

JAERI-M

9080

R O S A - III によるスプレー冷却実験
データ報告・2

1980年9月

傍島 真・村田 秀男・斯波 正誼

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、複製などのお問合せは、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.

R O S A - Ⅲによるスプレー冷却実験データ報告・2

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

傍島 真・村田 秀男・斯波 正誼

(1980 年 8 月 19 日受理)

BWRのLOCA試験装置であるROSA-Ⅲの炉心1チャネルを用いて、スプレー冷却の個別効果実験を行った。本報は、そのうち発熱実験で炉心再冠水を行わせた実験についての報告である。実験の結果、次のことが明らかにされた。

- (1) 実施した条件下でのスプレー水の蒸発蒸気流のみでは、上部タイププレートのCCFLは生じなかった。
- (2) 落下流による炉心冷却は不規則・不安定なものであって、これに冷却を頼る考え方には取れないが、炉心水位のスウェルによる冠水が行われた場合は、十分な冷却が得られた。
- (3) スプレー水温が高いと凝縮が少なく、キャリーオーバーが多くなった。

Data Report on Spray Cooling Test
by ROSA-III, 2

Makoto SOBAJIMA, Hideo MURATA and Masayoshi SHIBA
Division of Reactor Safety
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received August 19, 1980)

A separate effect test on spray cooling was carried out using one core channel of ROSA-III BWR-LOCA test facility.

This report describes a heating experiment with reflood process in the series of runs

- (1) The CCFL at the upper tie-plate was not caused at the performed conditions only by evaporated steam flow due to spray water
- (2) Although core cooling by falling water is irregular and unstable and is not to be relied on, core cooling by reflood due to level swell, if it takes place, was sufficiently attained.
- (3) When spray temperature was raised, carry-over rate increased due to decrease of condensation.

Keywords: BWR, LOCA, Spray Cooling, ROSA-III Facility, ECCS, Counter-Current Flow Limit, Falling Water, Reflooding, Level Swell

目 次

1. はしがき	1
2. 実験装置と実験条件	2
3. 計測とデータ処理	4
4. 実験データと考察	5
5. 結 言	7
参考文献	8

Contents

1. Preface	1
2. Experiment facility and experiment conditions	2
3. Instrumentation and data processing	4
4. Experiment data and discussion	5
5. Concluding remarks	7
References	8

1. は し が き

BWRの冷却材喪失事故(LOLA)模擬試験であるROSA-III試験⁽¹⁾では、BWR 6を対象にして、

1. LOCA時の一次系内の熱流動現象の把握と、ECCS注入効果についての実験的評価
 2. 実験データを利用してのLOCA解析コードの性能評価
- を目的とした試験を行っている⁽²⁾。

ROSA-IIIの試験装置は1/2実寸長の8×8燃料集合体を4チャネル配した炉心部のほか、気水分離器、4台の外部接続ジェットポンプ、2つの循環ループなどを備えた総合試験装置であって、BWR実炉におけるLOCA現象の忠実な模擬が、その役割とされる。しかしながら上記二つの目的を果すための過程には、以下の様な問題が必然的に浮かび上がってくる。

- I 得られた総合試験データからのみでは、それが実炉をどの程度模擬しているか、判断し得ない。また現象を計測する方法にも技術的限界がある、定量的に現象を捕えられる範囲が、かなり限られる。
- II LOCA解析コードによる計算結果の一致度が悪い部分が、現状のコードにはしばしば見られるが、これがモデルの不完全さに起因する場合、改善のために総合試験データを使用することは、影響因子の多さのため、ほとんどの場合不可能である。
- I の問題点において、総合試験のみしか行わない場合には、データの表わす結果のみに知識が限定されて、たとえ模擬が実炉とかけ離れた方向へ流されても気付く手段が実はなく、独善的解釈に落入りやすい。また II の問題では、総合試験データはコードモデルの不完全さの証明に使用されたのみで、それ以上のものではなくなる。

そこで総合試験には並行する個別効果実験が不可欠のものとなるが、特定の現象(効果)を取り出して、定常的な実験を行えば、非定常二相流では測定のできなかったかなりの量について測定定量化が可能になるとともに、その結果の整理によって得られる現象を記述する何らかの手段(バターン化や実験式化)を使って、新しいモデルを組立てることが可能になる。すなわち上記 I, II の問題点に解決が与えられ、現象把握と解析コードの開発に貢献しつつ、総合試験データの利用価値が新しいモデルについても発揮され、一段と有効になってくる。

このような基本認識のもとに、BWR-LOCA模擬実験の最も重要でかつ明瞭になってない現象の一つである、スプレー水による炉心冷却挙動に関する個別効果実験を行った。BWRではブローダウン過程に下部ブレナム・フラッシングという過程がある、ここでは炉心冷却がよくなるとされている。しかし下部ブレナム・フラッシングによる上昇流は次第に衰え、冷却状態が再び悪化するが、大破断事故の場合ECCスプレー水が注入され始めるのは頂度その頃である。このスプレー水が順調に炉心へ落下し、冷却に十分寄与すれば問題はないが、上部タイブレートの多孔板において、対向流抑制(CCFL)と呼ばれる現象があつて、上昇蒸気流のために水の落下が制限されると報告されている。^{(3)~(6)}これらの実験はほとんど実寸長燃料集合体を用いて、常圧付近の圧力で行ったものか、単に多孔板における対向流抑制についてのみ調べた

もので、実際に問題となる 30 atm 程度までの状態で、炉心冷却の分布まで調べたものではない。対向流抑制を生じた結果として冷却がどのように進行し、再び対向流抑制に影響を与えるかを詳しく調べ、熱伝達モデルを開発することが、BWR のコード解析では重要な課題であり、その目的に近づくためにこのスプレー冷却の個別効果実験が行われた。また ROSA-III の装置上の特殊性である 1/2 実寸長についても、これらの現象に特異性をもたらすかどうか調べておくことにもなる。同時に前記 1 の問題に答えて、ROSA-III 総合試験のデータ解釈にこの個別効果実験が役立つと期待される。

本データ報告では、一連の実験のうち、発熱実験と称する炉心加熱を行った状態での初期炉心水位なしのテスト・ランについてのみまとめた前報に続き、残る初期水位を炉心下端に設定してスプレーを上部に注入した再冠水実験についてまとめ、若干の解釈を加えた。

2. 実験装置と実験条件

装置構成

実験装置は ROSA-III 装置の圧力容器と炉心を用い、ループやジェット・ポンプ部、蒸気ドーム部は切り離して盲フランジで置き換えた試験部を有する。炉心部は燃料体 4 体のうち 1 体のみを試験部として使用するもので他の 3 体は上部にふたをして、単なる蒸気溜りとしている。使用する 1 体のチャネル・ポックスを上方に延長し、圧力容器上部管板を貫通させてから水平に系外へ取出している。スプレーはこの延長管内に注入される。Fig.1 の構成図に示す毎く、蒸気発生器で作られた蒸気および飽和水は混合器で所定の流量比で混合され、圧力容器下部に一定流量で入る。そして試験部チャネルを通過し、上部ブレナムを経て、圧力調節弁 (CV-2) から凝縮器へと流出する。凝縮器には二次側冷却水が一定流量で流されている。スプレー注入系は ROSA-III 総合試験で使用する低圧スプレー系 (LPOS) をそのまま使用し、圧力容器内の配管で延長管部（上部ブレナム）に導かれている。圧力容器下部ブレナムに落下したスプレー水および自然冷却のために凝縮した蒸気は水となって、下部ドレンよりダンプタンクに落下し留る。

上記機器類の配置および配管の構成をそれぞれ Fig.2, Fig.3, Fig.4 に示す。

試験容器

試験容器は Fig.5 に示す ROSA-III 総合試験用の試験容器から蒸気ドーム部、気水分離器を取りはずしたもので、試験用チャネル・ポックスの延長部が、上部ふたを貫通して、外部へ導かれている。この上部構造の詳細は Fig.6 に示す通りで、四角形のチャネル・ポックスは延長部で円形となっている。スプレー・ノズルの高さは ROSA-III 総合試験の場合と同じであり、広がり角度は上部タイプレートの位置ではなくその辺の長さになるようにし、管部の液膜による落下をなくすようにしている。しかし、実際には広がり角度は吐出圧力にも依存するものと考えられる。延長管部は上部ブレナム部に相当するが、その上に BWR では気水分離器のスタンド

もので、実際に問題となる 30 atm 程度までの状態で、炉心冷却の分布まで調べたものではない。対向流抑制を生じた結果として冷却がどのように進行し、再び対向流抑制に影響を与えるかを詳しく調べ、熱伝達モデルを開発することが、BWR のコード解析では重要な課題であり、その目的に近づくためにこのスプレー冷却の個別効果実験が行われた。また ROSA-III の装置上の特殊性である 1/2 寸長についても、これらの現象に特異性をもたらすかどうか調べておくことにもなる。同時に前記 1 の問題に答えて、ROSA-III 総合試験のデータ解釈にこの個別効果実験が役立つと期待される。

本データ報告では、一連の実験のうち、発熱実験と称する炉心加熱を行った状態での初期炉心水位なしのテスト・ランについてのみまとめた前報に続き、残る初期水位を炉心下端に設定してスプレーを上部に注入した再冠水実験についてまとめ、若干の解釈を加えた。

2. 実験装置と実験条件

装置構成

実験装置は ROSA-III 装置の圧力容器と炉心を用い、ループやジェット・ポンプ部、蒸気ドーム部は切り離して盲フランジで置き換えた試験部を有する。炉心部は燃料体 4 体のうち 1 体のみを試験部として使用するもので他の 3 体は上部にふたをして、単なる蒸気溜りとしている。使用する 1 体のチャネル・ボックスを上方に延長し、圧力容器上部管板を貫通させてから水平に系外へ取出している。スプレーはこの延長管内に注入される。Fig.1 の構成図に示す毎く、蒸気発生器で作られた蒸気および飽和水は混合器で所定の流量比で混合され、圧力容器下部に一定流量で入る。そして試験部チャネルを通過し、上部ブレナムを経て、圧力調節弁 (CV-2) から凝縮器へと流出する。凝縮器には二次側冷却水が一定流量で流されている。スプレー注入系は ROSA-III 総合試験で使用する低圧スプレー系 (LPOS) をそのまま使用し、圧力容器内の配管で延長管部（上部ブレナム）に導かれている。圧力容器下部ブレナムに落下したスプレー水および自然冷却のために凝縮した蒸気は水となって、下部ドレンよりダンプタンクに落下し留る。

上記機器類の配置および配管の構成をそれぞれ Fig.2, Fig.3, Fig.4 に示す。

試験容器

試験容器は Fig.5 に示す ROSA-III 総合試験用の試験容器から蒸気ドーム部、気水分離器を取りはずしたもので、試験用チャネル・ボックスの延長部が、上部ふたを貫通して、外部へ導かれている。この上部構造の詳細は Fig.6 に示す通りで、四角形のチャネル・ボックスは延長部で円形となっている。スプレー・ノズルの高さは ROSA-III 総合試験の場合と同じであり、広がり角度は上部タイプレートの位置ではほぼその辺の長さになるようにし、管部の液膜による落下をなくすようにしている。しかし、実際には広がり角度は吐出圧力にも依存するものと考えられる。延長管部は上部ブレナム部に相当するが、その上に BWR では気水分離器のスタンド

・パイプが立つのを模擬するため、上部から内挿管を挿入する構造になっている。この内挿管下端の高さはROSA-IIIの場合と一致する低位置（長管）と、BWR 5の最も低い位置である上部ブレナム周辺の場合に一致する高位置（短管）とに変えられるようになっている。この構造により、水位が上部ブレナム延長部を上昇する場合、内挿管下端に達すれば、内挿管外環状部は蒸気充填であるので、未飽和水による凝縮がない限り水位が上昇することはないと考えられ、水位は内挿管内を上昇することになる。内挿管上部には水平出口部があり、この高さはほぼBWRのすべての気水分離器の水出口高さに相当する。内挿管内径による液滴付着の違いが生ずる可能性を考慮し、実験パラメータとできるよう、内部に十字板を全長に渡って挿入できる構造になっている。この場合の等価直径は27.7mmと十字板除去の場合の1/2以下になる。仮にこの影響が著しくないことが明確になれば、実炉のスタンド・パイプ内径166mmと異なることが問題でなくなる。

蒸気発生器

Fig.7に示す蒸気発生器（ボイラー）は12B径管内にシース・ヒータ21本の集合体を下部から挿入したもので、集合体周囲に環状の下降流部を設けて自然循環による気水分離および、定水位上に出るヒータ集合体上端部に簡単な構造の気水分離機能をもたせてある。さらに容器上部にデミスターを設けて液滴を落し、完全な乾き蒸気に近い蒸気が得られる工夫がしてある。一方下降する水は、飽和水として容器中位のノズルから取出され、必要な流量に制御されて混合で蒸気と混合され、所定のクオリティに調整される。給水量、ヒータ電力はその所定量に自然放熱を加えた値にそれぞれ設定し、安定になるまで置かれる。

ダンプタンク

Fig.8に示すダンプ・タンクはROSA-IIの試験容器を転用したもので、上下ブレナム部を除く中間部が均一断面積であるので、水位が水量に比例し、落下水量の計測に好都合である。初期水位を下部ブレナム上端以上に設定し、上部ブレナムに達した所までを測定範囲として使用する。この容器自体の予熱を早く行えるよう、初期条件設定前には直接蒸気を吹込む。また自然放熱も大きいので、胴部やフランジ部には十分に断熱材を巻いて使用している。

凝縮器

Fig.9に示すように凝縮器の内部は3本の蛇管を介して二次側冷却水に伝熱する。ブローダウン伝熱流動装置の熱交換器に使用していたものであるため、やや過大な容量を持っており、蛇管内容積が76l、二次側水容積が126lである。このため実験範囲における熱応答時間は、一次側が12分以上、二次側が3~4分となる。ただしこれは一次側出口温度は実験中ほとんど不变で二次側入口温度近くに保たれているため、問題にはならず、二次側の熱応答時間を主として実験時間に考慮すればよい。

実験条件

実験手順は始めにボイラーを 100°C 以上まで温度上昇させ、発生する蒸気を流量制御弁 CV-1 (Fig. 1) を調節して予熱回路 (MV-5 開) に通し、ダンプ・タンクと試験容器を予熱しつつ、圧力と温度を徐々に上昇させる。所定の圧力になったら MV-3 が開かれていれば、圧力制御弁 CV-2 が自動的に開き始める。クオリティを低くとる場合は V-1 を開いて水を混合する。本報の再冠水過程を対象とした実験では、炉心下端付近まで水を満たし、バイパス回路 (MV-1 閉, MV-2, 3 開) を使用して系圧力を一定にする。系全体が安定し、定常状態になったら、テスト・チャネルの燃料体に通電し、所定の温度にする。安定した所でスプレー注入を開始し、同時に炉心出力を所定の値に上昇させる。データはスプレー開始前から約 30 分記録する。燃料体保護のため、燃料棒表面温度が設定値を越えてしまったら、自動的に通電を停止するようになっている。

本装置で実施し得る実験条件は以下の様である。

系圧力 : $3 \sim 30 \text{ atm}$.

蒸気流量 : $\sim 400 \text{ kg/hr}$ (0.11 kg/s)

混合水流量 : $\sim 600 \text{ kg/hr}$ (0.167 kg/s)

クオリティ : $0 \sim 1$

スプレー水温 : 常温 $\sim 105^{\circ}\text{C}$

スプレー流量 : $\sim 100 \ell/\text{min}$ ($16.7 \ell/\text{s}$)

燃料体出力 : $\sim 1800 \text{ KW}$

燃料表面温度 : $\sim 900^{\circ}\text{C}$

出口管高さ、径 : 各 2 種

これらの条件範囲に対し、実施を予定した各実験 Run の実験条件と、本報に掲げる実験 Run で実際に行われた条件をそれぞれ Table 1, Table 2 に示す。Table 2 は炉心発熱実験のうち初期炉心水位を設定した再冠水実験であるが、各実験パラメータは多くの組合せを網羅することはできないので、一定圧力、流量のもとでスプレー水温と流量および燃料表面初期温度を振った影響を調べた。

3. 計測とデータ処理

計測データとして収録する計測項目は Table 3 に示されている。計測チャネルに空白があるのは、ROSA-III 総合試験における計測器⁽¹⁾ のうち、本スプレー実験で必要なものだけ同じチャネルに収録し、さらに本スプレー実験専用の計測器は空白チャネルの一部に収録したことによる。また、燃料棒表面温度の一部 (Ch-166 ~ Ch-207) は収録装置の部分的不調のため、前報の Run 37 以後、本報の Run まで本来の収録チャネル (Ch-78 ~ Ch-127) から移動させたものである。

各計測点の位置は、ループに関しては Fig. 1 に、またテスト部に関しては Fig. 5, 6, 10

実験条件

実験手順は始めにボイラーを 100°C 以上まで温度上昇させ、発生する蒸気を流量制御弁 CV-1 (Fig. 1) を調節して予熱回路 (MV-5 開) に通し、ダンプ・タンクと試験容器を予熱しつつ、圧力と温度を徐々に上昇させる。所定の圧力になったら MV-3 が開かれていれば、圧力制御弁 CV-2 が自動的に開き始める。クオリティを低くとる場合は V-1 を開いて水を混合する。本報の再冠水過程を対象とした実験では、炉心下端付近まで水を満たし、バイパス回路 (MV-1 閉, MV-2, 3 開) を使用して系圧力を一定にする。系全体が安定し、定常状態になったら、テスト・チャネルの燃料体に通電し、所定の温度にする。安定した所でスプレー注入を開始し、同時に炉心出力を所定の値に上昇させる。データはスプレー開始前から約 30 分記録する。燃料体保護のため、燃料棒表面温度が設定値を越えてしまったら、自動的に通電を停止するようになっている。

本装置で実施し得る実験条件は以下の様である。

系圧力 : $3 \sim 30 \text{ atm}$.

蒸気流量 : $\sim 400 \text{ kg/hr}$ (0.11 kg/s)

混合水流量 : $\sim 600 \text{ kg/hr}$ (0.167 kg/s)

クオリティ : $0 \sim 1$

スプレー水温 : 常温 $\sim 105^{\circ}\text{C}$

スプレー流量 : $\sim 100 \ell/\text{min}$ ($16.7 \ell/\text{s}$)

燃料体出力 : $\sim 1800 \text{ KW}$

燃料表面温度 : $\sim 900^{\circ}\text{C}$

出口管高さ、径 : 各 2 種

これらの条件範囲に対し、実施を予定した各実験 Run の実験条件と、本報に掲げる実験 Run で実際に行われた条件をそれぞれ Table 1, Table 2 に示す。Table 2 は炉心発熱実験のうち初期炉心水位を設定した再冠水実験であるが、各実験パラメータは多くの組合せを網羅することはできないので、一定圧力、流量のもとでスプレー水温と流量および燃料表面初期温度を振った影響を調べた。

3. 計測とデータ処理

計測データとして収録する計測項目は Table 3 に示されている。計測チャネルに空白があるのは、ROSA-III 総合試験における計測器⁽¹⁾ のうち、本スプレー実験で必要なものだけ同じチャネルに収録し、さらに本スプレー実験専用の計測器は空白チャネルの一部に収録したことによる。また、燃料棒表面温度の一部 (Ch-166 ~ Ch-207) は収録装置の部分的不調のため、前報の Run 37 以後、本報の Run まで本来の収録チャネル (Ch-78 ~ Ch-127) から移動させたものである。

各計測点の位置は、ループに関しては Fig. 1 に、またテスト部に関しては Fig. 5, 6, 10

~17に詳細に示されている。

本実験は ROSA-Ⅲ二次燃料集合体の A チャネルを使用して行われたものであり、他チャネルのデータは収録していない。収録装置と収録データの処理法は ROSA-Ⅲ 試験と同様であるが、計算式や算出される量に異なる点がある。これらの計算変数の意味とテープ編集上のチャネルをそれぞれ Fig.18, Table 4 に示す。また各計測変数の組合せ作図も、スプレー実験独自のものを作成している。これは後にデータ図で示される通り、同一の時間軸に対し、4種の縦軸を必要に応じて使用し、比較と図数の節減を計っている。出口挿入管の下端に設置した液面計の信号は、電圧値に相当するものをそのままデータとして示し、水位判定の材料としている。

4. 実験データと考察

データが示された 4 Run について、それぞれの結果の比較考察を以下に述べる。これらはあくまで発熱実験のみの相互比較からデータ上の事実として観測される事柄にここでは留め、より総合的、定量的な評価は別途行う予定である。

データを見る上での注意点

- (1) ダンプ・タンクの上部は、一定断面積でないので、水位がここに差しかかり、DP-3 の値が約 0.3 kg/cm^2 を越えた時刻からは WM-1 およびこれを用いた計算値 WW-1, WW-2, WM-2 の値は誤差が大きくなる。
- (2) Table 3 の計測値 Table 4 の計算値のうち、単なる確認用データであって意味の薄いもの、計測や計算結果が現状では不調と考えられるものは、データを示していない。
- (3) 燃料温度データは燃料体通電停止時刻(図番 9)に注意してみる必要がある。
- (4) スプレー水温 T-10 は、注入初期に約 2 分間ほどノズル近傍の熱伝導により高温となった水が注入され、これが急な凝縮減圧を防ぐ役を果している。

データ上的一般的観測事実とその評価

- (1) 実施した実験条件は、再冠水過程を対象としており、低圧であるため、出口弁(CV-2)における蒸気流量の制限範囲は低い。スプレー注入開始後しばらくは、系圧力上昇のため蒸気流量の不安定が生じる。炉心に落下した水の蒸発による蒸気流発生があっても、本報の各 Run では CCFL に至らなかった。ただ、Run 47 のみは全炉心を冷却した後、減圧による沸騰に起因するとみられる上部プレナム蓄水が観測された。
- (2) 炉心冷却状態は上部からのスプレー水によっては一般に悪く、下部からの冠水による冷却が行われるまでは温度上昇を続ける。従って、冠水の早かった Run 47 以外は比較的早期に燃料棒の制限温度である $700 \sim 800^\circ\text{C}$ に到達してしまい、電力遮断となっている。上部からの液膜による冷却は、Fig.19 に示すごとく、燃料棒の位置依存性が強く、不規則、非対称的で、一部に液膜のときれによる再温度上昇が生ずるなど不安定なものである。(例.Run 47, A-73, 75, 33 燃料棒等)

~17に詳細に示されている。

本実験は ROSA-Ⅲ二次燃料集合体の A チャネルを使用して行われたものであり、他チャネルのデータは収録していない。収録装置と収録データの処理法は ROSA-Ⅲ 試験と同様である⁽¹⁾が、計算式や算出される量に異なる点がある。これらの計算変数の意味とテープ編集上のチャネルをそれぞれ Fig.18, Table 4 に示す。また各計測変数の組合せ作図も、スプレー実験独自のものを作成している。これは後にデータ図で示される通り、同一の時間軸に対し、4種の縦軸を必要に応じて使用し、比較と図数の節減を計っている。出口挿入管の下端に設置した液面計の信号は、電圧値に相当するものをそのままデータとして示し、水位判定の材料としている。

4. 実験データと考察

データが示された 4 Run について、それぞれの結果の比較考察を以下に述べる。これらはあくまで発熱実験のみの相互比較からデータ上の事実として観測される事柄にここでは留め、より総合的、定量的な評価は別途行う予定である。

データを見る上での注意点

- (1) ダンプ・タンクの上部は、一定断面積でないので、水位がここに差しかかり、DP-3 の値が約 0.3 kg/cm^2 を越えた時刻からは WM-1 およびこれを用いた計算値 WW-1, WW-2, WM-2 の値は誤差が大きくなる。
- (2) Table 3 の計測値 Table 4 の計算値のうち、単なる確認用データであって意味の薄いもの、計測や計算結果が現状では不調と考えられるものは、データを示していない。
- (3) 燃料温度データは燃料体通電停止時刻(図番 9)に注意してみる必要がある。
- (4) スプレー水温 T-10 は、注入初期に約 2 分間ほどノズル近傍の熱伝導により高温となった水が注入され、これが急な凝縮減圧を防ぐ役を果している。

データ上的一般的観測事実とその評価

- (1) 実施した実験条件は、再冠水過程を対象としており、低圧であるため、出口弁(CV-2)における蒸気流量の制限範囲は低い。スプレー注入開始後しばらくは、系圧力上昇のため蒸気流量の不安定が生じる。炉心に落下した水の蒸発による蒸気流発生があっても、本報の各 Run では CCFL に至らなかった。ただ、Run 47 のみは全炉心を冷却した後、減圧による沸騰に起因するとみられる上部プレナム蓄水が観測された。
- (2) 炉心冷却状態は上部からのスプレー水によっては一般に悪く、下部からの冠水による冷却が行われるまでは温度上昇を続ける。従って、冠水の早かった Run 47 以外は比較的早期に燃料棒の制限温度である $700 \sim 800^\circ\text{C}$ に到達してしまい、電力遮断となっている。上部からの液膜による冷却は、Fig.19 に示すごとく、燃料棒の位置依存性が強く、不規則、非対称的で、一部に液膜のときれによる再温度上昇が生ずるなど不安定なものである。(例.Run 47, A-73, 75, 33 燃料棒等)

- (3) 下部からの冠水によるクエンチは、同一高さ断面では同時に生じており、低温水の注入ではスプレーのほぼ全量が炉心に蓄水するため、冠水速度は一定に近く、クエンチ速度も一定に近くなっている。
- (4) 上部タイプレートへの過熱蒸気の到来が観察されたのは Run 4 8 の初期の短時間のみであった。これは落下水が過熱蒸気となって吹返されるのは、CCFLによって水落下量が少なくなっている時に生じやすいことを意味する。
- (5) 上部プレナム内温度分布は、タイプレート上面付近はほぼ常時飽和温度であるが、Run 4 8 の全炉心クエンチ終了後などでは、炉心からの蒸気流がなくなるため、未飽和度を示すようになる。スページャから 7cm 下方の屋根付の熱電対 T - 4 では通常 30 ~ 40°C の未飽和度を示す。

各実験パラメータの影響

Run 4 6 を再冠水模擬実験の基準実験とし、これとの比較で実験パラメータ (Table 2 に示す) について影響をみた結果を以下に述べる。

スプレー水温 (高 Run 4 5)

系外への流出水量は注入水温を約 100°C とした Run 4 5 の方が多くなった。蒸気の凝縮が少ないだけ蒸気流によるキャリーオーバーがされやすいためと思われる。この影響で炉心の冠水速度、クエンチはやや遅くなっている。

スプレー流量 (高 Run 4 7)

燃料体への通電は最後まで持続された。これは炉心への水落下量が通電時間中で比較すると Run 4 6 より多く、燃料温度上昇も遅かったことによる。通電が持続されたにもかかわらず、通電の停止された Run 4 6 よりも最高到達温度は全体に低く、クエンチ時刻は早い。クエンチは同一高さ断面の点ではほとんどが同時であることから、下部からの水位冠水によるものとみることができるが、水位上昇が 200 秒頃まではより急であったことが、よりよい冷却に寄与している。しかし Run 4 6 で通電停止した 140 秒頃以後で比べると、Fig. 20 に示すとく炉心水位上昇 (DP-1) は Run 4 6 の方が早く、水頭値も大で、ボイド率が相対的に少ないことがわかる。

初期燃料表面温度 (高 Run 4 8)

スプレー流量も 20 l/min と Run 4 7 と同じにしたので Run 4 7 と比較する。燃料表面温度の上昇速度は同じ程度であったが、初期設定値が Run 4 8 で高かったので制限温度の 800°C に 155 秒頃に達してしまい通電停止に至った。それ以後、炉心水頭は急速に上昇し、200 秒までには全点でクエンチに至っている。

5. 結 言

BWR - LOCA のスプレー冷却に関する個別効果実験を ROSA-Ⅲ 試験装置を用いて行ったが、本報の再冠水模擬実験シリーズの結果から、次のような事実が明らかになった。

- (1) 初期水位を炉心下端に設定し、下部からの蒸気流の代りに、バイパスラインを開け、上部プレナムへの蒸気流出入を自由にした状況では、炉心上部タイプレートにおけるスプレー水によるCCFLの発生はみられなかった。これは落下水の蒸発による蒸気流量のみでは、実施した条件では容易にCCFLを発生させる蒸気流量に至らないことを示すものである。しかしそスプレー流量を実炉比の $30\ell/\text{min}$ まで取ることができ、試験部チャネルの水位が不使用チャネルへ流れない構造となっていて、より速い冠水が可能であれば、より大きな蒸気発生が予想され、CCFLの発生の可能性は残る。
- (2) スプレーからの落下流による冷却は、吹込み蒸気がなく発生蒸気のみの状況でもやはり不規則、非対称になり易く、また局所的にとぎれ易い不安定なものである。従って安全解析上の熱伝達は保守的に扱う必要があろう。
- (3) 冠水による冷却が行われた場合は、十分な熱伝達が得られ、炉心発熱が続けられていてもクエンチに至らしめる。特にスプレー流量が多い場合は、水位のスウェルによる冠水が早期に行われ、以後よい冷却を持続する。
- (4) スプレー水温が高いと系外へ流出する流量が増える。これは炉心へ落下する時の水温はいずれの場合も飽和温度であるので、蒸気発生量に変りはなく、スプレー水の蒸気凝縮が少ないだけ、蒸気流によるキャリーオーバーが増えたものとみられる。

なお本実験の実施に当り、朝日秀男氏、関口修一氏を中心とする原子力エンジニアリングK.Kの方々の多大な努力があったことを付記し謝意を表したい。

参考文献

- (1) 傍島 真, 大崎秀機, 村田秀男「ROSA-Ⅲ試験の計測とデータ処理法」JAERI-M 8499, 1979.11.
- (2) M. SOBAJIMA, Y. ANODA et al. "Experiment Data of ROSA-Ⅲ Test Run 701 (Decay Heat Simulation Test with ECCS Activation)" JAERI-M 8604, 1979.12.
- (3) 日立製作所 「8×8型燃料集合体による炉心スプレー系の冷却能力に関する試験研究」昭和50年度原子力平和利用委託研究, 1976.9.
- (4) R. B. Duffey, M. C. Ackerman et al. "The Effect of Countercurrent Single and Two-phase Flows on the Quenching Rate of Hot Surfaces" Int. J. Multiphase Flow Vol. 4 pp117-140, 1978.
- (5) D. D. Jones "Subcooled Counter Current Flow Limiting Characteristics of the Upper Region of a BWR Fuel Bundle" NEDG-23549 1977.7.
- (6) M. NAITOH, K. CHINO et al. "Restrictive Effect of Ascending Steam on Falling Water during Top Spray Emergency Core Cooling" J. Nucl. Sci. Tech. 15(11), pp806~815. 1978.11.
- (7) G. B. Wallis "One-dimensional Two-phase Flow" McGraw-Hill.
- (8) 傍島 真, 村田秀男, 斯波正誼「ROSA-Ⅲによるスプレー冷却実験データ報告・1」JAERI-M 8760, 1980.3.

Table 1. Specified Experimental Conditions of Spray Cooling Tests

Run No.	System Press. atm	Steam Flow Rate Kg/h	Water Flow Rate Kg/h	Quality	Spray Temp. °C	Spray Flow Rate l/min	Fuel Power KW	Initial Peak Clad Temp. °C	Outlet Level	Outlet Diameter
1	5	100		1.0	25	5, 12.5			Low	Small
2	5	150				5, 12.5				
3	5	200				5, 15				
4	10	100				5, 12.5				
5	10	150				5, 10				
6	10	250				5, 12.5				
7	10	300				5, 15				
8	30	400				5, 12.5				
9	30	300				5, 10				
10	30	300				10	150	400		
11	30	250				5, 10				
12	30	400			100	5, 20				
13	30	300				5, 12.5				
14	30	250				5, 12.5				
15	10	300				5, 25				
16	10	250				5, 20				
17	30	300				15	150	400		
18	30	400			25	5, 15				Large
19	30	300				5, 12.5				
20	30	250				5, 10				
21	10	360				5, 15			High	
22	10	360	90	0.8		5, 12.5				
23	10	300	75	0.8		10	150	400		
24	10	300	75	0.8		5, 15				
25	30	400	100	0.8		5, 12.5			Low	Small
26	30	300	75	0.8		5, 10				
27	30	300	75	0.8		10	150	400		
28	10	250	62.5	0.8		5, 12.5				
29	10	250	62.5	0.8		10	150	400		
30	10	300	40	0.88		5, 15				
31	10	300	40	0.88		10	150	400		
32	5	200	50	0.8		5, 12.5				
33	5	175	43.8	0.8		5, 12.5				
34	5	175	43.8	0.8		10	150	400		
35	3	175	43.8	0.8		10	150	400		

Table 1. Continued

RUN No.	System Pressatg	Steam Flow Rate Kg/h	Water Flow Rate Kg/h	Quality	Spray Temp. °C	Spray Flow Rate ℓ/min	Fuel Power KW	Initial Peak Clad Temp. °C	Outlet Level	Outlet Diameter
36	10	300	100	0.75	25	10	150	400	Low	Small
37	10	300	100	0.75		5, 12.5				
38	10	300	75	0.8		15	150	400		
39	10	300	75			10	150	250		
40	10	300	75			10	150	550		
41	10	300	75			10	210	400		
42	10	300	75			10	320	400		
43	10	300	75		70	10	150	400		
44	10	300	75		100	10	150	400		
45	5	200		1.0	100	10	150	400		
46	5	200			25	10	150	400		
47	5	200				20	150	400		
48	5	200				20	150	550		

Table 2. Actual Conditions of Test Runs in the Present Report

RUN No.	System Press.atg	Steam Flow Rate Kg/h	Water Flow Rate Kg/h	Quality	Spray Temp. °C	Spray Flow Rate ℓ/min	Fuel Power KW	Initial Peak Clad Temp. °C	Outlet Level	Outlet Diameter
45	5.6	180		1.0	96	10	138	400	Low	Small
46	5.8	180			33	10	138	400		
47	5.8	180			34	20	138	400		
48	5.8	180			37	20	138	550		

Table 3 Measurement List for Spray Cooling Test(1)

Table 3 Measurement List for Spray Cooling Test(2)

Table 3 Measurement List for Spray Cooling Test(3)

CH No.	Item	Symb	Location	Range & Output	Accuracy	CH No.	Item	Symb	Location	Range & Output	Accuracy
201	Temp	TF2-18	A-33 Fuel Rod Pos. 3	0~120°C 0~10V	"						
202		TF2-19	" 4	"							
203		TF2-20	" 5	"							
204		TF2-21	" 6	"							
205		TF2-22	" 7	"							
206		TF2-23	A-35 Fuel Rod Pos 3	"		256	Temp	TB-1	C,B,In, Surface Pos A-1	0~97.6°C 0~10V	
207		TP2-24	" 4	"		257		2	A-1	"	
						258		3	A-3	"	
						259		4	A-4	"	
						260		5	A-5	"	
						261		6	A-6	"	
						262		7	A-7	"	
						263		8	C,B,In, Surface Pos A-8	"	
						264		9	A-9	"	
						265		10	A-10	"	
						266		11	A-11	"	
						267		12	A-12	"	
						268		13	A-13	"	
						269		14	A-14	"	
220	Temp	TF2-117	A-55 Tie Rod Pos. 1	0~97.6°C 0~10V							
221		TF2-118	" 2	"							
222		TF2-119	" 3	"							
223		TF2-120	" 4	"							
224		TF2-121	" 5	"							
225		TF2-122	" 6	"							
226		TF2-123	" 7	"		276	Temp	TP-7	Lower Pl Center Low	0~97.6°C 0~10V	
						277		TP-8	" " Bottom	"	
						278		TP-9	" Guide Tube	"	
						279		TP-10	" Outer Bottom	"	
						280		TG2-1	Upper Tieplate A Up.1	"	
						281		TG2-2	2	"	
						282		TG2-3	3	"	
						283		TG2-4	4	"	
						284		TG2-5	5	"	
						285		TG2-6	6	"	
						286		TG2-7	7	"	
						287		TG2-8	8	"	
						288		TG2-9	9	"	
						289		TG2-10	10	"	
						290		TG2-11	Upper Tieplate A Low.1	"	
						291		TG2-12	12	"	
						292		TG2-13	13	"	
						293		TG2-14	14	"	
						294		TG2-15	15	"	
						295		TG2-16	16	"	
						296		TG2-17	17	"	
						297		TG2-18	18	"	
248	Temp	TC-1	Channel Box A Outlet	0~97.6°C 0~10C		298		TG2-19	19	"	
249		TC-2	Channel Box A Outlet	"		299		TG2-20	20	"	
						300					

Table 4. List of Variables Calculated from Test Data.

CHNo.	Item	Symb.	Location	Range & Output
401				
402				
403				
404				
405				
406				
407				
408				
409				
410				
411	Flow	W - 1	Vessel Inlet	0 - 0.36 Kg/s
412		W - 2	LPCS Injection	0 - 1.2 Kg/s
413		W - 3	Subtracted Fall	0 - 1.2 Kg/s
414		W - 4	Vessel Outlet	0 - 1.2 Kg/s
415		W - 5	Secondary Water	0 - 6.0 Kg/s
416	Flow	WW- 1	Dump Tank Increase	0 - 1.2 Kg/s
417		WW- 2	Core-LP Increase	-0.2- 1.0 Kg/s
418		WW- 3	Upper Plenum Increase	-0.2- 1.0 Kg/s
419	Flow	WS - 0	Steam Rise	-0.6- 0.6 Kg/s
420		WS - 1	Steam Generation	-0.2- 1.0 Kg/s
421		WS - 2	Steam Condensation	-0.2- 1.0 Kg/s
422		WS - 3	Net Steam Increase	-0.6- 0.6 Kg/s
423	Mass	WM - 1	Dump Tank Water	0 - 360 Kg
424		WM - 2	Core-LP Water	0 - 240 Kg
425		WM - 3	Upper Plenum Water	0 - 18 Kg
426	Mass	WT - 2	Total Injected Water	0 - 600 Kg
427	Quality	X - 1	Vessel Inlet	0 - 1.2 -
428		X - 4	Vessel Outlet	0 - 1.2 -
429	Heat	QD - 1	Core Input	0 - 120 Kcal/s
430		QD - 2	System Loss	0 - 12 Kcal/s
431		QD - 3	Core Storage	-40- 80 Kcal/s
432		Q - 1	Core Input	0 - 120 Mcal
433		Q - 2	System Loss	0 - 12 Mcal
434		Q - 3	Core Storage	-40- 80 Mcal

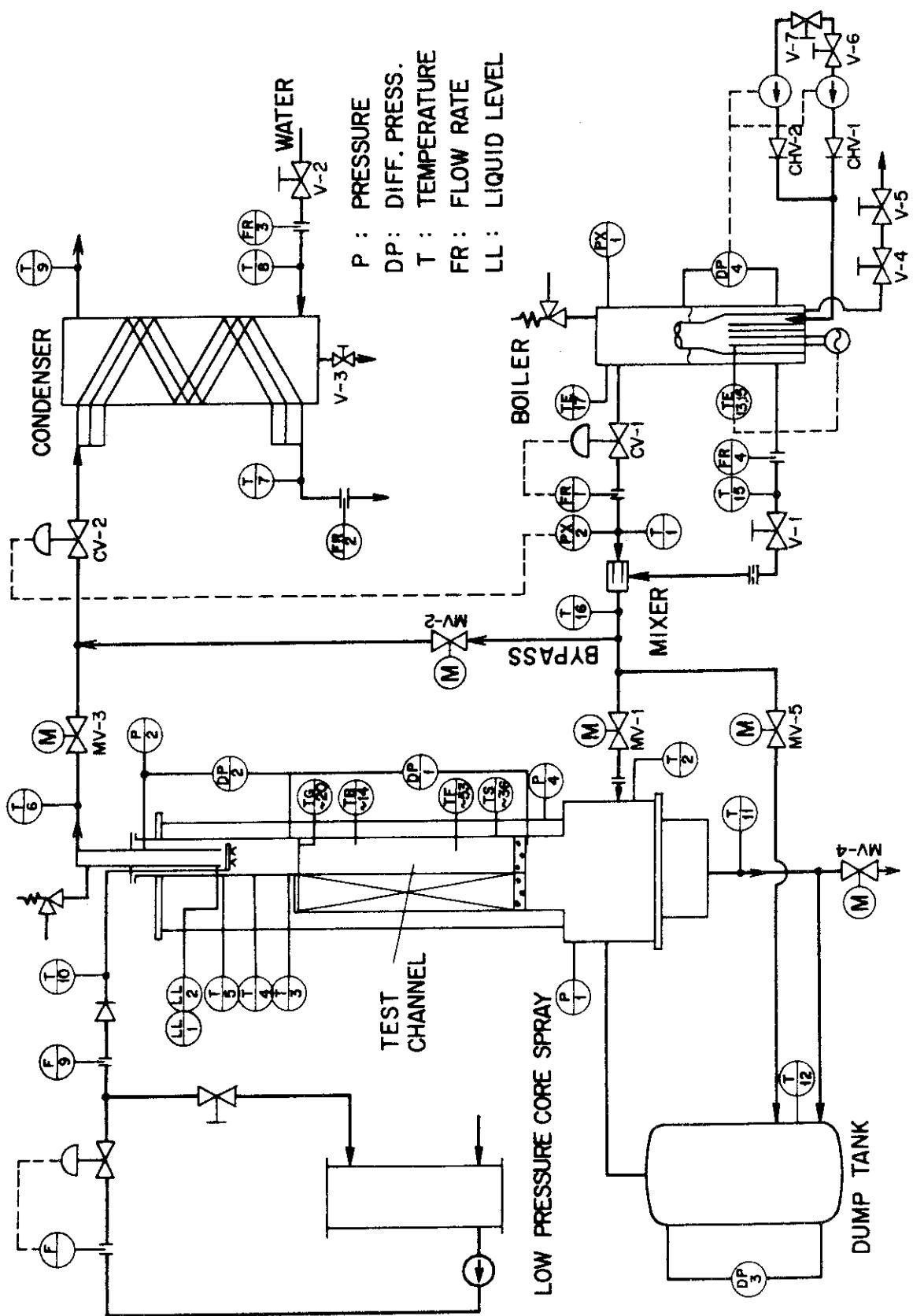


Fig. 1 FLOW DIAGRAM OF SPRAY COOLING TEST

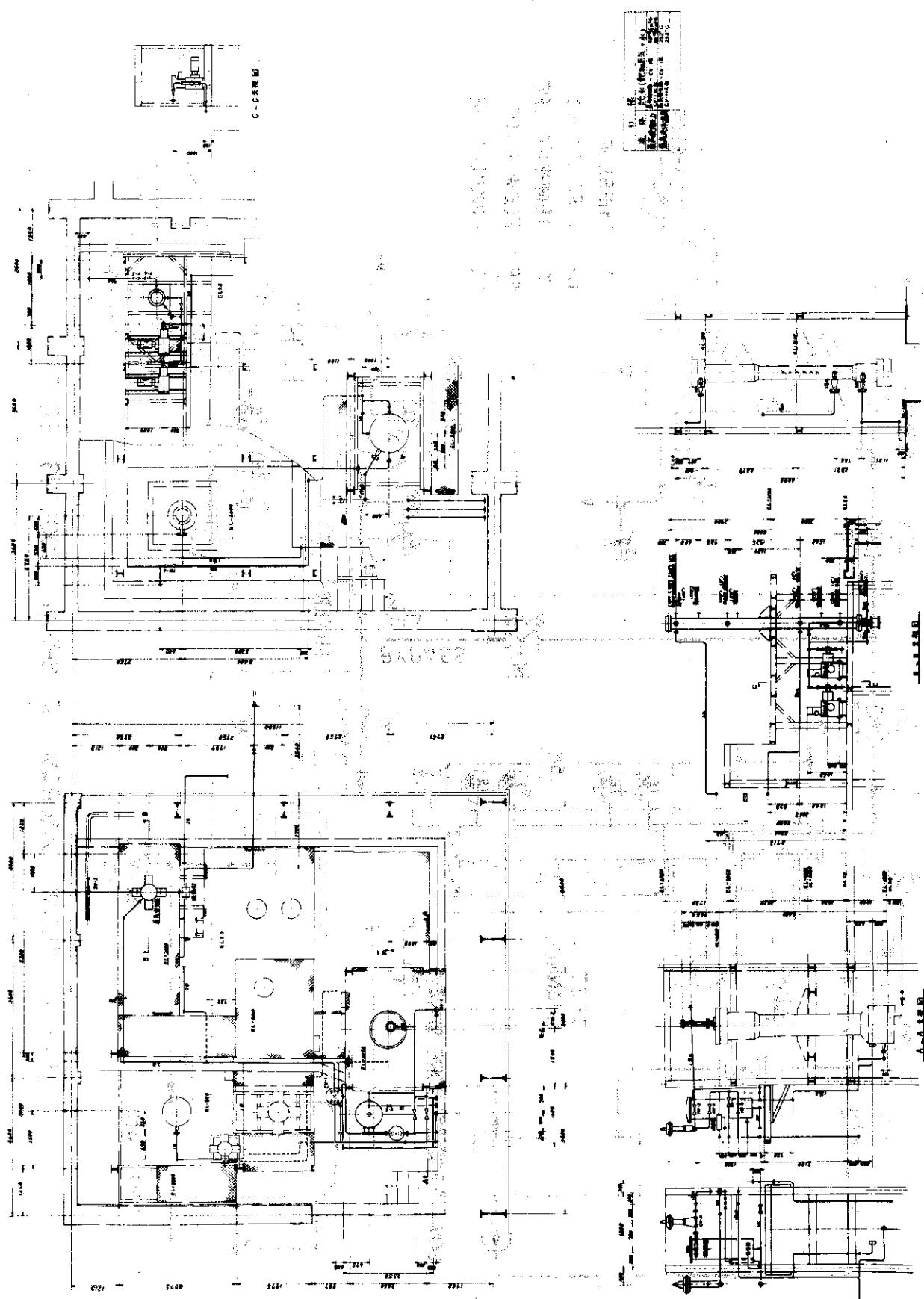


Fig. 2 Disposition of Components of Facility

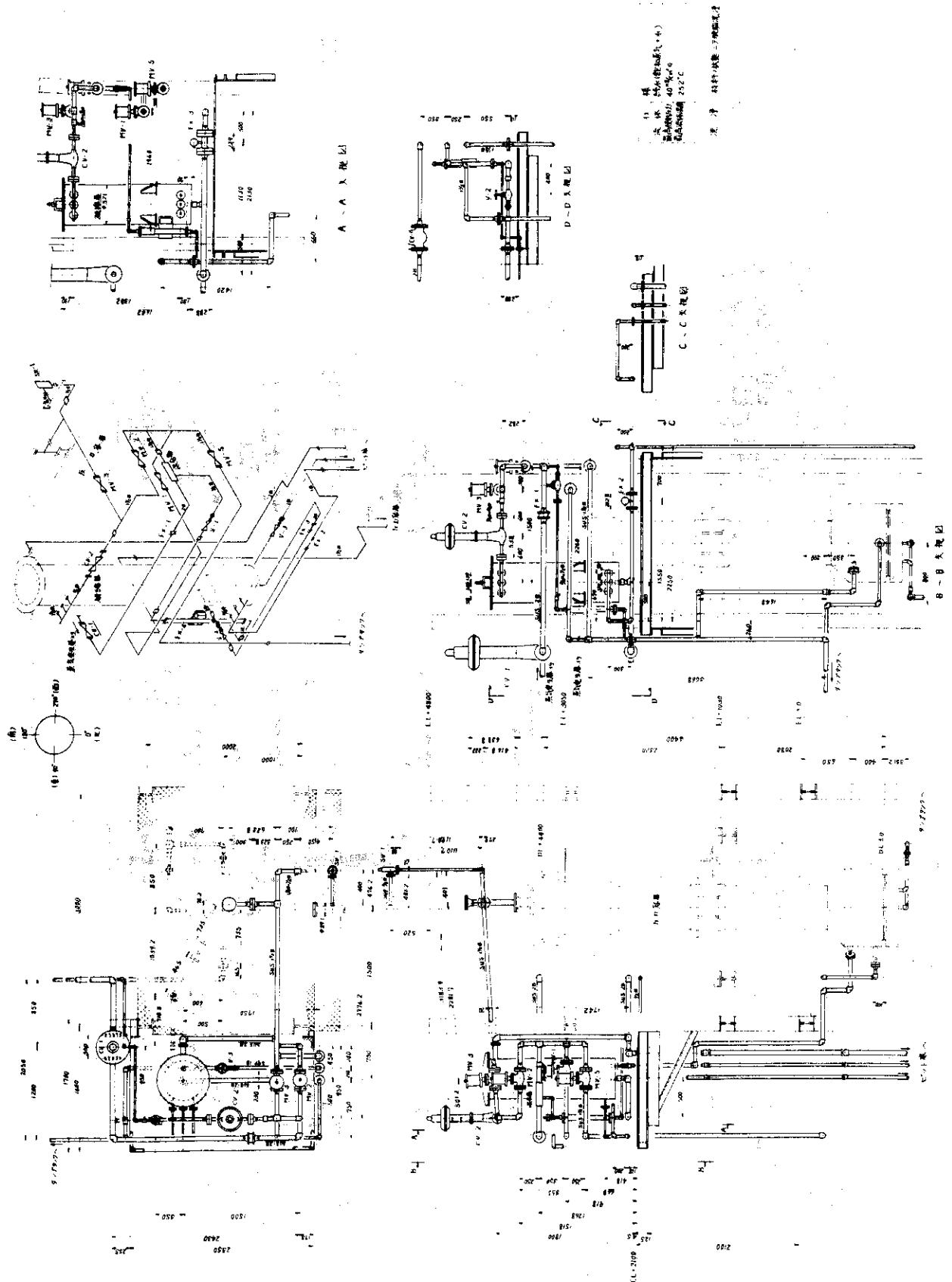


Fig. 3 Piping Composition of Facility

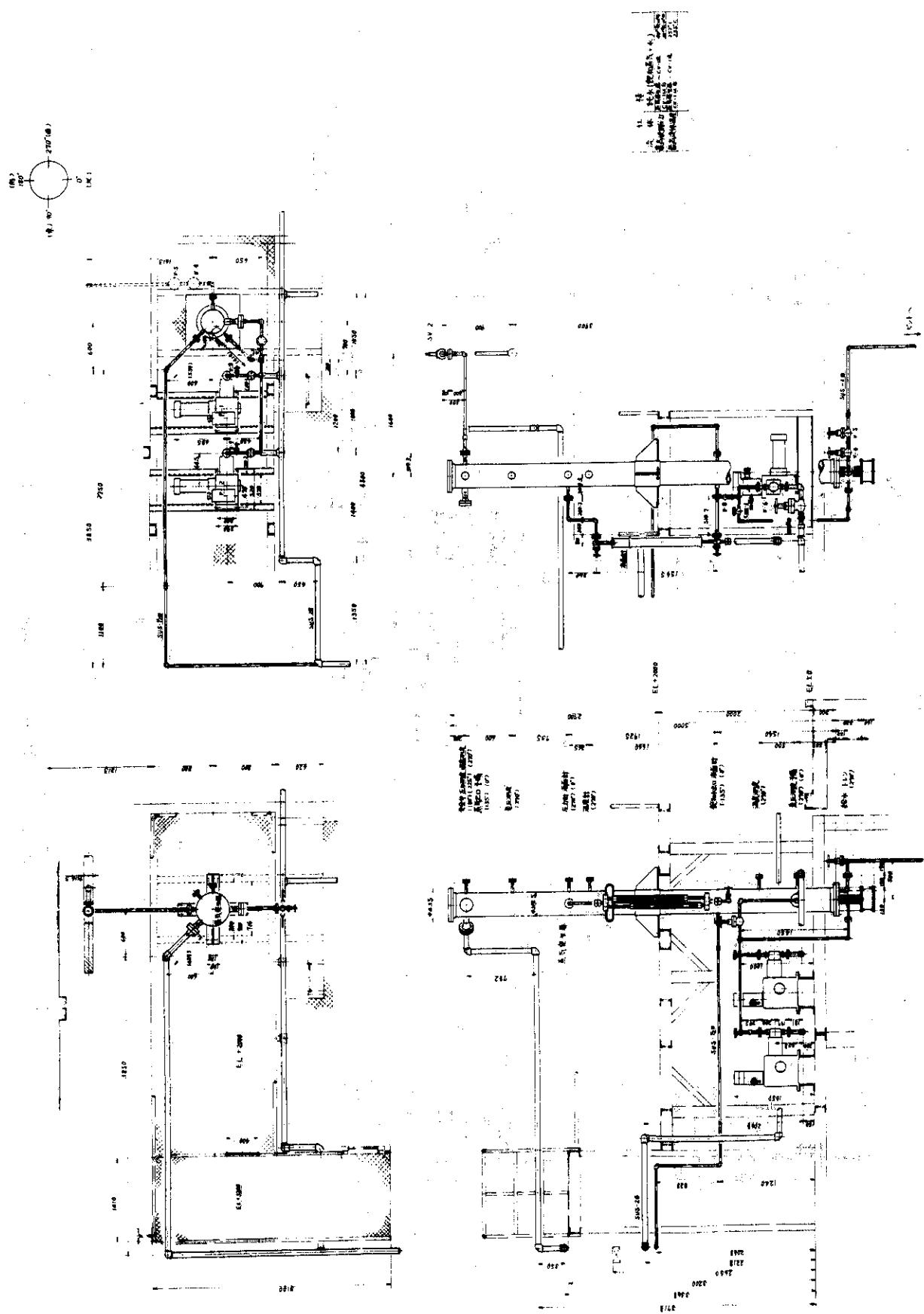


Fig. 4 Piping around Steam Generator

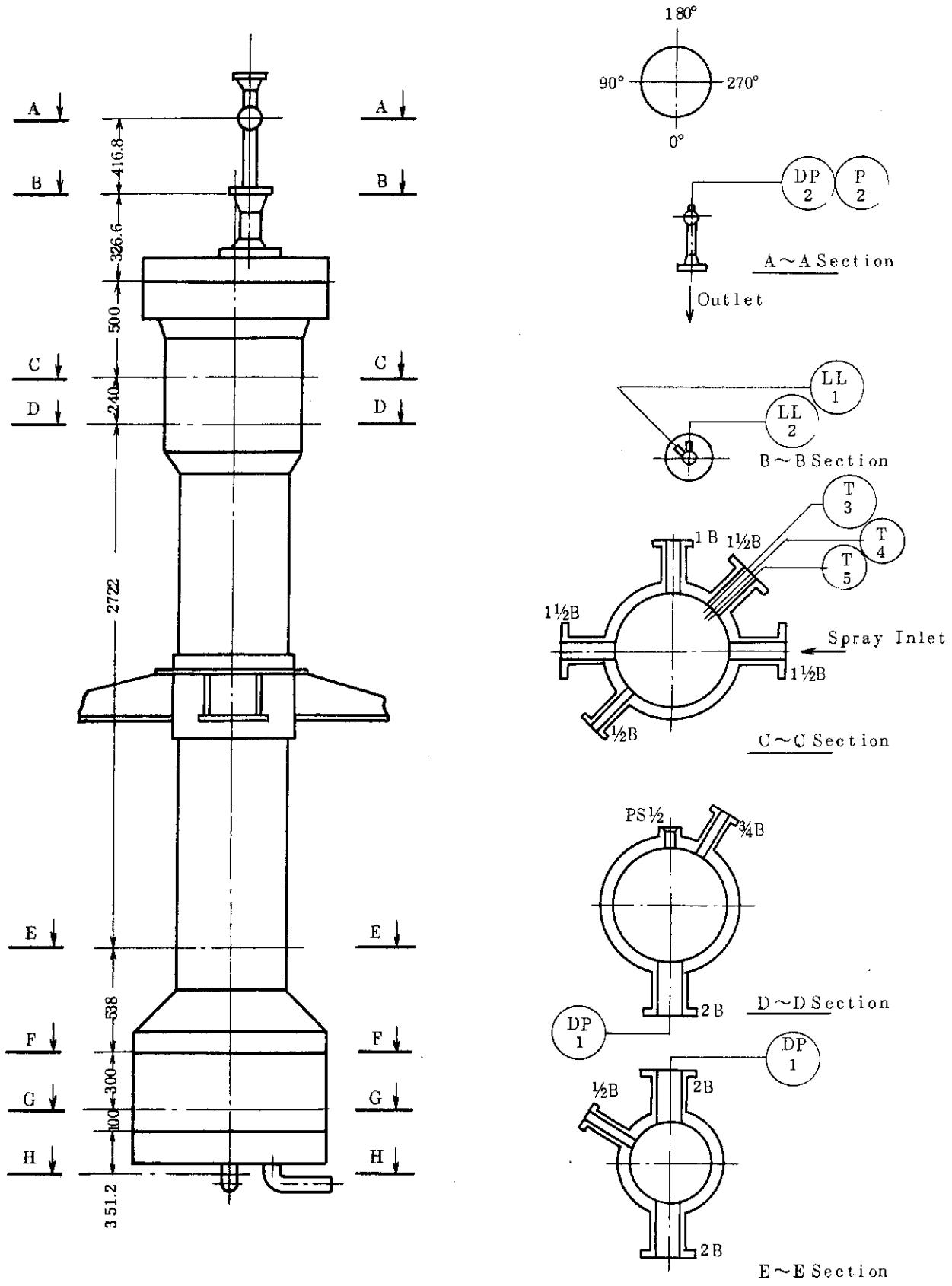


Fig. 5(1) Test Vessel and Its Nozzles

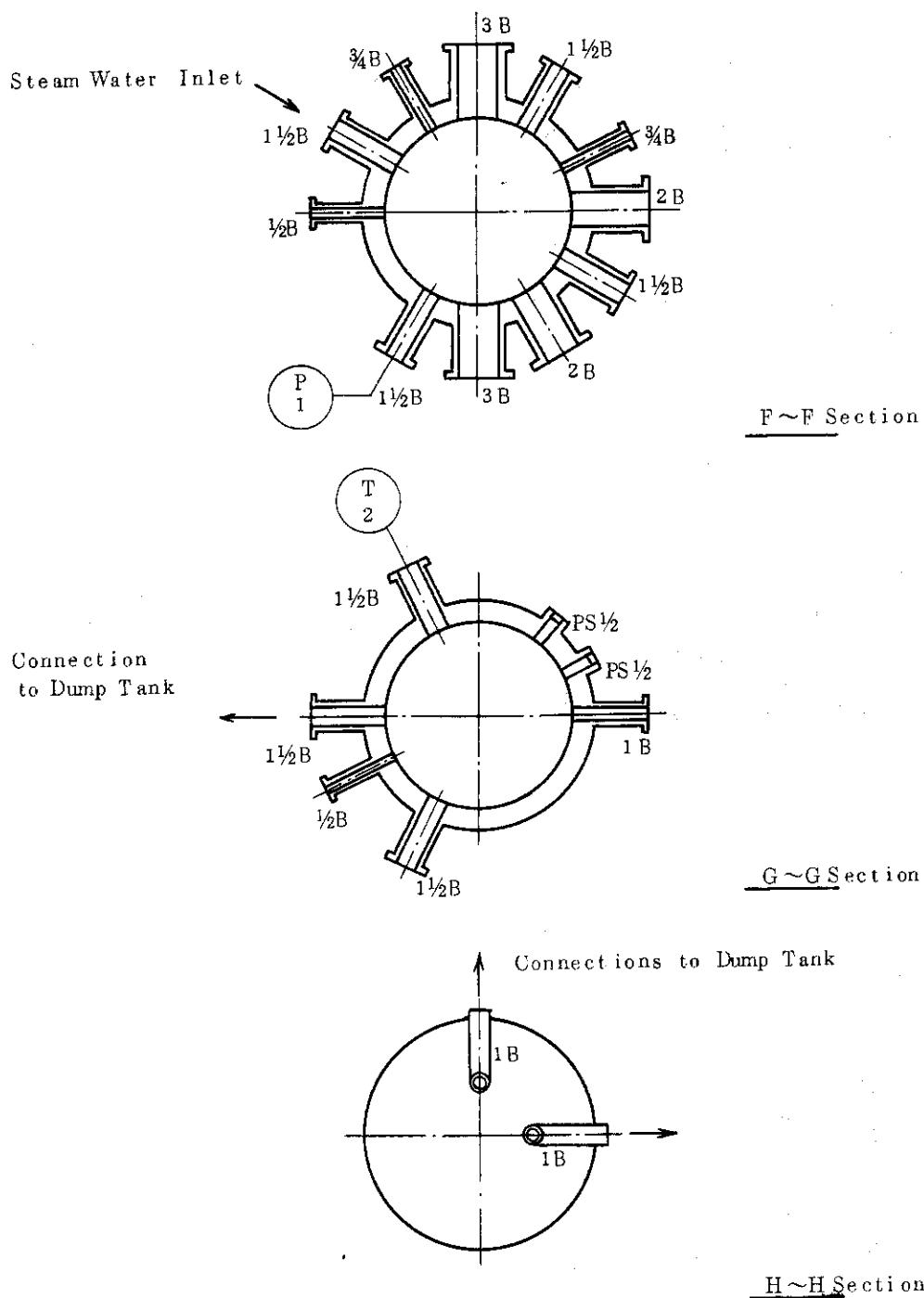


Fig. 5 (2)

JAERI-M 9080

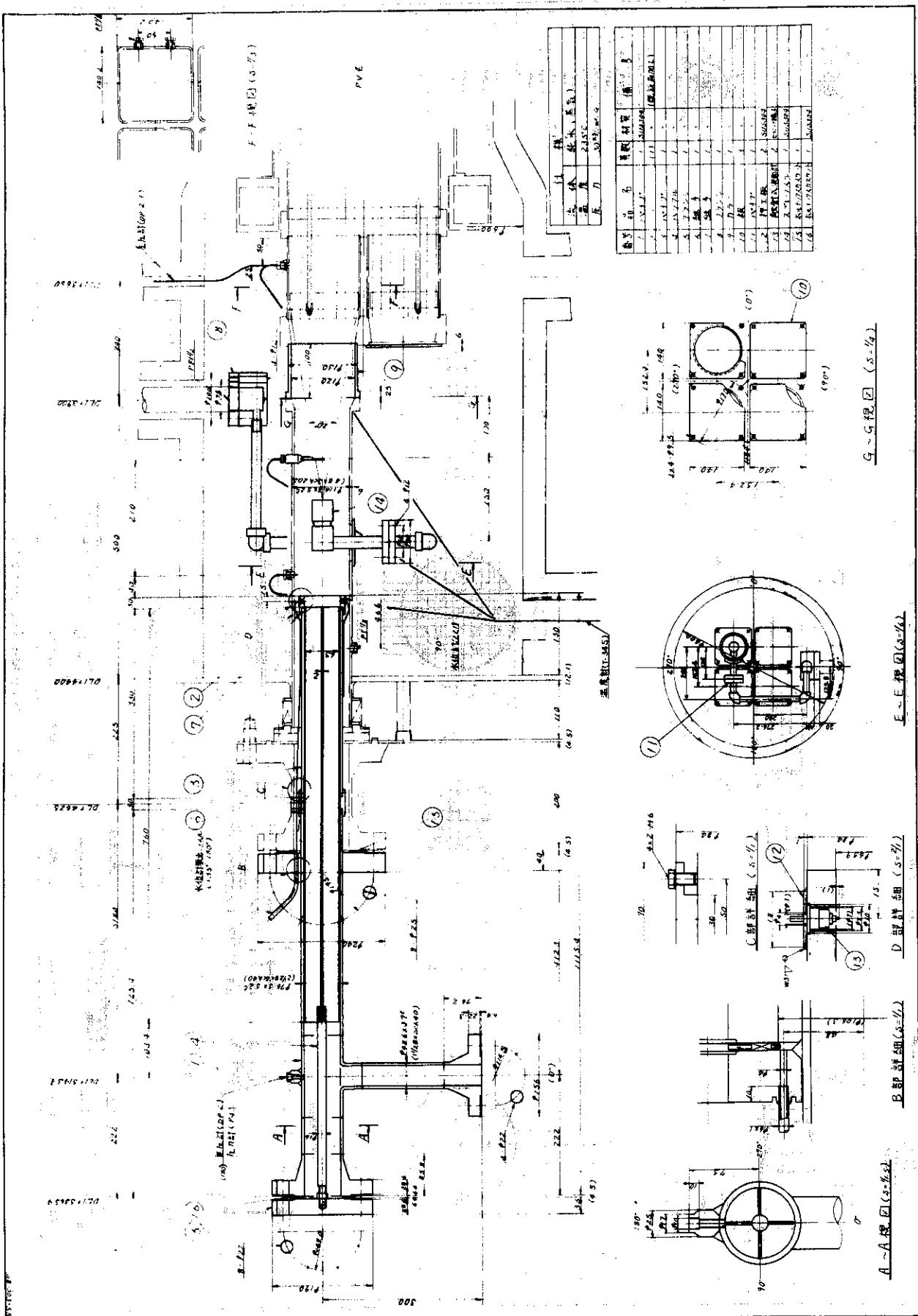


Fig. 6 Composition of Upper Plenum

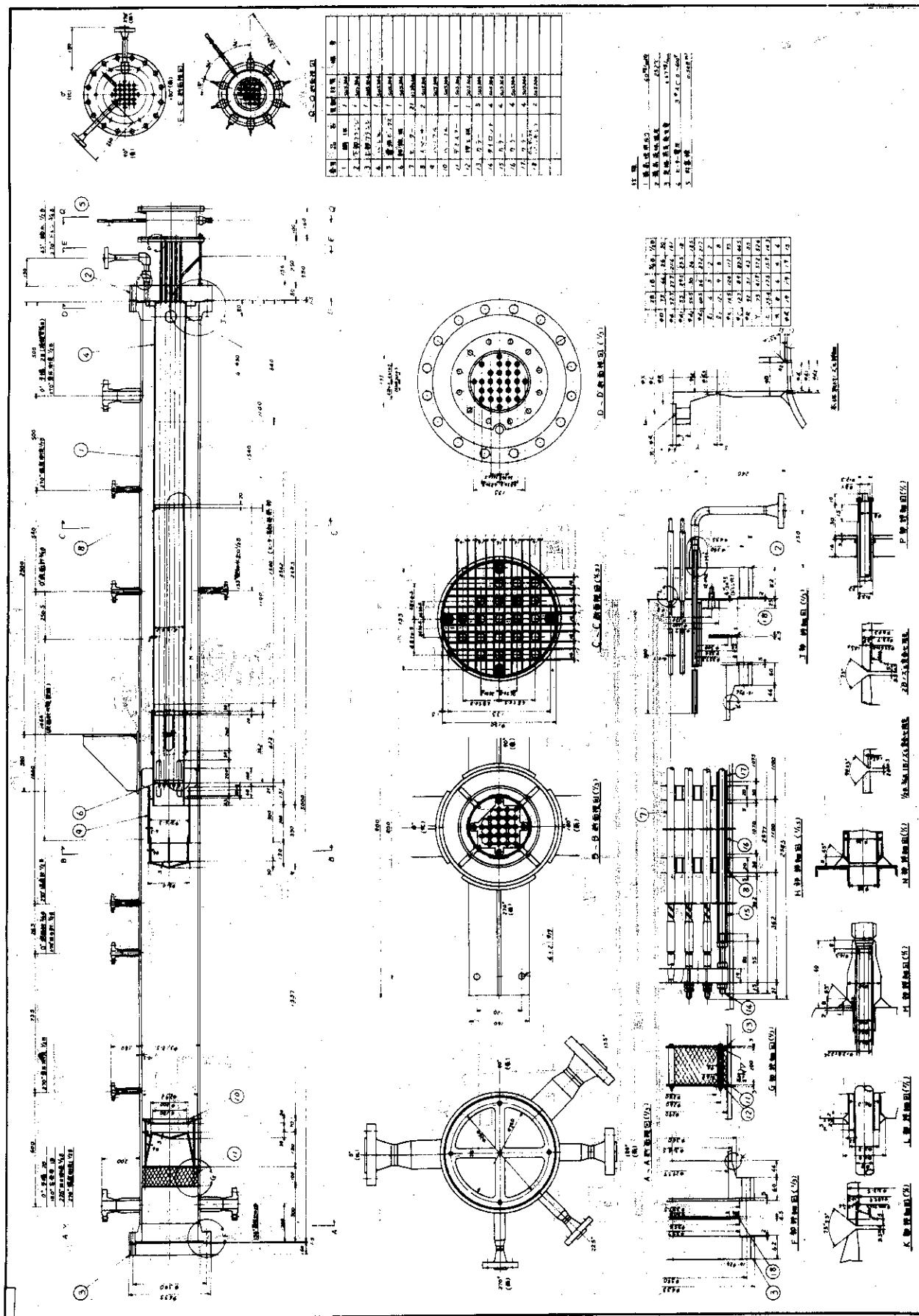


Fig. 7 Steam Generator

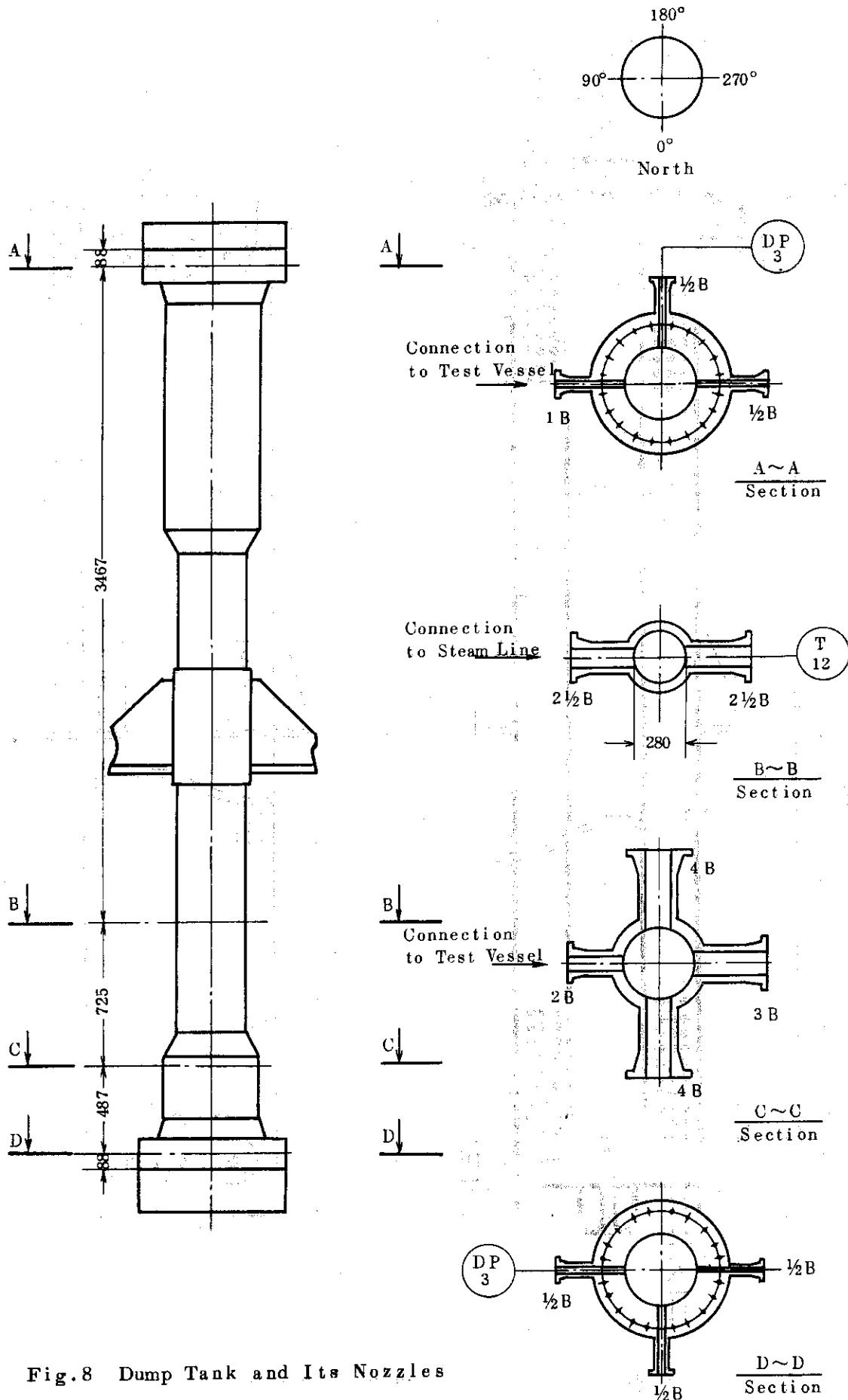


Fig. 8 Dump Tank and Its Nozzles

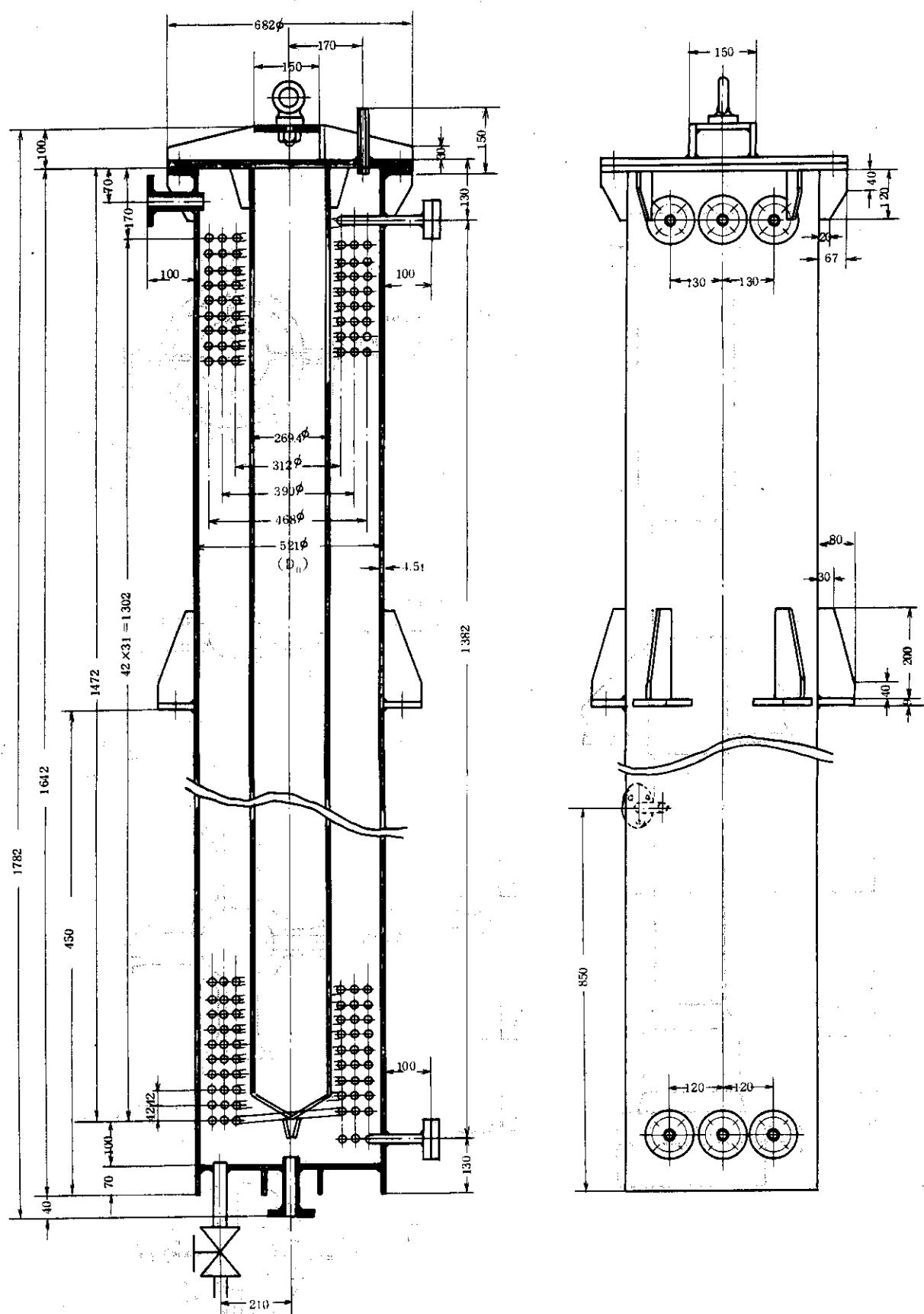


Fig. 9 Constitution of Condenser

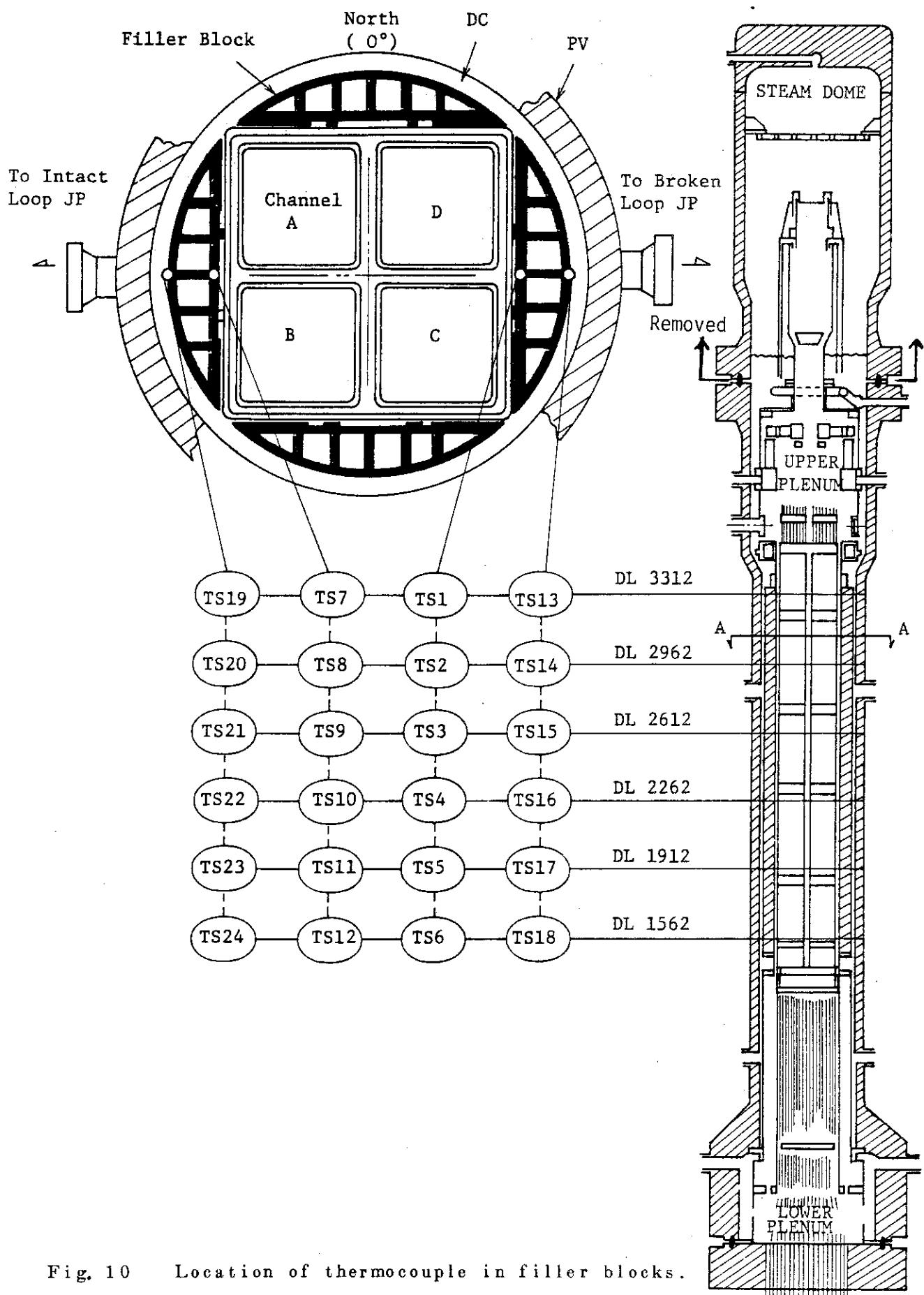


Fig. 10 Location of thermocouple in filler blocks.

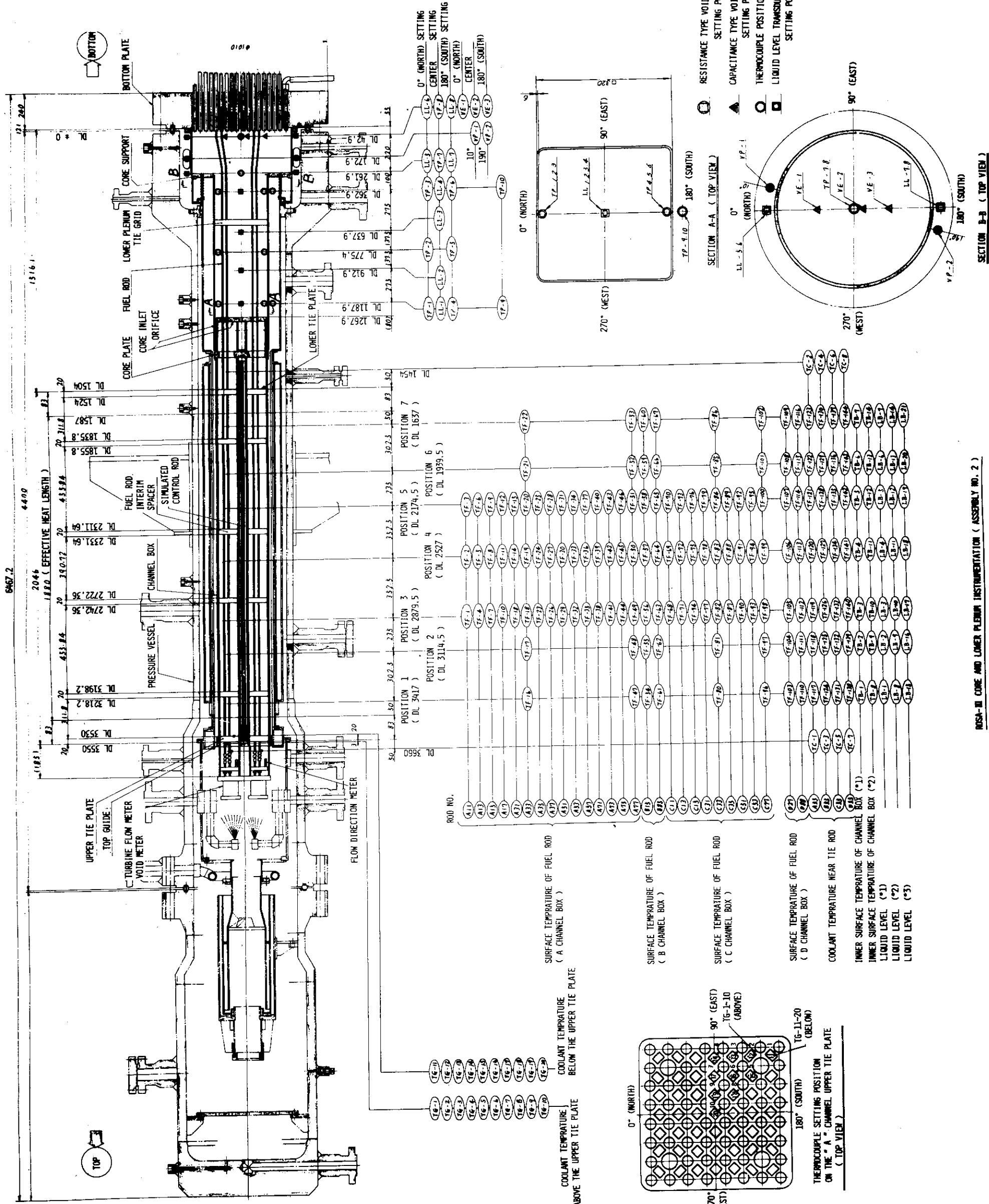


Fig. 11 Instrumentation inside the Test Vessel
MESA-II CONE AND LOWER PLenum INSTRUMENTATION (ASSEMBLY NO. 2)

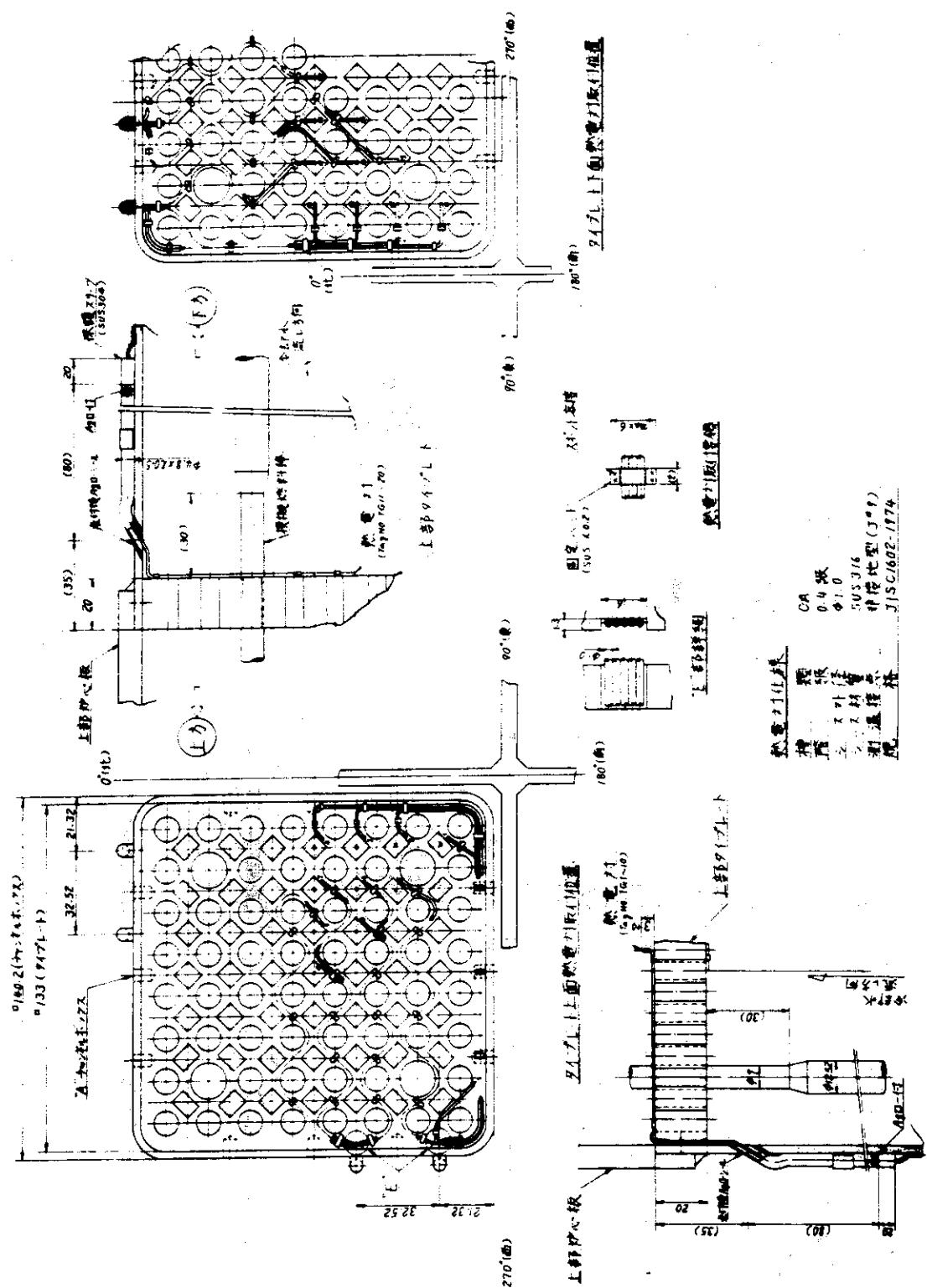


Fig. 12 Upper Tieplate Composition and Thermo Couples

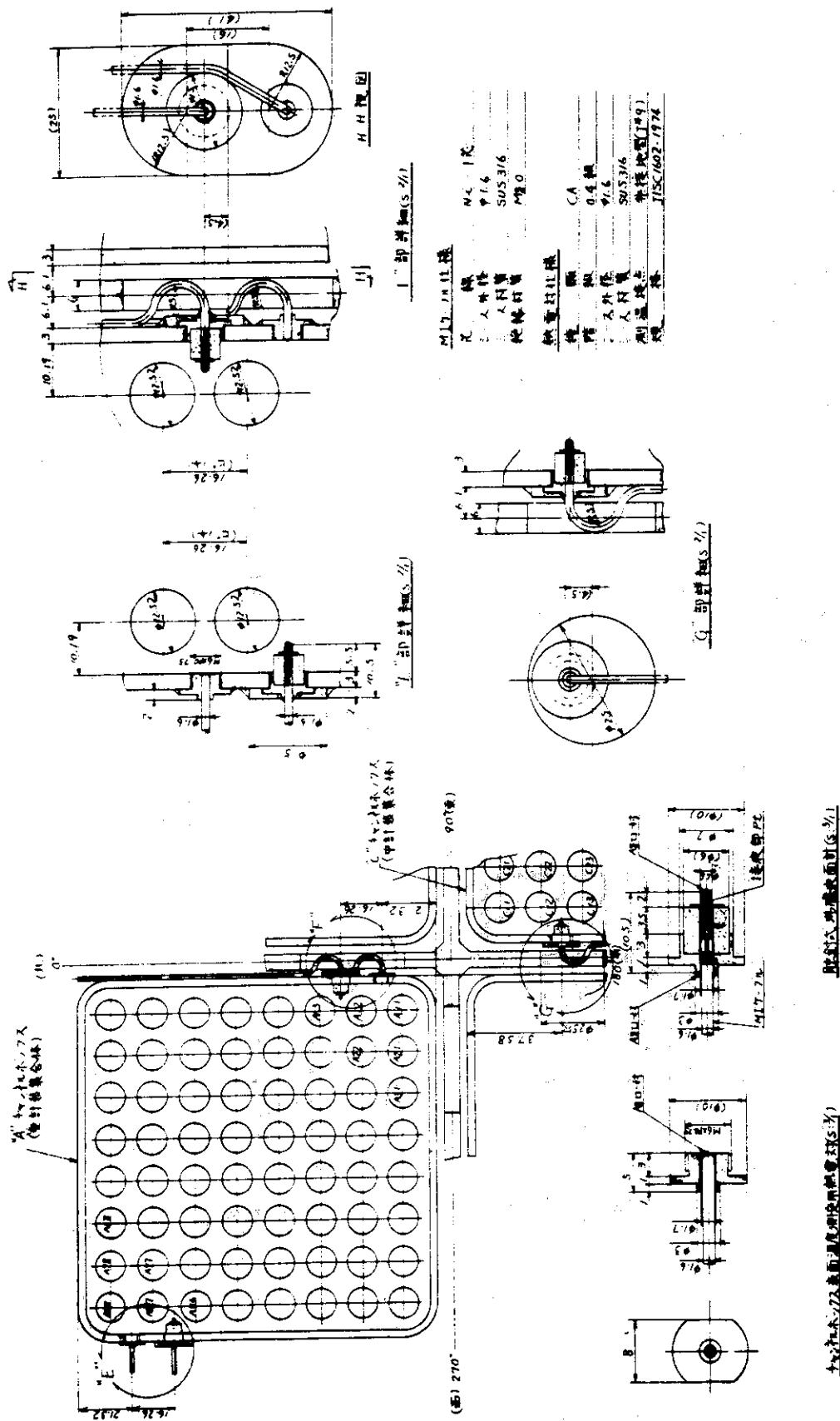
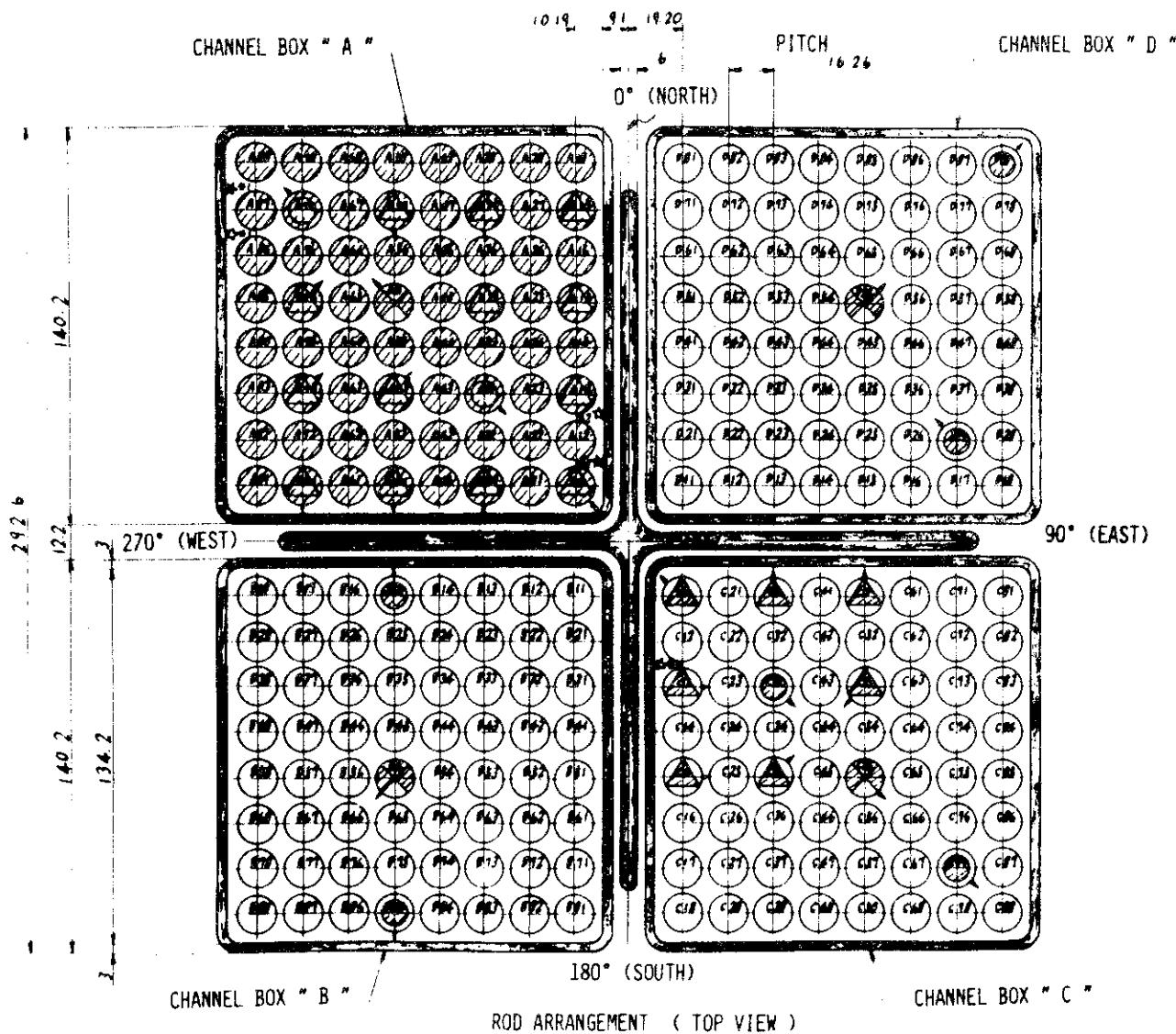


Fig. 13 Channel Box Instrumentation

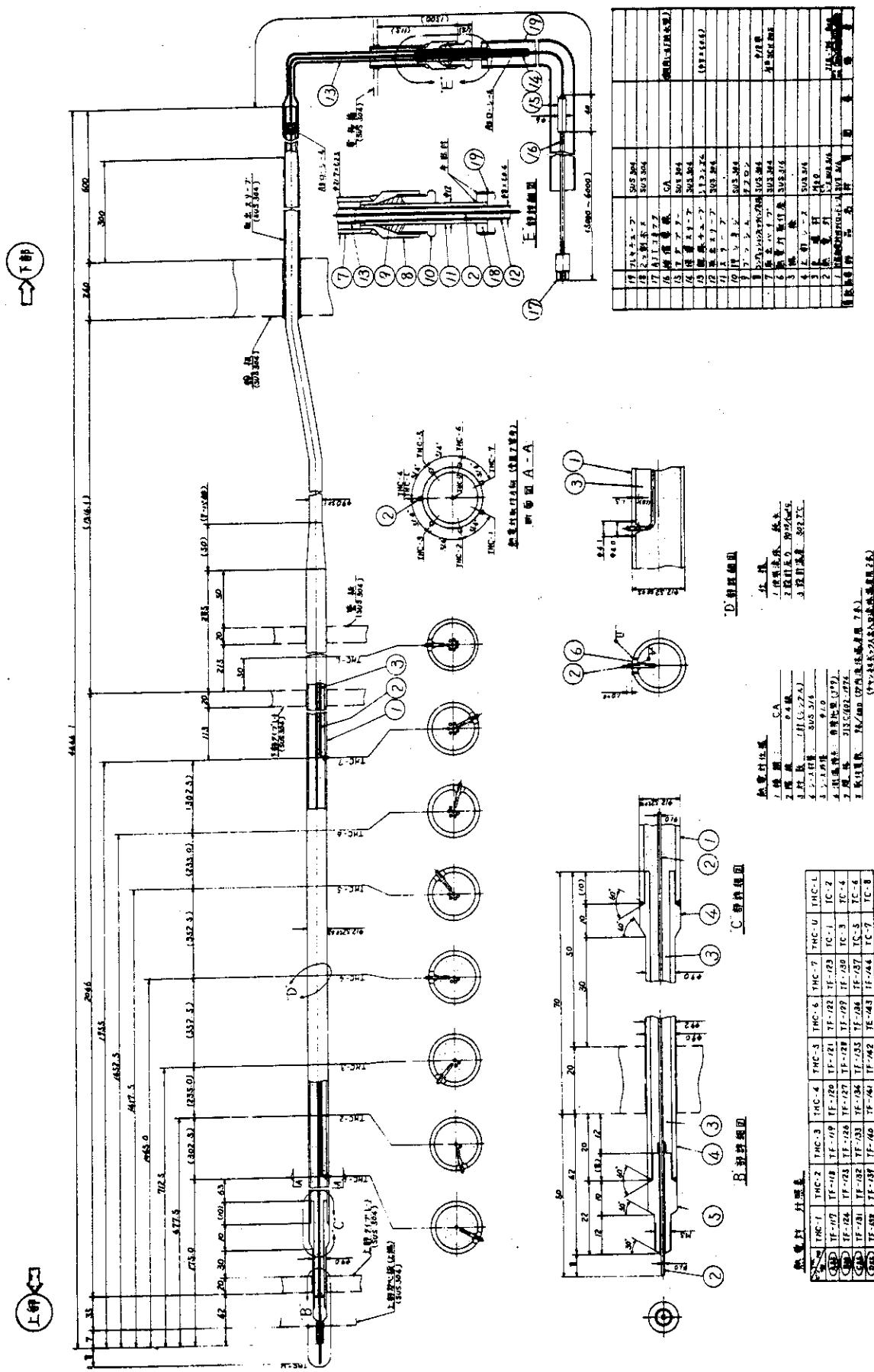


- HIGH HEAT FLUX INSTRUMENTED (7 COUPLES/ROD) HEATER ROD 2 RODS
 - HIGH HEAT FLUX INSTRUMENTED (3 COUPLES/ROD) HEATER ROD 13 RODS
 - HIGH HEAT FLUX HEATER ROD 48 RODS
 - LOW HEAT FLUX INSTRUMENTED (7 COUPLES/ROD) HEATER ROD 6 RODS
 - LOW HEAT FLUX INSTRUMENTED (3 COUPLES/ROD) HEATER ROD 7 RODS
 - LOW HEAT FLUX HEATER ROD 176 RODS
 - INSTRUMENTED (7 COUPLES/ROD) TIE ROD 4 RODS
- TOTAL 256 RODS

THERMOCOUPLE FOR MEASURING INNER SURFACE TEMPERATURE
ON CHANNEL BOX 14 COUPLES

- ★ LIQUID LEVEL TRANSDUCER 21 SETS
- ! ANGULAR ORIENTATION OF THERMOCOUPLE (POSITION 4)

Fig. 14 ROSA-III CORE MAP (ASSEMBLY No.2)
Channel "A" is used in Spray Cooling Test



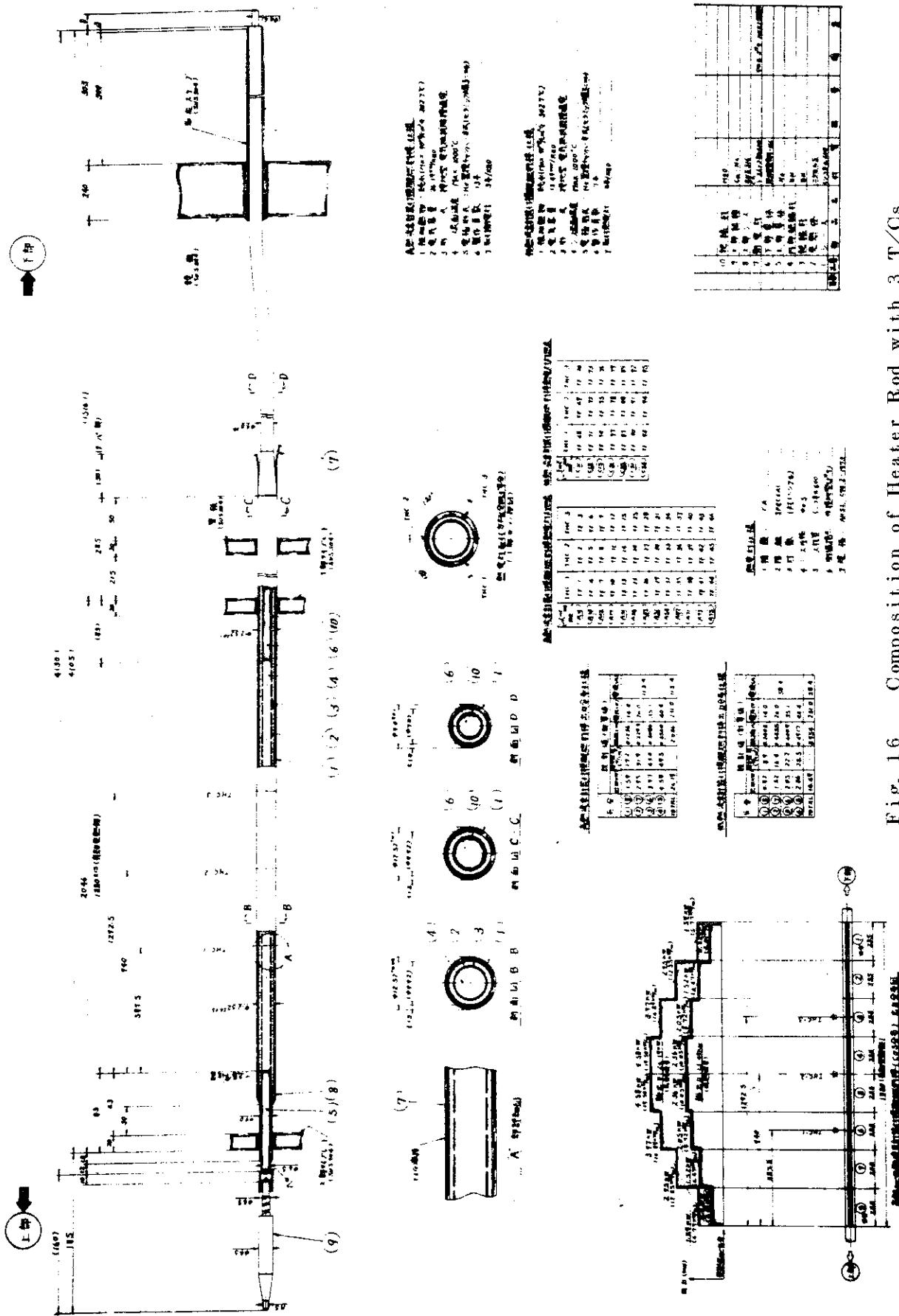


Fig. 16 Composition of Heater Rod with 3 T/Cs.

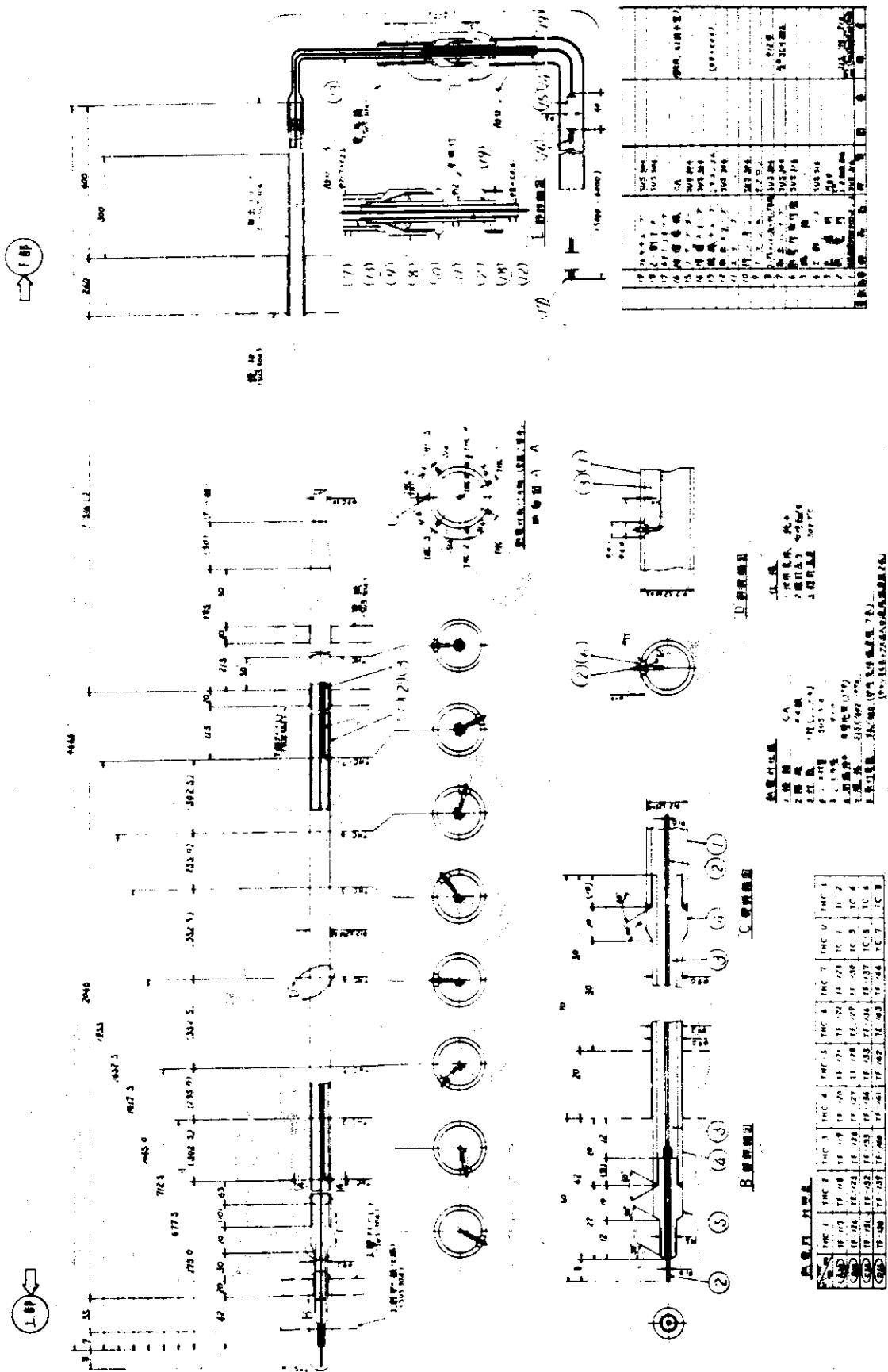
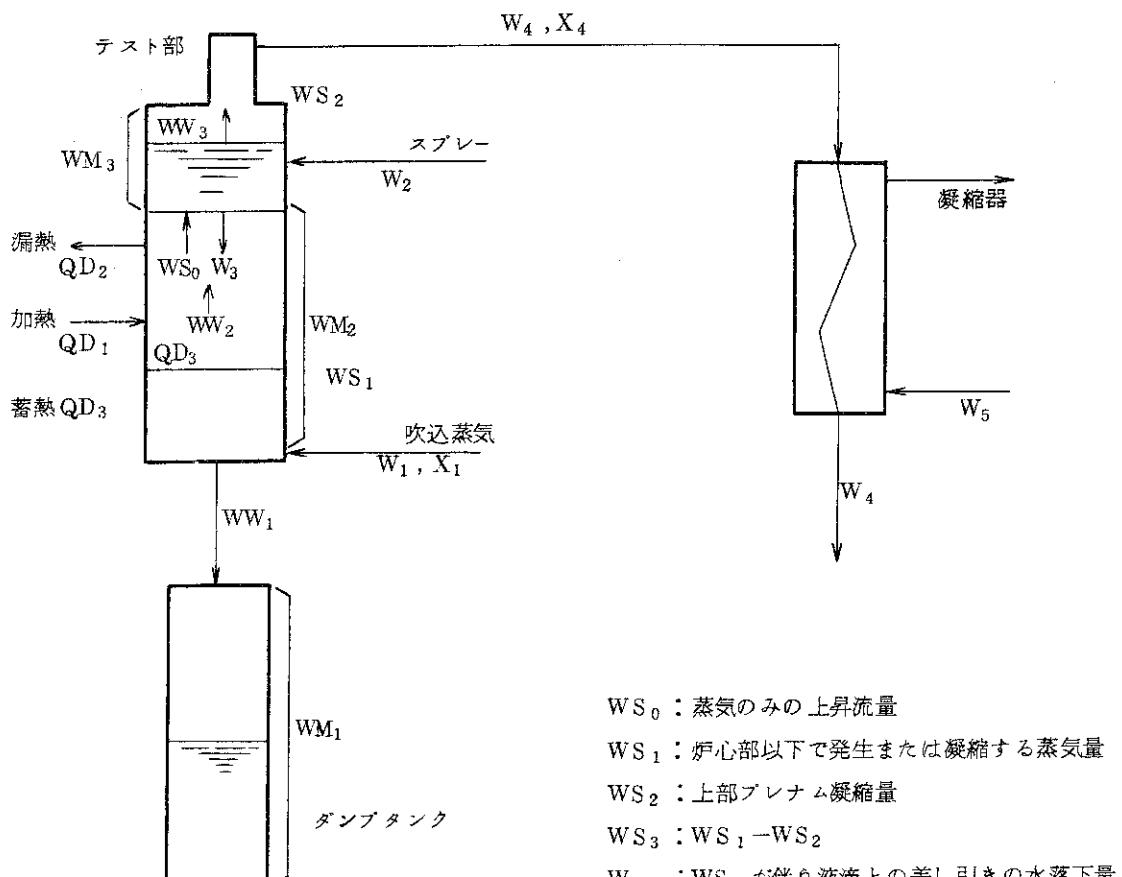


Fig. 17 Composition of Unheated Rod with 7 T/Cs.



Q_i : QD_i の時間積分値

Fig. 18 Definition of Variables for Flow Calculations

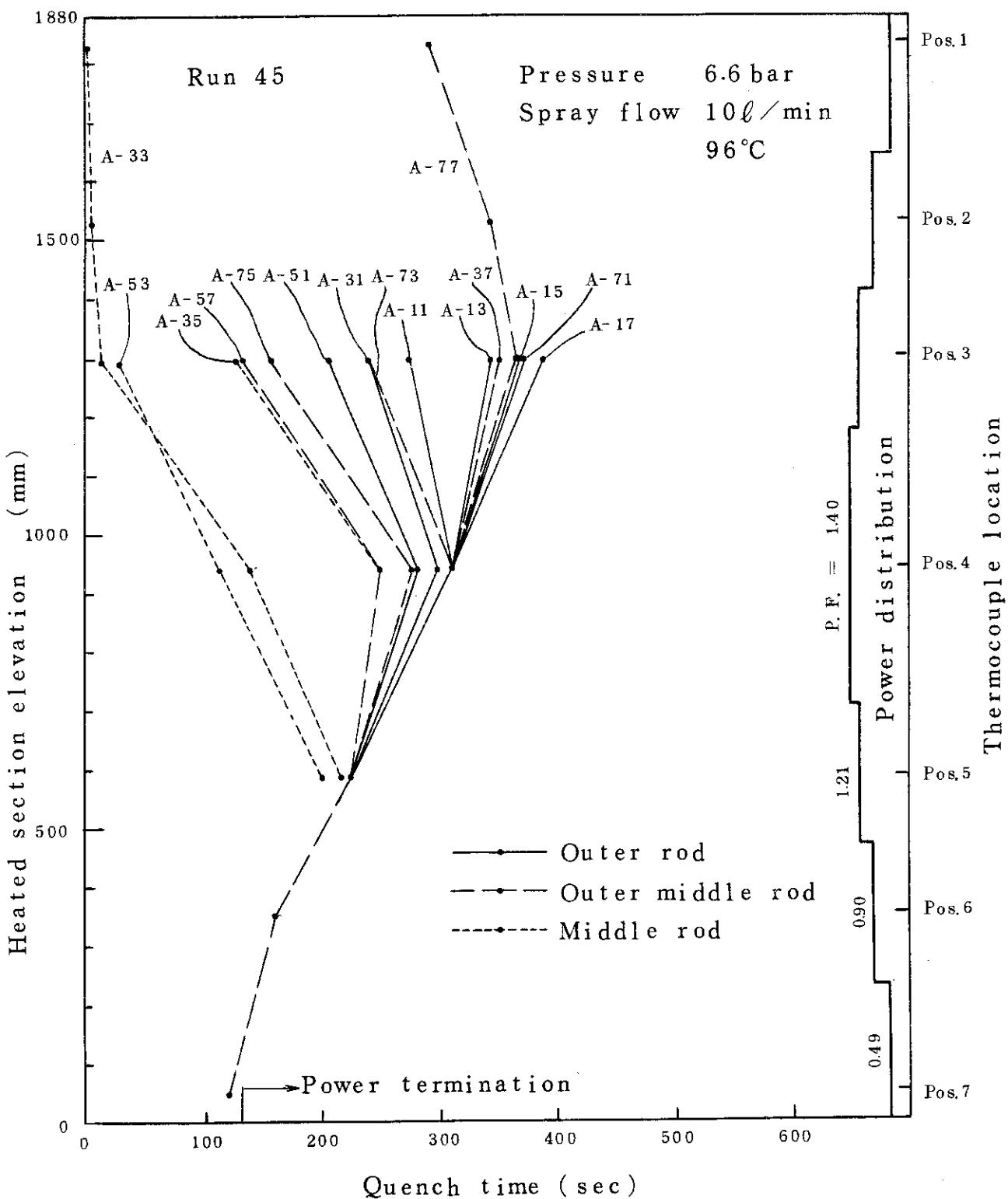


Fig. 19 An example of irregular quench behavior of rods in a bundle during spray with reflood state

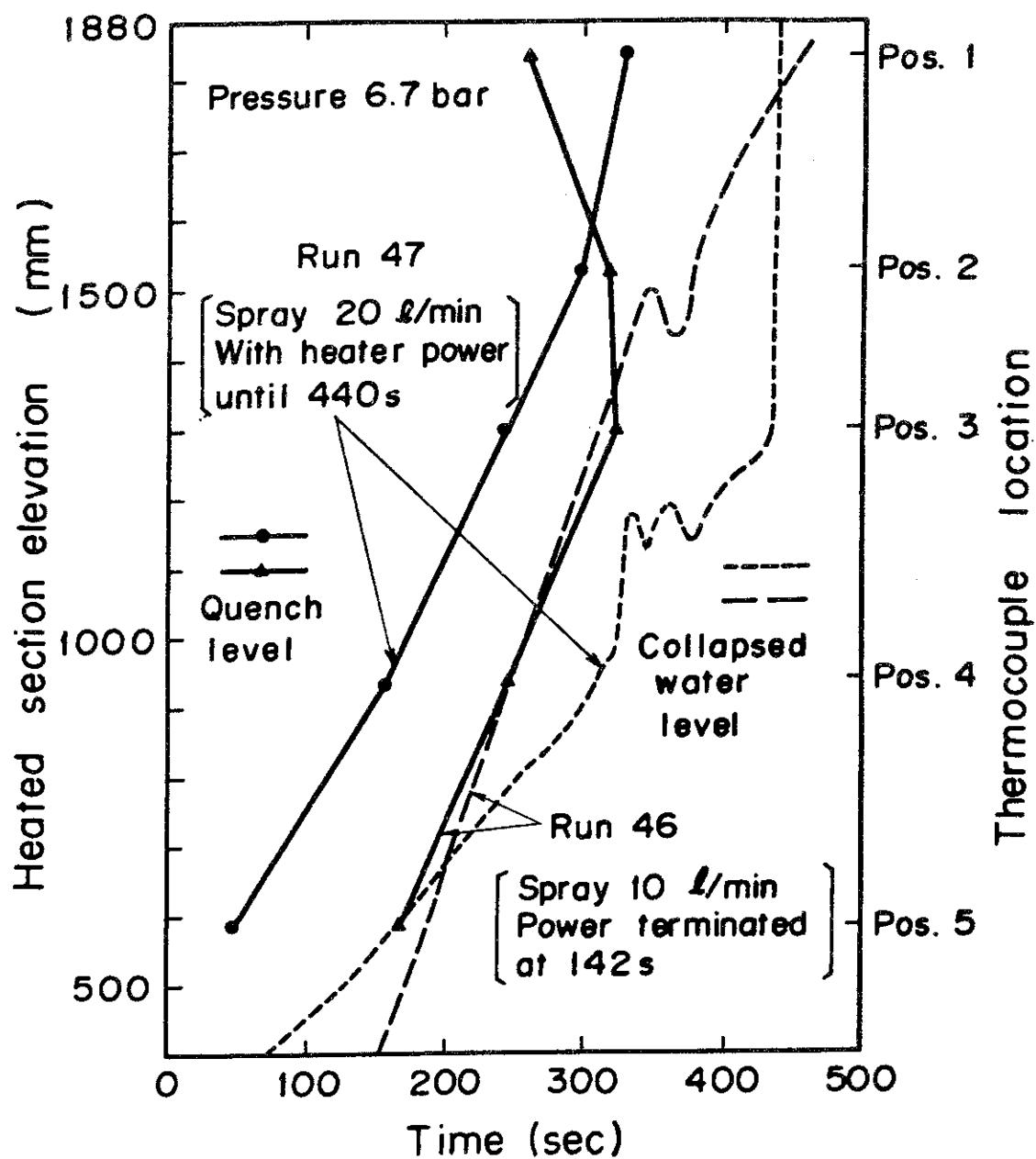
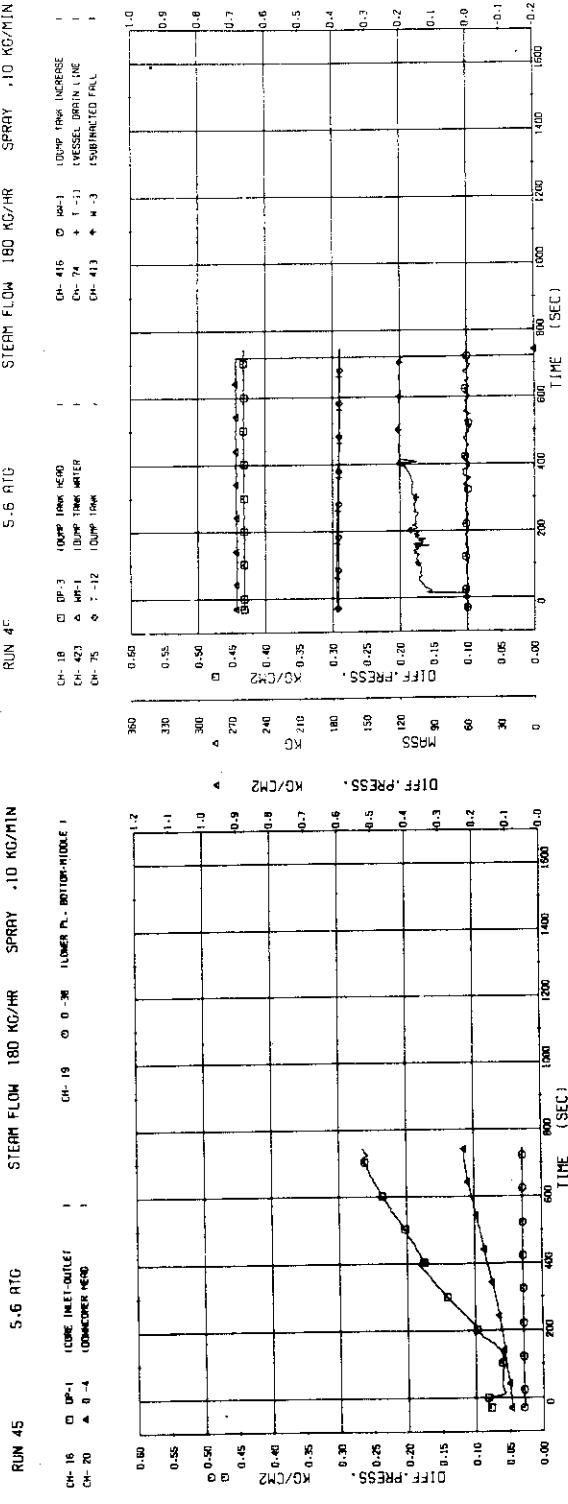
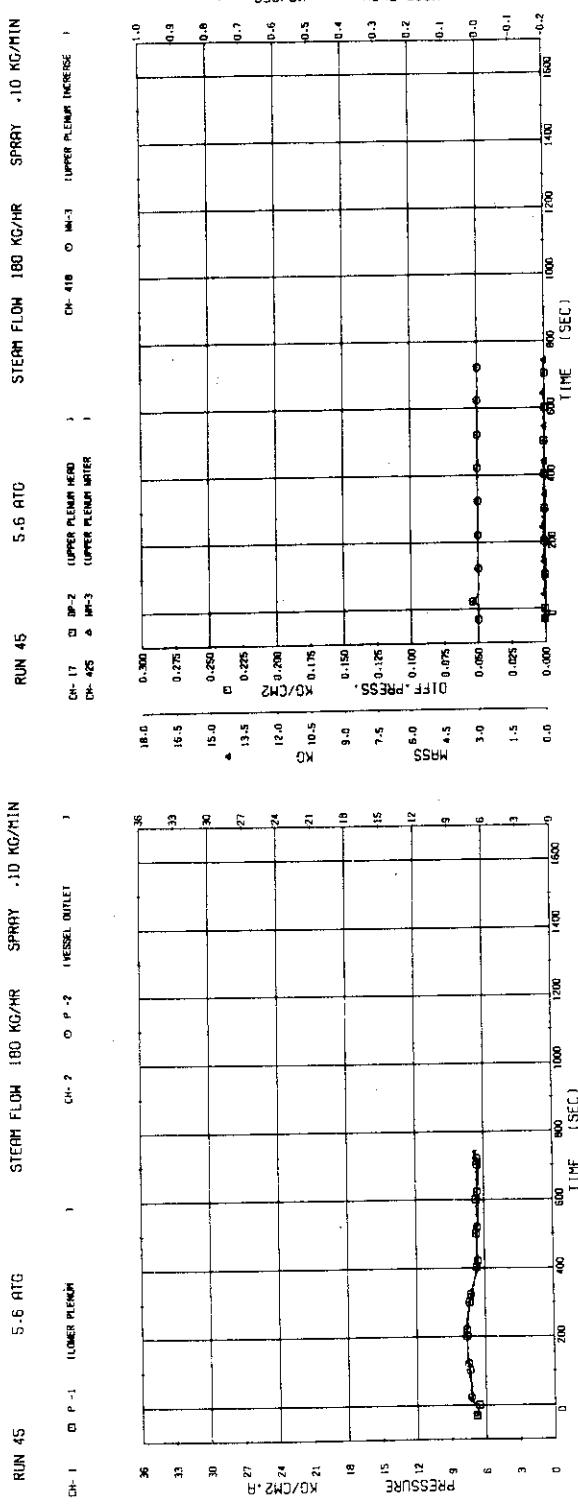
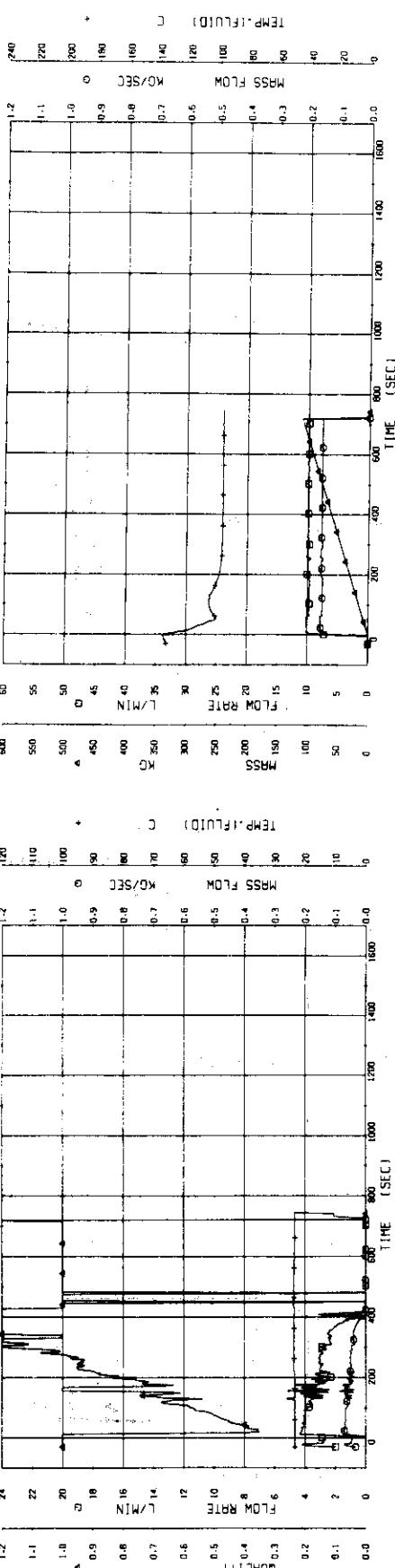
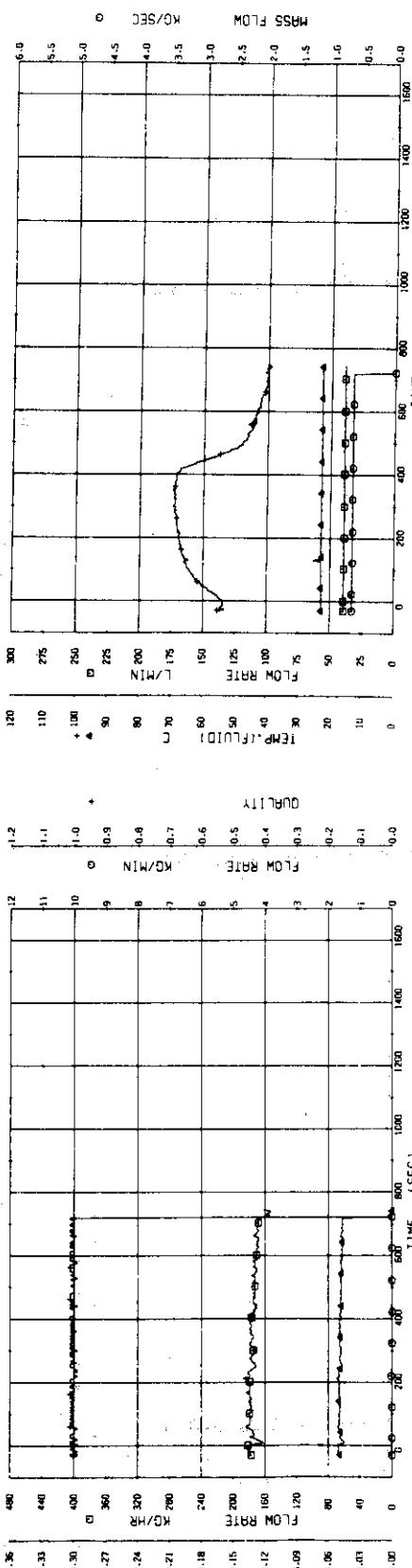


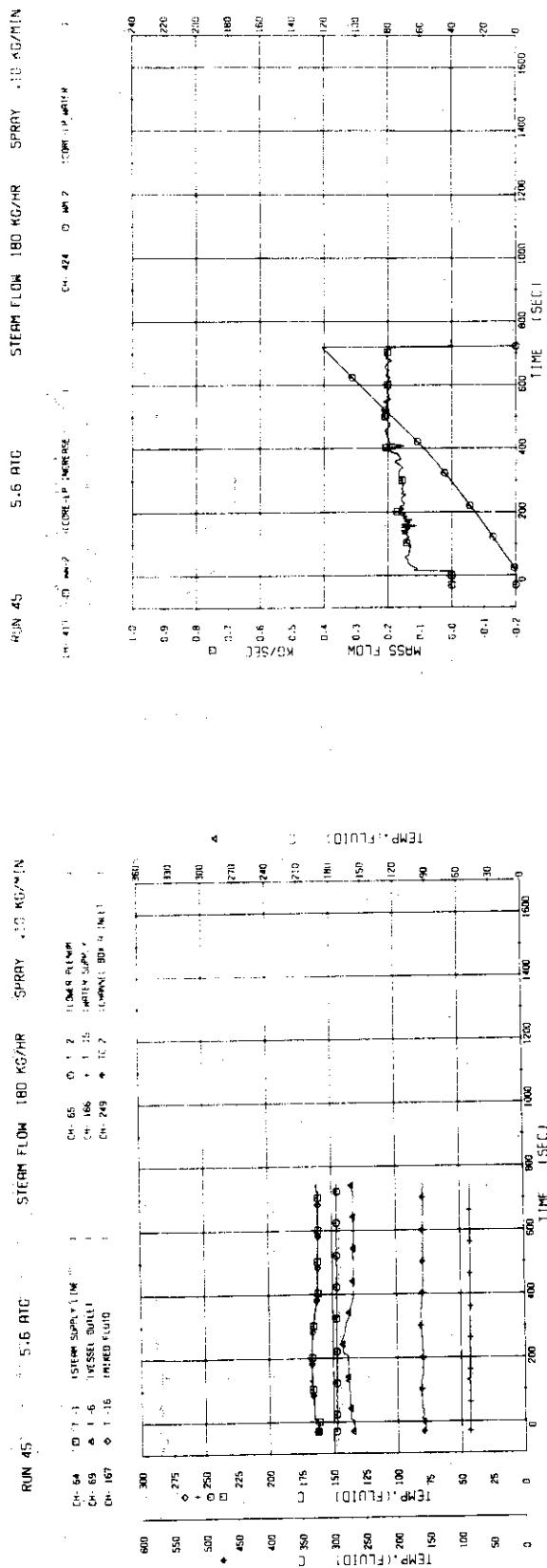
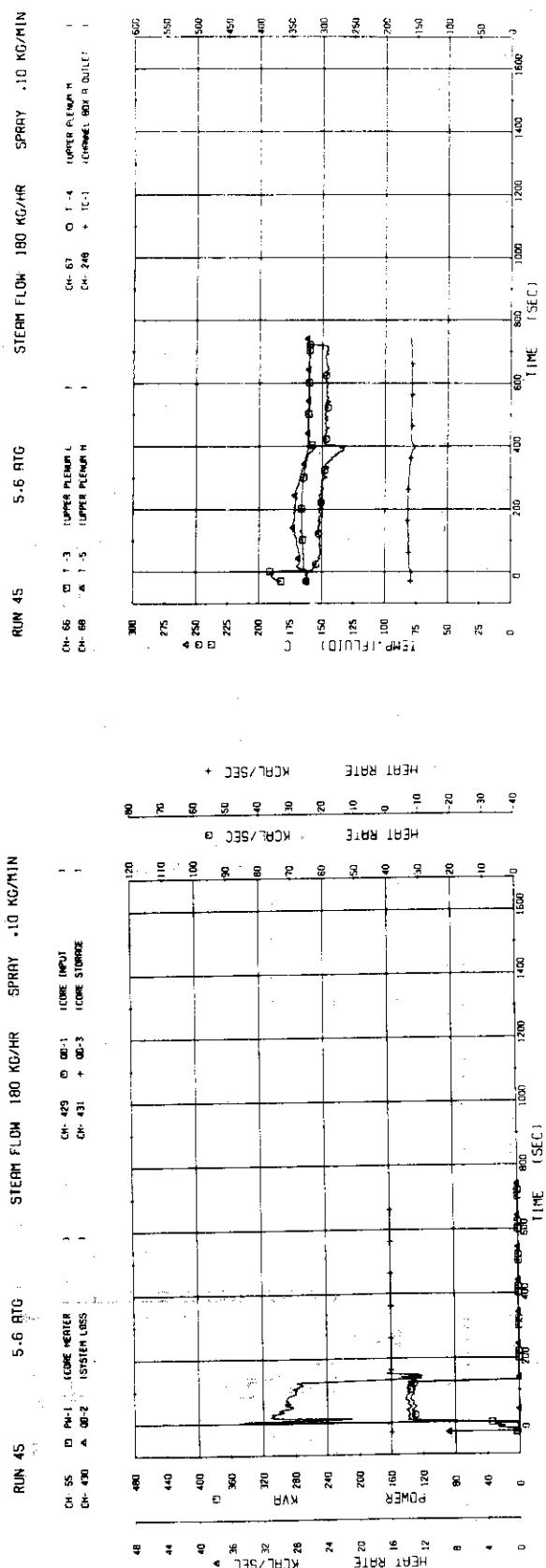
Fig. 20 Effect of spray flow rate and core power on reflood level and rod quench.



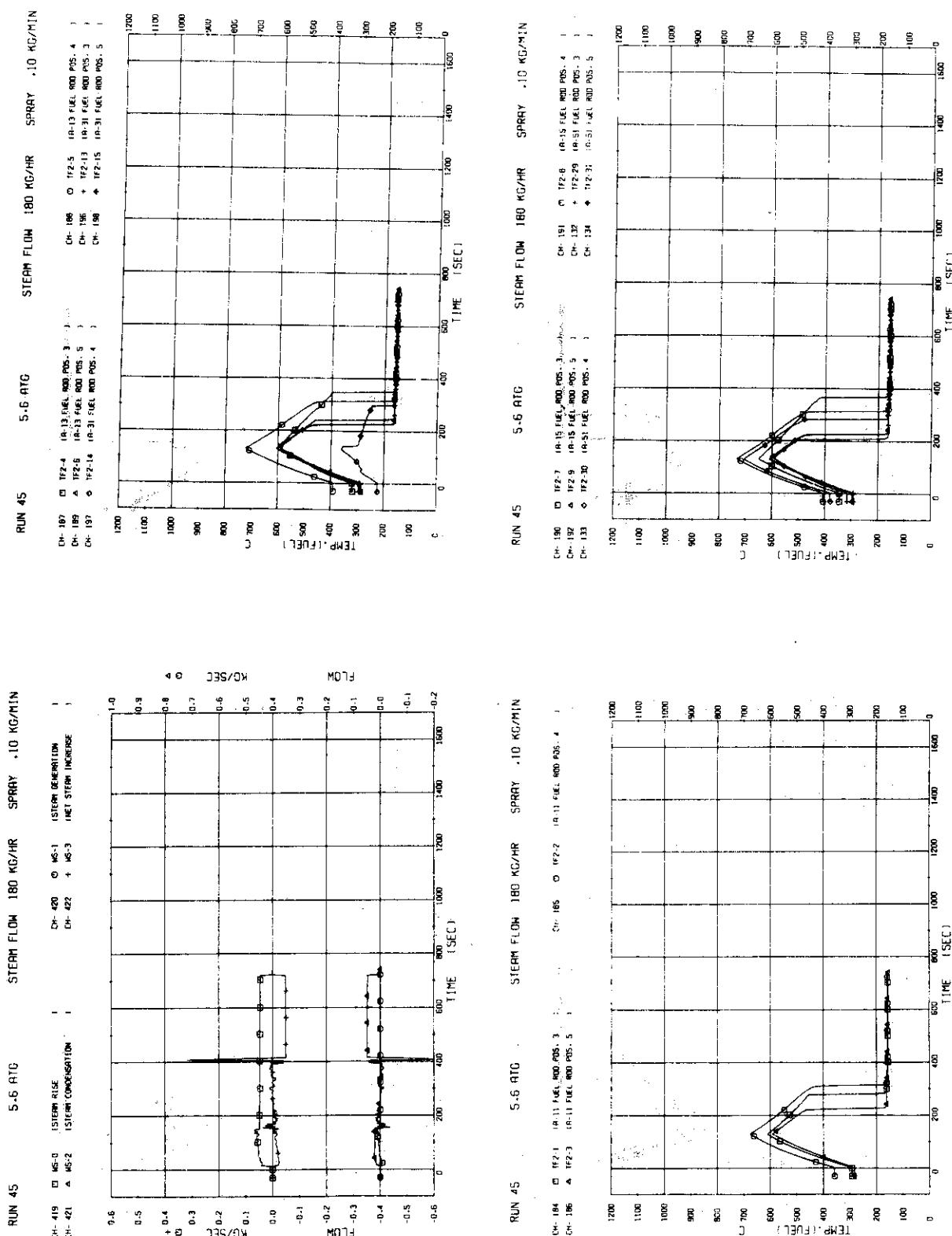
J AERI-M 9080



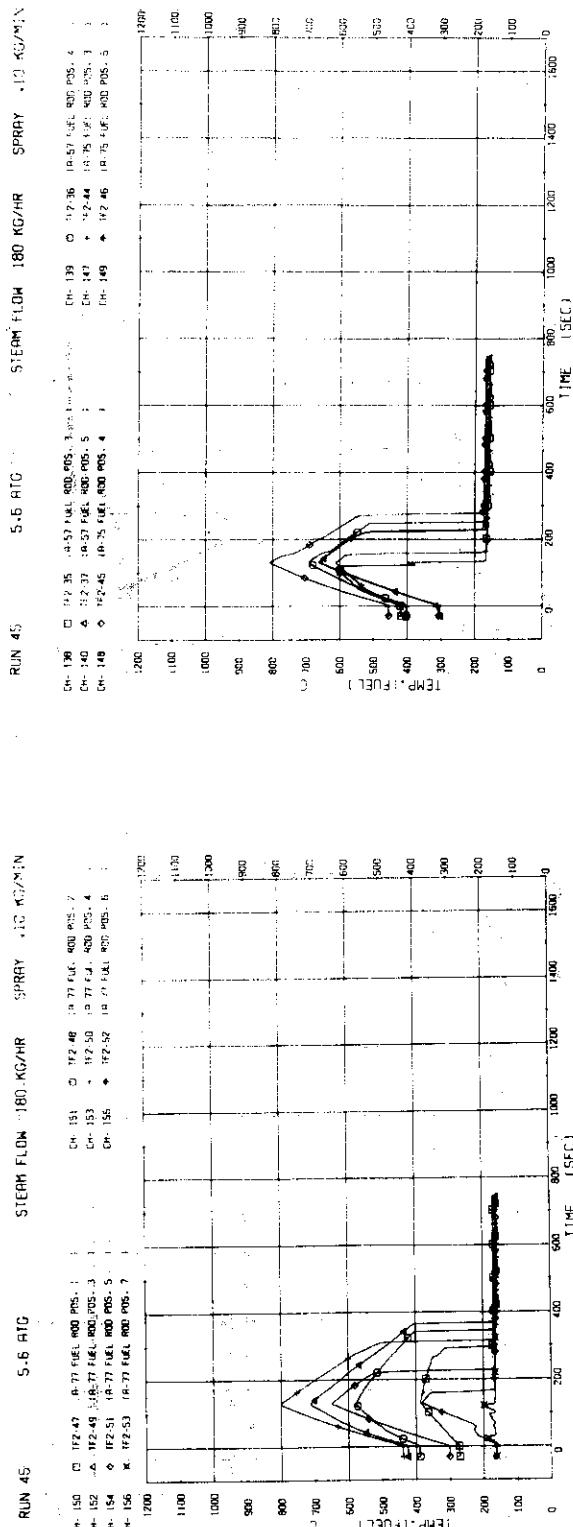
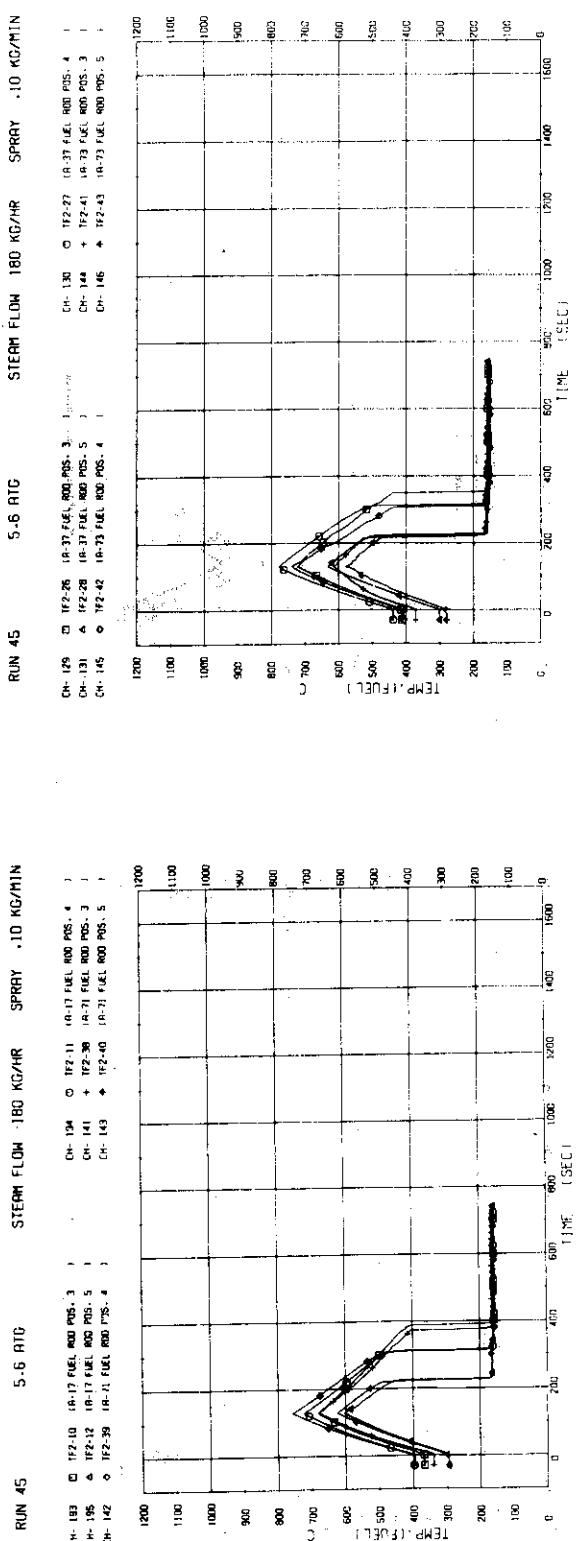
J A E R I - M 9.0.8.0

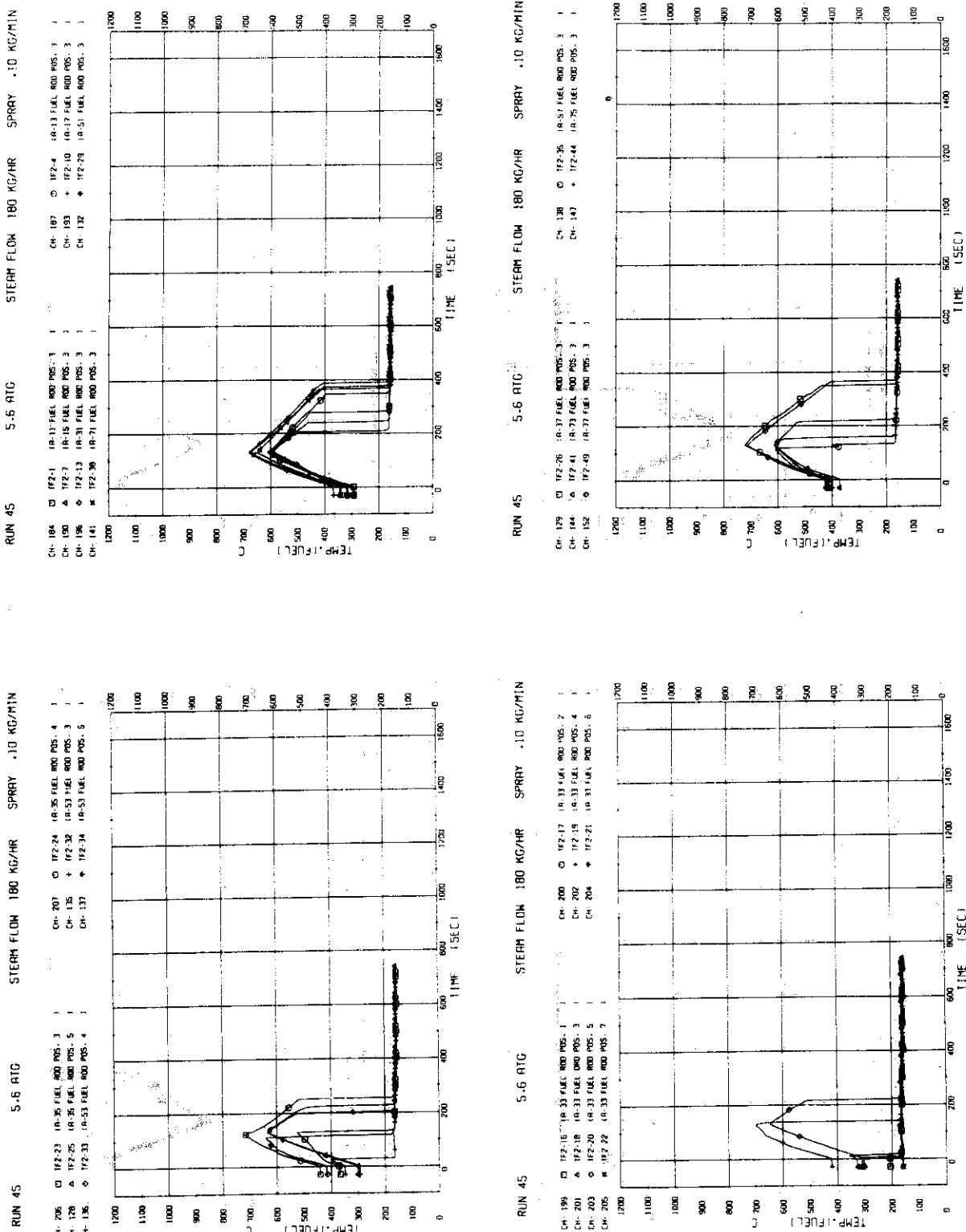


JAEARI-M 9080

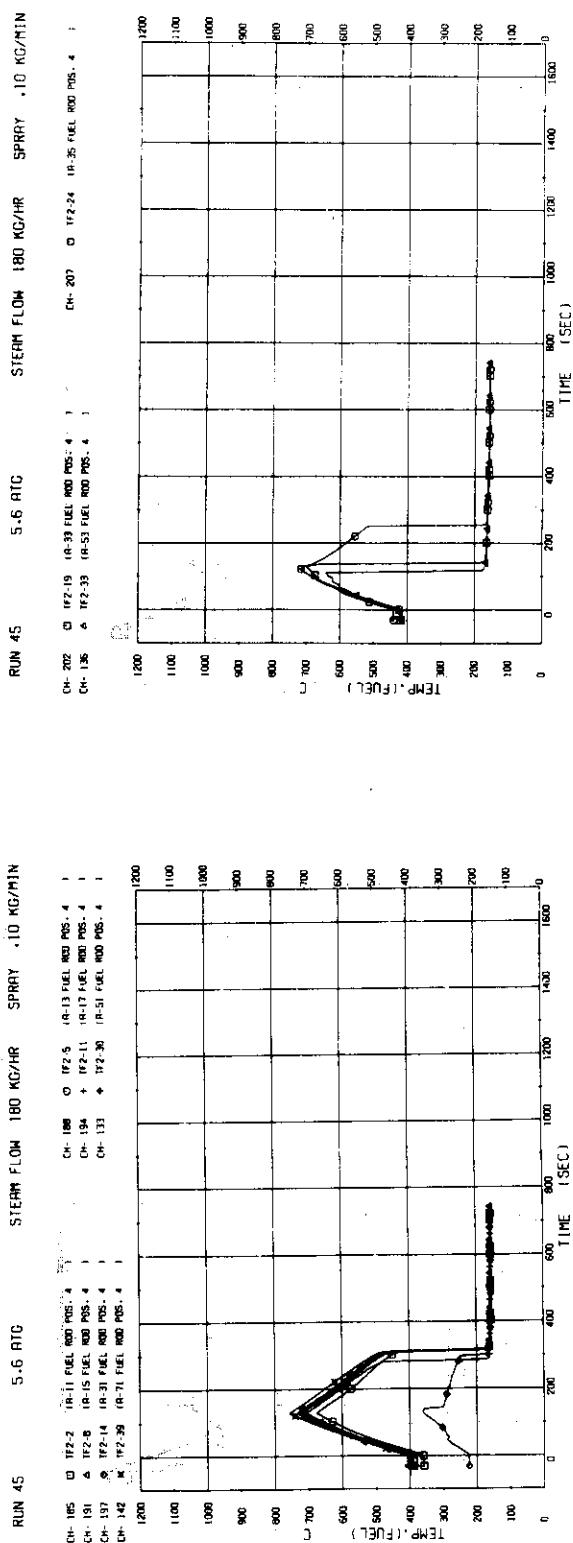
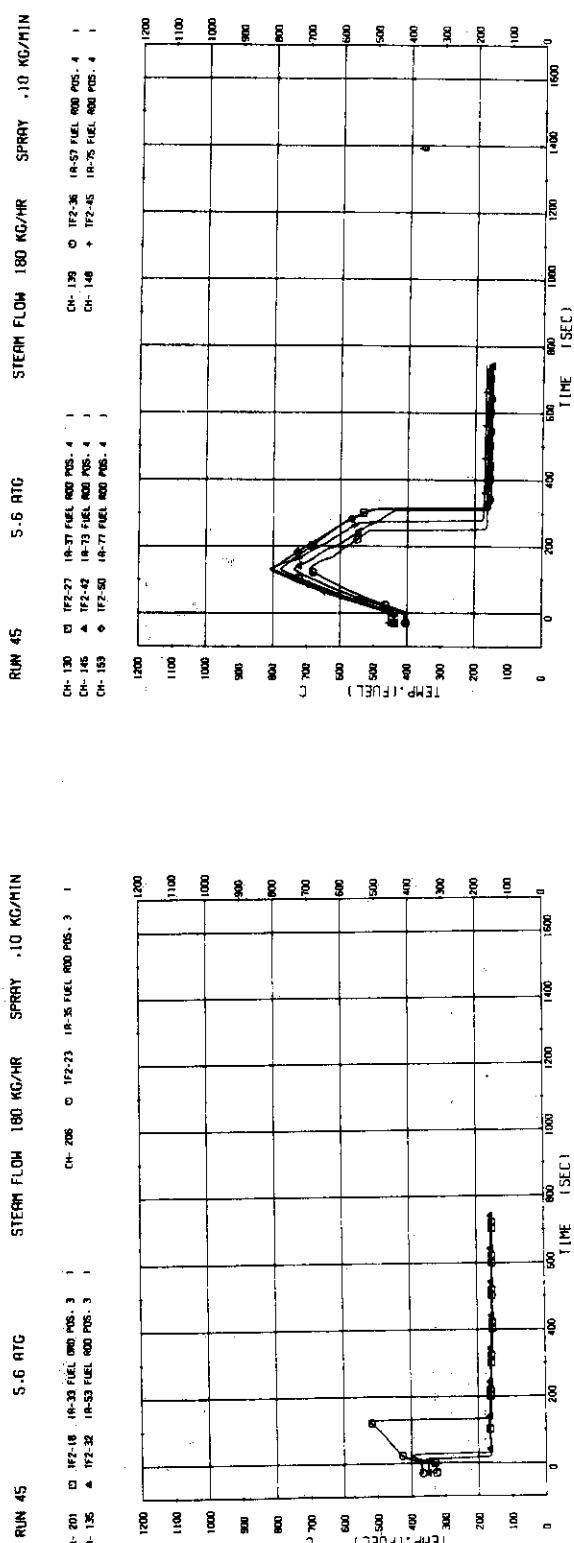


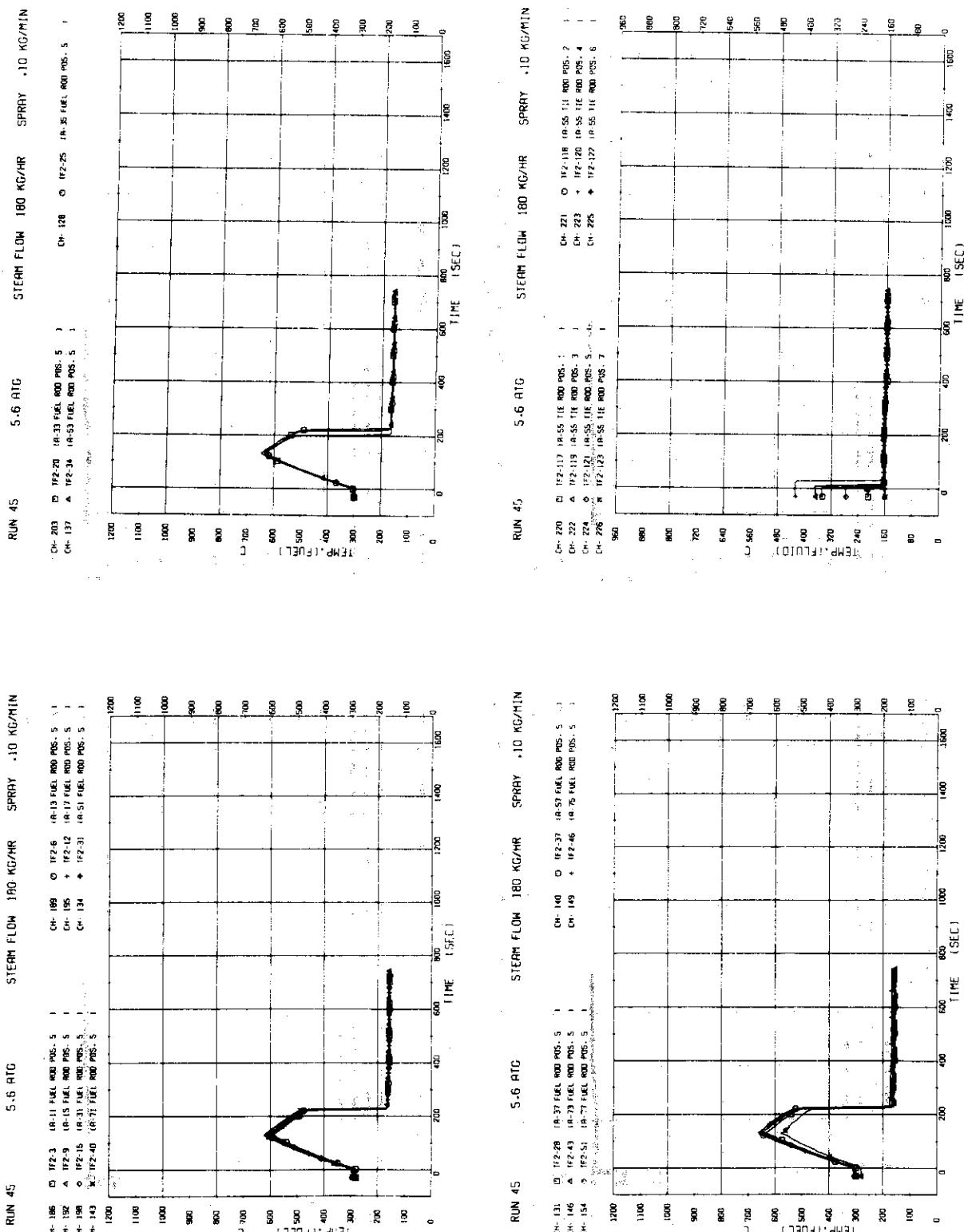
JAERI-M-9080



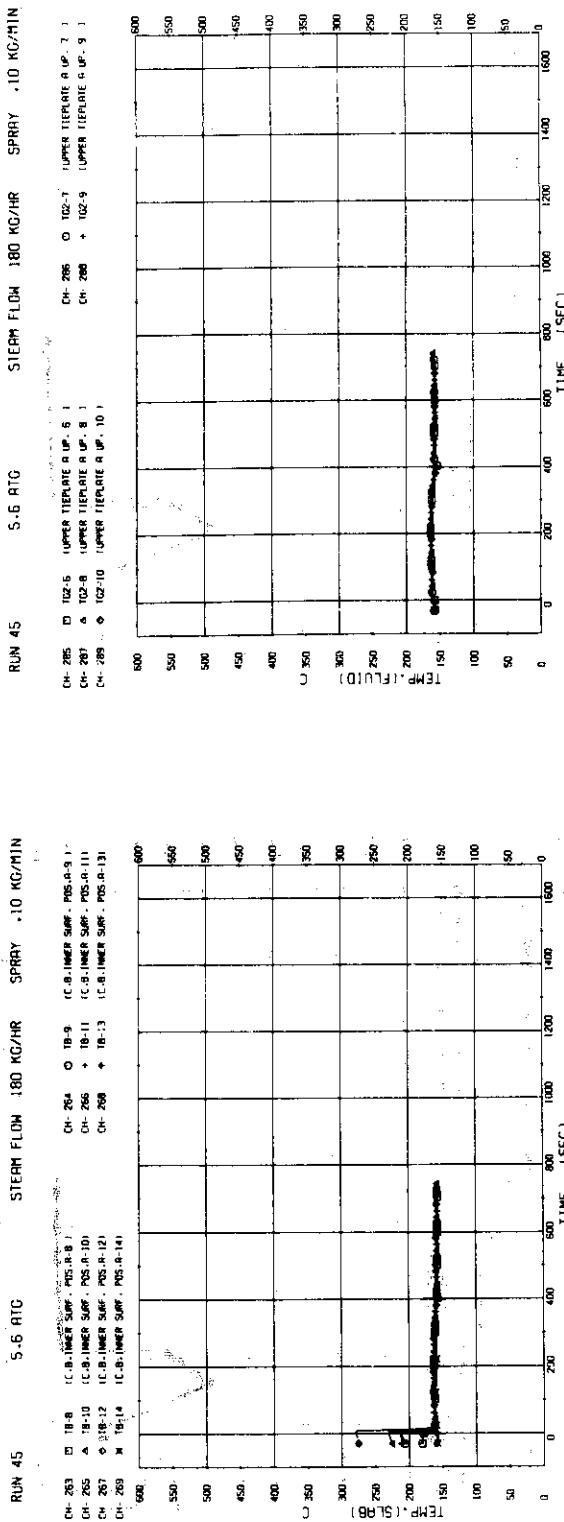
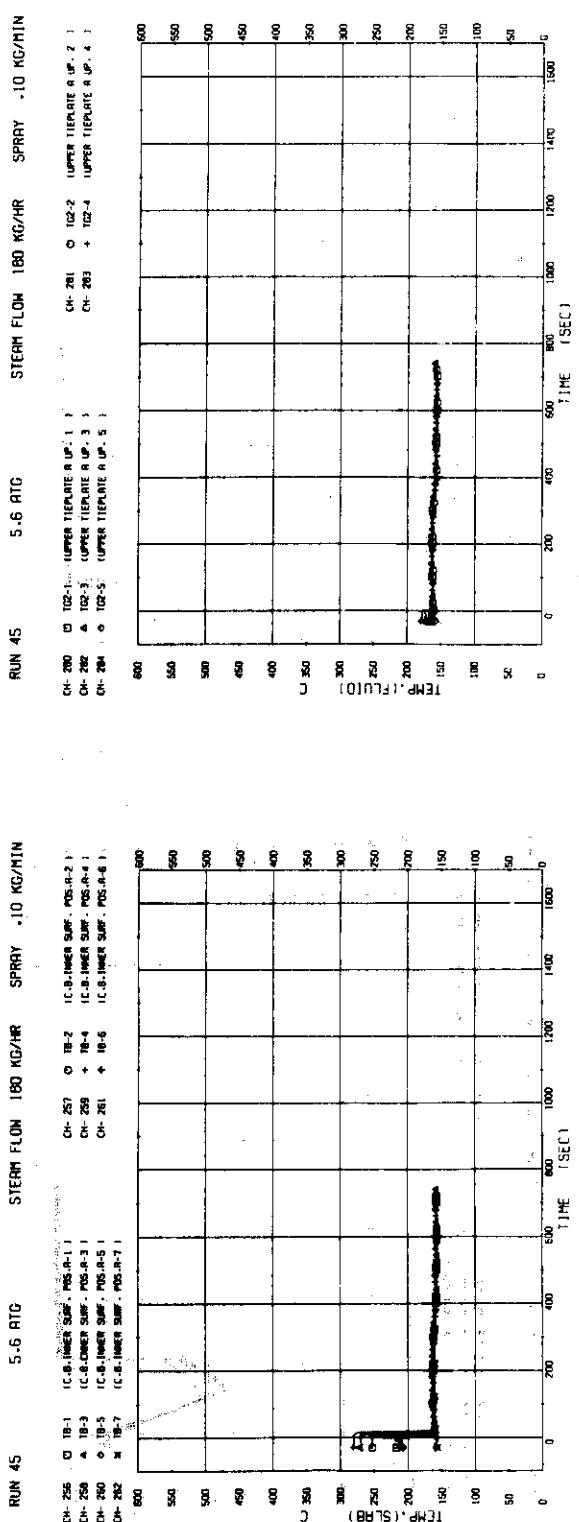


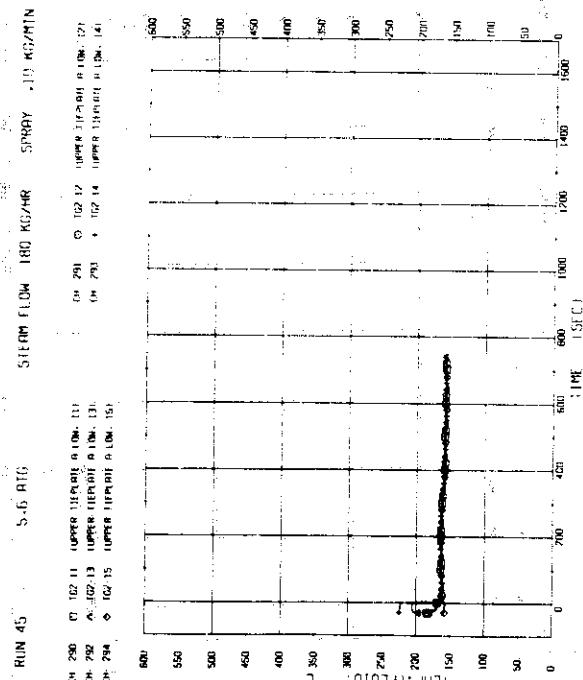
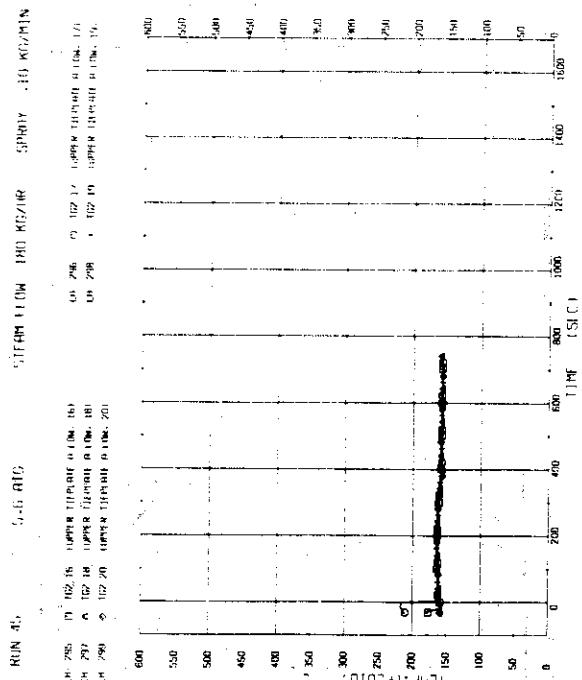
JAERI-M 9080



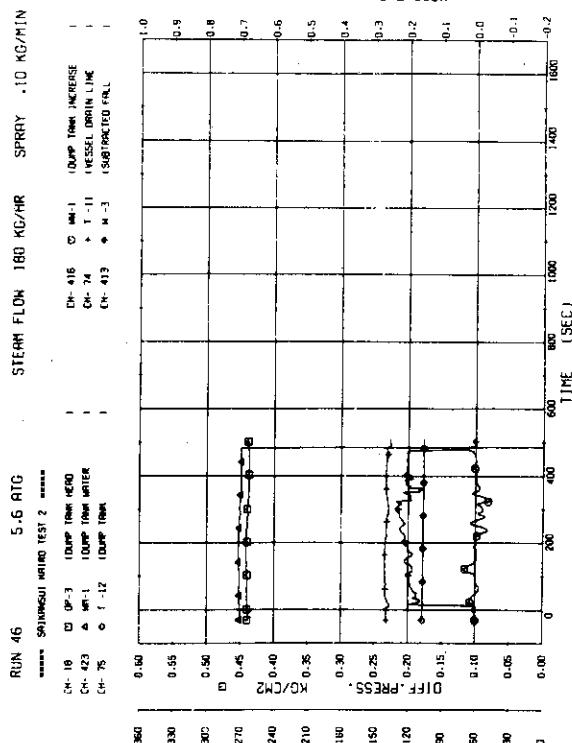
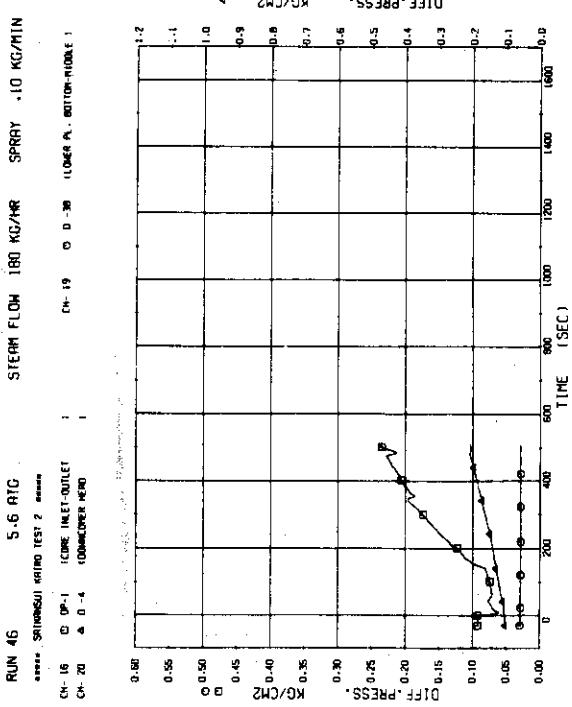
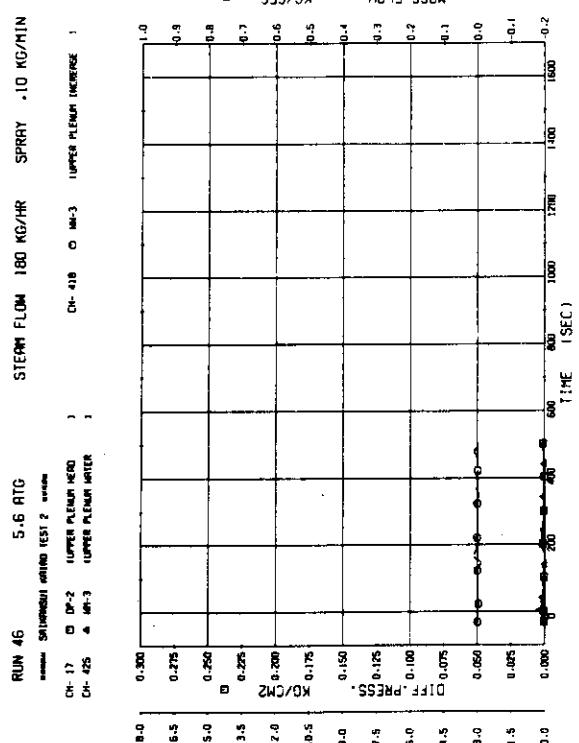
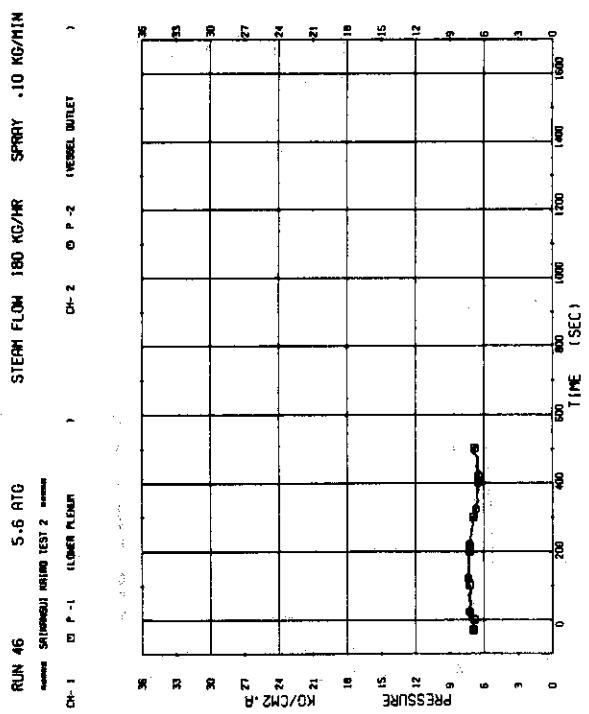


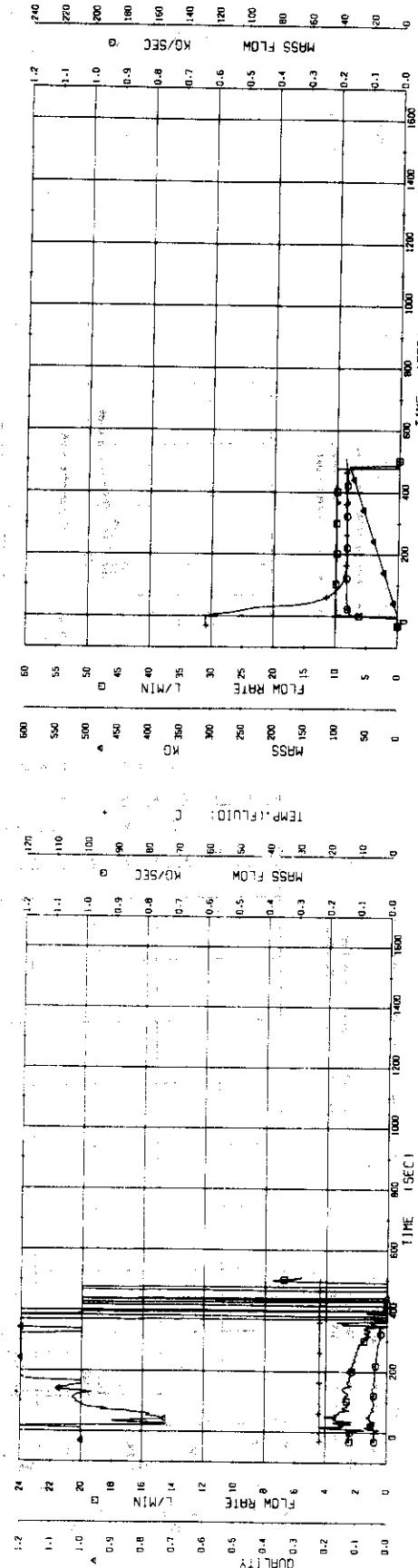
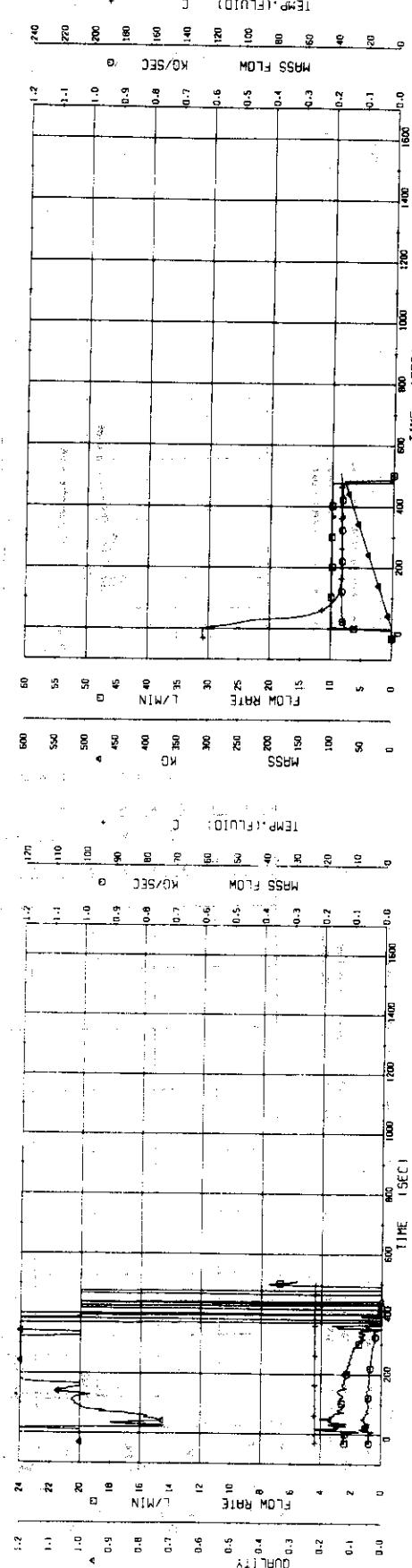
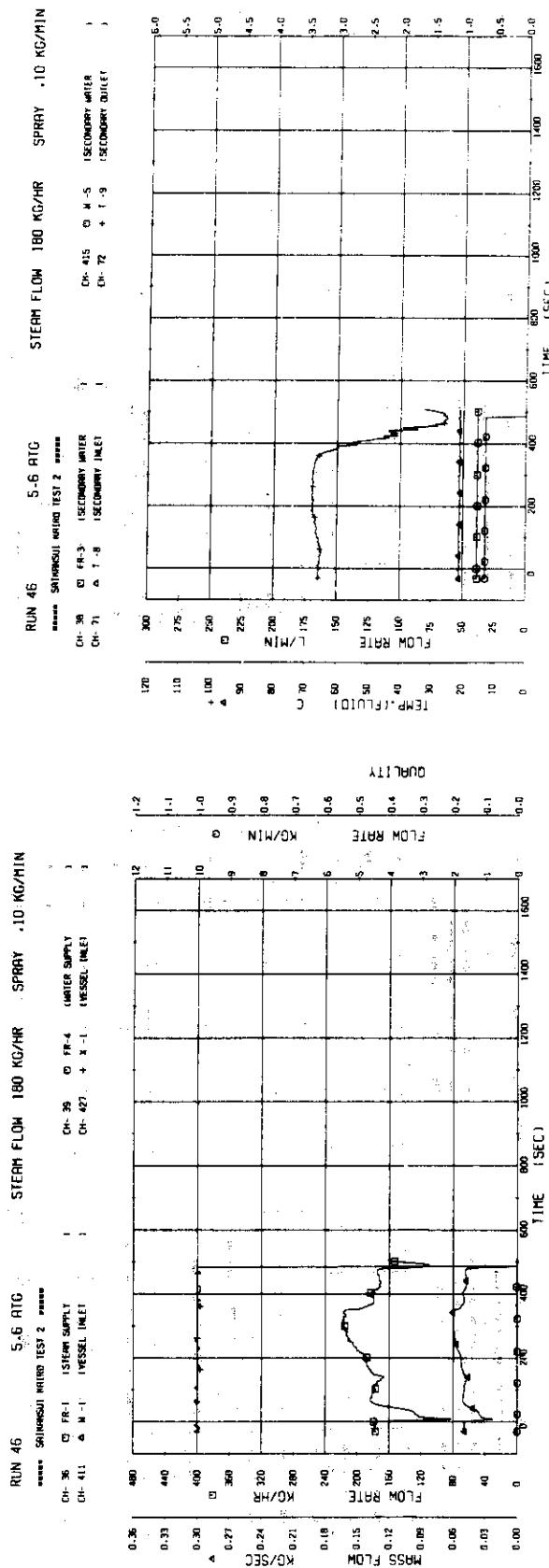
J A E R I - M 9080



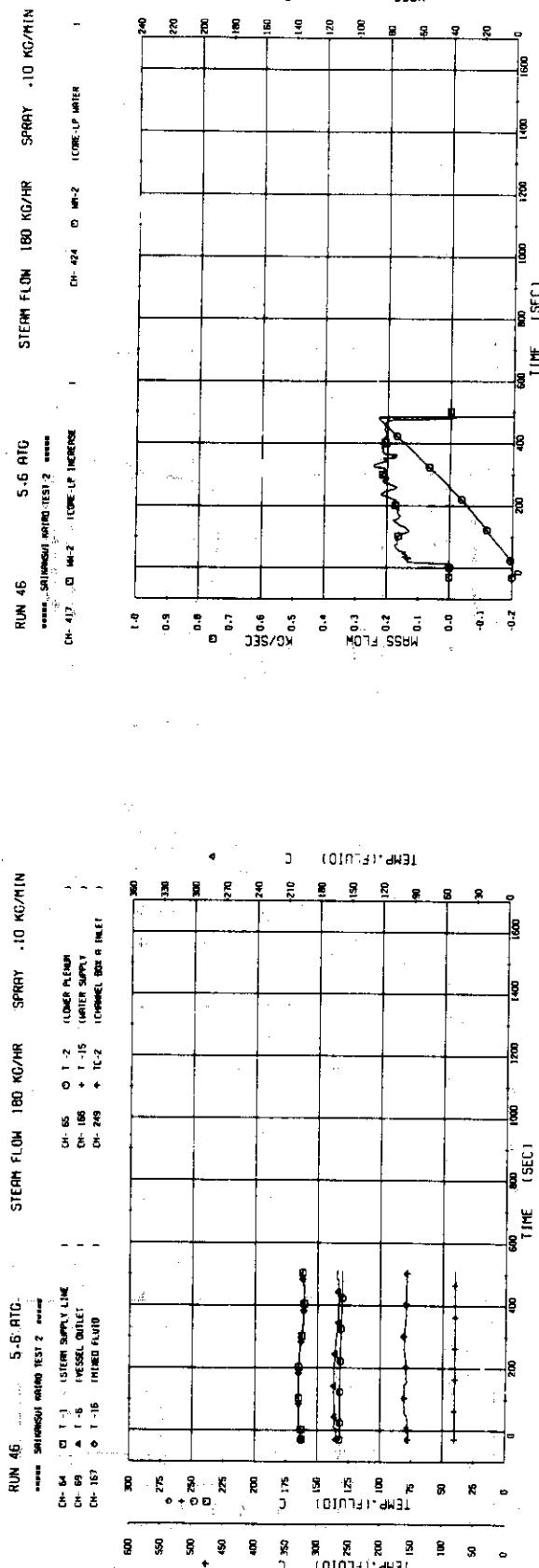
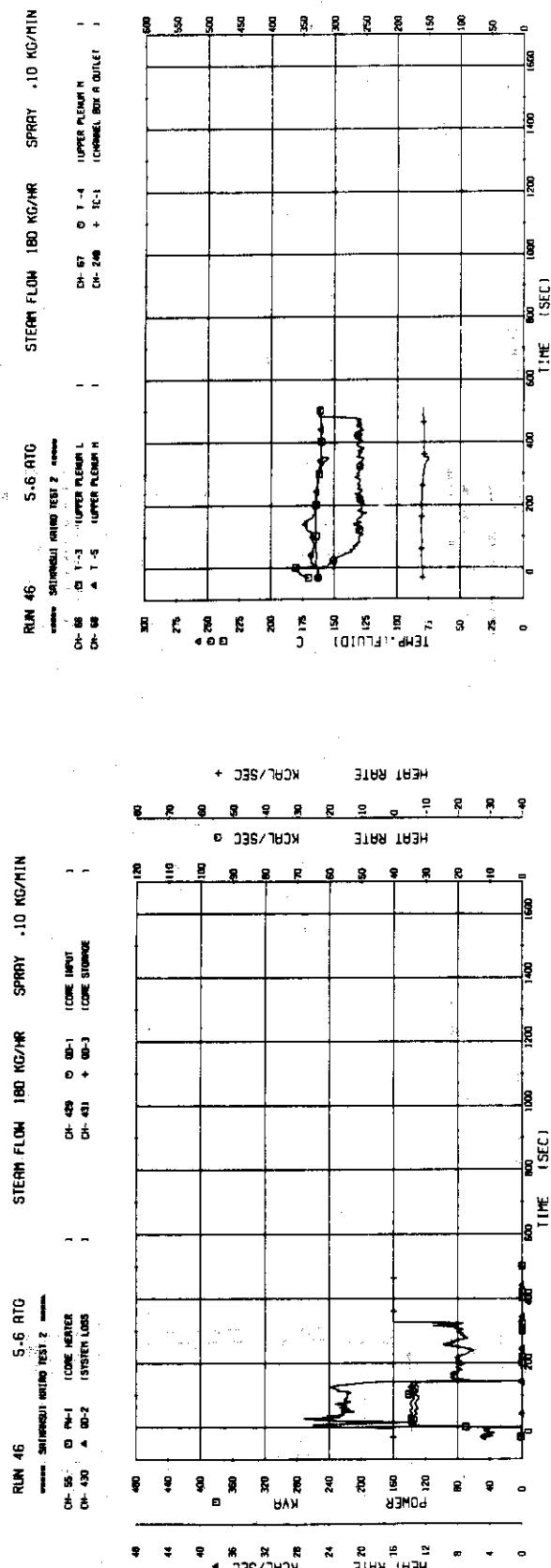


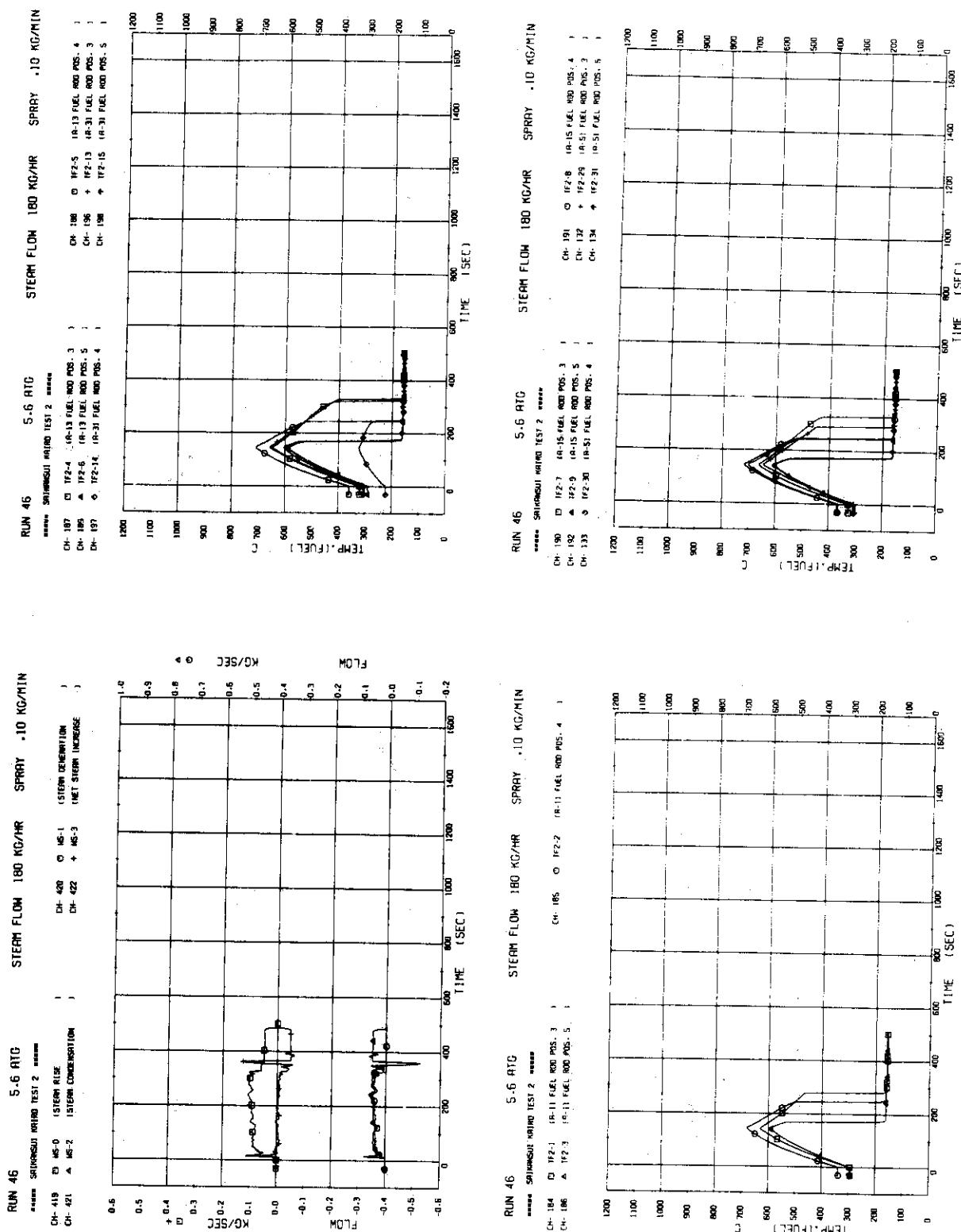
JAERI-M 9080

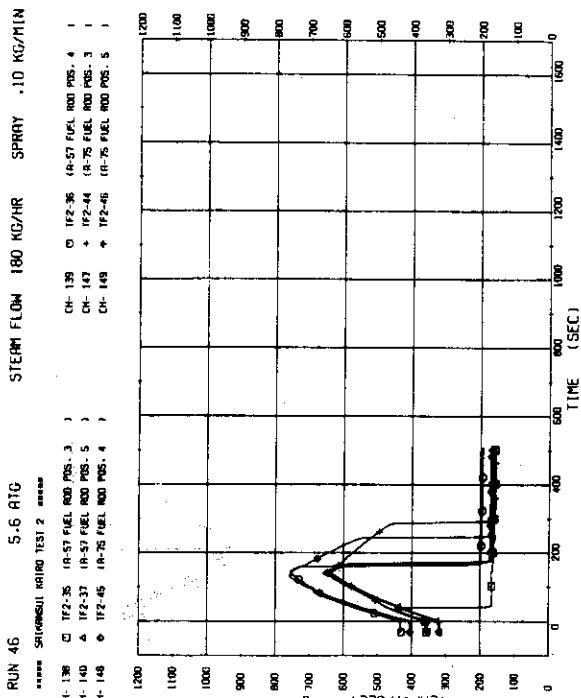
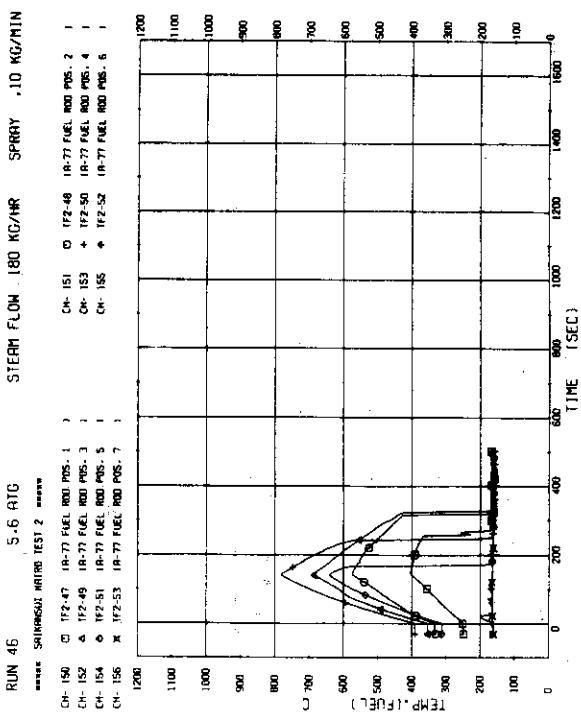
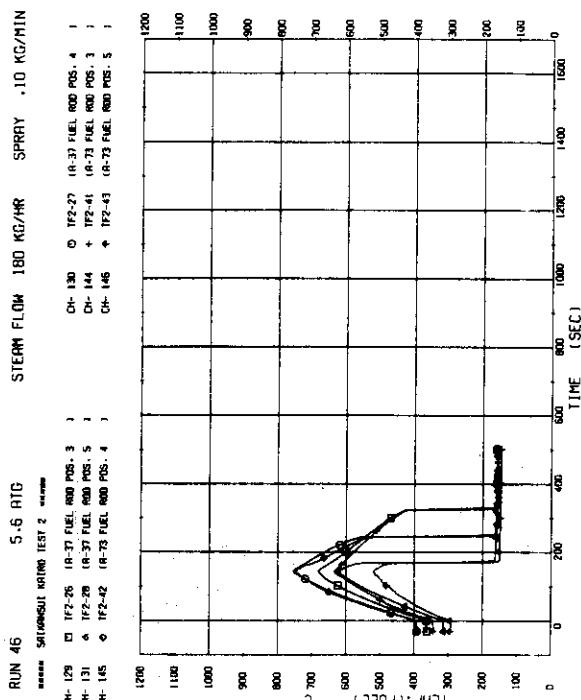
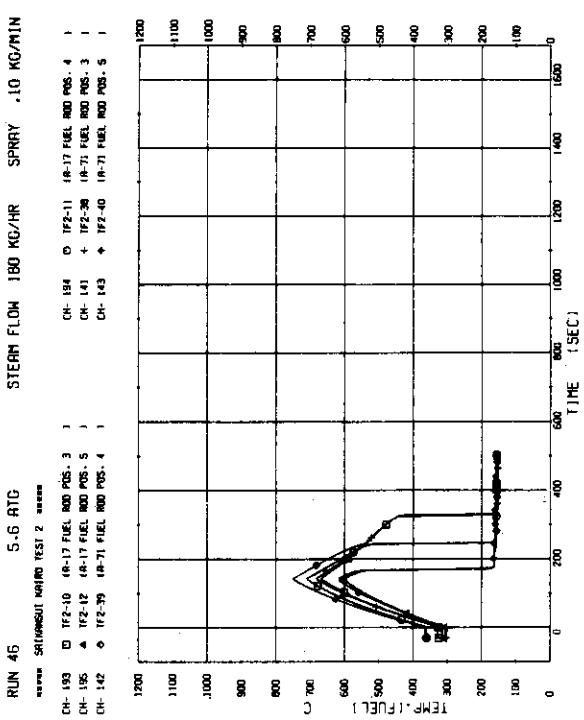


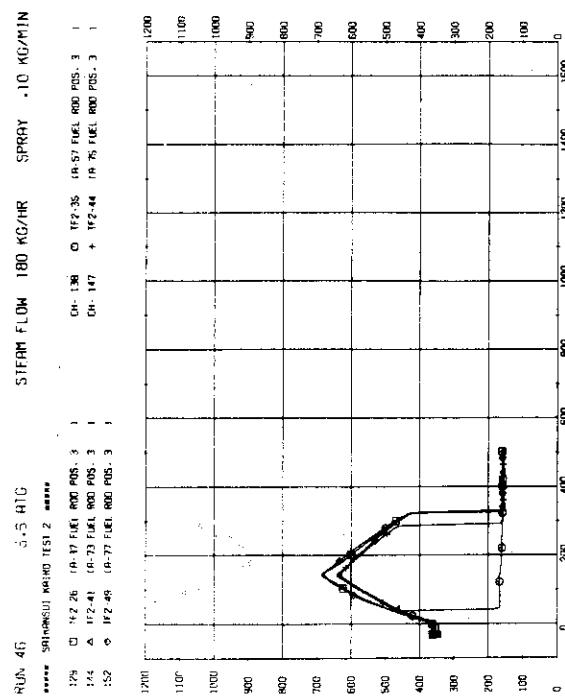
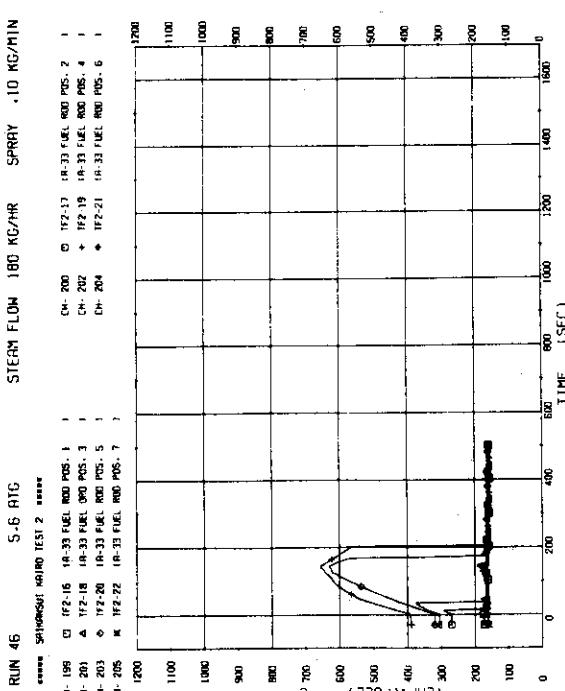
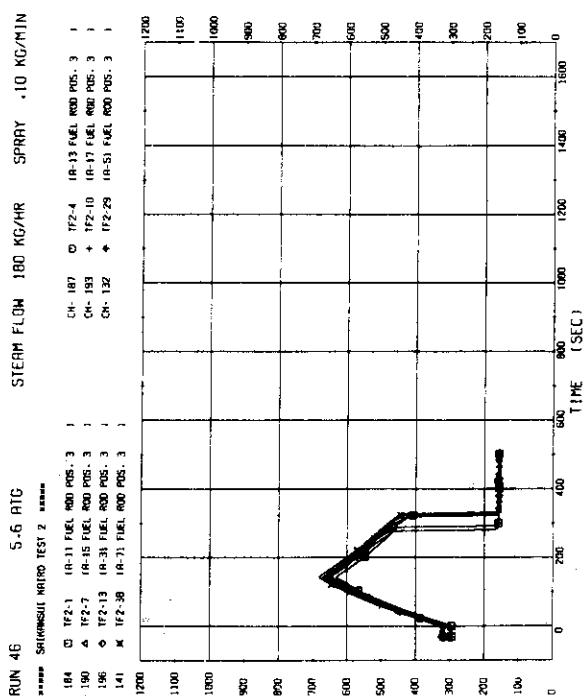
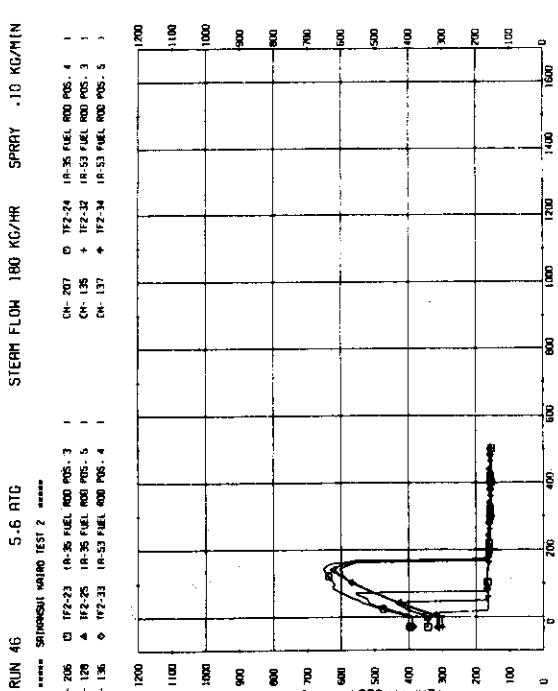


JAERI-M 9080

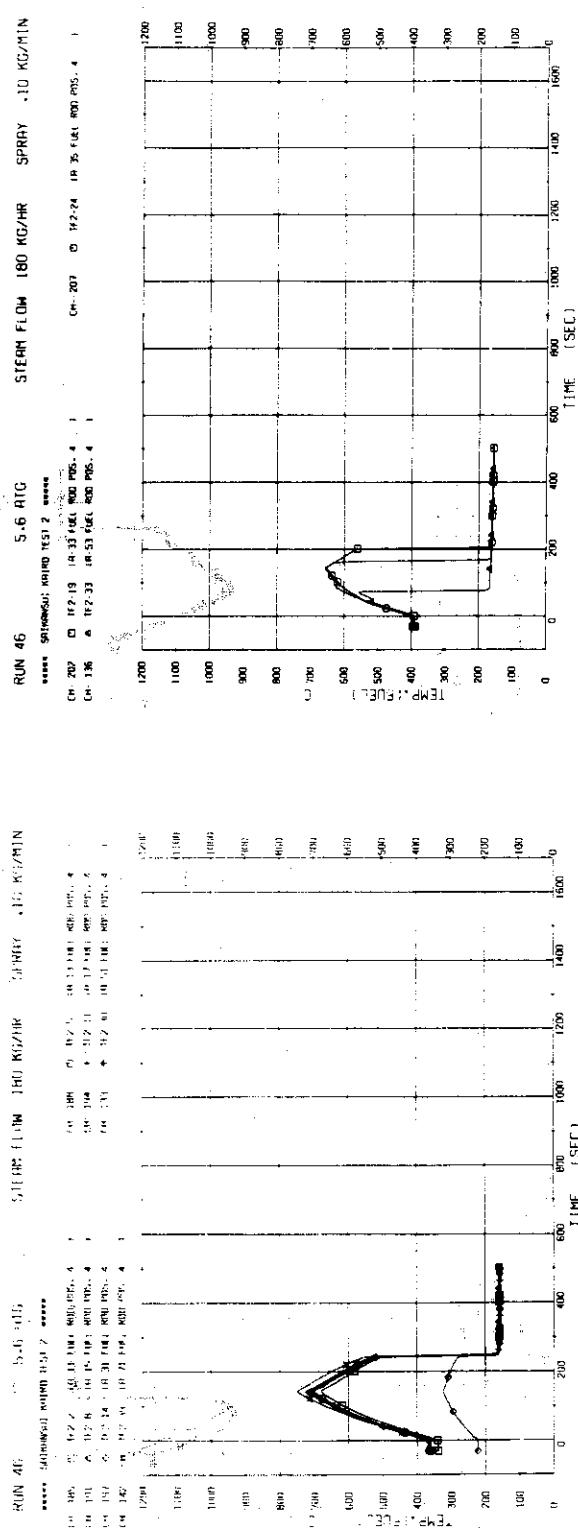
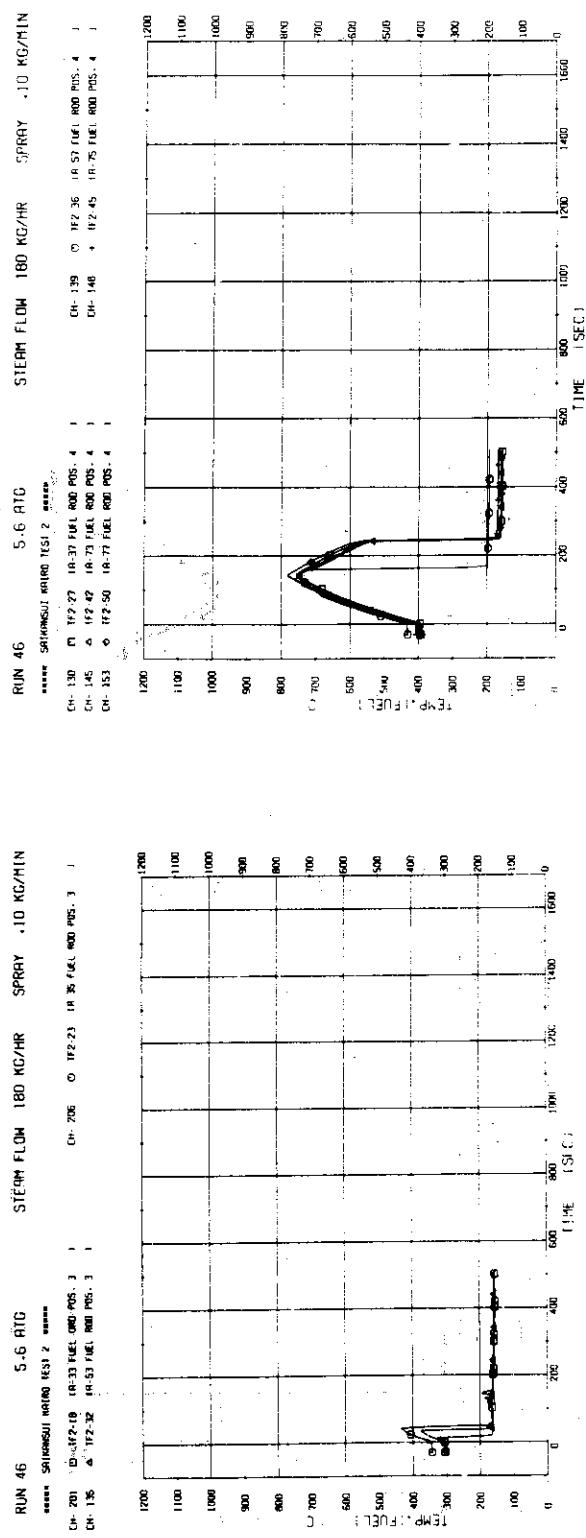


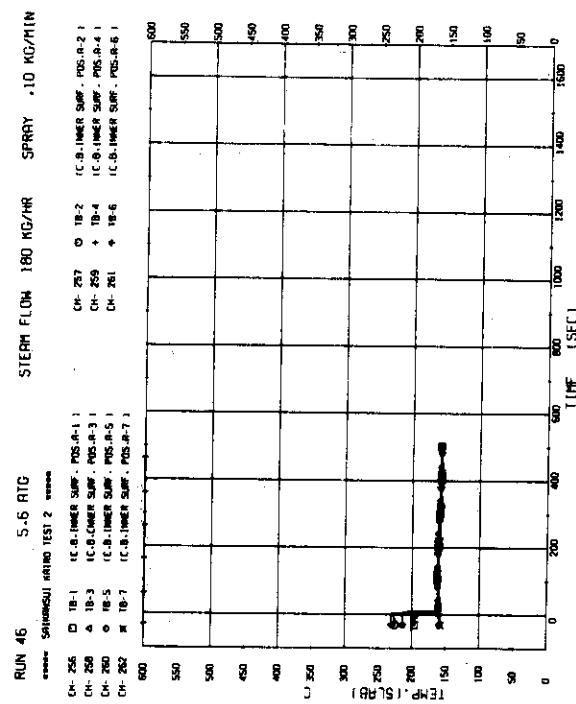
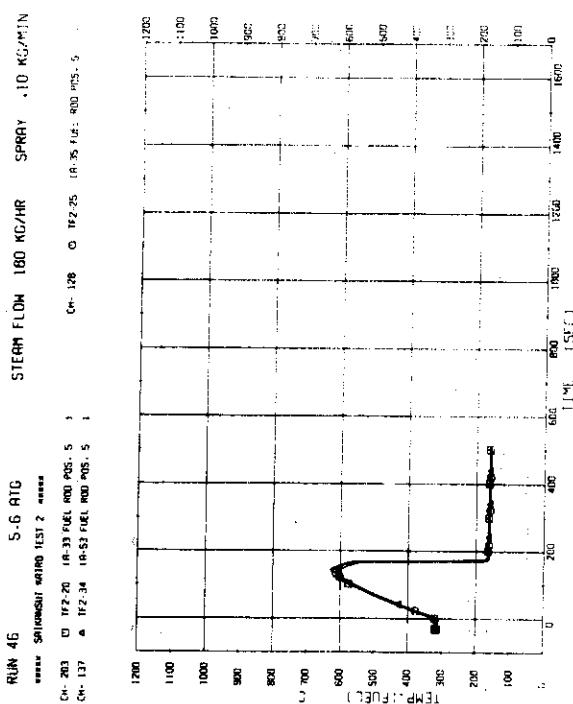
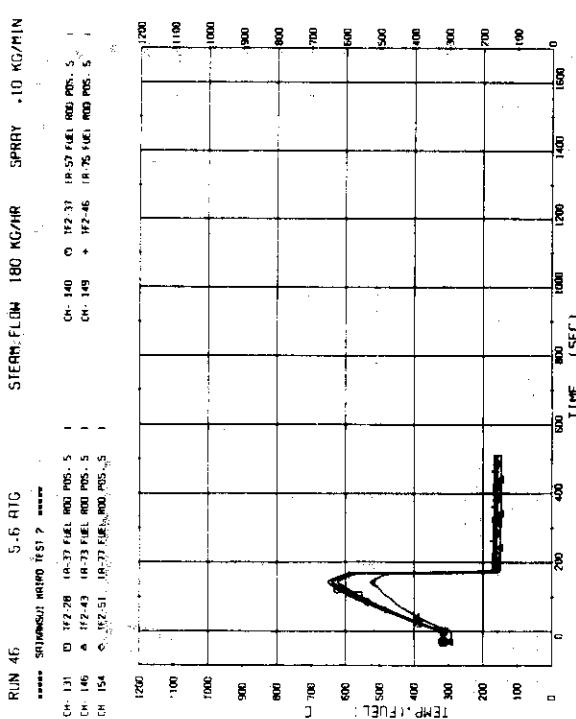
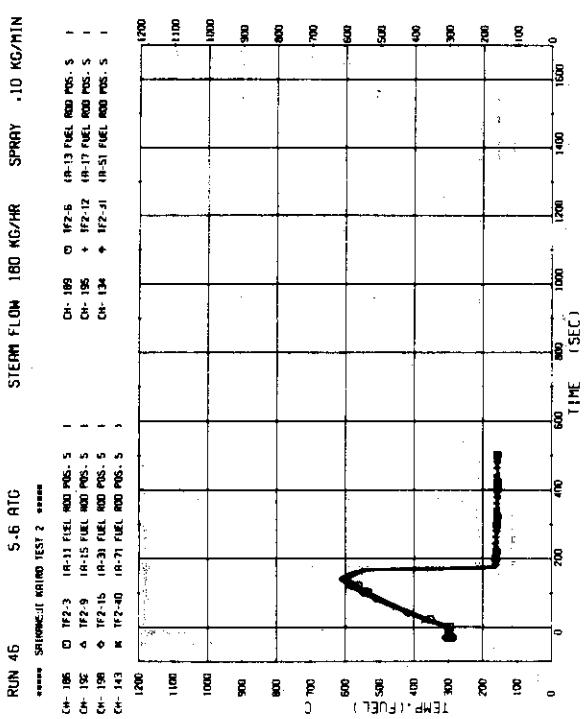




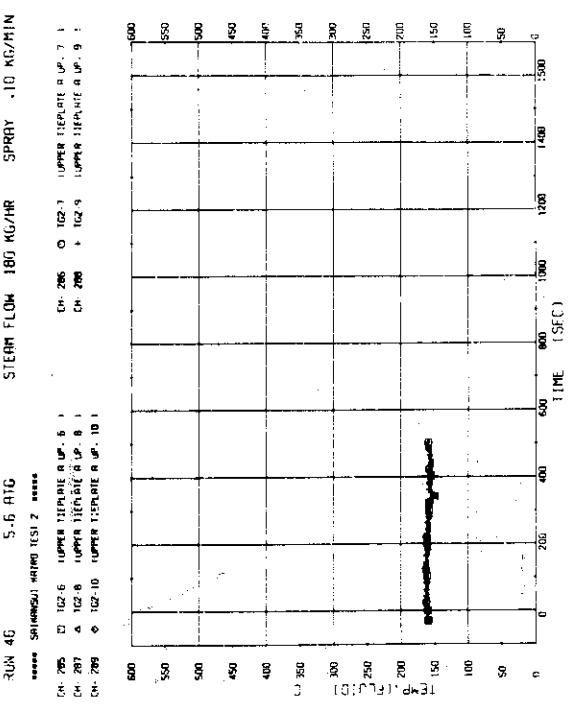
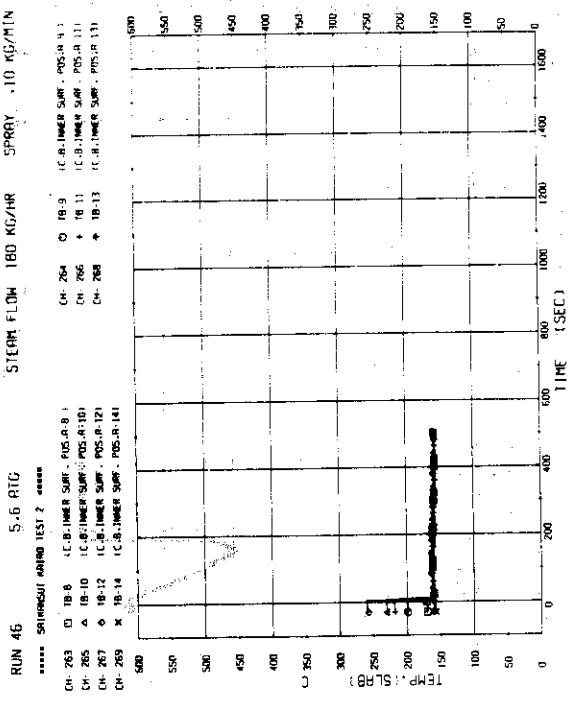
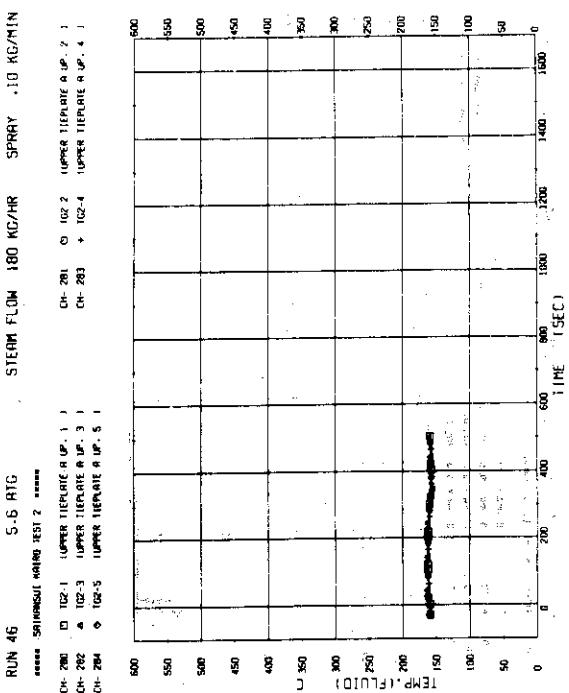
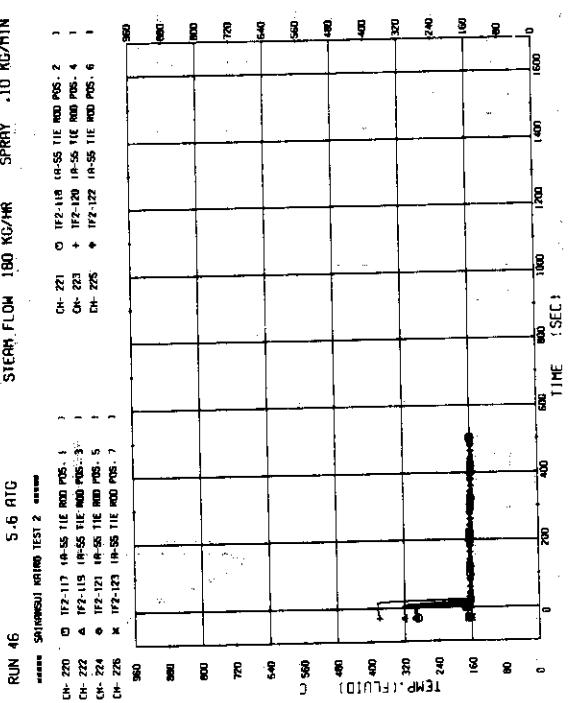


JAERI-M 9080



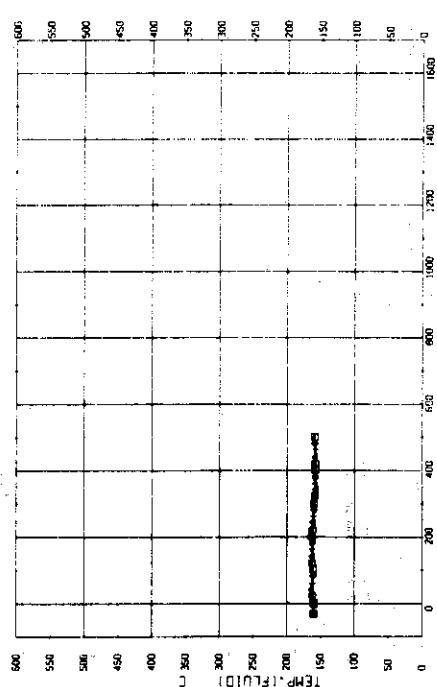


JAERI-M-9080

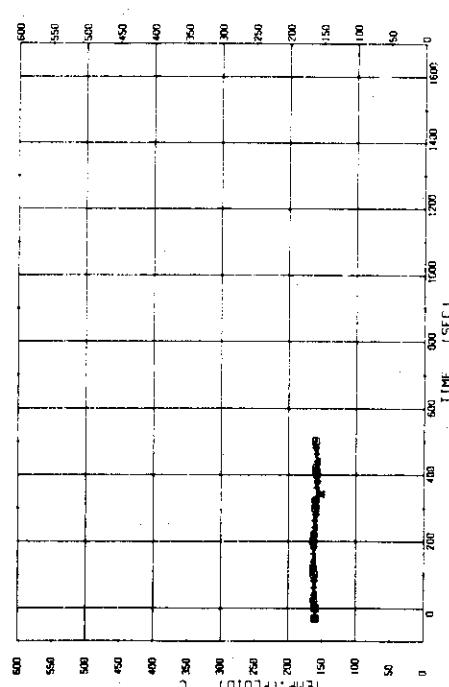


JAERI-M 9080

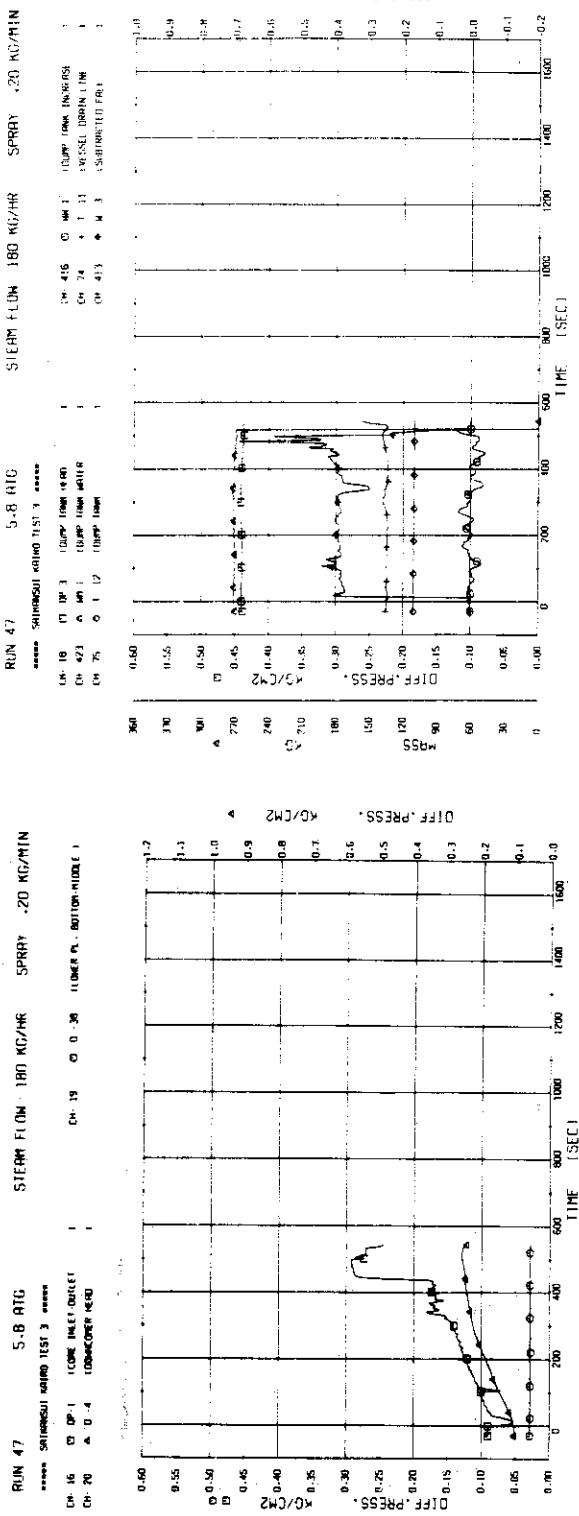
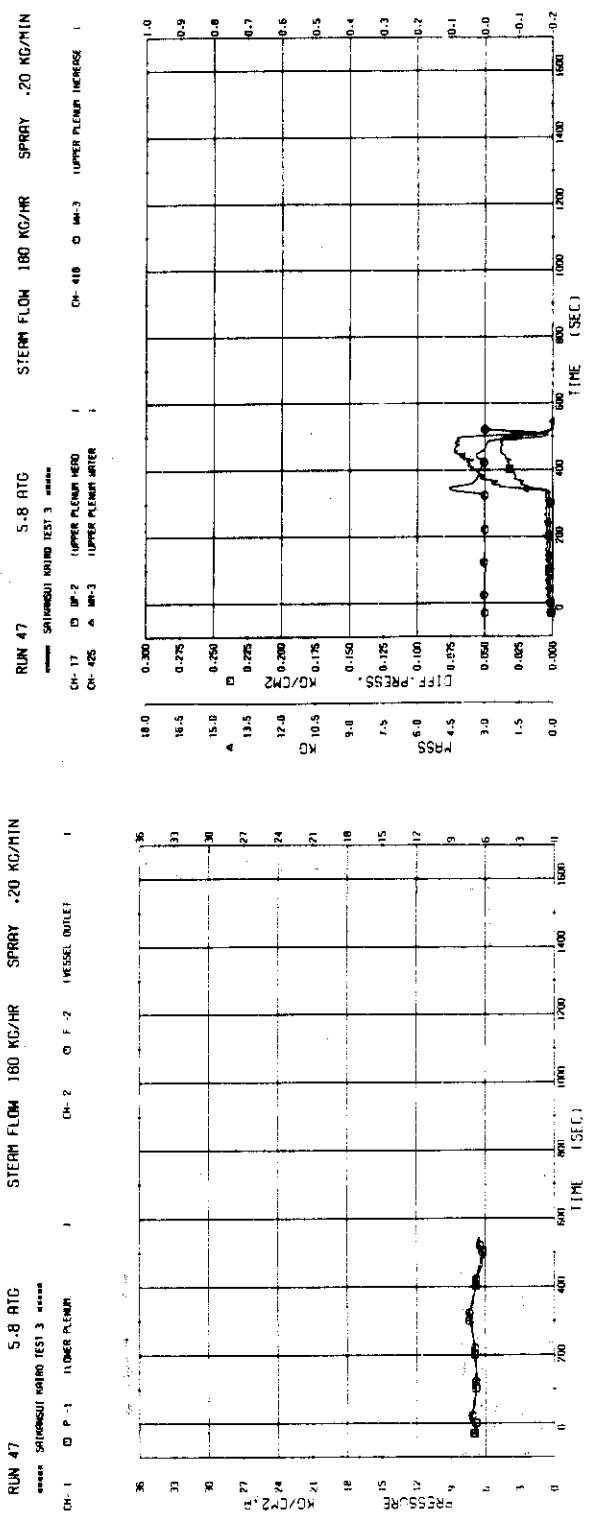
RUN 46 5.6 ATG STEAM FLOW 180 KG/AHR SPRAY .10 KG/MIN
***** SHIBASU WIND TEST 2 *****
CH- 250 □ 102-14 UPPER TIEPLATE 8.1 CM. 11
CH- 252 ▲ 102-13 UPPER TIEPLATE 8.1 CM. 13
CH- 254 ◆ 102-15 UPPER TIEPLATE 8.1 CM. 15



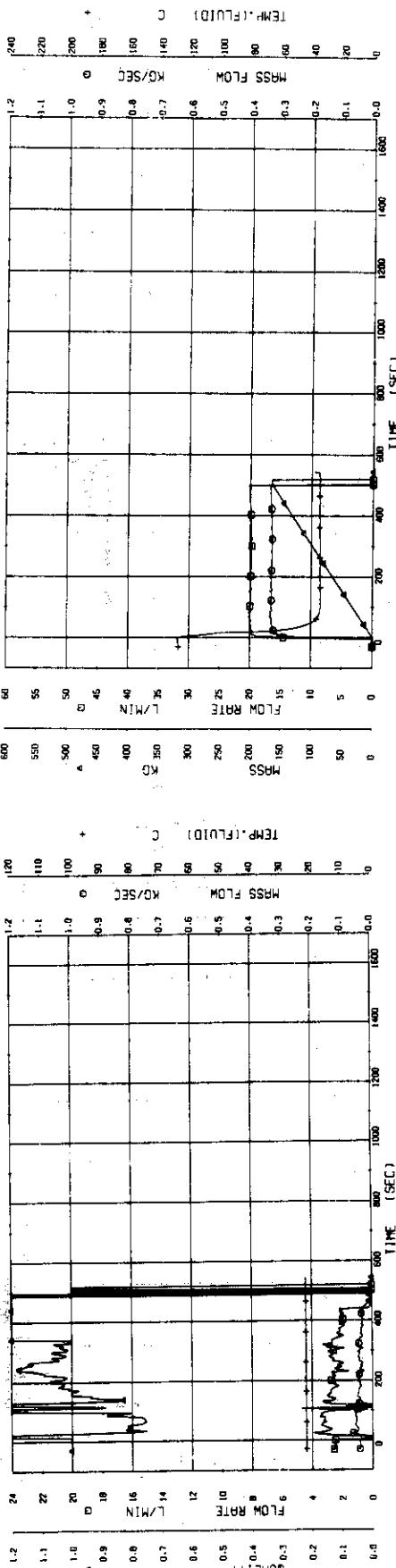
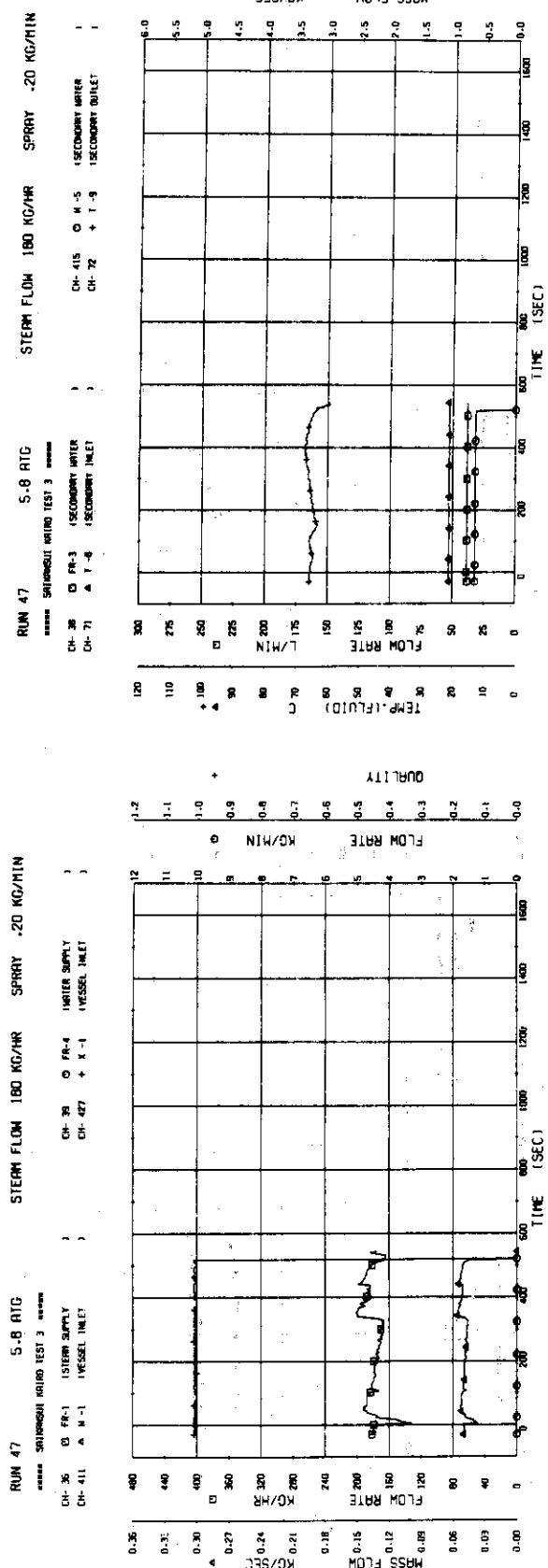
RUN 46 5.6 ATG STEAM FLOW 180 KG/AHR SPRAY .10 KG/MIN
***** SHIBASU WIND TEST 2 *****
CH- 255 □ 102-16 UPPER TIEPLATE 8.1 CM. 16
CH- 257 ▲ 102-18 UPPER TIEPLATE 8.1 CM. 18
CH- 259 ◆ 102-20 UPPER TIEPLATE 8.1 CM. 20



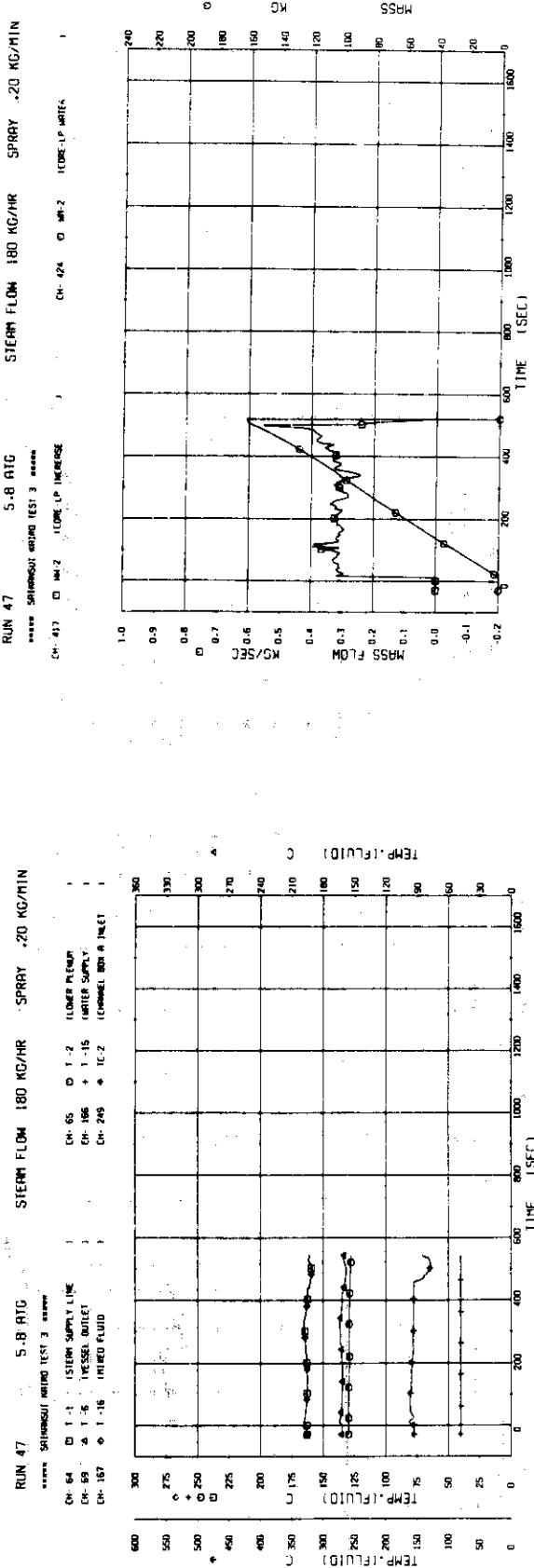
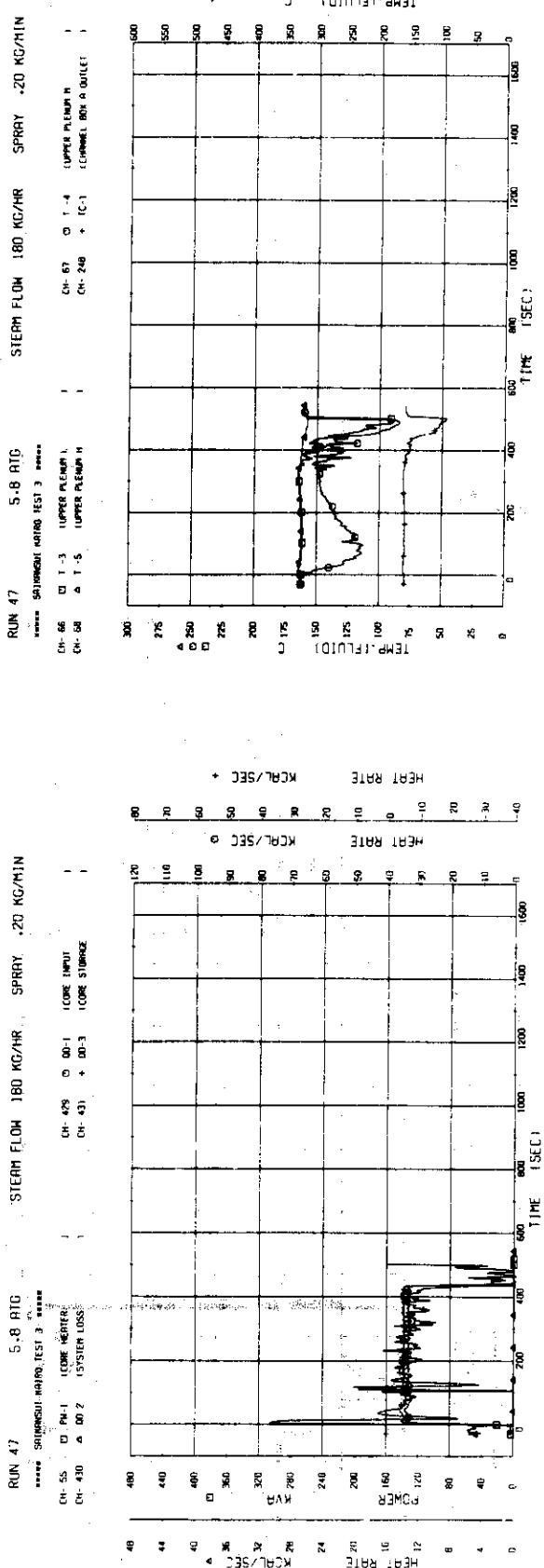
JAERI-M 9080



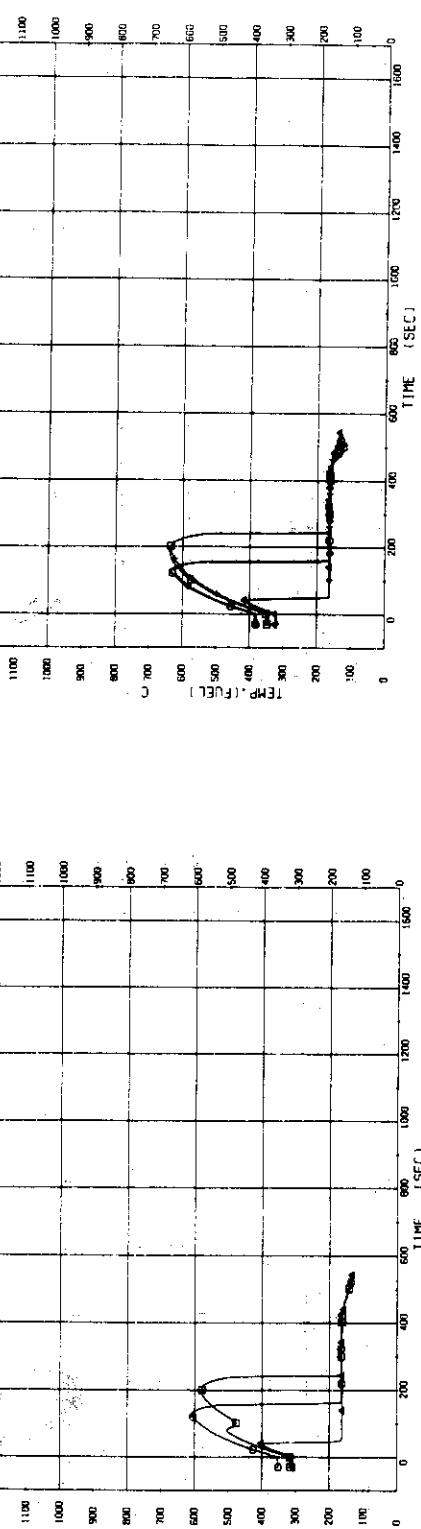
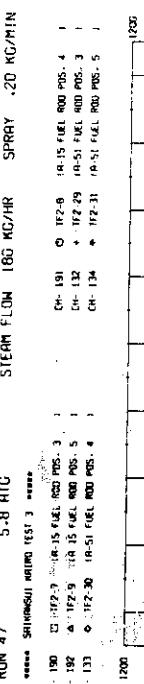
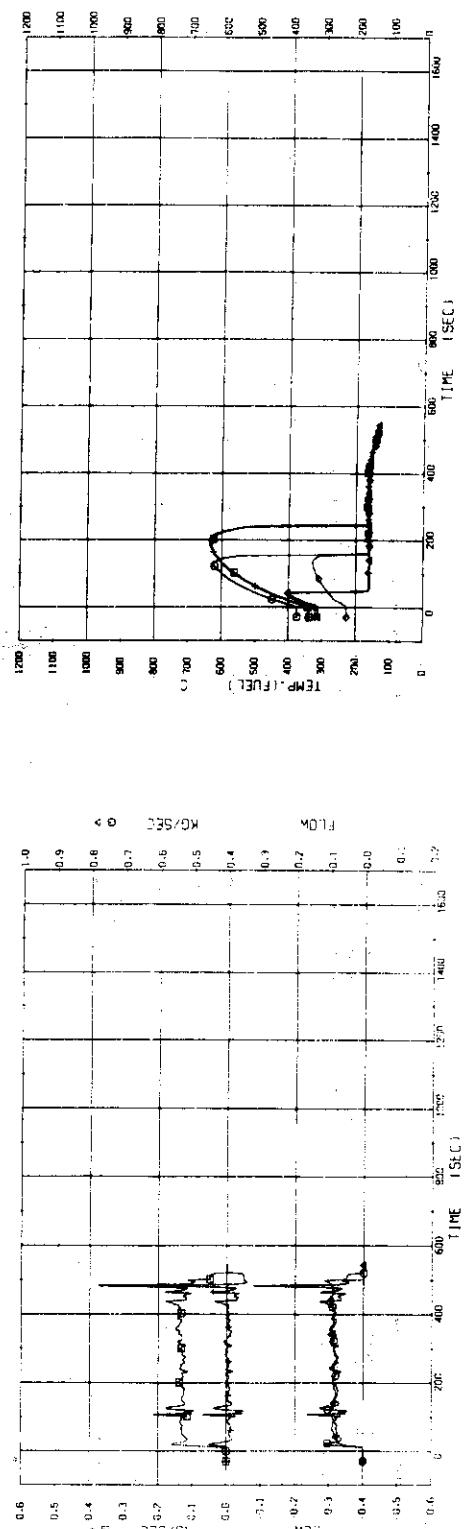
JAERI-M 9080



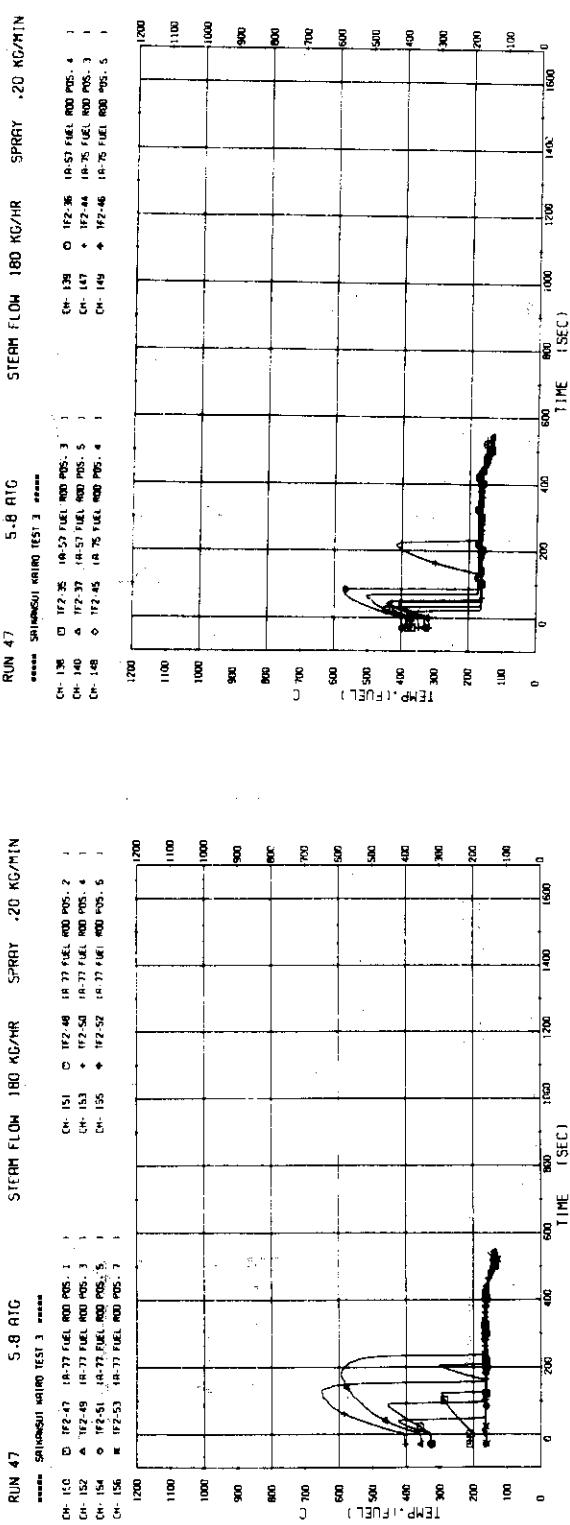
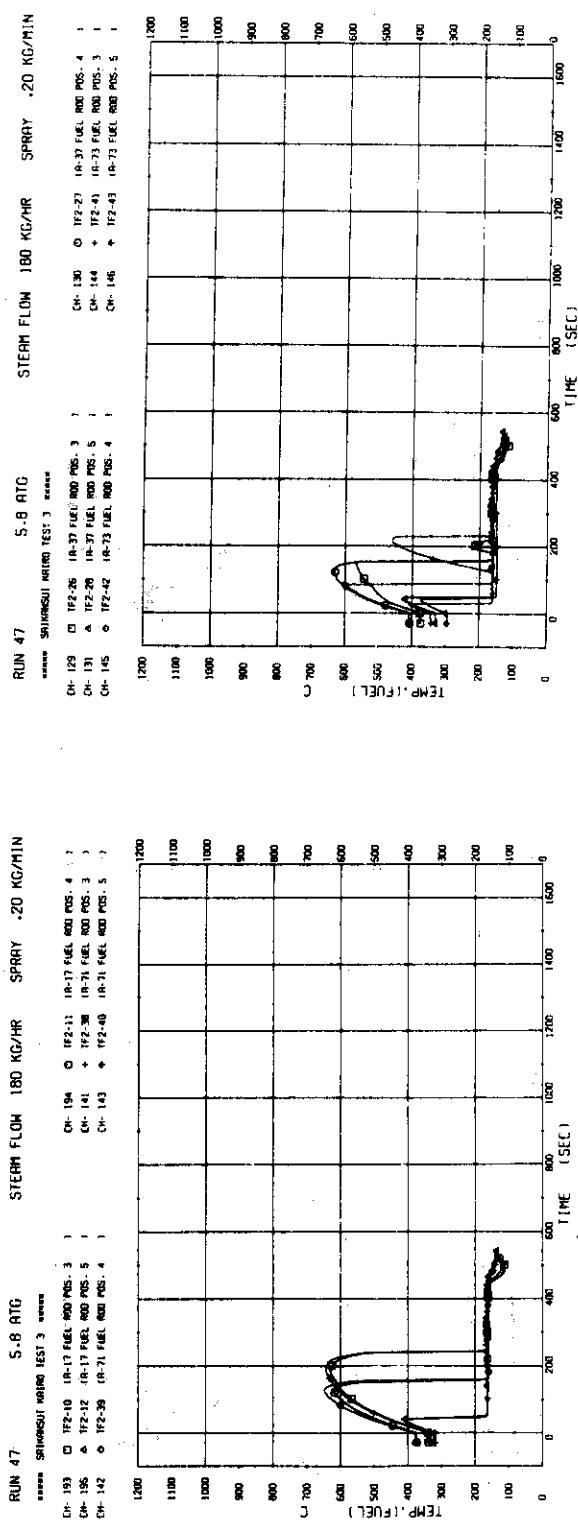
JAERI-M-9080

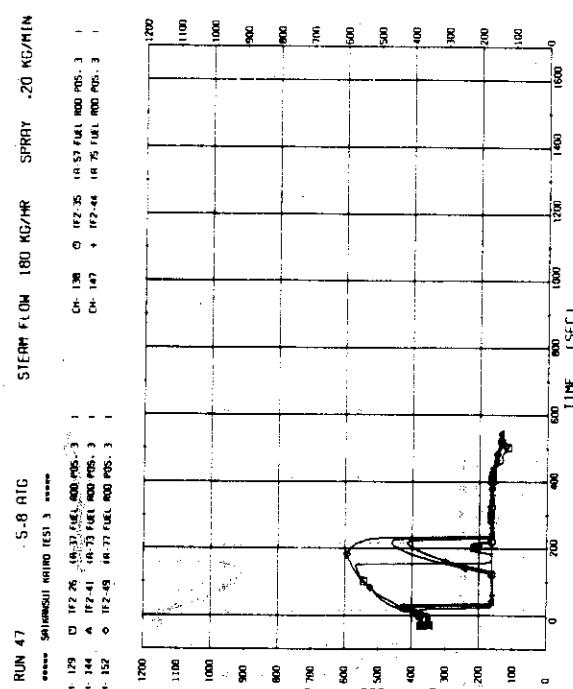
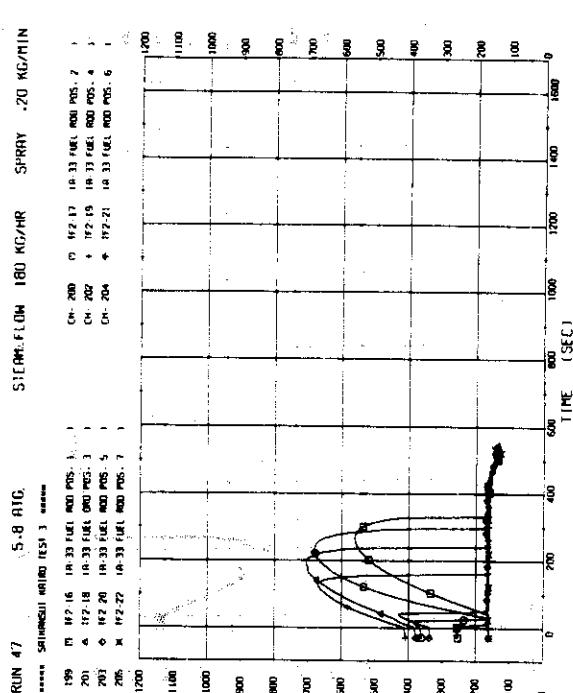
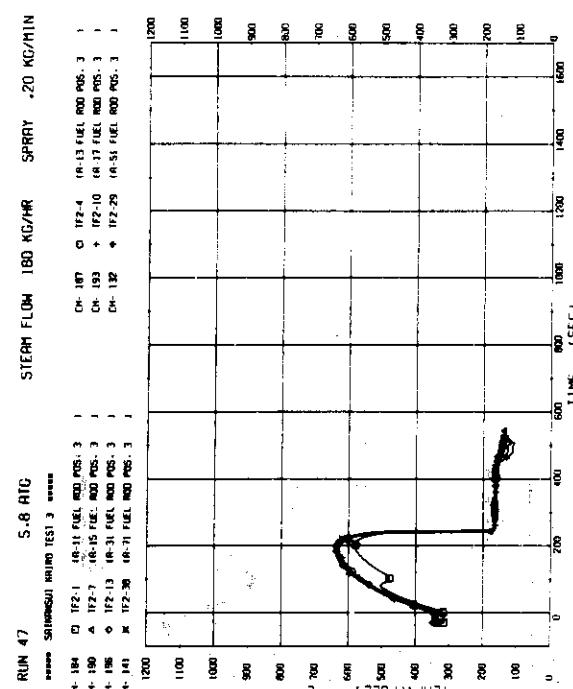
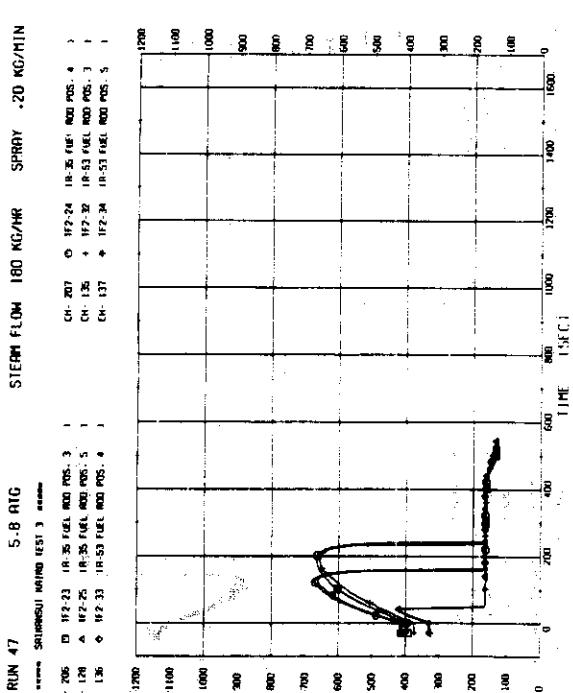


JAERI-M 9080

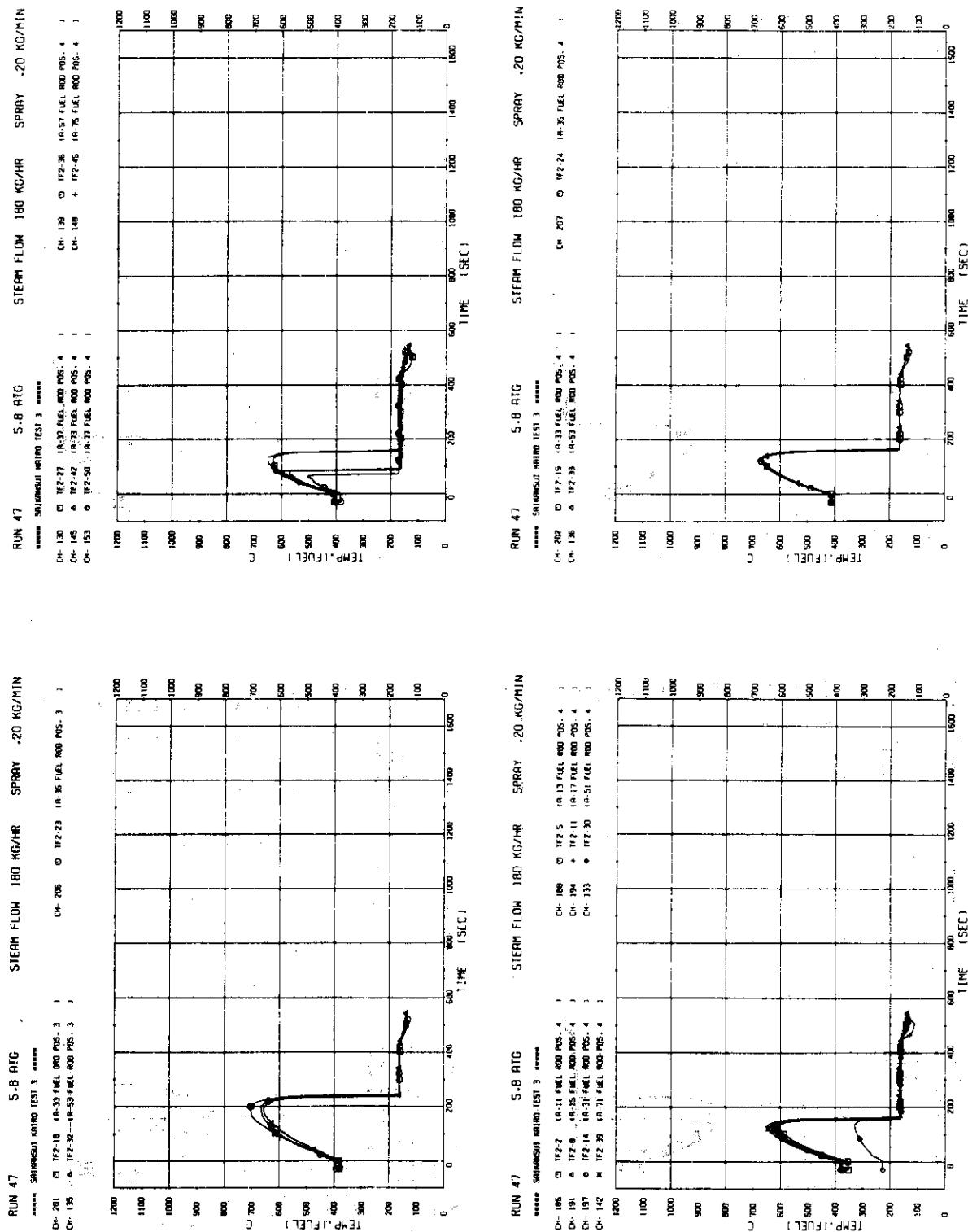


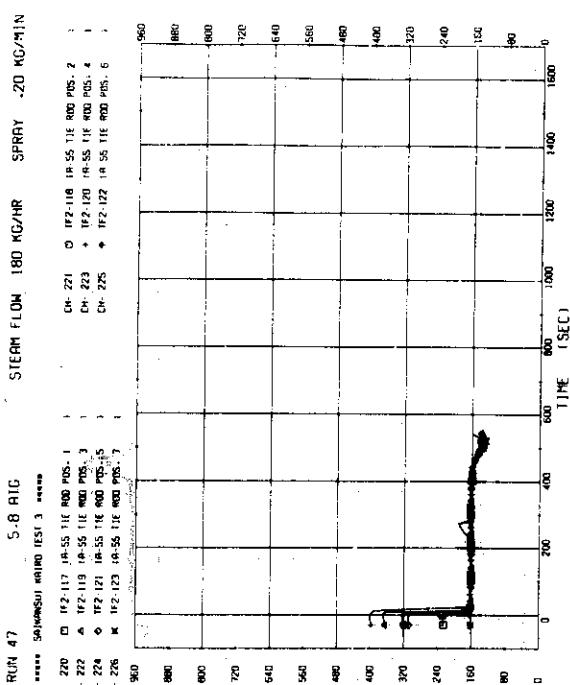
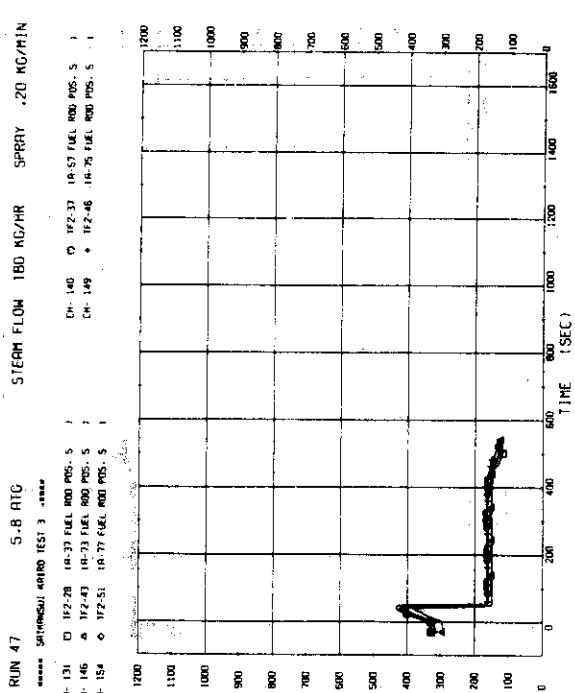
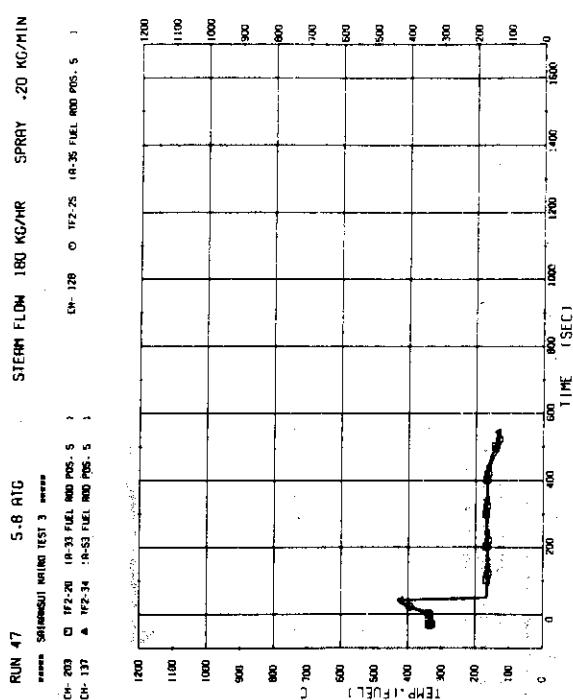
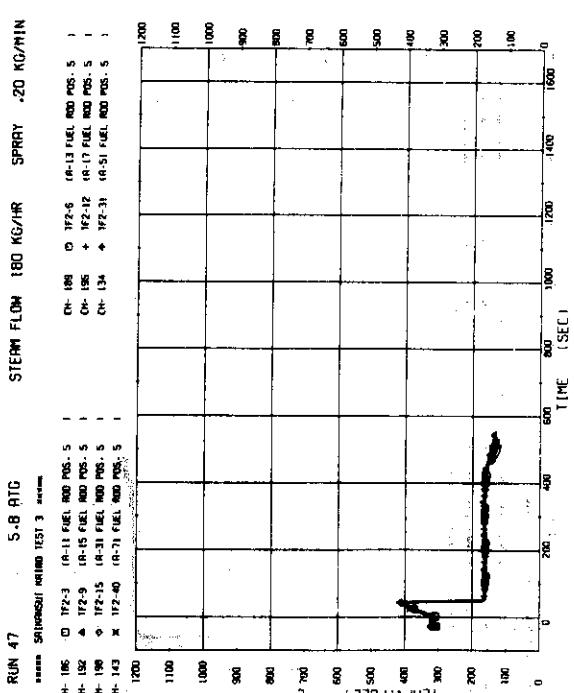
JAERI-M-9080



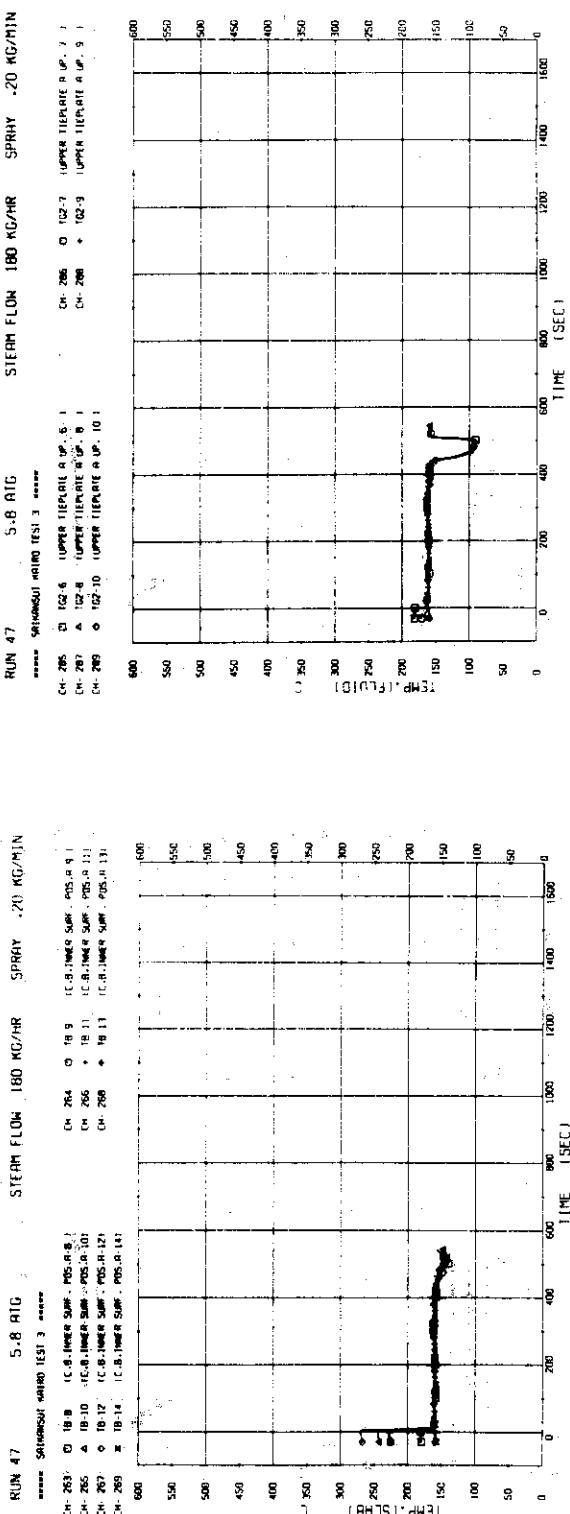
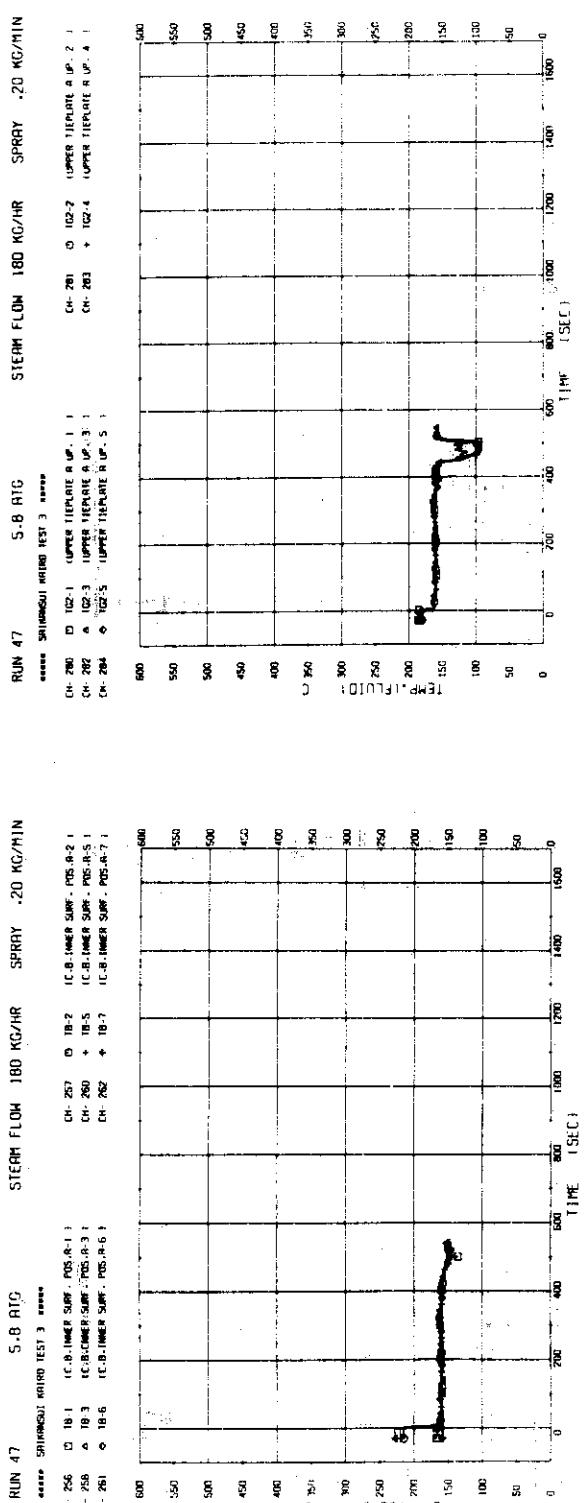


JAERI-M 9-080



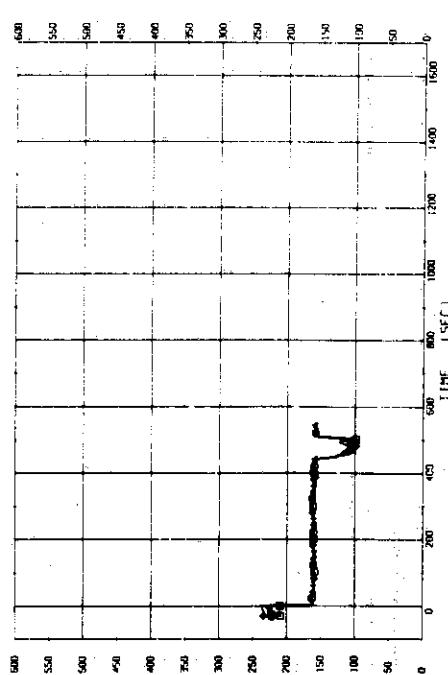


JAERI-M 9080



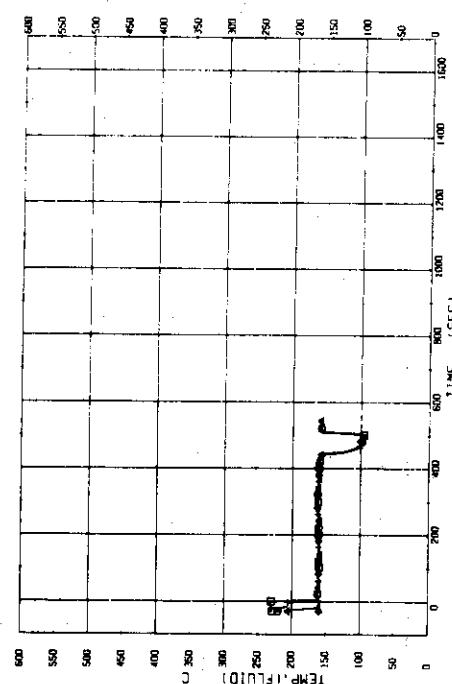
RUN 47 5.8 RTG
 SHIBUSAWA MEDIUM TEST 3

CH-290	□	162-11	UPPER TIEPLATE A (DM. 11)
CH-292	▲	162-13	UPPER TIEPLATE B (DM. 13)
CH-294	◆	162-15	UPPER TIEPLATE C (DM. 15)

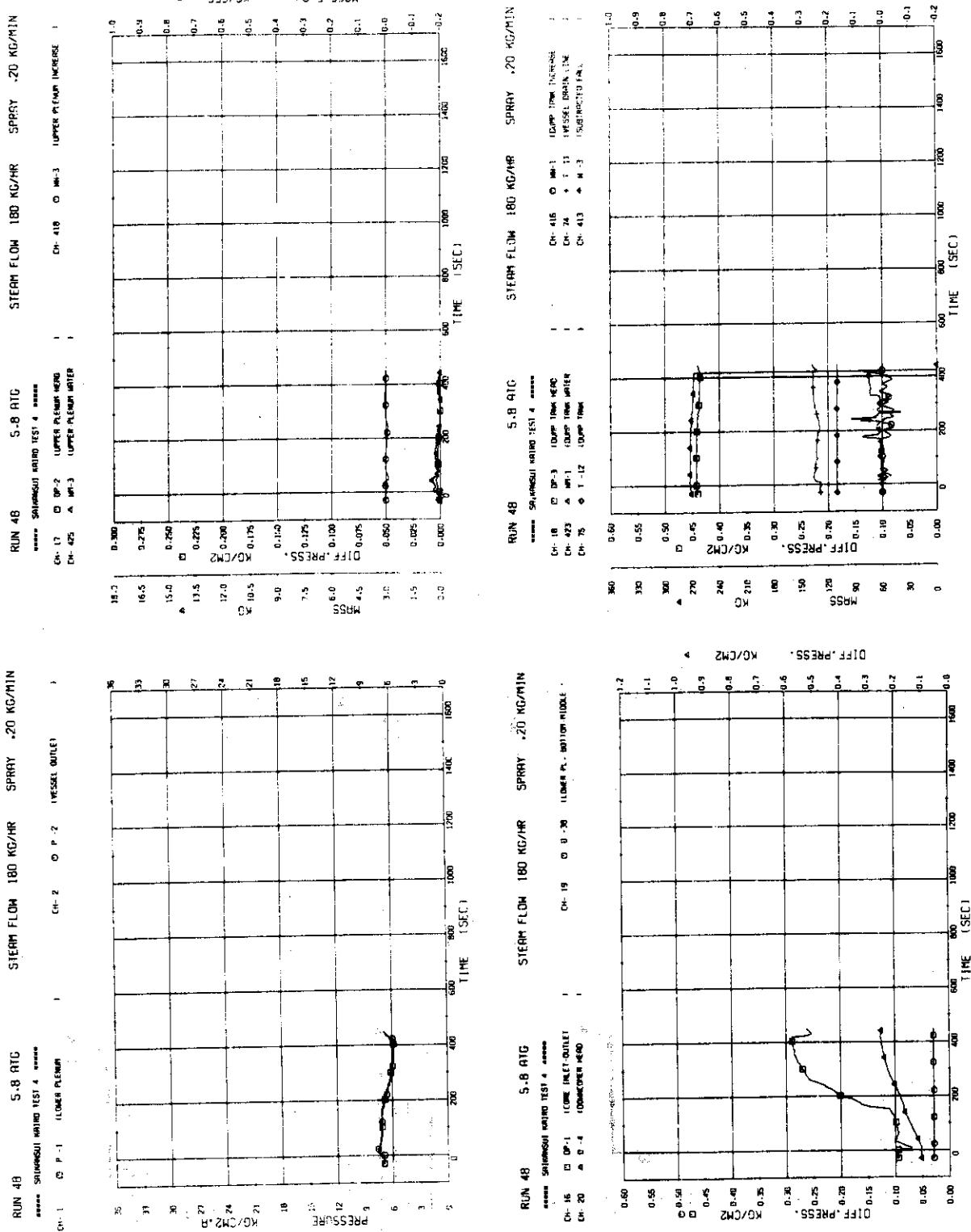


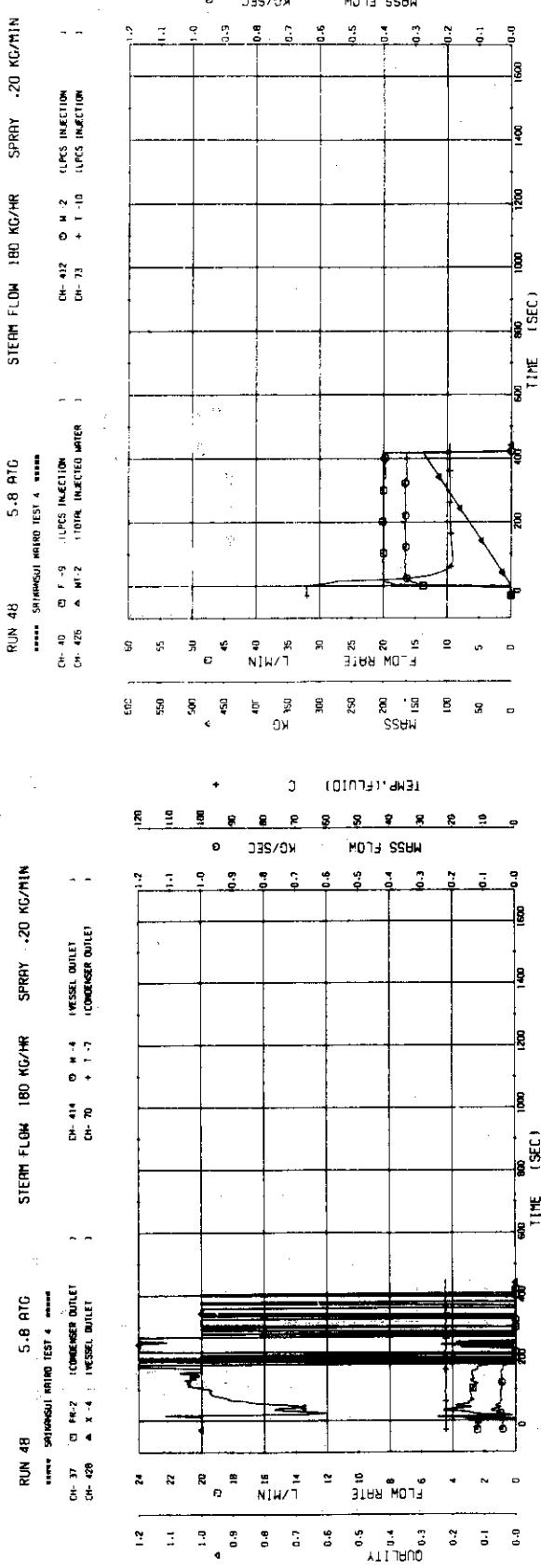
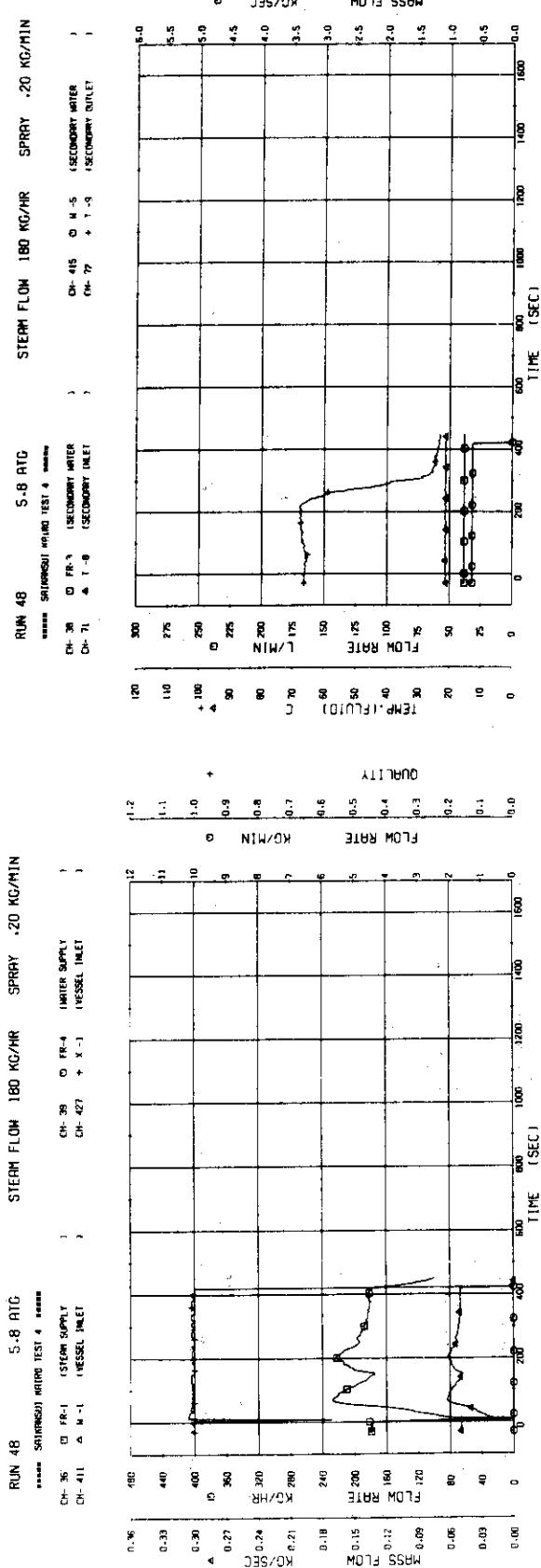
RUN 47 5.8 RTG
 SHIBUSAWA MEDIUM TEST 3

CH-295	□	162-16	UPPER TIEPLATE A (DM. 16)
CH-297	▲	162-18	UPPER TIEPLATE B (DM. 18)
CH-299	◆	162-20	UPPER TIEPLATE C (DM. 20)

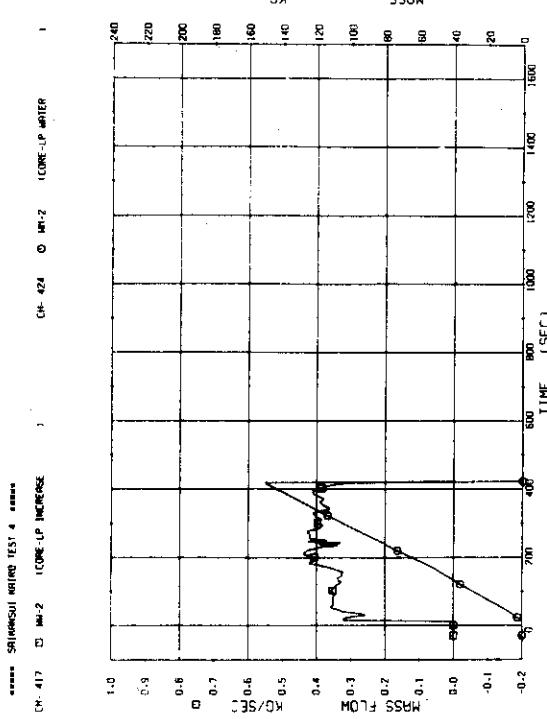
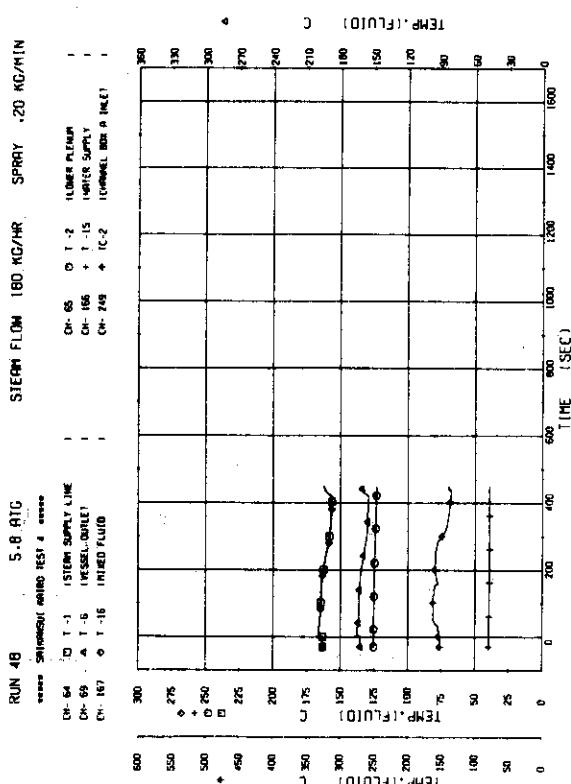
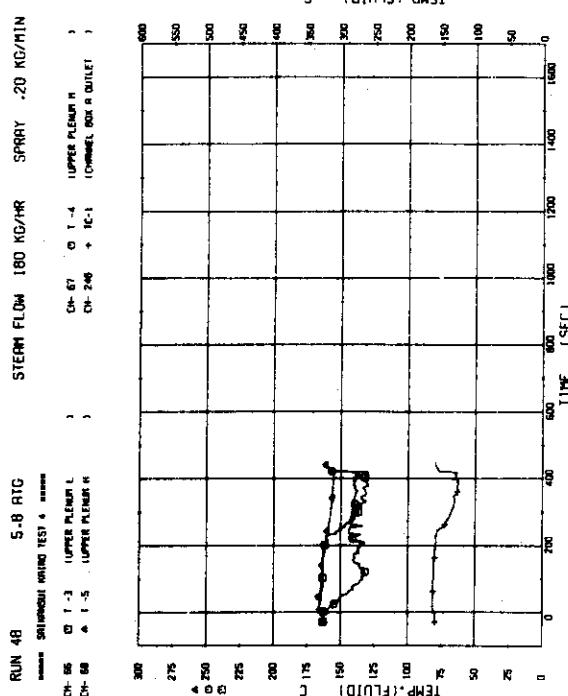
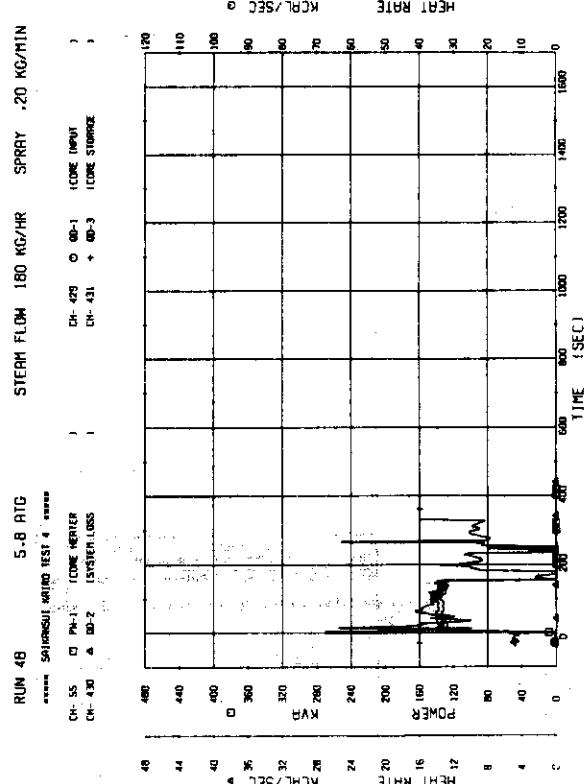


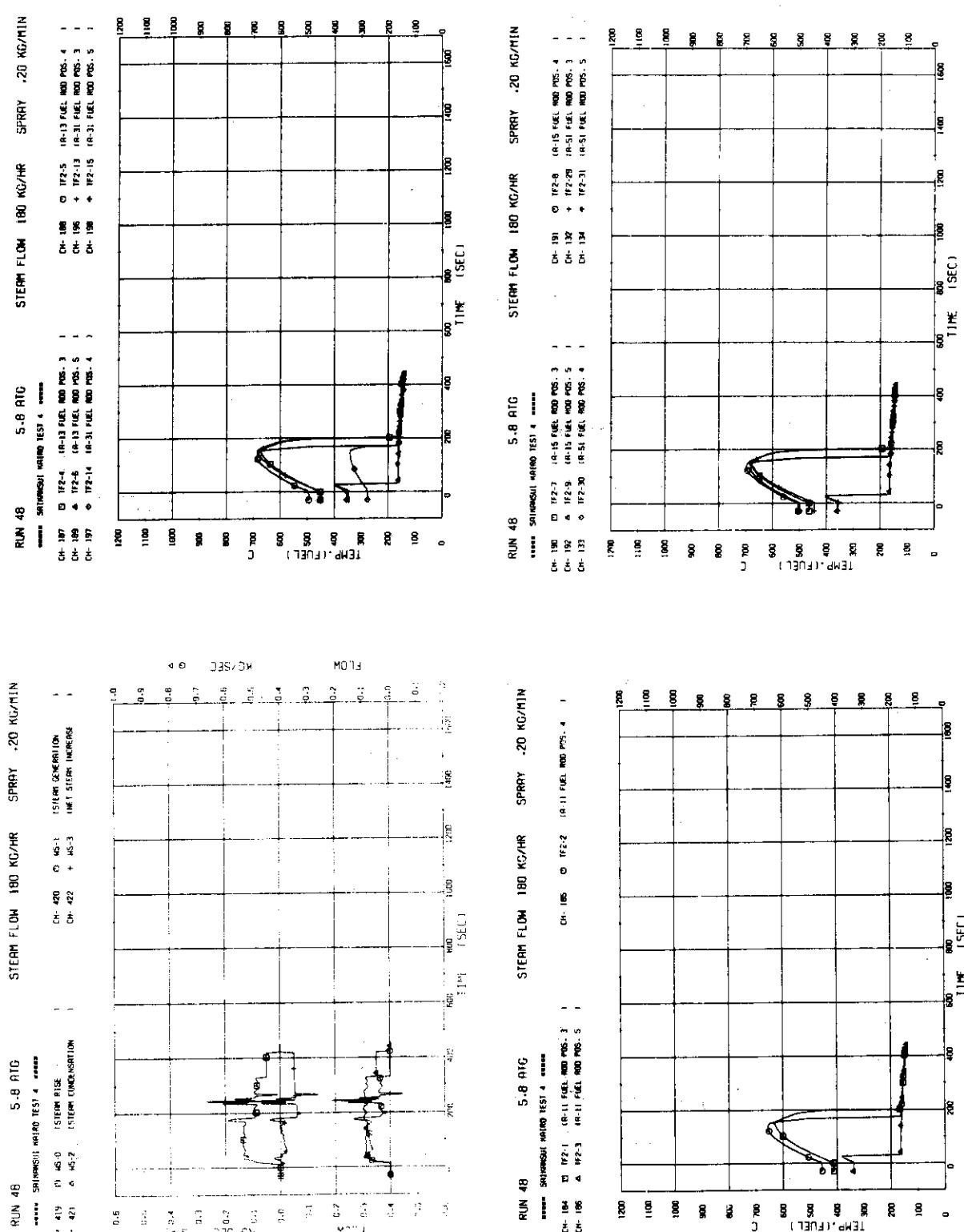
JAERI-M 9080



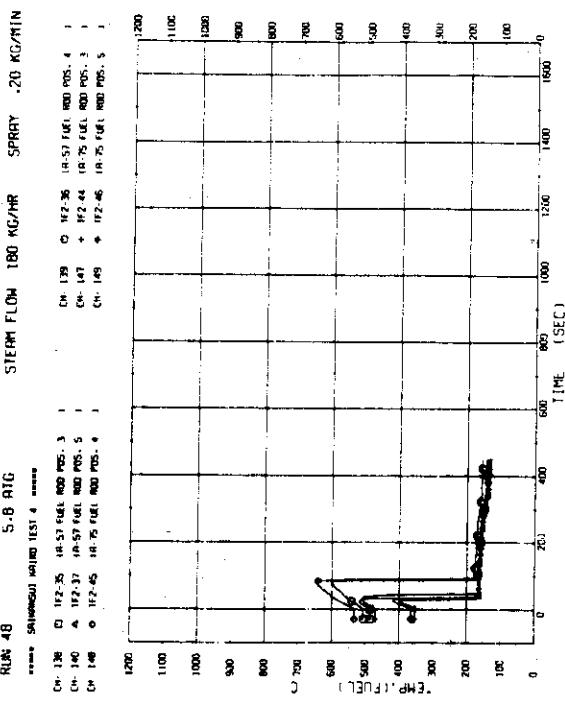
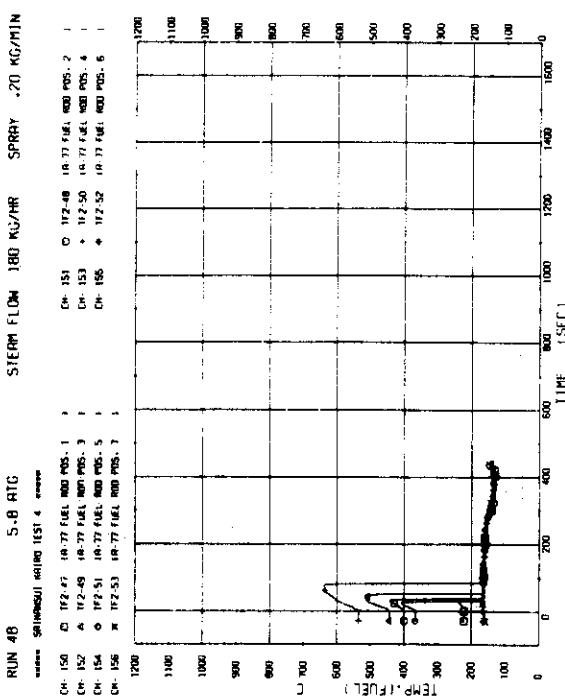
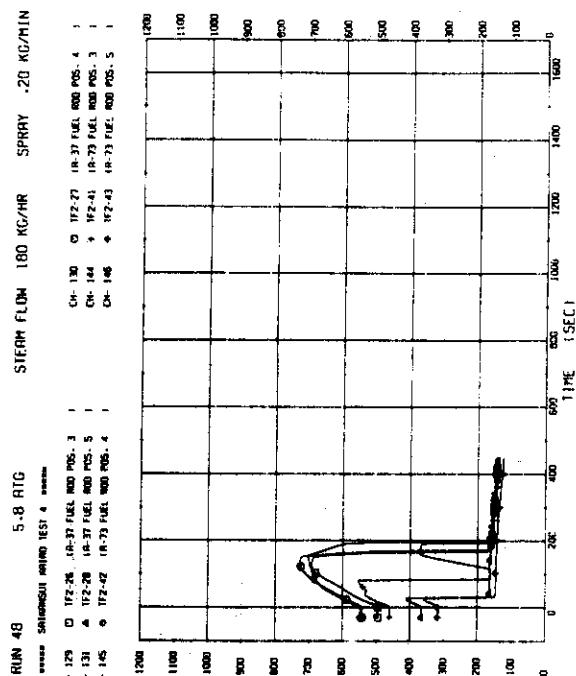
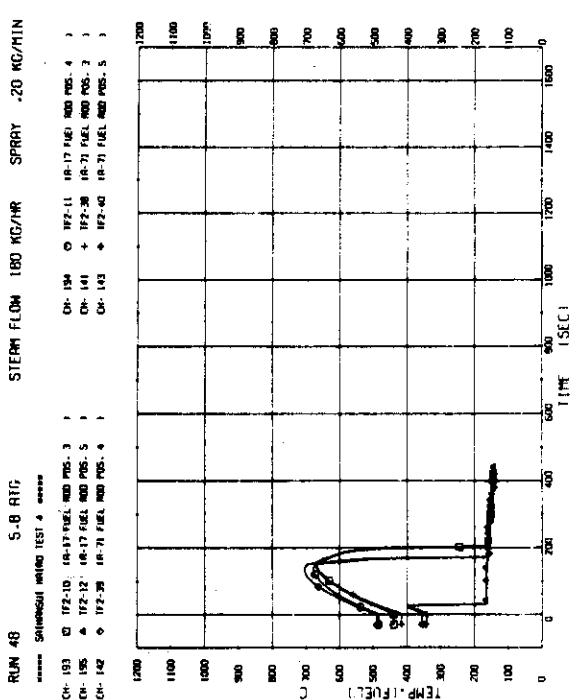


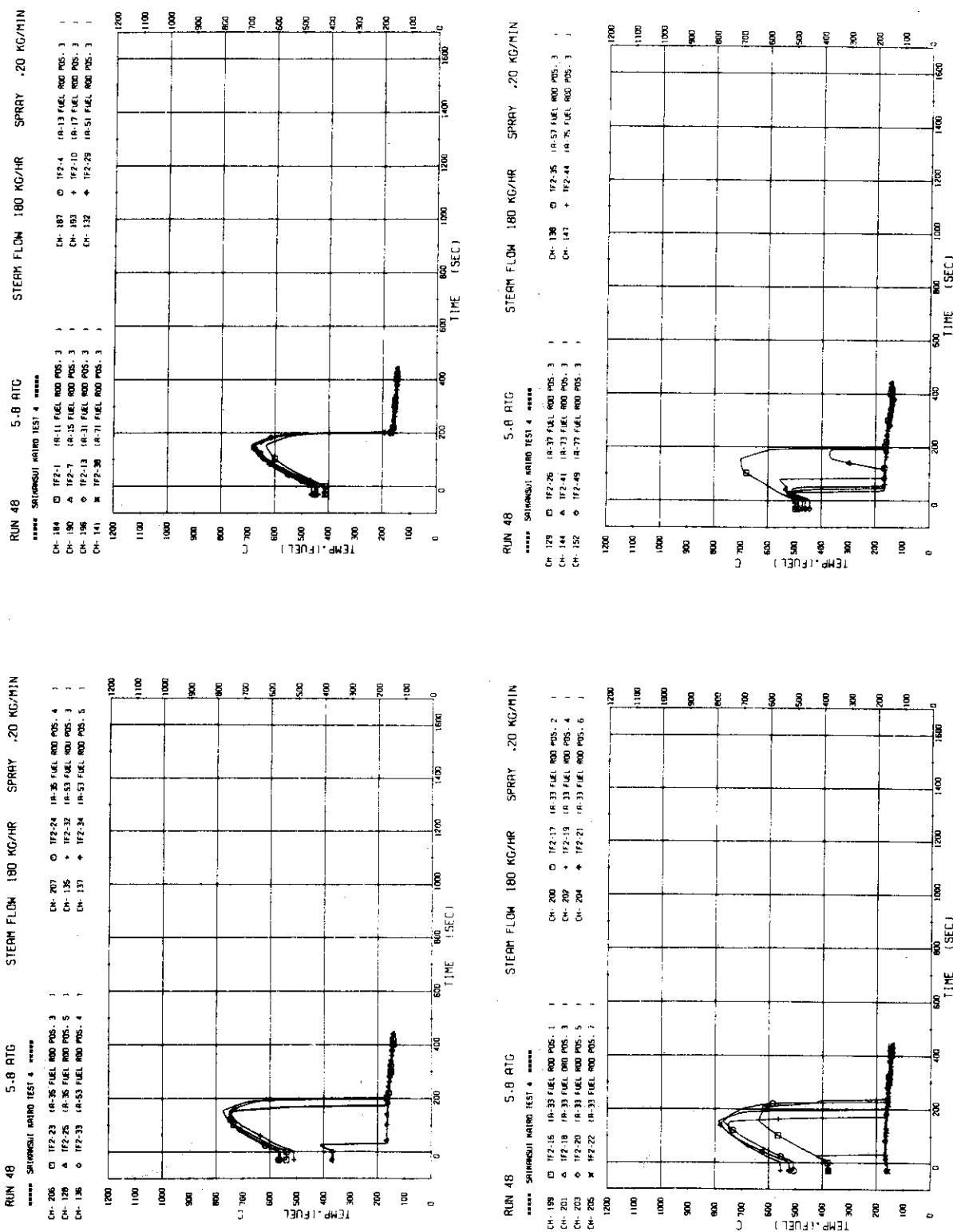
JAERI-M 9080



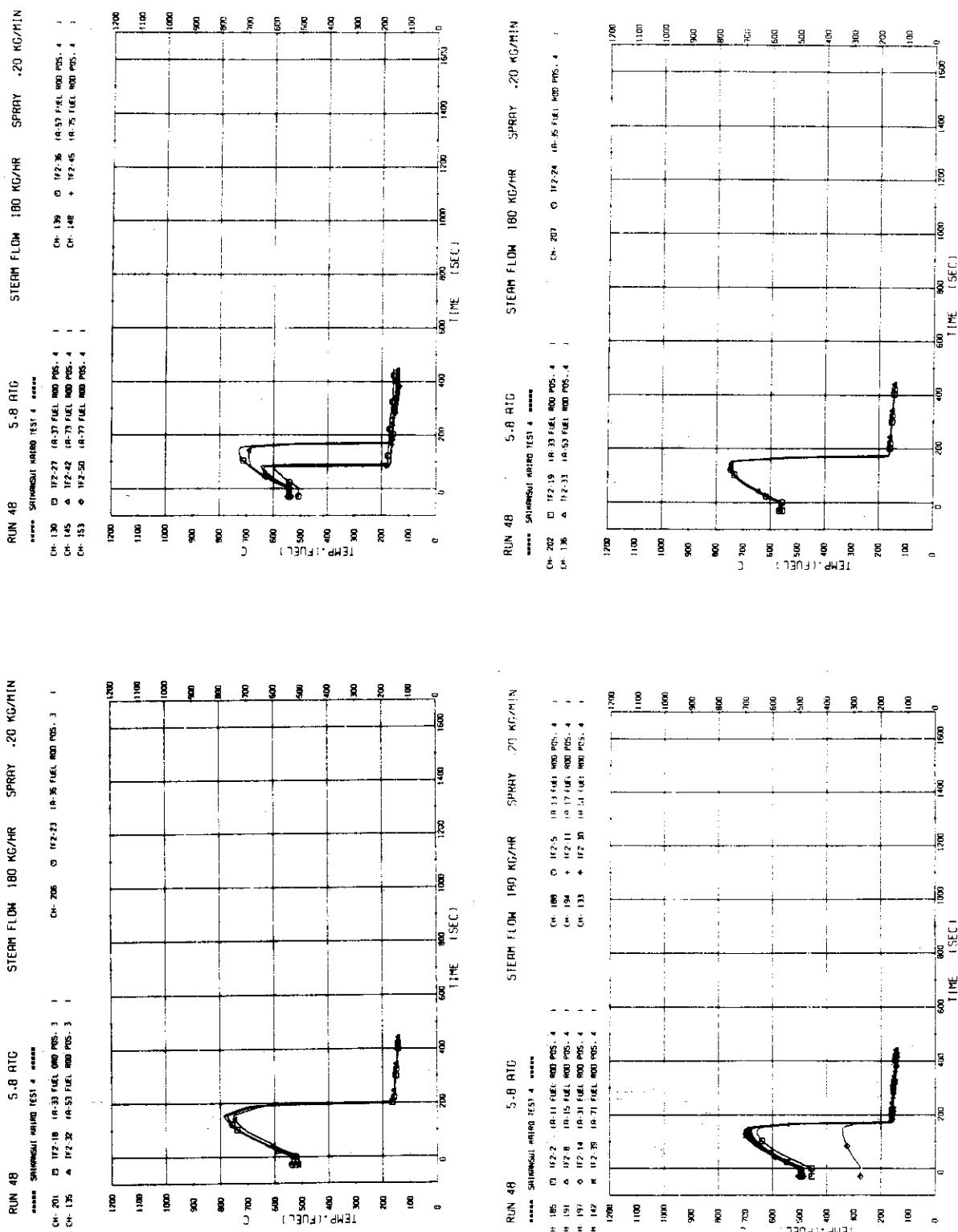


JAERI-M 9080

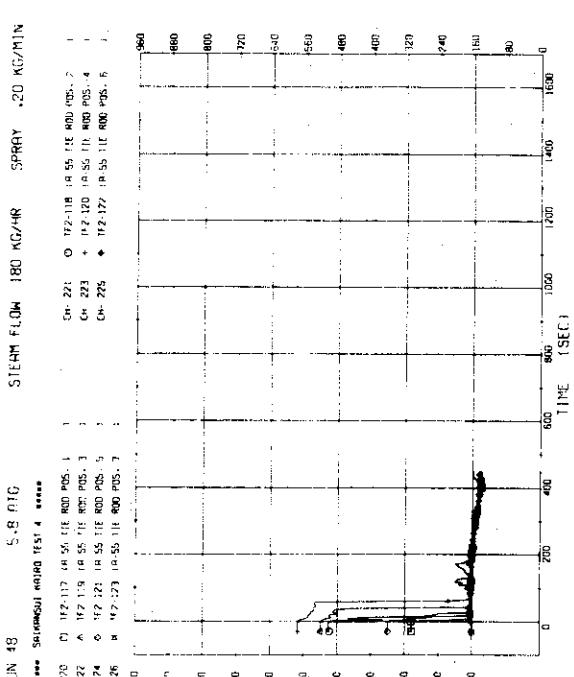
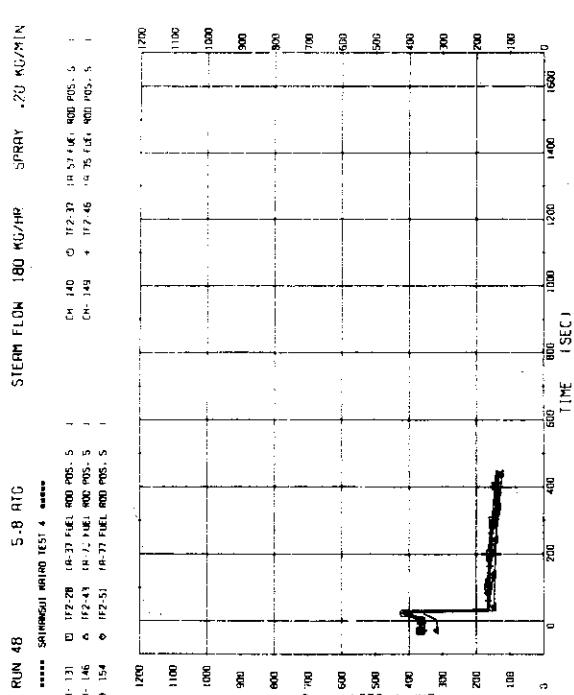
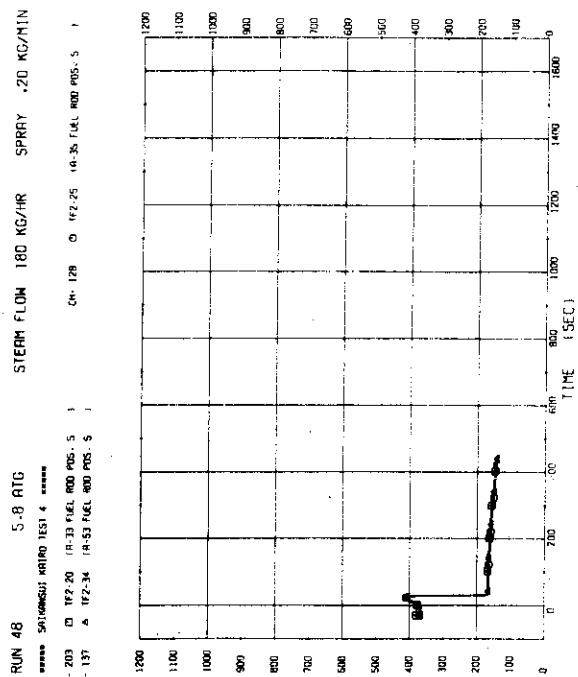
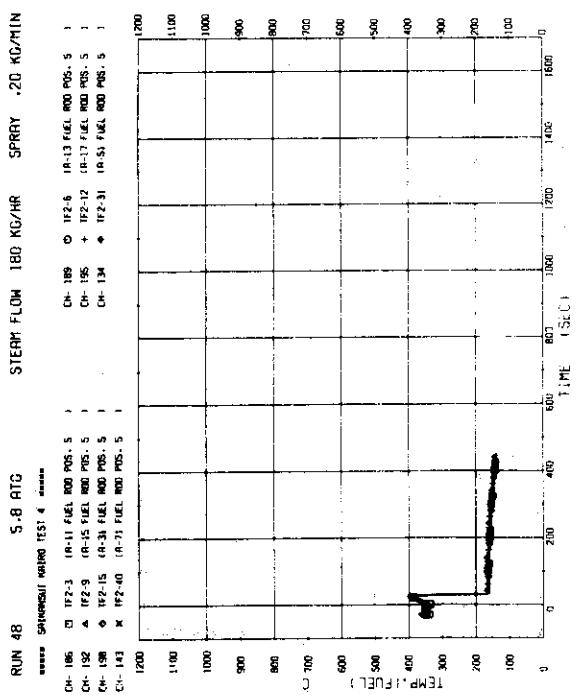




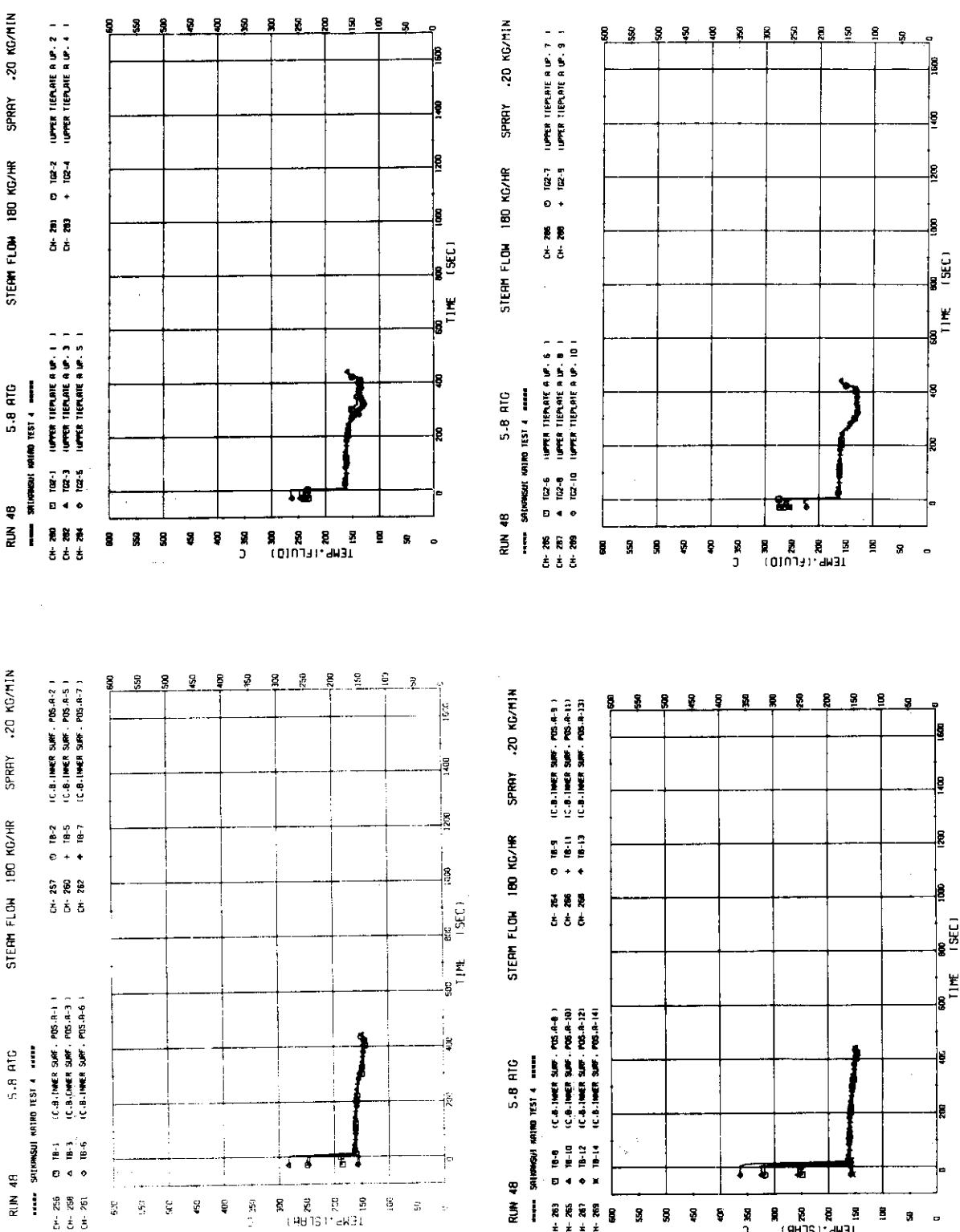
JAERI-M 9080



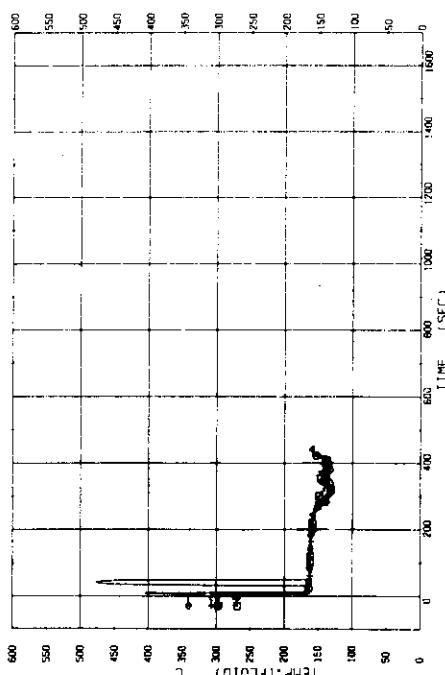
JAERI - M 9080



JAERI-M 9080



RUN 48 5.8 ATG STEAM FLOW 180 KG/HR SPRAY .20 KG/MIN
 SHIMANO KAWANO TEST 4 *****
 CH-290 □ TO2-11 (UPPER TIEPLATE A LOM. 11)
 CH-292 ▲ TO2-13 (UPPER TIEPLATE A LOM. 13)
 CH-294 ◆ TO2-15 (UPPER TIEPLATE A LOM. 15)



RUN 48 5.8 ATG STEAM FLOW 180 KG/HR SPRAY .20 KG/MIN
 SHIMANO KAWANO TEST 4 *****
 CH-295 □ TO2-16 (UPPER TIEPLATE A LOM. 16)
 CH-297 ▲ TO2-18 (UPPER TIEPLATE A LOM. 18)
 CH-299 ◆ TO2-20 (UPPER TIEPLATE A LOM. 20)

