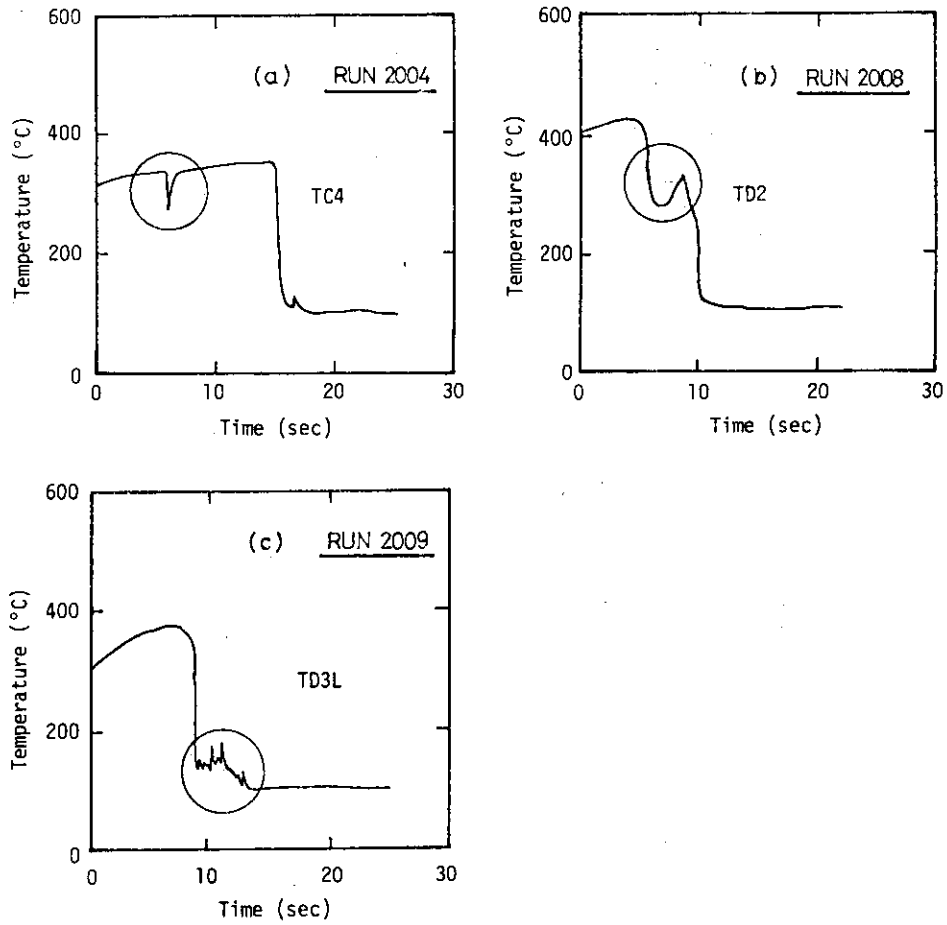


Fig. 2.5 Examples of Temperature Response (Reflood Experiment Series 2)

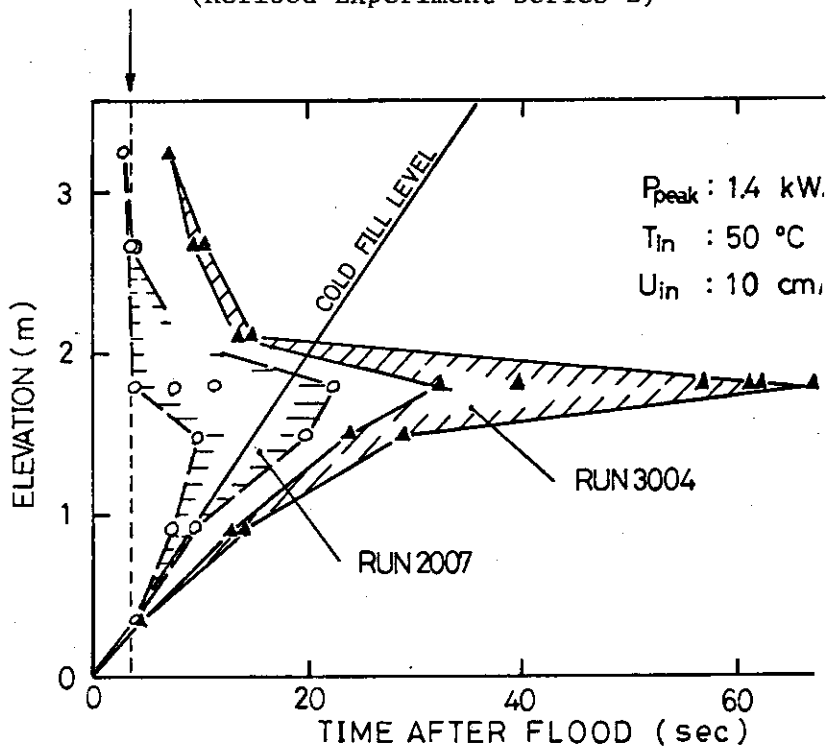
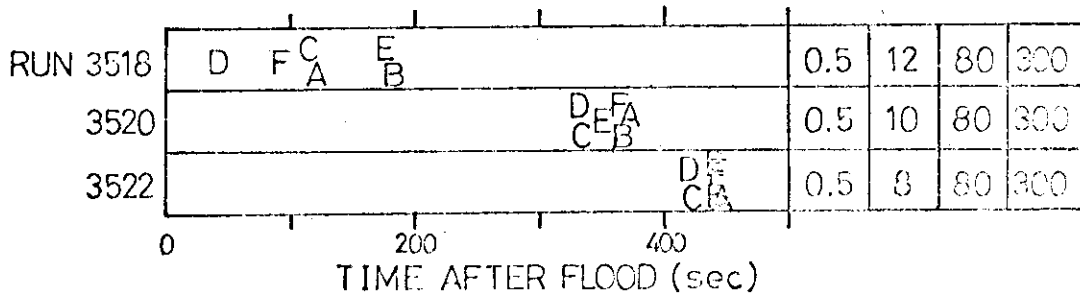
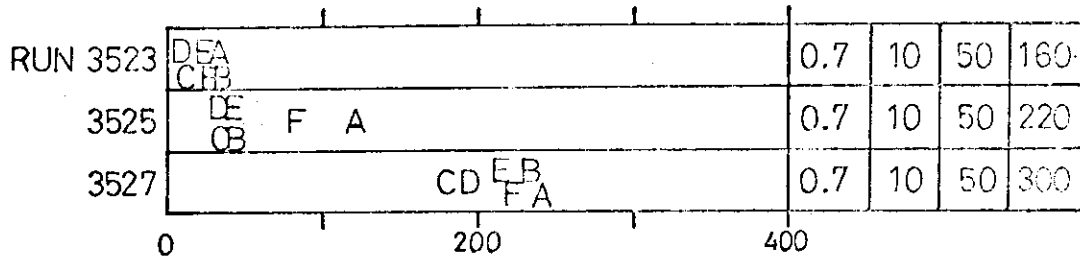
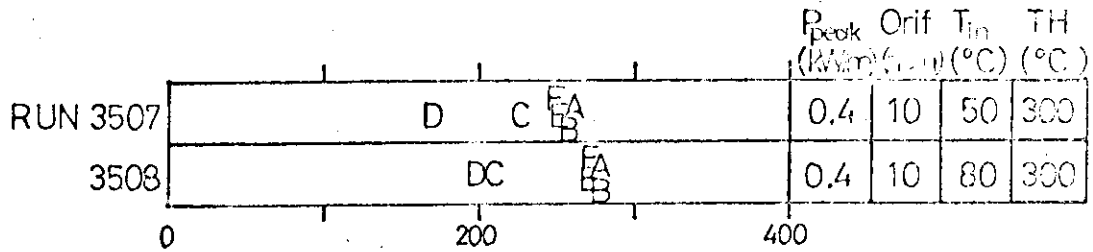
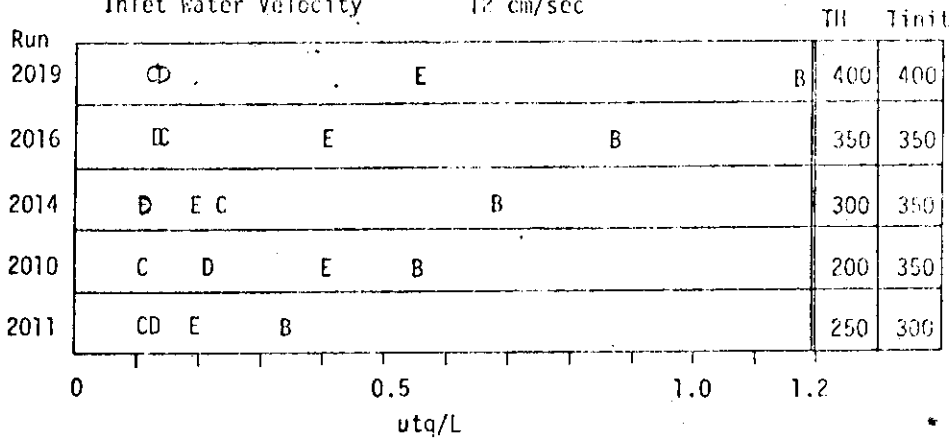


Fig. 2.6 Quench Envelopes for Run 2007 and Run 3004 (Reflood Experiment Series 2, 3)

Inlet Water Temperature 50°C
 Peak Power 1.8 kW/m
 Inlet Water Velocity 12 cm/sec



MIDPLANE QUENCH TIME CHARACTERISTICS

Fig. 2.7 Characteristics of Midplane Quench Time

第3章 熱電対取付法比較実験

3.1 実験の目的

前章に述べたように、再冠水実験における発熱体表面温度測定用の熱電対は、必ずしも正しい表面温度を指示していない可能性がある。そこでこのことを実験的に確認するために、熱電対取付法比較実験を行った。

実験の主な目的は次の2点である。

- (1) 再冠水実験で使用されている熱電対の取付法で、どの程度正しく表面温度が測定できているかを検討すること。
- (2) 再冠水実験に適する他の取付法を開発する。

テスト用のピンには、テストピン (I) とテストピン (II) の2種類があって、それぞれの目的は次の通りであった。

テストピン (I)

再冠水実験で従来用いられていた熱電対の取付法を主に検討する。合せて新しい取付法を試みる。

テスト (II)

(I) での結果をもとに、主に新しい取付法を検討する。合せて、(I) で検討し残した方式を検討する。

3.2 テスト部

Fig. 3.1 にテスト部と他の構成物を含む実験装置のフローシートを示す。

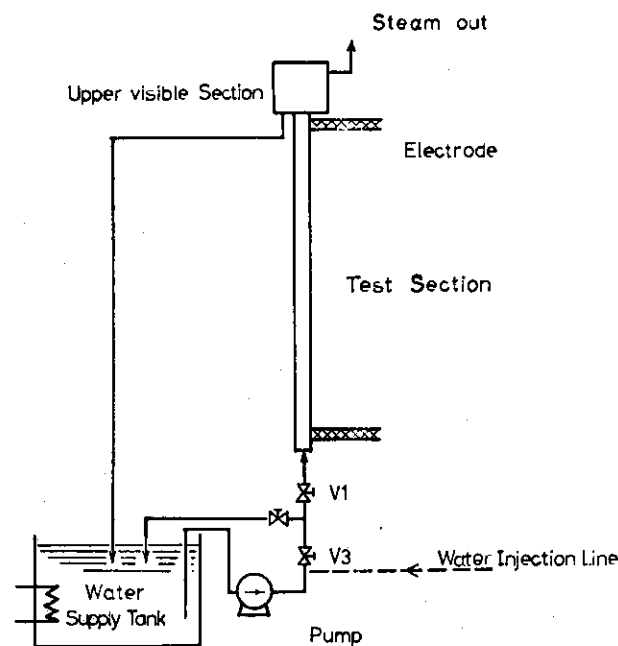


Fig. 3.1 Test Rig Flow Sheet

Fig 3.2 (I) に本実験で用いられたテストピン (I) を示す。テストピンは長さ1 m, 外径10 mm, 内径6.8 mmのステンレス製の円管である。円管に直接電流を通じて発熱させ、円管内下部より冷却水を注入し、再冠水実験時を模擬するよう設計された。同図に見るような各種の取付法を施した熱電対が8本付いている。

Fig 3.2 (II) にテストピン (II) を示す。同図の各種取付法を施した熱電対が6本付いている。

各種熱電対取付法の概要

(1) Aタイプ

再冠水実験シリーズ1, 2で用いられた取付法と同等な取付法である。

テストピン内表面に熱電対先端をスポット溶接により固定している。流路内にある熱電対リード線は、押え板により2ヶ所で流路内を表面に沿って固定され、流路上流側（実験時では下方）に引き出されている。

(2) Bタイプ

再冠水実験シリーズ3で用いられた取付法と同様の取付法である。テストピン内表面に溝を切り、熱電対シース径（0.5 mm）の約半分を表面に埋め込んでいる。先端部はスポット溶接により固定しているが、再冠水シリーズ3ではプラズマ溶接を用いた。熱電対リード線はやはり2ヶ所で押え板で固定され、流路内を表面に沿って引き出してある。リード線の引く方向はテストピン (I) ではAタイプと同じく下方へ、テストピン (II) では上方に引いてある。Fig 3.3 (B) にBタイプ取付法の写真を示す。

(3) Cタイプ

新しく試みた取付法のひとつである。取付法の詳細図をFig 3.4に示す。テストピン表面に垂直に穴をあけて熱電対を差し込み、表面流路側に先端部をアルゴンアーク溶接にて固定したものである。同図に示すように、シース部・絶縁部を除いた熱電対の先端中心は外表面より約0.5 mm離れた点にあると考えられる。

(4) Dタイプ

同じく新しく試みた取付法である。詳細図はFig 3.3に示してある。テストピン表面に斜めに穴をあけ、熱電対先端部分を表面に沿って溝に埋め、銀ろう溶接により固定したものである。熱電対の中心点は外表面より約0.25 mm離れた点にある。Fig 3.3 (D) にDタイプ取付法の写真を示す。

(5) Eタイプ

A～Dタイプの取付法と比較するための参照用の取付法である。テストピンの外表面（流路側から見ると内側表面）に直接スポット溶接により固定してある。Fig 3.1 (I), (II) でE1, E2, E3, E4とあるのはすべてEタイプの取付法である。Fig 3.3 (E) にEタイプ取付法の写真を示す。

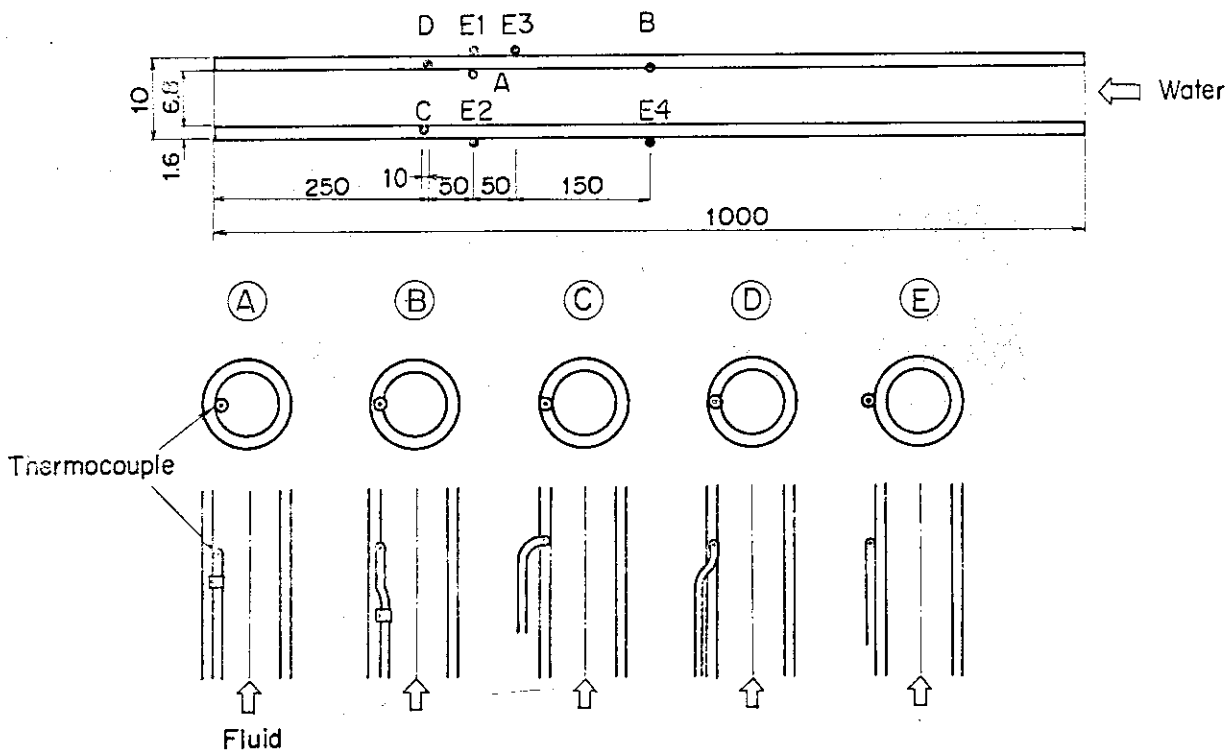


Fig. 3.2(I) Thermocouple Attachment Test Pin (I)

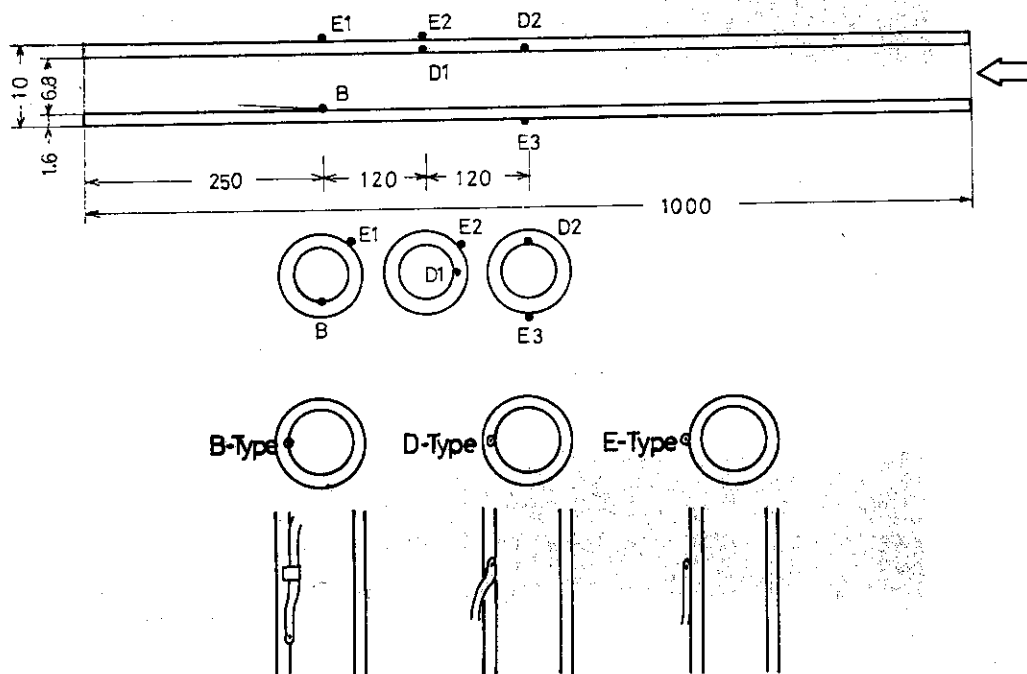


Fig. 3.2(II) Thermocouple Attachment Test Pin (II)

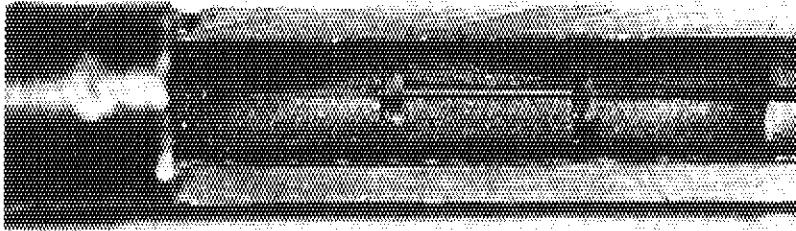


Fig. 3.3(B) Thermocouple for Type B

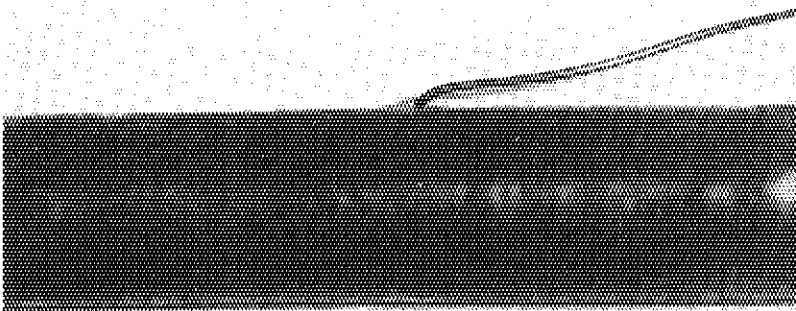


Fig. 3.3(D) Thermocouple for Type D

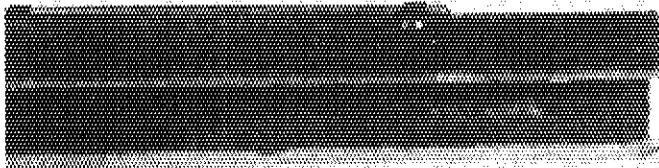


Fig. 3.3(E) Thermocouple for Type E

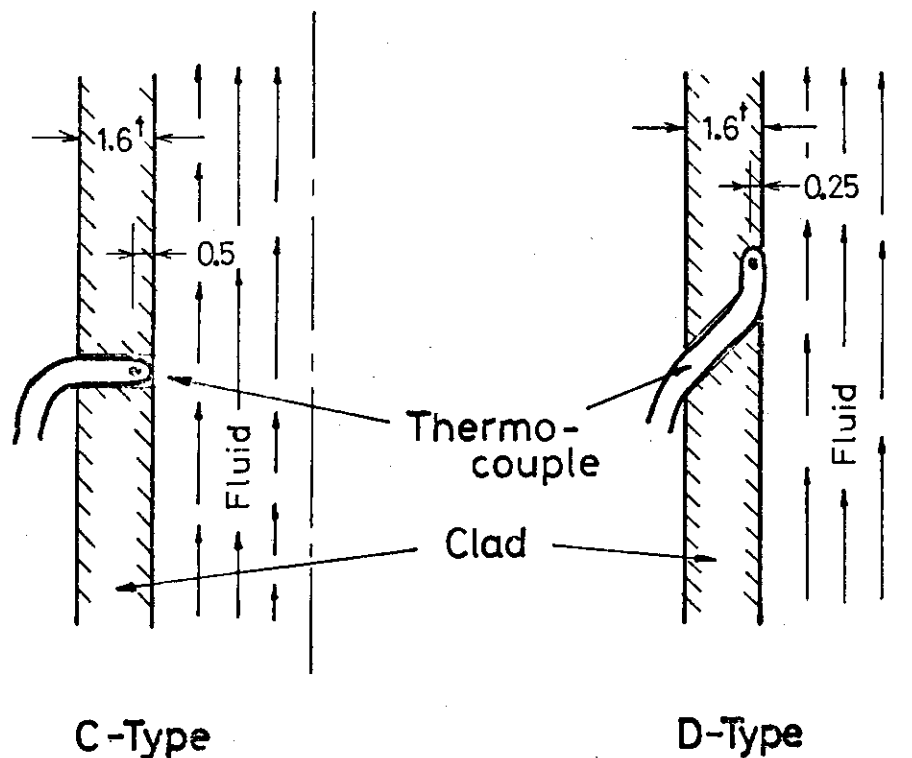


Fig. 3.4 Thermocouples Attachment Methods for Type C and Type D

使用された熱電対は、テストピン（II）のE 1を除いて、すべてクロメルアルメル非接地型熱電対でシース径は0.5mmのものを用いている。テストピン（II）のE 1ではクロメルアルメル接地型0.25mm熱電対を用いている。

テストピンの上下部には電極が取付けられている。さらにテストピン外側は断熱材が巻かれている。

テストピンの上方には、ガラス製の上部可視部がありテストピン内部を上昇して来た流体を直接観測できるようになっている。

3.3 実験方法

実験は以下の手順により行われる。フローシート Fig 3.1を参照のこと。

- (1) 恒温槽の冷却水を所定の温度にまで予熱する。
- (2) 弁V 1を閉じ、V 2を開け、循環ポンプを起動させ、バイパスラインを循環させながらV 3により流量を調節する。

（ただし、注入水温が室温のものはFig 点線の水注入ラインより直接注入水を引いている）

Table 3.1 Summary of Test Conditions

Test No.	Linear Power (kW/m)	Inlet Water Velocity (m/sec)	Inlet Water Temp. (°C)	Initial Clad Temp. (°C)	Water Injection Time (sec)	Test Date
1	1.3	8.5	25	300	27.5	808-1-3
2	1.3	26.5	25	300	38.5	808-1-5
3	1.2	12.5	25	300	13.5	808-1-6
4	1.7	11.5	25	300	7.5	808-1-7
5	1.2	8.0	25	300	15.0	829-1-3
6	1.2	10.5	25	300	7.5	829-1-4
7	1.9	11.5	25	300	9.25	829-2-4
8	1.9	9.0	25	300	9.0	829-2-5
9	1.9	7.0	25	320	5.0	829-2-6
10	1.1	19.5	50	300	7.0	916-1-5
11	1.2	14.5	50	300	14.0	030-1-3
13	1.2	12.0	50	300	16.0	030-1-5
14	1.2	14.5	50	300	15.0	111-1-3
15	1.2	18.5	50	300	15.0	111-1-4
16	2.6	26.5	50	300	7.0	111-1-5
17	2.6	32.5	50	320	7.0	111-1-6
18	1.9	32.5	50	300	9.0	111-1-7
19	1.9	21.5	50	300	9.0	111-1-8
20	0.7	18.0	55	300	13.0	120-1-3
21	0.7	13.0	60	300	13.0	120-1-4
22	1.2	12.5	60	300	8.0	120-1-5
23	1.2	22.0	60	300	7.0	120-1-6

- (3) テスト部に電源を投入する。
- (4) 発熱体温度が設定値に到達すると同時に弁V2を閉じ、V1を開け、冷却水をテストピン内に注入させる。
- (5) 発熱体各部が完全に冷却されるか、または温度が上昇しすぎる場合は電源を切る。

実験では、熱電対からの温度応答の他に発熱体供給電力（電圧，電流）を計測している。計測信号は再冠水実験と同様に、高速データ集録装置に記録され、計算センターによる処理がなされている⁽²⁾。

3.4 実験条件

熱電対取付法比較実験の実験範囲は次の通りである。

発熱対線出力	0.7~2.6	KW/m
注入水流速	7~26	cm/sec
注入水温度	25~60	°C
発熱体初期温度	300	°C

個々の実験条件を Table 3.1 に示す。

Test NO 1~10 までがテストピン (I) による実験であり、Test NO 11~23 までがテストピン (II) による実験である。

第4章 実験結果と検討

4.1 温度応答特性

クエンチ時温度降下速度

Fig 4.1(c), (b), (c)にTest NO 4で得られた各種熱電対からの温度応答を示す。同図(a)の右方に、それぞれの熱電対の位置とその記号が示してある。図中の名称A, B, C, Dが前章で述べた取付法A, B, C, Dタイプに相当している。図中の記号(○, ●, ⊙等)の位置が、クエンチ点を示している。黒抜と白い記号は中心に対して反対の位置にあることを示している。下方に示す線巾は、クエンチ時刻を中心に温度降下に要する時間を表している。

図からもわかるように、クエンチ時の温度降下速度は一般に、①A, Bタイプ(～0.5秒以下) ②Dタイプ(～1秒), ③Cタイプ(～1.5秒), ④(2～3秒)の順に大きい。これは前章で示したように、熱電対先端部から流路側表面までの距離が、①A, Bタイプ(～0mm), ②Dタイプ(～0.25mm), ③Cタイプ(～0.5mm), ④Eタイプ(～1.6mm)の順に小さいことが反映されている。

Fig 4.1(b), (c)に見るように、A, Bタイプの温度応答には、クエンチした後も温度が飽和温度に落ち着かずに、上向きの小さなスパイクを示すことがある。点線の記号(……)は、そのような場合、飽和温度に落ち着くまでの時間を示している。

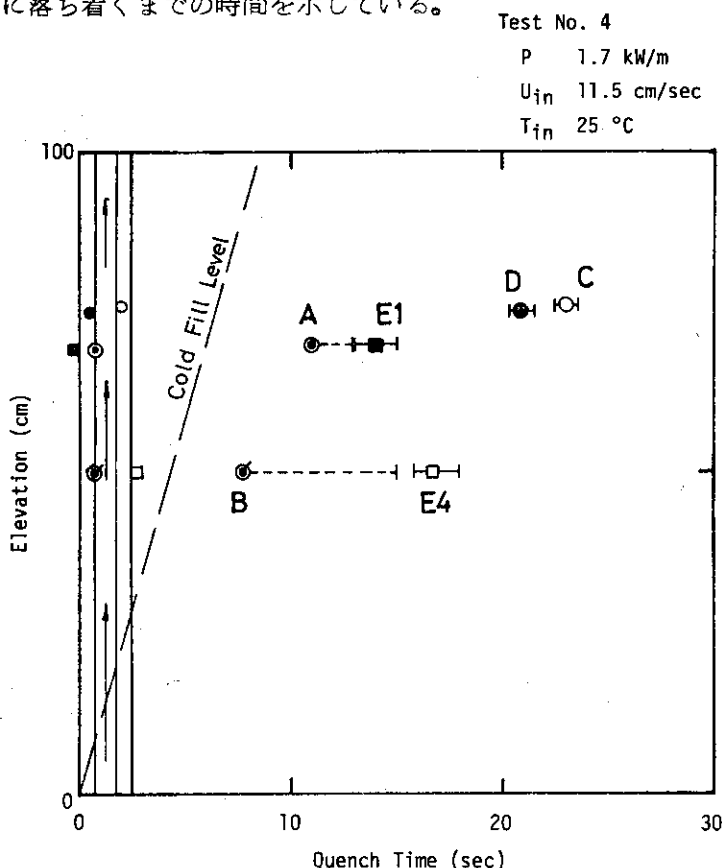


Fig. 4.2 Quench Envelope for Test No.4

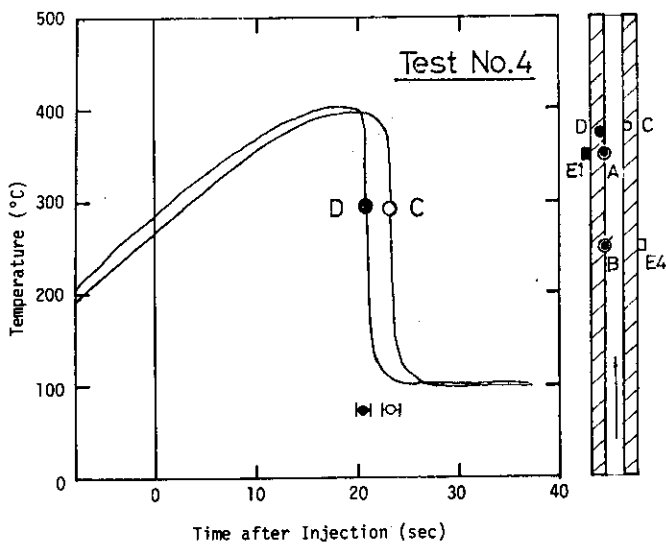


Fig. 4.1(a) Type C, D Behavior

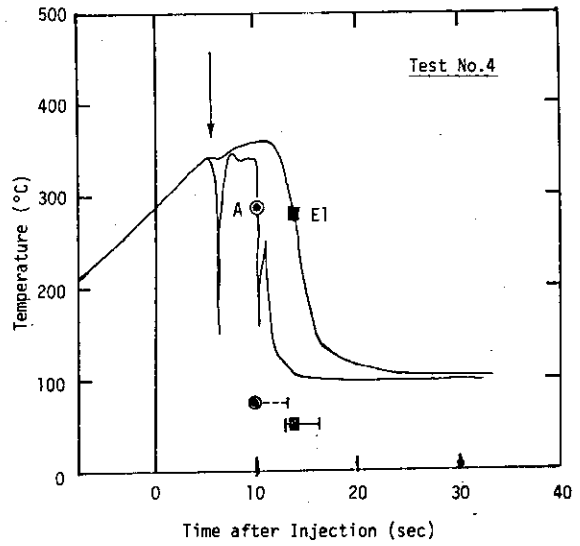


Fig. 4.1(b) Type A, E Behavior

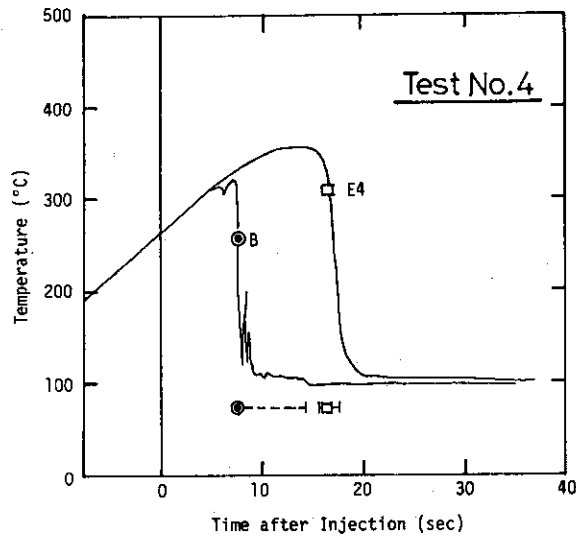


Fig. 4.1(c) Examples of Temperature Response (Test Pin - I)

Fig 4.2 に Test NO 4 のクエンチ時刻に対して、熱電対高さをプロットしたクエンチエンベロップを示す。図中に Cold Fill Level とあるのはテスト部が加熱されていないとした場合の、冷却水がテスト部内を上昇していく位置を注入流量よりプロットしたものである。クエンチ時刻点がこの線よりも右側にあるのが一般的である。実験では、冷却水の注入直後から多量の水滴が上方に飛ばされること（キャリーオーバー）が、上部可視部より観測されているが、このことがクエンチ時刻を Cold Fill Level より遅らせている原因の一つであると考えられる。

温度応答の特徴

各種熱電対取付法から得られた温度応答の特徴をまとめると以下のようになる。

(1) A, B タイプ

- i) 注入開始直後から温度応答に極微少な不規則振動が見られる。
- ii) 時には、高温時（ $\sim 300^{\circ}\text{C}$ ）に下向きスパイク応答を示すことがある。
- iii) クエンチ時の温度降下速度は大きい。（0.5 秒以下）
- iv) クエンチ以後に飽和温度に落ち着かず、数 10°C 高い値を示したり、上向きスパイクを示す場合がある。

(2) C, D タイプ

- i) 温度応答は比較的滑らか。
- ii) スパイク応答は得られない。
- iii) クエンチ以後はほぼ飽和温度を示す。
- iv) クエンチ時の降下速度は 1～2 秒程度である。

(3) E タイプ

- i) 温度応答は滑らか。
- ii) クエンチ時の降下速度は 2～3 秒程度である。

4.2 A, B タイプの検討

(1) クエンチ後の安定性

前節に見たように、A, B タイプの熱電対の応答にはクエンチ後も温度が飽和温度を示さずに、ある時間

- a) 飽和温度以上を示す。
- b) 上向き小スパイクを示す。

等の現象が見られることがあった。

テストピン (I) では、Fig 3.1 (I) で見たように、A タイプの熱電対とクラッドをはさむすぐ裏には、E タイプの熱電対 E 1 が取付けられている。そこで両者の温度応答を比較することにより、その点の正確なクエンチ時刻が見積ることが可能であり、同時に上記(a),(b)の現象が推察される。

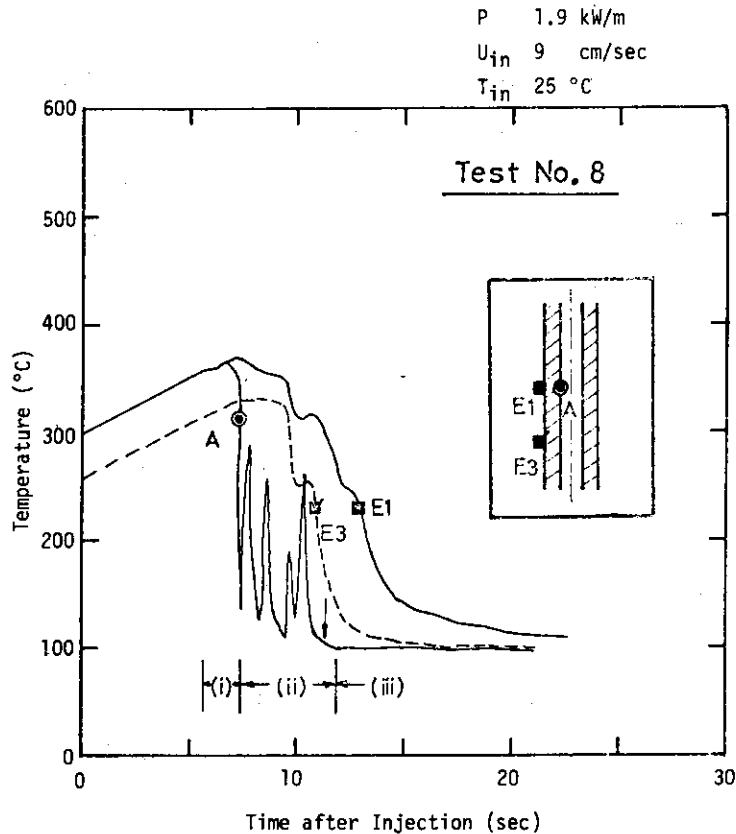


Fig. 4.3 Temperature Response Showing Characteristics of Quench Time Difference

Fig 4.3に Test NO 8のA, E1の温度応答を示す。Aタイプの熱電対の応答は次の3期を経ている。

- (i) 断熱的な温度上昇からはずれて、冷却が始まりクエンチに至る。
- (ii) クエンチ以後飽和温度以上を示し、時折上向きスパイク応答を示す。
- (iii) 飽和温度を示す。

一方で、E1の温度応答を見ると、上の(iii)期の始まる時刻とE1のクエンチ時刻がほぼ一致している。このことから、上の(i)~(iii)のAタイプの応答に関しては、以下のようなモデルによる説明が可能と思える。

Fig 4.4にモデル図を示す。

- (i) 注水開始後の蒸気流による熱伝達が支配的な領域で、飛散液滴径も非常に小さく、熱電対先端部に捕捉されてもその影響は小さい。あるいは、飛散液滴径が大きいものが混合し始めても、それらは捕捉されない。
- (ii) 飛散液滴のうち大きな径の液塊が熱電対先端に捕捉されると熱電対自身が低熱容量のため、熱電対のみがクエンチする。しかし発熱体自身はまだ完全には冷却されていないので熱電対Aの指示は飽和温度以上のある平衡値を示す。液塊の供給あるいは液塊自身の振動により、上向きスパイク応答を示したりすることがある。近傍の発熱体もそれにより冷

却が促進されるが真のクエンチではない。

iii 真のクエンチフロントが下方より到達し発熱体クラッドのクエンチとともに、熱電対Aも飽和温度を示す。

上のモデルによれば、Test NO 8のA-E1の位置のクエンチ時刻は、Fig 4.3の矢印の点と考える方が合理的であることがわかる。

Fig 4.5にはTest NO 9の同じくA-E1の温度応答を示す。この例でも、同様にAタイプのクエンチ時刻はE1のクエンチ時刻とほぼ一致していると考えた方がよいであろう。ただし、Fig 4.3と比べると、熱電対E3の応答に差異が見られる。Test NO 8でのE3はE1の少し前にクエンチしているが、Test NO 9ではE3はクエンチしていない。E3はE1の下方5 cmに位置しているので、Test NO 8のような状況は理解しやすい。Test NO 9のような状況は、上記モデル(ii)の段階で、

Aの点にのみ特異点的に液塊の供給がなされ、その近傍の発熱体クラッドまでクエンチに至らしめている場合と想像される。

上で見たように、Aタイプの熱電対は、E1の応答から考えて、

(a) クエンチ時刻を小さく示す場合がある。

また、E3の応答から推察して、

(b) Aタイプの熱電対があることによる早期冷却の効果のある場合がある。

ことが明らかとなった。

これら2点はクエンチ時刻を二重の意味で小さ目に見積ってしまう危険性がある点で重要である。

(2) クエンチ時刻の遅れの検討

本実験で用いられたテストピンにおいて、内表面がクエンチしたとき、外表面（外側断熱）が熱伝導によりクエンチするまでの、クエンチ時刻の遅れをオーダー的に調べておくことは意味があると思われる。

簡単のため、Fig 4.6のように厚さ δ の平板に置き換え、内部発熱も無視し表面温度がステップ状に T_0 から T_{sat} に変化したと仮定し、熱伝導方程式を解くことにする。すなわち、

$$\text{初期条件 } t=0 \text{ で } T_1 = T_2 = T_0 \quad (1)$$

$$\text{境界条件 } t>0 \text{ で } T_1 = T \Big|_{x=0} = T_{sat} \quad (2)$$

$$\text{(外側断熱)} \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = 0 \quad (3)$$

のもとで、熱伝導方程式

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (4)$$

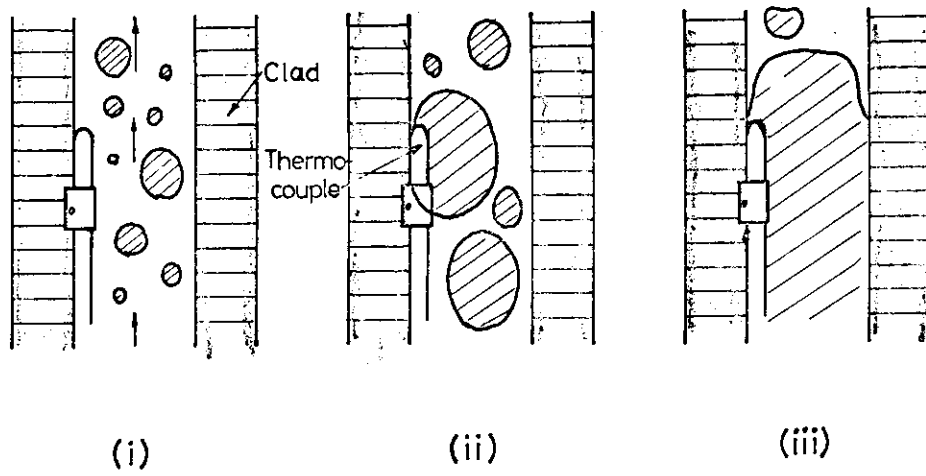


Fig. 4.4 Models of Thermocouples Quench and Clad Quench

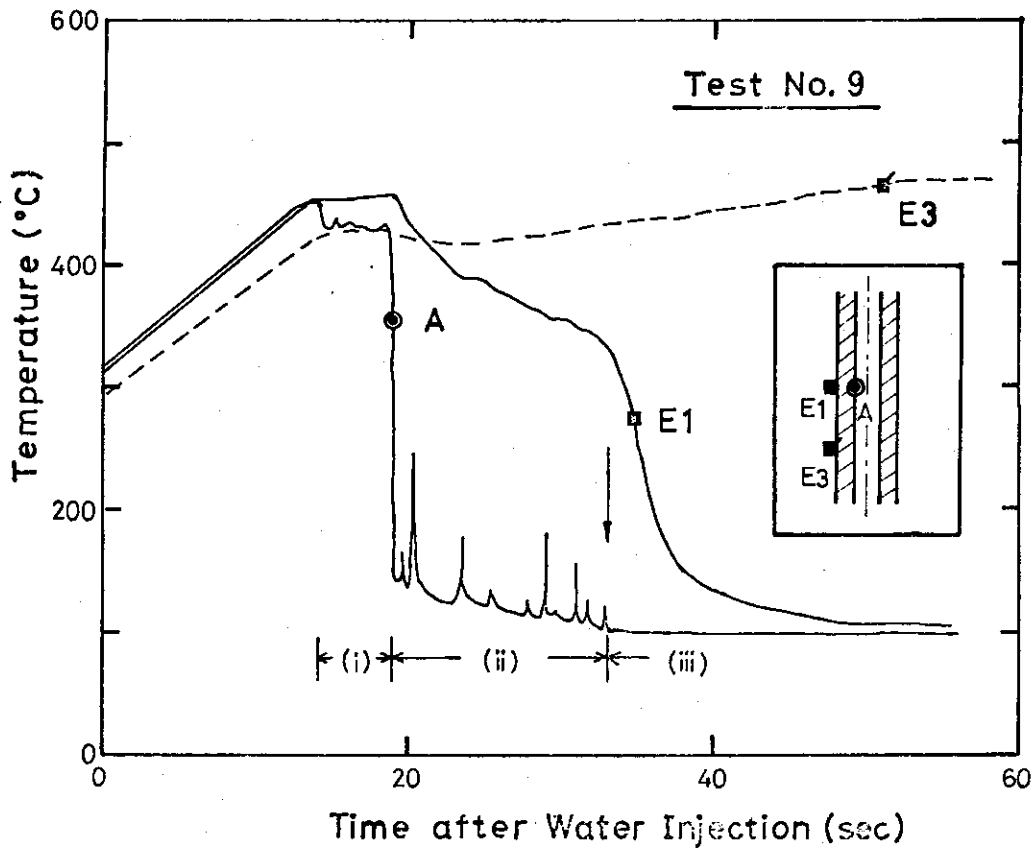


Fig. 4.5 Temperature Response Showing Characteristics of Quench Time Difference

ただし $k = \lambda / (c_p \rho)$

λ = 熱伝導率, c_p : 比熱, ρ : 密度

を解くことになる。(4)の解は変数分離法により容易に.

$$\frac{T(x,t) - T_{sat}}{T_0 - T_{sat}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{\sin P_n x}{2n-1} \exp(-k P_n^2 t) \right\} \quad (5)$$

$$P_n = \frac{\pi}{\delta} \left(n - \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

の形になる。

$$\delta \sim 1.6 \text{ (mm)}$$

とステンレスの 350°C での物性値

$$\lambda \sim 16 \text{ (kcal / m hr)}$$

$$c_p \sim 0.13 \text{ (kcal / kg } ^\circ\text{C)}$$

$$\rho \sim 7820 \text{ (kg / m}^3\text{)}$$

をとり, $x = \delta$ での $T(t, \delta) = T_2$ の変化を Fig 4.6 に示す。

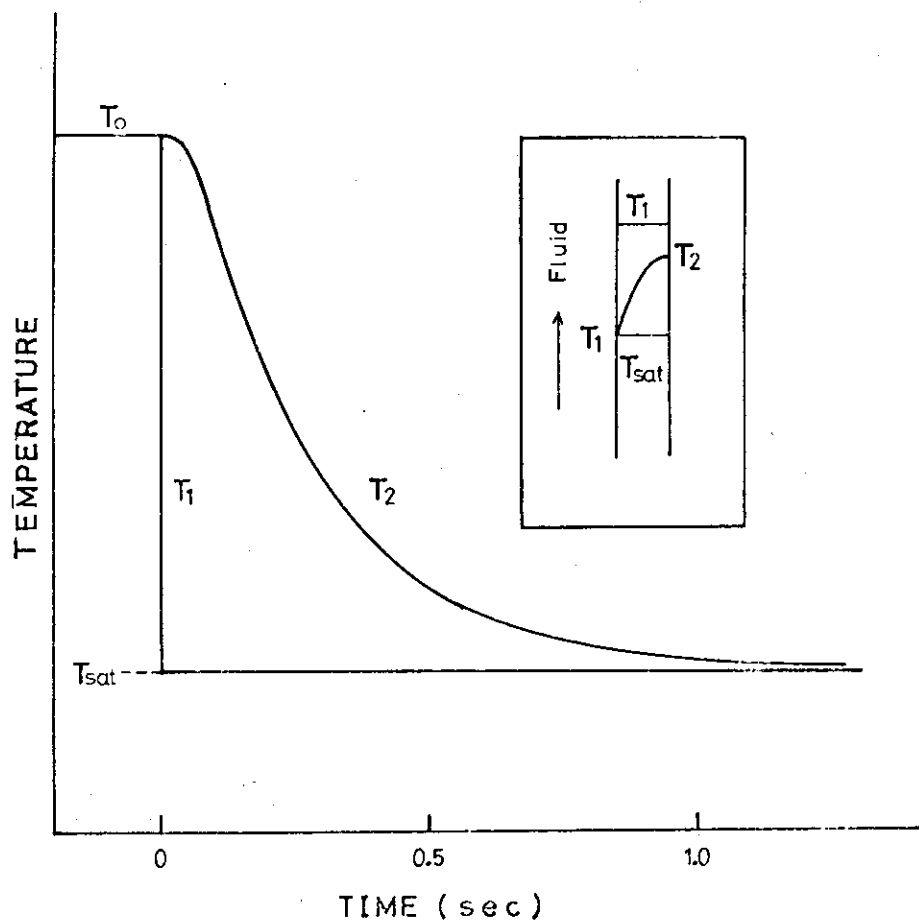


Fig. 4.6 Calculated Temperature Response at Quench

同図から、この簡単なモデルではクエンチ時刻の遅れは高々1秒程度であることがわかる。

モデルの選び方において、内部発熱による熱流束はクエンチ時の熱流束に比べて無視できると考えられている⁽¹⁾。

この種の非定常熱伝導では時定数はフーリエ数が1、

$$\text{すなわち、} \quad t = \delta^2 c_p \rho / \lambda \sim 0.6 \text{ (sec)}$$

程度であり、上での考察とオーダー的に一致する。

(3) クエンチ時刻の遍在性

前節に見たように、クエンチ時刻と高さの関係で

- ・ 同一の高さ位置で熱電対の取付法によりクエンチ時刻が大きく異っている。

場合があった。

本実験のような単一の細い流路チャンネルで、周方向でクエンチ時刻が大きく異なることは非常に考え難い。以下この点について検討する。

Fig 4.7はTest NO 6 クエンチエンベロープを示したものである。この例では、A-E1間のクエンチ時刻の差は大きくないが、ほぼ同じ高さ位置のE2に比べて約10秒もクエンチ時刻が早いことがわかる。また、同一高さのB-E4を比べてもクエンチ時刻は5秒以上遅れている。本節(1)項で述べたように考えてBタイプのクエンチ時刻を飽和温度に落ち着いた時に選んでも、やはり2.5秒程度はE4と異なっている。周方向が完全に一樣とすれば前(2)項で見たようにクエンチ時刻の遅れは高々1秒であるから、逆に言えば、Fig 4.7は流路チャンネル内での軸対称性が破れていることを示している。

Fig 4.8はこのような同一高さでのクエンチ時刻の差をプロットしたものを示す。横軸には各テストにおける冷却水注入速度を選んでいる。A、Bのクエンチ時刻は定義通りのものである。図内のハッチングはデータの傾向を示している。

同図から以下のことがわかる。

- (i) A、Bタイプの熱電対が付いている流路チャンネル内方向は、反対側に比べて、クエンチが早い。(E1、E2を比べても)
- (ii) E1-Aのクエンチ時刻の差は流速、出力にはあまり依存せず、数秒程度である。
- (iii) E1-E2、B-E4間のクエンチ時刻の差は流速が小さい程大きい傾向にある。

(i)の点は本節(1)項で見たような、Aタイプ熱電対の示す早期冷却の効果が同様にBタイプでも見られることを示している。その具体的な原因は、熱電対、およびリード線、押え板が流路内にあることであり図式的に示せば次のようになる。

熱電対、リード線等のフィン効果、流体感知



熱電対先端部の温度降下



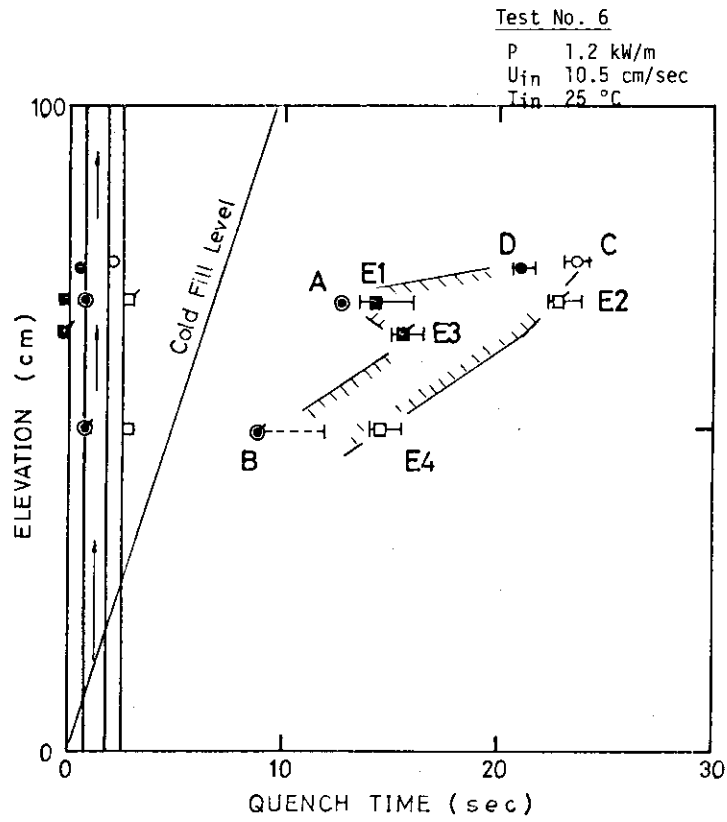


Fig. 4.7 Quench Envelope for Test No.6

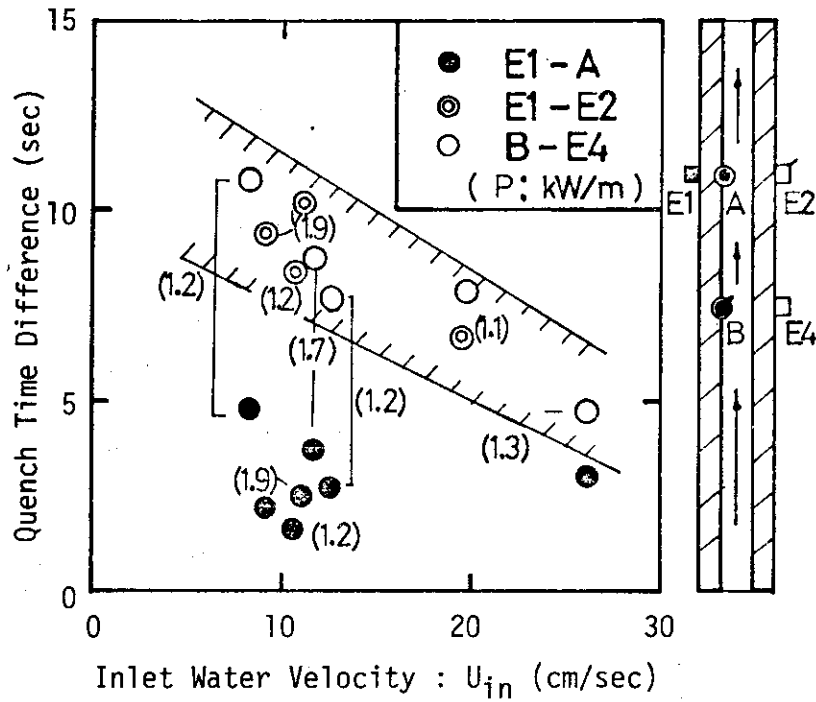


Fig. 4.8 Effect of Inlet Water Velocity on Quench Time Difference (Test Pin I)

先端部の液滴、液塊捕捉

↓

熱電対先端部のクエンチ

↓

熱電対近傍の冷却促進

(ii)の点は不明であるが、恐らくクエンチ点近くの微視的な伝熱形態と関連があると思われる。

(iii)は定性的には、流速が大きくなるほど、テスト部が短いために、どの部分もクエンチ時刻に差がなくなってゆき、したがって、熱電対取付法による差は生じ難くなるためと推察される。

4.3 C, Dタイプの検討

新しい熱電対取付法として開発した取付法C, Dタイプのものは、どちらも比較的良好な応答を示したと言える。具体的には、Fig 4.1(a), 4.7でも見たように、

- (1) 温度応答にスパイク等の現象が見られなかった。すなわち、流体の影響を受けにくい。
- (2) 互いに流路の反対側（高さは約1cmの差）にあるC, Dのクエンチ時刻の差は1秒内外であり、ほぼ同時と言ってもよい。
- (3) クエンチ時刻は、下方Eタイプのものから予想されるものから大きくずれていない。

Fig 4.9は Test NO 5におけるC, Dタイプの熱電対の応答から計算された熱伝達率を示す。

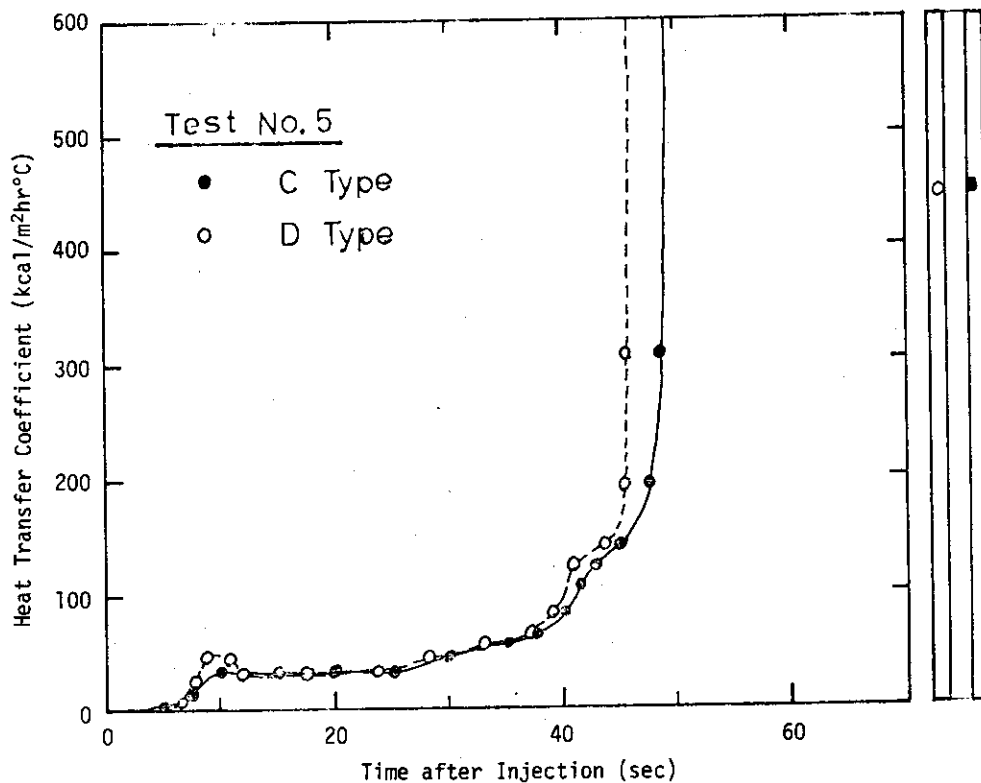


Fig. 4.9 Heat Transfer Coefficients Calculated from Thermocouple C and D

計算は簡単のため1点近似によっている。同図から、熱伝達率にはC、D間でほとんど差はないことがわかる。10秒付近でDの方がCより値がやや大きいのは、DはCに比べていく分流路側に近いので、流路内の流体、飛散液滴を多少は敏感に感じたものと思われる。

また、いままでに見たように、Cより約1cm上方にあるDの方がCよりクエンチが必ず1、2秒早いのは、恐らく、Dの下方5cmの位置にある熱電対Aのためであると推察される。すなわち、前節に見たように熱電対Aの早期冷却効果により流路チャンネル内の軸対称性が破れ、Aの上方のDにまで影響を及ぼしてCよりは早いクエンチを引き起こしているものと考えられる。付録にテストピン(I)での他のクエンチエンベロープデータを示す。これらのデータからも本節までに述べた、①A、Bタイプの早期冷却の効果と②軸対称性の破れ、が示されている。

4.4 テストピン(III)の結果

4.2節で見たように、テストピン(I)のA、Bタイプの応答から熱電対リード線が下方から引いてある影響が考えられたので、Fig 3.1(II)で示したような、テストピン(II)による実験を行った。リード線を上方に引いたBタイプと、Dタイプをさらに検討するのが目的であった。

Fig 4.10にTest NO 13の同一高さにあるBタイプとEタイプの温度応答を示す。Bタイプでリード線を上方に引いた効果は明確ではないが、この例では少なくともクエンチ時刻の遅れはない。テストピン(I)でと同じ程度かそれ以上、Bタイプの温度応答に乱れ(スパイク)があることがわかる。このことは、高温時の温度応答のスパイクは熱電対先端部が流路内にあるためであり、リード線の引く方向とは深い関連はないことを示している。

テストピン(II)での実験ではこの後Bタイプのものは絶縁不良からか使用できなくなり、Bタイプのデータ例は少ない。

再冠水現象ではクエンチフロントの進行は必ずしも下方からばかりではなく、燃料体上部では上方からも進行することがあると考えられている。それ故、もし熱電対のリード線が何らの悪影響を及ぼすものとすれば、リード線を上方より引くことは問題の解決にはならないと考えられる。

Fig 4.11におけるテストピン(II)における各高さ位置におけるクエンチ時刻の差を冷却水注入速度に対してプロットしたものを示す。同図から以下のことがわかる。

- (1) D2 - E3間のクエンチ時刻の差はほとんどない。
- (2) D1 - E2間のクエンチ時刻の差($t_{E2} - t_{D1}$)は流束、出力にほとんどよらず1秒内外である。

(1)、(2)でDタイプ間に差異が生じる原因は不明であるが、クエンチ時刻数10秒に対して、その差1秒は大きな問題ではなく、4.2節(2)項での許される範囲内でもある。このことは逆に、Dタイプの取付法によるクエンチ時刻の評価が信頼できることを示している。

さらに、DタイプのものがCタイプのものよりすぐれていると思われる点は、Dタイプの方がCタイプよりより流路側表面に近い点である。この種の発熱体で、温度応答から表面熱流束、熱伝達率を計算するには、「表面温度データ」に近ければ近い程一般に精度が向上するからである。

CおよびDタイプの取付法で實際上問題となるのはクラッドに穴を貫通させて取付けている点であろう。万一高温等のため溶接部が溶解したり、剥離した場合流体が模擬燃料体内に流入してしまう恐れがあるからである。この点についてはさらに検討が必要である。

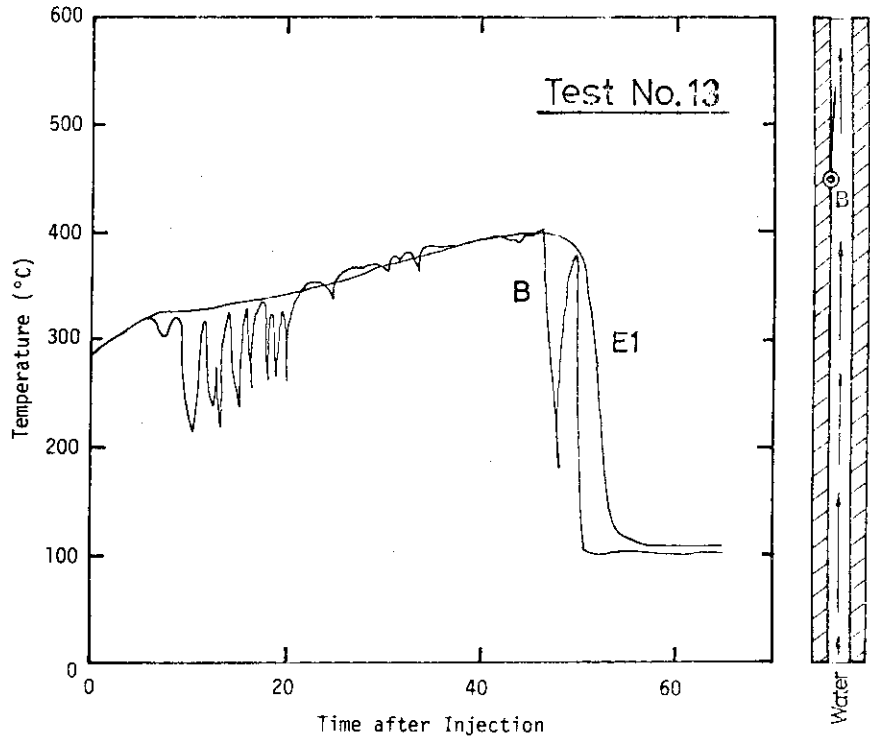


Fig. 4.10 Temperature Response for Test No.13

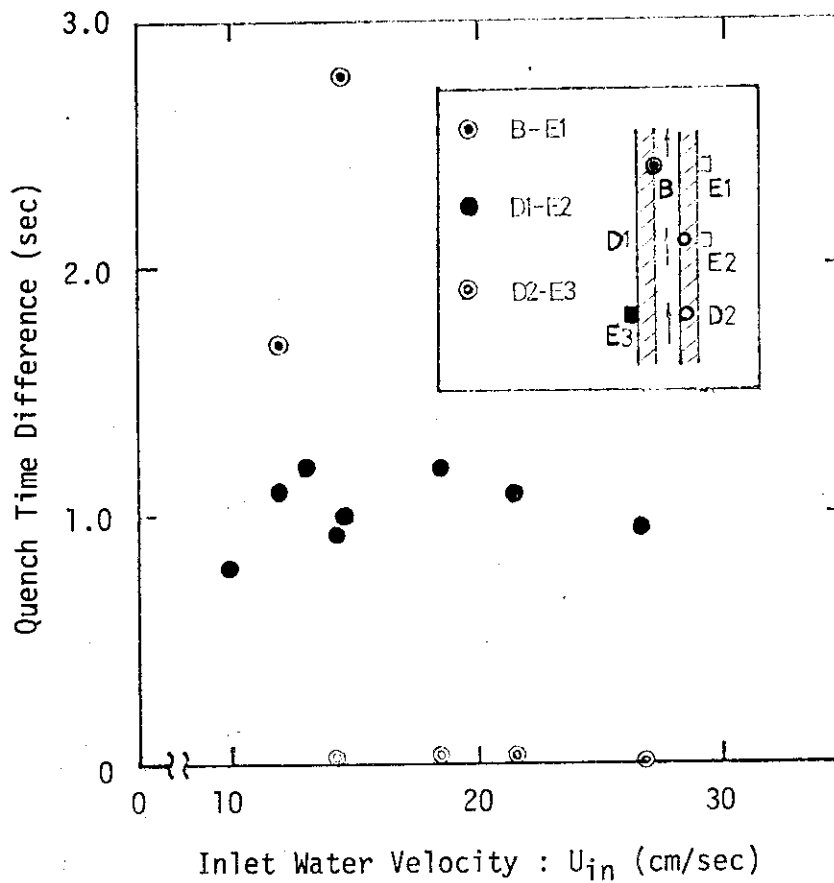


Fig. 4.11 Effect of Inlet Water Velocity on Quench Time Difference (Test Pin II)

第5章 考 察

実験結果と再冠水実験シリーズ1, 2, 3との関連

本比較実験で用いられた熱電対取付法A, Bタイプでは、

Aタイプ - 再冠水実験シリーズ1, 2

Bタイプ - 同 シリーズ3

の対応がつくように取付法の模擬がなされている。その模擬がどの程度なされているかは検討を要する。A, Bタイプの方式と再冠水実験での方式の実験上も含めた主な相違点を以下の表にまとめる。

	再冠水実験	本比較実験
<u>実験上</u>		
流路形状	円管群 (16本) の外側	単一管の内側
発熱長	3.6m	1m
冷却水流速	4 ~ 12 cm/sec	7 ~ 26 cm/sec
冷却水サブクール度	20 ~ 50 °C	40 ~ 75 °C
<u>熱電対取付法上</u>		
溶接法	シリーズ1, 2 シリーズ3 スポット溶接 プラズマ溶接	Aタイプ Bタイプ スポット溶接 スポット溶接
リード線	押え板により発熱体表面に沿って固定されている。	押え板は2箇所のみで他の部分は流路内に自由。

このうち、大きな違いはBタイプのスポット溶接と再冠水実験シリーズ3のプラズマ溶接法である。本比較実験においてA, Bタイプの温度応答に顕著な差が見られなかったのはこのためと思われる。実際にシリーズ3においては、第2章で述べたように特異的な現象が見られることは少なくなっていた。

(Fig 2.6 参照)

一方で、2.4章で見たようにA, Bタイプの温度応答と再冠水実験シリーズ1, 2の間には類似性が見出されていることから、Aタイプの模擬はほぼ満足すべきものと考えられる。

ただし、Bタイプの取付法は上で述べたように、シリーズ3実験の取付法の模擬としては不満足であり、得られた結果から見る限りではむしろシリーズ1, 2の方式に近いものと考えられる。

再冠水シリーズ4実験の結果

再冠水シリーズ4実験では、前章までに述べた

(1) 熱電対リード線の影響

(2) リード線が一束になっている影響

を取除くため、Fig 5.1 に示すように、発熱体下方から導いた熱電対先端部を、横上方に90°回転させ表面に溝を掘って半分を埋め、先端部をプラズマ溶接により固定した。

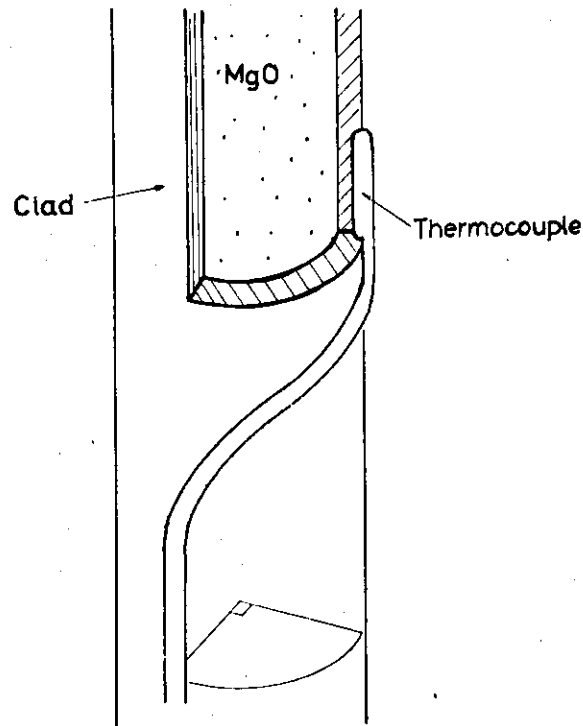


Fig. 5.1 Thermocouple Attachment Method Used in Series 4 Reflood Experiment

装置上の制約もあって、リード線は以前と同様発熱体表面に沿っている。

Fig 5.2 はシリーズ4実験データの一例である。温度応答に特異的な現象が見られることがさらに少なくなった。

ただし、実験では高温時の再冠水実験を多く行ったためか、Fig 5.1 のように先端部が曲げられているためか、熱電対の絶縁が悪くなるものが多く、耐久性に問題があることが明らかとなった。

シリーズ4実験の詳しい解析でこの取付法について再び述べたい。

再冠水実験に適した熱電対取付法

再冠水実験で要求される模擬燃料棒被覆管温度測定用の熱電対は、次の2点を満たすものが望まれる。

- (1) 正しいクエンチ時刻を与えるもの。
- (2) 表面熱伝達率が正確に見積れるもの。

今回の熱電対取付法比較実験で検討した取付方式のうち(1)の点に重点を置くなら、Eタイプのものが最善である。それは長い再冠水過程(数+秒から最大数百秒と考えられている。)においては、流路表面とのクエンチ時刻の差はほとんど問題とならないからであり、流体の影響を受ける

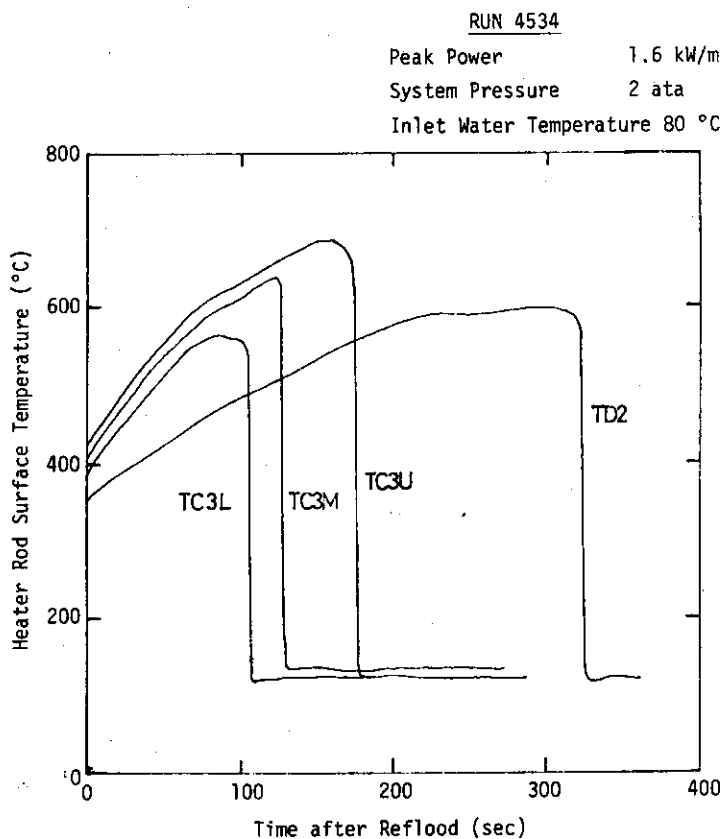


Fig. 5.2 Examples of Series 4-Reflood Experiment
(Heater Rod Surface Temperature)

度合はEタイプが最も小さいからである。しかしながら同時にクエンチ時までの熱伝達率を得ようとする時、表面温度を計算による外挿とするため一般には精度が落ちる。ただし、ゆるやかな温度変化を示すような状況では精度差は問題とはならなくなるであろう。

逆に(2)の点に重点を置くなら、表面温度を直接測定する方式（本比較実験ではA、Bタイプがこれに相当）が良い。特にクエンチ時近傍の熱流束を正確に求めようとするれば表面温度データは不可欠となる。ところが、前章までに見たようにA、Bタイプでは、時にクエンチ時刻を小さ目に見積る可能性があり、安全解析にとって危険側であると言える。

一方で、本比較実験で検討したC、Dタイプのものは、(1)の点に関してはかなり信頼性があると言える。それは熱電対先端部・リード線が流路内にはない方式だからであると思われる。

(2)の点に関しては本実験ではC、Dタイプ間でそれほど差はないという結果であった。Dタイプの方がより発熱体表面に近い点と、表面までの距離がCタイプでは不明確になりやすい点ではDタイプの方が有利な方式であろう。

ただし、C、Dタイプの方式は、先端部が小半径Rで曲げられている点と、実際の発熱体では管の内側からリード線を引く技術上の困難さから、その耐高温性と・耐久性については問題があるかも知れない。その点、Fig 5.3に示したようにクラッド表面に溝を切って熱電対をリード線と共に埋め込む方式は、熱電対先端部に関してはDタイプと本質的に同等であり、技術的にも実際

的な方式と言え、またクラッドに穴をあけない分だけ安全である。

再冠水実験においては、(2)の点を多少犠牲にしても、(1)の点は必ず満足させることが要求されるから、熱電対の取付方式としては、少なくとも熱電対先端部、リード線共に流路内に出ない方式が今後は望まれる。

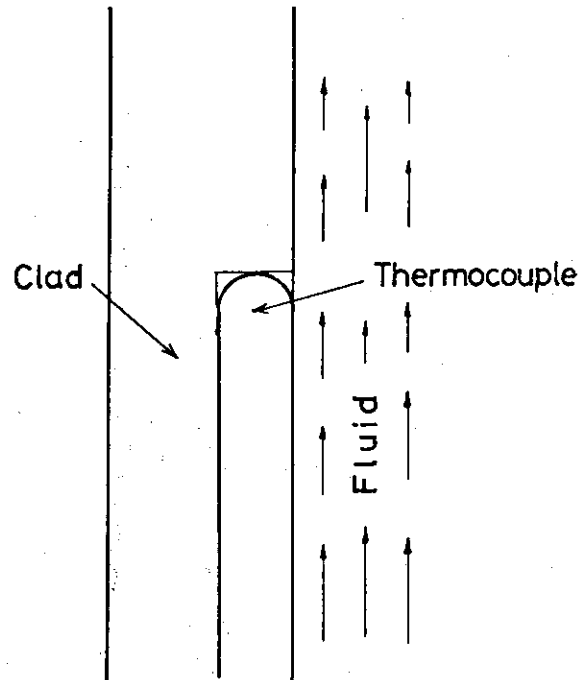


Fig. 5.3 Thermocouple Attachment Method similar to Type-D

第6章 結 論

熱電対取付法比較実験の結果、次の事項が明らかとなった。

- (1) 再冠水実験シリーズ1, 2で用いられた熱電対取付法では、クエンチ時刻を実際より小さく示す場合があって信頼性に欠ける。
- (2) (1)の原因として以下のものが見出された。
 - ① 熱電対先端部が流路内にあること。
 - ② 熱電対リード線が発熱体表面に沿って流路内にあること。
- (3) 再冠水実験シリーズ3で用いられた取付法の以下の改善策はその効果が見られた。
 - ① 熱電対先端部を半分埋め込んだこと。
 - ② 溶接法をスポット溶接からプラズマ溶接にしたこと。ただし、(2)の②の影響は依然残っていて完全ではない。
- (4) 新しく試みた熱電対取付法2種(熱電対、リード線共流路内にはない方式)ではほぼ正確にクエンチ時刻が評価できる。
- (5) 今後の再冠水実験では、熱電対先端部・リード線共に流路内にはない方式を採用してゆく必要がある。

謝 辞

本報告をまとめるに当り、安全工学部第二研究室平野見明室長、ならびに村尾良夫氏から適切かつ懇切なる御助言、御指導を受けた。発熱体への各種熱電対の実際の取付は同研究室深谷好夫主査によるものであり、また須藤高史氏を含む同研究室員全員から実験上の御協力、懇切なる御指導を受けた。ここに心から感謝の意を表したい。

第6章 結 論

熱電対取付法比較実験の結果、次の事項が明らかとなった。

- (1) 再冠水実験シリーズ1, 2で用いられた熱電対取付法では、クエンチ時刻を実際より小さく示す場合があって信頼性に欠ける。
- (2) (1)の原因として以下のものが見出された。
 - ① 熱電対先端部が流路内にあること。
 - ② 熱電対リード線が発熱体表面に沿って流路内にあること。
- (3) 再冠水実験シリーズ3で用いられた取付法の以下の改善策はその効果が見られた。
 - ① 熱電対先端部を半分埋め込んだこと。
 - ② 溶接法をスポット溶接からプラズマ溶接にしたこと。ただし、(2)の②の影響は依然残っていて完全ではない。
- (4) 新しく試みた熱電対取付法2種(熱電対、リード線共流路内にはない方式)ではほぼ正確にクエンチ時刻が評価できる。
- (5) 今後の再冠水実験では、熱電対先端部・リード線共に流路内にはない方式を採用してゆく必要がある。

謝 辞

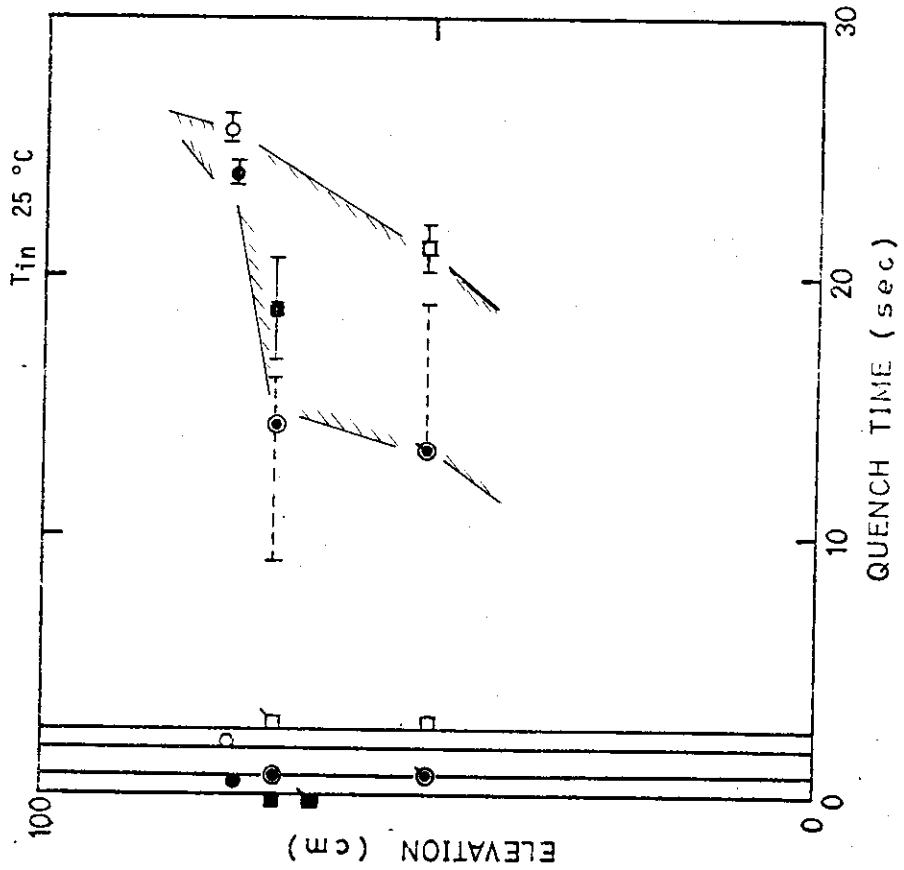
本報告をまとめるに当り、安全工学部第二研究室平野見明室長、ならびに村尾良夫氏から適切かつ懇切なる御助言、御指導を受けた。発熱体への各種熱電対の実際の取付は同研究室深谷好夫主査によるものであり、また須藤高史氏を含む同研究室員全員から実験上の御協力、懇切なる御指導を受けた。ここに心から感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) Murao, Y., Iguchi, T., Sudoh, T., Sudo, Y., Sugimoto, J., Niitsuma, Y., Fukaya, Y., and Hirano, K., "Report on Reflood Series 1 Experiment", JAERI-M 6551, June, 1976 (In Japanese)
- (2) Murao, Y., Iguchi, T., Sudoh, T., Sudo, Y., Sugimoto, J., Niitsuma, Y., and Hirano, K., "Report on Series 2A Reflood Experiment", JAERI-M 6787, November, 1976 (In Japanese)
- (3) Cadek, F., et al; "PWR FLECHT FINAL REPORT", WCAP-7665, April 1971
- (4) Murao, Y., Sudoh, T., "Study of Quench Phenomena during Reflood Phase (1) Quench Models for Bottom Flooding", JAERI-M 6984, 1977
- (5) Murao, Y., Iguchi, T., Sudoh, T., Sudo, Y., Sugimoto, J., Niitsuma, Y., Fukaya, Y., and Hirano, K., "Report on Reflood Series 3 Experiment", JAERI-M 6983, 1977 (In Japanese)

Appendix 1.

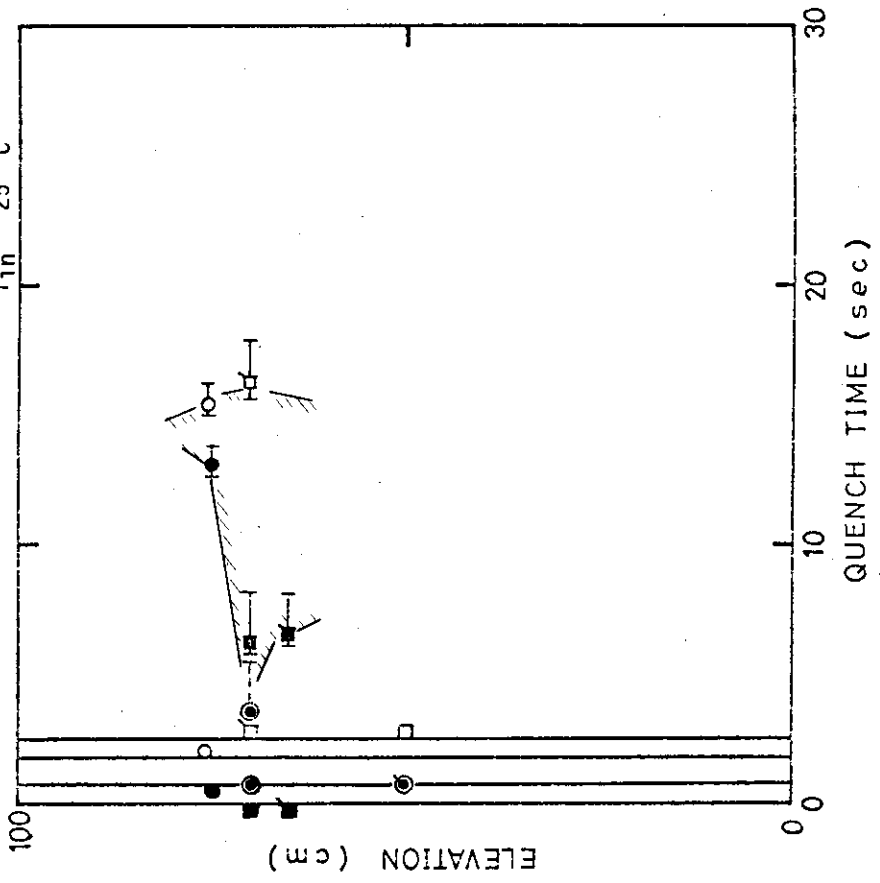
Test No. 3
 P 1.2 kW/m
 U_{in} 12.5 cm/sec
 T_{in} 25 °C



Quench Envelope for Test No. 3

Appendix 2.

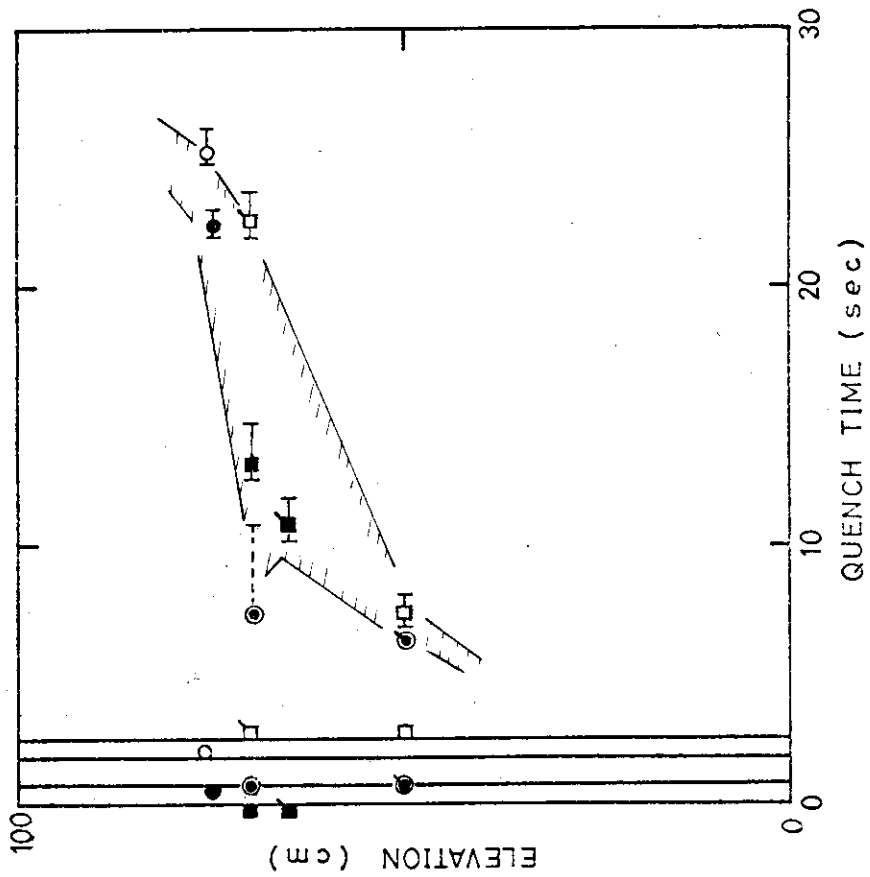
Test No. 7
 P 1.9 kW/m
 U_{in} 11 cm/sec
 T_{in} 25 °C



Quench Envelope for Test No. 7

Appendix 3.

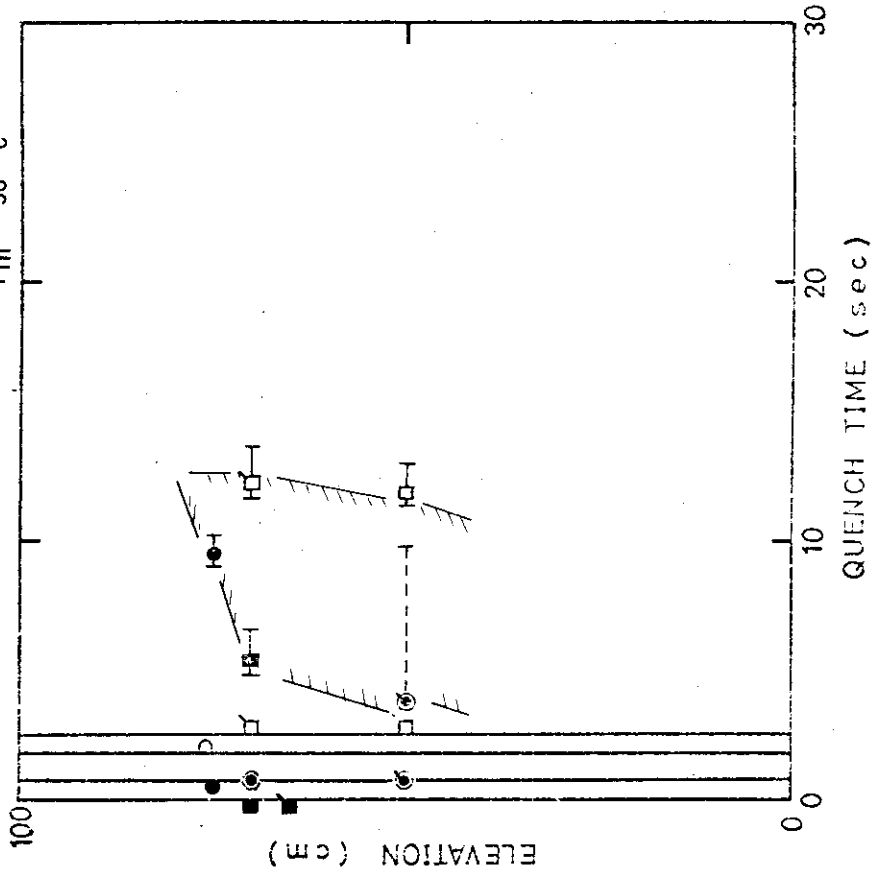
Test No. 8
 P 1.9 kW/m
 U_{in} 9 cm/sec
 T_{in} 25 °C



Quench Envelope for Test No. 8

Appendix 4.

Test No. 10
 P 1.1 kW/m
 U_{in} 19.5 cm/s
 T_{in} 50 °C



Quench Envelope for Test No. 10