

JAERI-M

6551

再冠水シリーズ1 実験報告

1976年6月

村尾良夫・井口 正・須藤高史・数土幸夫
杉本 純・新妻 泰・深谷好夫・平野見明

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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、お申しこしてください。

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.

再冠水シリーズ1実験報告

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
村尾良夫・井口 正・須藤高史・数土幸夫・
杉本 純・新妻 泰・深谷好夫・平野見明

(1976年4月26日受理)

この報告書は、1974年9月～10月に行われた再冠水シリーズ1実験の結果について述べたものである。

シリーズ1実験は、大気圧下で最高温度600℃に設定したテスト部一定流量注水実験であり、データの収集とともに実験上の問題点を見いだすことが目的である。

実験の結果、FLECHTデータより早くクエンチすること、クエンチ時の温度降下がFLECHTデータより非常に速いこと、飛散水滴がクエンチの原因の一つとなることが見いだされた。また、装置、データ処理に種々の問題点のあることもわかったが、一般的には、当初の目的を達していると考えられる。

Report on Reflood Series 1 Experiment

Yoshio MURAO, Tadashi IGUCHI, Takashi SUDOH, Yukio SUDO,
Jun SUGIMOTO, Yasushi NIITSUMA, Yoshio FUKAYA, Kenmei HIRANO

Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI

(Received April 26, 1976)

Results of the Reflood Series 1 Experiment carried out from September to October 1974 are described.

The conditions of experiment are :

- (1) direct water injection into the test section at constant rate,
- (2) operation under atmospheric pressure, and
- (3) maximum allowable temperature 600°C for heater rods.

Objectives of the Series 1 experiments are (1) to obtain thermo-hydrodynamic data for the flow channel and (2) to check performance of the test rig and data processing.

The rate of temperature fall during quench is much larger than that in PWR-FLECHT tests, and droplets flying through the test section are one of dominant causes for quench phenomenon.

Test rig operation and data processing are as expected with problems of temperature detection, data signals amplification, and water temperature control.

目 次

1. 序論	1
1.1 シリーズ1実験の目的	1
1.2 シリーズ2以降の予定	2
1.2.1 シリーズ2実験	2
1.2.2 シリーズ3実験	22
1.2.3 シリーズ4実験以降	2
2. 実験装置および実験方法	3
2.1 テスト部	3
2.2 構成機器	3
2.3 計装	8
2.3.1 検出器	8
2.3.2 計測	11
2.4 データ処理	11
2.4.1 データ処理系の構成	11
2.4.2 データ処理 I	11
2.4.3 データ処理 II	15
(1) 熱伝達率計算コード	15
(2) 温度プロフィルコード	17
2.4.4 グラフィック・ディスプレイによるデータ処理	17
2.5 実験条件	18
2.6 実験方法	19
3. 実験結果	22
3.1 発熱体表面温度応答	22
3.2 熱伝達率	24
3.2.1 熱伝達率の特徴	24
3.2.2 Aタイプ, Bタイプの出現の特徴	24
3.3 熱流束 q と過熱度 ΔT_{sat} との関係	26
3.4 本実験とFLECHT実験との相異点	26
4. 実験結果の考察	30
4.1 冷却開始時刻(t_c)	30
4.2 蒸気流熱伝達の検討	30
4.2.1 蒸気流熱伝達率の特徴	30
4.2.2 本実験とFLECHT実験との比較	34
4.3 膜沸騰熱伝達の検討	34
4.4 クエンチ温度およびクエンチ時間の検討	42
4.5 クエンチ時の熱流束の検討	42

4.6 装置、データ集録の問題点	54
4.6.1 実験装置の問題点	56
4.6.2 計測、データ集録の問題点	58
4.7 データ処理上の問題点	60
4.7.1 磁気テープ処理上の問題点	60
4.7.2 熱伝達率計算コード、温度プロファイルコードの問題点	61
4.7.3 グラフィック・ディスプレイの問題点	62
4.8 テスト部解体検査	63
5. 結論	66
謝辞	66
参考文献	67

1. 序 論

1.1 シリーズ1実験の目的

シリーズ1実験は、次の基本条件で行われた。

- 1) テスト部への一定流量直接注入
- 2) 発熱体出力一定
- 3) 大気圧

本実験の目的は、次の3項目である。

(1) 炉心内伝熱流動現象の解析

再冠水現象を明らかにするためには、それに起因する種々の現象を、総合的に解析することが必要であるが、本実験においては、第一段階として、炉心内の伝熱流動現象を模擬した実験を行い、その部分の解析コードの開発、検証に役立てる。

(2) 再冠水実験装置の確証試験

本実験装置の最初の運転であり、設計通りの性能があるか否か、ループの特性、性能限界、計装系の作動状況はどうか等、今後行う予定の実験性能を確認し、かつテスト部2号機製作の資料を得る。

(3) データ処理の確立

温度、圧力等のデータは、データ集録装置（岩崎通信機：DATAC 2000B）に記録されるが、そのデータを大型計算機で読み出し、グラフ化、熱伝達計算、グラフィックディスプレイによるモニタ等の一連のデータ処理を、支障なく、かつ円滑に行える様に、シリーズ1実験のデータ処理を行いながら、その作業を確立させる。

このような目的のために、再冠水実験装置を用い、システム効果実験用のダウンカマー部は用いないで、テスト部への一定流量直接注入実験を行った。

シリーズ1実験は、米国Westinghouse社のFLECHT実験⁽¹⁾と同様のものであるが、次の点が異っている。

1) FLECHTでは、発熱体表面温度測定用の熱電対は、1mmφで太く、被覆管内側に取付けられているが、本実験では、0.5mmφの熱電対が、被覆管外面に取付けられており、温度測定の時定数は本実験の方が短い。

2) FLECHTでは、間接加熱発熱体を用いているが、本実験では、直接加熱発熱体を用いており、熱容量が小であり、非定常熱伝導計算に誤差が入りにくい。これは、データ集録設備の高速性および温度検出の時定数が短いことも関係している。

3) FLECHT実験の結果として報告されているデータは、発熱体中央部のみであるが、解析には、他の位置のデータも必要である。本実験では、当然のことながら、多数の位置のデータを得ることが可能である。

4) FLECHTでは、発熱体出力を時間とともに崩壊熱曲線に合わせて減衰させているが、本実験では、データ解析を容易にするために、一定出力で実験を行っている。

5) FLECHTでは、模擬燃料棒は、7×7本または10×10本バンドルで、本実験の4×4本

のすべてが、同一出力の発熱体であり、流路外管の壁温を自由に調節できるようになっている。

6) 発熱体ならびに計装上の問題のため、本実験の発熱体の耐熱温度は、FLECHTに比べて低く、最高許容温度600℃で実験を行っている。

以上の理由から、FLECHT実験と同様な条件ではあるが、テスト部への一定流量直接注入、発熱体一定出力の実験をシリーズ1実験として行った。

これらの目的が達成されれば、今後の実験、すなわち、システム効果がある場合の実験、データ処理等を円滑に行うことができ、その解析に当たって、本シリーズの解析結果を大いに役立てることができると考えられる。

なお、再冠水実験計画ならびにシリーズ1実験の概要については、文献(2)に、実験装置の詳細については、文献(2)と(3)に、また計装系の詳細については、文献(4)にそれぞれ記述されている。

1.2 シリーズ2以降の予定

1.2.1 シリーズ2実験

(1) シリーズ1実験の追加実験

テスト部への一定流量直接注入

発熱体出力一定

系圧力=大気圧

(2) システム効果予備実験

発熱体出力一定

系圧力=大気圧

1.2.2 シリーズ3実験

(1) テスト部への一定流量直接注入

発熱体出力一定

系圧力 $\leq 4 \text{ kg/cm}^2\text{g}$

(2) システム効果実験

発熱体出力一定

系圧力 $\leq 4 \text{ kg/cm}^2\text{g}$

1.2.3 シリーズ4実験以降

最高許容温度 $\leq 1200^\circ\text{C}$

発熱体出力可変

なお、今後、一定流量直接注入実験をPhase A実験、システム効果実験をPhase B実験と呼ぶことにする。

2. 実験装置および実験方法

2.1 テスト部

テスト部の概略を Fig. 2.1 に示す。

上部プレナムは、一次系出口側抵抗体模擬部を介して圧力容器を模擬した定圧タンクに接続されている。また、発熱部から吹上げてくるキャリオーバー水を蒸気から分離する目的で、分離筒と反射板が設けられている。側面に取付けられている透明ガラス窓を通して、内部の流動状態の観察が可能である。

上部プレナムの下に発熱体集合体およびそれを収納している流路外管が設置されている。発熱体集合体は、 $4 \times 4 = 16$ 本の直接通電型中空発熱体を正方形格子配列することによって形成されている。発熱体外径は1.05mm、ピッチは13.8mmである。

発熱体は、肉厚を適当に変えることにより、階段状コサイン分布発熱となるように設計されている。加熱長は3.6mである。表面には、温度測定用熱電対が取付けられている。

発熱体の熱電対取付位置と出力分布を Fig. 2.2 に示す。熱電対は、外径0.5mmの非接地シース型クロメル-アルメル熱電対を使用し、発熱体表面にスポット溶接で取付けられている。

16本の発熱体は、スペーサグリッドにより 4×4 の正方格子形に配列され、電気絶縁用石英ブロックを介して流路外管(ステンレス鋼製四角管、 $60\text{mm} \square \times 5\text{mm t}$)に納められている。スペーサグリッドの寸法を Fig. 2.3 に示す。なおグリッド取付間隔は600mmである。

流路外管には、加熱用ヒータが取付けられ、任意の温度に設定することが可能である。その他圧力測定用座、テスト部内の流体温度測定用熱電対座が600mm間隔で取付けられている。

下部プレナムは、電極収納箱を兼ね、上部に流路外管と接続される角管が、下部に注水系と接続されるノズル2本がそれぞれ設けられている。内部には、各発熱体の熱膨張による伸びを考慮して、常に張力を付加するスプリングと、発熱体を加熱するための電気供給用平編導線が内蔵されている。さらに、テスト部注入水の温度を調節するための加熱ヒータと、温度測定用熱電対が取付けられている。下部プレナム内壁は、すべてテフロンシートで絶縁され、発熱体の温度測定用熱電対の取出しもテフロンチューブで保護され、下部プレナムの外に導かれている。

テスト部の電気絶縁には、各々の場所に適合した絶縁材が選ばれている。すなわち上部の電極には、気密性と耐熱性の優れたモンタニットが、スペーサグリッドには、絶縁性の優れた石英ガラスが、また下部プレナム等の比較的低温部には、加工性の良いテフロンがそれぞれ用いられている。

上部プレナムを除くテスト部は、組立および据付時の破損や変形の防止と実験時の熱膨張を考慮して、水平方向の変位を抑制した取付台に固定されている。またテスト部は、すべて保温され、さらに保温カバーで保護されている。

テスト部は、上下プレナムを含めて全長約6mで、上端を架台に固定し、吊下げられている。

2.2 構成機器

再冠水試験装置のフローシートを Fig. 2.4 に示す。

構成機器の機能は次の通りである。

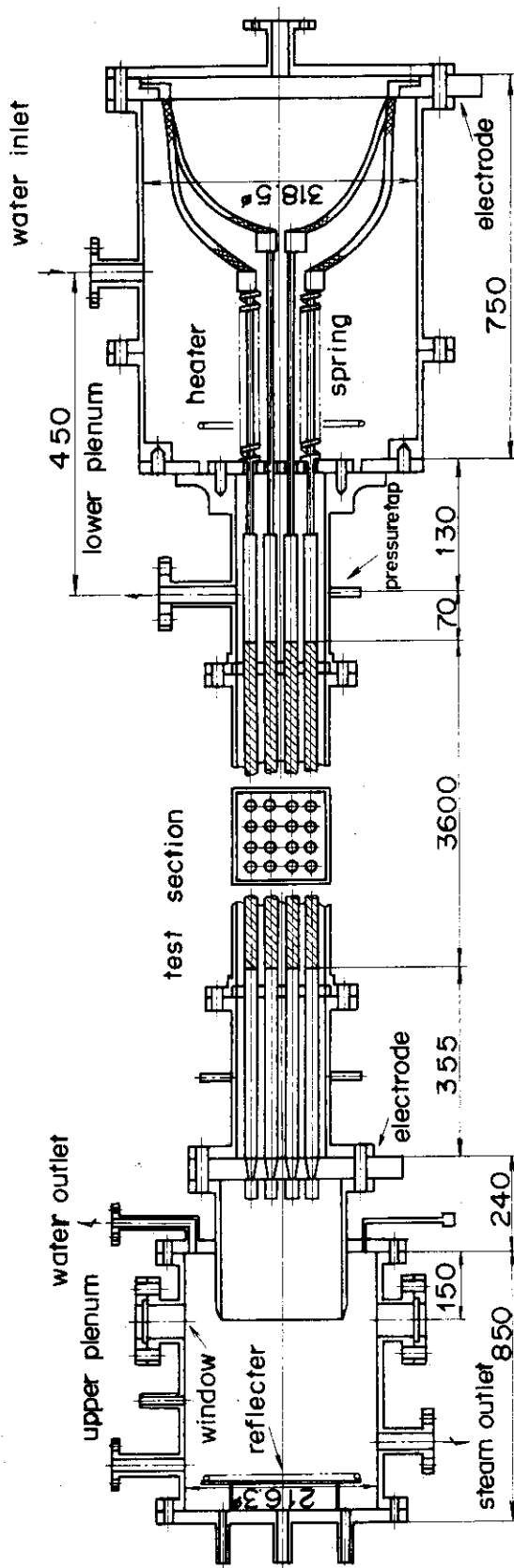


Fig. 2.1 Test Section of Reflooding Test Rig

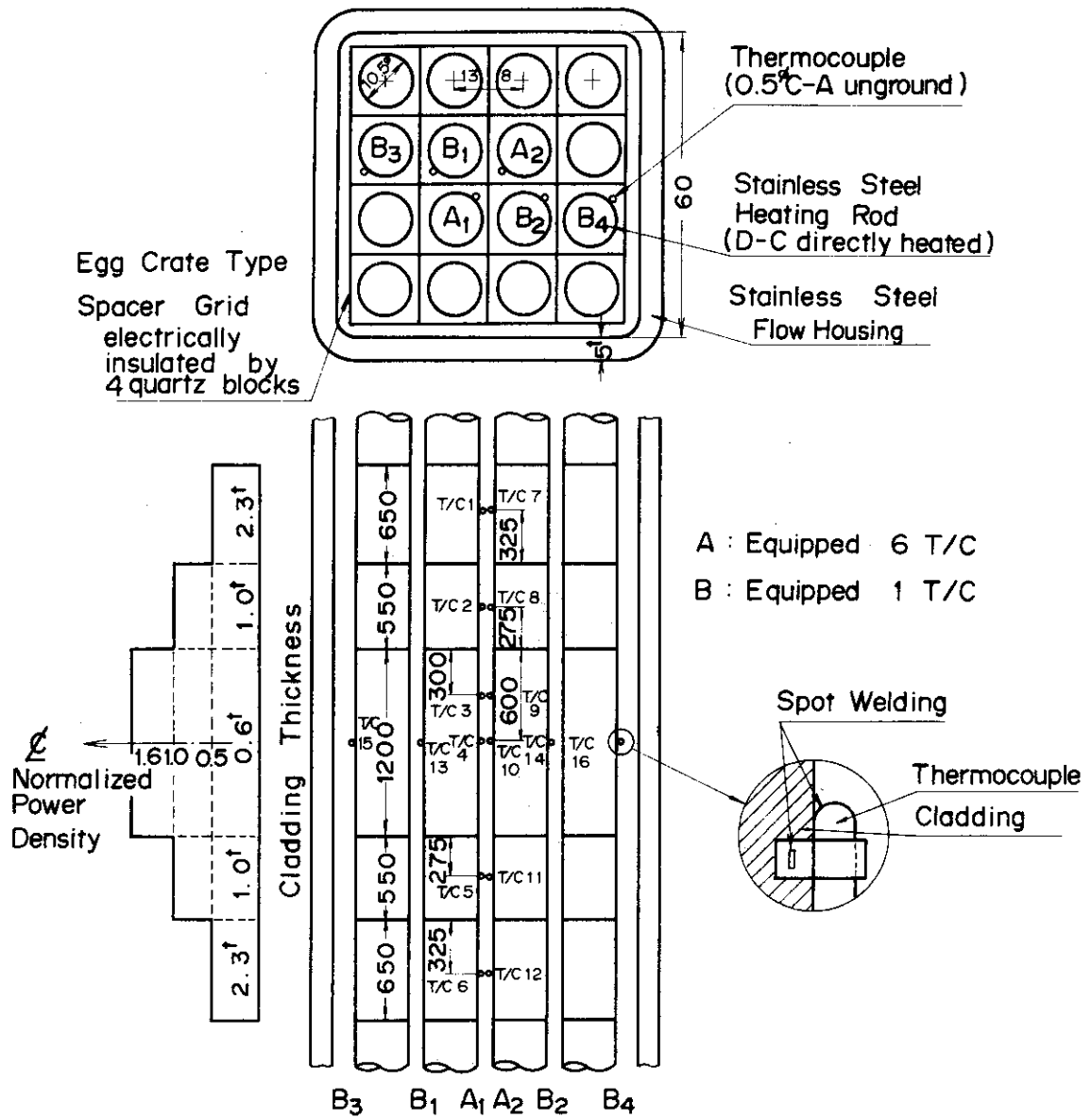


Fig. 2.2 Cross Section of Test Section and Location of Thermocouples

- | | | |
|-----|--------------|--------------|
| 1. | flow housing | SUS 304 |
| 2. | flange | SUS 304 |
| 3. | flange | SUS 304 |
| 4. | gasket | copper |
| 5. | spring | hastelloy X |
| 6. | insulator | quartz glass |
| 7. | spacer grid | hastelloy X |
| 8. | | |
| 9. | | |
| 10. | bolt | SUS 304 |
| 11. | bolt | SUS 304 |
| 12. | bolt | SUS 304 |

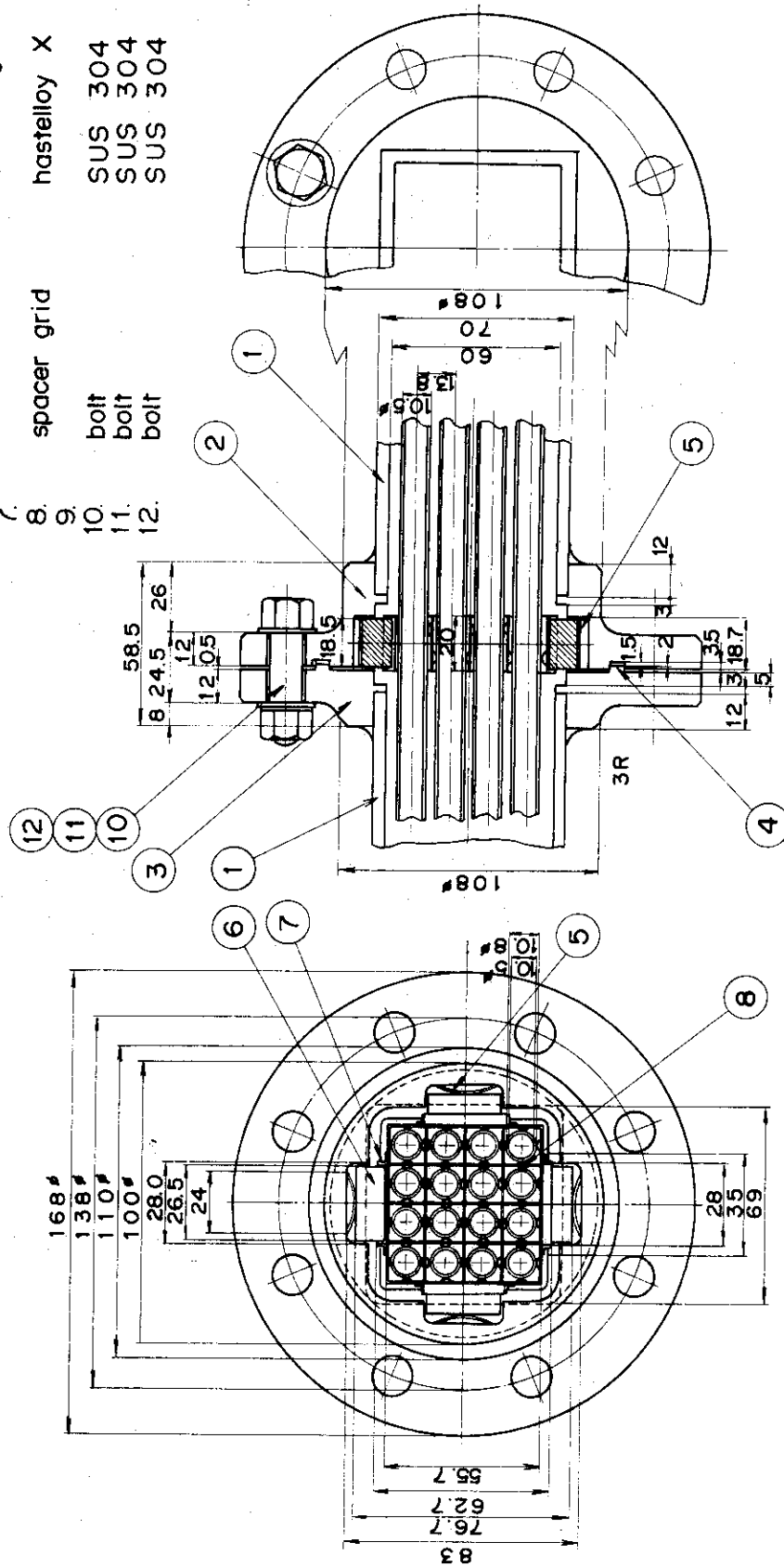


Fig. 2.3 Details of the Spacer Grid

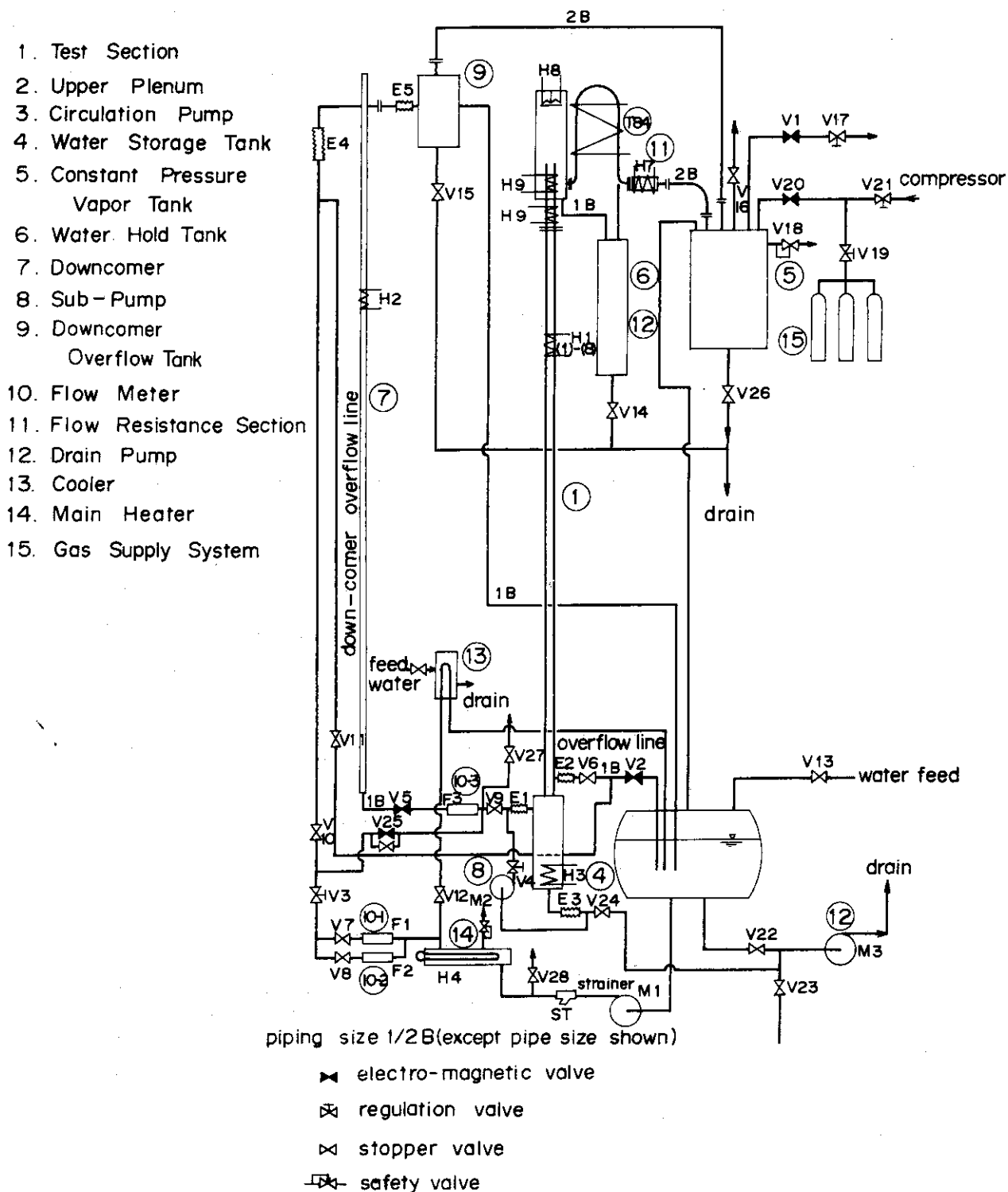


Fig. 2.4 Flow Sheet of Reflooding Test Rig

- (1) テスト部：実炉の炉心を模擬する。
- (2) 模擬抵抗部：上部プレナムから破断口までの流動抵抗を模擬し、蒸気発生器模擬部とポンプ模擬部とからなる。
- (3) 定圧タンク：格納容器を模擬する。
- (4) 液滴ホールドタンク：キャリオーバー水を捕集し、キャリオーバー比の測定に用いる。
- (5) ダウンカマー部：ダウンカマーを模擬する。

Table 2.1に、本装置と500MWe級発電炉との比較を、またTable 2.2に本装置の主要性能をそれぞれ示す。

ループ部は、上部構成機器の中で、テスト部を除いた諸機器とこれらを接続する配管、弁、ポンプ等で構成され、注水系とシステム効果模擬部とに分類できる。

注水系は、貯水タンク、循環ポンプ、加熱器、流量計、冷却器、弁、ポンプ等の機器と、これらの機器を結ぶ配管よりなっている。貯水タンクに貯えられた冷却水は、循環ポンプにより加熱器を経て下部プレナムに入る。下部プレナムに満された冷却水は、オーバーフローして、貯水タンクに戻る。このラインを注水の主循環系とし、一定温度の温水が、テスト部に注入されるよう配慮されている。またダウンカマーを使用したPhase B実験時には、主循環系から分岐して、ダウンカマーのヘッド差により、ダウンカマーを通して注水させる。

この際、ダウンカマーのヘッドを、一定に保つために、ダウンカマー上部では、常にオーバーフローし、オーバーした水は、オーバーフロータンクに入る。

テスト部の上部プレナムは、液滴ホールドタンクと定圧タンクとに接続されており、上部プレナム内で分離された水と蒸気は、それぞれ液滴ホールドタンクと定圧タンクへ導かれる。なお定圧タンクへ至る配管には、原子炉の一次系を模擬した抵抗体が設けられている。定圧タンクには、圧力制御装置が付設されており、装置内を一定の圧力に保持できるように設計されている。またループのすべてのタンクには、液面計（定圧タンクを除く）、計装用熱電対、圧力計等が付加されている。ループ各部の各機器の高さは、テスト部を基準にして、それぞれの目的を最もよく模擬するように設定され、注水系はピット内に、上部プレナムとの接続機器は架台上にそれぞれ設置され、各タンクは連通管により結ばれている。

テスト部と注水系配管との接続には、テスト部の比較的大きな伸縮（約4 cm）を考慮してベローズが用いられている。またその他の配管には、ベンド部が適宜設けられ、熱応力の発生を避けている。その他、各タンクおよび主要配管には保温が施されている。模擬抵抗部の形状をFig. 2.5に示す。

2.3 計装

2.3.1 検出器

温度検出器としては、すべて、クロメル-アルメル非接地形シース熱電対を使用した。シース外径としては、発熱体表面温度検出用には、応答速度の速い0.5mm、その他の温度検出用には、1mmがそれぞれ選ばれた。

定圧タンク内圧力検出器としては、ブルドン管式指示計付発信器を用いた。ガス供給および排気用電磁弁2個を制御することにより、定圧タンク内圧力を一定に保つようにしてある。テスト部内圧力検出器としては、ダイヤフラム式圧力変換器を用い、テスト部の上部と下部にそれぞれ取付けた。信

Table 2.1 Comparison between 500 MWe PWR and Test Rig

	500 MWe PWR	Test Rig
Core Flow Area	2.7086 m ²	22.15 cm ²
Upper Plenum Volume	~ 28 m ³	23 ℓ (23 ℓ)
Lower Plenum Volume	~ 9.86 m ³	48 ℓ (8 ℓ)
Downcomer Flow Area	1.2176 m ²	22.47 cm ² (10.0 cm ²)
Downcomer Length	~ 5.0 m	4.995 m
Distance from Lower End of Downcomer to Lower End of Core	~ 0.25 m	0.25 m
Distance from Lower End of Core to Lower End of Heating Region	~ 0.07 m	0.07 m
Effective Heating Length	3.6 m	3.6 m
Capacity of Pump	~10 m ³ /min	50 ℓ/min (8 ℓ/min)

* Symbol "(:)" means equivalent value to PWR.

Table 2-2 Main Characteristic of Reflooding Test Rig

Loop section

Max. pressure	5 atg.
Max. temperature	water: 150°C, vapor: 350°C
Water storage capacity	0.5 m ³
Vapor tank capacity	1.0 m ³
Main circulation pump	head: 50 m, flow rate: 0.05 m ³ /min. (>30 cm/sec at test section) type: canned volute type
Heater capacity/ cooler capacity	30 kW/5 kW
Material	AISI Type 304

Test section

Max. pressure/temperature	5 atg./600°C
Heating rod	O.D.: 10.5 mm, heater length: 3.6 m type: d-c direct heating, step cosine T/C : 0.5 mm sheathed C-A
Outer channel box	6cm × 6cm square pipe, 5 mm thick
Material	AISI Type 304
Spacer grid	4 × 4 square lattice of 13.8 mm pitch Hastelloy metal egg crate

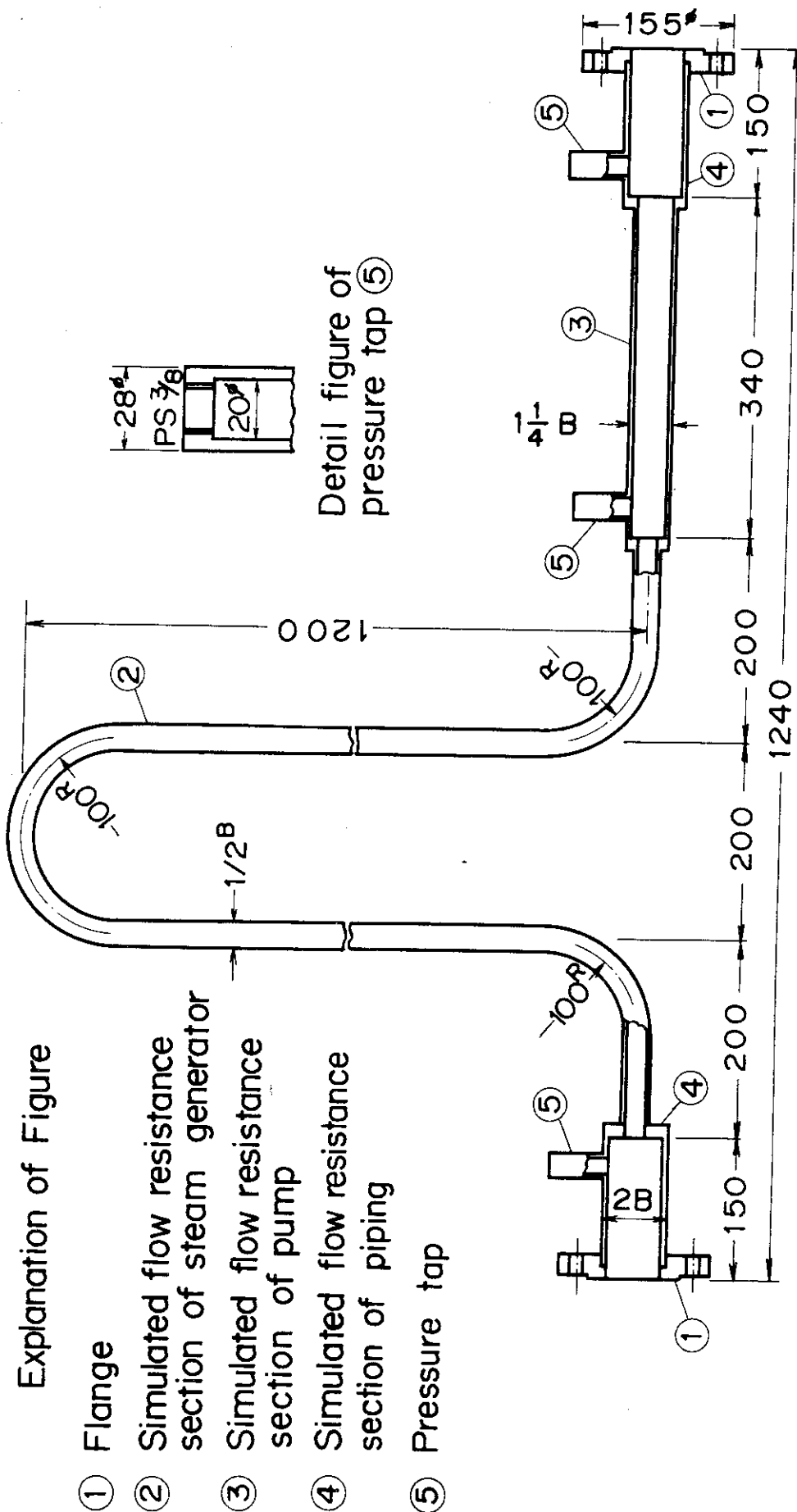


Fig. 2.5 Dimensions of Flow Resistance Section

号は、動歪増巾器を介してデータ集録装置に集録されるようになっている。

ダウンカマオーバーフロータンクと液滴ホールドタンクの液位検出器としては、パルス巾変調方式の静電容量レベル発振器を使用した。

流量検出器としては、実験時の流量範囲が150~2500ℓ/hと広いため、150~800ℓ/hと450~2500ℓ/hの範囲をそれぞれ測定できる2台のロータリピストン形流量計と、システム効果実験時に、ダウンカマ部を通してテスト部に注入される変動した流量を測定できるタービン流量計1台をそれぞれ使用した。

発熱体加熱用電源としては、定格直流50V, 10,000Aを使用した。

2.3.2 計測

検出器からデータ集録装置までの信号の流れをFig. 2.6に示す。

2.4 データ処理

2.4.1 データ処理系の構成

再冠水実験中に得られたデータは、高速データ集録装置で磁気テープに記録される。この集録されたデータから必要な情報を得るために、原研計算センターの大型計算機を利用して以下の処理がなされている。

(1) 生データを温度、圧力、流速等の具体的物理量に変換するための処理、ならびに編集し、保存するための処理。

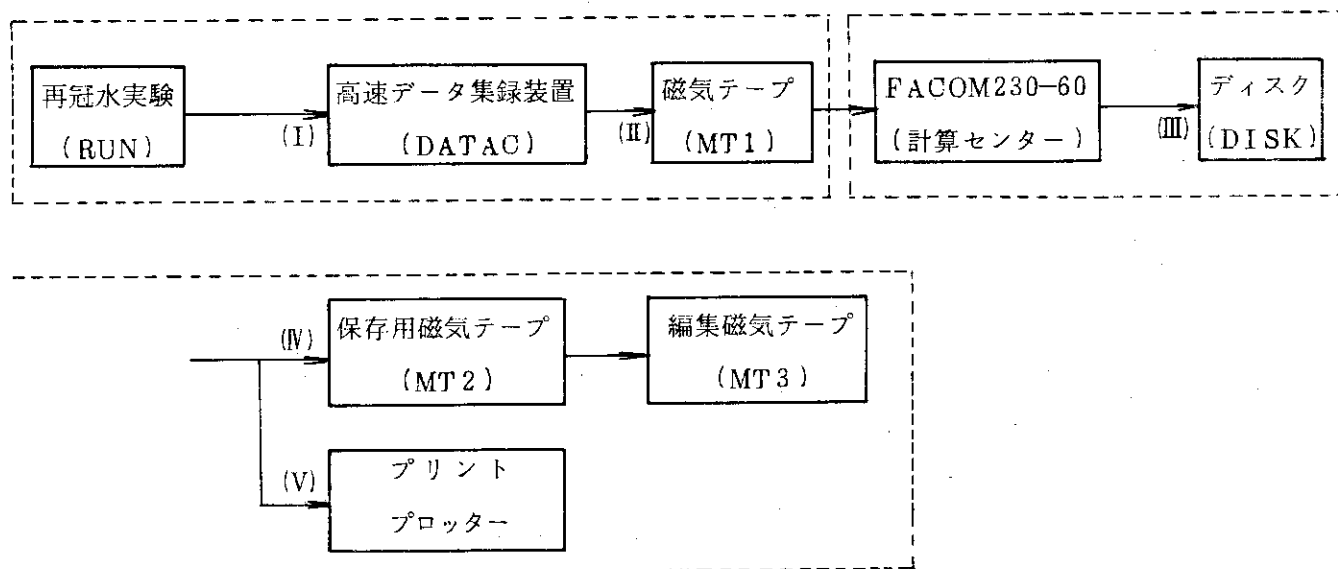
(2) (1)で得られた数値を用いて、熱伝達率、ターンアラウンド時間、クエンチ時間を算出するための処理。

(3) グラフィックディスプレイを用いて、データの内容を敏速に把握するための処理。この処理は、上記(1)、(2)項に先行あるいは平行して行われ、実験で得られたデータのチェックに使用される。

上記の3項目の具体的な内容を以下に記す。全体の流れをFig. 2.7に示す。

2.4.2 データ処理, I

磁気テープに記録された実験データは、下記に示す流れ図に従って、計算センターの大型計算機FACOM230-60で処理される。



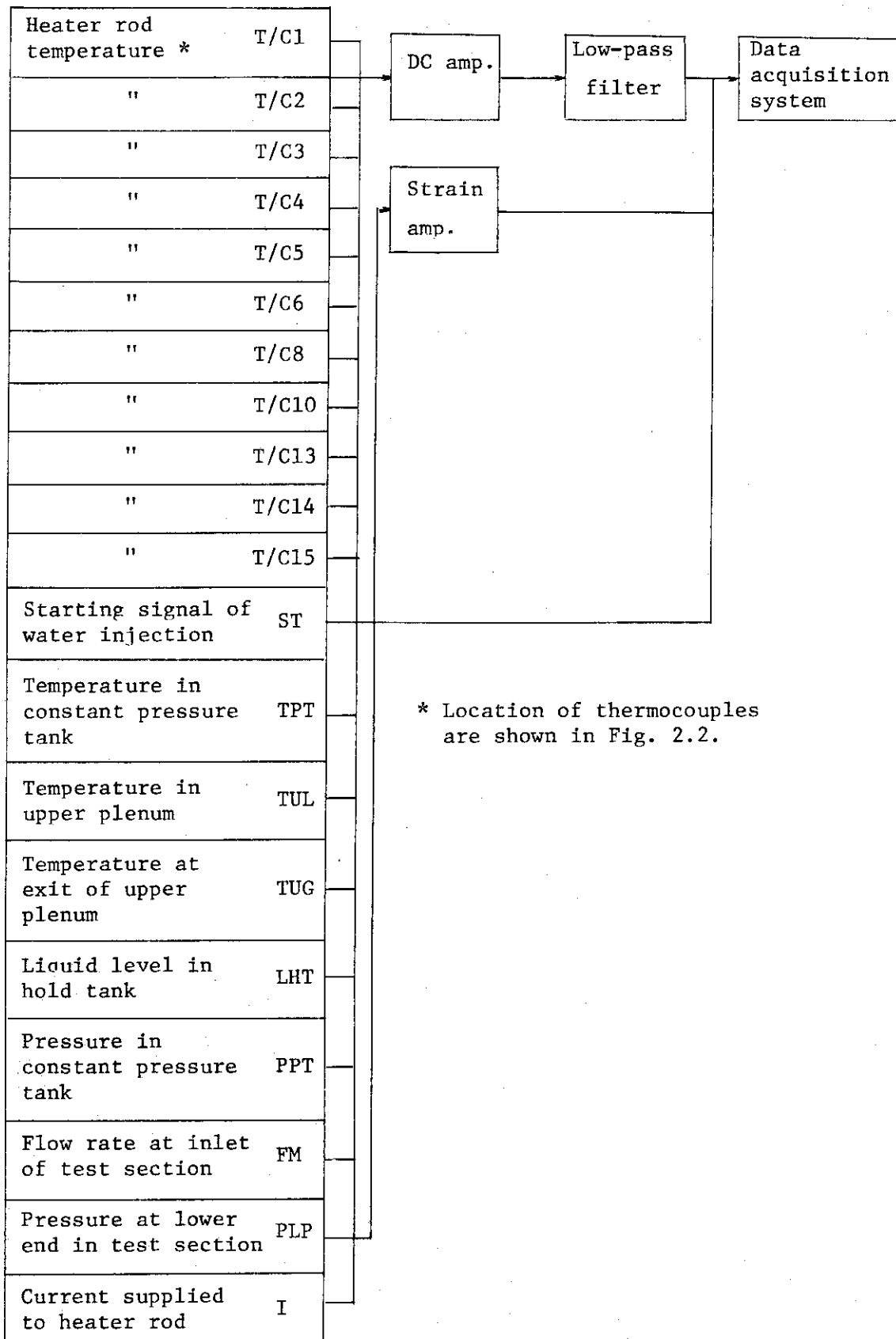


Fig. 2.6 Flow Diagram of Data

(Computer Center at JAERI)

(Laboratory)

Reflow test

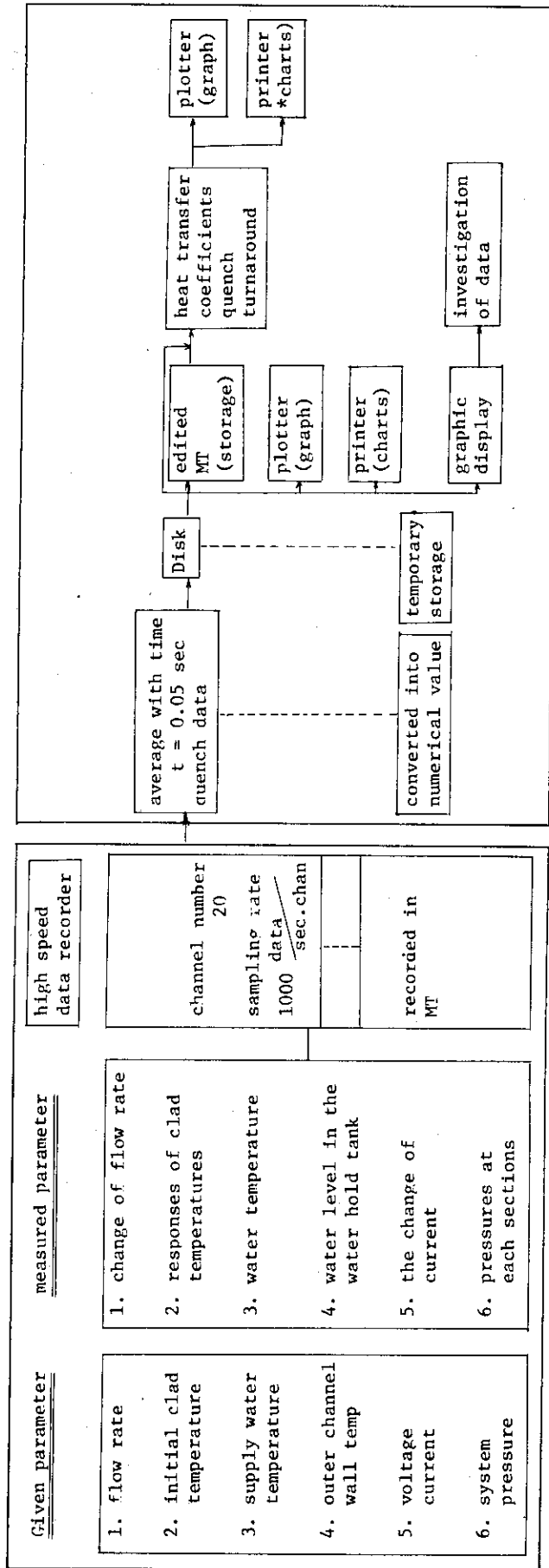


Fig. 2.7 Flow Diagram of Data Processing

すなわち、実験室で得られた磁気テープ (MT 1) の内容を、一時、計算センターのディスク (DISK) に記録させ、いくつかの RUN をまとめて保存用磁気テープに編集し直すと同時に、データを記録用紙にプリントし、さらにグラフ上にプロットすることによって、実験データを記録する。

(1) 高速データ集録装置によって磁気テープに書込まれる内容

1つの測定点につき、1秒間に1000個の計測速度で、総数20点の情報が記録される。

各チャンネルの具体的内容は次の通りである。

CHANNEL	No.	内容
	1.	発熱体表面温度 T/C1 (°C)*
	2.	" T/C2 (°C)
	3.	" T/C3 (°C)
	4.	" T/C4 (°C)
	5.	" T/C5 (°C)
	6.	" T/C6 (°C)
	7.	" T/C8 (°C)
	8.	" T/C10 (°C)
	9.	" T/C13 (°C)
	10.	" T/C14 (°C)
	11.	" T/C15 (°C)
	12.	注水開始時刻信号 (-)
	13.	定圧タンク内温度 (°C)
	14.	上部プレナム内温度 (°C)
	15.	上部プレナム出口温度 (°C)
	16.	ホールドタンク内液位 (m)
	17.	定圧タンク内圧力 (kg/cm ² ・g)
	18.	流量 (ℓ/hr)
	19.	テスト部下部圧力 (kg/cm ² ・g)
	20.	電流 (アンペア)

磁気テープ (MT 1) には、まず実験に先立って較正値が記録され、NOTE=1として、温度については0mV、圧力については0μ strainが、NOTE=2として、温度については20mV、圧力については200μ strainが入力され、NOTE=3として、実験値がチャンネル番号1 CH=1からMAXCH=20までについて実験終了まで記録される。

以上の手順は、データ処理の流れ図の(I)、(II)に相当する⁽²⁾。

(2) ディスクに書込まれる実験データの内容と順序

高速データ集録装置によって磁気テープ (MT 1) に書込まれたデータは、次の処理をなされた後、ディスクに一時記憶される。すなわち、1つの実験について、まず、実験年月日 (IDATE)、実験日磁気テープ番号 (INO)、実験番号 (NOTE)、サンプリング時間 (DT)、チャンネル総数 (MAXCH)、1チャンネルのデータ総数 (MAXTIM) が書込まれた後、データの内容が、チャンネル

* T/Cの番号の具体的位置は実験装置の項参照。

ル番号とその経時の数値として記入される。これをまとめると、

- A. IDATE , INO , NOTEST , DT , MAXCH , MAXTIM
- B. ICH , [DATA (ICH , ITIM) , ITIM=1 , MAXTIM]

となる。

さらに、その後に、温度については、急激に降下するクエンチの状況として、クエンチしている測定点についてのみ、クエンチ以後の温度が測定時間間隔 0.001秒、最大数 500 個にわたって記録される。なお、クエンチの定義は、0.05 秒間の温度降下が 32.5℃以上あり、その後、温度上昇がない場合とした。

クエンチデータとしては、クエンチしているチャンネル総数 (KKK)、クエンチデータ [チャンネル番号 (ICHQ)、クエンチ開始時刻 (TQEN)、クエンチデータ数 (ILL)、クエンチ中のデータ (DATQEN)] が記入された。これをまとめると、

- A. KKK
- B. ICHQ (KKK) , TQEN (KKK) , ILL (KKK) , [DATQEN (KKK , IBL) , IBL=1 , ILL (KKK)]

となる。

なお、ディスクに記録される数値は、すべて校正された値である。

以上の手続は実験データ処理流れ図で(III)に相当している。

(3) 磁気テープ (MT 2) に書込まれる内容と順序

磁気テープ (MT 2) には、ディスク上に記録された内容がそのまま記録され、これをいくつかまとめて保存用磁気テープとされる。すなわち、

- A. IDATE , INO , NOTEST , DT , MAXCH , MAXTIM
- B. ICH , [DATA (ICH , ITIM) , ITIM=1 , MAXTIM]
- C. KKK
- D. ICHQ (IK) , TQEN (IK) , ILL (IK) , [DATQEN (IK , IBL) , IBL=1 , ILL (IK)]

となる。

さらに、磁気テープ (MT 2) 編集と同時に、ディスク上のデータは、プロッターによってグラフ上に時間経過のデータとして、またプリンタによって表としてそれぞれアウトプットされる。

以上は、実験データ処理の流れ図で(IV)と(V)に相当している。

2.4.3 データ処理, II

磁気テープに再編され、保存されているデータから、必要に応じ、所要のデータを選びだし、データ処理計算を行うことができる。現在、熱伝達率計算コードと、温度プロフィールコードが、この目的でサブルーチン化され、準備されている。この他にも、実験条件を表表するためのコードが準備されている。

(1) 熱伝達率計算コード

熱伝達率を計算するためのコードであり、伝熱体として中空円筒状の模擬燃料棒を対象としている。熱伝達率の計算は、計機機内のコア占有量の節約と、計算時間の節約のため、以下に示すような近似計算をしている⁽⁸⁾。

- 仮定1 軸方向, 周方向の温度分布は無視する。
- 仮定2 内表面では断熱である。
- 仮定3 外表面温度は既知関数 $f(t)$ である。
- 仮定4 初期 ($t=0$) では, 一様な温度分布である。
- 仮定5 温度分布は次の形で表現できる。

$$T(r, t) = a(t)r^2 + b(t)r + c(t)$$

ここで, r : 半径方向座標(m)

- 仮定6 物性値 A は, 次の値 A^* で近似できる。

$$A^* = \frac{\int A r dr}{\int r dr}$$

- 仮定7 熱流束 q (kcal/m²hr) は次のように表現できる。

$$q = -\lambda^* \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r_0}$$

ここで, λ : 熱伝導率 (kcal/m hr °C)

r_0 : 外半径 (m)

すると

$$q = -2\lambda^* (r_0 - r_i) \text{Exp} \left(-\int_0^t P(\tau_3) d\tau_3 \right) \cdot \int_0^t \left\{ -Q(\tau_1) \text{Exp} \left(\int_0^{\tau_1} P(\tau_2) d\tau_2 \right) \right\} d\tau_1$$

$$P = \frac{B}{A}$$

$$Q = \frac{C}{A}$$

$$A = (C_p \rho)^* \{ F_4 - 2r_i F_3 + (2r_i r_0 - r_0^2) F_2 \}$$

$$B = -2\lambda^* r_0 F_1$$

$$C = \left\{ (C_p \rho)^* \left(\frac{df}{dt} \right) - q''^* \right\} F_2$$

$$F_n = \frac{1}{n} (r_0^n - r_i^n) \quad (n=1, 2, 3, 4)$$

ここで

$C_p \rho$: 比熱×密度 (kcal/m³°C)

r_i : 内半径 (m)

q'' : 発熱量 (kcal/m²hr)

熱伝達率 h (kcal/m² hr°C) は次の定義式により計算している。

$$h \equiv q'' / (T - T_s)$$

ここで、 T_s : 飽和温度 (°C)

上の定義による熱伝達率 h は、通常の意味の熱伝達率と異っている。再冠水実験では、特に蒸気流部において過熱蒸気となっていることが充分考えられ、その場合 h は実際の値より小さくなる。

(2) 温度プロフィールコード

温度プロフィールコードは、表面温度実測値から、各熱電対位置のターンアラウンドタイム、クエンチタイム、ターンアラウンド温度、クエンチ温度を求めるためのコードである。ターンアラウンドの有無、クエンチの有無の判定も行っている。判定に用いた手法は別報⁽²⁾に譲る。

2.4.4 グラフィック・ディスプレイによるデータ処理

次の機能をもったグラフィック・ディスプレイによるデータ処理プログラムを作成し、実験で得られたデータの早期把握に資した。

(1) データ読み取り

ディスクに集録されたデータを読む。この場合、不必要なデータブロックはライトペンの指示により読み飛ばすことができる。また個数の多いデータは、その数に応じた算術平均を行う。

(2) 図形表示

(1)により得られたデータを、時間軸に対してプロットし、グラフを描く。

(3) 部分図形表示

(2)により表示されたグラフを観察し、必要な部分を拡大して、再度表示する。表示する部分の指定は(5)によりキーボードから行う。

(4) 図形の修正

生データにより得られた図形は、信号ノイズ等により少なからず乱れた図形もある。それらをライトペンにより観察者が、図形を修正することができる。これは(2)、(3)どちらの図形でも、また重複して修正することも可能である。

(5) パラメータの変更

部分図形表示用の時間帯、縦軸の尺度等のパラメータをキーボードにより入力し、指定あるいは変更する。

(6) 熱伝達率の計算

得られた温度データにより、熱伝達率を計算し、図形を表示する。データとしては、原データ、修正データどちらも取りうる。これらは(2)、(3)に従い、全体・部分ともに、温度グラフの上に表示させることが可能である。

(7) 表

原データ、修正データ、熱伝達率等の数値を表にして10個ずつ画面に表示する。表示する範囲は全体でも部分でも可能である。ライトペン、キーボードにより、そのデータを修正したり、つけ加えたりすることも可能である。

(8) 印刷

必要なデータ、計算結果をプリントする。

2.5 実験条件

シリーズ1実験は、昭和49年9月～10月の間に、45ラン行なわれた。その実験条件は、第1章で述べた実験目的等から以下の様に設定された。主要実験条件範囲をTable 2.3に示す。

Table 2-3 Main Run Conditions

Item	Range
System Pressure (Po)	1 atm.
Inlet Water Temperature (Tin)	50 ~ 90°C
Flow Housing Temperature (TCH)	300 °C
Initial Heater Rod Temperature (Tw in)	300 °C
Peak Power (Q)	1.8 ~ 4.0 kW/m
Injected Water Velocity (Uin)	6 ~ 16 cm/sec

(1) 系圧力 (P_o)

実炉の事故を模擬するためには、ブローダウン終了時のコンテナ圧力にすべきであるが、本装置の最初の運転であるので、特に系を加圧せず、大気圧下における実験を行なった。

(2) 注入水温度 (T_{in})

実炉の再冠水時においては、ダウンカマーや下部プレナムの状態により、炉心に入る冷却水温度は、種々の場合が考えられる。この実験では、サブクール度の大きい50°C、サブクール度の小さい90°C、およびその中間である80°Cを採用した。

(3) 流路外管温度 (T_{CH})

テスト部は4×4本の小さな集合体であるため、流路外管の実験に与える影響は無視できないものと思われる。しかしながら、流路外管の温度、熱容量等の影響に関するデータは少なく、今後の実験により明らかにされるであろう。本シリーズでは、流路外管温度はパラメトリックな変更はせず、一定とし、その値は次項(4)と同様の理由で、300°Cとした。

(4) 初期発熱体中央部温度 (T_{w in})

これは、テスト部へ注水を開始する時の発熱体中央部温度（軸方向最高温度）である。これに関しても、実炉の再冠水開始時の温度を基準にして設定すべきであるが、その時の初期状態に関するデータは少ない。本シリーズにおいては、ブローダウン過程においては、まだ発熱体の温度上昇は少なく、それ以後の過程において、温度変化が生ずるとみなし、初期温度は、実炉の定常運転時の温度に近い値の300°Cを採用した。この温度から注水を開始すれば、発熱体表面温度は、ライデンフロスト温度より高くなるということも、設定理由の一つである。

(5) 発熱体ピーク出力 (Q)

本装置の能力、解析を容易にする等を考慮して、時間的には一定出力とした。その出力は、スクラ

ム後のある時間経過した時の崩壊熱を模擬し、0.9秒後の4.0 kw/mと250秒後の1.8 kw/mとした。なお、崩壊熱算出にあたってはShure式の20%増を使用した。この実験により、出力大の時と小の時の装置運転性能を明らかにできる。将来は装置を改造し、崩壊熱の時間変化を模擬できるよう改造する予定である。

(6) 注水速度 (U_{in})

実炉再冠水時の注水速度は、低圧注入系ポンプの容量等から推定すると、10 cm/sec程度となる。しかしながら、破断口より溢水する量等を考慮していないため、実際にはこれよりかなり減少するものと思われる。本実験では、装置の能力から、最大速度は16 cm/secとし、パラメトリックに最小値6 cm/secまでの実験を行なった。

Table 2.4 にシリーズ1の実験条件を示す。

2.6 実験方法

前述の装置により、Phase A実験を行なった。その実験の手順は下記のとおりである。

(1) 冷却水循環

水を、貯水タンク、加熱器、下部プレナム、オーバーフローラインを通して循環させながら、加熱器により昇温、あるいは、冷却器により降温させ、注入水温を設定温度にする。また、流調弁により、所定の流速が得られるよう流量を設定する。下部プレナムのオーバーフローラインの高さ位置は、発熱体有効発熱部下端にあり、水が循環している際は、発熱体はそこまで水にひたされている。実験が開始されれば、水はただちに、有効発熱部を上昇する。

(2) 流路外管予熱

冷却水を循環させている間に、外巻ヒータにより、流路外管を設定温度に保持する。

(3) 実験制御シーケンス・スタート

- i) 高速データ集録装置が温度、流量、圧力等のデータ記録を開始する。
- ii) 発熱体に電力を供給し、加熱する。
- iii) 発熱体中央部表面温度が設定温度に達した時、オーバーフローラインの弁を閉じることにより、テスト部への注水を開始する。
- iv) 発熱体表面温度が全て飽和温度以下に下がった時、あるいは、発熱体保護のため、同温度が600℃に達した時は、発熱体供給電源を切る。
- v) データ記録を停止し、発熱体が完全に冷却された後にテスト部への注水をやめ、実験を終了する。

Table 2-4 Series 1 Experiment Condition Summary Sheet

No.	NOTEST	INO	ITEST	T _{in} (°C)	U _{in} (cm/s)	E (V)	T _{win} (°C)	T _{CH} (°C)
1	490102	1	3	90	16	20	300	300
2	"	"	4	"	14	"	"	"
3	"	"	5	"	"	"	"	"
4	"	"	6	"	"	"	"	"
5	"	"	7	"	"	"	"	"
6	491008	3	3	"	10	30	300	300
7	"	"	4	"	8	"	"	"
8	490109	1	3	80	16	30	300	300
9	"	"	4	"	"	"	"	"
10	"	"	5	"	14	"	"	"
11	"	"	6	"	12	"	"	"
12	"	"	7	"	10	"	"	"
13	490108	1	3	90	14	30	300	300
14	"	"	4	"	12	"	"	"
15	490925	2	3	80	16	20	300	300
16	"	"	4	"	14	"	"	"
17	490910	3	3	50	12	30	300	300
18	"	5	"	"	16	"	"	"
19	"	6	"	"	16	20	"	"
20	"	8	"	"	12	"	"	"
21	490925	1	4	80	16	20	300	300
22	"	2	6	"	10	"	"	"
23	"	"	7	"	8	"	"	"
24	490904	1	3	50	10	20	300	300
25	"	2	4	"	8	"	"	"
26	"	3	"	"	10	30	"	"
27	"	"	"	"	"	"	"	"
28	490910	2	3	50	8	30	300	300
29	"	4	3	"	14	"	"	"
30	"	7	3	"	"	20	"	"
31	490911	2	3	50	6	20	300	300
32	490102	1	8	90	12	20	300	300
33	"	"	9	"	10	"	"	"
34	"	"	10	"	8	"	"	"
35	490904	1	4	50	10	20	300	300

No.	NOTEST	INO	ITEST	T _{in} (°C)	U _{in} (cm/s)	E (V)	T _{in} (°C)	T _{CH} (°C)
36	490904	3	5	50	10	30	300	300
37	"	4	3	"	"	20	"	"
38	490910	1	5	50	10	30	300	300
39	490911	1	3	50	8	20	300	300
40	"	3	3	80	10	"	"	"
41	490925	2	5	80	14	20	300	300
42	"	"	8	"	8	"	"	"
43	490102	1	11	90	8	20	300	300
44	490107	1	3	90	10	20	300	300
45	"	"	4	"	"	"	"	"

Notes: T_{in}: initial temperature of heater rod (°C)
T : temperature of housing wall (°C)
T_{in} : temperature of water injected (°C)
U_{in} : injected water velocity (cm/s)
E : voltage supplied to heater rod (volt)
Linear peak power is 1.8 kW/m when E is
20 volt, and it is 4.0 kW/m when E is 30 volt.

3 実験結果

3.1 発熱体表面温度応答

実験で得られた発熱体表面の温度応答は、

- (1) 発熱体の発熱量
- (2) 冷却水温度
- (3) 冷却水注入速度
- (4) 熱電対取付位置

の違いにより、種々の様相を示している。Fig. 3.1はそれらを分類し、典型的なものを例示したものである。図中の t_{00} は発熱体の発熱開始時刻、 t_0 は注入開始時刻を意味する。発熱体表面は、 t_{00} 以前は流路外管からの輻射で加熱されているが、その伝熱量は僅かであるので、ほぼ一定温度を保っている。 t_{00} 以後は、発熱体の発熱開始によって表面温度は上昇する。表面温度の上昇率は、若干の期間一定値を保つ。その後、上昇率は変化し、冷却が開始されたことを示す（冷却開始時刻を t_1 と呼ぶ）。発熱体の熱容量が小さいため、 t_{00} 、 t_0 、 t_1 の時刻は表面温度の履歴に比較的明確な変化としてあらわれている。

t_1 以後、表面温度はターンアラウンド（最高温度点）、クエンチ（急冷開始点）を経て、発熱体は完全に冷却され、表面温度は飽和温度に到る。

t_1 から、表面温度が飽和温度に達するまでの期間の温度応答の様相には、次の諸タイプが見られる。

Aタイプ；Fig. 3.1 (A) に示すごとく、冷却開始後極めて短時間でクエンチする例で、この場合仮想液位 ($U_{in} t$ で定義され、非加熱の場合の液位である。ただし、 U_{in} は注入速度、 t は注入開始後の時間である。) が、注目点に達する以前に、クエンチが起ったことを示す。Fig. 3.2はクエンチ時刻と熱電対取付高さの関係を示したもので図中の実線は仮想液位を示す。この実線の左方領域は仮想液位到達以前を示し、右方領域は仮想液位到達後を意味する。Fig. 3.2に示されるように、実線の左方領域にかなりのデータが見受けられる。

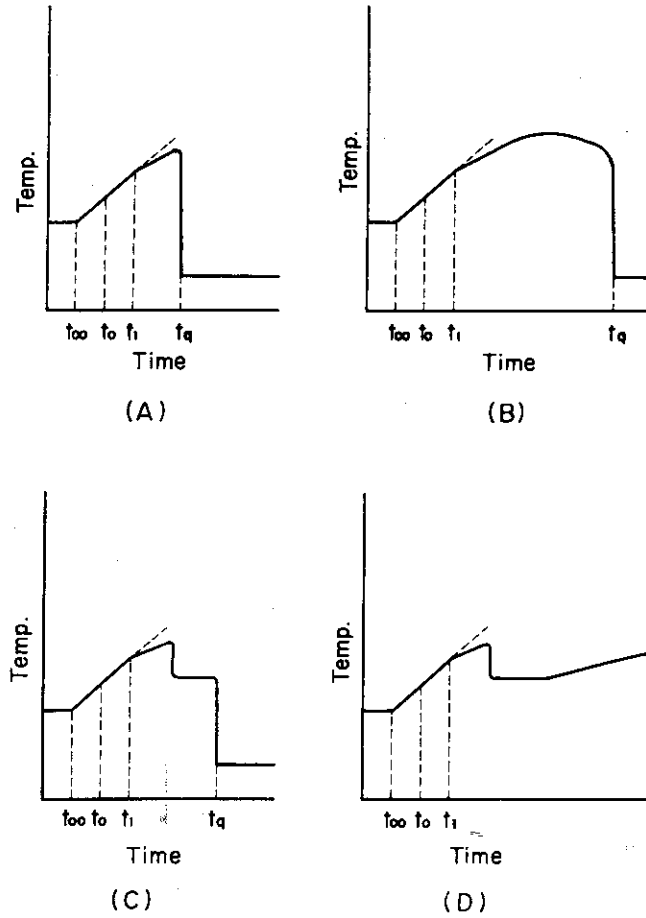
このタイプでは、注目点に連続した液相がある状況下でクエンチしたとは考えがたい。従って下方からの飛散した液滴が注目点で付着し、クエンチがおきたと考える方が妥当である。また、大部分のデータに、ターンアラウンド時刻とクエンチ時刻が一致しているという特徴が見受けられる。

Bタイプ；Fig. 3.1 (B) に見るごとく、冷却開始後相当時間経過した後にクエンチする例である。冷却開始後、ターンアラウンド、クエンチが明確に現われ、それぞれの間には若干の時間差がある。これらのデータの内には仮想液位が、注目点に達した後にクエンチがおこったことを示すものがある。

Cタイプ；Fig. 3.1 (C) に見るごとく、Aタイプと同様の温度履歴であるが、クエンチ時刻後、発熱体表面温度が飽和温度まで急降下する途中で一時停滞する例である。

Dタイプ；発熱体表面温度がクエンチ時に一時停滞しその後、飽和温度まで降下せず再び上昇する例である。

CタイプはT/C 2でのみ、DタイプはT/C 1でのみ現われているが、これはテスト部の下半部



Legend
 t_{00} : time of heating initiation
 t_0 : time of reflooding initiation
 t_1 : time of cooling initiation
 t_q : quench time

Fig. 3.1 Typical Patterns of Temperature Responses in Present Experiments

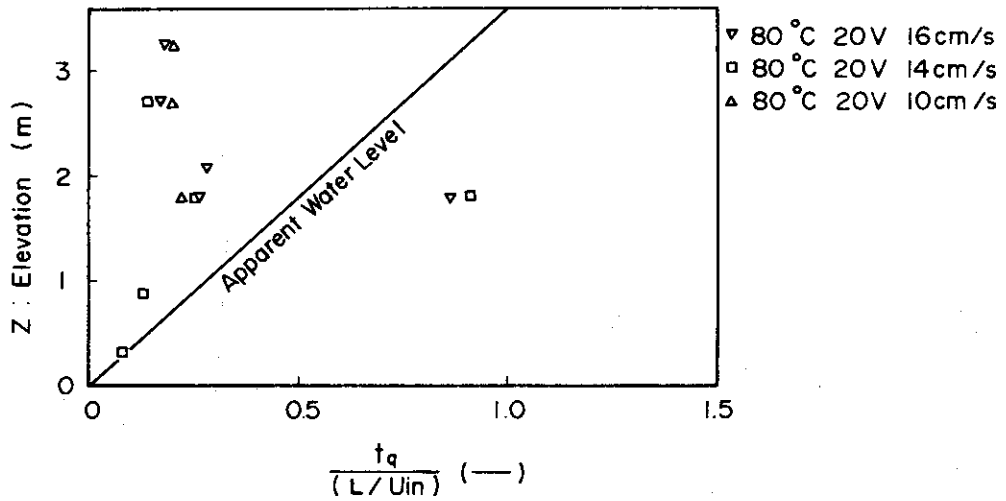


Fig. 3.2 Effect of Injected Water Velocity on Quench Time

に取付けられている熱電対では、発熱体表面温度の急降下があれば、殆んど例外なく飽和温度まで降下し、完全に発熱体表面は漏れるのに対し、T/C 1, T/C 2のテスト部上半部では、発熱体温度が一度急降下しても完全には漏れない場合があることを示している。

Fig. 3.3にDタイプの実例を示す。同図中には参考のため、他のタイプの例も示してある。

本実験では、熱電対は発熱体表面に取付けられ、流路内に突出している。このため、熱電対はフィンとして働き、液滴の飛散開始に「忠実」に反応したか、またはその他の理由によって、C, Dタイプが出現した可能性もあり、目下これらのタイプの反応の妥当性について詳細に検討中である。

3.2 熱伝達率

3.2.1 熱伝達率の特徴

熱電対の温度反応をもとに得られた熱伝達率の計算結果の例をFig. 3.4に示す。軸方向の高さの違いにより、熱伝達率は相当に異なった傾向を示しているが、同一位置での実験条件の違いによる熱伝達率の傾向の差は小さい。特に発熱体中央部の最高発熱量の位置に於ける熱伝達率は大部分Fig. 3.4中の(b)の傾向を示す。この発熱体中央部の状況は、3.1節の分類では、Bタイプに属している。Fig. 3.4(b)のBタイプに限定していえば、冷却開始時刻 t_1 になると熱伝達率は急増加を示し、その後一度漸減し丘状の熱伝達率特性を形成する。それ以後、熱伝達率はゆるやかな増加を示し、クエンチ近傍から急に増加し、クエンチでは大きな値を示すようになる。

以上のように注水開始時刻 t_0 からクエンチ時刻 t_q に至る期間は一般に次のような各期間に分類できる。

Bタイプの特徴

- (1) 初期断熱領域 ($t_0 \sim t_1$)
- (2) 初期冷却促進領域 ($t_1 \sim t_2$)
- (3) 冷却停滞領域 ($t_2 \sim t_3$)
- (4) 冷却増大領域 ($t_3 \sim t_q$)
- (5) クエンチ点 (at t_q)

Fig. 3.4中の(a)にAタイプの場合の熱伝達率の計算例が示してある。このAタイプの場合には、Bタイプの期間の内、(2), (3), (4)の期間の存在が不明瞭となり、殆んど同時に現われている。

Aタイプの特徴

- (1) 初期断熱期 ($t_0 \sim t_1$)
- (2) 初期冷却促進領域 ($t_1 \sim t_q$)
- (3) クエンチ点 (at t_q)

3.2.2 Aタイプ, Bタイプの出現の特徴

Aタイプ, Bタイプはランダムに出現しているわけではなく、以下に述べる規則性が見受けられる。

- (1) 一実験において、A, B両タイプが出現する。
- (2) Aタイプ中でのクエンチは、熱電対取付位置が異なっても、一度クエンチが生じれば殆んど同時に起る。
- (3) Aタイプが生ずるか、Bタイプが生ずるかは、熱電対取付位置による。即ち、発熱体中央部以外の全ての熱電対では、Aタイプを示す(但し、C, Dタイプをも含んでいる)。発熱体中央部の一

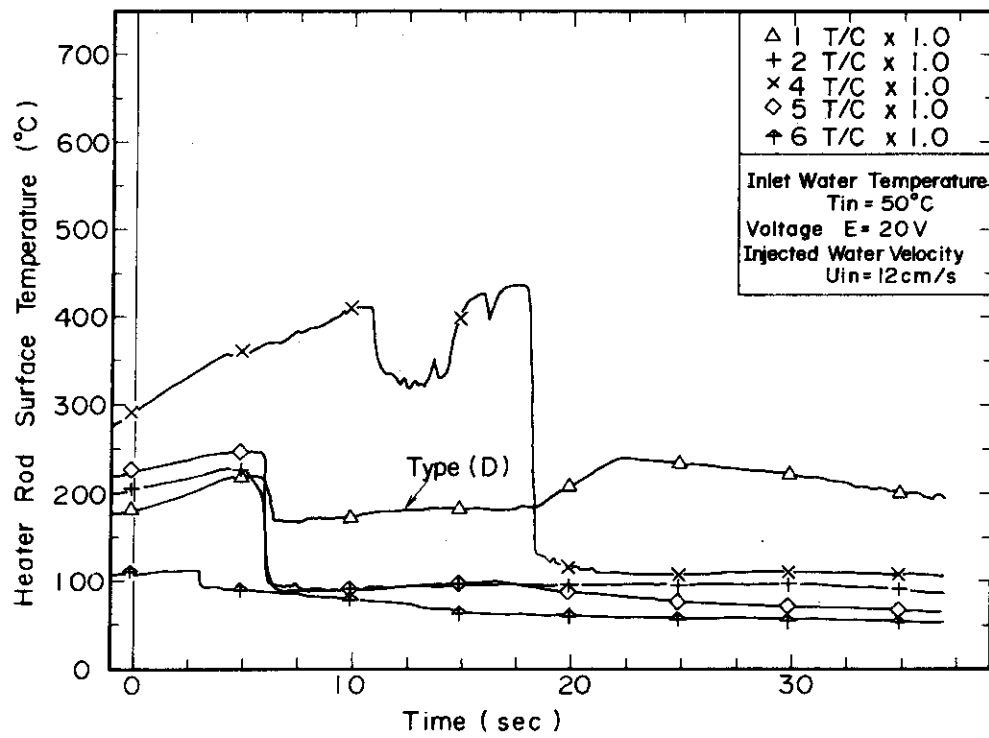


Fig. 3.3 Examples of Temperature Response of Heater Rod Surface-Type(D)

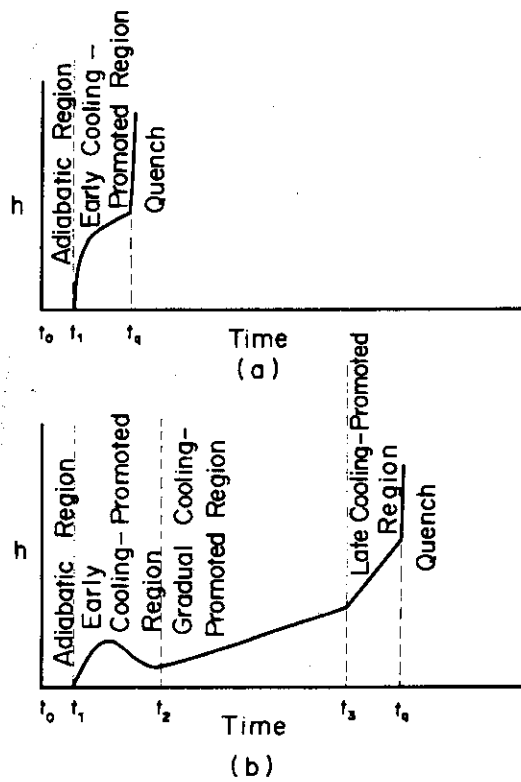


Fig. 3.4 Two Types of History of Heat Transfer Coefficient

部の限定された熱電対にもAタイプが現われる。一方、発熱体中央部の残りの熱電対はBタイプを示す。

3.3 熱流束 q と過熱度 ΔT_{Sat} との関係

発熱体表面から流体側に放出される正味の熱流束 q と過熱度 ΔT_{Sat} （発熱体表面温度 T_w と飽和温度 T_s との差）との関係が、注水開始後どのように変化していくかを示した例が、Fig. 3.5(a), (b)に示してある。ここで、(a)は熱電対番号5のもので発熱体温度応答の分類でAタイプに入る例であり、(b)は発熱対番号14のものでBタイプに属している。同図の縦軸は熱流束 q ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{hr}$)、横軸は過熱度 ΔT_{Sat} ($^{\circ}\text{C}$)を示す。この曲線上で最高過熱度（曲線上で一番右側の点）の位置がターンアラウンド点を示し、一方熱流束がほぼ一定で過熱度が 200°C 程度から 50°C 程度まで降下する箇所がクエンチを示している。

一般に、Bタイプの、熱流束 q 対過熱度 ΔT_{Sat} の関係は注水開始時から終了まで、次のごとき特徴ある経過をたどる。

(1) 注水開始と共に過熱度は増大しターンアラウンドに到る期間は、熱流束も増大し、右上りの曲線となる。

(2) ターンアラウンドからクエンチに到るまでの期間で膜沸騰が顕著に出現する実験では左下りの曲線となる。

(3) クエンチでは熱流束が一定で、過熱度が急降下し、グラフ上では水平に左へ移行する。

(4) クエンチの後には、核沸騰が続くと考えられ、かなりの急勾配の左下りの曲線をたどる。

(5) その後、強制対流領域に入り、過熱度は小さく熱流束も小さいほぼ一定の値をとる。

上記の(1)~(5)の経過を概念図として示すと、Fig. 3.6のごとくなる。

Aタイプの場合には、上述の(2)の領域が全くなく、一般にターンアラウンド温度は低いのが特徴である。

3.4 本実験とFLECHT実験との相異点

本実験で得られた温度応答曲線、熱伝達率曲線、熱流束対過熱度曲線の結果を、FLECHT実験結果と比較すると、次の相異点が認められる。

(1) 温度応答について

- a. FLECHT実験よりもクエンチが早期に生じている。
- b. クエンチ時の温度降下がFLECHT実験よりも非常に早い。
- c. 発熱体上部では、飛散液滴がクエンチの原因になっていると推測される。

(2) 熱伝達率について

- a. 本実験では、初期に断熱期があるが、FLECHT実験ではなく、実験開始時に既にかかなりの熱伝達率を有している。
- b. 熱伝達率変化の状況の対応に、相異が見受けられる。FLECHT実験では、クエンチ前に熱伝達率が、 100 程度から $300 \text{ kcal}/\text{m}^2 \text{ hr } ^{\circ}\text{C}$ 程度まで漸増する期間が長期間継続するのが一般的であるのに対し、本実験ではこのように長期間継続することはない。
- c. 本実験の冷却停滞領域は、注入開始時刻を始点としてFLECHT実験と比較すると、FLECHT

実験の初期の熱伝達率との状況が類似している。

d. FLECHT実験では、クエンチ直前以降の熱伝達が例示されていない。本実験では実験終了時まで計算されている。

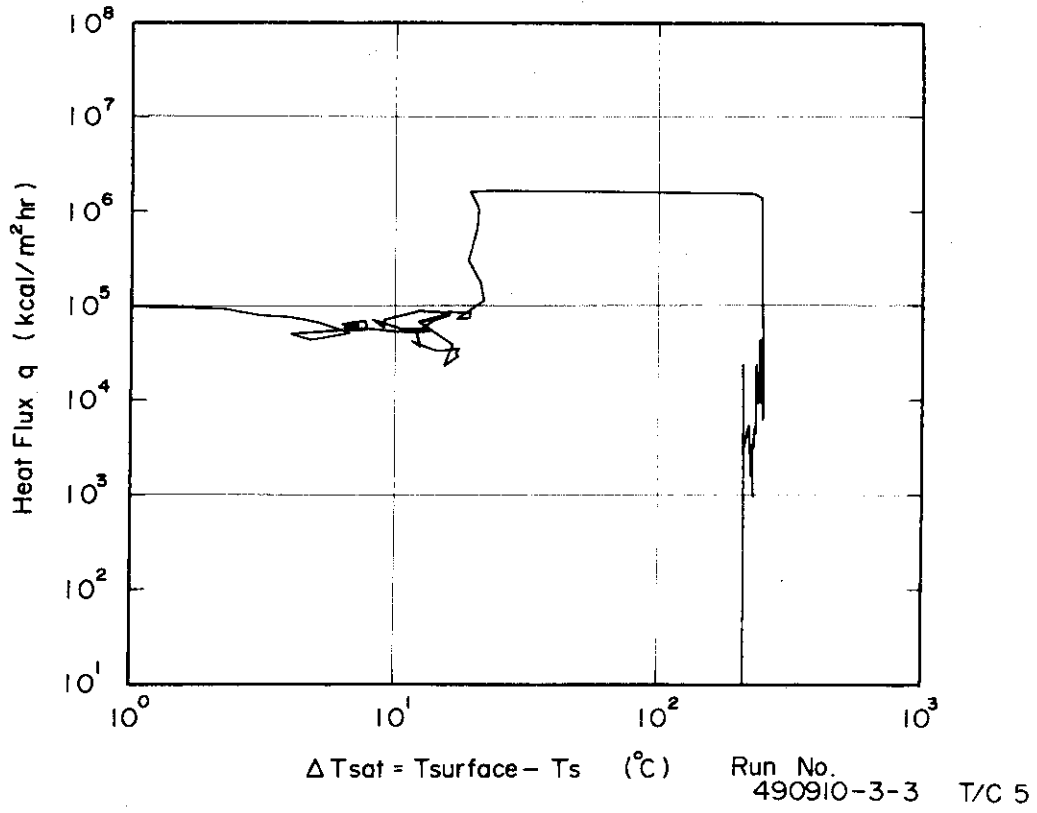


Fig.3.5(a) Heat Flux vs ΔT_{sat}

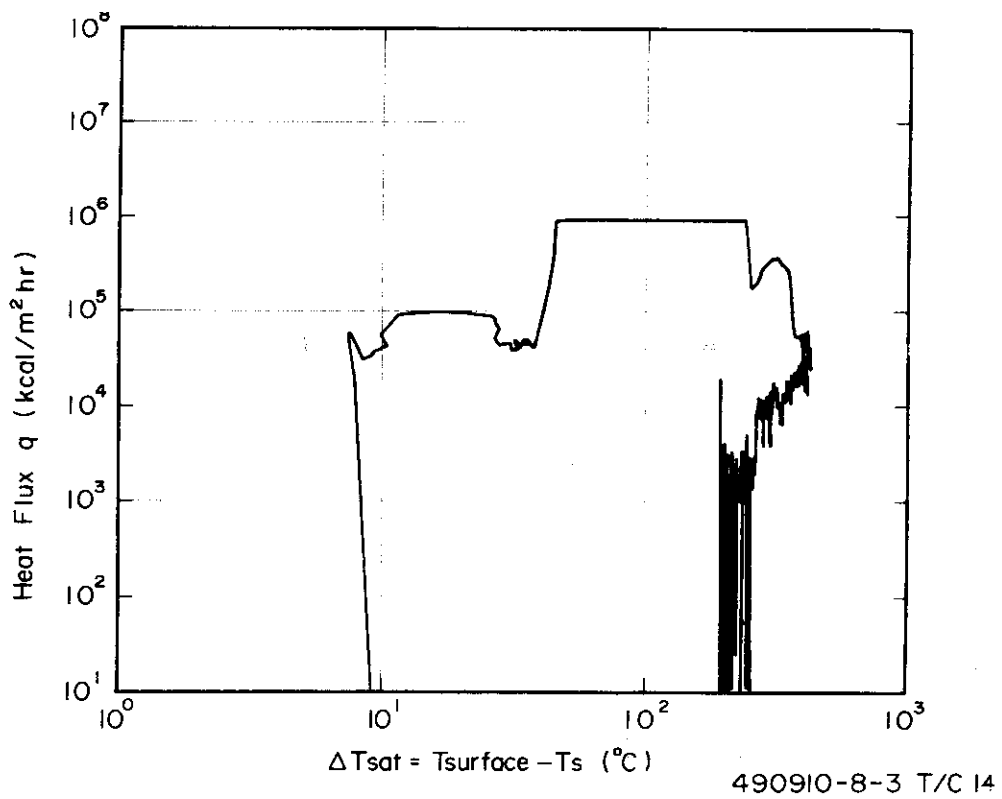


Fig.3.5(b) Heat Flux vs ΔT_{sat}

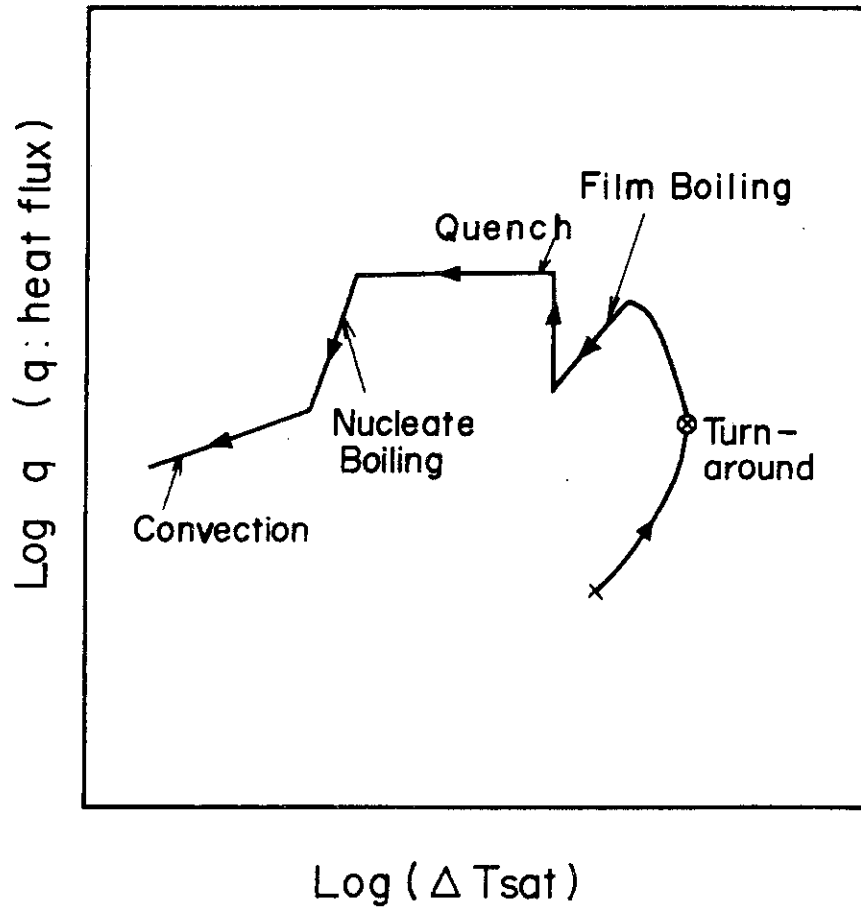


Fig. 3.6 Schematic Diagram of q vs T_{sat} Relation

4 実験結果の考察

4.1 冷却開始時刻 (t_1)

本実験では、注水開始後しばらくの間発熱体は殆んど断熱状態となっている。その後発熱体表面の温度応答の屈折から冷却が開始されることがわかる。この時刻が t_1 である。本実験結果によれば、冷却開始は発熱体全長に亘ってほぼ同時に起っている。Fig. 4.1(a)は、発熱体表面温度応答に、冷却開始時刻 t_1 がどのようにあらわれるかを例示したものである。Fig. 4.1(b)には、 u_{in} をパラメータにして t_1 と熱電対取付高さとの関係を示す。同図で縦軸は無次元時間 ($t_1/(L/u_{in})$) を示し、横軸は熱電対の取付高さを示す。発熱体高さ位置によらず、ほぼ同時に冷却が開始していることがわかる。(ここで L は有効発熱長である)

また、Fig. 4.2 に無次元時間 $t_1/(L/u_{in})$ と発熱体印加電圧の2乗 (これは発熱量に比例している) との関係を示す。

Fig. 4.3 に、 $t_1/(L/u_{in})$ と注入水のサブクール度との関係を示す。

Fig. 4.4 に、 $t_1/(L/u_{in})$ と注入速度との関係を示す。

現在のところ、これらの図からわかるように冷却開始時刻 t_1 と発熱体出力、入口サブクール度、注入速度との間には明確な関係は見られず、本実験では $t_1/(L/u_{in}) = 0.06 \sim 0.14$ の範囲にある。

4.2 蒸気流熱伝達の検討

4.2.1 蒸気流熱伝達率の特徴

Fig. 4.5 は、本実験で得られた発熱体表面の温度応答から計算された熱伝達率の一例である。図中の曲線(a)、(b)は仮想液位到達後にクエンチしており既述のBタイプに属しており、曲線(c)は既述のAタイプに属している。Bタイプに属する曲線(a)についてみると、注水開始後しばらくの間、熱伝達率 $h \doteq 0$ の期間がある。その後 h がゆるやかに増加する期間があり、この注入開始から熱伝達率 h がゆるやかに増加している期間は蒸気流による冷却が支配的な期間と考えられる。その後、 h が急激に増加している期間は、熱伝達率と発熱体表面温度との変化具合から別の伝熱形態があらわれていると考えられる。

また、熱伝達率がゆるやかに増加する前に、一時的に熱伝達率が大きくなる時があり、Fig. 4.5 中の(b)がその典型例である。ここでは、この期間を、初期冷却促進領域、その後のゆるやかな増加期間を冷却停滞領域と呼ぶことにする。

蒸気流熱伝達領域では、一般に熱伝達率の変動は大きく、特に初期冷却促進領域では大きい。

Fig. 4.5 の曲線(c)は、いわゆるAタイプに属する発熱体温度応答から計算された熱伝達率の例である。Bタイプに属するものに比べ、冷却停滞領域に相当する領域がないか、または非常に短いという特徴がある。

本実験における各領域の継続時間と、その時の熱伝達率の大きさを次に示しておく。

- (1) 初期冷却促進領域の継続時間：おおよそ5～10秒
- (2) 初期冷却促進領域の熱伝達率：

Run Conditions
 Δ 490910-5-3
 Tin 50°C
 Uin 16 cm/s
 E 30 V
 ○ 490925-2-7
 Tin 80°C
 Uin 8 cm/s
 E 20 V
 × 490910-3-3
 Tin 50°C
 Uin 12 cm/s
 E 30 V

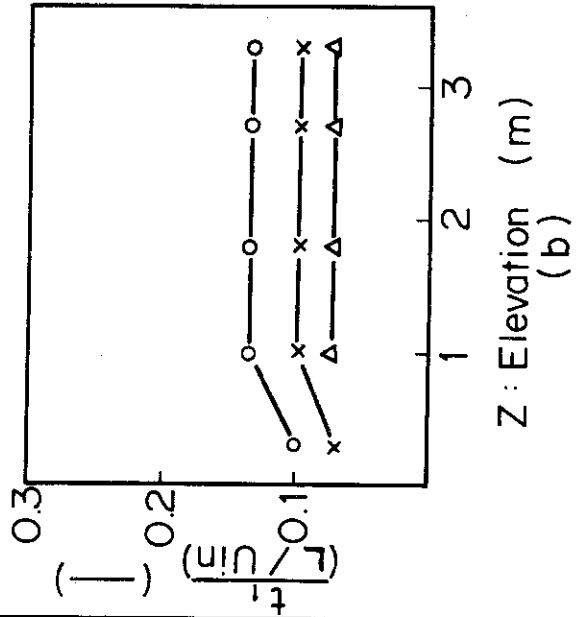
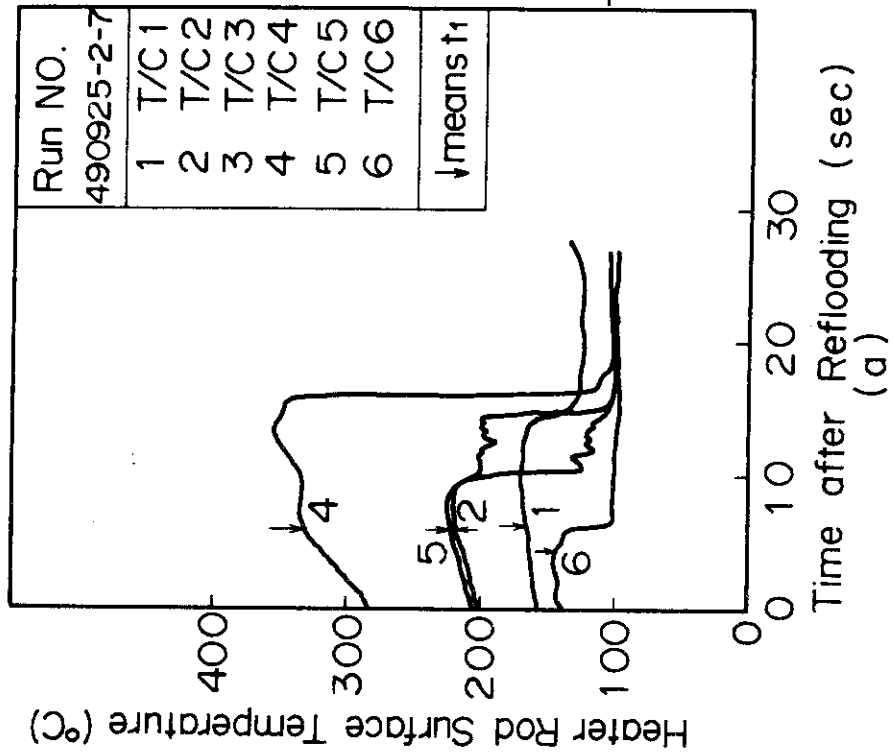


Fig. 4.1 Characteristics of Cooling Initiation

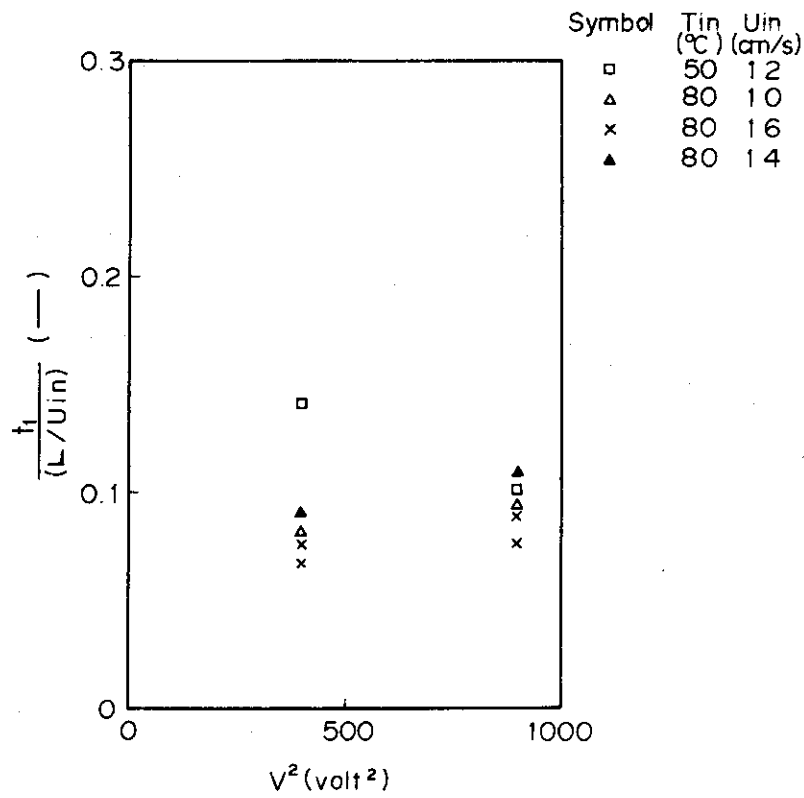


Fig. 4.2 Effect of Power on Time of Cooling Initiation

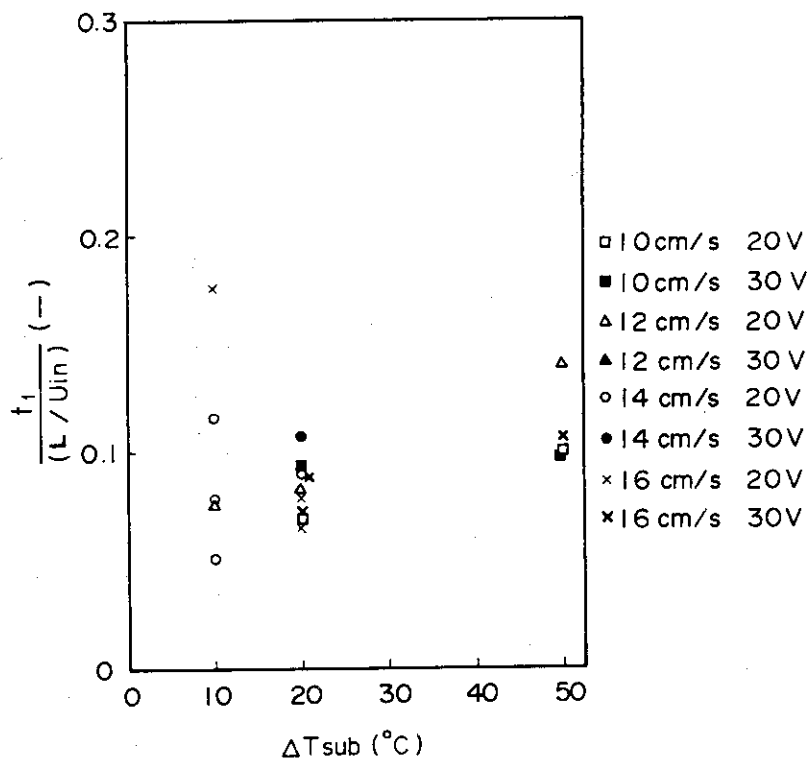


Fig. 4.3 Effect of Inlet Subcooling on Time of Cooling Initiation

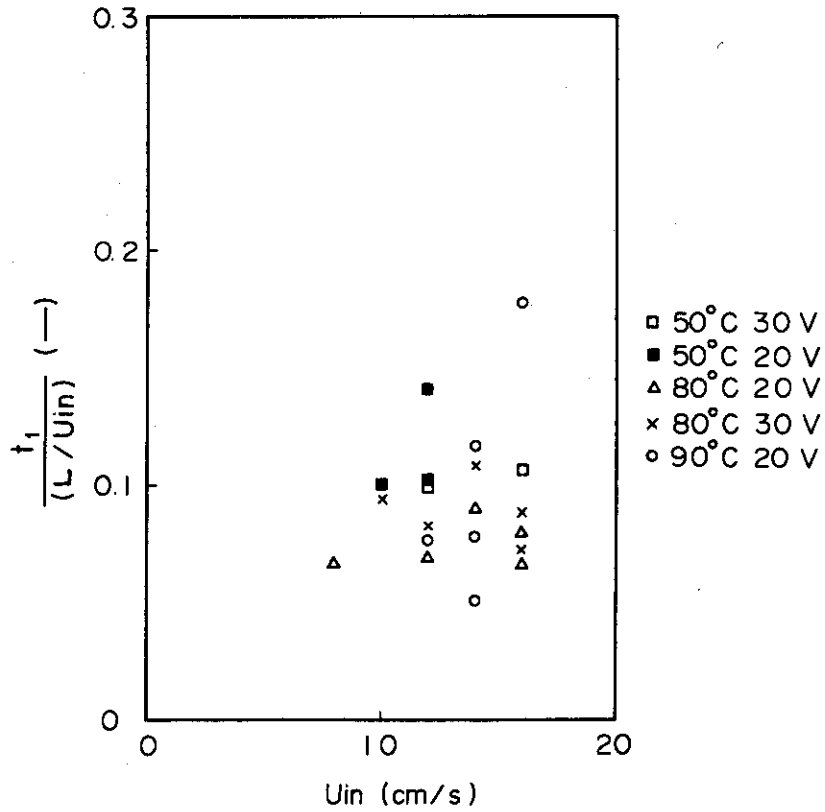


Fig. 4.4 Effect of Injected Water Velocity on Time of Cooling Initiation

Run Conditions

- (a)---- 490925-2-3 T/C 14 80°C 20V 16 cm/s
- (b)—— 490102-1-5 T/C 14 90°C 20V 14 cm/s
- (c)—— 490102-1-6 T/C 2 90°C 20V 14 cm/s

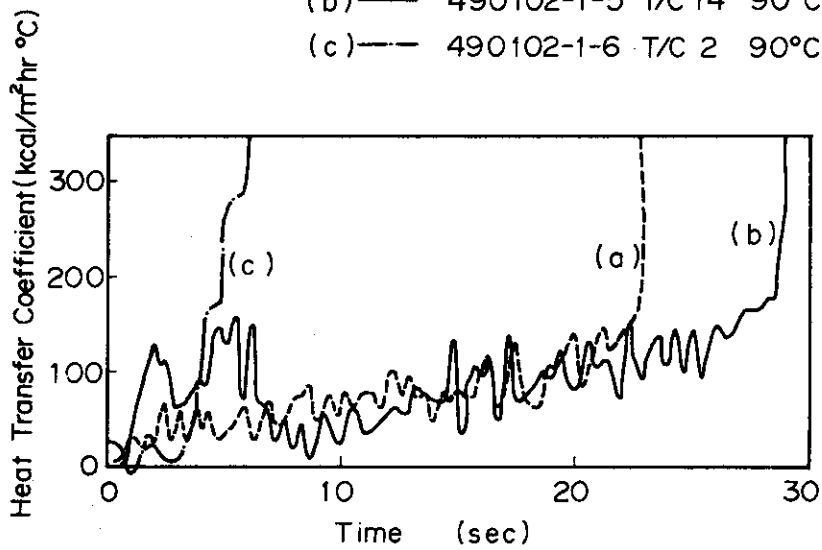


Fig. 4.5 Example of Calculated Heat Transfer Coefficient

Aタイプ 100~300Kcal/m²hr℃.

Bタイプ 50~150Kcal/m²hr℃.

(3) 冷却停滞領域の熱伝達率：50~150Kcal/m²hr℃

なお、Fig. 4.6に注入速度の熱伝達率に及ぼす影響を示す。Fig. 4.6(a)はT/C 13について、Fig. 4.6(b)はT/C 4に注目したものである。Fig. 4.7に入口サブクールの影響を示す。Fig. 4.8に発熱体発熱量の影響を示す。

4.2.2 本実験とFLECHT実験との比較

再冠水実験の初期に生ずる蒸気流による冷却期間の発熱体中央部での熱伝達率を、本実験とFLECHT実験とで比較してみた。Fig. 4.9にFLECHT実験の熱伝達率の例を示す。FLECHT実験では、熱伝達率は、I：初期の急増する期間、II：中期の漸増する期間、III：後期の再び急増する期間、を経過してクエンチに至る傾向がみられる。Fig. 4.10に本実験とFLECHT実験の中央部発熱体熱伝達率の時間変化を示す。図中の細い実線は本実験の例であり、(a)は熱電対T/C 13に(b)はT/C 14に注目したものであり、これは前節の温度応答の分類でいえば、Bタイプに属する。：印のついた太い実線はFLECHT実験のものである。主たる実験条件を下に記す。

実験番号	本実験	FLECHT実験	
	490910-8-3	0711	2322
注水速度	12 cm/sec	15 cm/sec	10 cm/sec
注入水温度	50℃	23℃	24℃
ピーク出力	1.8KW/m(一定)	4.08KW/m(減衰)	4.08KW/m(減衰)
発熱体初期温度	300℃	871℃	877℃

図より、本実験でのクエンチ点以前では、両者はほぼ等しい値を示しているが、クエンチ点近傍においては、差が生じている。これはFig. 4.9で明らかのように、本実験でクエンチに達した時刻でも、FLECHT実験においては、まだ蒸気流冷却期（前述のI期）が継続しているからである。このように、蒸気流冷却期においては、両者の熱伝達率の値はほぼ等しいが、その継続時間には大きな差が認められる。

またFLECHT実験では熱伝達率変化において、II期の継続時間がI、III期に比べて長い。本実験では、II期に相当するものは明確には見い出せない。逆に前節の本実験熱伝達率変化分類におけるAタイプ、つまり早期にクエンチし、ターンアラウンド点とクエンチ点の区別が明瞭でないものの熱伝達率変化（Fig. 3.4(a)）に相当するようなのはFLECHT実験にはない。

4.3 膜沸騰熱伝達の検討

発熱体表面に取り付けた熱電対の示す温度応答の特性、熱流束と過熱度の関係、および熱伝達率特性から、クエンチの直前ある期間それ以前とは異なる傾向を示す領域が存在していることがわかった。この領域は、膜沸騰のような熱伝達特性を示しているので、ここでは「膜沸騰熱伝達領域」と名付け、以下この領域の特徴を、温度応答・熱伝達特性・熱流束と過熱度との関係から検討する。

(1) 温度応答の特徴

Run Conditions

Symbol	U _{in}	T _{in}	E	Run No	Location
—	10cm/s	80°C	30 V	490109-1-7	T/C13
- - -	12cm/s	80°C	30 V	490109-1-6	T/C13
- · - · -	14cm/s	80°C	30 V	490109-1-5	T/C13
—	16cm/s	80°C	30 V	490109-1-4	T/C13

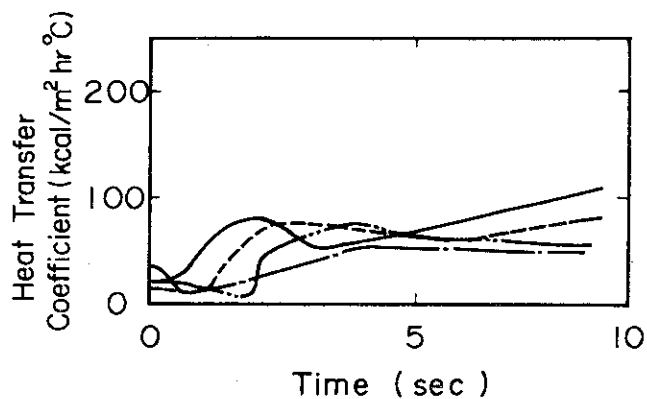


Fig.4.6(a) Effect of U_{in} on Heat Transfer Coefficient

Run Condition

Symbol	U _{in}	T _{in}	E	Run NO.	Location
—	10cm/s	80°C	30V	490109-1-7	T/C 4
- - -	12cm/s	80°C	30V	490109-1-6	T/C 4
- · - · -	14cm/s	80°C	30V	490109-1-5	T/C 4
—	16cm/s	80°C	30V	490109-1-4	T/C 4

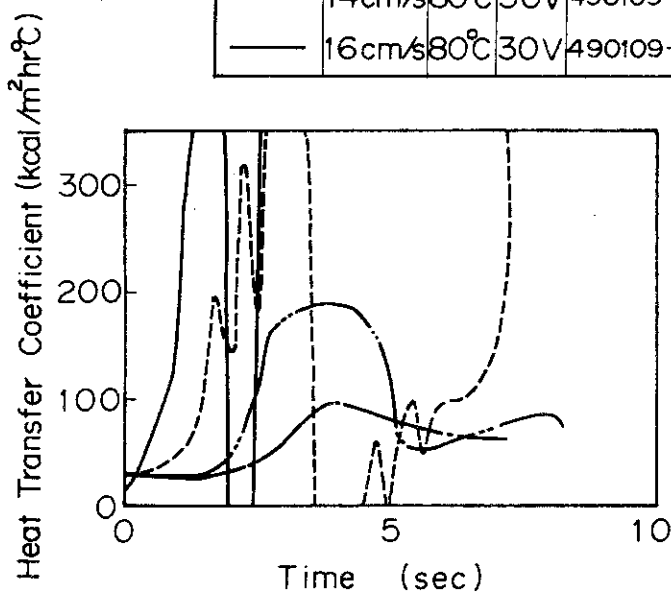


Fig.4.6(b) Effect of U_{in} on Heat Transfer Coefficient

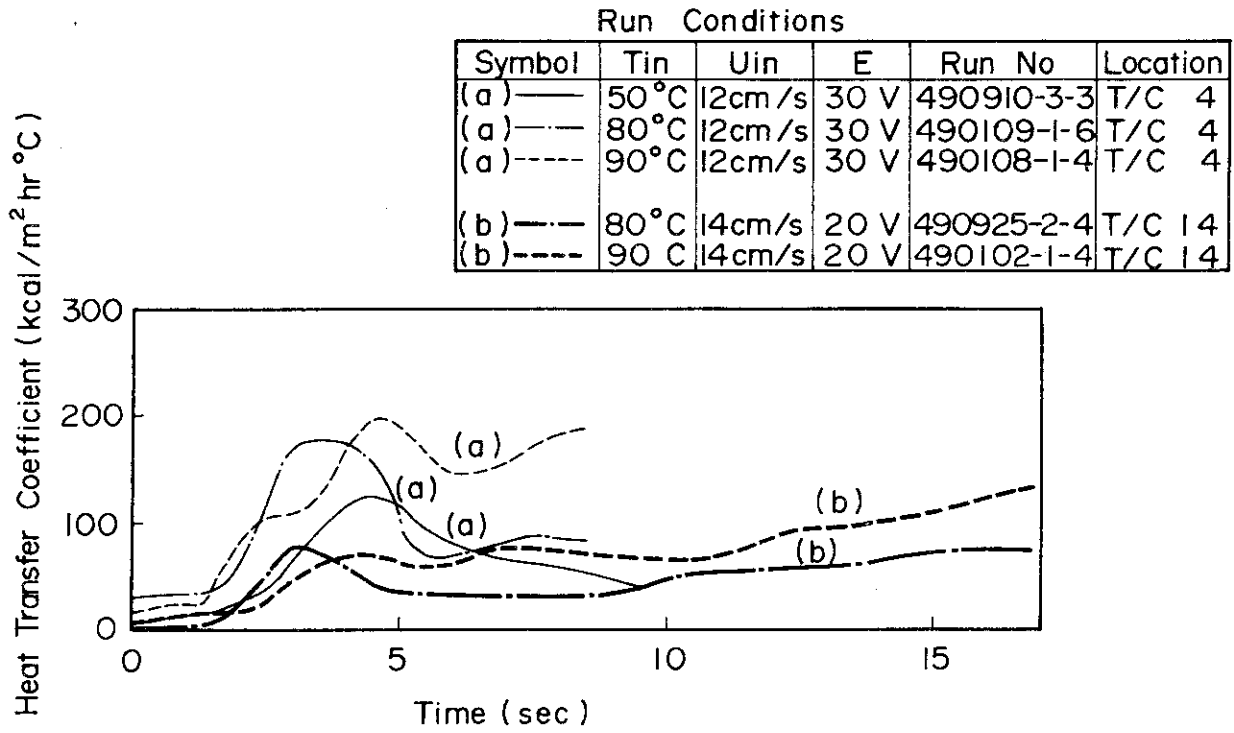


Fig. 4.7 Effect of ΔT_{sub} on Heat Transfer Coefficient

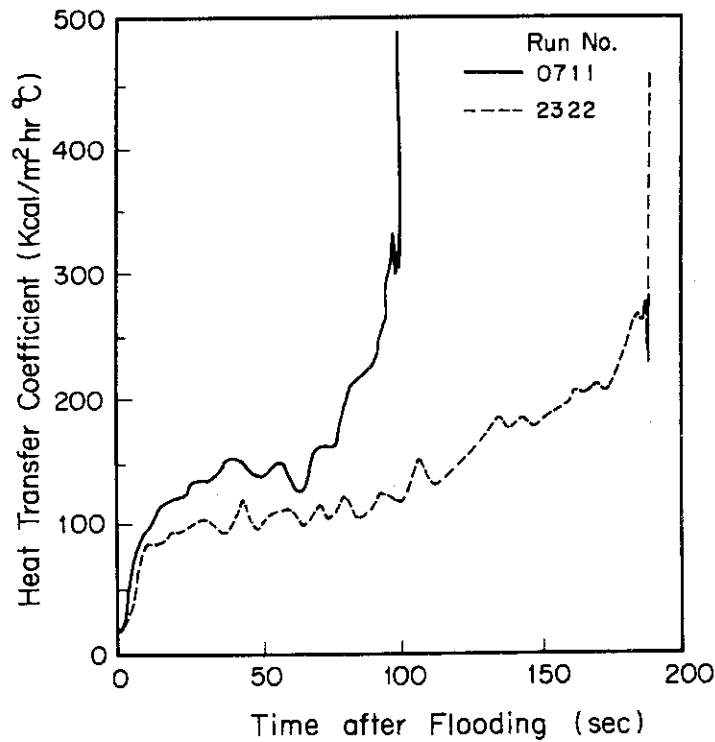


Fig. 4.9 Heat Transfer Coefficients Referred from FLECHT's Data

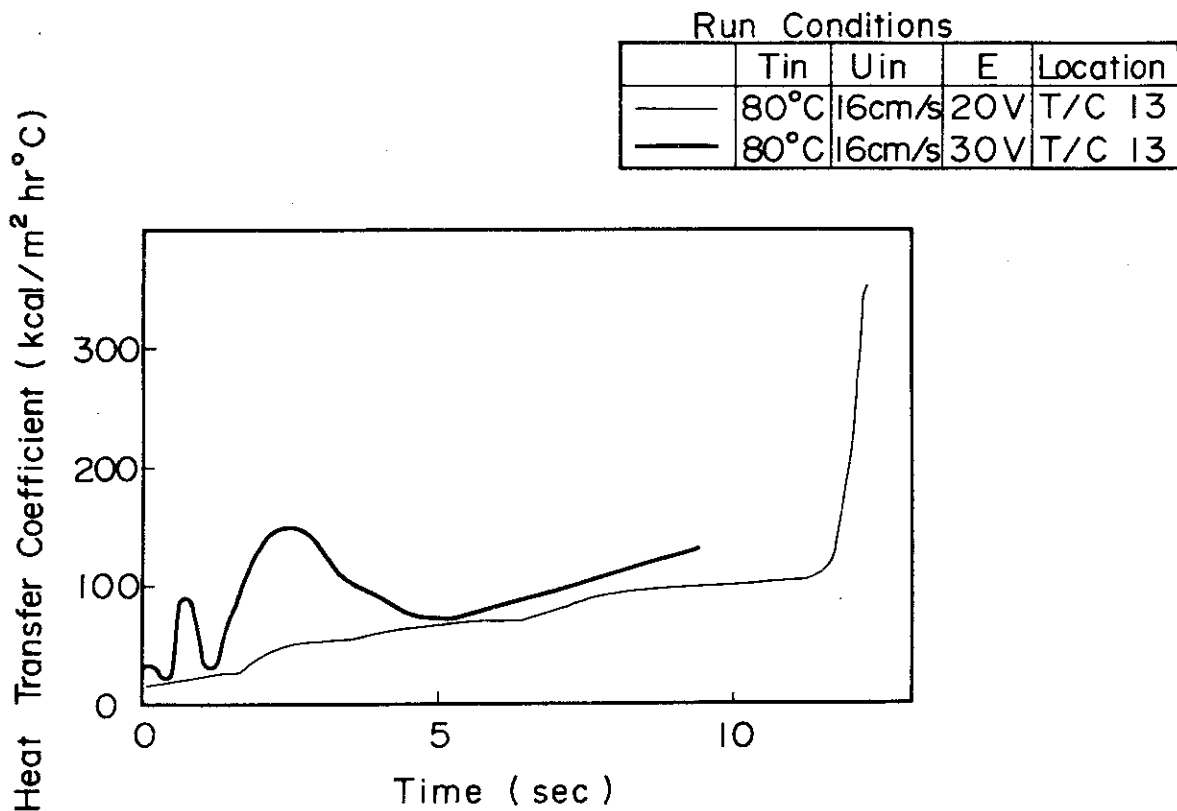


Fig.4.8(a) Effect of Supplied Voltage on Heat Transfer Coefficient

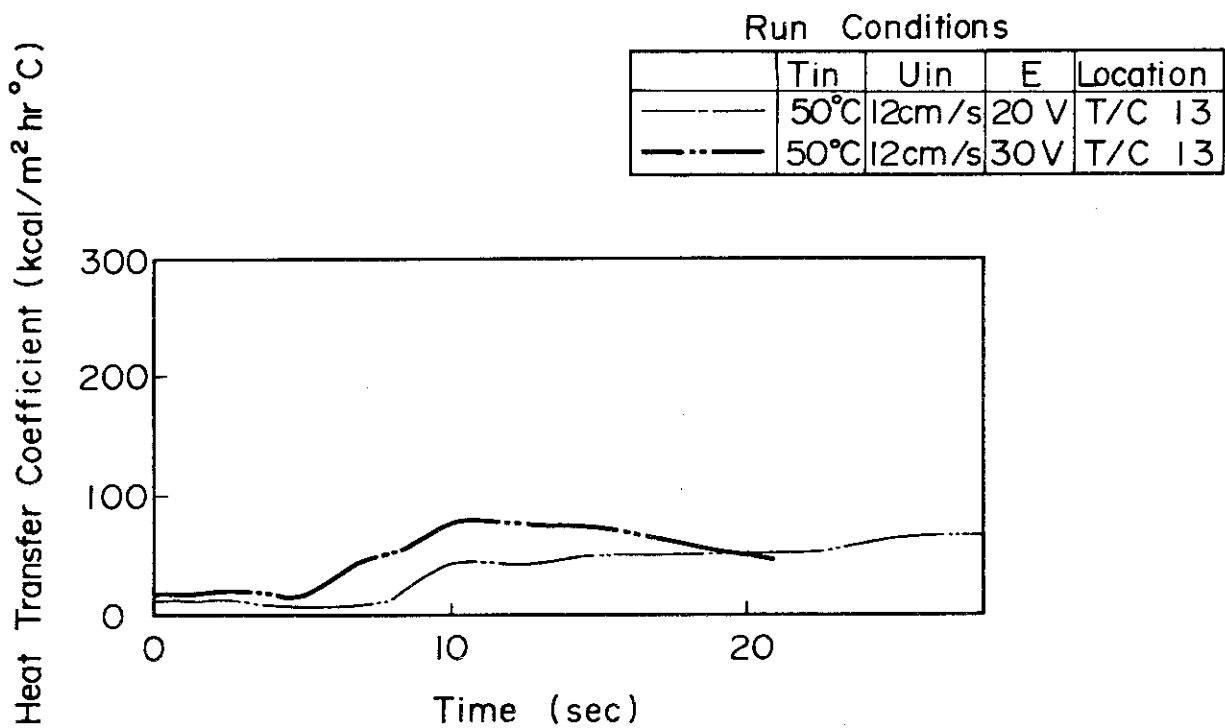


Fig.4.8(b) Effect of Supplied Voltage on Heat Transfer Coefficient

490910-8-3 T/C 13

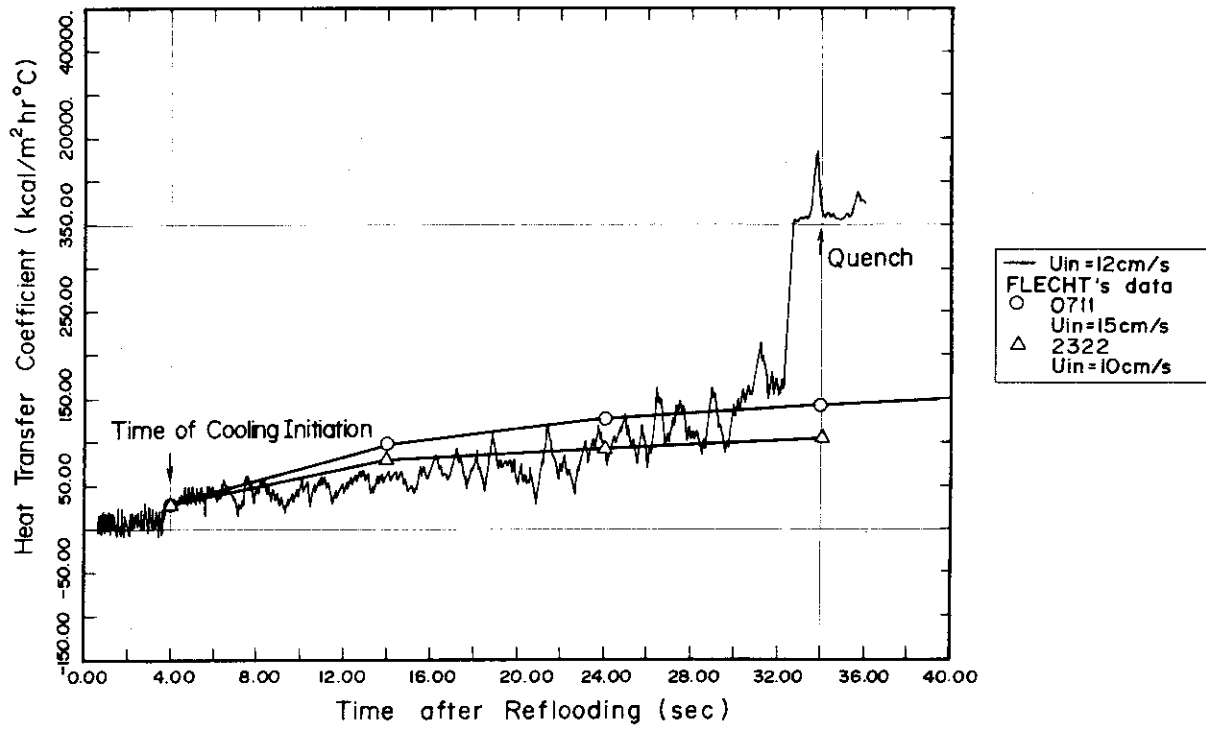


Fig.4.10(a) Comparison between FLECHT's Data and Present Data

490910-8-3 T/C 14

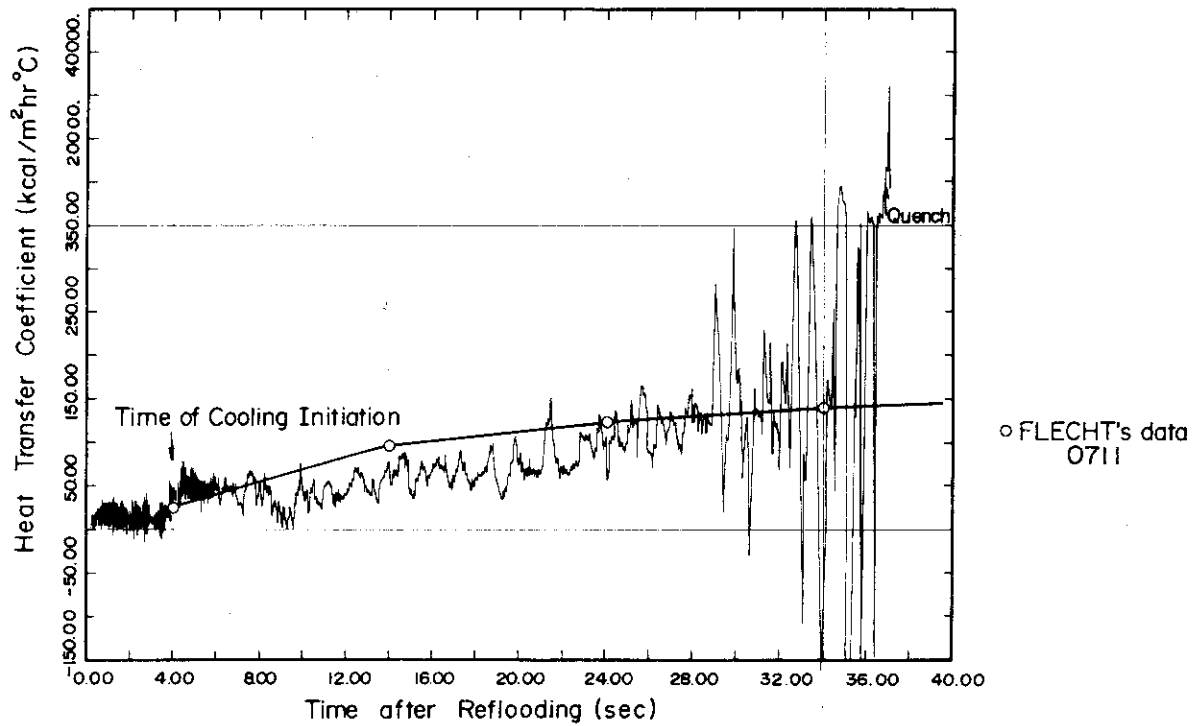


Fig.4.10(b) Comparison between FLECHT's Data and Present Data

発熱体表面に取付けた熱電対の温度応答は、大別して次の二つのタイプに分けられる。(Fig. 4.11)

- Aタイプ 熱電対取付位置にはまだ冷却水の仮想水位が到達していない時刻に、急激に温度降下をしているもの。Fig. 4.11中のT/C 3, 4
- Bタイプ 発熱体中央部に取付けてある特定の熱電対に見受けられるもので、冷却水仮想水位が発熱体中央部に到達したと考えられる時刻以後に急激に温度降下しているもの。T/C 13, 14

A, Bいずれのタイプに於いても、発熱体がクエンチする直前に、ある時間比較的急激に温度降下している領域がある。Aタイプでは、この現象が仮想水位到達以前に起ることが特徴的であり、飛散液滴によって膜沸騰形態が出現していると考えられる。Aタイプは本実験においては発熱体高さ位置によらず一般に見受けられるが、FLECHT実験には見受けられない。

(2) 熱伝達率の特徴

A, B両タイプの熱伝達率の計算結果の例をFig. 4.12, 4.13に示す。横軸は注目する位置でのクエンチ前の時間を示し、縦軸は熱伝達率を示す。 h_t は全熱伝達率を示し、 h_c は輻射熱伝達率、 h_r を h_t から差引いた値である。ここで h_c の計算は次式による。

$$h_t = h_c (h_c / h_t)^{1/4} + h_r$$

$$h_r = 4.88 \{ (T_w / 100)^4 - (T_s / 100)^4 \} / (T_w - T_s) \text{ [kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}]$$

T_w , T_s は各々発熱体表面温度、飽和温度(°K)である。

A, Bいずれの場合も、クエンチ直前のある時刻までは熱伝達率は100 kcal/m²hr °C内外で小さく、クエンチ近傍では200 kcal/m²hr °C以上に急激に大きくなっている。

このように、クエンチ直前のある期間、温度応答は比較的急激な温度降下を示し、かつ熱伝達率は大きな値を示す。この期間は、発熱体に水が安定に接触しうる温度よりも高く、かつ熱伝達率もかなり高い値を示すことから、膜沸騰領域と考えられる。

(3) 熱流束 \dot{q} と過熱度 ΔT_{sat} との関係の特徴

本実験での膜沸騰の状況を、FLECHT実験結果と比較するために、Fig. 4.14に熱流束 \dot{q} と過熱度 ΔT_{sat} との関係として、その結果が示してある。図で縦軸は \dot{q} を示し、横軸は ΔT_{sat} を示す。なおここでは、Bタイプのみを取上げている。なお図中の矢印はクエンチがその温度で生じており急激に熱流束 \dot{q} が増大していることを示し、膜沸騰の終端を示している。

その結果、特徴として次の点があげられる。

- 同じ ΔT_{sat} に対し、本実験の方が数倍の \dot{q} を示している。
- 膜沸騰が継続している時の ΔT_{sat} の変化幅は、本実験の場合の方が一般に小さい。
- \dot{q} と ΔT_{sat} との間に、FLECHT testでは $\dot{q} \propto \Delta T_{sat}$ の関係が強く見受けられるのに対し、本実験では、 $\dot{q} \propto \Delta T_{sat}^m$ ($m > 1$)の関係にある。

(4) 発熱体印加電圧および注入速度の影響

Fig. 4.12, 4.13等に示した傾向は、発熱体印加電圧が全て20Vの場合であり、30Vの場合には本実験の発熱体の上限温度600°Cに到達して実験を打切っているためBタイプの特徴を示す熱電対はない。そのため、印加電圧の影響を見ることができなかった。

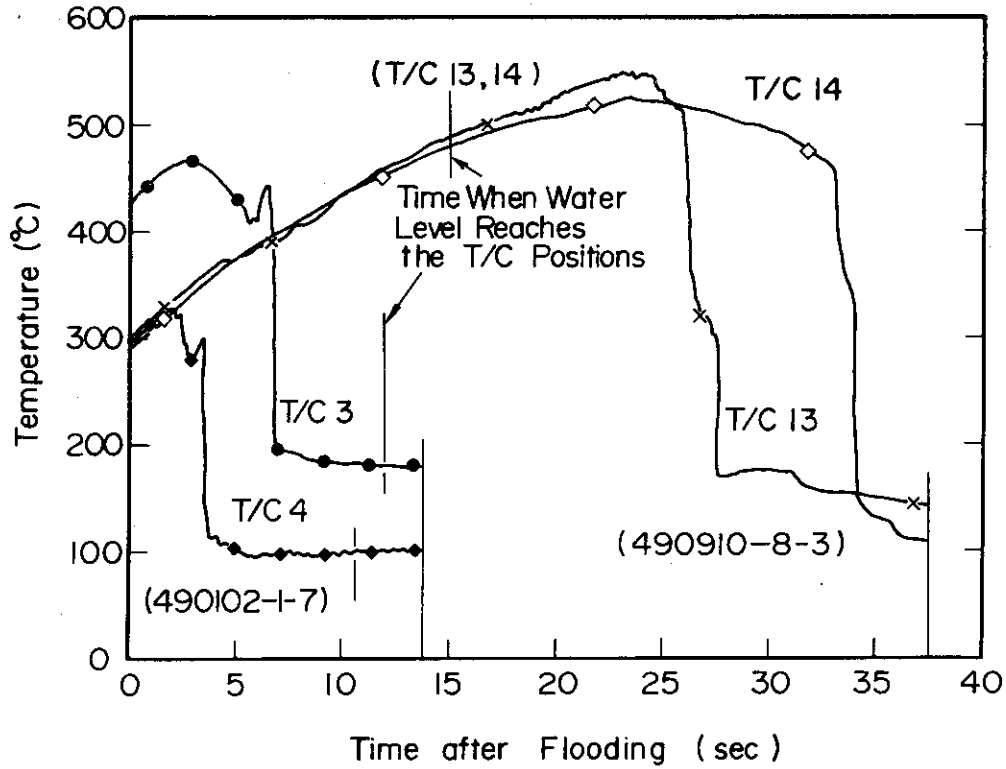


Fig. 4.11 Two Typical Thermocouple Responses

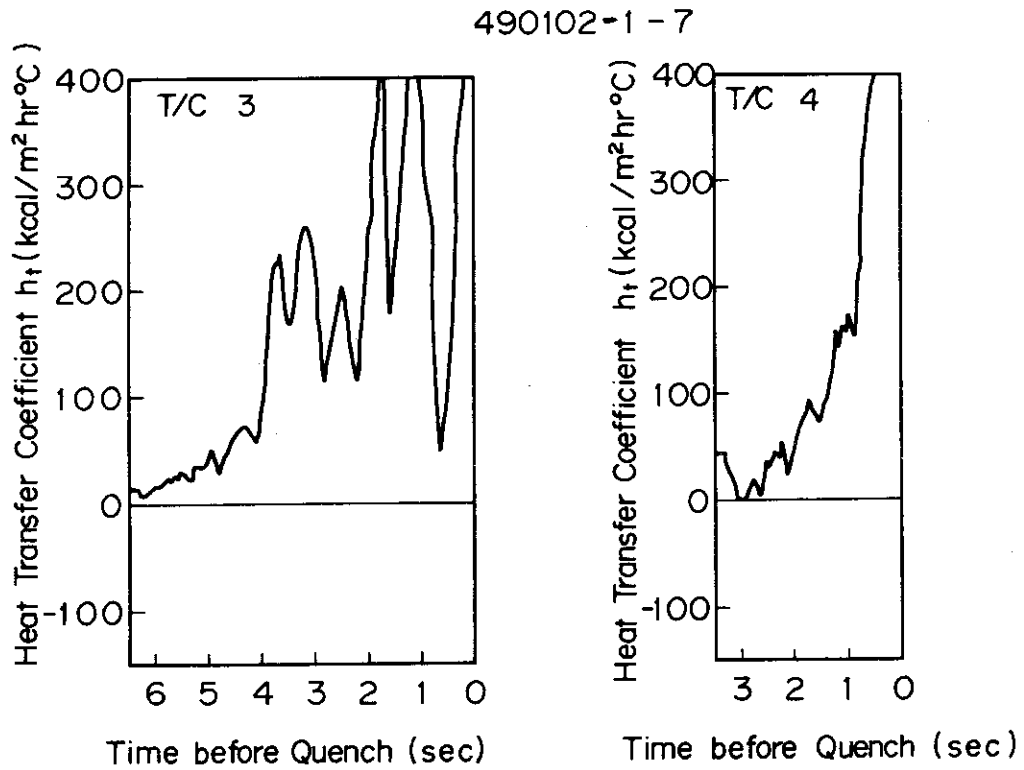


Fig. 4.12 Behavior of Heat Transfer Coefficient in Third Accelerated Cooling Region

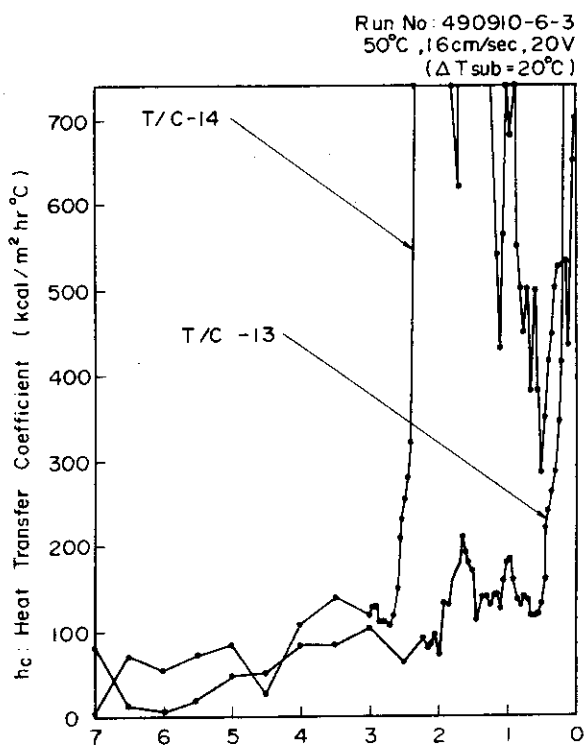


Fig.4.13(a) Behavior of Heat Transfer Coefficient

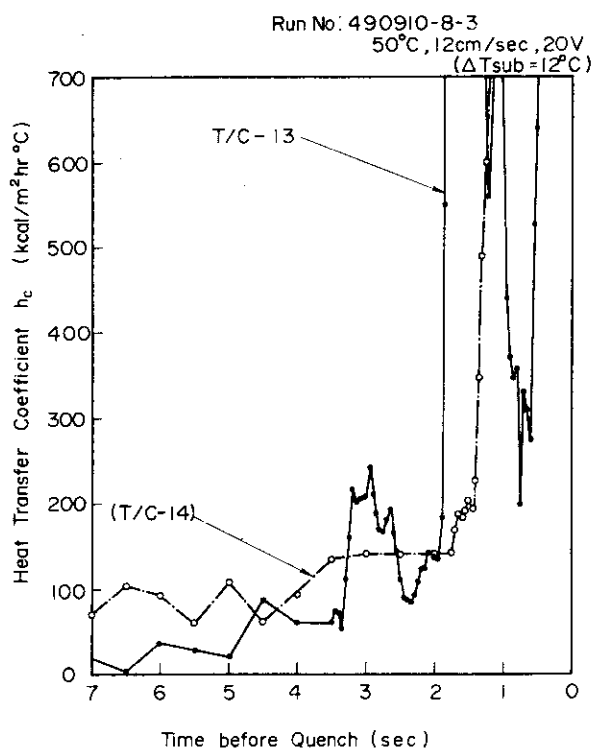


Fig.4.13(b) Behavior of Heat Transfer Coefficient

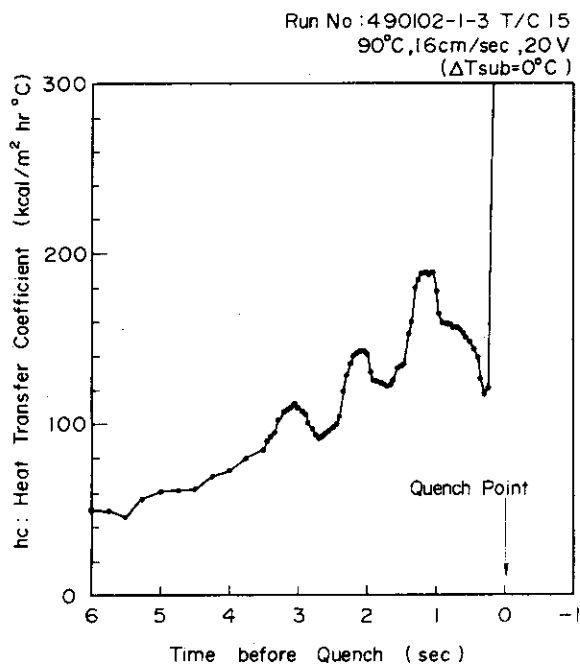


Fig.4.13(c) Behavior of Heat Transfer Coefficient in Third Accelerated Cooling Region

また注入速度の影響については、12 cm/sec から16 cm/sec の範囲では、特に際立った差異は見受けられない。Fig. 4.15には発熱体の発熱量が全て冷却水の温度上昇に費やされたとした時の発熱体下部から中央部までの区間に水の昇温する値を算出した結果が示してある。20 V, 流速16 cm/sec, 50℃の水を供給した時には、水温上昇は29℃となり $4T_{SUB} = 21.0℃$ となる。本実験ではこの条件が最大のサブクール度を示す条件であり、サブクール度が0と20℃とを比較するとき、その差異が生じてとも良いように思われるが少くとも本実験では判然とした差は出ていない。

(5) 膜沸騰部の蒸気膜厚さ

別の視点から膜沸騰部分の状況を調べるために、Bタイプの膜沸騰部の蒸気膜の厚さを試みに算出して、その傾向を調べた。蒸気膜厚さ δ_v の算出には一つの試みとして

$$\delta_v = k_v / h_c$$

を用いた。ここで、 k_v は蒸気の熱伝達率であり、発熱体表面温度 T_W^W と飽和温度 T_S との算術平均で評価する。 h_c は全熱伝達率 h_t から、輻射熱伝達率 h_r を差引いた値である。その結果がFig. 4.16(a), (b), (c)に示してある。図の縦軸は蒸気膜厚さ δ_v (m)であり、横軸はクエンチ前の時間(sec)である。

Fig. 4.15(a), (b), (c)から以下に示すような特徴があげられる。

(i) 蒸気膜厚さが、 5×10^{-4} m以上になると蒸気膜厚さが急激に増大するか又は、大幅に変動している。

(ii) 上記の特徴が現われるのは、クエンチ前3~4秒の時である。

(iii) クエンチ前3~4秒からクエンチまでは蒸気膜の厚さが急激に減少し、クエンチ近傍では急激に薄くなっていく。

(6) 膜沸騰部分についてのまとめ

膜沸騰熱伝達領域における熱伝達率(Fig. 4.13, 4.14)をFLECHT実験結果と比較すると次の点での相異が見受けられる。

(i) FLECHT実験では、公表されているデータとしては、発熱体中央部の熱電対からのみの熱伝達率であるが、Fig. 4.12に示したT/C4のごとく、仮想水位が到達する以前に膜沸騰が生じているケースは見当らない。

(ii) FLECHT実験では、かなりの時間(言い換えると、長手方向にかなりの長さ)膜沸騰部が存在し、長さにして約30 cm⁽⁵⁾もの区間膜沸騰が継続していると考えられるのに対し、本実験ではせいぜい4~5 cm程度と短い。ただ本実験の場合の局所のサブクール度は一般に小さい傾向にある。

(iii) 従って、本実験の場合の膜沸騰熱伝達は、FLECHT実験に較べて、短時間かつ短い長さしか持続せず、その期間の熱伝達率はFLECHT実験の膜沸騰中の熱伝達率と比較して非常に大きい値を示している。ただFLECHT実験に於いてもクエンチ上方5 cm程度の区間では非常に大きな値となっているので、本実験との比較の場合、基準のとり方が重要な問題となる。

(iv) FLECHT実験では局所のサブクール度が、その部分の熱伝達率の値に大きな影響を与えているのに対し、本実験ではサブクール度の影響については、はっきりとした傾向は見いだされない。

4.4 クエンチ温度およびクエンチ時間の検討

実験により得られた発熱体表面温度応答よりクエンチ点を求め、その温度および時間について検討

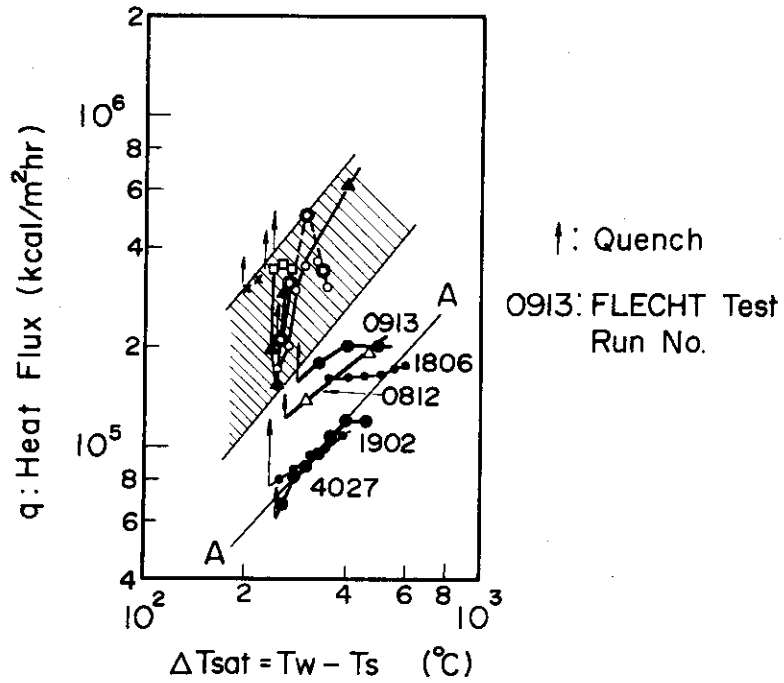


Fig. 4.14 Characteristics of q vs ΔT_{sat} (Midplane)

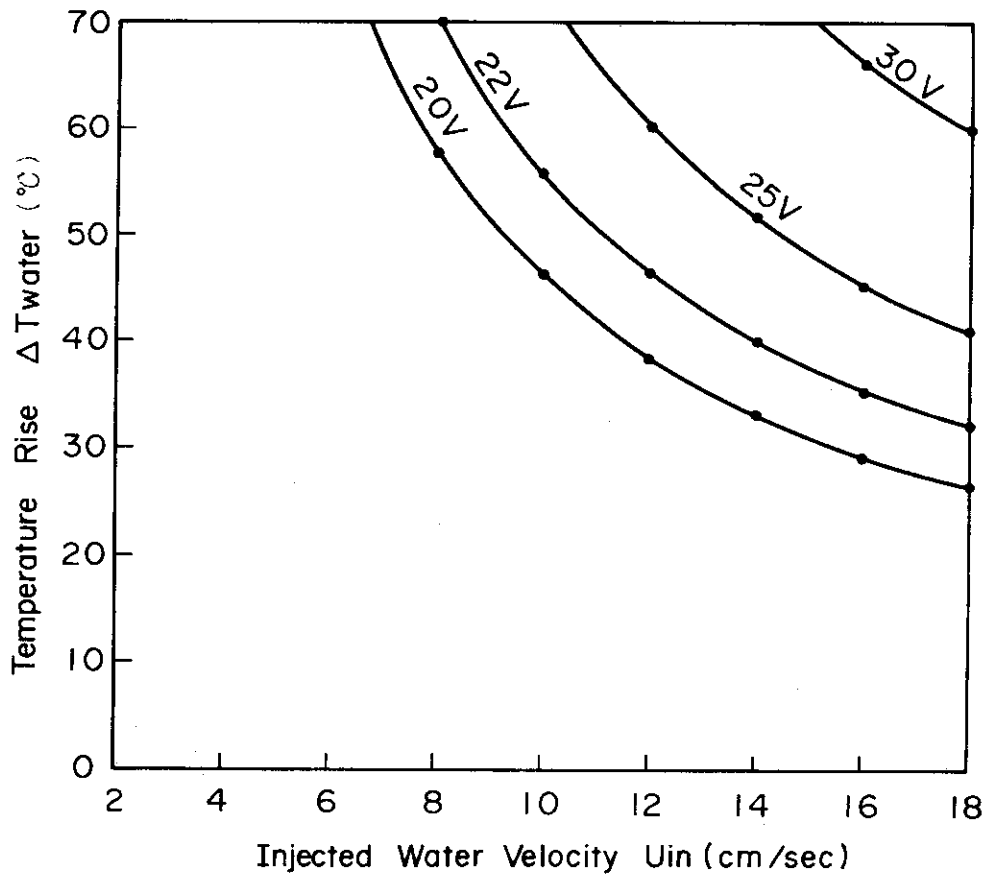


Fig. 4.15 Temperature Rise of Coolant (Water) at the Midplane of the Rod

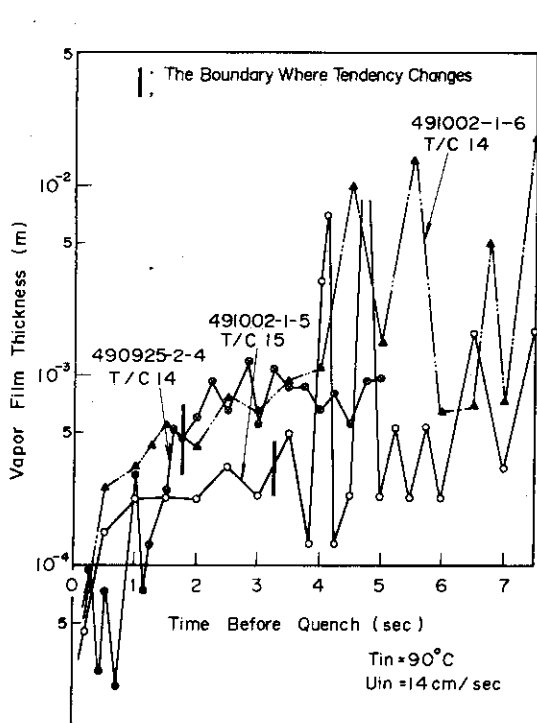


Fig. 4.16(a) Calculated Vapor Film Thickness

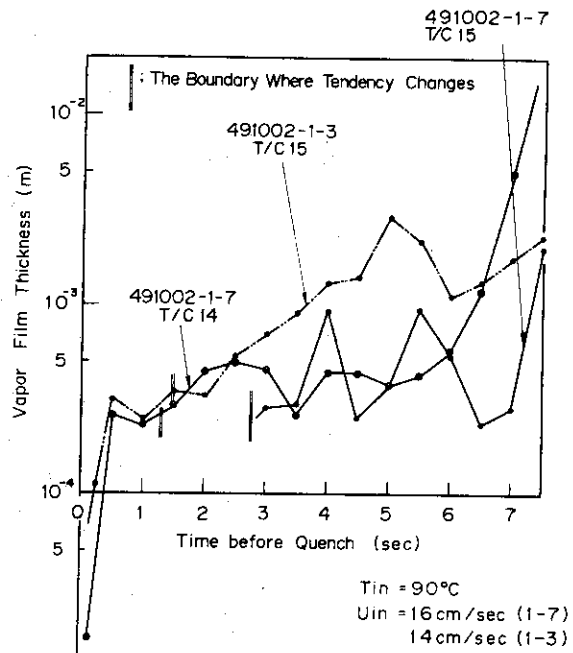


Fig. 4.16(b) Calculated Vapor Film Thickness

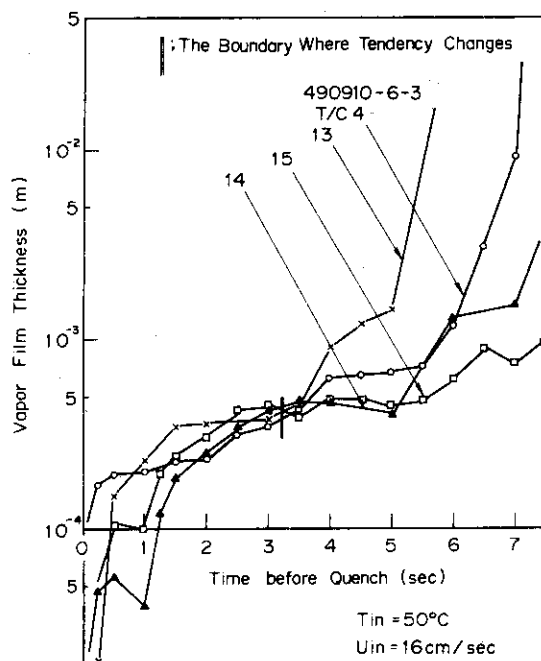


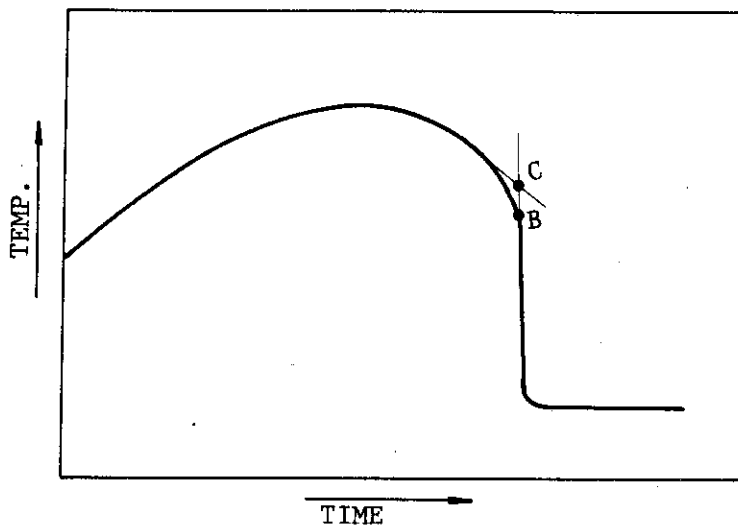
Fig. 4.16(c) Calculated Vapor Film Thickness

を行ったので以下に述べる。

クエンチ点の定義には

- A. 熱流束極大値点
- B. 温度急降下開始点
- C. 温度急降下部接線の交点

等が考えられる。下の発熱体温度応答モデル図に、上記B、C点を示す。このように、クエンチ点は、定義のやり方により、異なった位置になるが、クエンチ温度および時間については、その差は小さく、ここではC点をクエンチ点とした。



Model of Rod Surface Temperature Response

シリーズ1実験での発熱体各部でのクエンチ温度とクエンチ時間との関係をFig. 4.17に示す。

縦軸はクエンチ温度、横軸は無次元化したクエンチ時間である。

ただし、無次元時間は、クエンチ時間と有効発熱部仮想冠水時間の比である。

$$\tau = \frac{\text{クエンチ時間}}{\text{有効発熱部仮想冠水時間}}$$

$$= \frac{t_q}{L/u_{in}}$$

u_{in} : 冷却水注入速度

t_q : クエンチ時間

L : 発熱体有効発熱長

プロットした点に付記した数字は熱電対番号であり、X軸下部の矢印は、仮想液位がその熱電対位置に到達する τ を示す。

図は注入速度をパラメーターとして4図にわかれており、それぞれ(a)16 cm/sec, (b)14 cm/sec (c)12 cm/sec, (d)10 cm/secである。本図よりクエンチ温度、時間は次のような傾向がみられる。

○ 中央部以外の位置のクエンチ

- (1) $\tau \leq 0.2$ 程度の時間にクエンチしている。
- (2) クエンチ温度はT/C6を除いて、200~300℃の間にある。

(3) クエンチ温度は τ の増加とともに上昇する傾向にある。

○ 中央部の位置のクエンチ

(1) クエンチ時間は $0.1 < \tau < 1.2$ の間にある。

(2) クエンチ温度は $250 \sim 500$ ℃の範囲にある。

T/C 6の位置では、早期に低い温度でクエンチしている。これは、T/C 6が発熱体下部より約30 cmの位置に取付けられており、実験前の下部プレナム水位に近いため、初期温度も低く、また注水後すぐに水で包まれるためである。

図より一般的にクエンチ温度および τ は、注入速度、発熱体出力、冷却水温度等の実験条件には、あまり影響されないことがわかる。Fig. 4.18~20に、発熱体各部のクエンチ時間に及ぼす、上記パラメータの影響を示す。これらの図からも同様にクエンチ時間は、実験条件には影響されないことがわかる。

Fig. 18~20において、実線は仮想液位を示す。実線の左側領域は、仮想液位の到達前にクエンチすることを示しており、中央部の一部を除いては、高さ位置の違いにもかかわらず、この領域にある。またそれらはほとんど同時にクエンチしていることがわかる。この傾向を示す場合の温度温答は3章に示すAタイプに属し、その時刻に流路全長にわたり、発熱体表面の伝熱量が急激に増大したことを示す。発熱体の中央部以外は中央部と比較して、発熱量は大きく、出力は小さいために、その温度上昇は小さい。発熱体下部でボイドが発生し、蒸気流中に液滴が分散された時、まだ比較的温度の低い中央部以外の位置では、その液滴がすぐに付着し、熱伝達が良くなり、クエンチしたものと思われる。

Fig. 3.1に示す温度応答で明らかのように、このAタイプのクエンチ点は、その位置における温度最高点と一致している。このことによっても、上記は説明される。

Fig. 4.18~20において、破線の右領域、仮想液位よりおくれでクエンチするものについては、シリーズ1実験ではデータが少なく、今後の実験によるデータの蓄積を待って検討を行う。Fig. 4.21に軸方向中央部のクエンチ時間を示す。横軸は、図右側に示す温度測定位置を表わし、縦軸は注水開始からクエンチに至るまでの時間である。T/C 10のデータは少ないが、同じ高さ位置でもそのクエンチ時間は、場所により異なっている。その傾向は、T/C 13, 14でのクエンチ時間は大きく、T/C 4では小さい。この原因としては、流路内の流れの不均一性や、発熱体表面に付着している熱電対リード線の影響等が考えられる。

この中央部でのクエンチ時間はFLECHT実験の結果¹⁾では、実験条件により異なるが、 $50 \sim 200$ secの間にあり、本実験では40 sec以下である。つまり、FLECHTよりも本実験ではクエンチが早く生じている。

Fig. 4.22に各位置におけるクエンチ温度を・印で示し、比較のためにFLECHT実験での結果⁵⁾を斜線領域で示す。FLECHT実験では、クエンチ温度は中央部まで漸増し、それより高い位置では、ほぼ一定であるが本実験では、中央部まではFLECHTの傾向と似ているが、高い位置ではまたクエンチ温度は低くなっている。本実験では、中央部以外はほとんど同時にクエンチしており、その温度は、その位置における最高温度にほぼ等しくなっており、そのことによりクエンチ温度の傾向は、発熱体の発熱分布と同様に、高さ位置では小型となっている。

この様に、本実験におけるクエンチ時間、クエンチ温度に関する特徴は、次のとおりである。

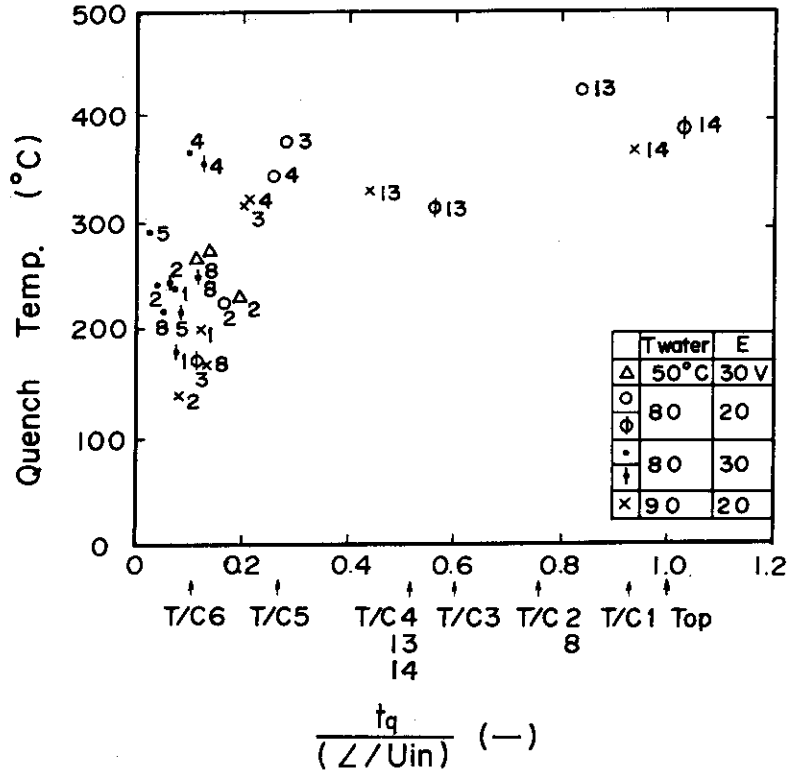


Fig.4.17(a) Quench Temperature U_{in}=16 cm/sec

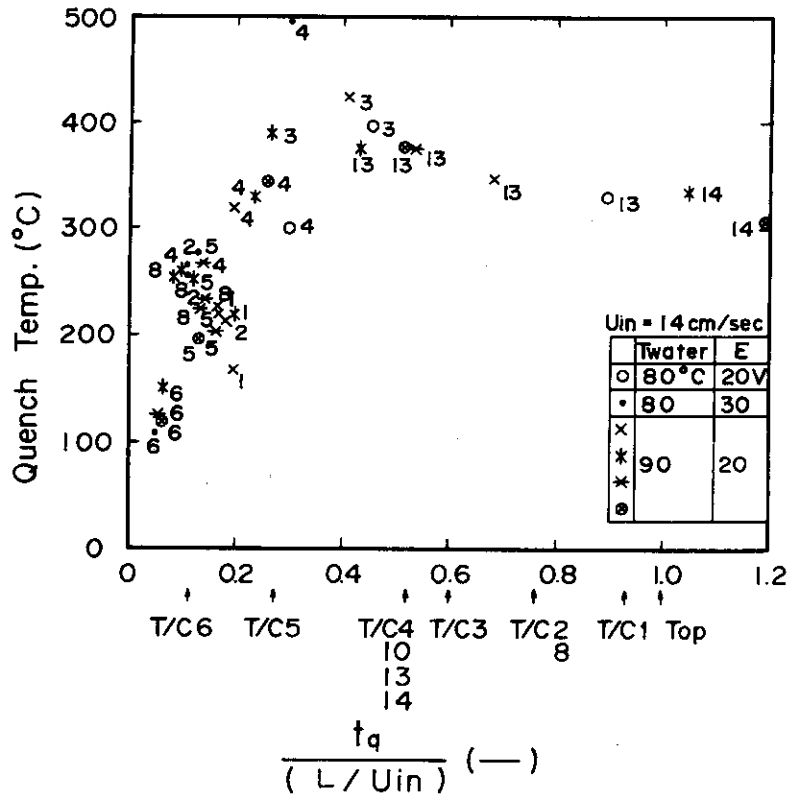


Fig.4.17(b) Quench Temperature U_{in}=14 cm/sec

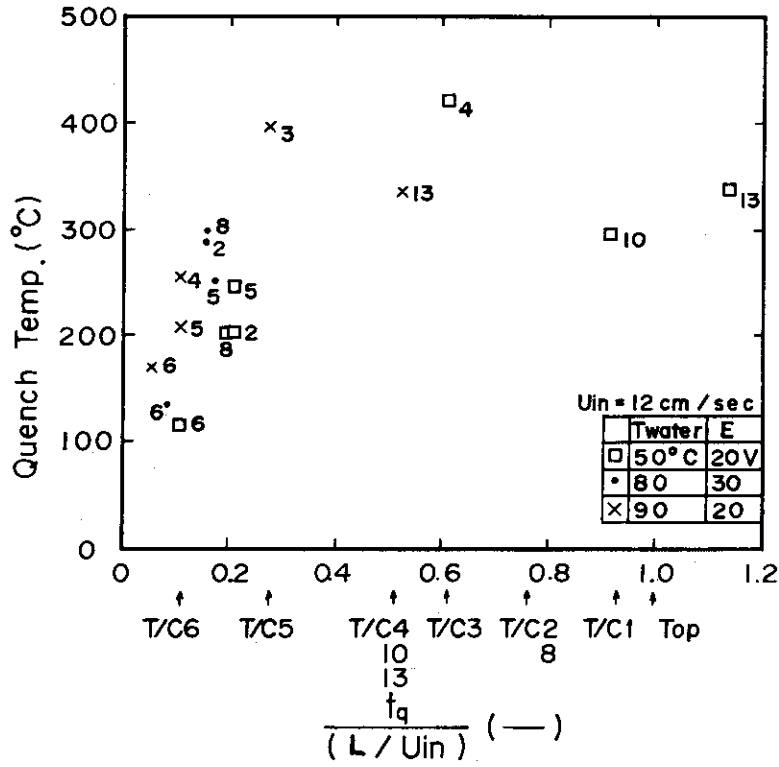


Fig.4.17(c) Quench Temperature Uin=12 cm/sec

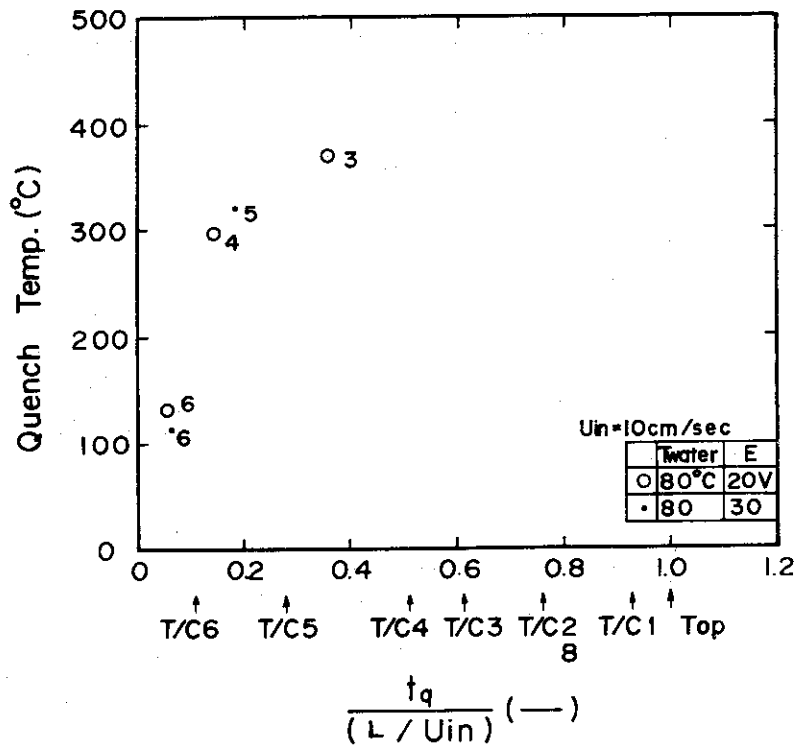


Fig.4.17(d) Quench Temperature Uin=10 cm/sec

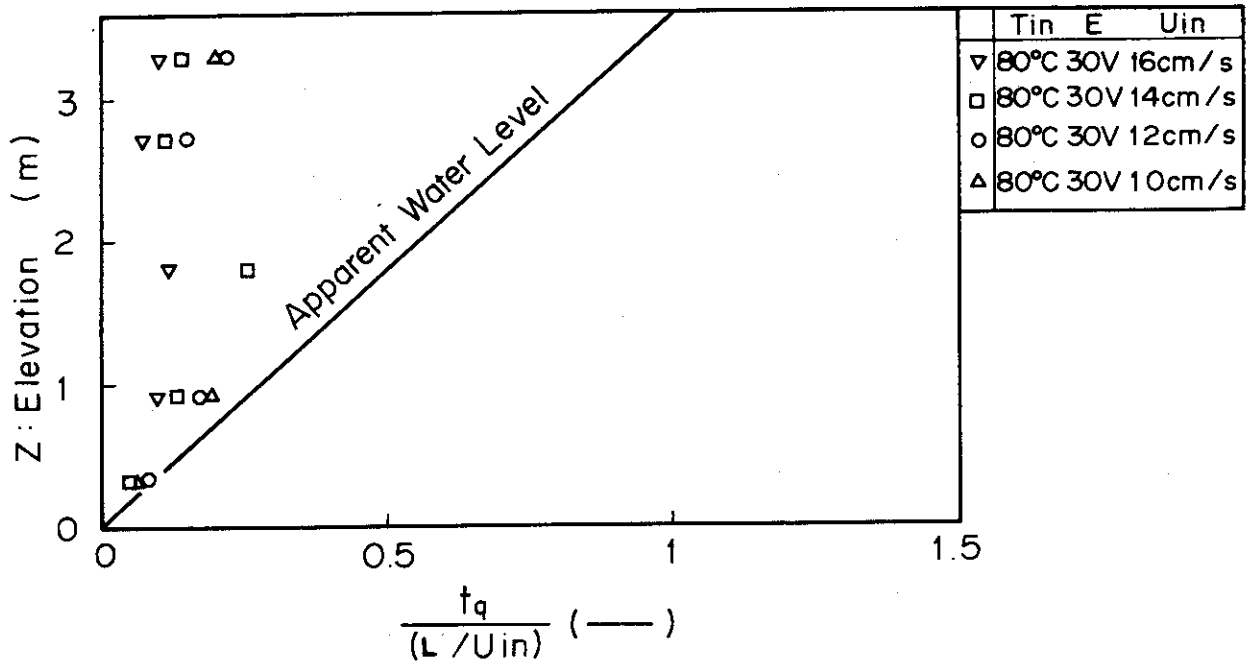


Fig.4.18(a) Effect of Injected Water Velocity on Quench Time

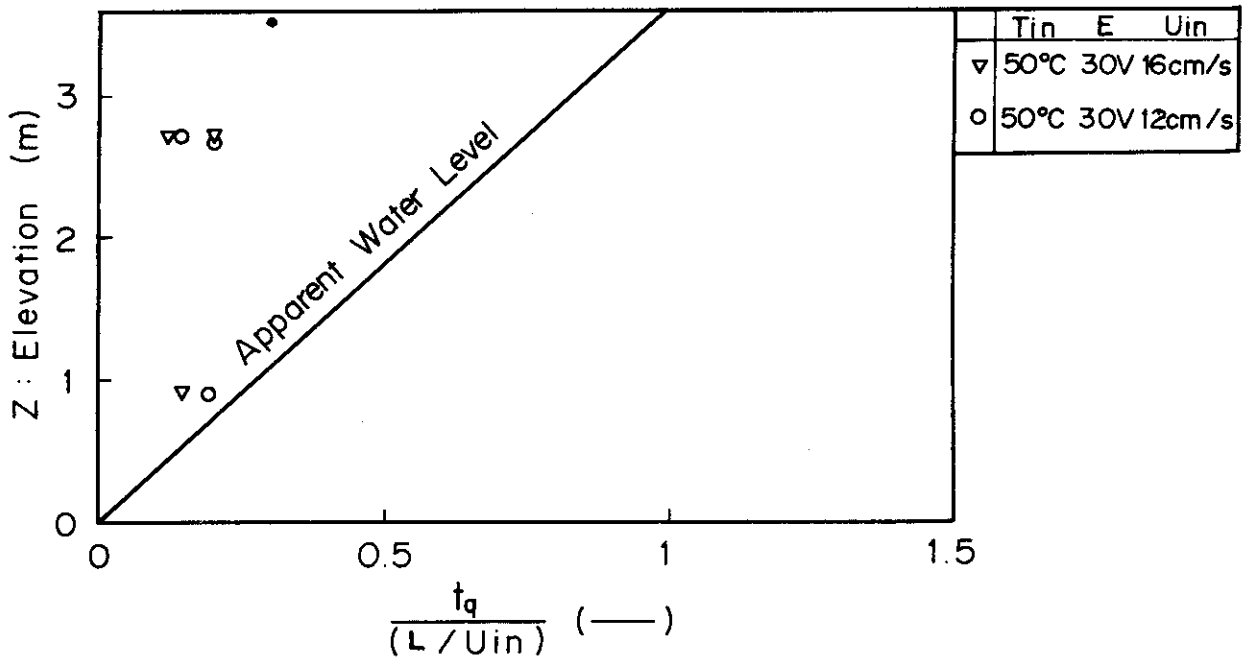


Fig.4.18(b) Effect of Injected Water Velocity on Quench Time

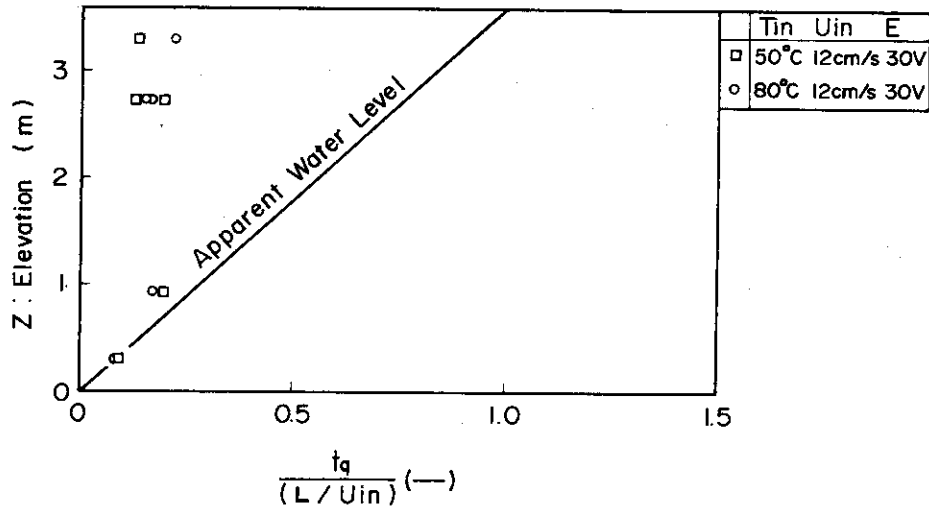


Fig.4.19(a) Effect of Inlet Subcooling on Quench Time

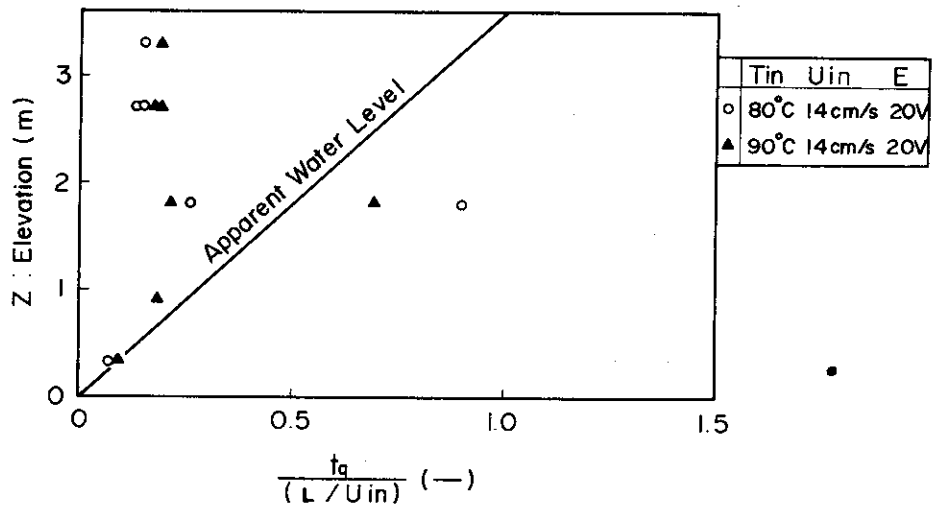


Fig.4.19(b) Effect of Inlet Subcooling on Quench Time

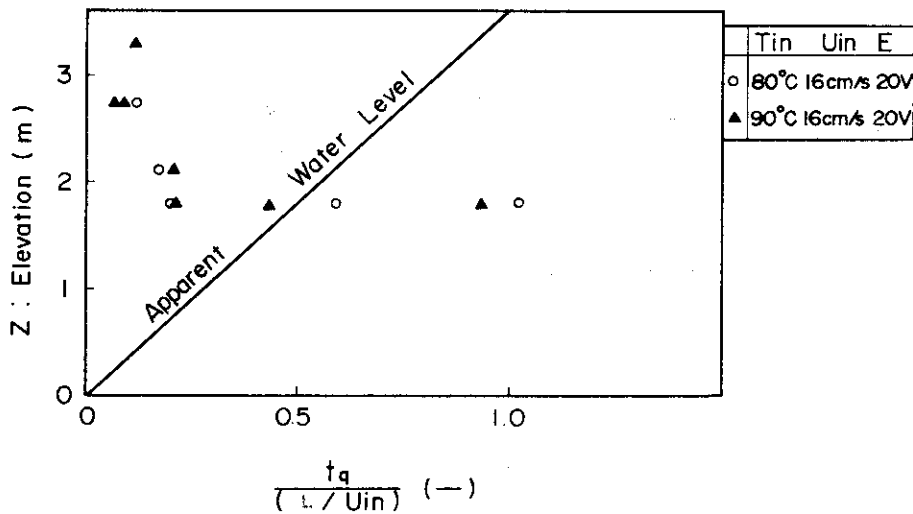


Fig.4.19(c) Effect of Inlet Subcooling on Quench Time

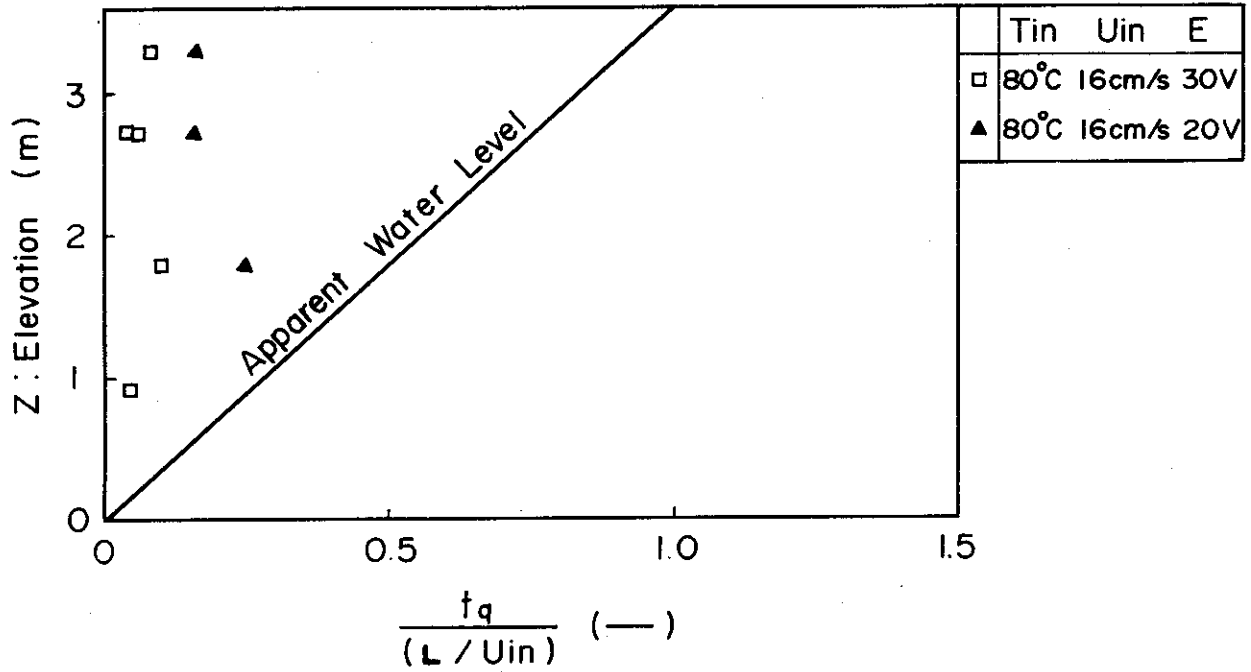


Fig.4.20(a) Effect of Supplied Power on Quench Time

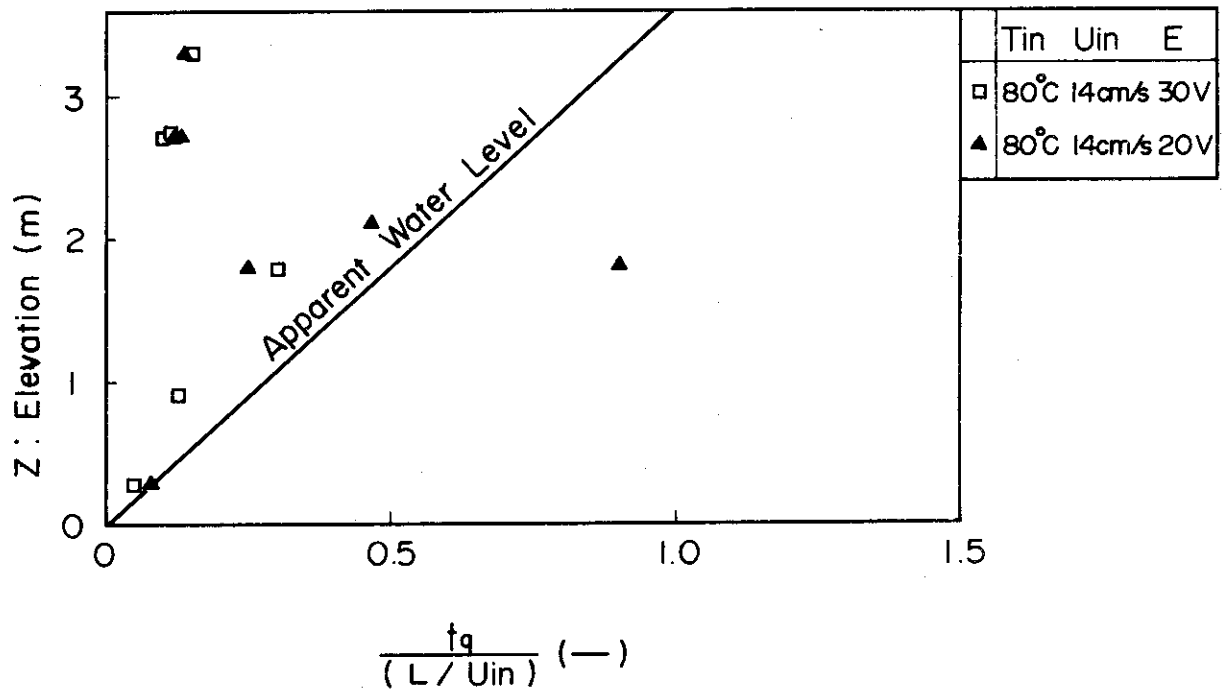


Fig.4.20(b) Effect of Supplied Power on Quench Time

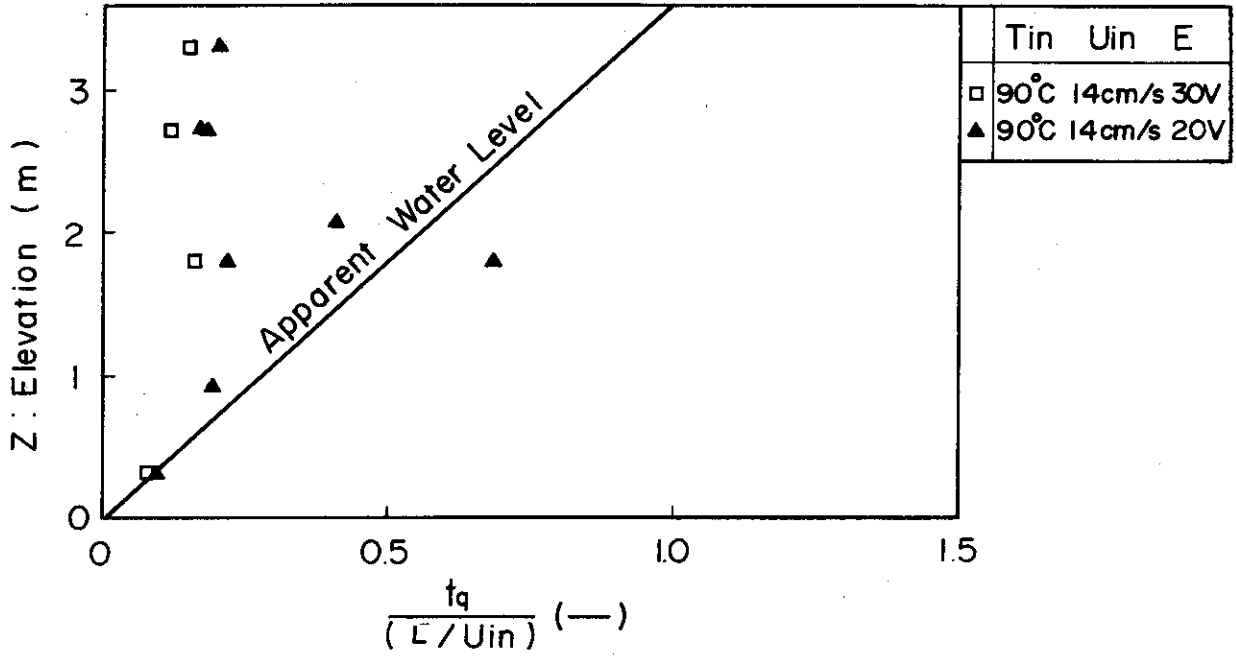


Fig.4.20(c) Effect of Supplied Power on Quench Time

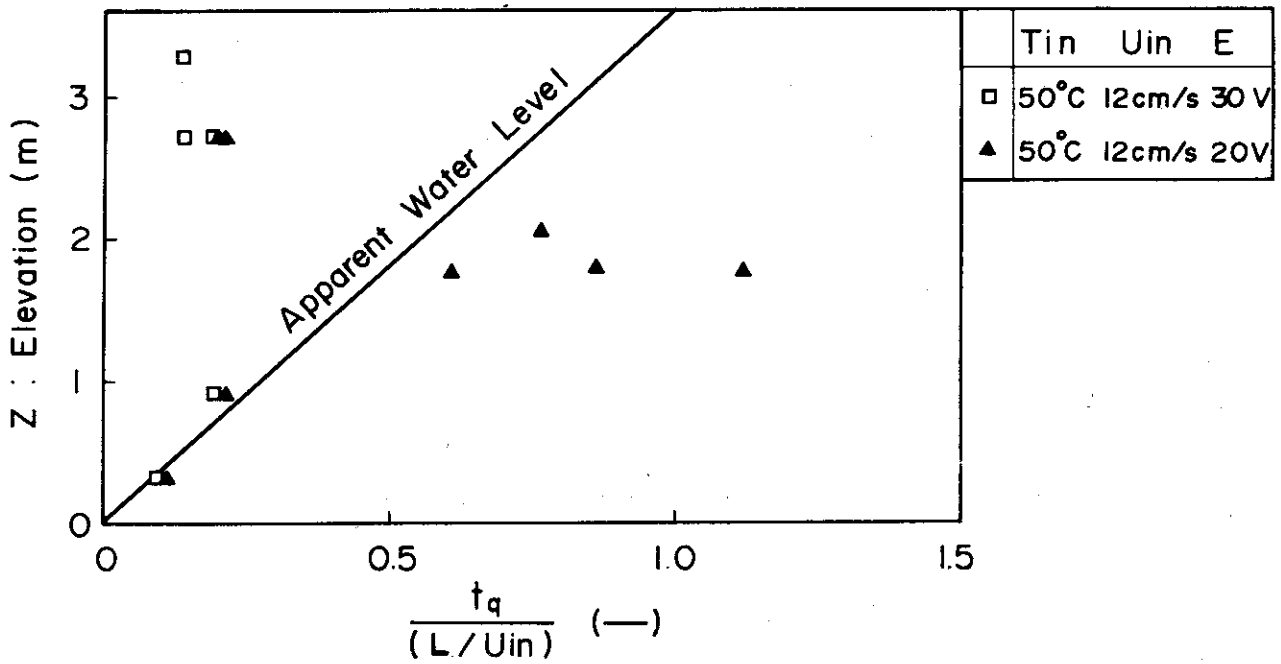


Fig.4.20(d) Effect of Supplied Power on Quench Time

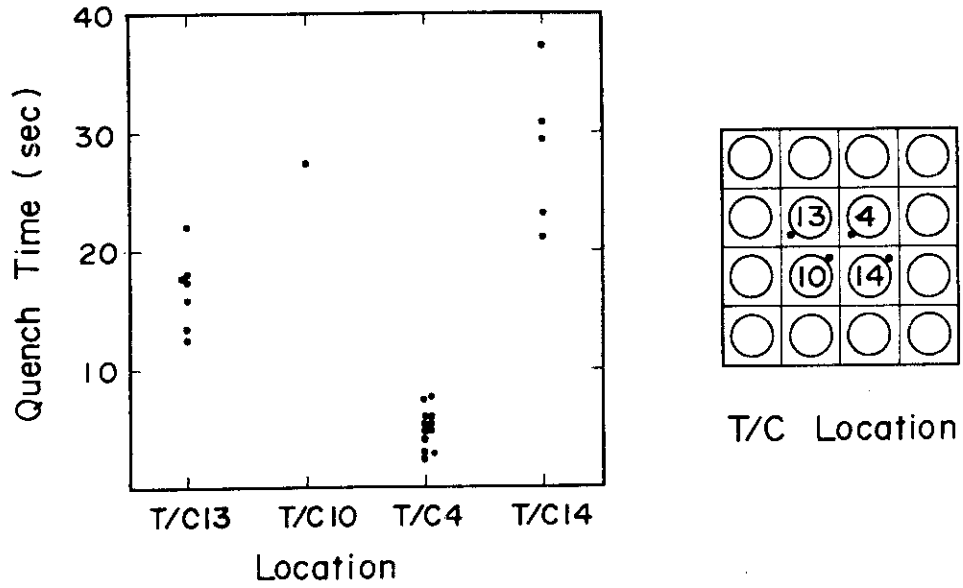


Fig. 4.21 Characteristics of Quench Time at Midplane

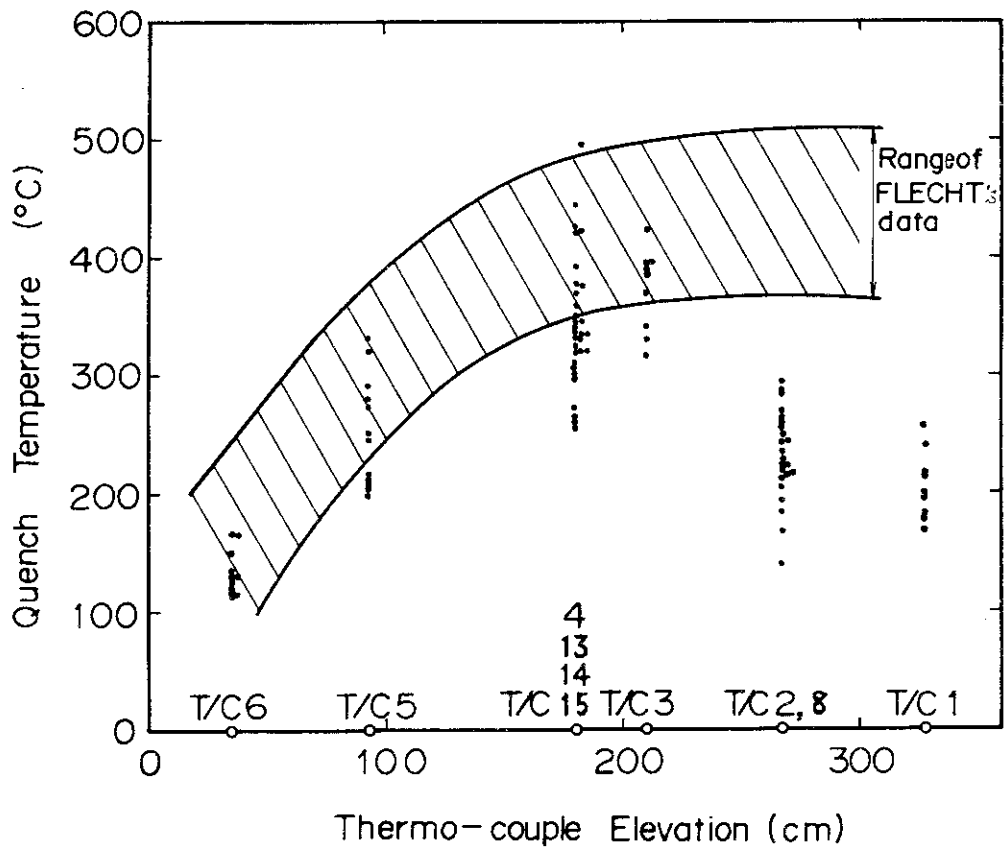


Fig. 4.22 Variation in Quench Temperature with Elevation

- 1) 中央部の一部を除いて、仮想液位到達前にそれも軸方向位置によらず、ほとんど同時にクエンチしている。これらのクエンチは、蒸气流中に分散された液滴の影響が大きいと思われる。
- 2) ひとつの実験においても、中央部位置におけるクエンチ時間は、断面方向により異なっている。一部は仮想液位到達前であり、その残りはその到達後かなり遅れてクエンチする。また、FLECHT実験に比べて、クエンチする時間は早い。
- 3) クエンチ温度は、軸方向に山型の分布をしており、その範囲は100~500℃である。

4.5 クエンチ時の熱流束の検討

本実験に使用した熱伝達率計算法によれば、クエンチ時の伝熱面表面からの除熱量は非常に大きく、熱流束は 10^6 kcal/m²hr に達する。このように大きな熱流束の場合、熱電対の時定数あるいは熱流束計算法等が問題になるとと思われる。そこで以下にクエンチ時の熱流束の値がどの程度のものであるか検討してみる。

Fig. 4.23は実測された1/1000秒毎の伝熱面表面温度変化である。T/C4のクエンチ時の温度降下は約50 msecの間ではほぼ完了している。なお点線は前項までの検討に用いた平均された1/20秒毎の伝熱面表面温度である。点線のデータから約 10^6 kcal/m²hrの熱流束が算出されている。

Fig. 4.25は平板の片面断熱の場合の表面温度変化の理論計算結果⁽⁶⁾を示す。ここで横軸は無次元時間を表し、縦軸は無次元温度を表している。また図中のパラメータ m は $m = \lambda / \alpha L$ (λ : 熱伝導率, α : 熱伝達率, L : 物体の特徴長さ) で定義される相対境界抵抗である。図中のプロット点はFig. 4.23のデータを1点鎖線のように近似して求めたものである。(3種のプロット点が示されているが、各々初期温度、流体温度の近似値のとり方の違いによる。) 図から $m \sim 1.0$ したがって、 $\alpha \sim 23000$ (kcal/m²hr℃) と考えられる。クエンチ初期には過熱度 ΔT (伝熱面表面温度 - 流体飽和温度) は $\Delta T \sim 200$ (℃) であるので、熱流束 $q (= \alpha \cdot \Delta T)$ は $q \sim 4.6 \times 10^6$ (kcal/m²hr) となり、クエンチ時の熱流束は 5×10^6 (kcal/m²hr) にも達すると考えられる。Fig. 4.24は内部発熱のない系に関する計算結果であるが、実験における定常発熱量を熱流束に換算した値は、最大 1×10^5 kcal/m²hr程度であり、クエンチ時の熱流束 5×10^6 kcal/m²hrに比べて非常に小さく無視し得る。

伝熱面の温度変化はFig. 4.23の結果からみて、25 msec程度の時定数での変化を示している。実験に使用されている熱電対の時定数もこれとほぼ同程度である。このためクエンチ時の伝熱面温度変化は実測データよりも急峻であると考えられ、したがってクエンチ時の熱流束は 5×10^6 kcal/m²hrあるいはそれ以上の値であると考えられる。

4.6 装置, データ集録の問題点

シリーズ1実験の経験から、種々の問題点が見いだされた。これらの問題点は逐次解決されていかなければいけない。しかし、中には容易に解決されない問題点もある。これらの問題点解決の努力は主としてシリーズ1終了後に行われた。従って、シリーズ1実験は、以下に示す諸問題点を含んだ実験であったと言ってよい。

以下に見いだされた諸問題点およびその解決についての提言を述べる。

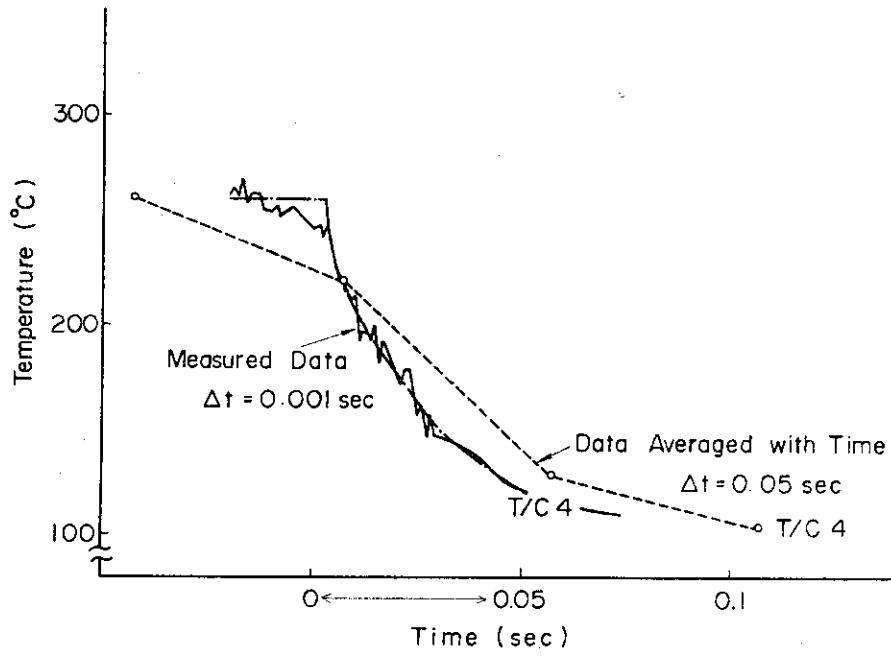


Fig. 4.23 Example of Temperature Response of Quench

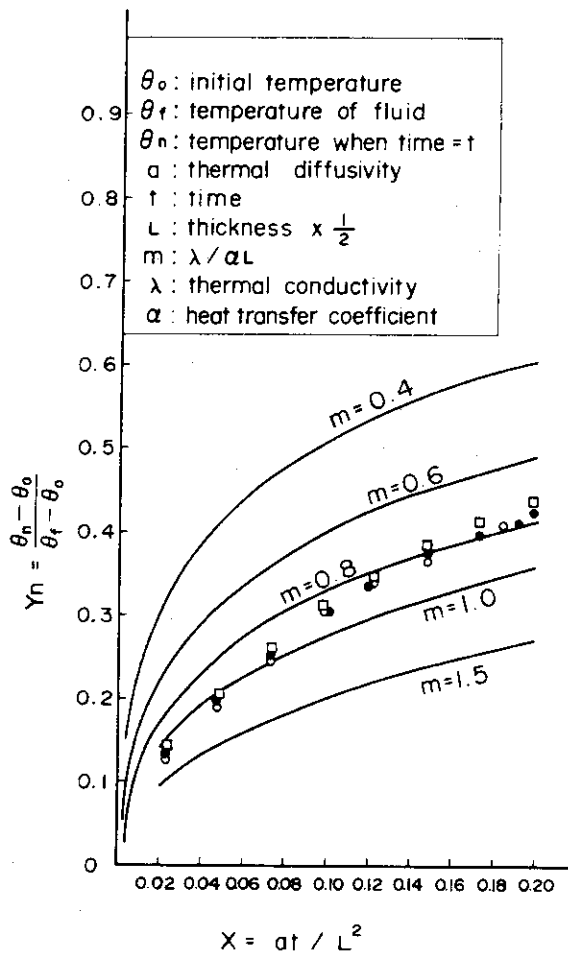


Fig. 4.24 Surface Temperature Response at High Heat Flux

4.6.1 実験装置の問題点

(1) 初期液位

実験開始前には、注入水は下部プレナム、オーバーフローライン（テスト部下部の位置にある）、貯水器の間を循環して流れる。そして自由表面は貯水器およびテスト部下部の2ヶ所に形成される。実験開始と同時にオーバーフローラインに設置されている弁を閉め、注入水をテスト部内に導く。テスト部下部に形成される液位は、実験開始時の液位と考えられ、この液位と発熱体有効発熱部下端との距離は、できるだけ小さくかつ一定に保持されることが望ましい。

装置設計に際しては、オーバーフローラインに設置された弁の流動抵抗をできるだけ小さくすることにより、注入水のオーバーフローを容易にし、初期液位をオーバーフローラインのレベルに保持するように計画した。オーバーフローラインのレベルと発熱体有効発熱部下端との距離は小さく設計されている。（常温時、鉛直差7 cm）オーバーフローラインに設置された弁は、差圧作動型の電磁弁であった。

シリーズ1実験を行ったところ、バルブ前後の差圧が小さいため、バルブが十分に開状態とならないことがわかった。その結果、バルブの流動抵抗が大きくなり、初期液位が、目標であったオーバーフローレベルより上昇した。加えて、実験パラメータである注入水速度を変えると、初期液位が従属して変化する難点が見いだされた。

このバルブはその後、より流動抵抗が少なく、作動に水圧を利用しない空気操作自動ボール弁に交換し、問題を解決した。

(2) 流路外管温度

8個に分割された流路外管は、マイクロヒータにより加熱される。流路外管の初期温度分布が所定の分布になったかどうか確認するため、実験開始前の流路外管温度を測定した結果、次の難点が見いだされた。

- 8個の流路外管をつなぐフランジ部が、流路外管の他の部分に比べ低温であり、流路外管軸方向温度分布にムラがある。
- 内部に収納された発熱体も、フランジ部と同じ高さの位置では、初期温度が低く、温度分布にムラがある。

これらは、流路外管の昇温過程でフランジ部が熱容量が大きく昇温しにくいことおよびマイクロヒータの局部的偏在のためとして説明できる。この対策として

- フランジ部温度測定用熱電対を取付け、かつ
- フランジ部加熱用ヒータを取付ける。

ことによってフランジ部を独自に温度調節できるようにし、初期温度分布に及ぼすフランジの影響を除いた。

流路外管は肉厚5.0 mmの角管であり、発熱体に比較して、大きな熱容量を持っている。その熱容量は、

- 発熱体最高出力部で、発熱体69.7本相当
- 発熱体中出力部で、発熱体43.6本相当
- 発熱体低出力部で、発熱体21.9本相当

の値である。発熱体16本に比べ、かなり大きな値である。

流路外管壁に蓄積されていた熱温が、どのように再冠水現象に影響するかはにはわかには断じがたいが、仮りにこの熱量が、発熱体表面における熱伝達率と等しい熱伝達率で放出されたとすれば、発生蒸気量は46%増と推定される。(流路外管の伝熱面積は発熱体7.3本に相当する。 $7.3/16=0.46$)

流路外管温度は、クエンチ速度に関して大きく影響することがFLECHTデータの検討でわかった。⁽⁷⁾ 7×7本または10×10本バンドルの試験でも影響があるので本実験のような4×4本バンドルの試験では、更に強い影響があろう。

流路外管温度については、その効果の検討のための実験が必要であろう。流路外管の熱容量については、その効果について考慮を払いつつ実験結果の検討を行う必要がある。

(3) 発熱体表面温度

実験開始前発熱体は外周の流路外管からの輻射熱により所定温度に加熱された。流路外管が所定温度に達した後、発熱体が所定温度に達するには若干の時間を要した。発熱体低出力部が最も時間遅れが大きかった。従って、高出力部の表面温度をモニターするのみではテスト部内が十分に熱平衡に達したかどうかは不明である。シリーズ1実験の初期には、十分に熱平衡に達しないまま開始された実験も多い。この難点は、経験的に得られた熱平衡に達する必要な時間を実験開始前に置くことにより解消した。

シリーズ1実験は、発熱体の最高許容温度が低く、十分な実験ができなかった。たとえば実際の再冠水過程で実現すると思われる低炉心注入水を模擬した実験は、発熱体が許容温度を越え実験不能であった。今後、実験範囲の拡大が可能な発熱体の製作を行う予定である。

(4) 注入水温度の制御

注入水を予熱する場合は、下部プレナム、オーバーフローラインを循環させながら行い、加熱器の制御は、貯水タンク中の水温により行う。加熱器出力は30KWであり循環量が800ℓ/hrの時の加熱器による温度上昇は30℃程度になり、貯水タンクと加熱器出口、下部プレナムでの水温が大きく異なってくる。また循環ライン中で沸騰を生じさせないためには、貯水タンクには大きなサブクール度が必要となり、サブクール度の小さな実験は困難となる。注入水の予熱は貯水タンク内で行うのが望ましい。

(5) ポンプキャビテーション

貯水タンク中の水のサブクール度が小さくなると、ポンプ内でのキャビテーションが生じた。ポンプを更に低い位置に下げて、ポンプ吸水側圧力を大きくする必要がある。

(6) 流量調節

注水流量の設定は絞り弁により行われた。しかし、流量計の応答が悪く、調節にはかなりの時間がかかった。流量が大きくなると、絞り弁の応答も悪くなり、この傾向は大きくなった。

(7) 流量計

流量計にはロータリーピストン型を用いたが、この計器の過渡応答は、上述のように悪い。またこの流量計は、測定範囲の異なる二台が並列に取付けられており、設定流量に応じて止弁により切換えて使用される。この切換の時、温度の高い水が急にグラファイト製ロータリーピストンを暖ためるため、ケーシングとの熱膨張の差によりかじりが生じ、作動不良になることがあった。これは、流量計を徐々に昇温させることにより解消された。

(8) 系圧力制御

シリーズ1実験の系圧力は、大気圧で行われた。実験中は、テスト部で発生した蒸気を定圧タンクより放出して系圧力を一定にする。しかし、その放出系の口径が小さく、定圧タンク圧力は0.2～0.3 kg/cm²程上昇した。放出系はより大きな配管および流動抵抗の小さな弁に交換された。

4.6.2 計測, データ集録の問題点

シリーズ1実験でデータの計測, 集録の過程で次の点が問題となった。

(1) 熱電対の取付け方法の問題

前項迄にしばしば言及したように、発熱体表面温度測定用の熱電対は、正しく発熱体表面温度を指示しているかどうか疑わしい。この点に関して検討を行う必要がある。

(2) 熱電対の耐久性の問題

シリーズ1実験経験によれば、実験回数を増すにつれ、発熱体表面に取付けられた熱電対の不良のものの個数が増加していった。不良の症状としては、

- 発熱体印加電圧投入により指示温度が変る。
- 指示温度が極端に振動する。
- 指示温度が出ない。

ことが経験された。数十回の実験で、不良となった熱電対は全取付熱電対の25%, 最高発熱量の部分に取付けられた熱電対の70%であった。

熱電対の耐久性について考慮を払う必要がある。

(3) 計装系と計測系との併用信号の取扱いの問題

本実験では、次の信号はデータ集録すると同時に、計装信号として自動平衡型計器に導かれている。

- 流量
- 液位
- 圧力 (ただし定圧タンク内圧力のみ)
- 電流
- 温度 (ただし発熱体表面温度は除く)

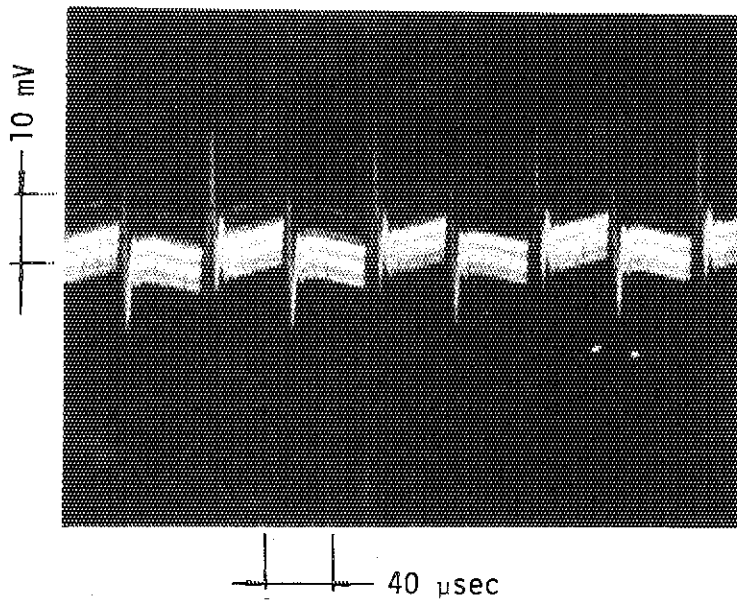
計装系と併用することにより、計測信号にどのような悪影響がもたらされているかを具体的に把握することはできなかったが、今後検討を要する事項である。

(4) 直流増巾器の雑音の問題

検出器で検出された計測信号の一部は増巾器により増巾され、データ集録装置で磁気テープにデジタル信号として記録される。この時増巾器で生ずるチョッパによるパルス性の雑音が問題となった。

Fig. 4.25 (a)は増巾器入力端を短絡した時の増巾器出力信号で、大きなパルス性ノイズならびに零点の変動がみられた。これを除去するため、ローパスフィルターを増巾器出口に入れたが、フィルターのアースを通して、他回路との干渉がみられた。この悪影響を除くために、フィルターを個別に完全に浮かすことを考えたが、その改造はシリーズ1実験には間に合わなかった。(シリーズ1実験後、フィルターの替りに、RC回路を入れることにより改善された。)

Fig. 4.25 (b)はデータ集録装置で磁気テープに記録された内容をディスプレイしたものを示す。縮尺は200 mV/cmである。約700 mV_{p-p}の変動が見られる。この値は、フルスケール:

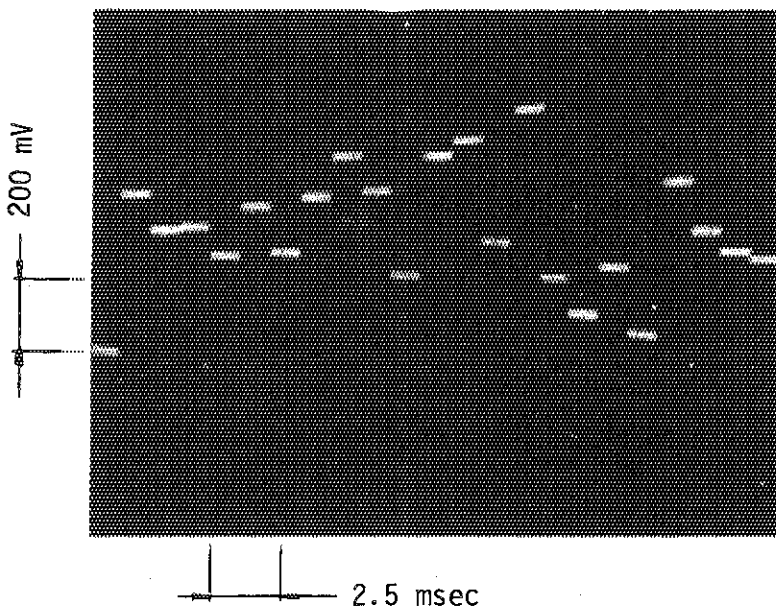


Wave Form of Output
Signal from Amplifier

Condition

- (1) Input: Short Circuit
- (2) 0.01 V/cm.
- (3) 0.04 msec/cm.

(a)



Output Signal of Magnetic Tape

Condition

- (1) 200 mV/cm.
- (2) 2.5 msec/cm.

(b)

Fig. 4.25 Characteristics of Data Recording System

±10Vの3.5%であり、実験時にオーバーレンジにならないように少しゲインを上げると、約5%に相当する。これは600℃に対して30℃に相当し、データの平滑化を行わねばデータの利用はむずかしい。この変動の原因と対策は現在追求中であり、一部改善されつつある。(応答速度の遅くてもよいデータに関しては、この変動は均一な時系列分布をもったホワイトノイズによるものと考え、高速集録したデータを数個ずつ平均化することにより、ノイズ除去を行っている。)

(5) データ集録装置の問題

データ集録装置に関して次の問題点があった。

- ① しばしばメモリーエラーがあった。
- ② 時々データ集録開始エラーがあった。
- ③ 磁気テープ記録内容については

- ・ DATA No.の記録のエラー
- ・ BLOCK No.の記録のエラー

が起る場合があった。

①, ②に関しては逐次修理され、現在では解決している。③に関してはまだ未解決である。現在は処理コードの方で対処することを考えている。

4.7 データ処理上の問題点

4.7.1 磁気テープ処理上の問題点

実験室に於て、高速データ集録装置 DATA C 2000 Bで作成された磁気テープ (MT1) を具体的な温度、圧力、流速、液位の値に直し、以後のデータ処理に便利のように新たに編集テープ (MT2) に変換しているが、この処理で遭遇した問題点を列挙しておく。これらの問題点は漸次改善されつつある。

(1) 磁気テープ (MT1) 読取上の問題点

(a) 各実験毎に記録の先頭にかかれる実験番号をマニュアルで操作しているが機械に誤動作が生じ、その実験番号を読みとれない時があった。誤動作を生じている時はその実験番号を探し出すことができず、磁気テープを最後まで読み切ってしまう次の実験番号も探すことができなくなる。この対策として実験終了時に磁気テープ上にどのような実験番号がどの順序で入っているかをチェックしている。

(b) 各実験の終了時に、磁気テープ上の記録の最後に記入されるブロック数が正しく記入されないことがあり、この時、次の実験番号を探し出すことができない。このトラブルを避けるため、磁気テープ上の記録を全ブロック数より僅かに少なめに読むことによって、各実験終了時に生ずる磁気テープ記録上のエラーを読みとばし、トラブルを避けた。そのため実験時間は所要時間よりも長めに動作させている。

(c) 磁気テープの先頭に各検出器に於ける較正值として熱電対ならば0と20mVの値が書き込まれているが、どちらかの較正值を入れ忘れると出力はオーバーフローしてエラーを生じた。このエラーを避けるため0mV、20mVの出力を書き出させると同時に、0mVと20mVに相当する出力差がある値よりも小さい時はそのチャンネルは読みとばすことにした。

(2) データ処理上の問題点

(a) 温度応答の読み取りと同時にクエンチの状況を精密に知るために本処理ではクエンチの前後サ

ンプリングレイト1000 DATA/secで温度を記録し、メモリーさせることにしている。ある熱電対の応答にクエンチが二度以上生じている時がある。これは主としてスパイク現象のためであり、本実験ではこのスパイク現象はクエンチとして認めず、一度温度が急降下した後再び急上昇する温度応答はクエンチとしては省くことにした。またクエンチの判別方法として0.05秒間の温度差がある値以上になった時クエンチとしているが、この値を小さくとると、温度応答のノイズをクエンチと判定することがあった。そこで実験での状況から経験的に0.05秒間の温度差を3.25℃にとると、グラフ上に書かれたデータから判断されるクエンチを、プログラムでクエンチとして判断できるようになった。

(b) 本処理では、磁気テープ上の記録(20チャンネル、サンプリングレイト1000 DATA/secを50個平均した値を具体的に温度・圧力・液位等に直すと同時に、温度に関してはクエンチの判定を各熱電対について0.05秒毎に判定し、クエンチを生じたならばクエンチ中のデータをサンプリングレイト1000 DATA/secで記録し、また注水開始時信号を判定するようにしてある。また、DATA C 2000 Bは2進法の9トラックで、計算センターの計算機FACOM 230-60, 75に対して非標準磁気テープとなっているので、その変換も行っている。この全ての処理時間は3分間の実験に対し(磁気テープ上の全記録数は約 3×10^6 個で2000ブロック相当)、FACOM 230-60でCPU timeは400秒、FACOM 230-75で100秒である。計算時間の短縮の余地は充分あるものと考えられる。

4.7.2 熱伝達率計算コード、温度プロフィールコードの問題点

熱伝達率計算コードを使用し、熱伝達率を計算し、計算結果を図表する過程で、種々の問題点が見いだされた。これらの問題点に対処するため、熱伝達率計算コードは若干の修正がなされた。以下に問題点となされた修正について記す。

(1) 熱伝達率計算結果が非常に振動すること。

熱伝達率計算結果が振動する理由には次の2つが考えられる。

① 時間メッシュが大きすぎる。

② インプットデータである温度応答実測値が微小変動している。

①については、時間メッシュを小さくして、平衡状態を越えて進行することを避ければよい。具体的には次の条件式により許容時間巾 Δt (sec)を求めている。

$$\Delta t < \frac{C_p \rho \log 1.111}{2\lambda} \times \frac{(R_1 - R_0)^2 (3R_1 + 5R_0)}{24R_1}$$

この時必要となる Δt 毎の温度応答データは、実測値の内挿により求めている。(C_p ρ:熱容量 kcal/m³℃, λ:熱伝導率 kcal/mhr℃, R₁:発熱体外半径m, R₀:発熱体内半径m) ②については、計算結果の平均化によりスムージングした。具体的には、0.05 secおきに得られた計算結果を、前後4コ計9コの算術平均値で置きかえている。

(2) 発熱量の見積りの誤差が計算結果に大きな誤差をもたらすこと。

対象としている発熱体の熱容量が小さいため、上記の難点は理論的に避け得られない。従って発熱量の見積りを精度よく行う必要がある。発熱体は直接通電により加熱されているので、物理的には、発熱体の形状寸法と電流実測値から求められる。本実験の電流実測値は、発熱体集合体16本の全電流であり、個々の発熱体電流に若干の不均一性の存在が予想されることや、電流実測値が必ずしも信

頼できるものでないこと等のため、電流実測値からの発熱量の見積りを諦め、以下に述べる方法により見積りを行うことにした。

① 発熱体に加熱用電力を供給開始した後で、テスト部注水開始以前の期間の温度応答から平均温度上昇率を求める。

② 発熱体内の半径方向には温度分布はないものとして、①の温度上昇率が実現されるべき発熱量を求める。

①、②の方法が有効であるためには、発熱体への電力供給開始後、注水開始迄の期間は断熱状態であるという前提が必要である。この期間における発熱体表面の伝熱は、流路外管への輻射と周囲雰囲気への自然対流伝熱が考えられる。輻射は、流路外管と発熱体が殆んど等温であることから無視できると思われる。自然対流伝熱については、本実験の体系について試算した結果、次の条件の時が最も伝熱量が大きくなると考えられた。

発熱体温度 = 300℃, 蒸気温度 = 100℃, 位置 = 3.6 m

この時 $Gr \cdot Pr \approx 1.9 \times 10^{11}$ であり乱流となる。そして $Nu = 754$, $h = 5.6 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$

従って、注目している期間は、断熱状態であると考えてよかろうと思われる。(熱伝達率計算の対象とされる期間の熱伝達率は、本実験データによれば $50 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 以上である)

温度プロフィールコードについてはおおむね良好な結果が得られた。具体的には、次の項目は良好であった。

- (1) ターンアラウンドの有無の判定
- (2) ターンアラウンド時刻の決定
- (3) ターンアラウンド温度の決定
- (4) クエンチの有無の判定
- (5) クエンチ時刻の決定

しかしながらクエンチ温度の決定については、未解決の問題がある。4.4.2の定義とは別に、温度プロフィールコードでは発熱体表面熱流束が最大の時刻の温度としてクエンチ温度を定義しているが、この定義によれば、クエンチ時の壁温急降下中内のどの温度もクエンチ温度とされる可能性を持っている。どの温度がクエンチ温度として選択されるかは、温度応答のサンプリング時刻とクエンチ時刻の相対関係で右左されるようになりかなり偶然的な性格を持っている。また、物理的にも上記の定義で合理的であるかどうかは疑しい。温度プロフィールコードによるクエンチ温度の決定はいまのところ解決されていない。

なお、1つの実験データの処理所要時間は約4 minである。(CORE 45 KW)

4.7.3 グラフィック・ディスプレイの問題点

このルーチンでは、実験データをテープより読み出し、グラフィック・ディスプレイ (GSP) により、作図して画面表示させ、そのハードコピーを得る作業を行う。

GSPルーチンにより、実験終了後早期に結果を観察することができ、測定系のチェックも次の実験前に行うことができた。

以下に、このルーチンの現在までの改良点を述べる。

1. データ読み

- 記録チャンネルは20 CHであるが、実験により、編集テープには書き込まれないCHがある。

そういったCHを誤って読み出ししないようにした。

○個別テープと編集テープでは書き込みFormatが異なるが、どちらのFormatでも、最初のデータで判断して選べるようにした。

2. 作図法

○作図を自動スケールサブルーチン(SCALE, AXIS etc)で行うと、実験毎に横軸、縦軸のスケールが異なり、シンボルマークも小さくなるので、それらをこのルーチンでは固定し、A4版の大きさにした。

○作図のFormatを整備し、実験番号、条件等を併記するようにした。

このGSPルーチンでの目的である早期に実験データの整理作図を行い、結果の観察を容易にすることは、これらの改善により満足すべき成果をおさめた。

4.8 テスト部解体検査

シリーズ1実験終了後、テスト部は解体され、各部分の外観検査が行われた。

この結果、流路外管、下部プレナム、電極等には、特に大きな変形等は観察されなかった。しかしながら、発熱体には大小の曲がりがあり、テスト部からの引出しきへも困難であった発熱体もあった。スペーサーグリッドは健全であり、絶縁用石英ブロックの破損も解体時に生じたもの以外は観察されなかった。

解体後の発熱体中央部の外観をFig. 4.26に示す。発熱体表面は、やや酸化しており大きな湾曲がある。また、グリッド間では小さな座屈変形がみられ、その変形量は中央部やや上方で大きい傾向にある。発熱体の湾曲変位量と、その方向をFig. 4.27に示す。湾曲は流路中心側で大きくなっており、また中心側発熱体の曲がりの方向は、熱電対取付方向に近い。発熱体の製作上の歪は、熱処理されているので考えられず、これらの変形の原因は、実験中の発熱体温度挙動による歪の発生と思われる。その発生には熱電対リードが何らかの影響を与えているものと思われる。

発熱体に取付けられた熱電対は、実験中に計測不能になったものがあり、その取付状況の解体後検査を行うつもりであったが、解体時の発熱体取り出しのさいに、グリッドに接触し、切断されたものもあり、不可能となったが特に測定先端が発熱体よりはずれているものもなく、スポット溶接による取付けでも使用できるものと思われる。

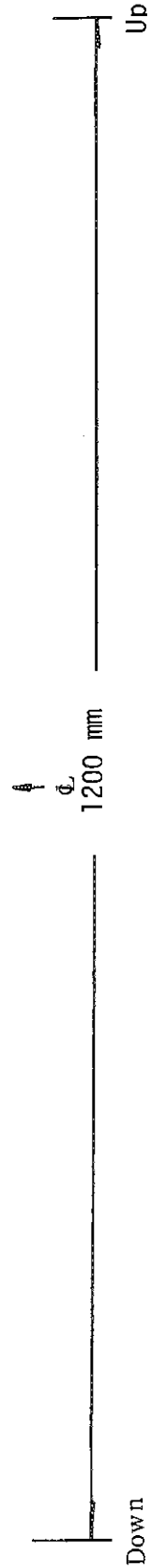
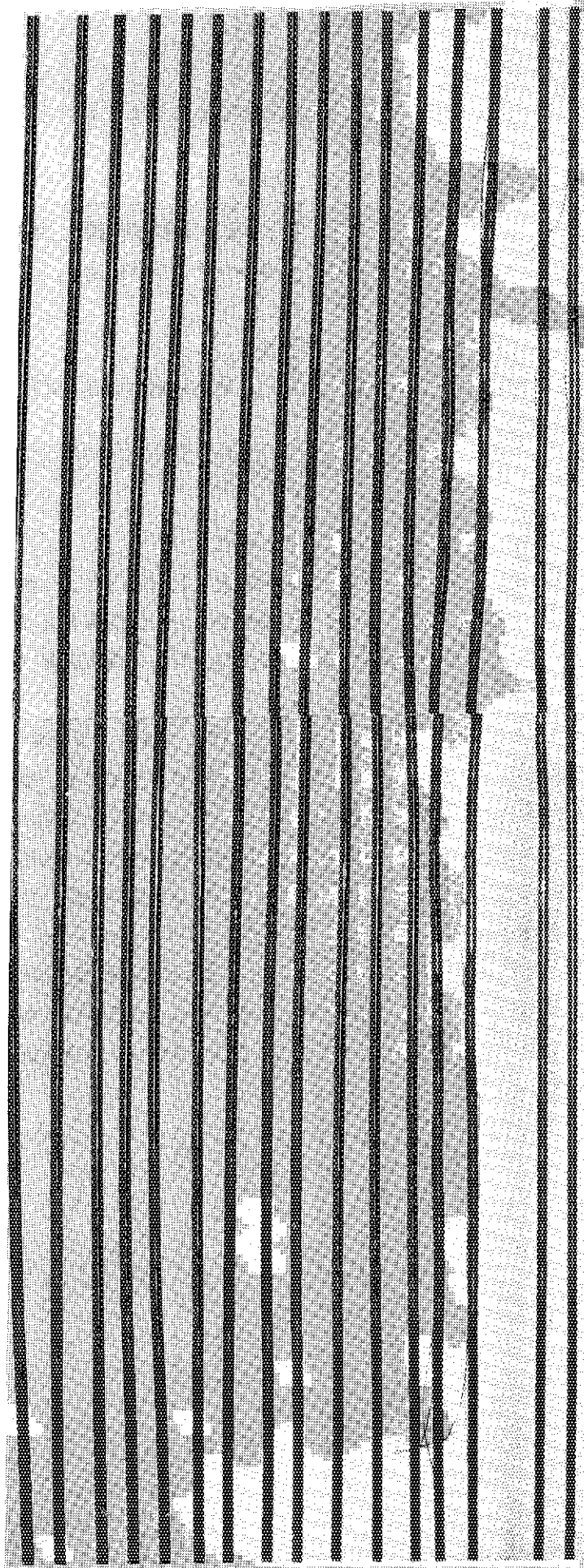


Fig. 4.26 Photograph of Deformed Heater Rods at Maximum Heat Flux Region (Series 1)

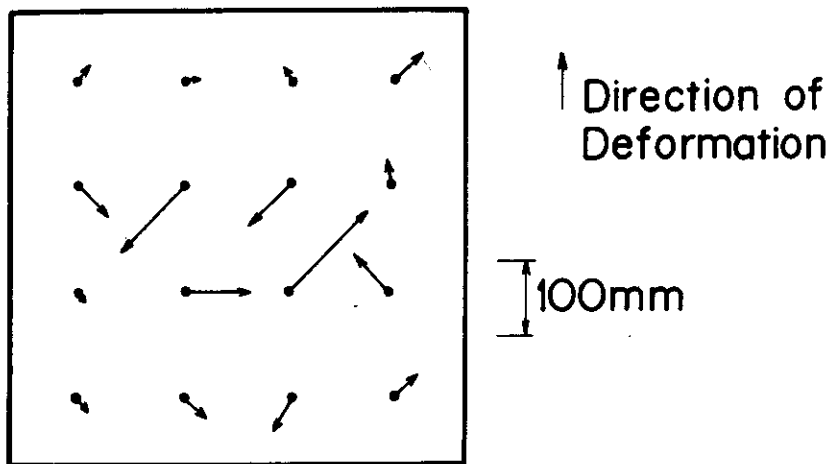


Fig. 4.27 Deformation of Heater Rods at Fepe Condition

5 結 論

実験結果から次の結論が得られた。

- (1) 発熱体壁温の温度応答には、仮想液位到達前にクエンチする場合と、到達後にクエンチする場合の2種類が存在した。
- (2) 一般に注入開始後、初期冷却促進領域、冷却停滞領域、冷却増大領域、クエンチという経過を辿る。
- (3) 飛散液滴がクエンチ現象をもたらす一原因となる。
- (4) FLECHT データより早くクエンチが生じている。
- (5) クエンチ時の温度降下速度はFLECHT データより早い。
- (6) 初期冷却促進領域、冷却停滞領域の熱伝達率の値は、FLECHT データとほぼ等しく、 $50 \sim 150 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 程度である。
- (7) クエンチの直前に膜沸騰のような熱伝達特性を示す領域がある。その領域の長さはFLECHT データに比べかなり短い。
- (8) A タイプの温度応答を示す位置のクエンチ時刻は、注目点高さが違っていても殆んど同時である。
- (9) クエンチ時の熱流束は $5 \times 10^6 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 以上に及ぶ。

実験経験から装置、データに関してシリーズ1では次の問題点があることがわかった。

- (1) 流路外管の初期設定温度をどのように決定すべきか。
- (2) 熱電対の取付方法は現状でよいか。
- (3) 発熱体許容温度が低く、十分な実験ができない。
- (4) 発熱体の熱容量の実験結果に及ばず影響について考慮を払いつつ、実験結果の検討を行うこと。
- (5) 発熱体の曲りについて考慮すべきこと。
- (6) 注水開始前の初期テスト部液位が一定でないこと。
- (7) 流路外管フランジ部は低温であり、流路外管温度の均一性が達成されてないこと。
- (8) 実験開始前のテスト部内の熱平衡が十分でないこと。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり、安全工学部村主進部長、能沢正雄次長、山崎弥三郎主任研究員ならびに斯波正誼安全工学第一研究室長から、適切かつ懇切な助言、御指導を受けた。

ここに、深謝の意を表したい。

5 結 論

実験結果から次の結論が得られた。

- (1) 発熱体壁温の温度応答には、仮想液位到達前にクエンチする場合と、到達後にクエンチする場合の2種類が存在した。
- (2) 一般に注入開始後、初期冷却促進領域、冷却停滞領域、冷却増大領域、クエンチという経過を辿る。
- (3) 飛散液滴がクエンチ現象をもたらす一原因となる。
- (4) FLECHT データより早くクエンチが生じている。
- (5) クエンチ時の温度降下速度はFLECHT データより早い。
- (6) 初期冷却促進領域、冷却停滞領域の熱伝達率の値は、FLECHT データとほぼ等しく、 $50 \sim 150 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 程度である。
- (7) クエンチの直前に膜沸騰のような熱伝達特性を示す領域がある。その領域の長さはFLECHT データに比べかなり短い。
- (8) A タイプの温度応答を示す位置のクエンチ時刻は、注目点高さが違っていても殆んど同時である。
- (9) クエンチ時の熱流束は $5 \times 10^6 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 以上に及ぶ。

実験経験から装置、データに関してシリーズ1では次の問題点があることがわかった。

- (1) 流路外管の初期設定温度をどのように決定すべきか。
- (2) 熱電対の取付方法は現状でよいか。
- (3) 発熱体許容温度が低く、十分な実験ができない。
- (4) 発熱体の熱容量の実験結果に及ばず影響について考慮を払いつつ、実験結果の検討を行うこと。
- (5) 発熱体の曲りについて考慮すべきこと。
- (6) 注水開始前の初期テスト部液位が一定でないこと。
- (7) 流路外管フランジ部は低温であり、流路外管温度の均一性が達成されてないこと。
- (8) 実験開始前のテスト部内の熱平衡が十分でないこと。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり、安全工学部村主進部長、能沢正雄次長、山崎弥三郎主任研究員ならびに斯波正誼安全工学第一研究室長から、適切かつ懇切な助言、御指導を受けた。

ここに、深謝の意を表したい。

参考文献

- (1) Cermak, J. O. , et al ; "PWR FULL LENGTH EMERGENCY COOLING HEAT TRANSFER (FLECHT) GROUP I TEST REPORT," WCAP-7435 (1970)
- (2) Murao, Y. , Iguchi, T. , Sudoh, T. , Sudo, Y. , Niitsuma, Y. , Fukaya, Y. , Hirano, K ; "REFLOODING EXPERIMENTAL PROGRAM AND SUMMARY OF SERIES 1 EXPERIMENTS" (1975)
- (3) Fukaya, Y. , Murao, Y. , Sekiguchi, K. , Hirano, K ; "DESIGN AND MANUFACTURE DESCRIPTION OF REFLOOD TEST FACILITY" (1975)
- (4) Niitsuma, Y. , Murao, Y. , Hirano, K. , "SUMMARY OF CONTROL EQUIPMENTS AND INSTRUMENTATION FOR THE REFLOODING TEST RIG" ; (1975)
- (5) Sudo, Y. , Murao, Y. ; "STUDY ON FILM BOILING HEAT TRANSFER DURING REFLOOD PROCESS (ON THE EFFECTS OF SUBCOOLING ON FILM BOILING HEAT TRANSFER) ; (1975)
- (6) Meisler, M. P. ; Trans ASME, Vol. 69 (1974), p227
- (7) Murao, Y. , Sudoh, T. ; "THE STUDY ON QUENCH PHENOMENA DURING FLOOD PHASE, (1) DISCUSSION OF QUENCH MODELS," (1975)
- (8) Murao, Y. , Iguchi, T. , Sudo, Y. , Sugimoto, J. , Niitsuma, Y. , Fukaya, Y. , Hirano, K ; "Reflood Experiment 2A Data Report (Heat Flux, Heat Transfer Coefficient)" (1976)