

原型炉用過熱器伝熱管材SUS321のウェステージ試験



1986年3月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N 9410 86-023
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

1986年3月

原型炉用過熱器伝熱管材 S U S 321 のウェステージ試験

宇佐美正行*

田辺 裕美*

黒羽 光男*

要 旨

高速増殖原型炉「もんじゅ」の蒸気発生器において万一水リークが発生した場合の事故評価を行う上で、ナトリウム-水反応による伝熱管の損耗（ウェステージ）挙動を把握することは重要である。このため、過熱器材であるS U S 321 鋼を対象として、動燃大洗工学センター内の小リーク・ナトリウム・水反応試験装置（S W A T - 2）及び大リーク・ナトリウム-水反応試験装置（S W A T - 1）を用いて、それぞれ小リーク及び中リーク領域でのウェステージ試験を実施した。試験パラメータは水リーク率、ノズル・ターゲット間距離、ナトリウム温度である。主な結果は以下のとおり。

1. 小リーク領域（水リーク率：0.1～10 g/sec）でのS U S 321 鋼のウェステージ率は $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼及びS U S 304 鋼と同様L/D（L：ノズル・ターゲット間距離，D：ノズル孔径）に依存し，L/D = 20～35にピークを有する。このS U S 321 の最大ウェステージ率は同じオーステナイト系ステンレス鋼であるS U S 304 の最大値の約1/2で，S U S 321 の方が耐ウェステージ性に優れている。
2. 中リーク領域（水リーク率29及び145 g/sec）のS U S 321 鋼のウェステージ率はL/Dに依存し，L/D = 20～50にピークを有する。これは $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の最大ウェステージ率に比べ約1/4で，耐ウェステージ性に優れている。
3. これらの結果を基に小リーク及び中リーク領域のそれぞれに適用できるウェステージ率評価実験式を導き出した。

* 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室

March 1985

Wastage Tests on Monju Superheater Tube Material SUS321

Masayuki Usami * ,
Hiromi Tanabe * ,
Mitsuo Kuroha * ,

Abstract

It is essential to clarify wastage behavior of a heat transfer tube in a sodium-water reaction in order to analyze a water leakage incident in a steam generator of LMFBR Monju.

Therefore wastage tests in small and intermediate leak ranges were conducted for austenitic stainless steel JIS · SUS321 of a Monju superheater tube material by use of Small Leak Sodium-Water Reaction Test Loop (SWAT-2) and Large Leak Sodium-Water Reaction Test Rig (SWAT-1).

In the tests, a water leak rate, a distance from a leak nozzle to a target tube, and a sodium temperature were varied as empirical parameters.

Test Results are as follows:

1. In the small leak range (0.1~10 g / sec), the wastage rate of SUS321 depends on L/D and has maximum value at L/D of 20 to 30 ; where L is distance from the nozzle to the target and D is a nozzle diameter. Since the maximum wastage rate of SUS321 is about half as high as that of SUS304, SUS321 is more resistive against wastage than SUS304.
2. In the intermediate leak range (30 and 150 g/sec), the wastage rate depends on L/D and has a peak at L/D of 20~50. The maximum wastage rate is quarter as high as that of 2 ¼Cr-1Mo Steel.
3. Empirical formulas were derived from these test results concerning the relation between the wastage rate and the parameters.

* Plant Safety Section, FBR Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

1. 緒 論	1
2. 小リーク・ウェステージ試験	2
(RUN-4206試験)	
2.1 試験目的	2
2.2 試験装置	3
2.3 試験方法	3
2.4 試験結果	4
2.5 ウェステージ率に及ぼす水リーク率, ナトリウム温度, ノズル・ターゲット間距離の効果に関する検討	5
3. 中リーク・ウェステージ試験	10
(RUN-4117, RUN-4118)	
3.1 試験目的	10
3.2 試験装置	10
3.3 試験条件	11
3.4 試験結果	12
3.5 ウェステージ率に及ぼすL/D, 水リーク率に関する検討	13
4. 結 論	16
5. 参考文献	17

APPENDIX 1. SWAT-2. Run-4206-①, Run-4206-②, DATA
APPENDIX 2. SWAT-2 Run-4206-①, Run-4206-②, Wastage Map
APPENDIX 3. SWAT-2, Run-4206-①, Run-4206-②, Photograph of Target Tubes
APPENDIX 4. Test Results of Run-4117
APPENDIX 5. Test Results of Run-4118
APPENDIX 6. SWAT-1 Run-4117, Run-4118 Wastage Map

List of Tables

Table. 2. 2. 1	試験体製作仕様	18
Table. 2. 2. 2	試験データ収録項目	18
Table. 2. 3. 1	R U N - 4206試験条件	19
Table. 2. 3. 2	注水ノズル校正試験結果	20
Table. 2. 4. 1	R U N - 4206試験ウェステージデータ	21
Table. 3. 2. 1	計測一覧表	22
Table. 3. 3. 1	試験条件及び注水停止条件	23
Table. 3. 4. 1	中リーク・ウェステージ試験ターゲット伝熱管ウェステージデータ	24

List of Figures

Fig A	Arrangement of Target and Nozzle tubes for Test Section	2
Fig. 2. 2. 1	Flow Sheet Diagram of S W A T - 2	25
Fig. 2. 2. 2	反応容器内試験体挿入位置	26
Fig. 2. 2. 3	R u n - 4206 - ①試験用試験体	27
Fig. 2. 2. 4	R u n - 4206 - ②試験用試験体	28
Fig. 2. 4. 1	ウェステージの広がり ℓ_0 と水リーク率 G の関係	29
Fig. 2. 5. 1	ウェステージ率 W_R と水リーク率 G の関係	30
Fig. 2. 5. 2	相対ウェステージ率と絶対温度の逆数の関係	31
Fig. 2. 5. 3	ウェステージ率 W_R とノズルターゲット間距離 L の関係	32
Fig. 2. 5. 4	ウェステージ率 W_R と L/D の関係	33
Fig. 2. 5. 5	規格化したウェステージ率 ω と距離 L との関係	34
Fig. 2. 5. 6	相対ウェステージ率 ω/ω_0 と距離 L との関係	35
Fig. 3. 1. 1	Relation between Wastage Rate and L/D (2 ¼ C r - 1 M o)	36
Fig. 3. 2. 1	Flow Sheet Diagram of S W A T - 1	37
Fig. 3. 2. 2	S W A T - 1 Reaction Vessel	38
Fig. 3. 2. 3	Contiguration of Tubes and Thermocouples in Run 4117	39
Fig. 3. 2. 4	Contiguration of Tubes and Thermocouples in Run 4118	40
Fig. 3. 2. 5	ラプチャー型注水管	41
Fig. 3. 4. 1	Multiple Wastage of Tubes and Reaction Temperature (Run 4117)	42
Fig. 3. 4. 2	Multiple Wastage of Tubes and Reaction Temperature (Run 4118)	43
Fig. 3. 5. 1	Relation between Wastage Rate and L/D	44
Fig. 3. 5. 2	Wastage Rate and Leak Rate	45

1. 結 論

高速炉用蒸気発生器はナトリウムと水との熱交換器であり、万一伝熱管が損傷して水リークが発生すると噴出した水/蒸気とナトリウムとの化学反応により高温の腐蝕性ジェットが形成される。このため水リークの規模によっては隣接伝熱管が損耗（ウェステージ）を受け、遂には2次破損に至ることも考えられる。このためナトリウム-水反応研究は原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器開発研究においても重要なひとつのテーマとなった。

「もんじゅ」では当初より蒸発器及び過熱器の伝熱管材として $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼及びオーステナイト系ステンレス鋼がそれぞれ選定されており、そのためこれらの鋼材を供試体としたナトリウム-水反応試験を実施し、ウェステージ関係各種データの蓄積を行った。このうち過熱器伝熱管に対する試験では、オーステナイト系ステンレス鋼の代表としてSUS304を用いた試験を行った。これらの蒸気発生器伝熱管材のウェステージ試験結果については、既に報告されている。

1)~5)

1978年、それまで特定されていなかった過熱器伝熱管材としてSUS321が選定されたため、SUS321に関するウェステージ・データを得る必要が生じた。しかし、従来よりの知見に基づけば、SUS321が他の伝熱管材、とりわけSUS304のウェステージ特性と根本的に異なるものでないことは明らかであり、従って、SUS304のデータのある小リーク領域については、SUS304の実験データを基礎にSUS321の特徴的な傾向を修正として加える。また、SUS304に関するデータのない中リーク領域では、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼とのウェステージ特性の比較を行うものとしてSWAT-1及びSWAT-2装置を用いて次の試験を実施した。

○ 小リーク・ウェステージ試験：RUN-4206試験

(SWAT-2) (試験パラメータ：水リーク率，ナトリウム温度，ノズル・ターゲット間距離)

○ 中リーク・ウェステージ試験：RUN-4117，RUN-4118試験

(SWAT-1) (試験パラメータ：水リーク率（水リーク孔径），ノズル・ターゲット間距離)

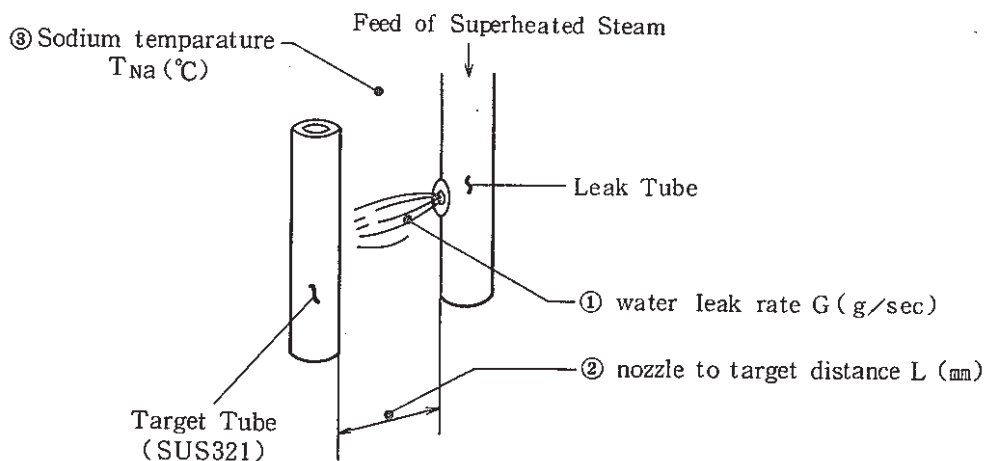
以下、第2，第3章にそれぞれ小リーク及び中リーク・ウェステージ試験の結果を、第4章にこれらの結果から得られた結論を述べる。

2. 小リーク・ウェステージ試験 (RUN - 4206 試験)

2.1 試験目的

本試験の目的は、「もんじゅ」過熱器伝熱管材であるSUS321鋼について、小リーク領域に於けるウェステージ率 W_R (mm/sec) を求め、その実験整理式を導き、また、それらを基に既存のSUS304材のデータとの比較に於いてSUS321材の耐ウェステージ性を明らかにすることにある。

試験では、ウェステージ率に影響を与える FigAに示した①水リーク率 (g/sec) , ②ノズル・ターゲット間距離 L (mm) 及び③ナトリウム温度 T_{Na} (°C) を試験パラメータとし、それぞれのパラメータに対して4~6点、合計12点のデータを得ることとした。



FigA Arrangement of Target and Nozzle tubes for Test Section

尚、比較対象となるSUS304材については、1972年以来多くのウェステージデータを得ており、既に次の実験整理式を定めている。¹⁾

(SUS304 実験整理式)

$$W_R = \frac{9205}{L} \exp \left[- \left\{ 0.287 \left(\ln \frac{G}{3.19} \right)^2 + \frac{7180}{T_{Na}} \right\} \right] \dots\dots\dots (2.1)$$

- 但し、 W_R : ウェステージ率 [mm/sec]
- L : ノズル・ターゲット間距離 [mm]
- G : 水リーク率 [g/sec]
- T_{Na} : ナトリウム温度 [°K]

2.2 試験装置

(1) S W A T - 2 試験装置

試験には、小リーク・ナトリウム-水反応試験装置 (S W A T - 2) を用いた。

同試験装置のうち、今回の試験に使用した部分のフローシートをFig. 2.2.1に示すが、大別すると、反応容器、水加熱器、反応生成物分離器 (サイクロンセパレータ) 及びダンプタンクから構成されており、試験は反応容器中に後述する試験体を挿入して、試験体内の注水管に水加熱器から過熱蒸気を注入することによって行った。

試験体を挿入した反応容器は、全長2515mm、内径 400mm ϕ 、板厚14mmで、ナトリウム液面検知用の接点式液面計及び熱電対が設けてある。Fig. 2.2.2はその反応容器と試験体の位置関係を示したものである。

尚、試験時の反応容器内ナトリウムは、静止状態である。

(2) 試験体

試験体製作仕様を、Table. 2.2.1に、試験体形状をFig. 2.2.3及びFig. 2.2.4に示す。

Fig. 2.2.3は、R U N - 4206 - ①試験、Fig. 2.2.4は、R U N - 4206 - ②試験に使用した試験体で、それぞれ6本の注水ノズルに6本のターゲット管を組合わせて、1回の試験運転で6回の注水が可能な構造とした。

試験に使用したターゲット管の材質は、S U S 321材で、外径31.8mm ϕ 、公称肉厚 3.5mm t の伝熱管を用いた。

注水ノズルは、Table. 2.2.1に示すとおり、ノズル孔径 0.5mm ϕ 以上がラプチャー型で、0.3mm ϕ 以下が保護ガス型である。

ラプチャー型は、ノズル孔表面に 1/100mm t の S U S 304 製のラプチャー箔を設けこれを押え板で固定したもので、水加熱器からの高圧蒸気を印加することでラプチャー箔を破壊する。⁽⁷⁾

ただし、このラプチャー型では、ノズルが小孔径になるとラプチャーしにくくなる。このため、ノズル孔径 0.3mm ϕ 以下の注水ノズルについては、保護ガス型 (注水開始以前は不活性ガスを放出させてナトリウムの流入によるノズル閉塞を防ぐ方法) とし注水直前まで A r ガスを流出させた。

試験体のノズル・ターゲット間距離は、もんじゅ過熱器伝熱管配列で、最小ピッチとなる 16.2mm を基準とした。

2.3 試験方法

試験をもんじゅ過熱器条件 (約141kg/cm²Gの過熱蒸気)で行うため、装置の水加熱器運転条件を温度 336 $^{\circ}$ C、圧力141kg/cm²Gの飽和水とし、水加熱器ガス空間に設置されている蒸気取出しノズルから試験体内注水伝熱管を接続する注水配管の温度を 480 $^{\circ}$ Cで運転することにより、水加熱器からの飽和蒸気が途中で加熱されて過熱蒸気となるようにした。

また、試験は、2回に分けて行ったが、水系の条件は一定とし、試験パラメータを次のように変えた。

- R U N - 4206 - ① 試験 — ナトリウム温度 (T_{Na}) 及びノズル・ターゲット間距離 (J N 1 ~ J N 6 試験) (L)
(水リーク率 (G) を一定)
- R U N - 4206 - ② 試験 — 水リーク率 (G)
(J N 7 ~ J N 12 試験) (ナトリウム温度 (T_{Na}) 及びノズル・ターゲット間距離 (L) を一定)

Table. 2.3.1 に R U N - 4206 試験の試験条件を示す。

尚、各注水ノズルの水リーク率は、試験前水加熱器に A r ガスを加圧封入し、このガスを注水ノズルから放出させることによって、注水ノズルを含めた注水系全体の圧力損失係数を求め、これを基に A r ガスから過熱蒸気への物性値変換を行って算出した。その注水ノズル校正試験結果及び R U N - 4206 試験条件下での各注水ノズルの水リーク率を Table. 2.3.2 に示す。

2.4 試験結果

試験は、R U N - 4206 - ① 試験で 6 回、R U N - 4206 - ② 試験で 6 回の合計 12 回を予定していたが、J N 7 試験がノズル孔 (0.1mm ϕ) 閉塞のため注水出来ず、結果的に計 11 回の注水試験となった。

試験注水時間は、Table. 2.3.1 の試験条件どおりである。

(1) 注水試験時の温度・圧力データ

J N 1 ~ J N 12 注水試験に於ける温度、圧力データを Appendix 1 に示す。

T - 401, P - 401 は、Fig. 2.2.1 に示した水加熱器の温度、圧力の変化で、各注水試験とも、注水と同時に低下し、注水量が最大の J N 12 試験では、温度 329℃、圧力 117kg / cm² G まで低下した。

T - 106 は、Fig. 2.2.2 に示した試験体から約 250mm 上部の反応容器内ナトリウム温度、T - 1 ~ T - 12 は Fig. 2.2.3 及び Fig. 2.2.4 に示した試験体のターゲット伝熱管周辺ナトリウム温度である。試験データより T - 1 ~ T - 12 は、注水開始と同時にナトリウム - 水反応時の反応熱による温度上昇を示しているのに比べ、T - 106 には際立った変化が現われていない。これは反応域が小さかったことを示している。

また、P - 104 は Fig. 2.2.1 に示した反応容器内カバーガス圧力の変化で、注入水の総量に比例し、J N 12 注水試験 (水リーク率、約 10.7g / sec) では最大の 0.4kg / cm² G 以上の圧力上昇があった。

(2) ターゲット伝熱管ウェステージデータ

Table. 2.4.1 にターゲット伝熱管ウェステージデータのまとめを示す。また Appendix 2 にウェステージマップ (ウェステージを受けた伝熱管表面の等高線図) を、Appendix 3 にウェステージ形状の写真を示す。

この結果から、J N 8, J N 9 伝熱管にはピット型ウェステージが、J N 1, J N 4 ~ 6 及び J N 10 ~ J N 12 の 7 本の伝熱管にはトロイダル型ウェステージが確認され、J N 2, J N 3 は、目視ではほとんどウェステージの形跡は観測されない。

ピット型ウェステージを受けた J N 8 , J N 9 伝熱管は, 0.47及び1.03 g/secと水リーク率が小さく, トロイダル型ウェステージを受けた伝熱管は2.8g/sec以上の水リーク率であることから, ノズル・ターゲット間距離が16.2mmの場合, この1.03~2.8g/secの範囲内でウェステージ形状がピット型からトロイダル型に変化する。

また, 本試験で最も深くウェステージを受けたのは J N 6 伝熱管 (ナトリウム温度 520℃, 水リーク率 2.8g/sec, ノズル・ターゲット間距離16.2mm) で, ウェステージの最大深さは 1.561mm (ウェステージ率 2.6×10^{-2} mm/sec) であるが, ナトリウム温度及びノズル・ターゲット間距離が一定の場合は, 水リーク率 3 ~ 5 g/secの範囲にウェステージのピークがあり, 5 g/sec以上の水リーク率になるとウェステージ率は低下する。

次に, ターゲット伝熱管のウェステージの広がりについて述べる。

このウェステージの広がり, 伝熱管の2次破損孔径と関係があり, 伝熱管がウェステージを受けた面の大きさを意味するもので注水時間にはほとんど影響されないと考えられる。

Fig. 2.4.1 に J N 8 ~ J N 12 のウェステージデータから得た伝熱管のウェステージの広がり (ℓ_0) と水リーク率 (G) の関係を示す。

このグラフから水リーク率 (G) の増加に伴い, ウェステージの広がり (ℓ_0) も大きくなり, 両対数グラフ上で直線になる。

従って, ウェステージの広がり (ℓ_0) と, 水リーク率 (G) の関係は次式で表わされる。

$$\ell_0 = 4.5 G^{0.62} \dots\dots\dots (2.2)$$

但し, ℓ_0 : ウェステージの広がり (mm ϕ) (平均孔径)

G : 水リーク率 (g/sec)

ただし, この適用範囲は, ナトリウム温度 480℃, ノズル・ターゲット間距離16.2mm一定で, 水リーク率 0.4~10 g/secに限定される。

2.5 ウェステージ率に及ぼす水リーク率, ナトリウム温度, ノズル・ターゲット間距離の効果に関する検討

ウェステージ率 (W_R) が, 水リーク率 (G), ナトリウム温度 (T_{Na}) 及びノズル・ターゲット間距離 (L) に依存することは, 既にこれまでの $2\frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo 鋼及び S U S 304 材に関する試験結果⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ から明らかである。

そこで, この知見を基に, ここでは2.4項で述べた試験結果に基づいて既存の S U S 304 材に関する試験結果との比較を行い, S U S 321 の小リーク領域に於けるウェステージ率の実験整理式を導く。

(1) ウェステージ率 (W_R) の水リーク率 (G) 依存性

Fig. 2.5.1 に, ナトリウム温度 480℃の場合の水リーク率とウェステージ率の関係を示す。ただし, ノズル・ターゲット間距離は, 今回の試験で得た S U S 321 材のデータでは16.2mm, 比較のために載せた既存の S U S 304 材のそれでは17.5mmである。

この図から明らかなように、S U S 321 材のウェステージ率はナトリウム温度 480℃の場合は、最大 2.3×10^{-2} (mm/sec) であり、水リーク率 3 ~ 5 g/sec の範囲で最大のウェステージ率を示している。

ここに示した図では、S U S 304 材と S U S 321 材でノズル・ターゲット間距離にわずかな違いはあるが、この影響は相対的に小さいので無視すると S U S 321 材のウェステージ率は S U S 304 材の約 1 / 2 であり、S U S 321 材は、S U S 304 材に比べ耐ウェステージ性に優れていることが明らかである。

次に、この S U S 321 材ウェステージデータを基に、ウェステージ率 (W_R) と水リーク率 (G) の関係式を導く。Fig. 2.5.1 でナトリウム温度 480℃ のデータについて注目すると、ウェステージ率 (W_R) と水リーク率 (G) は両対数グラフ上で 2 次曲線に近い関係にある。このためウェステージ率 (W_R) は、次のように表わされる。

$$W_R = A e^{-B \left(\ln \frac{G}{C} \right)^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、A, B, C は、水リーク率以外のパラメータから決まる定数であり、G は水リーク率である。

そこで、ナトリウム温度 480℃、ノズル・ターゲット間距離 16.2mm のデータを (2.3) 式にフィットさせ、S U S 321 材のウェステージ率 (W_R) と水リーク率 (G) の関係を求めると、(2.3) 式は、次の (2.4) 式で表わされる。

$$S U S 321 : W_R = 0.023 e^{-0.243 \left(\ln \frac{G}{3.93} \right)^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

但し、 W_R : ウェステージ率 (mm/sec)
 G : 水リーク率 (g/sec)

(2) ウェステージ率 (W_R) のナトリウム温度 (T_{Na}) 依存性

Fig. 2.5.2 に水リーク率 (ノズル孔径) 及びノズル・ターゲット間距離を一定とした場合の相対ウェステージ率とナトリウム温度 (絶対温度) の逆数の関係を示す。

この相対ウェステージ率は、(2.4) 式の与えるナトリウム温度 480℃ でのウェステージ率に対する比としているため、横軸 1.33×10^{-3} で相対ウェステージ率が 1.0 になる。

S U S 304 材データは、ナトリウム温度の上昇とともに、相対ウェステージ率が増加する傾向を示しており、図中の破線は最小 2 乗近似直線である。

本試験の S U S 321 材データは、ナトリウム温度パラメータを大きく振らなかったため、 $1.2 \sim 1.4 \times 10^{-3}$ の範囲に止まり、データ数も少なく、ばらつきが見られる。

しかしながら、S U S 304 材データと比較しても有意な差は認められず、ウェステージ率のナトリウム温度依存性は、S U S 304 材とほぼ同等であると判断した。

このため、ウェステージ率 (W_R) とナトリウム温度 (T_{Na}) の関係は、次のように表わすことが出来る。

$$SUS321 = SUS304 : W_R \propto \exp \left(- \frac{7180}{T_{Na}} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

但し, T_{Na} : ナトリウム温度 ($^{\circ}K$)

よって、ナトリウム温度 480℃ の場合のウェステージ率 (W_{480}) 基準にしたときの、あるリーク率でのウェステージ率とナトリウム温度との関係を表わした (2.6) 式中の定数 K_2 は、SUS304 材のそれと同一になる。

$$\frac{W_R}{W_{480}} = \frac{(W/G)_R}{(W/G)_{480}} = \frac{K_1 e^{-K_2/T_{Na}}}{K_1 e^{-K_2/753}} \dots\dots\dots (2.6)$$

但し, $K_2 = 7180$

以上より (2.3)(2.4) 式で求めたナトリウム温度 480℃ での定数 A, B, C , と (2.5) (2.6) 式で求めた定数 K_2 を次の (2.7) 式に代入することにより、水リーク率 (G) 及びナトリウム温度 (T_{Na}) の依存性を考慮したウェステージ率を表わす (2.8) 式が導かれる。

$$W_R = e^{K_2/753} A e^{-B} \left(\ln \frac{G}{C} \right)^2 + K_2 / T_{Na} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$W_R = 318 \exp \left[- \left\{ 0.243 \left(\ln \frac{G}{3.93} \right)^2 + \frac{7180}{T_{Na}} \right\} \right] \dots\dots\dots (2.8)$$

(3) ウェステージ率 (W_R) のノズル・ターゲット間距離 (L) 依存性

(1)及び(2)項より、SUS321 材ウェステージ率の水リーク率及びナトリウム温度依存性については (2.8) 式で表わされることが分かった。

従って、本項ではノズル・ターゲット間距離距離の依存性について述べ、それを加えることにより、SUS321 材のウェステージ率実験整理式を導く。

Fig. 2.5.3 は、ウェステージ率 (W_R) とノズル・ターゲット間距離 (L) の関係を示したものであるが、距離が増すほどウェステージ率は低下し、 $L = 50mm$ 以上になるとほとんどウェステージを受けなくなることが分かる。

また、Fig. 2.5.4 は、横軸にノズル・ターゲット間距離と、ノズル孔径との比 (L/D) を、縦軸にウェステージ率 (W_R) を示したものであるが、このグラフから次のことが言える。

- (a) ウェステージ率の最大値は、 $L/D = 20 \sim 35$ の範囲に存在する。
- (b) $L/D > 20 \sim 35$ では、 L/D が増加するにつれウェステージ率は低下し、 $L/D > 150$ になるとウェステージは観測されない。

(c) $L/D > 20 \sim 35$ では、 L/D が小さくなるにつれウェステージ率も減少する傾向にある。

(d) L/D 同一条件に於けるSUS321材のウェステージ率は、SUS304材の約1/2である。

Fig. 2.5.5は、ウェステージ率 (W_R) が(2.9)式に示す関数で表わされることから、横軸に距離 (L)、縦軸に(2.10)式で定義される規格化したウェステージ率 ω を用いて、距離の効果を明確化したものである。

$$W_R = F(G, T_{Na}, L) \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\omega = \frac{W_R}{\exp\left\{-0.243\left(\ln\left(\frac{G}{3.93}\right)\right)^2\right\}} \dots\dots\dots (2.10)$$

また、Fig. 2.5.6はSUS304材の距離の効果に関するデータがないため、2¼Cr-1Mo鋼と距離の効果を比較したものであり、縦軸に $L = 25\text{mm}$ の時のウェステージ率を基準とする相対ウェステージ率 ω/ω_0 をとったグラフである。

この結果、Fig. 2.5.5より、SUS321材の ω と L には、次の関係があることが分かった。

$$\omega = 1.34L^{-2.3} \dots\dots\dots (2.11)$$

すなわち、ウェステージ率 (W_R) は、水リーク率及びナトリウム温度が一定の場合、距離の2.3乗に反比例することを意味する。

これは、2¼Cr-1Mo鋼が距離の1乗に反比例するのに比べると、SUS321材は、ウェステージ率の距離依存性が大きいことを示している。

従って、SUS321材の実験整理式は、ここで求められたウェステージ率と距離の関係を(2.8)式に組込むことにより次のように表わすことが出来る。

(SUS321 実験整理式)

$$W_R = 31.8 \cdot \left(\frac{L_0}{L}\right)^{2.3} \cdot \exp\left[-\left\{0.243\left(\ln\frac{G}{3.93}\right)^2 + \frac{7180}{T_{Na}}\right\}\right] \dots\dots (2.12)$$

- 但し、 W_R : ウェステージ率 (mm/sec)
- L : ノズル・ターゲット間距離 (mm)
- L_0 : 16.2mm
- G : 水リーク率 (g/sec)
- T_{Na} : ナトリウム温度 (°K)

従って(2.12)式より

$$W_R = \frac{1.925 \times 10^5}{L^{2.3}} \exp \left[- \left\{ 0.243 \left(\ln \frac{G}{3.93} \right)^2 + \frac{7180}{T_{Na}} \right\} \right] \dots\dots\dots (2.13)$$

以上の検討の結果，S U S 321 材のウェステージ率 (W_R) とノズル・ターゲット間距離 (L) は，(2.13) 式により整理出来ることが分かったが，本検討は Fig. 2.5.4 に示すとおり，

$$L / D \geq 20 \dots\dots\dots (2.14)$$

の範囲の実験結果より求めたものである。

そのため，(2.13) 式の適用範囲は (2.14) 式に限定される。

3. 中リーク・ウェステージ試験

(RUN - 4117, RUN - 4118 試験)

3.1 試験目的

本試験の目的は、もんじゅ過熱器伝熱管材であるSUS321材について、中リーク領域に於けるウェステージ率 (W_R) を求め、その実験整理式を導き、またそれを基に既存の $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼のデータとの比較に於いて、SUS321材の耐ウェステージ性を明らかにすることにある。

また、2次破損伝熱管のウェステージの広がり及び形状を明らかにすることも目的の一つとした。

これらの目的達成のため、試験は、ノズル・ターゲット間距離及び水リーク率(水リークノズル孔径)をパラメータとした2回の注水試験を計画した。

尚、既に述べたSUS321材の小リーク領域のウェステージ試験では、そこで得た結果との比較をSUS304材の試験結果を行った。しかし、中リーク領域では比較対象となるSUS304材のデータをこれまで得ていないため、ここでは既にデータのある $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼のそれと比較することとした。比較対象とした $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼については、Fig. 3.1.1に示すとおりのウェステージデータを得ており実験整理式も以下のように定められている。

($2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼実験整理式)

$$W_R = 7 \times 10^{-2} \exp \{ -3 \times 10^{-4} (L/D - 25)^2 \} \dots\dots\dots (3.1)$$

但し、 W_R : ウェステージ率 (mm/sec)

L : ノズル・ターゲット間距離 (mm)

D : 水リーク孔径 (mm ϕ)

3.2 試験装置

(1) SWAT-1 試験装置

試験装置には、大リーク・ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-1) を用いた。

SWAT-1試験装置のフローシートをFig. 3.2.1に示すが、本装置は内径400mm ϕ ×高さ2868mmの反応容器、5Bの放出系配管、内容積1.2m³の反応生成物収納容器、584ℓのダンプタンク及び30ℓの水加熱器から構成されている。試験は、Fig. 3.2.2に示す反応容器中に、伝熱管を配列した試験体を挿入し、水加熱器からの蒸気を試験体内注水管に注入することによって行った。

尚、放出系配管及び収納容器には、注水試験時に上昇する反応容器カバーガス圧力を開放するため、それぞれ3kg/cm²d、1.5kg/cm²dのラプチャーディスクが取付けられている。

(2) 試験体

RUN-4117試験体の伝熱管束及び伝熱管配列をFig. 3.2.3に示す。

伝熱管束は、外径31.8mm ϕ ×肉厚3.5mm t×長さ220mm ℓのガス加圧管(ターゲット管で内部を150kg/cm²Gに窒素ガスで加圧している。)2本とダミー管(両端開放の伝熱管)18

本及びノズル孔径 1.2mmφの注水管1本の合計21本で構成される。

注水管はFig. 3.2.5に示すラプチャー型で、ノズル部には注水試験前にナトリウムの侵入を防ぐため 3/100mm t の S U S 304 箔が取付けられている。

R U N - 4118試験体の伝熱管束及び伝熱管配列をFig. 3.2.4に示す。

伝熱管束は、外径31.8mmφ×肉厚 3.5mm t ×長さ 240mm ℓ のガス加圧管1本と、ダミー管19本及び注水管1本の合計21本で構成される。

注水管は、R U N - 4117と同じラプチャー型であるが、R U N - 4117試験よりも水リーク率を大きくするため、ノズル孔径を 2.5mmφとした。

尚、R U N - 4117, R U N - 4118試験ともにウェステージの対象となる主な伝熱管をガス加圧管とし2次破損時間の検知に用いた。

(3) 計測系

本試験の目的を達成するため、計測系として次のものを用いた。

- 熱電対 -

反応域及び伝熱管面での温度分布を求めて、ウェステージ現象とその関連を見るものでFig. 3.2.3及びFig. 3.2.4に示すように、R U N - 4117, R U N - 4118試験共に23点。

Fig. 3.2.3及びFig. 3.2.4の中の()内数字は、熱電対取付け位置でノズル孔を中心とした伝熱管軸方向のずれを表わす。(単位mm)

- ガス加圧管用圧力計 -

ターゲット伝熱管の2次破損時間を知るためのもので、R U N - 4117, R U N - 4118試験共に1点。

この他に、注水率を知るための各種計器や、ラプチャー破裂信号、加速度計信号をデータ収録している。

これらの計測一覧をTable. 3.2.1に示す。

3.3 試験条件

試験は次の条件で実施した。

R U N - 4117試験 —— ノズル・ターゲット間距離 $L = 44.6\text{mm}$
水リーク孔径 $D = 1.2\text{mm}\phi$ (予定水リーク率 $G = 21\text{g/sec}$)

R U N - 4118試験 —— ノズル・ターゲット間距離 $L = 61.8\text{mm}$
水リーク孔径 $D = 2.5\text{mm}\phi$ (予定水リーク率 $G = 99\text{g/sec}$)

このうち、R U N - 4118試験は、従来の試験研究結果からウェステージ率が最大となる $L/D = 25$ の条件である。

本試験は「もんじゅ」過熱器材のウェステージ試験であることから、水系も過熱蒸気条件にすることが望ましいが、十分な量の過熱蒸気を作ることは現在の設備では必ずしも容易ではない。従って、水加熱器で飽和水を作り、水加熱器から反応容器に接続されている注水配管で加熱し、少しでも乾き度を上げることで加熱器条件を模擬することとした。

このため、試験は水加熱器条件を 342°C , $152\text{kg/cm}^2\text{G}$ の飽和水とし、注水配管温度を400

てとした。

Table. 3.3.1 に R U N - 4117, R U N - 4118 試験の試験条件及び注水停止条件を示す。

3.4 試験結果

試験は, R U N - 4117 及び R U N - 4118 試験ともに, 注水停止条件である総注水量に達し注水を停止した。(注水量は, 水加熱器液面計により確認した。)

両試験の注水時間及び水リーク率は以下のとおりであった。

試験No.	注水停止項目	注水時間	水リーク率	試験注水率 / 予定注水率
R U N - 4117	総注水量 (3 kg)	103sec	29 g / sec	1.036
R U N - 4118	同上 (10kg)	69sec	145 g / sec	1.464

(1) R U N - 4117, R U N - 4118 試験時データ

R U N - 4117 試験データを Appendix 4 に, R U N - 4118 試験データを Appendix 5 に示すが主な試験結果を次に述べる。

- R U N - 4117 試験 -

- ① 水加熱器液面 (L - W H) は 18kg → 15kg まで 3 kg の液面低下。
(水リーク率は 29 g / sec)
- ② 反応容器カバーガス圧力 (P - E V) 及びナトリウム中圧力 (P - 1101) は, 注水 8 sec 後に $2.4 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G}$ に達しラプチャーディスク (R - 1 D) が破裂。
- ③ ガス加圧器圧力 (P K - 5008) は, $146 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G} \rightarrow 154 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G}$ まで $8 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G}$ の圧力上昇を生じたが, ガス加圧管の 2 次破損は生じなかった。
- ④ 注水試験中の反応温度の最高値は, T - 1105 (No. 8 伝熱管) の約 750℃ であった。

- R U N - 4118 試験 -

- ① 水加熱器液面 (L - W H) は 18kg → 8 kg まで 10kg の液面低下。
- ② 反応容器カバーガス圧力 (P - E V) 及びナトリウム中圧力 (P - 1101) は, 注水 2 sec 後に $2.7 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G}$ に達しラプチャーディスク (R - 1 D) が破裂。
- ③ ガス加圧器圧力 (P K - 5015) は, $146 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G} \rightarrow 166 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G}$ まで $20 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G}$ の圧力上昇を生じたが, ガス加圧管の 2 次破損は生じなかった。
- ④ 注水試験中の反応温度の最高値は, T - 1110 (No. 15 伝熱管) の $> 900^\circ \text{C}$ (熱電対は破損) であった。

尚, 注水試験中のターゲット伝熱管周辺温度分布を Fig. 3.4.1 及び Fig. 3.4.2 に示す。

これらの図から, 注水位置付近は未反応水の影響によりあまり温度上昇せず, 高温となる反応域は広い範囲に及んでいることが分かる。

(2) ターゲット伝熱管ウェステージデータ

R U N - 4117 及び R U N - 4118 試験後に, それぞれ 3 本の伝熱管にウェステージが生じていることが確認された。

詳細は被伝熱管のウェステージマップ（伝熱管表面の等高線図）をAppendix 6に示すが、主な結果をTable. 3.4.1に示す。

RUN-4117試験で最も深いウェステージを受けたのは、No.8伝熱管（ガス加圧管 $L/D=37$ ）のウェステージ率 1.35×10^{-2} （mm/sec）で、伝熱管周方向のウェステージ範囲も周方向角度 $65^\circ \sim 220^\circ$ と広範囲に及んでいる。

また、RUN-4118試験では、ジェット直撃したNo.15伝熱管〔ガス加圧管で $L/D=25$ 、ウェステージ率 1.13×10^{-2} （mm/sec）〕よりも、No.16伝熱管〔ダミー管でウェステージ率 1.5×10^{-2} （mm/sec）〕の方が深いウェステージを受けていた。

No.15伝熱管は、2ヶ所にウェステージを受けており、ウェステージマップから判断すれば、このウェステージがトロイダル状であるためにウェステージ部の損耗体積が増加したにもかかわらず、ウェステージ率は大きくならなかったものと考えられる。これに対し、No.16伝熱管は、No.15伝熱管を直撃した未反応ジェットの散乱によりウェステージを受けたものと考えられ、ピット状のウェステージを受けた。

3.5 ウェステージ率に及ぼす L/D 、水リーク率の効果に関する検討

従来の $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼の中リーク・ウェステージ試験結果から^{(4),(5)}、中リーク領域に於けるウェステージ率（ W_R ）は、ノズル・ターゲット間距離と水リーク率（ D ）に依存することが知られている。このため、ここでは3.4項で述べた試験結果を基に $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼との比較検討を行い、SUS321材の中リーク領域に於けるウェステージ率の実験整理式を導く。

(1) ウェステージ率（ W_R ）の L/D 依存性

小リーク領域のSUS321材ウェステージ試験では、既に2.5項で述べたように、ウェステージ率（ W_R ）と L/D （ノズル・ターゲット間距離（ L ）とノズル孔径（ D ）との比）との間に顕著な関係があり、 $L/D=20\sim 35$ にウェステージ率のピークが存在する。

このため、ここでは中リーク領域に於ける L/D の効果について検討する。

今回のRUN-4117及びRUN-4118の2回の試験で、ウェステージを受けた伝熱管のウェステージ率を、既存の $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼の実験整理式曲線とともにプロットしたのがFig. 3.5.1である。 $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼の実験整理式は(3.1)式に示した。

ただし、 L はノズル孔と伝熱管表面の最大ウェステージ点との距離とした。

図中に用いたデータは、 L/D 以外にもナトリウム温度、衝突角度、ジェット中心線からのズレ等種々の条件も異なっているが、この図からSUS321材のウェステージ率のピークは、 $L/D=20\sim 50$ の範囲にあり、この範囲では $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼のウェステージ率の約 $1/4$ であることが分かる。

次にここで得られた試験結果からSUS321材のウェステージ率（ W_R ）と L/D の関係式を求める。

SUS321材についても、 $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼と同様の方法によりウェステージ率（ W_R ）と L/D の関係式を求めることが望ましいが、データ数が少ないため実験整理式は(3.1)式と同様な対数式になり、かつ対数の指数も(3.1)式と同一になるものと仮定して、比例定

数のみを決める。

従って SUS321 のウェステージ率 (W_R) の式は、(3.2) 式のようになりこの (3.2) 式に本試験データの最大ウェステージ率を代入することにより f を決定すると (3.3) 式が導かれる。

図中の実線は (3.3) 式を示したものである。

$$\text{SUS321} : W_R = f \cdot 7 \times 10^{-2} \exp \{ -3 \times 10^{-4} (L/D - 25)^2 \} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$: W_R = 1.7 \times 10^{-2} \exp \{ -3 \times 10^{-4} (L/D - 25)^2 \} \dots\dots\dots (3.3)$$

尚、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の実験整理式では、 L/D 以外のパラメータであるナトリウム温度及びジェットの影響角度の効果は、次に述べる理由により無視している。このため、(3.3) 式にも L/D 以外のパラメータの効果は考慮されないことになる。

〔理由〕

*ナトリウム温度の効果

中リーク領域に於いて被ウェステージ管は反応域内に入ってしまうため、相対的に未反応領域の温度の影響は低くなり、ナトリウム温度がウェステージ率に影響を及ぼさなくなる。

*衝突角度の効果

衝突角度の影響は、水リーク率 10g/sec 以下では顕著であるが、 30g/sec 以上になると伝熱管全体が反応域に覆われる。このため衝突角度自体があまり意味を持たなくなり、その影響力はほとんど無くなる。

(2) ウェステージ率 (W_R) の水リーク率 (G) 依存性

水リーク率 (G) の効果とノズル孔径 (D) の効果は互いに独立ではなく、水側の条件さえ与えられれば一方は他方の従属変数と考えることが出来る。

従って、水リーク率 (G) としては (3.3) 式中に組込まれていないが、その効果は含まれていると考えてよい。

そこで、水リーク率とウェステージ率との関係を図示したものが Fig. 3.5.2 である。この図から明らかなように、中リーク領域では $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼と同様、SUS321 材でも水リーク率に依存せず、ほとんど一定の傾向が見られる。これは、Fig. 2.5.1 で示した小リーク領域における傾向と顕著な違いを見せている。このことは、次のように説明することができる。

小リークでは、相対的にジェットの長さが短いため、最も温度の高い外炎部の先端が伝熱管表面に達し焦点を結ぶような、即ち $20 < L/D < 35$ となるような場合にウェステージ率が最高となる。これに対し中リークでは、特に水リーク率が大きい場合は、ジェットの向きに依らず一般にジェットの長さが伝熱管ピッチより充分長くなるため、 $L/D < 20 \sim 35$ となるような伝熱管が必ず水リーク位置付近に依存することになる。このため、ウェステージ率の

小リーク依存性が弱くなる。

このことは結果的に、2次破損時間も水リーク率に依存しないことになり、本SUS321材試験（伝熱管肉厚 3.5mm t）では、2次破損時間は水リーク率に無関係に200sec前後となる。

また、この結果からSUS321材は、2¼Cr-1Mo鋼と比べて耐ウェステージ性に優れておりウェステージ率は平均して2¼Cr-1Mo鋼の約1/4であることが分かる。

4. 結 論

SUS321 材の小リーク領域及び中リーク領域に於けるウェステージ試験を行い、次の結果を得た。

(1) 小リーク領域

- ① ウェステージ率のピークはナトリウム温度及びノズル・ターゲット間距離が一定の場合、水リーク率 3～5 g/sec の範囲にある。またナトリウム温度、水リーク率を一定とした場合は $L/D = 20 \sim 35$ の範囲にあり、この時の最大ウェステージ率は 2.3×10^{-2} mm/sec である。

- ② SUS321 材のウェステージ率は、次の実験整理式で表わされる。

$$W_R = \frac{1.925 \times 10^5}{L^{2.3}} \exp \left[- \left\{ 0.243 \left(\ln \frac{G}{3.93} \right)^2 + \frac{7180}{T_{Na}} \right\} \right]$$

ただし、 W_R : ウェステージ率 [mm/sec]

L : ノズル・ターゲット間距離 [mm]

G : 水リーク率 [g/sec]

T_{Na} : ナトリウム温度 [°K]

- ③ ウェステージの広がり (l_0) と水リーク率 (G) の間には、次の関係式が成立する。

$$l_0 = 4.5 G^{0.62} \text{ [mm } \phi \text{]}$$

- ④ SUS321 材は SUS304 材と比べると耐ウェステージ性に優れており、ウェステージ率は平均して SUS304 材 1/2 である。

(2) 中リーク領域

- ① ウェステージ率のピークは、 $L/D = 20 \sim 50$ の範囲であり、この時の最大ウェステージ率は、 1.7×10^{-2} mm/sec である。

- ② SUS321 材のウェステージ率は、次の実験整理式で表わされる。

$$W_R = 1.7 \times 10^{-2} \exp \{ -3 \times 10^{-4} (L/D - 25)^2 \}$$

ただし、 W_R : ウェステージ率 [mm/sec]

L : ノズル・ターゲット間距離 [mm]

D : 水リーク孔径 [mm ϕ]

- ③ マルチ・ターゲットの中リーク領域では、水リーク率が 30 g/sec を越えるとウェステージ率は約 1.7×10^{-2} mm/sec で飽和する。

- ④ 伝熱管肉厚が 3.5mm の場合、2次破損時間は水リーク率に無関係に 200sec 前後である。

- ⑤ SUS321 材は、2¼Cr-1Mo 鋼と比べ耐ウェステージ性に優れており、ウェステージ率は平均して 2¼Cr-1Mo 鋼の約 1/4 である。

5. 参考文献

- (1) 根井弘道, 氏原幸三郎, 大内義弘, 橋口功, 大島巖, 井上設生, 堀雅夫
「蒸気ウェステージと検出計の応答 小リーク・ナトリウム水反応試験研究 第4報」
PNC 941-45 (1974. 7)
- (2) 鐘ヶ江直道, 橋口功, 池本一郎, 大内義弘, 井上設生, 堀雅夫「ウェステージに対する距離
の効果に関する試験とその検討およびリーク孔拡大(セルフウェステージ)に関する一考察
小リーク・ナトリウム水反応試験研究 第7報」
PNC 941 76-27 (1976. 3)
- (3) 鐘ヶ江直道, 大後美道, 池本一郎, 井上設生, 堀雅夫「小リーク・ウェステージ研究プログ
レスレポート(その1)小リーク・ナトリウム水反応試験研究 第11報」
PNC 941 77-189 (1977. 11)
- (4) 田辺裕美, 錦見正和, 山田敏雄, 佐々木和一, 渡辺智夫, 佐藤稔, 「高速炉蒸気発生器伝熱
管の中リーク・ウェステージ破損試験」
PNC SN941 80-27 (1980. 2)
- (5) 藤井啓次, 佐藤稔, 田辺裕美, 大後美道「高速炉蒸気発生器伝熱管の中リーク・ウェステー
ジ破損伝播試験(Ⅱ)」
PNC SN941 83-38 (1983. 3)
- (6) 土屋毎雄, 岡本俊一, 坂本寛己, 田辺裕美, 黒羽光男, 佐藤稔, 福田達「高速増殖炉研究開
発正価の概況(Ⅱ) - 蒸気発生器 -」
PNC SN241 85-01 (1985. 3)
- (7) 宇佐美正行, 他, 「小リーク・ナトリウム水反応試験用ラプチャー型注水ノズル開発試験」
報告書作成中

Table 2.2.1 試験体製作仕様

試験 No.	注水ノズル			ターゲット管		ノズル・ターゲット間距離 L (mm)	L/D (-)
	No.	型式	孔径D (mmφ)	材質	寸法		
RUN-4206-①	JN1	ラプチャー型	0.5	SUS321	φ31.8×φ3.5	25	50
	JN2	↑	↑	↑	↑	50	100
	JN3	↑	↑	↑	↑	75	150
	JN4	↑	↑	↑	↑	16.2	32.4
	JN5	↓	↓	↓	↓	↑	↓
	JN6	ラプチャー型	0.5				
RUN-4206-②	JN7	保護ガス型	0.1				162
	JN8	↑	0.2				81
	JN9	保護ガス型	0.3				54
	JN10	ラプチャー型	0.5				32.4
	JN11	↑	0.7				23.1
	JN12	ラプチャー型	1.0	SUS321	φ31.8×φ3.5	16.2	16.1

Table 2.2.2 試験データ収録項目

位置	計測項目	計測点数	Tag No.	仕様
水加熱器	温度	1	T401	
	圧力	1	P401	差圧伝送式
反応容器	温度	13	T106, T-1~T-12	CA 1.0φ JIS0.75級, 非接地型
	圧力	1	P104	差圧伝送式

RUN-4206-①, -②試験ともに同様。

Table. 2.3.1 RUN-4206 試験条件

試験ケース 試験条件	RUN2406-①						RUN-4206-②					
	JN-1	JN-2	JN-3	JN-4	JN-5	JN-6	JN-7	JN-8	JN-9	JN-10	JN-11	JN-11
使用ノズル径 (mm)	φ0.5	←				→ φ0.5	φ0.1	φ0.2	φ0.3	φ0.5	φ0.7	φ1.0
注水バルブ No.	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	W-6	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	W-6
保護ガスバルブ No.	/	/	/	/	/	/	G-1	G-2	G-3	/	/	/
注水時間 (sec)	60	←				→ 60	120	120	60	60	30	30
水加熱器内部温度 T-401(℃)	336	←				→ 336	336	←				→ 336
水加熱器圧力 P-401(kg/cm ²)	141	←				→ 141	141	←				→ 141
注水配管温度 (℃)	480	←				→ 480	480	←				→ 480
RV 排気温度 T-106(℃)	480	480	480	450	500	520	480	←				→ 480
RV 排気液面	R-L~R-H	←				→ R-L~R-H	R-L~R-H	←				→ R-L~R-H
RVカバーガス圧力 P-104(kg/cm ²)	0.5	←				→ 0.5	0.5	←				→ 0.5
ノズル・ターゲット間距離 (mm)	25	50	75	16.2	16.2	16.2	16.2	←				→ 16.2
水反応検知熱電対 No.	TC1, 2	TC3, 4	TC5, 6	TC7, 8	TC9, 10	TC11, 12	TC1, 2	TC3, 4	TC5, 6	TC7, 8	TC9, 10	TC11, 12

Table. 2.3.2 注水ノズル較正試験結果

*表中の記号
 T_0 : ガス噴出前初期温度 P_0 : ガス噴出前初期圧力
 T_1 : " 後温度 P_1 : " 後圧力

注水ノズルNo	公称ノズル径 (mm ϕ)	水加熱器内部温 ($T_0 + T_1$)/2 ($^{\circ}$ C)	水加熱器圧力		噴出時間	水系試験条件値		水リーク率(平均値) (g/sec)
			P_0 (kg/cm 2 G)	P_1 (kg/cm 2 G)		温度($^{\circ}$ C)	圧力(kg/cm 2 G)	
J N 1	0.5 ϕ	27.5	100.0	40.0	239.99	480	141	2.745
		27.5			236.28			
J N 2		26.5			238.29			2.757
		26.0			235.84			
J N 3		27.5			235.90	480		2.781
		27.5			232.55			
J N 4		26.5			236.88	450		2.856
		26.5			237.86			
J N 5		26.0			235.68	500		2.746
		26.0			231.36			
J N 6	0.5	24.5			227.96	520		2.775
		24.5		40.0	225.27			
J N 7	0.1	26.5		95.3	300.00	480		0.112
		28.0		95.5				
J N 8	0.2	26.0		82.0				0.473
		26.5		82.0				
J N 9	0.3	26.0		65.2				1.032
		26.0		64.6	300.00			
J N 10	0.5	28.0		40.0	232.44			2.793
		27.5			235.35			
J N 11	0.7	24.0			133.78			4.984
		24.5			130.99			
J N 12	1.0	24.0			62.38	480	141	10.658
		23.0		40.0	61.31			

Table. 2.4.1 RUN-4206試験ウェスティングデータ

試験No.	Na 系			水 系			注水配管 温度 (℃)	ターゲット 材質	ノズル径 (mmφ)	水リーク率 (g/sec)	注水 時間 (sec)	ノズル・ターゲット間 距 離 (mm)	ウェスティング部 最大深さ (mm)	ウェスティング率 (mm)	備 考
	温度	流 速 (m/sec)	カバーガス圧 (kg/cm ² G)	温度 (℃)	注水前圧力 (kg/cm ² G)	注水後圧力 (kg/cm ² G)									
JN1	480	0	0.46	336	141.3	130.0	480	SUS321	0.5	2.745	60	25.0	0.476	7.9×10^{-3}	トロイダル型
JN2	"	"	0.50	"	142.1	130.6	"	"	"	2.757	"	50.0	0.096	1.6×10^{-3}	
JN3	"	"	0.50	"	141.8	130.6	"	"	"	2.781	"	75.0	0.022	3.7×10^{-4}	
JN4	450	"	0.42	"	141.2	133.7	"	"	"	2.856	"	16.2	1.47	2.45×10^{-2}	トロイダル型
JN5	500	"	0.45	"	140.0	128.1	"	"	"	2.746	"	"	1.173	1.96×10^{-2}	"
JN6	520	"	0.50	"	141.2	128.8	"	"	"	2.775	"	"	1.561	2.6×10^{-2}	トロイダル型
JN7	480	"	0.47	"	140.8	/	"	"	0.1	0.112	/	"	/	/	(ノズル閉塞)
JN8	"	"	0.55	"	140.9	136.6	"	"	0.2	0.473	120	"	0.241	2.0×10^{-3}	ピット型
JN9	"	"	0.50	"	140.8	137.0	"	"	0.3	1.032	60	"	1.104	1.84×10^{-2}	ピット型
JN10	"	"	0.48	"	140.9	129.6	"	"	0.5	2.793	60	"	1.327	2.21×10^{-2}	トロイダル型
JN11	"	"	0.46	"	141.3	128.1	"	"	0.7	4.984	30	"	0.681	2.27×10^{-2}	"
JN12	480	0	0.47	336	140.4	116.9	480	SUS321	1.0	10.658	30	16.2	0.543	1.87×10^{-2}	トロイダル型

Table. 3.2.1 計測一覧表

位 置	計 測 項 目	計測点数	Tag No.	仕 様	備 考
水 加 熱 器	温 度	1	T - W H		
	圧 力	1	P - W H		
	液 位	1	L - W H		
注 水 配 管	バルブ信号	1	W V - 26 D		
	温 度	1	T - 5003	C A 1.6φ JIS0.75級, 非接地型	
	圧 力	2	P - 5001, P - 5003	共和 200 K J	
	流 量	1	F - 5001	トキコポックメータ	
反 応 容 器	温 度	20	T1101 ~ T1120	C A 1.0φ JIS0.75級, 非接地型	Fig. 3.3.3 参照
	伝熱管内圧力	1	* P5008 (P5015)	共和 200 K J	Fig. 3.3.3 参照
	反応容器圧力	3	P1101, P1110, P - E V	P1101... S T 研, P H T - 15 E P1110... " , P H T - 20 E	
	加 速 度	1	A1102	キスラー	
反 応 容 器 (放出系配管)	圧 力	1	P - R T		
	ラプチャーディスク破裂信号	1	R - 1 D		

* R U N - 4118 試験は P5015 を使用

Table. 3.3.1 試験条件及び注水停止条件

系 統	条 件 項 目	R U N - 4117	R U N - 4118	備 考
水 系	水加熱器 圧力 (P - W H)	152kg / cm ² G	←	} 飽和水
	温度 (T - W H)	342℃	←	
	貯水量	18kg	←	
	注水配管 予熱温度	400℃	←	
	ラフナー板設定圧力 (R - O a)	70kg / cm ² d (反転)	←	
	注水ノズル孔径 (予定水リーク率)	1.2mm φ (21g/sec)	2.5mm φ (99g/sec)	
	注水位置 (反応容器底部より)	1150mm	400mm	
N a 系	ナトリウム温度 (T - E V)	450℃	400℃	
	ナトリウムチャージレベル(反応容器底部より)	1500mm	←	180ℓ
	初期カバーガス圧 (P - E V)	0.5kg / cm ² G	←	
放 出 系	配管予熱温度	350℃	←	
	収納容器予熱温度	350℃	←	
	初期カバーガス圧 (P - R V)	0.5kg / cm ² G	←	
	ラフナー板設定圧力 (R - 1 D)	3 kg / cm ² d	←	
	” (R - 2)	1.5kg / cm ² d	←	
ガス加圧管	ガス加圧管圧力	150kg / cm ² G	←	
内部構造物	ノズル・ターゲット間距離	44.6mm	61.8mm	
	L / D	37 (-)	25 (-)	

(注水停止条件)

いずれかの項目に該当した場合 注水停止

	条 件 項 目	R U N - 4117	R U N - 4118
1	注 水 時 間	120sec	←
2	伝熱管2次破損	P K 5008圧力低下	P K 5015圧力低下
3	総 注 水 量	3 kg	10kg

Table. 3.4.1 中リーク・ウエステージ試験ターゲット伝熱管ウエステージデータ

試験No.	被伝熱管		水リーク孔径 D (mm φ)	水リーク率 G (g/sec)	* ノズル・ターゲット間距離 L = (mm)	L / D (-)	ウエステージ 範囲 周方向角度	ウエステージの広がり		最大 ウエステージ		ウエステージ率 W _R (mm/sec)
	No.	種類						周方向 (mm)	軸方向 (mm)	周方向角度	深さ (mm)	
RUN-4117	3	ダミー管	1.2	29.0	30.0	25	110° ~ 130°	5	5	120°	0.12	1.165 × 10 ⁻³
	8	加圧管			44.6	37	65° ~ 220°	55	35	120°	1.39	1.35 × 10 ⁻²
	13	ダミー管			91.2	76	100° ~ 150°	15	47	130°	0.61	5.92 × 10 ⁻³
RUN-4118	11	ダミー管	2.5	145.0	24.5	10	70° ~ 135°	15	7	105°	0.26	3.77 × 10 ⁻³
	15	加圧管			61.8	25	110° ~ 140°	30	15	160°	0.78	1.13 × 10 ⁻²
								33	20			
16	ダミー管	88.3	45	200° ~ 300°	25	50	260°	1.03	1.5 × 10 ⁻²			

* ノズル孔位置（水リーク位置）～伝熱管最大ウエステージ点との距離

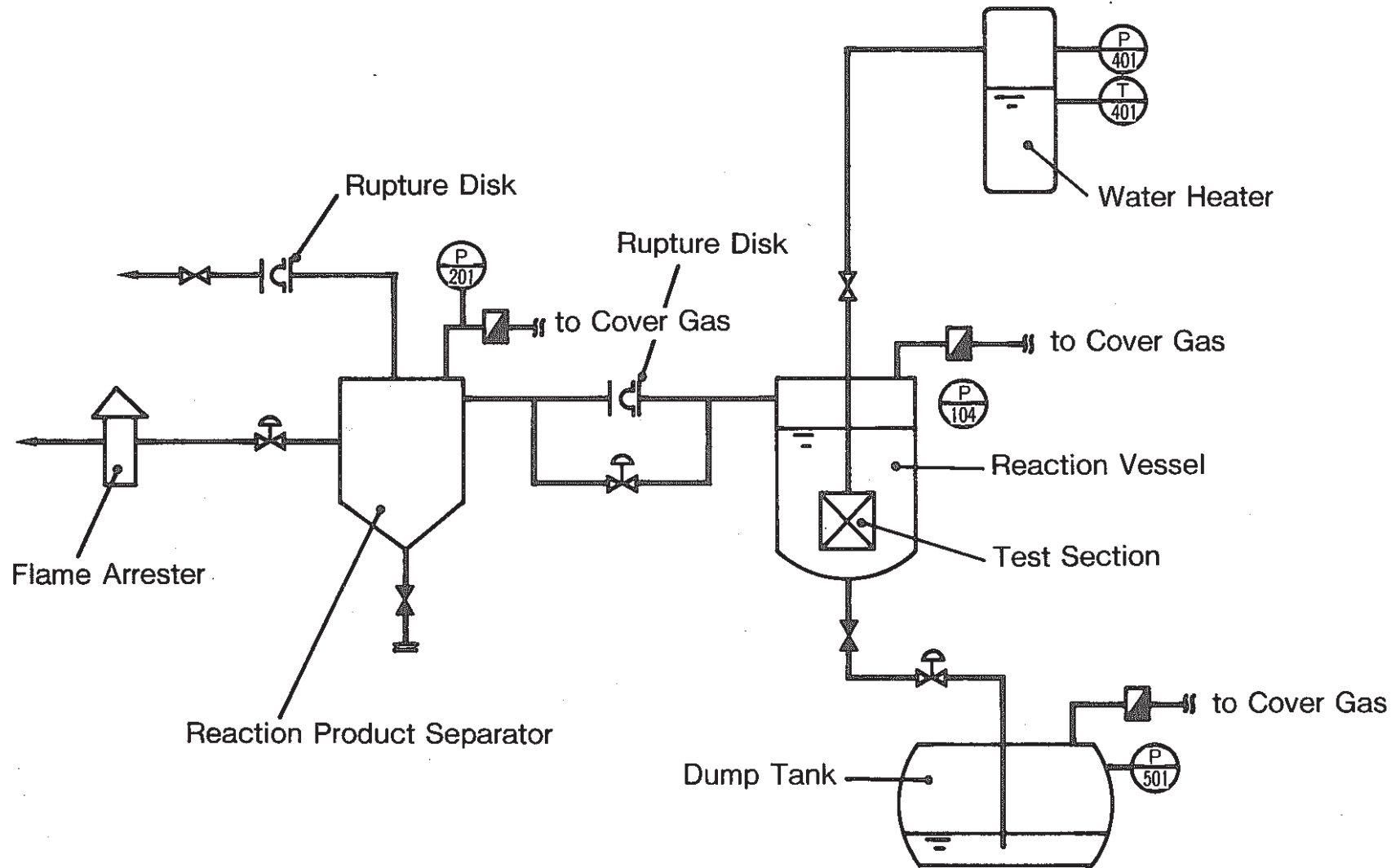


Fig. 2.2.1 Flow Sheet Diagram of SWAT-2

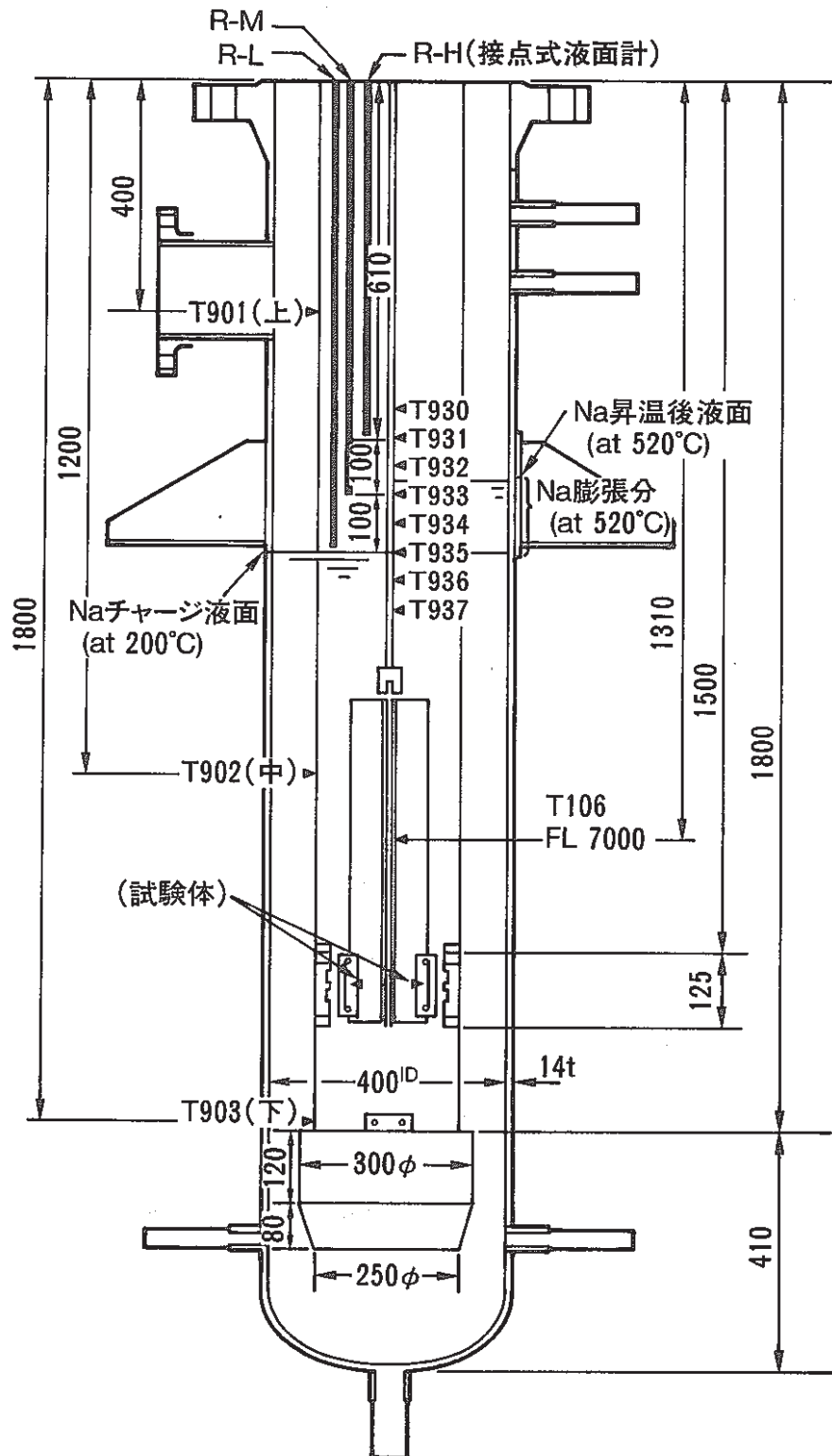


Fig. 2. 2. 2 反応容器内試験体挿入位置

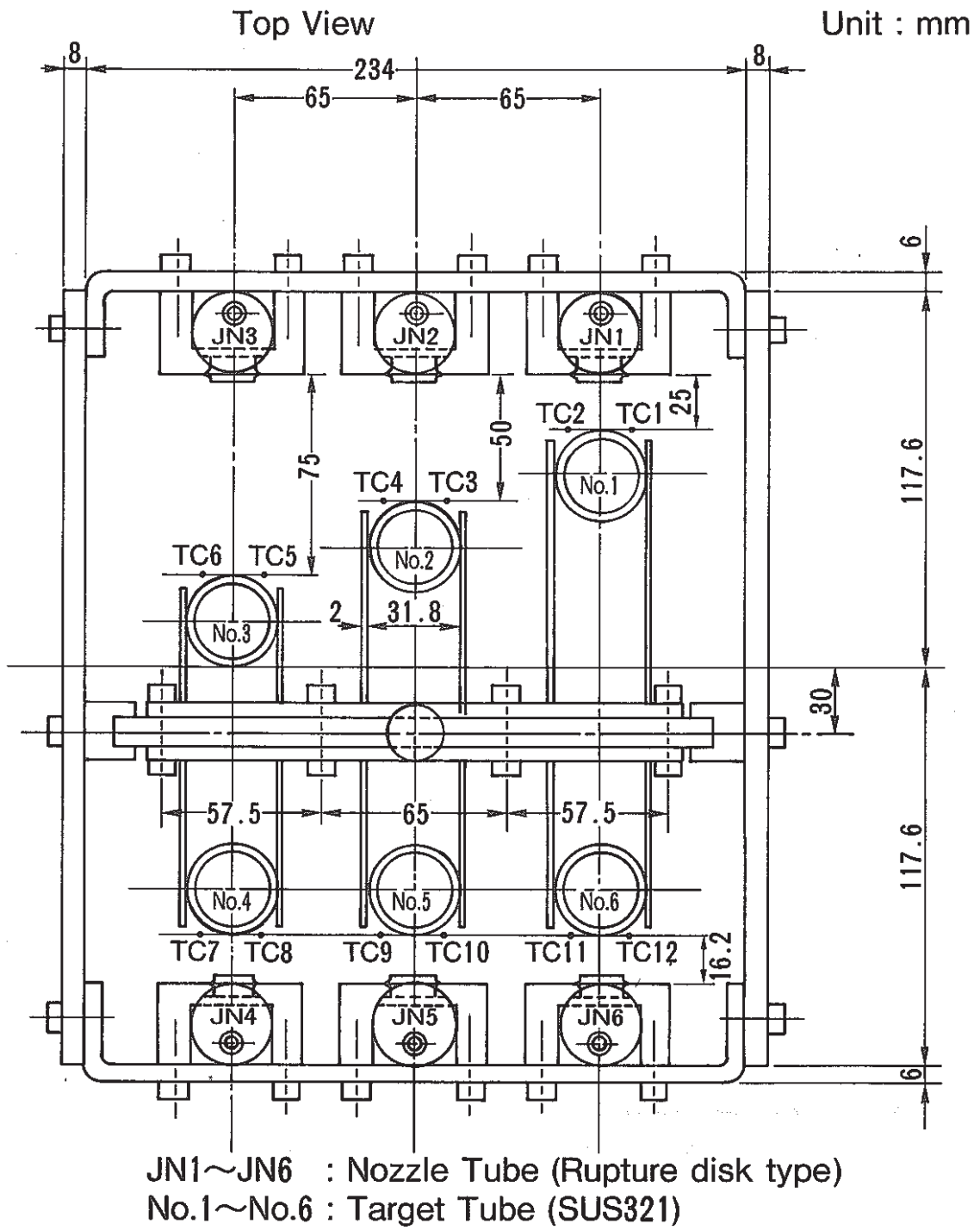
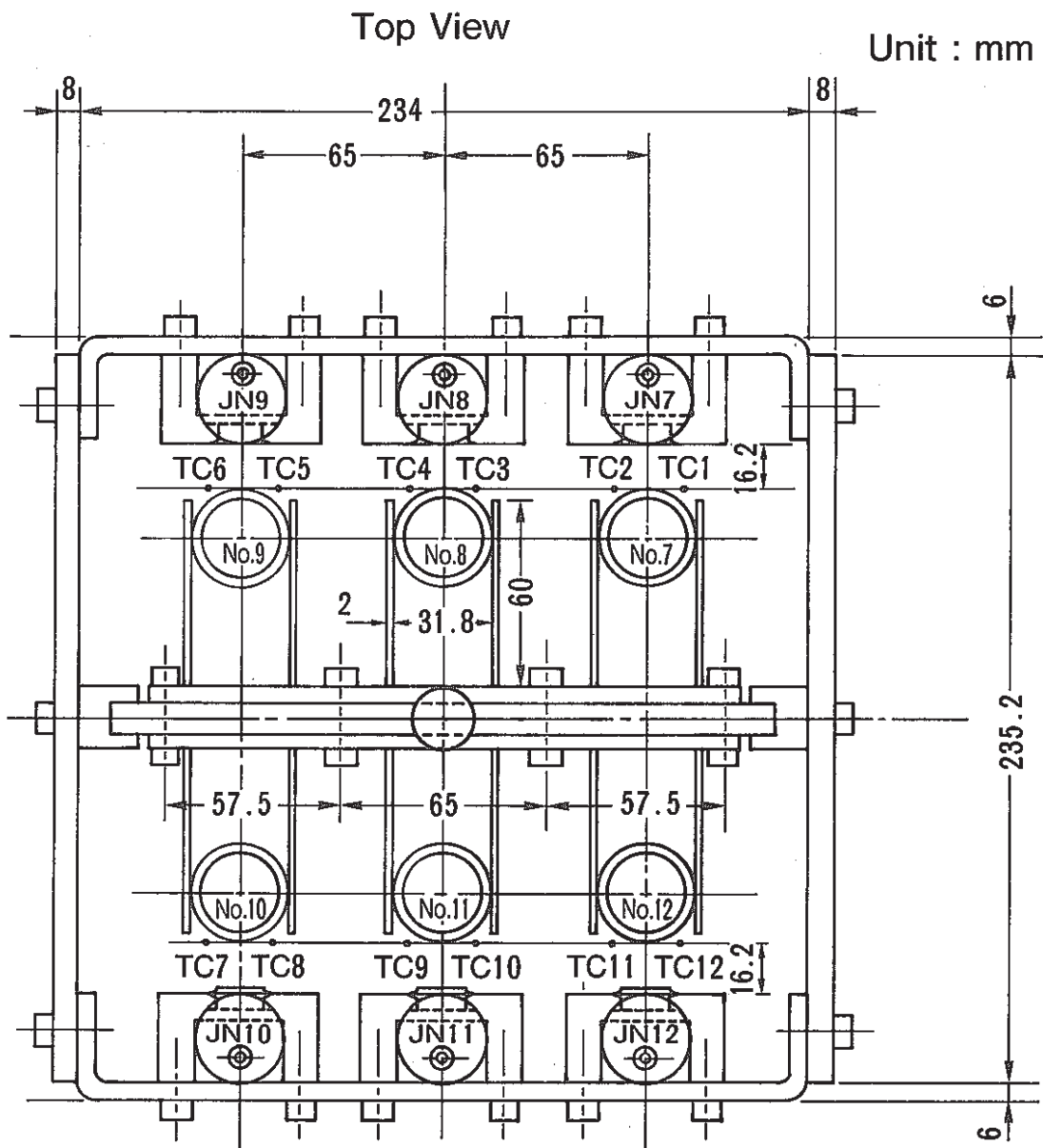


Fig. 2.2.3 Run-4206-①試験用試験体



- JN7~JN12 : Nozzle Tube
 (JN7~JN9 : Seal eas blow type, JN10~JN12 : Rupture disk type)
 No.7~No.12: Target tube (SUS321)

Fig. 2.2.4 Run-4206-②試験用試験体

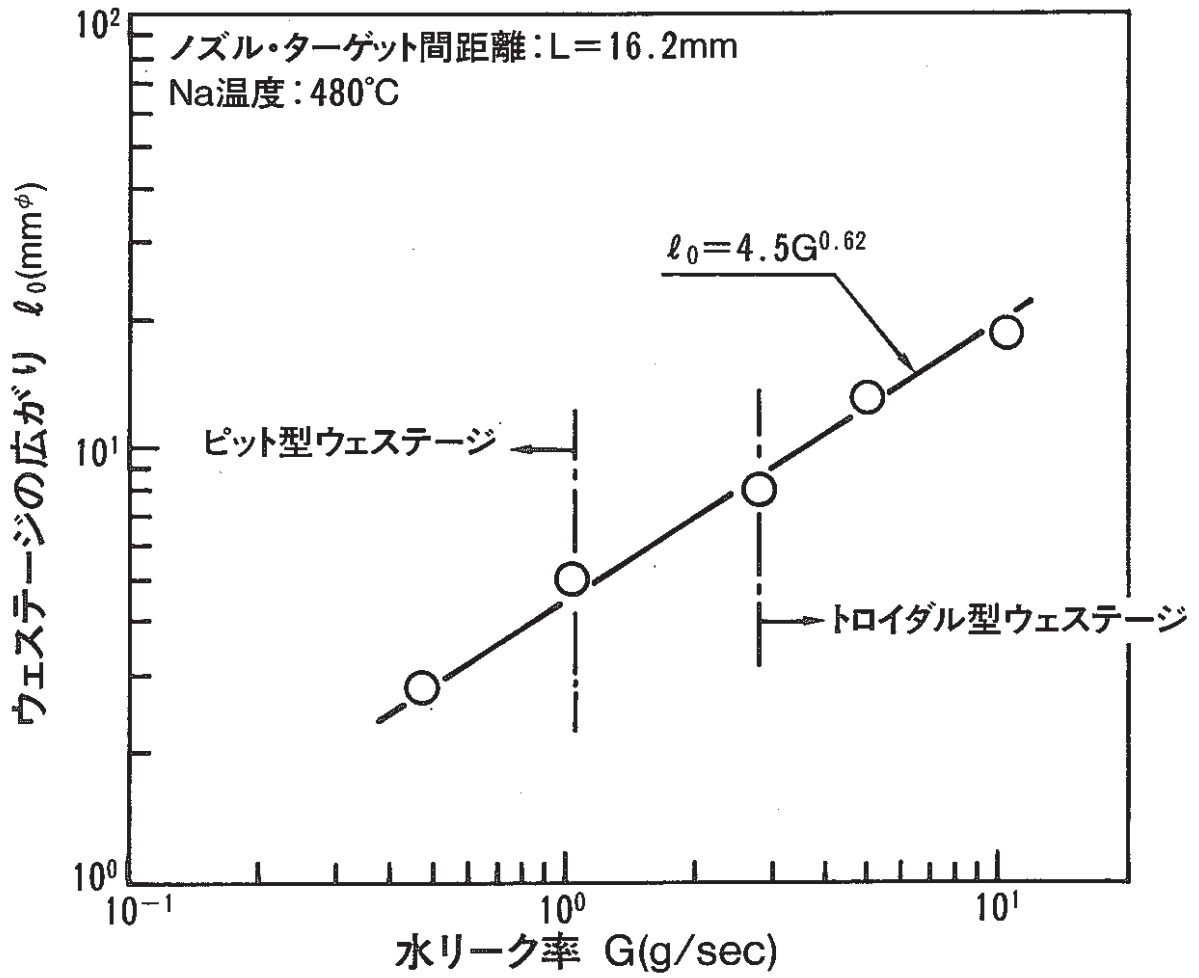


Fig. 2.4.1 ウェステージの広がり l_0 と水リーク率 G の関係

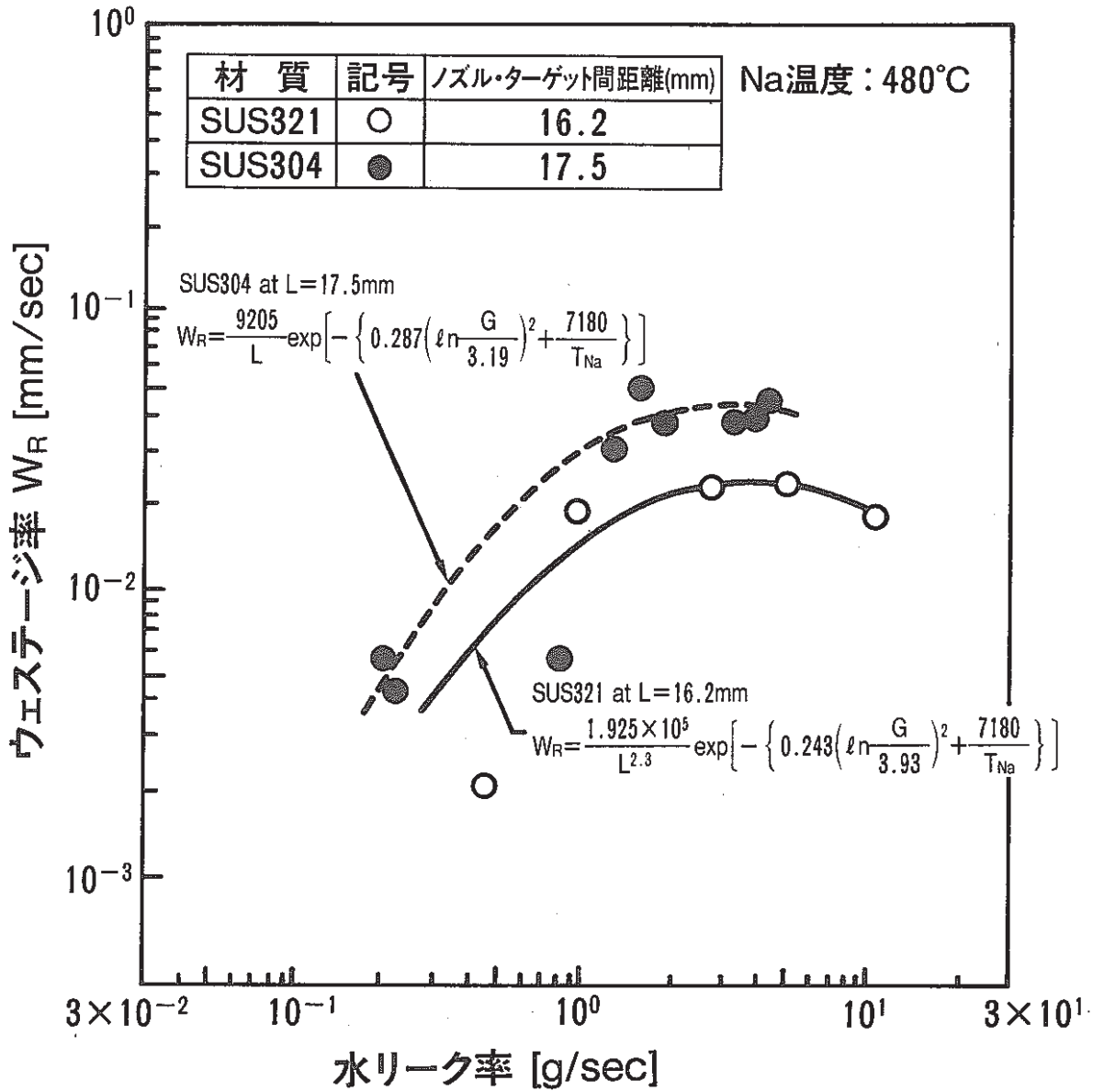


Fig. 2.5.1 ウェステージ率 W_R と水リーク率 G の関係

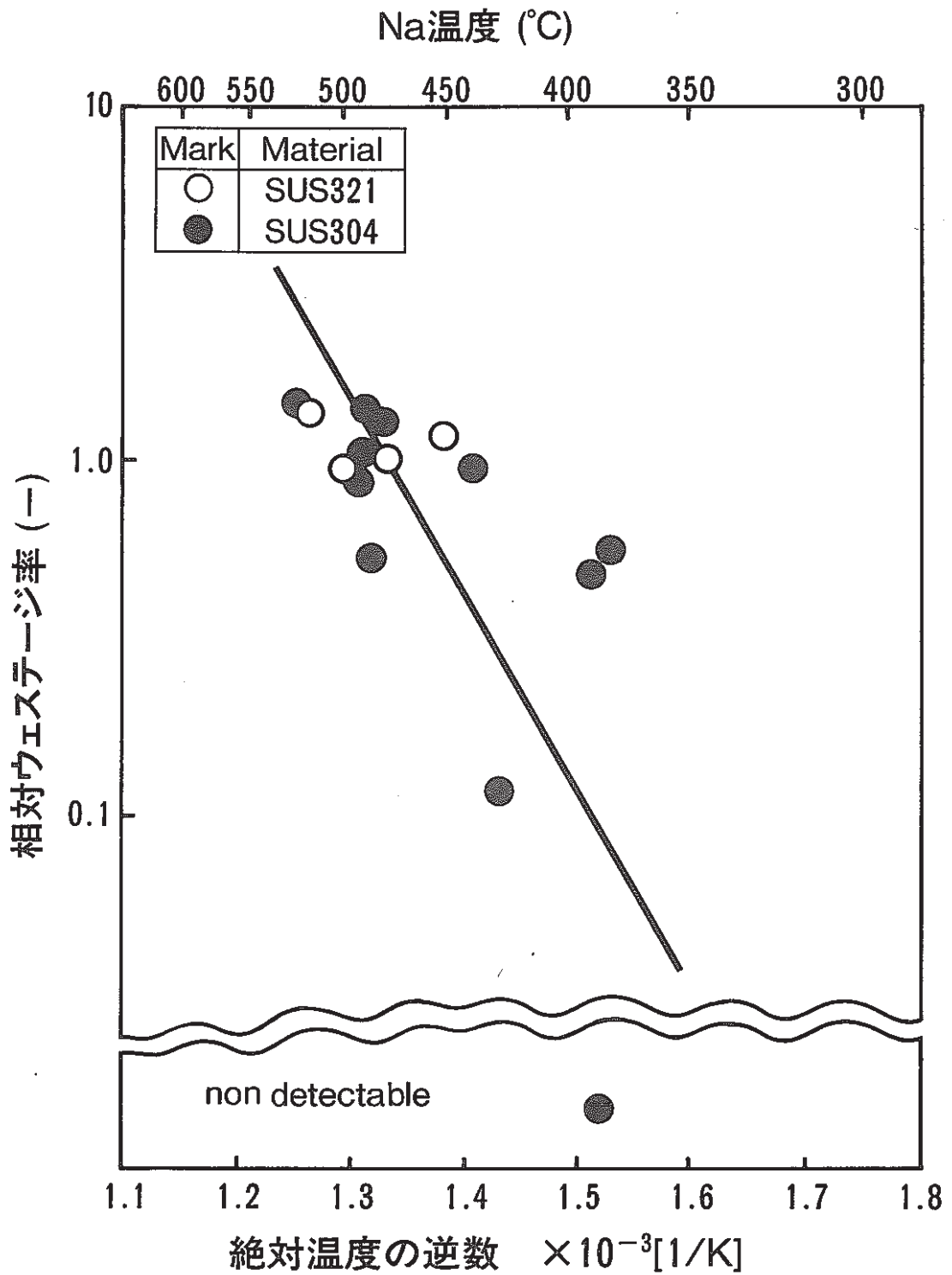


Fig. 2.5.2 相対ウェステージ率と絶対温度の逆数の関係

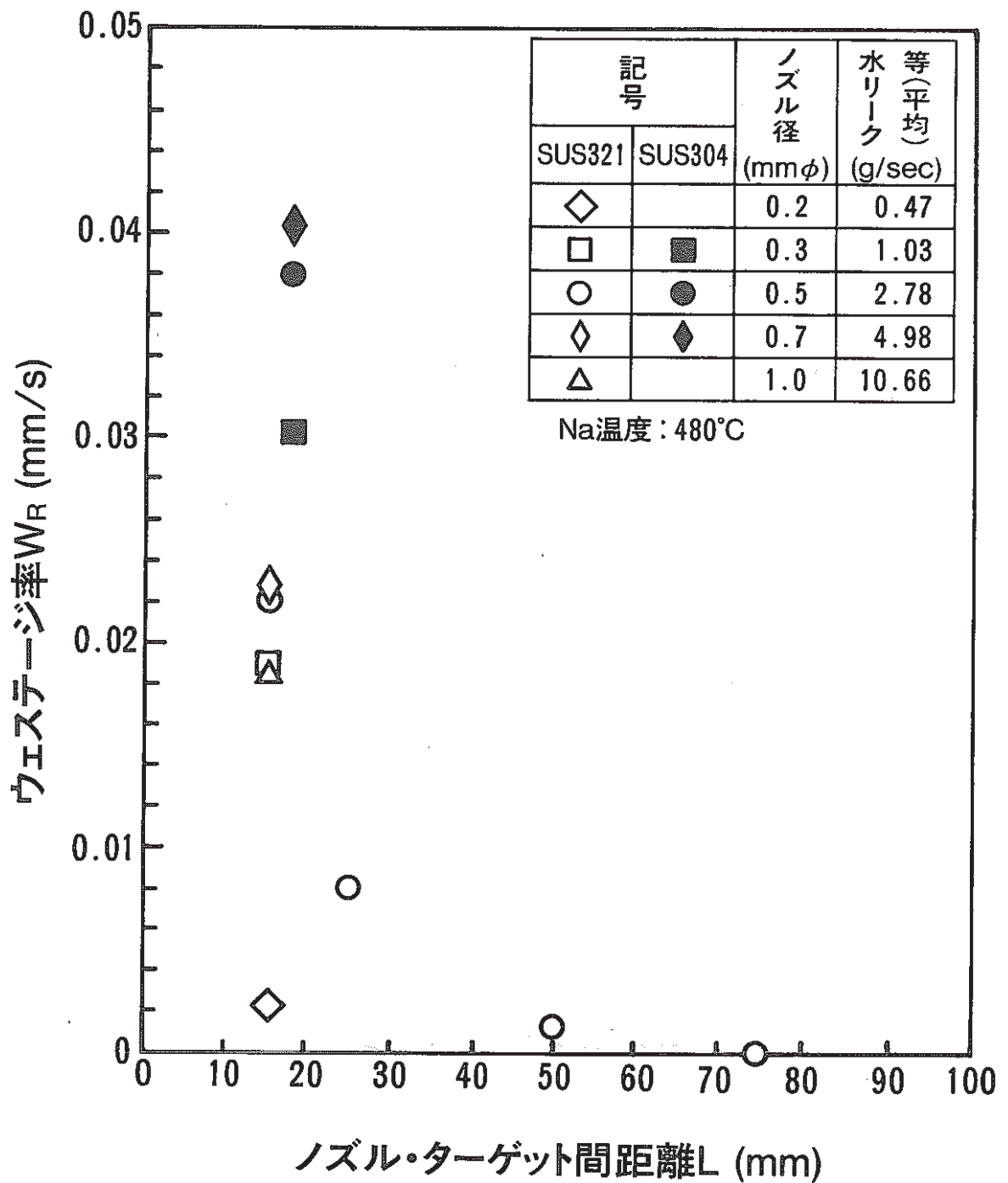


Fig. 2.5.3 ウェステージ率 W_R とノズルターゲット間距離 L の関係

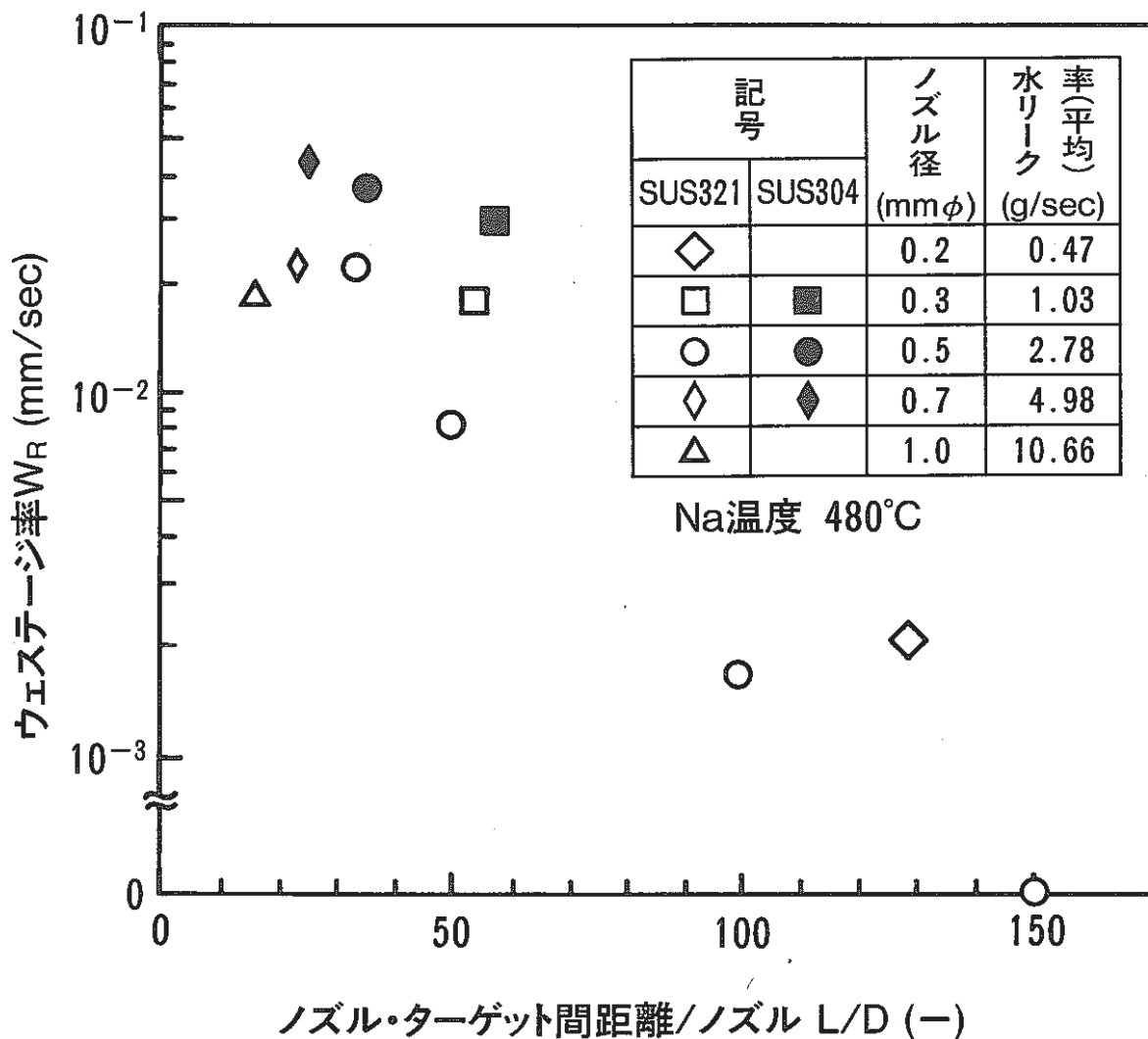


Fig. 2.5.4 ウェステージ率 W_R と L/D の関係

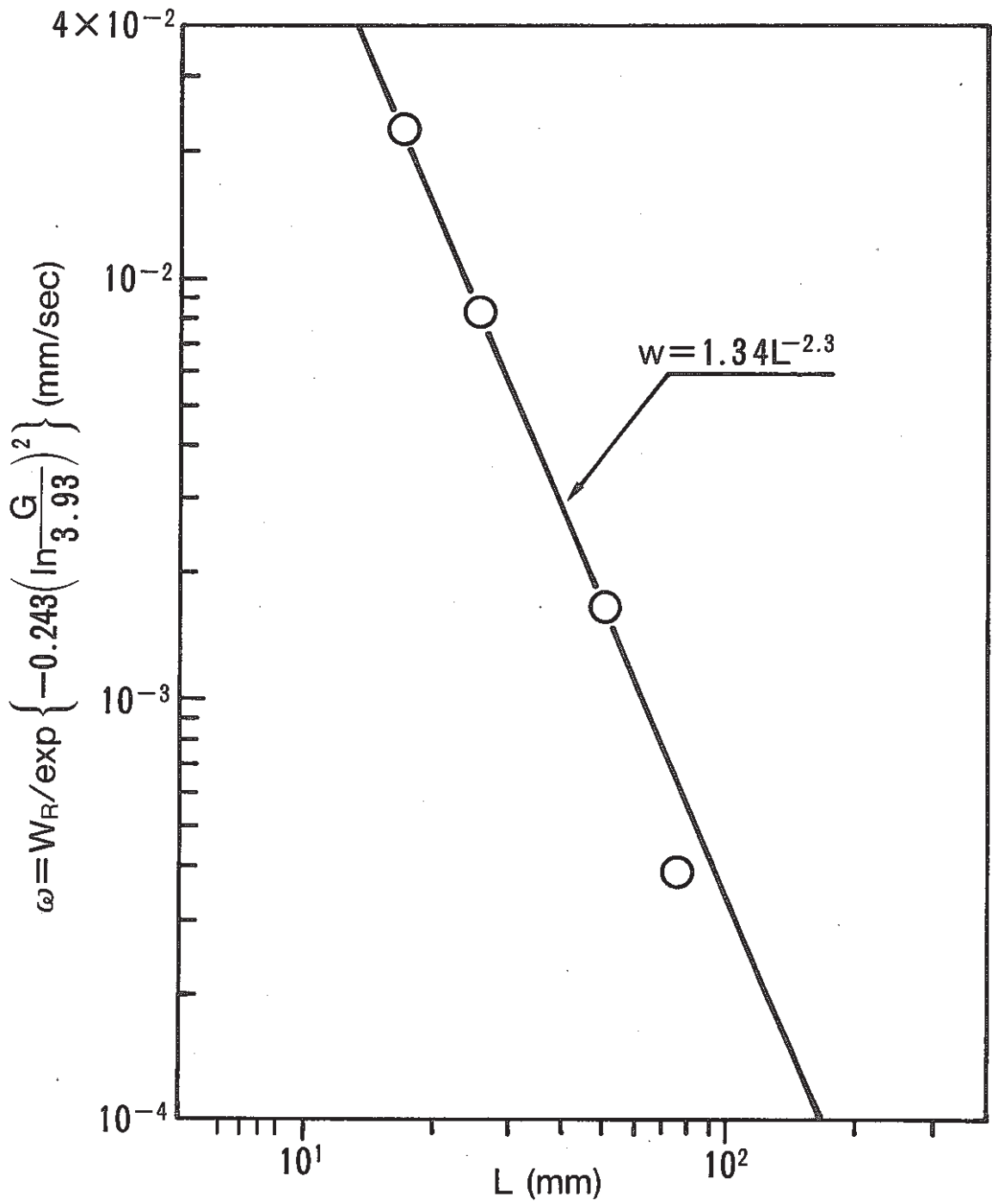


Fig. 2.5.5 規格化したウェステージ率 ω と距離 L との関係

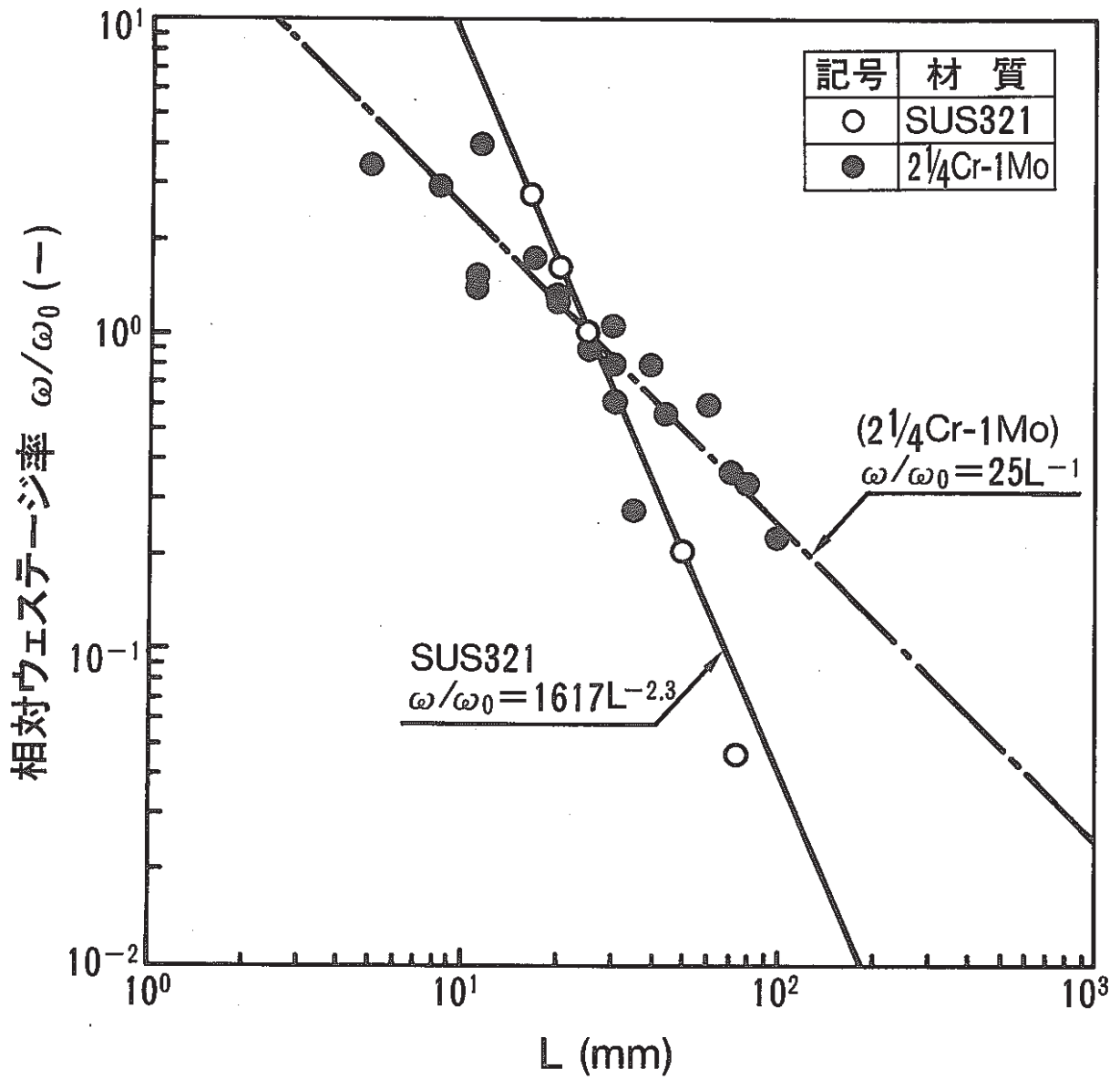


Fig. 2.5.6 相対ウェステージ率 ω/ω_0 と距離 L との関係

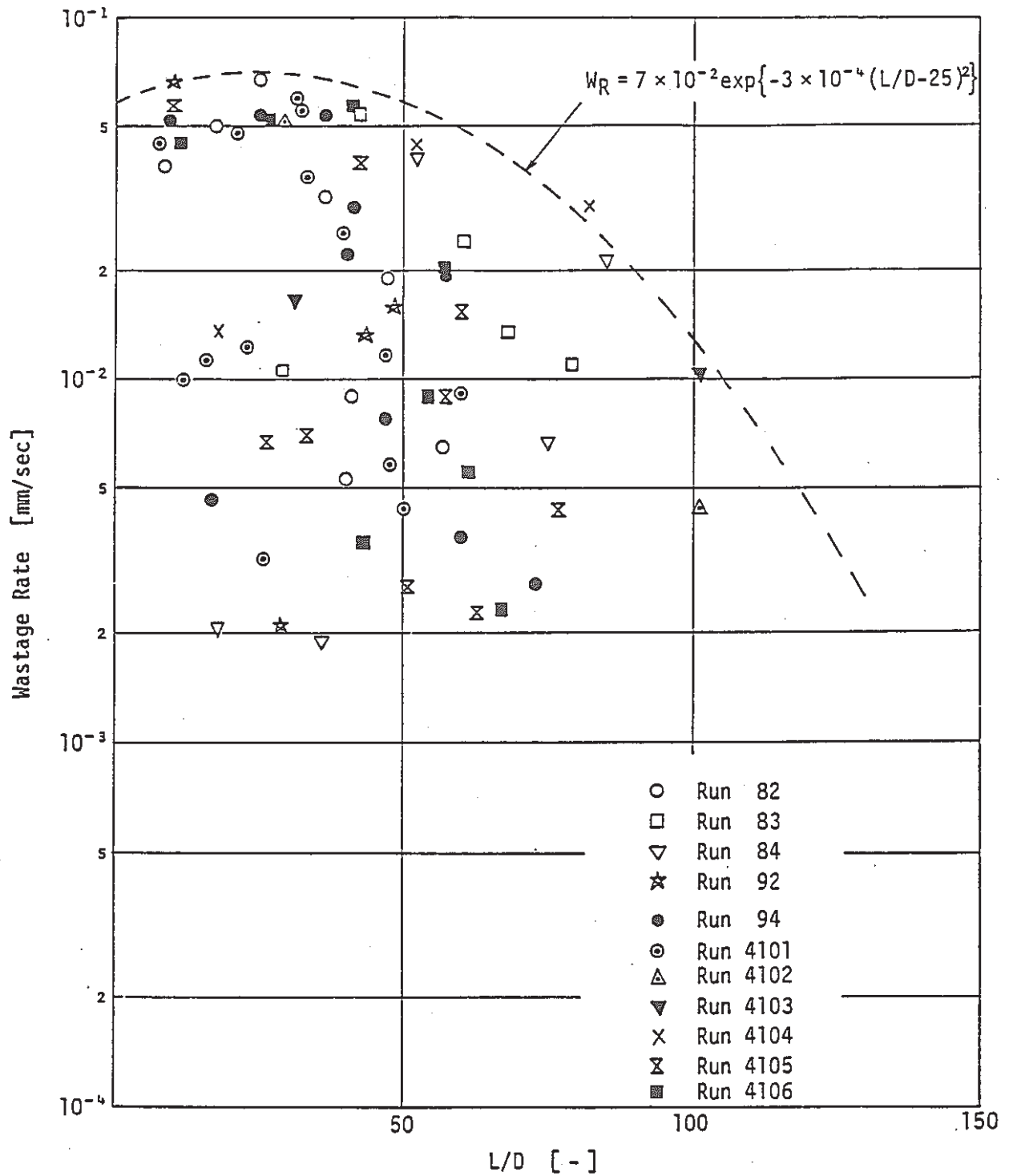


Fig. 3.1.1 Relation between Wastage Rate and L/D (2 1/4 Cr - 1 Mo)

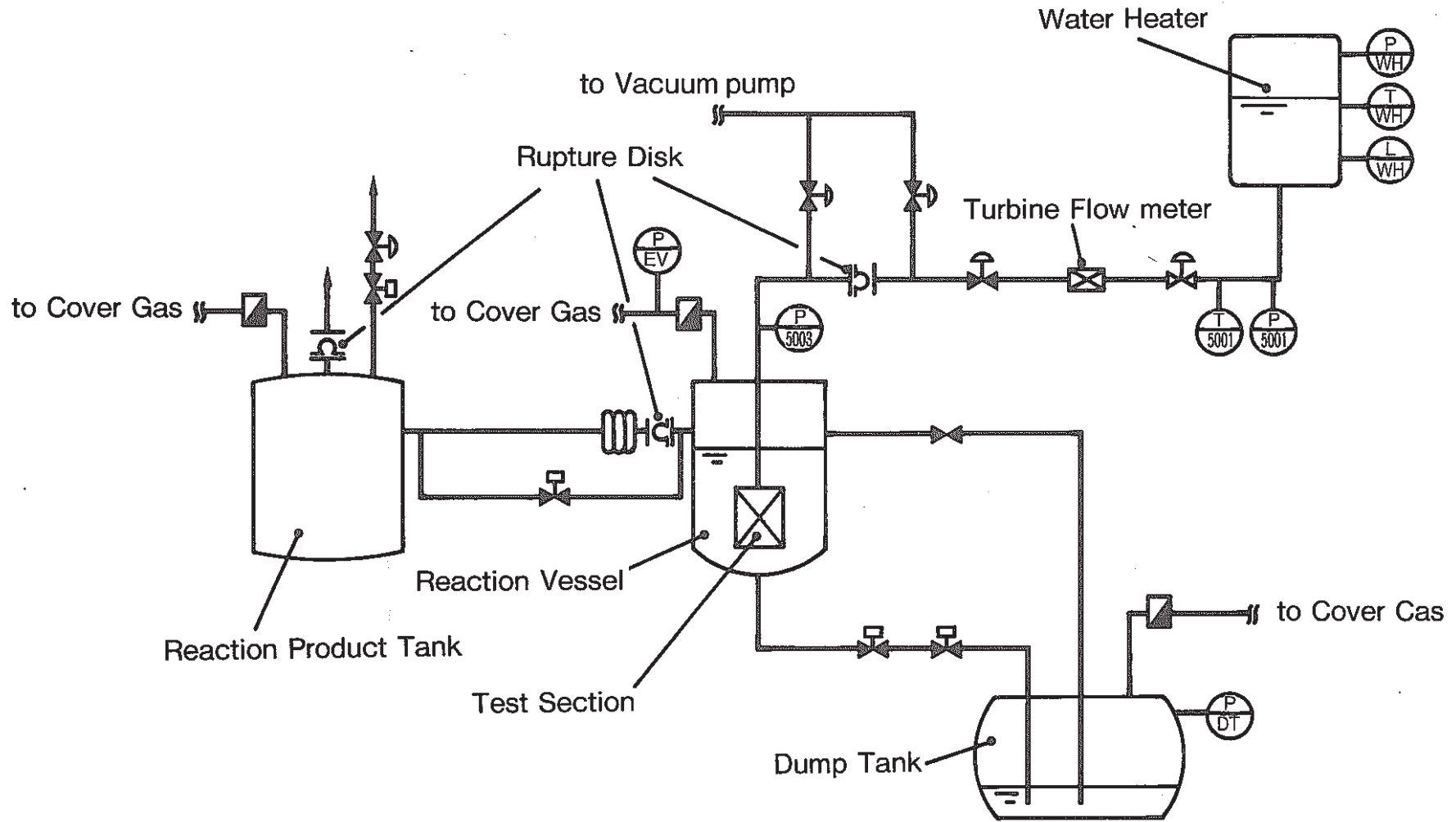


Fig. 3.2.1 Flow Sheet Diagram of SWAT-1

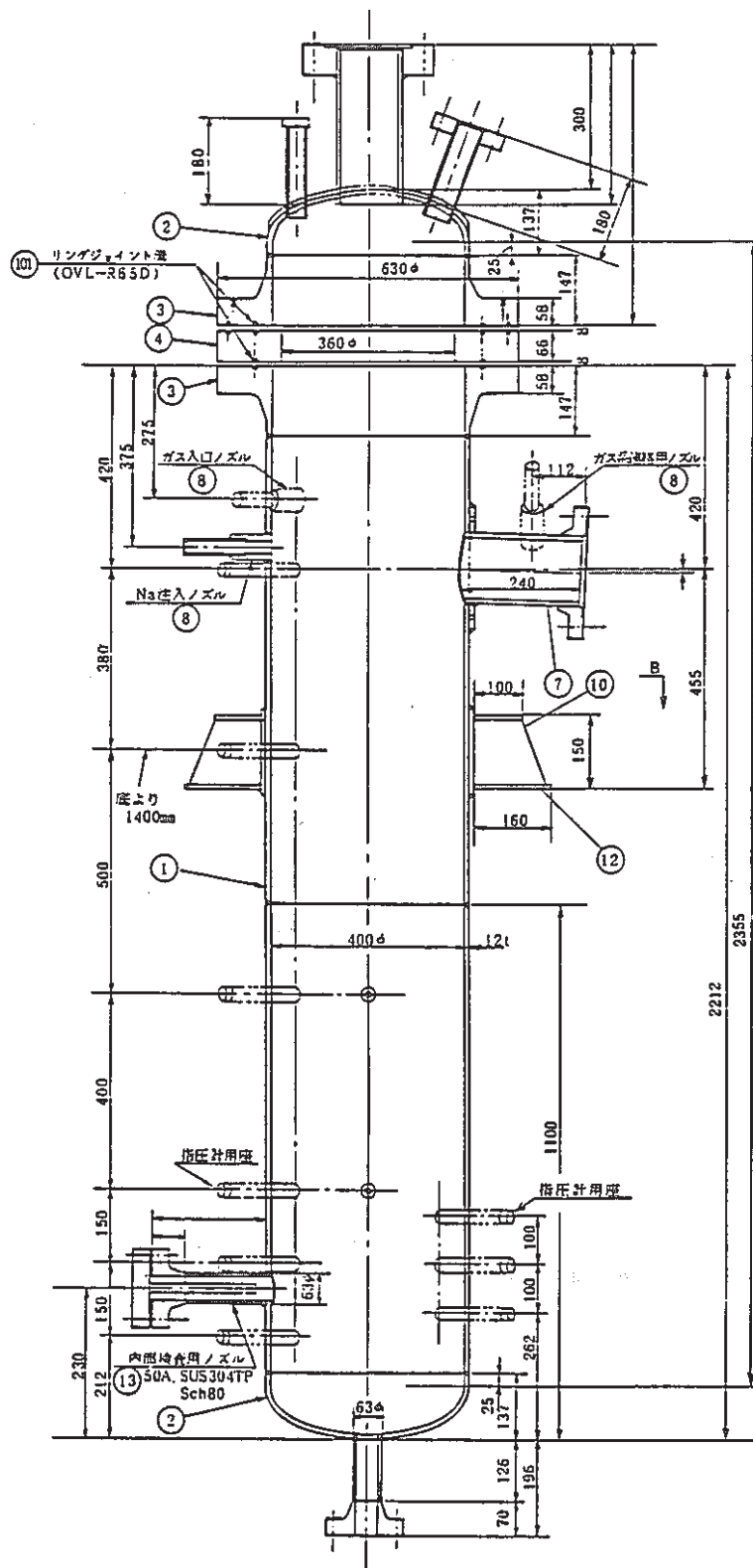


Fig. 3.2.2 SWAT-1 Reaction Vessel

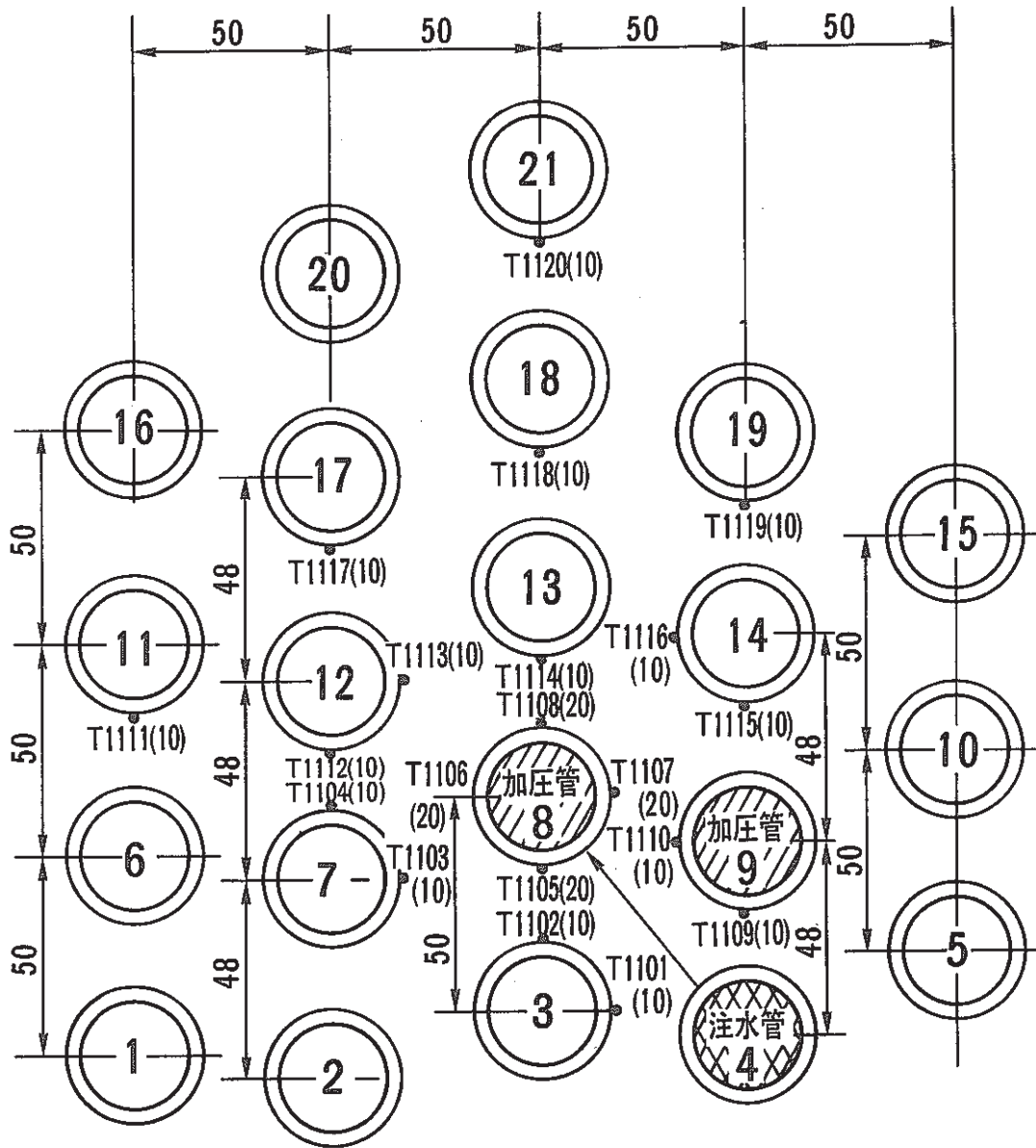


Fig. 3.2.3 Configuration of Tubes and Thermocouples in Run4117

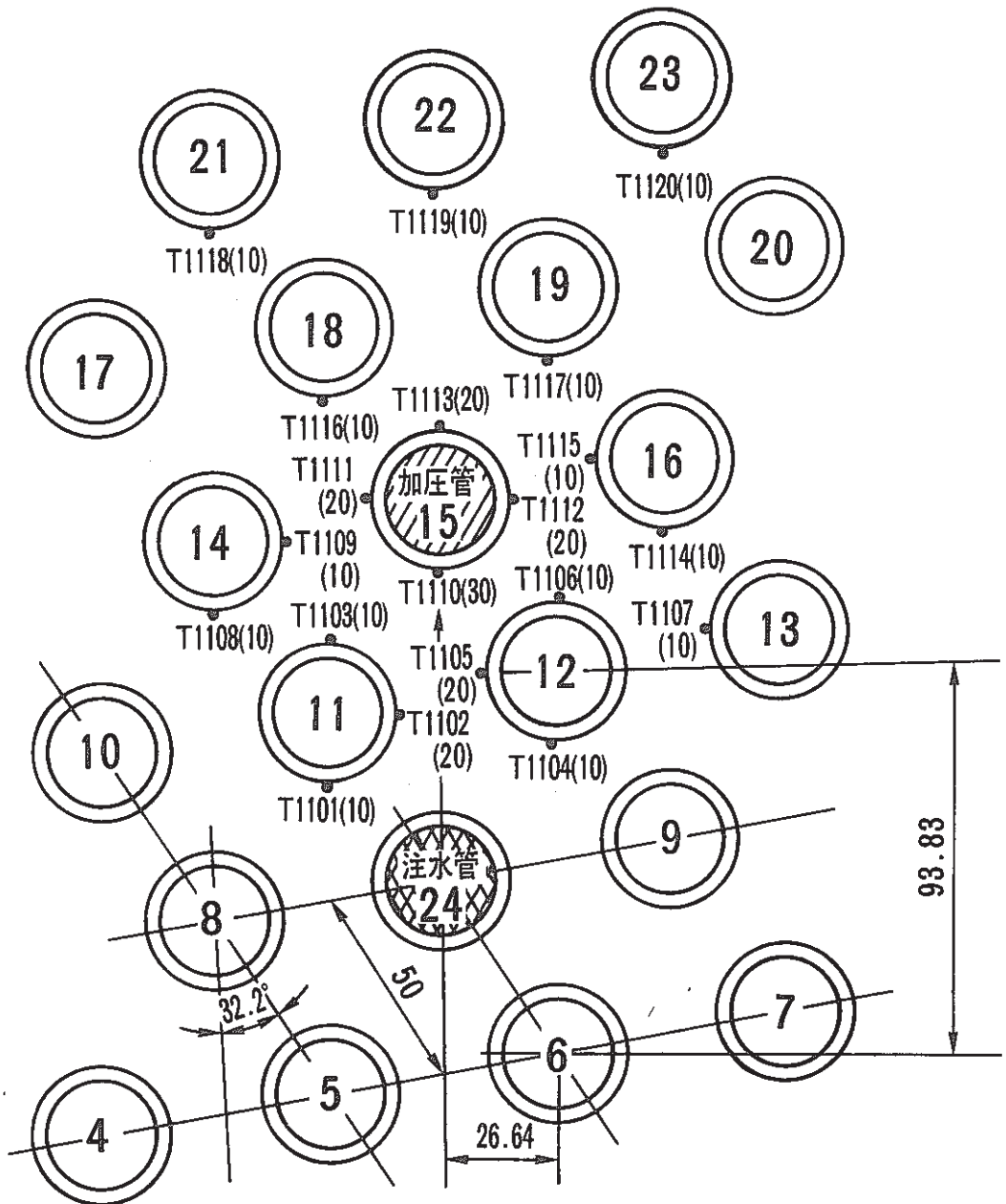
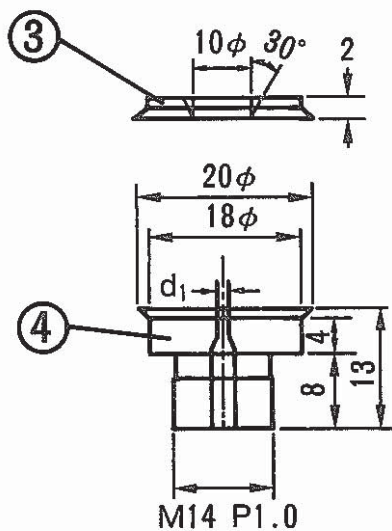
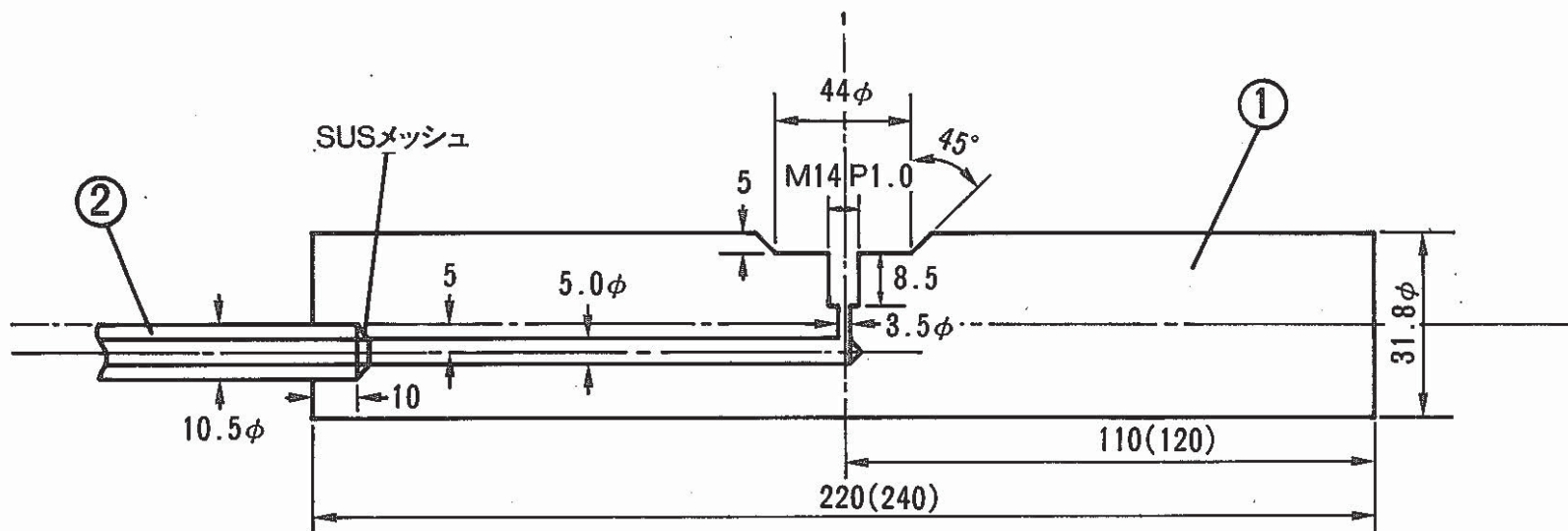


Fig. 3.2.4 Configuration of Tubes and Thermocouples in Run4118



番号	名称	材質	サイズ	備考
1	注水管	SUS304	31.8 ϕ	()内RUN-4118用
2	注水配管	〃	10.5 ϕ sch80	
3	ラプチャー板押え	〃	—	ラプチャー板=3/100mm ^t
4	ノズル	〃	—	RUN-4117 d ₁ =1.2mm ϕ RUN-4118 d ₁ =2.5mm ϕ

Fig. 3.2.5 ラプチャー型注水管

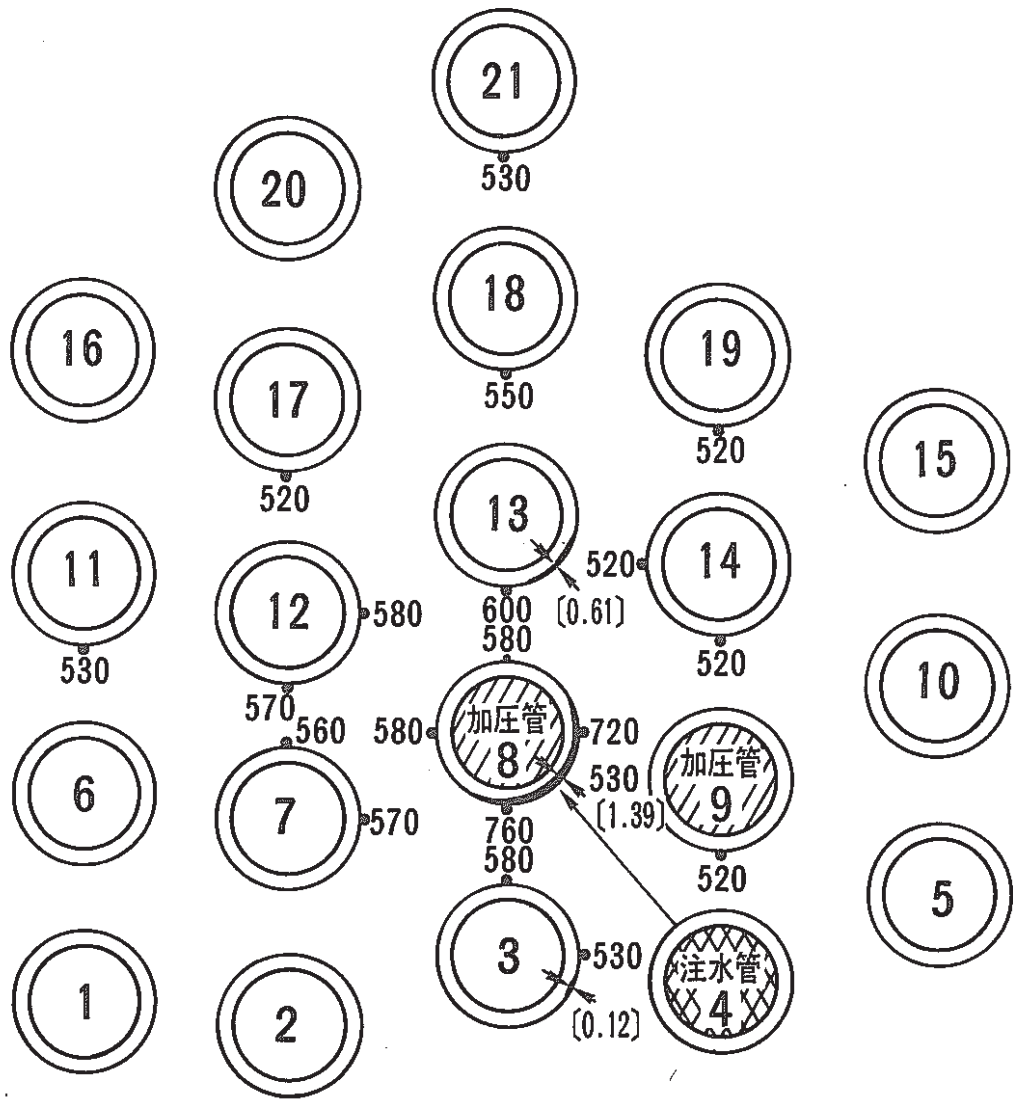


Fig. 3.4.1 Multiple Wastage of Tubes and Reaction Temperature (Run4117)

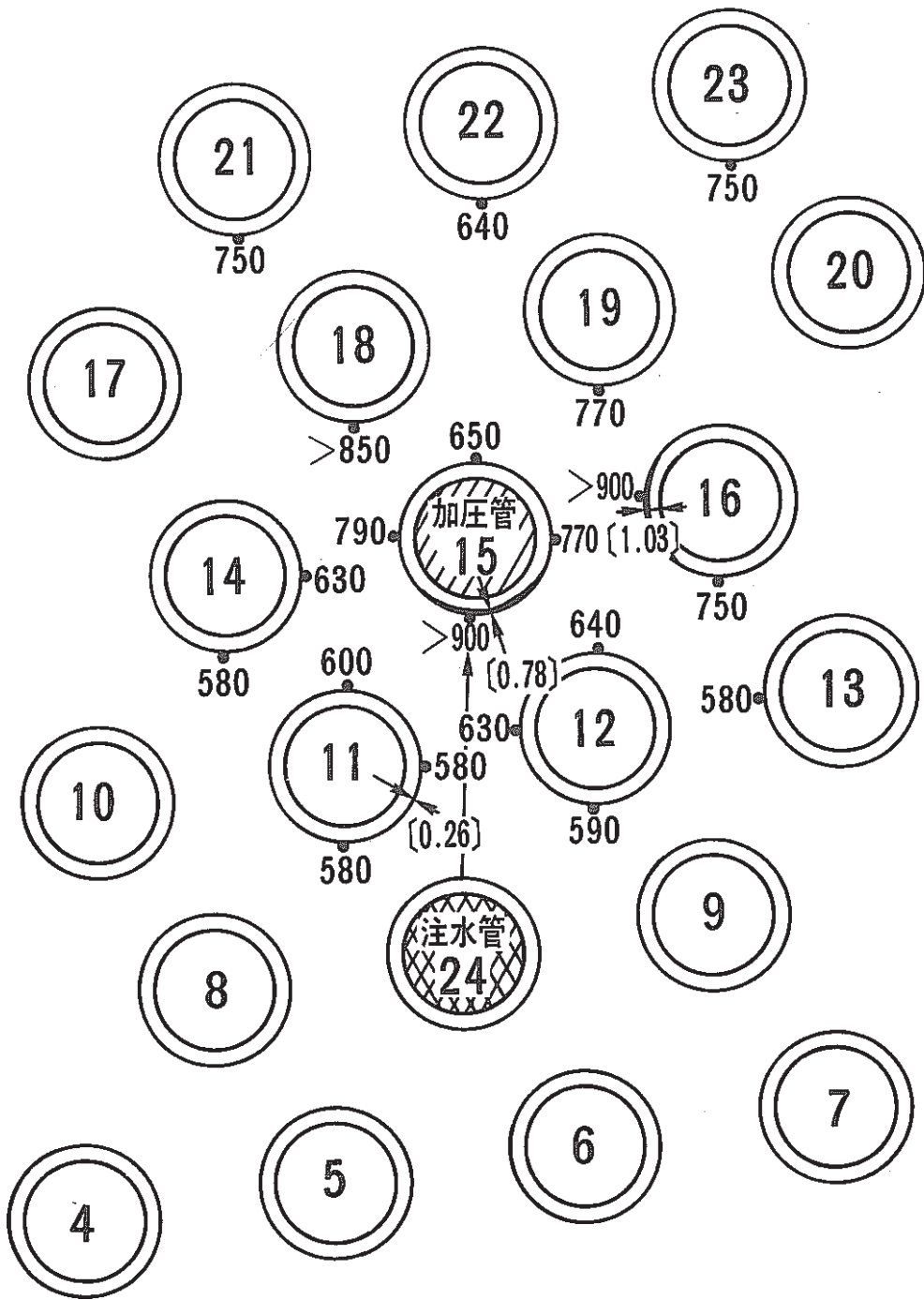


Fig. 3. 4. 2. Multiple Wastage of Tubes and Reaction Temperature (Run4118)

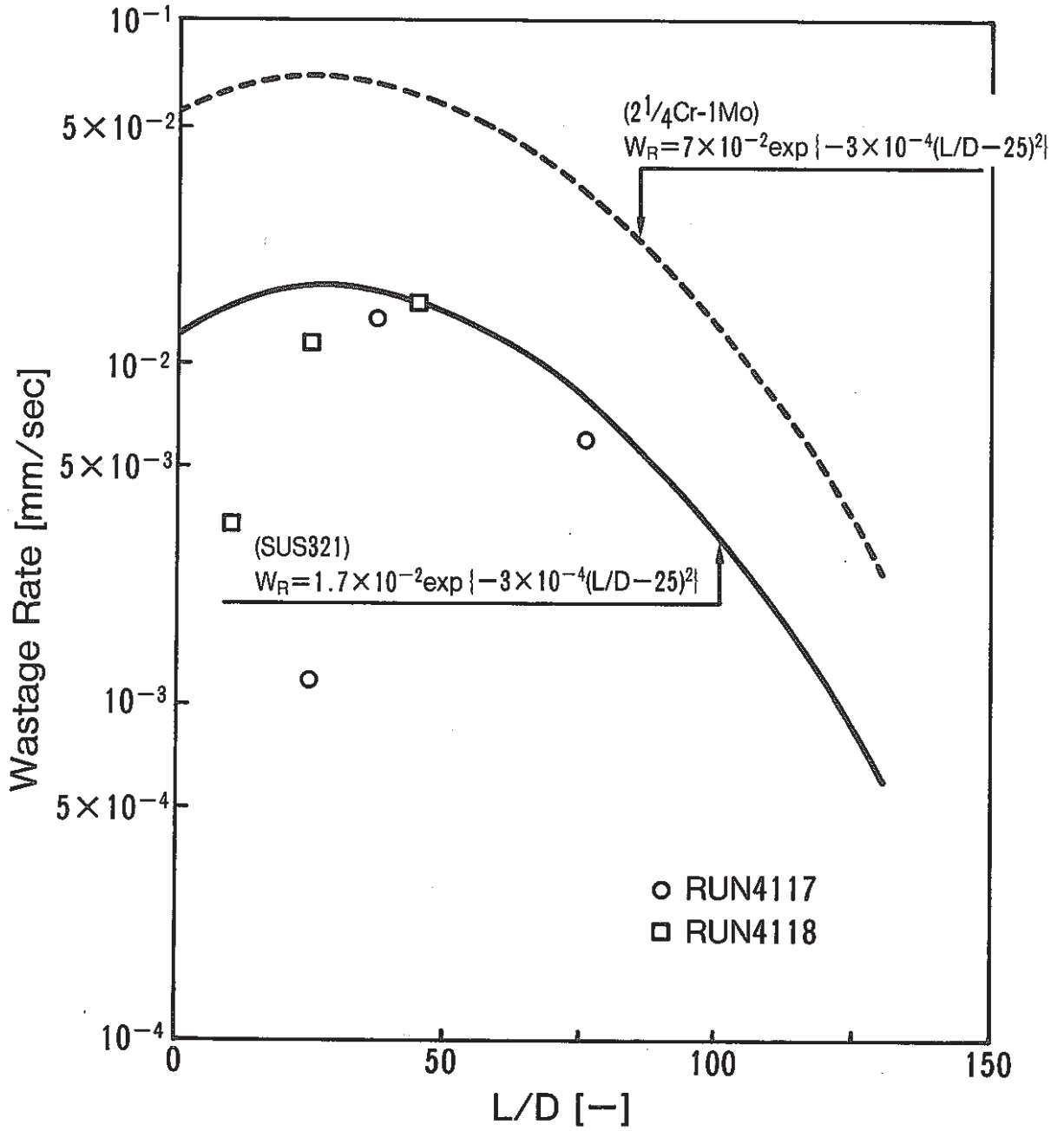


Fig. 3.5.1 Relation between Wastage Rate and L / D

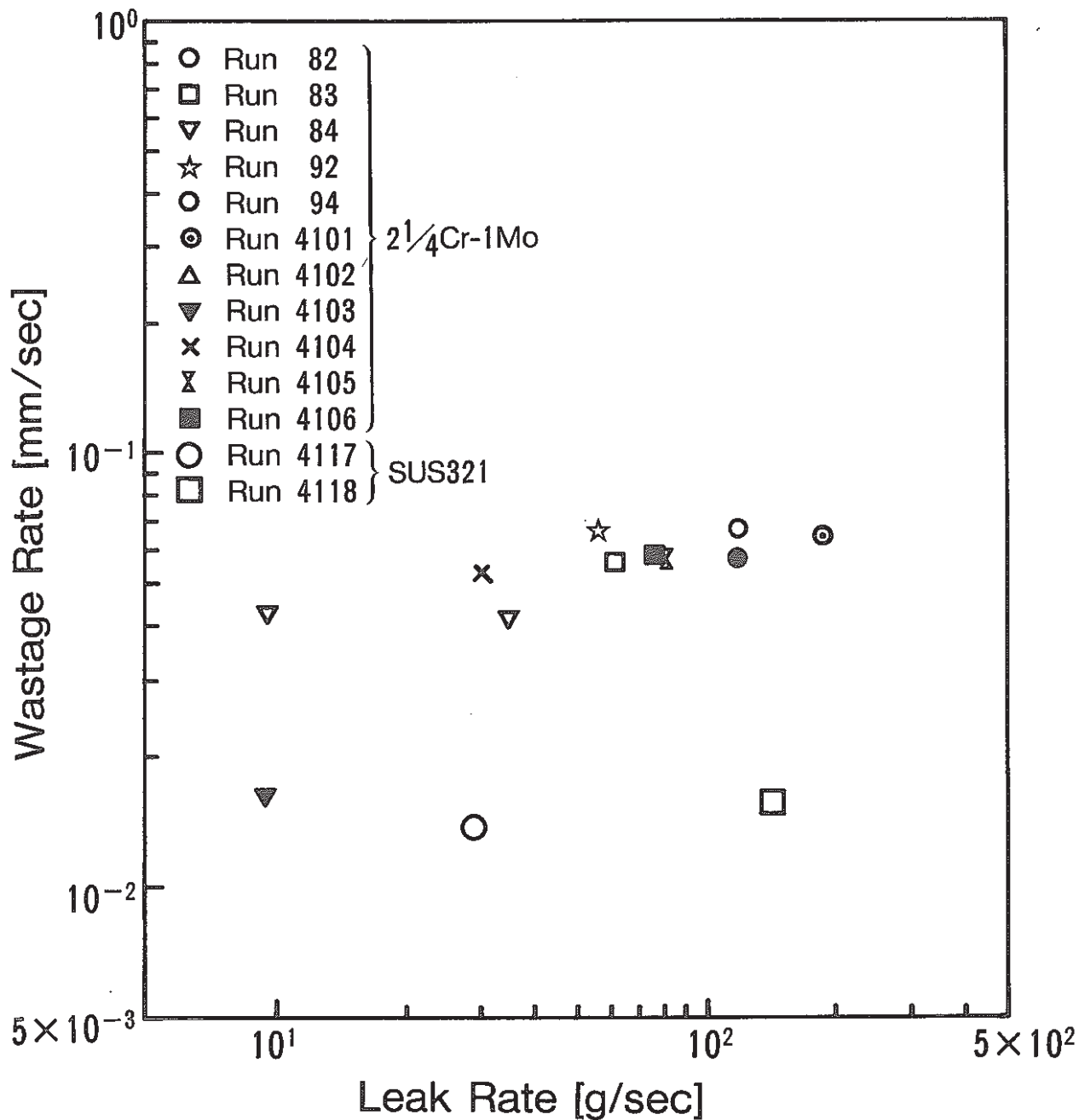
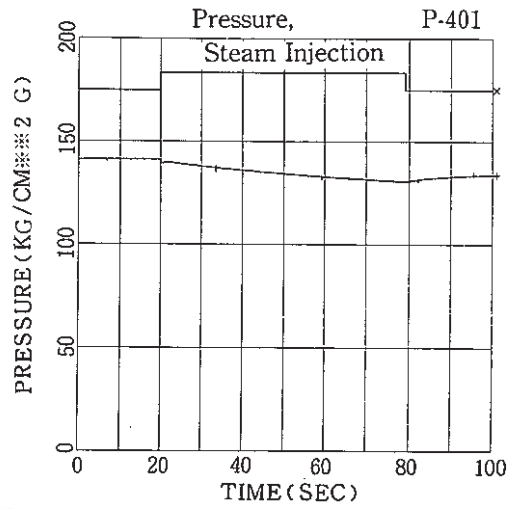
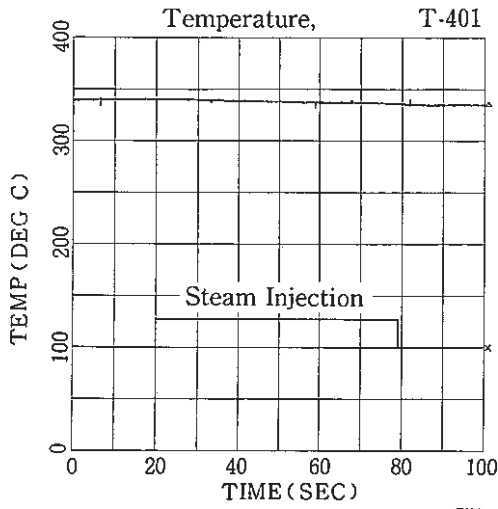


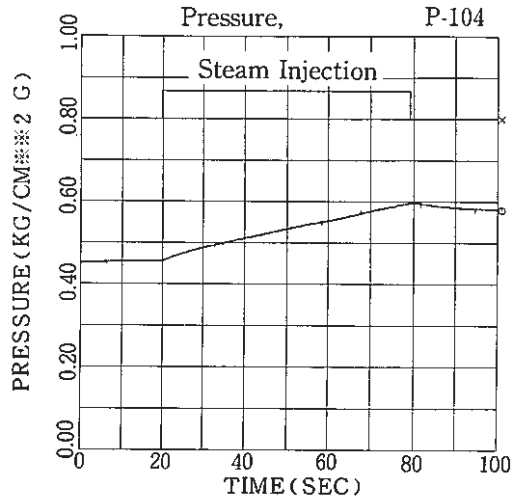
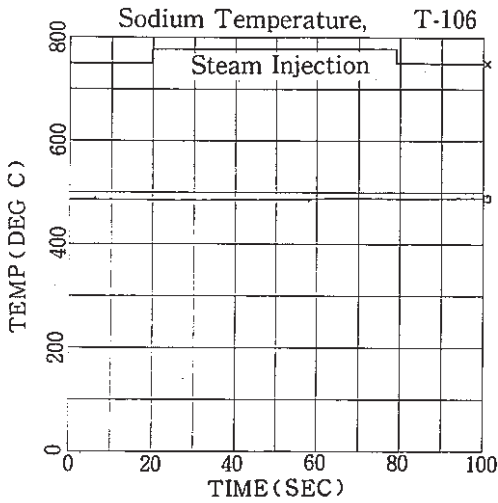
Fig. 3.5.2 Wastage Rate and Leak Rate

A p p e n d i x 1.

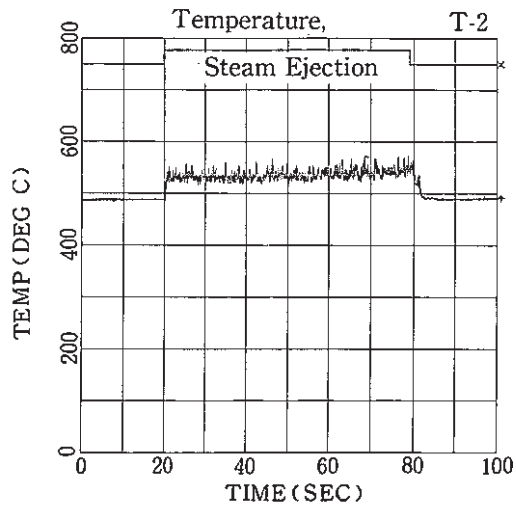
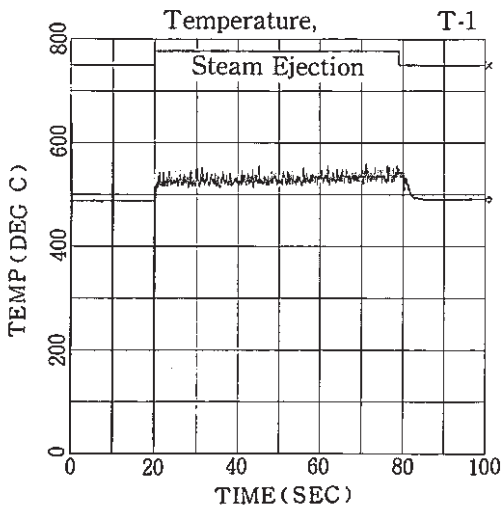
SWAT-2. Run-4206-①, Run-4206-②, DATA



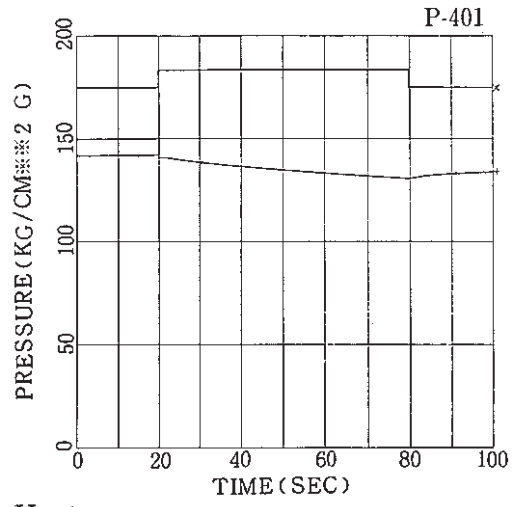
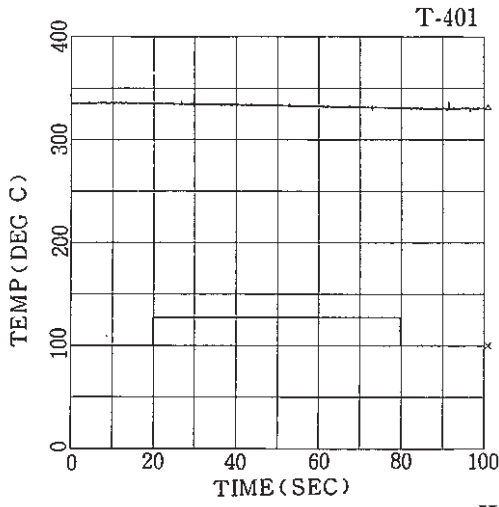
Water Heater



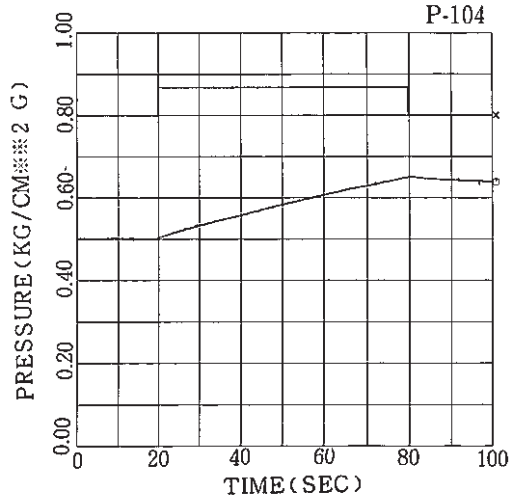
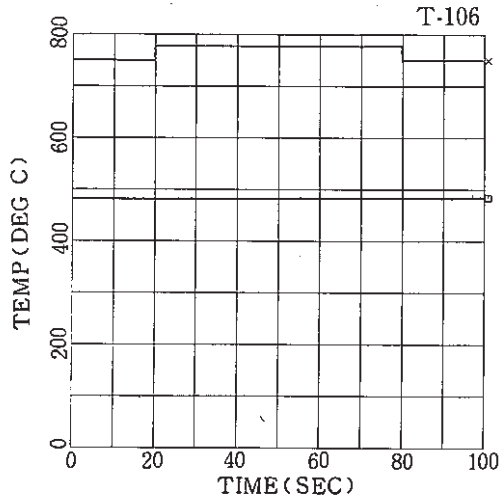
Reaction Test Vessel



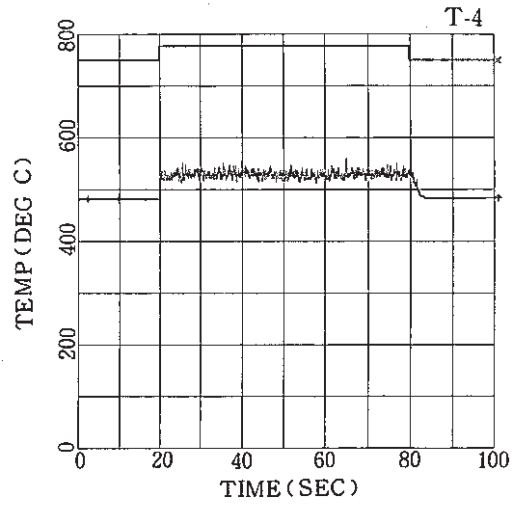
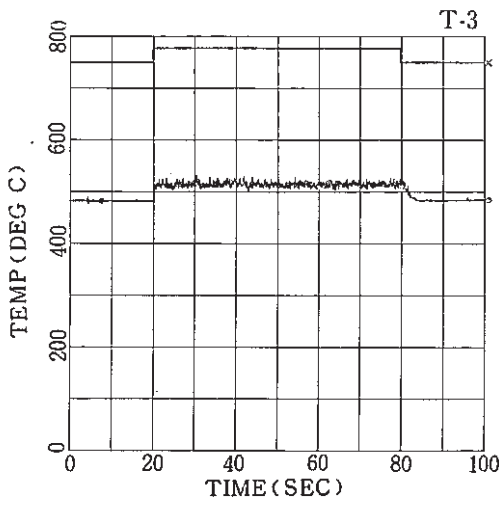
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



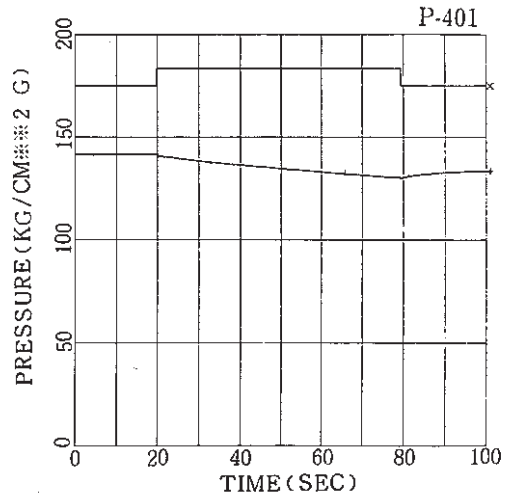
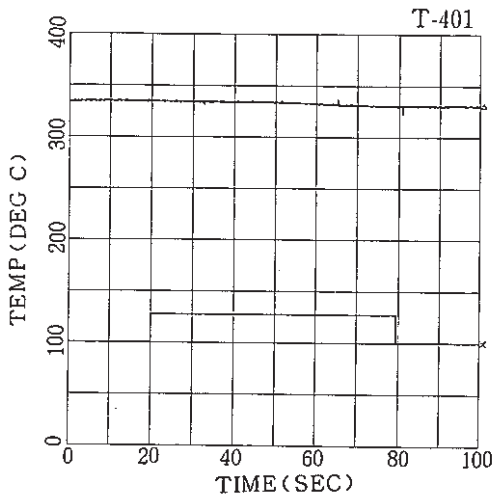
Water Heater



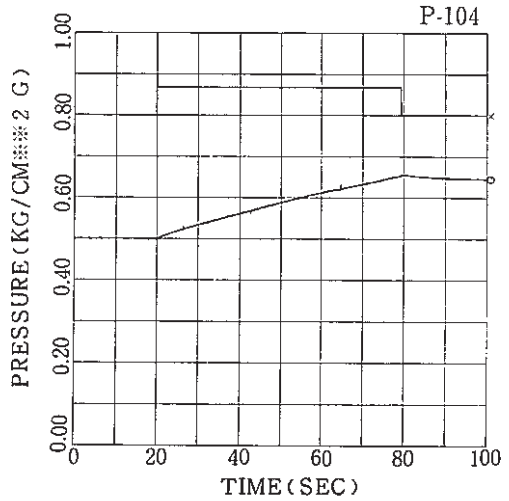
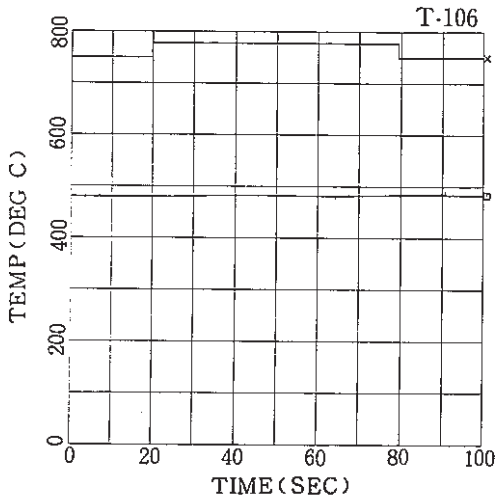
Reaction Test Vessel



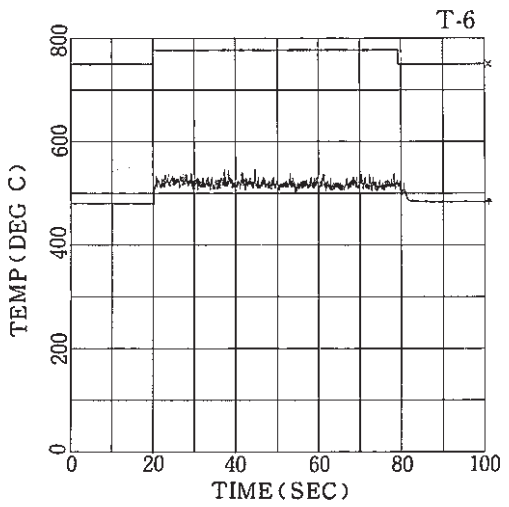
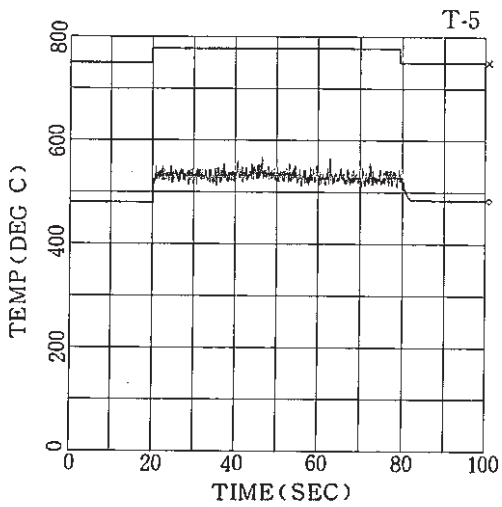
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



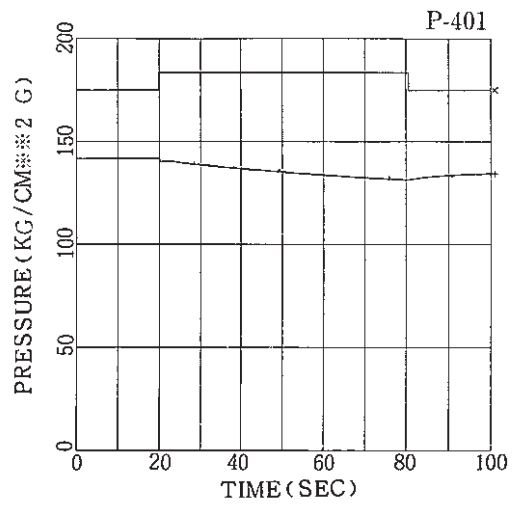
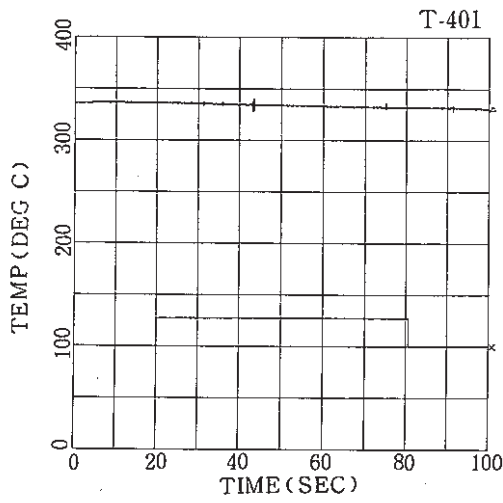
Water Heater



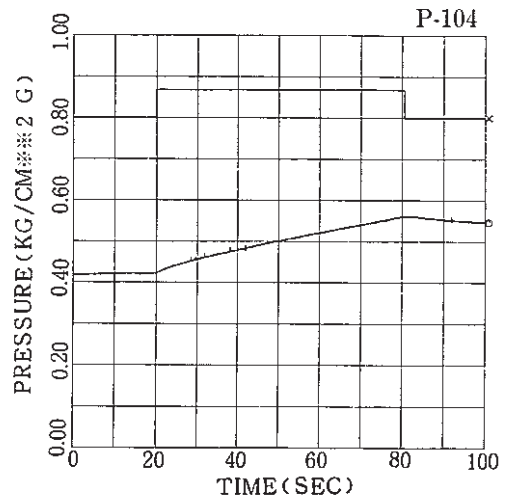
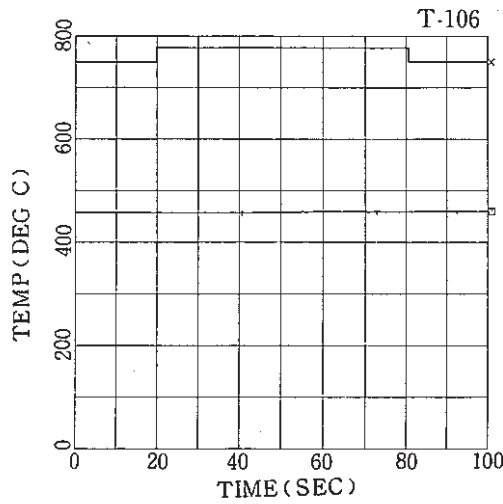
Reaction Test Vessel



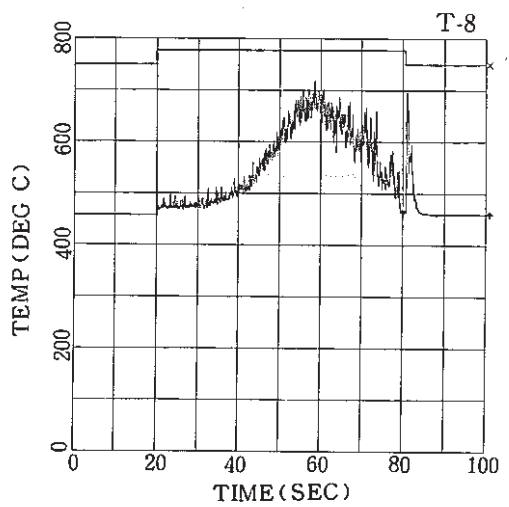
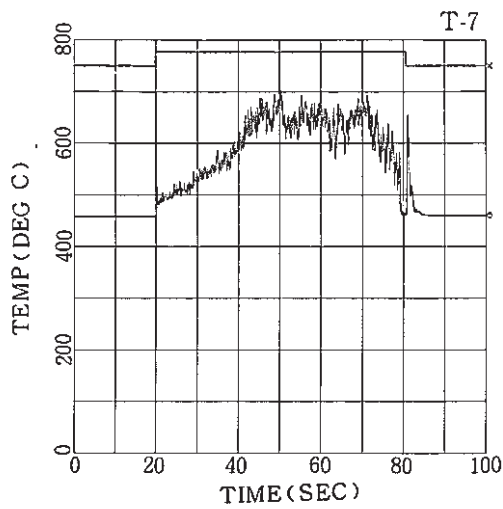
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



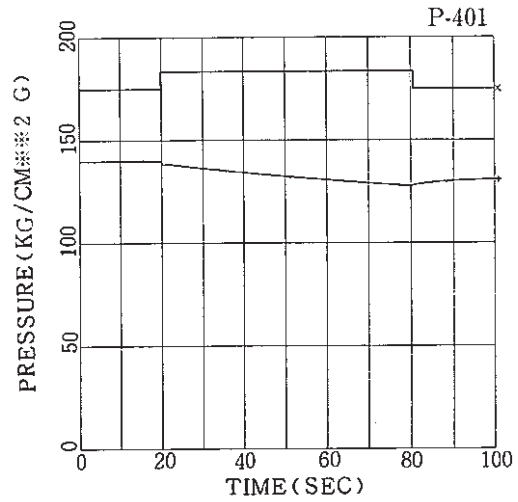
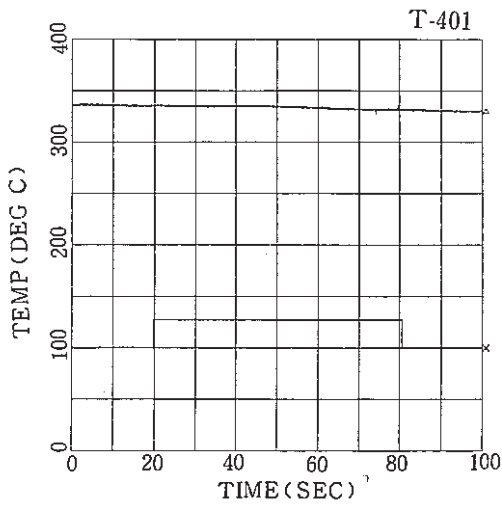
Water Heater



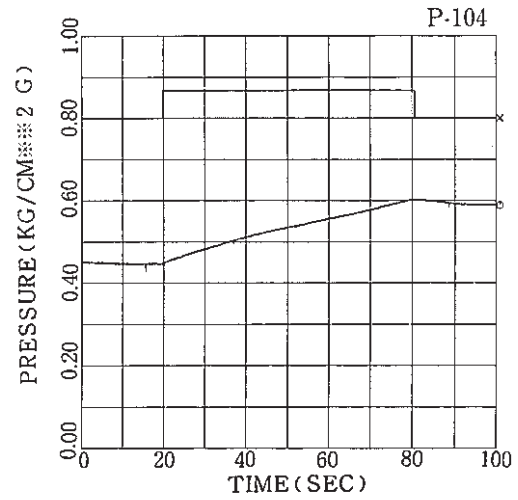
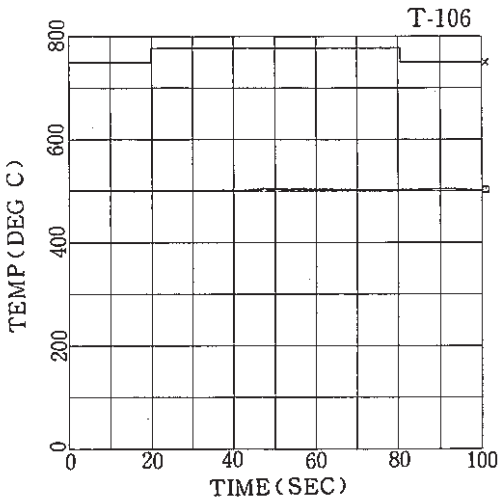
Reaction Test Vessel



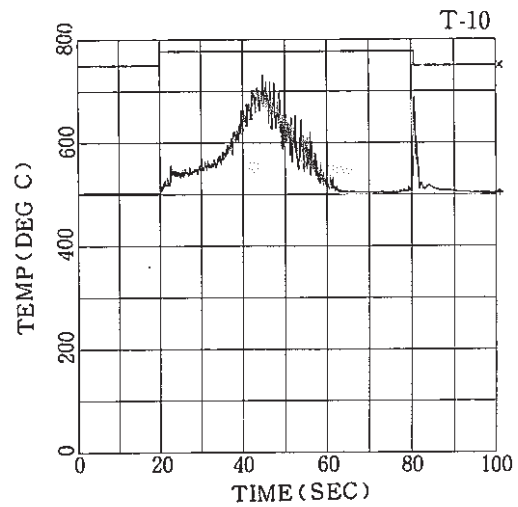
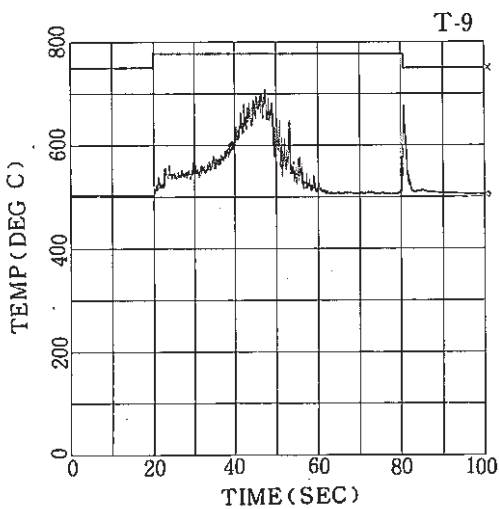
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



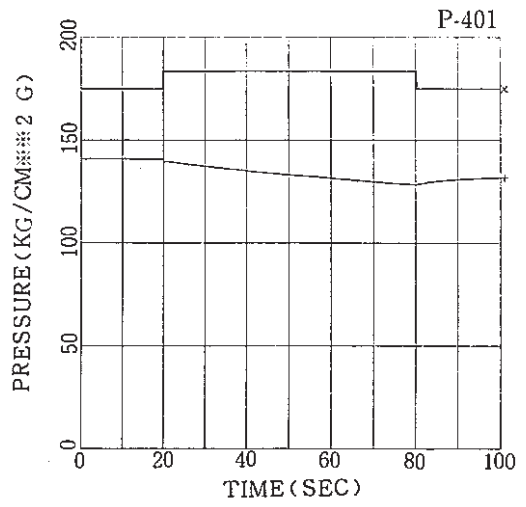
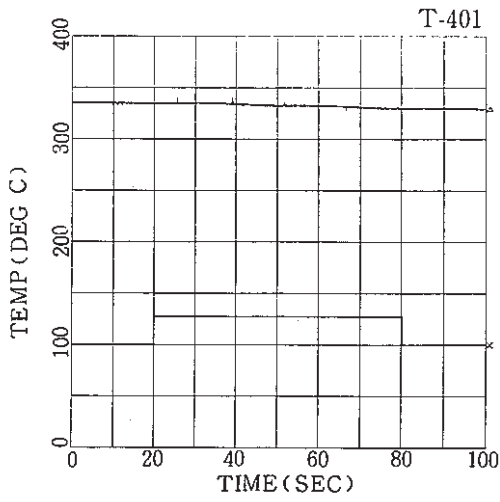
Water Heater



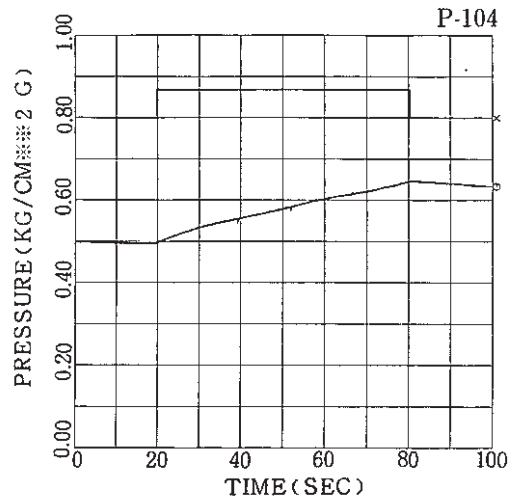
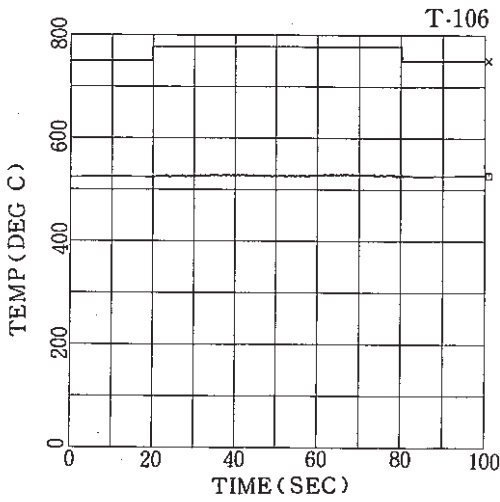
Reaction Test Vessel



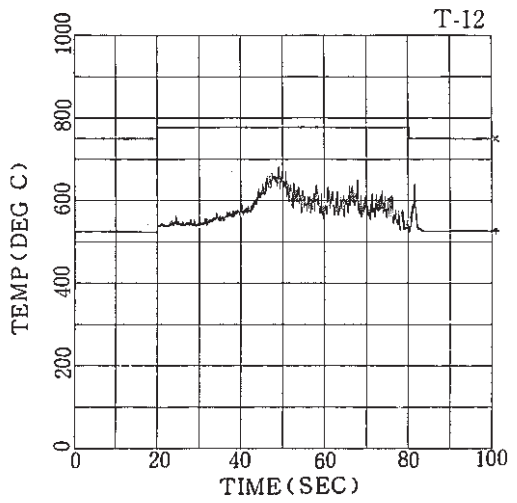
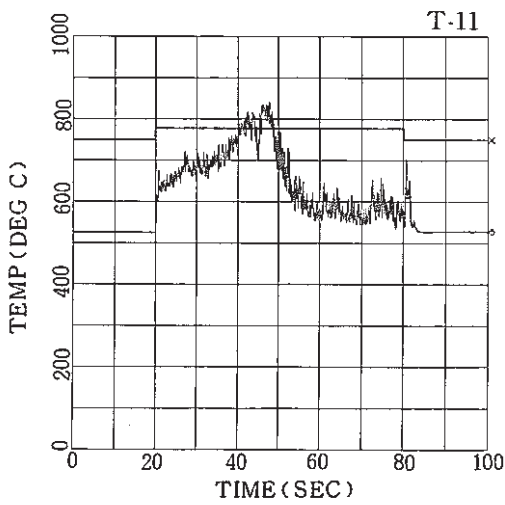
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



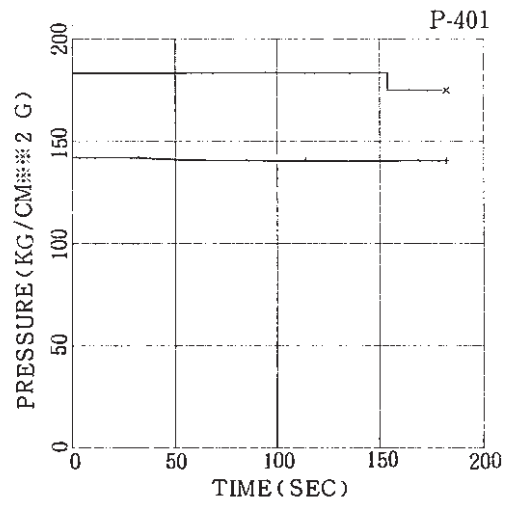
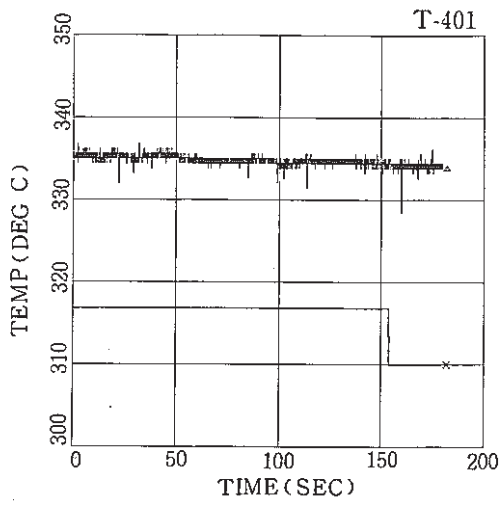
Water Heater



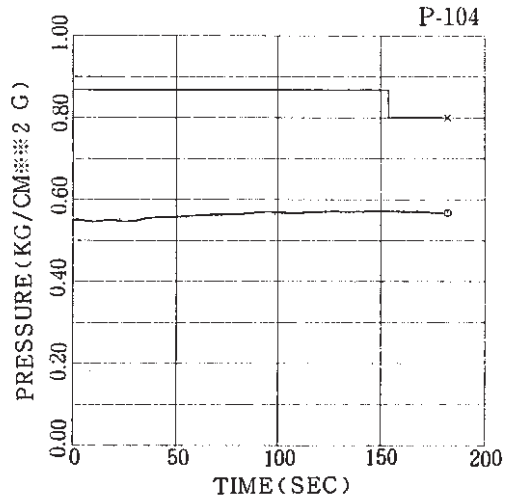
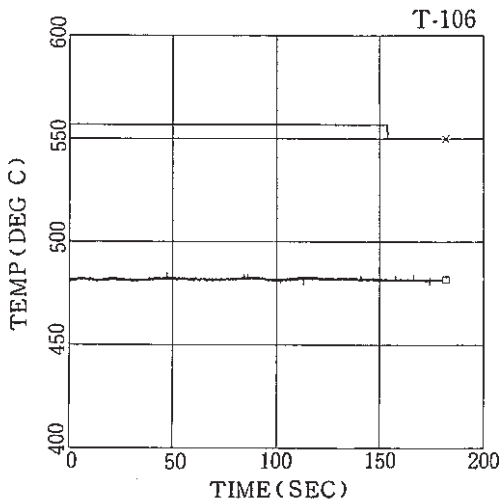
Reaction Test Vessel



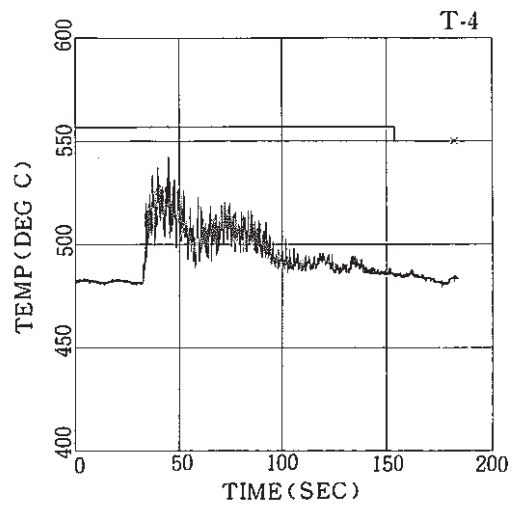
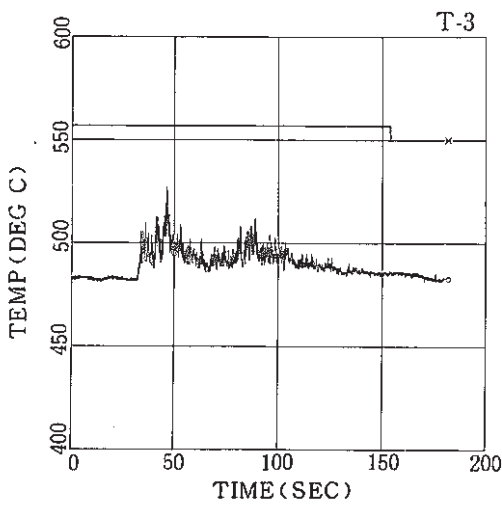
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



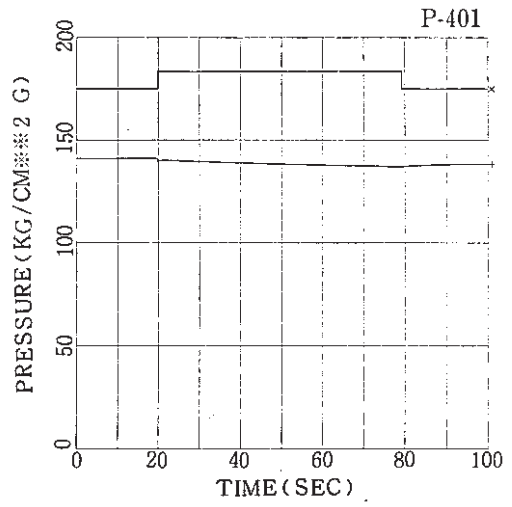
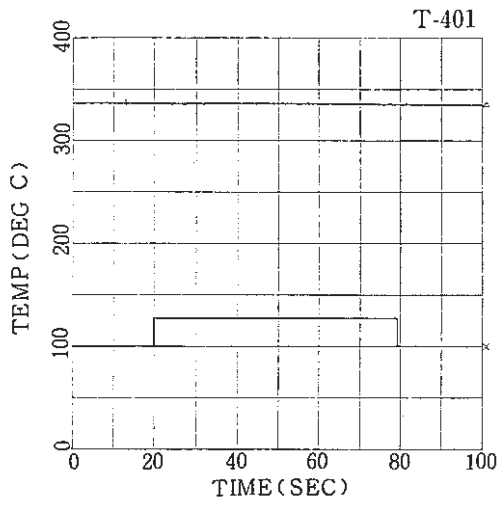
Water Heater



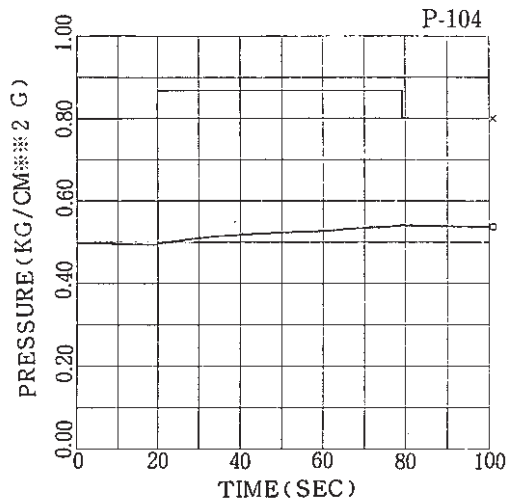
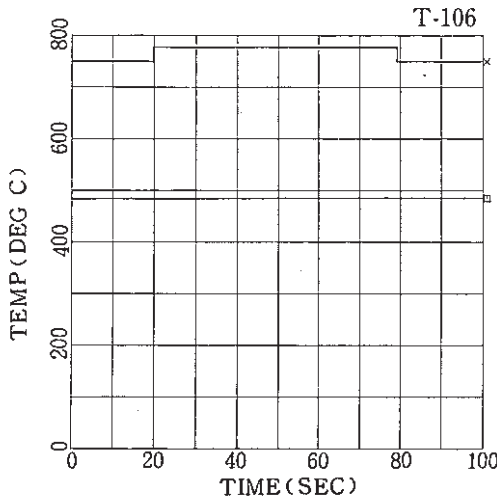
Reaction Test Vessel



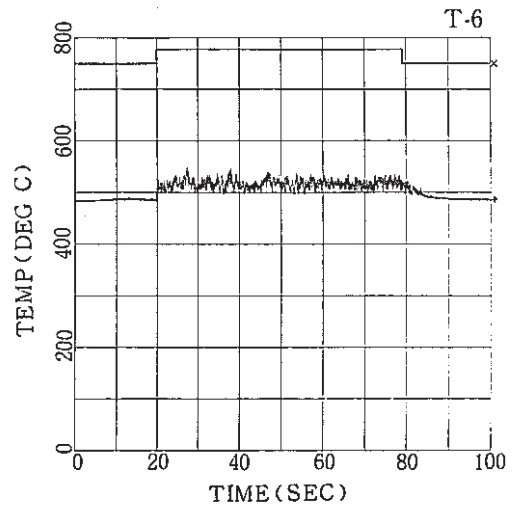
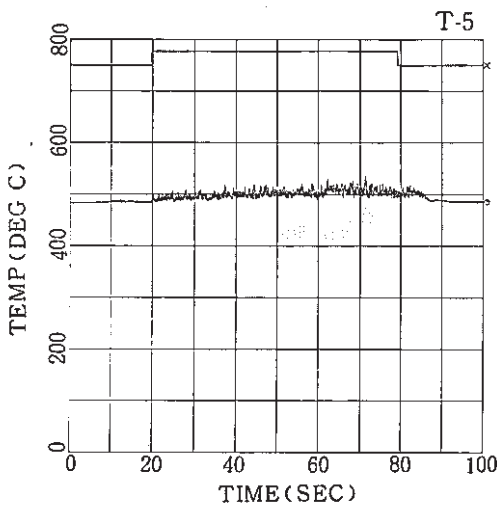
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



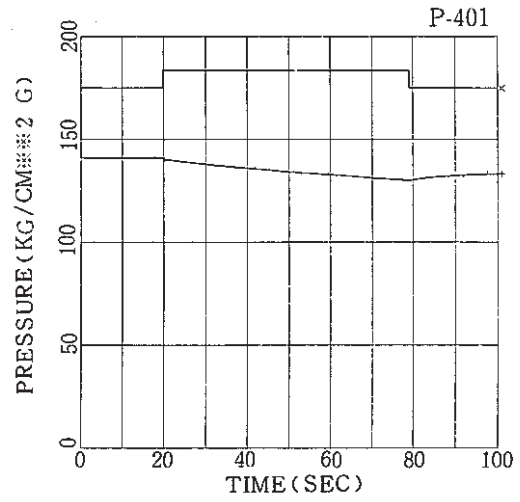
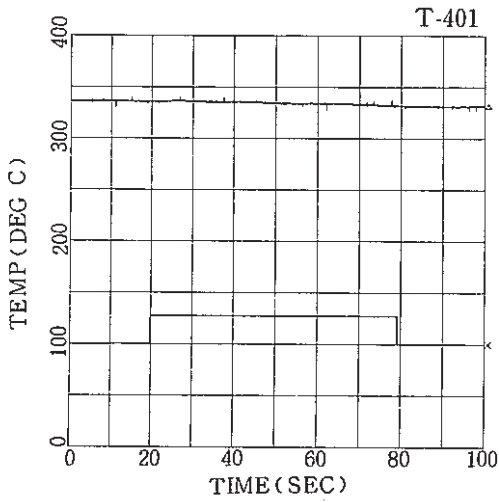
Water Heater



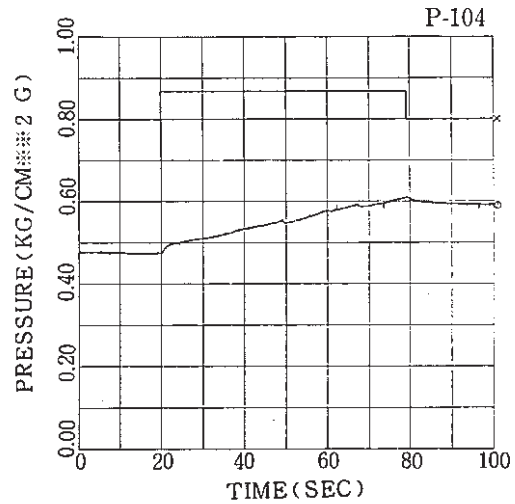
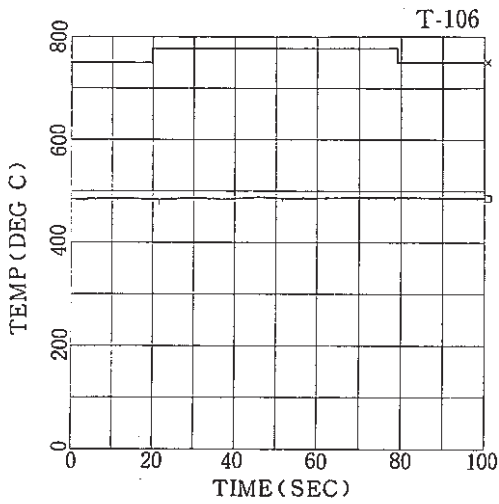
Reaction Test Vessel



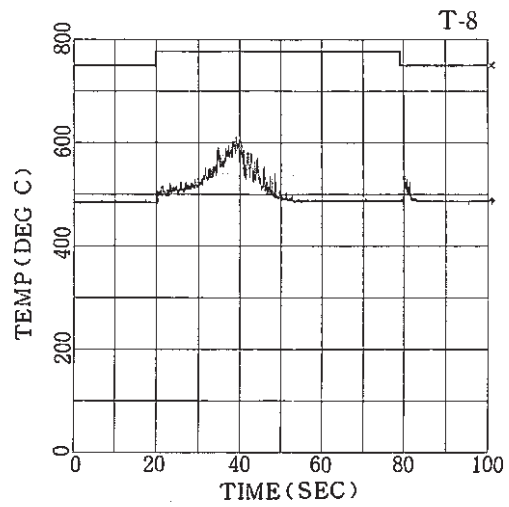
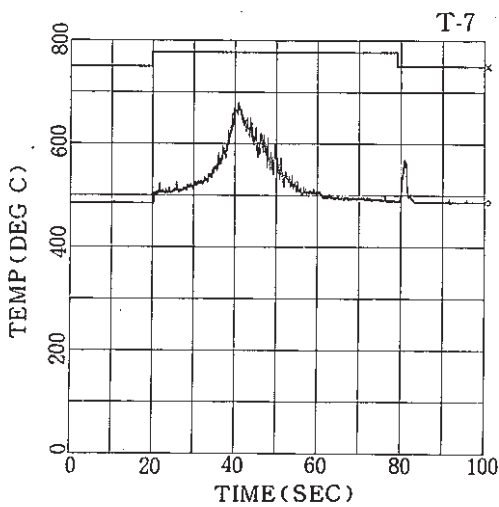
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



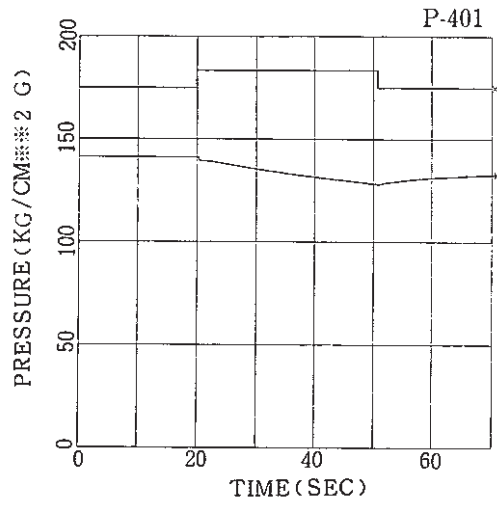
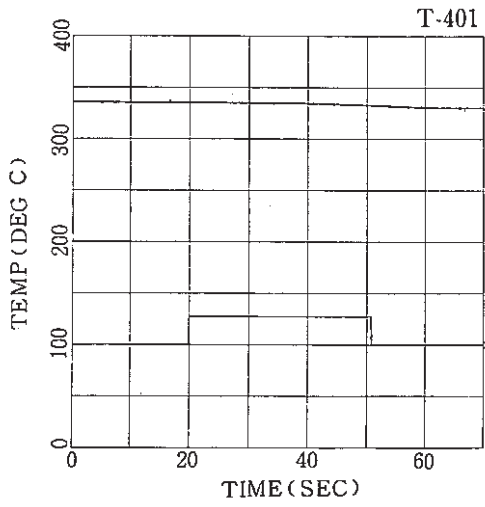
Water Heater



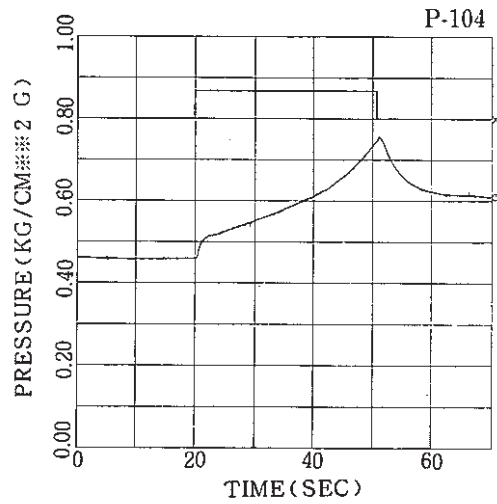
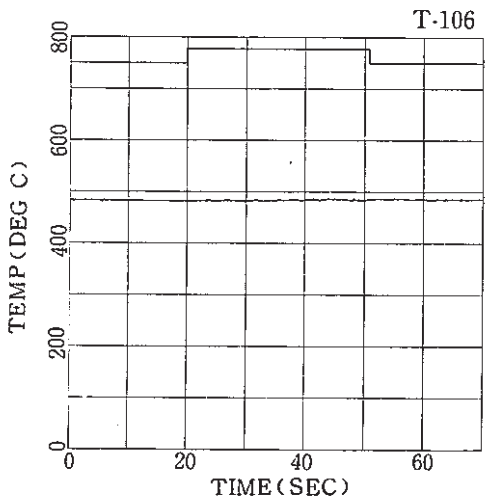
Reaction Test Vessel



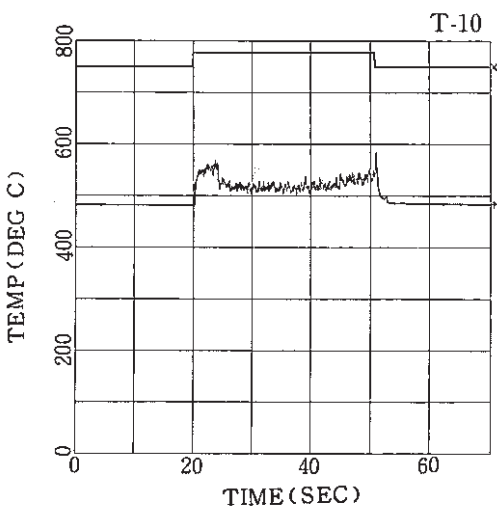
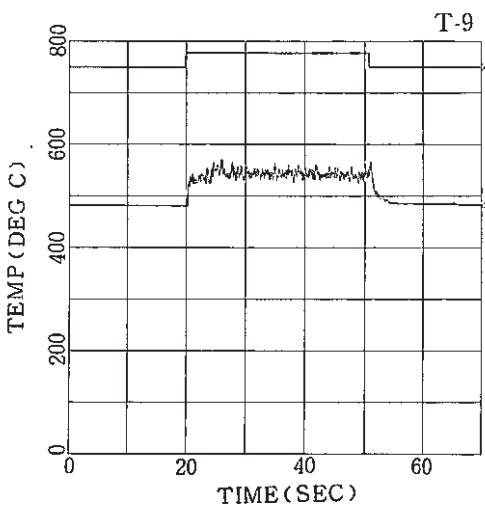
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



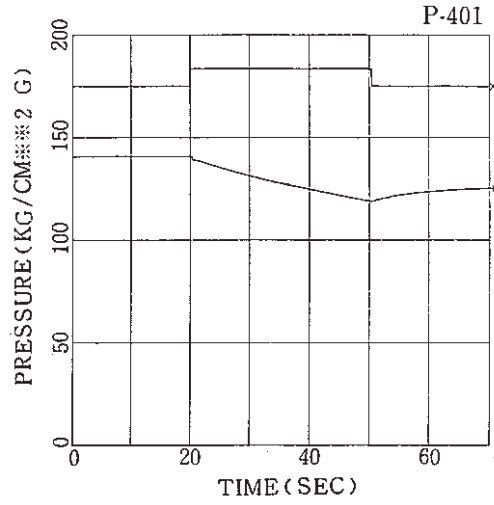
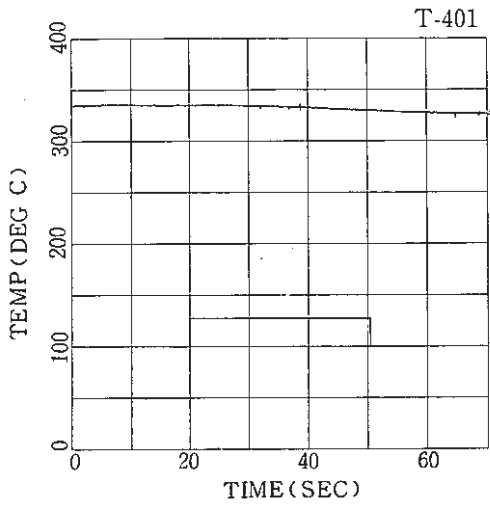
Water Heater



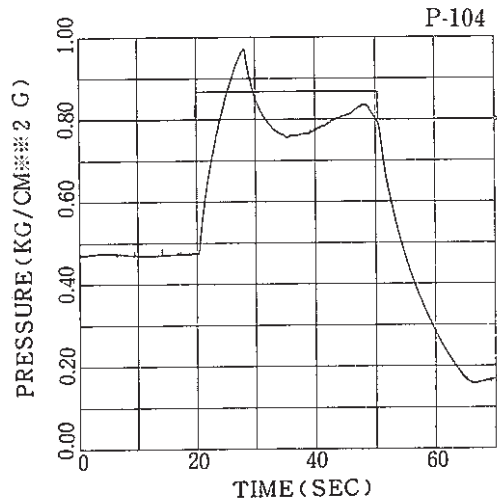
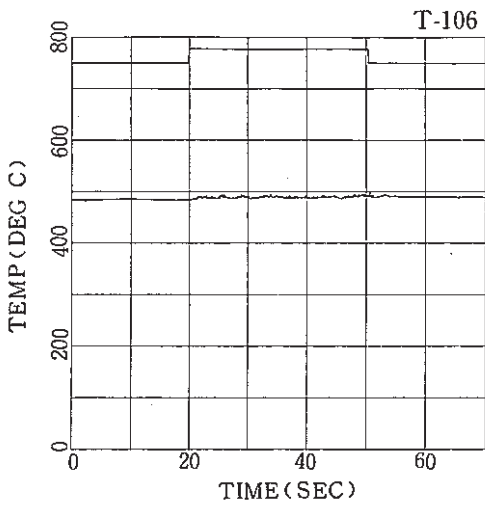
Reaction Test Vessel



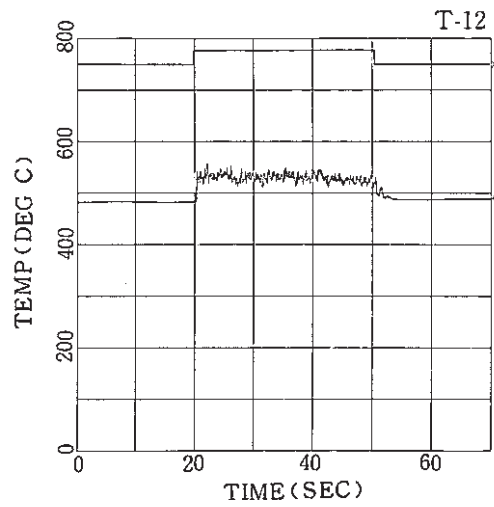
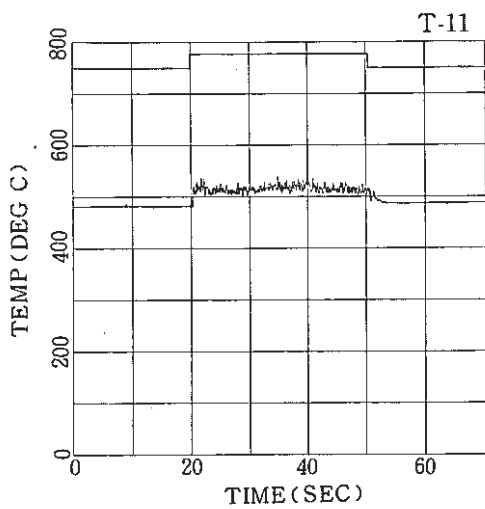
Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone



Water Heater



Reaction Test Vessel

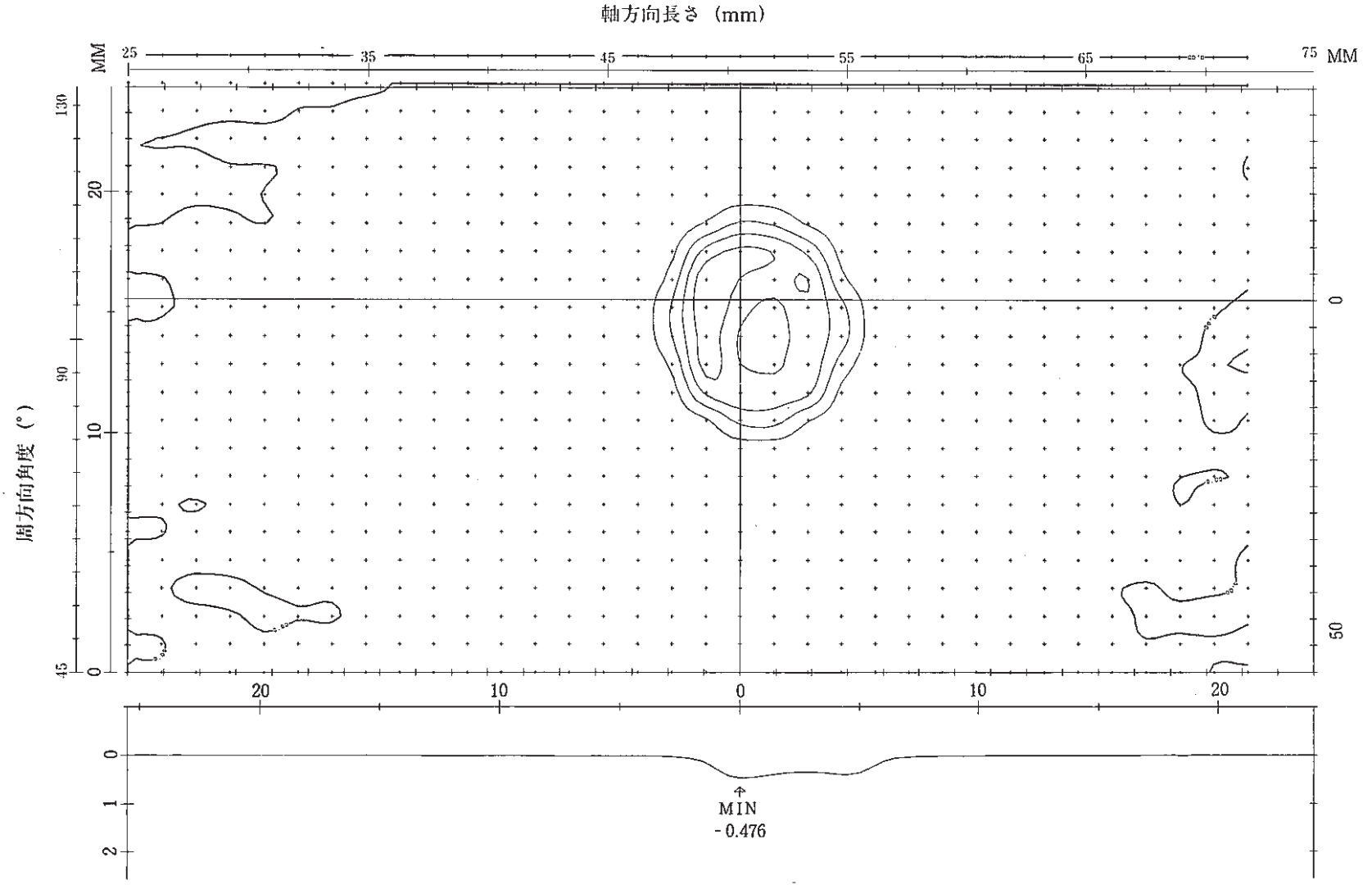


Temperatures at the Vicinity of a Reaction Zone

A p p e n d i x 2.

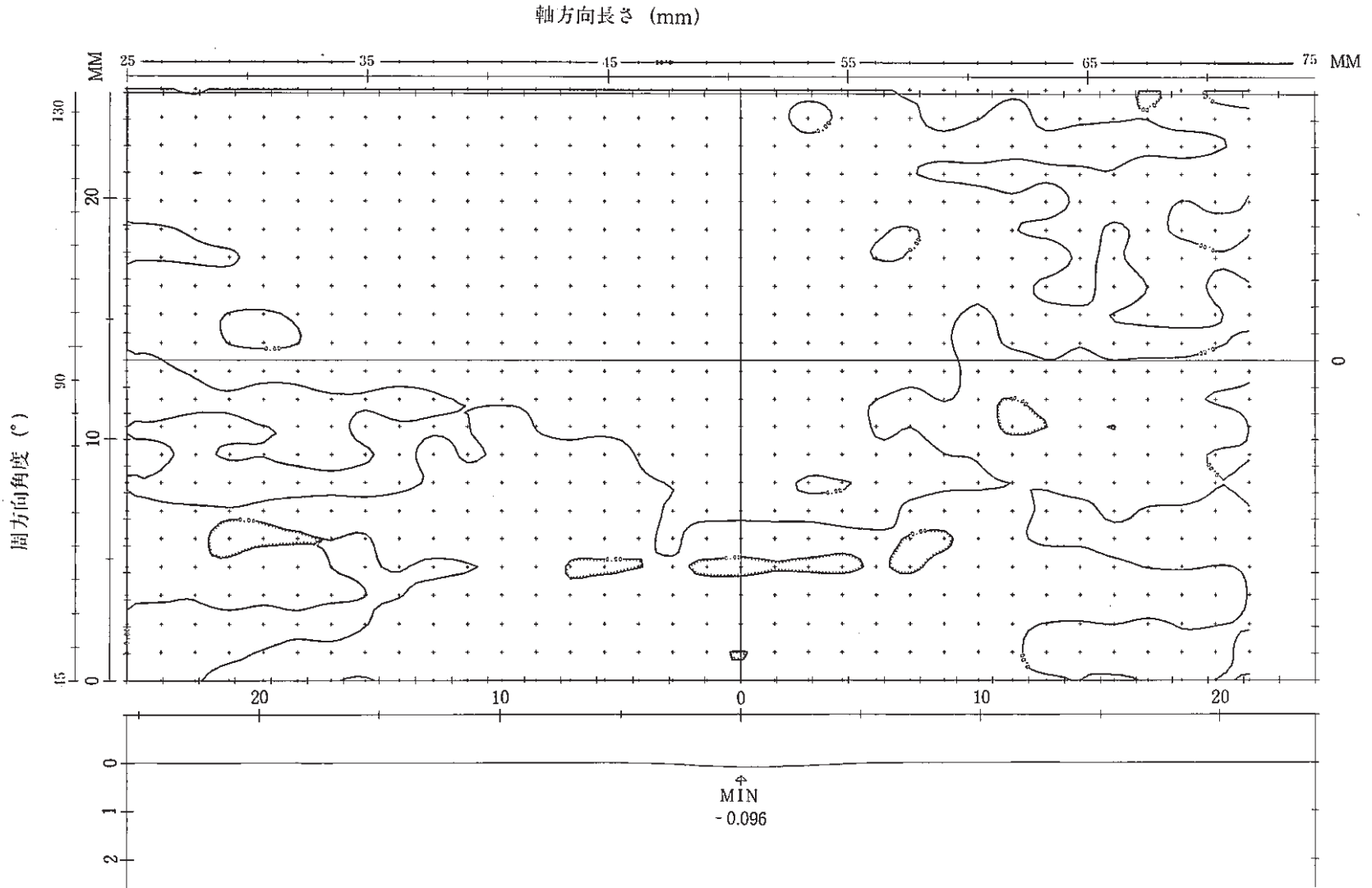
SWAT-2 Run-4206-①, Run-4206-②, Wastage Map

SWAT-2 RUN-4206 JN-1



2-1 Wastage Map of Target Tube JN1 (Run-4206-①)

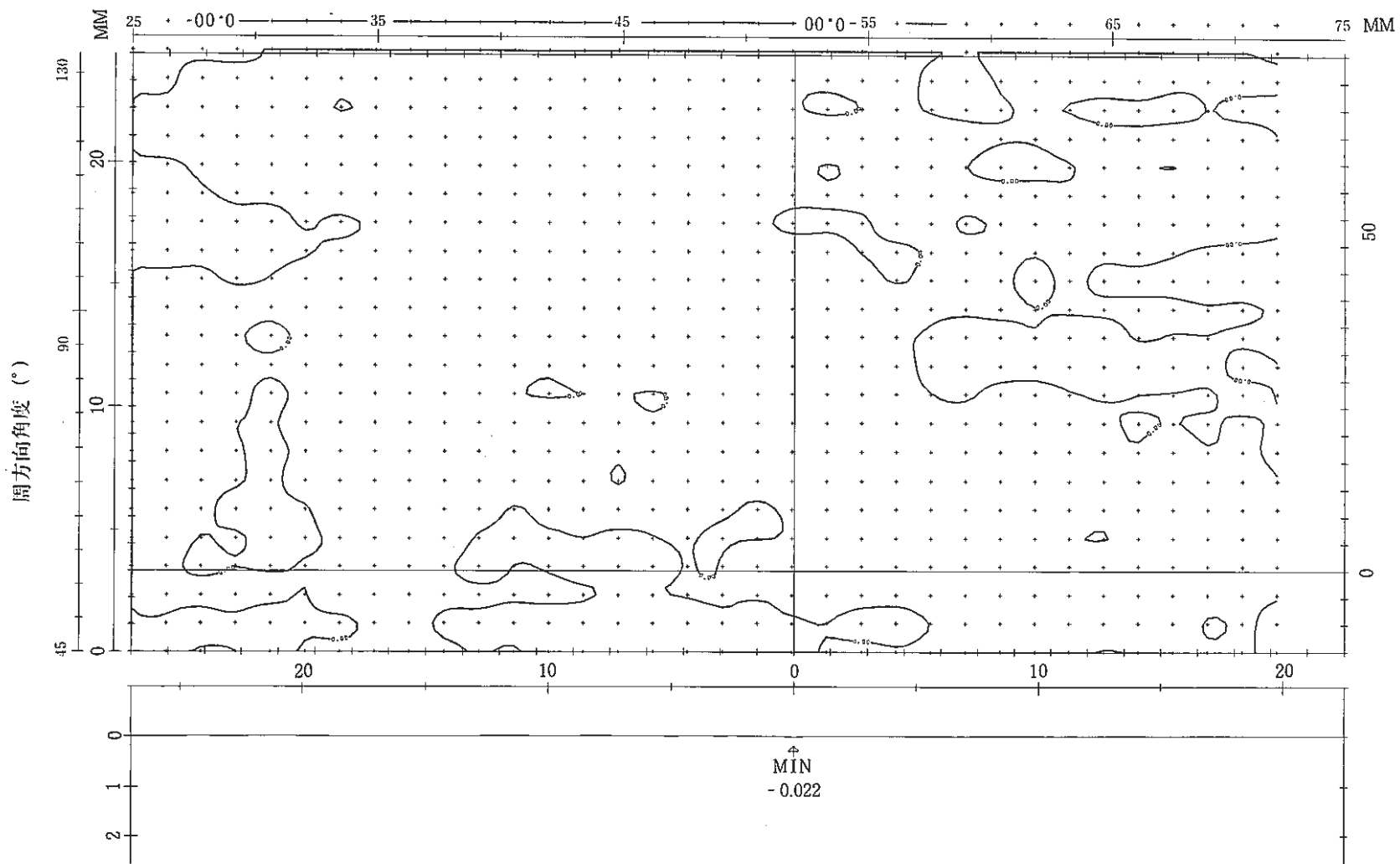
SWAT-2 RUN-4206 JN-2



2-2 Wastage Map of Target Tube JN2 (Run-4206-①)

SWAT-2 RUN-4206 JN-3

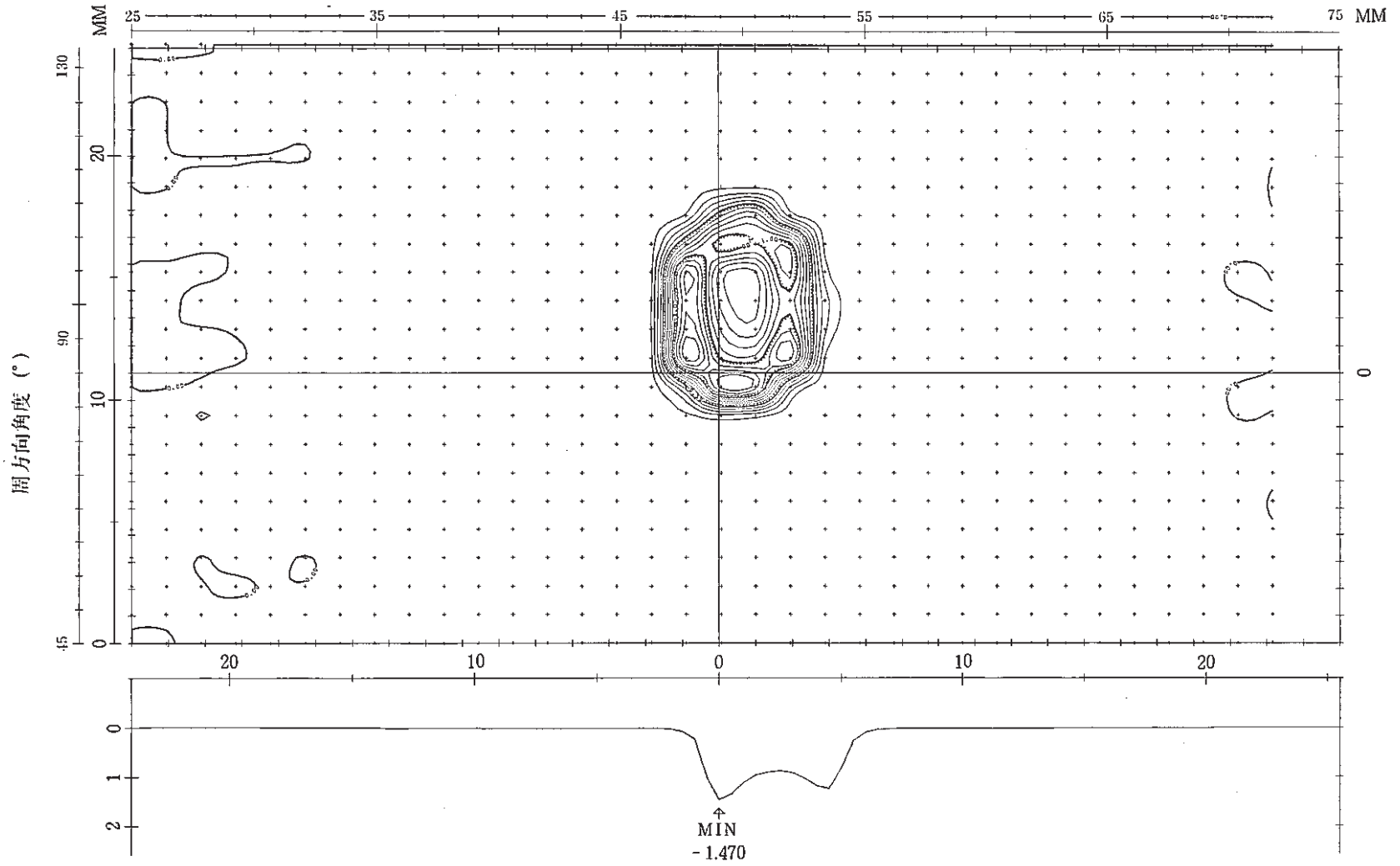
軸方向長さ (mm)



2-3 Wastage Map of Target Tube JN3 (Run-4206-①)

SWAT-2 RUN-4206 JN-4

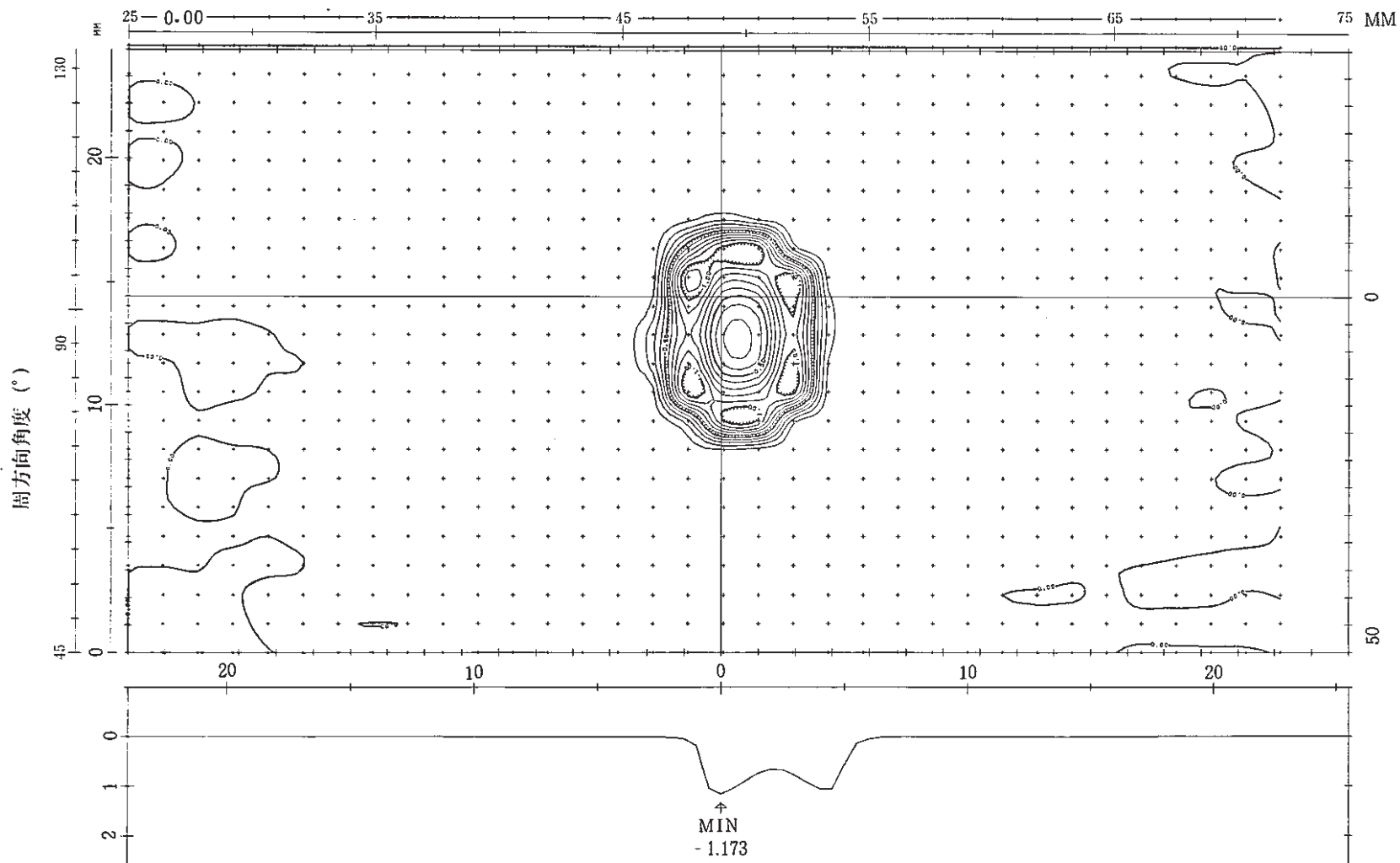
軸方向長さ (mm)



2-4 Wastage Map of Target Tube JN4 (Run-4206-①)

SWAT-2 RUN-4206 JN-5

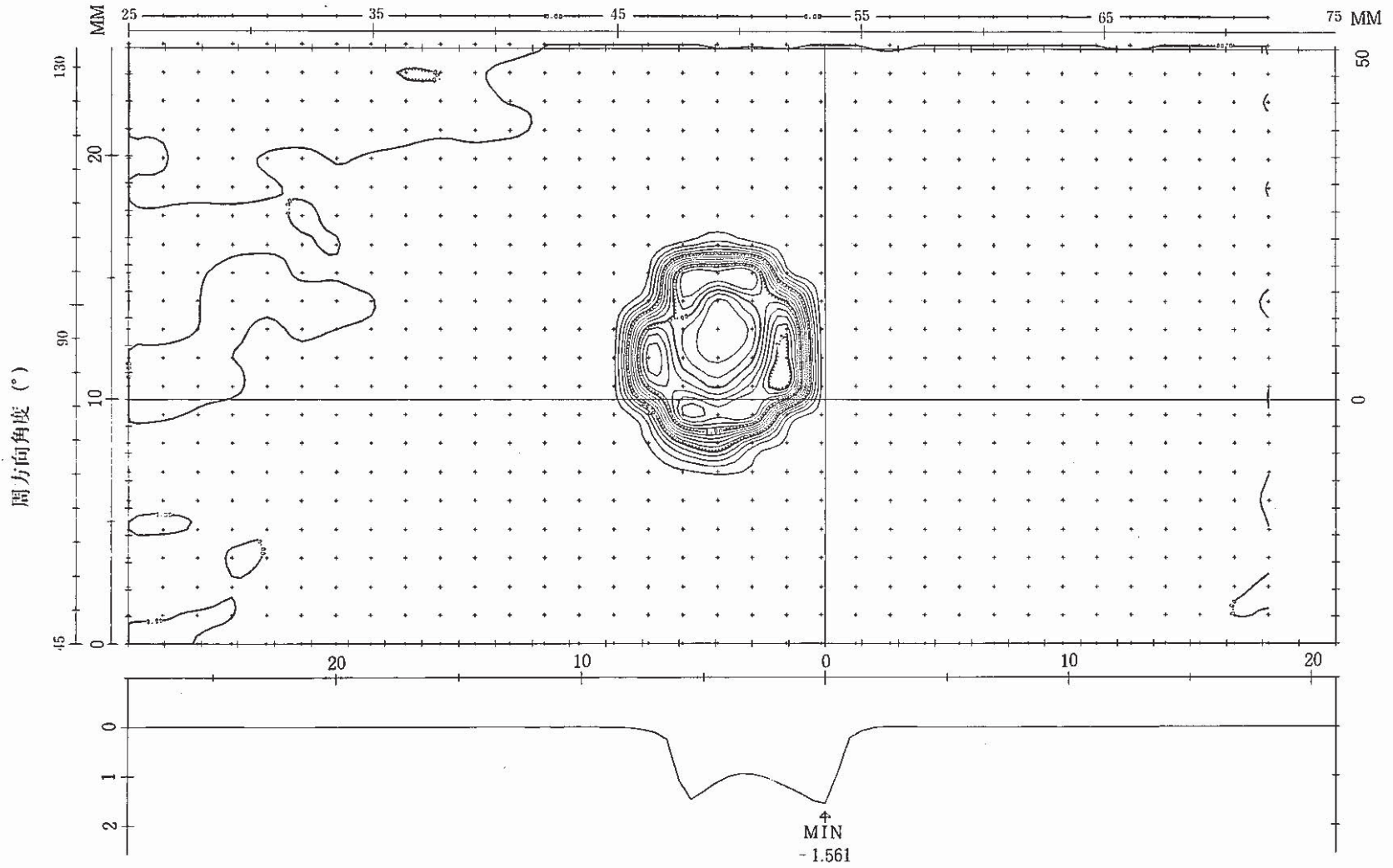
軸方向長さ (mm)



2-5 Wastage Map of Target Tube JN5 (Run-4206-①)

SWAT-2 RUN-4206 JN-6

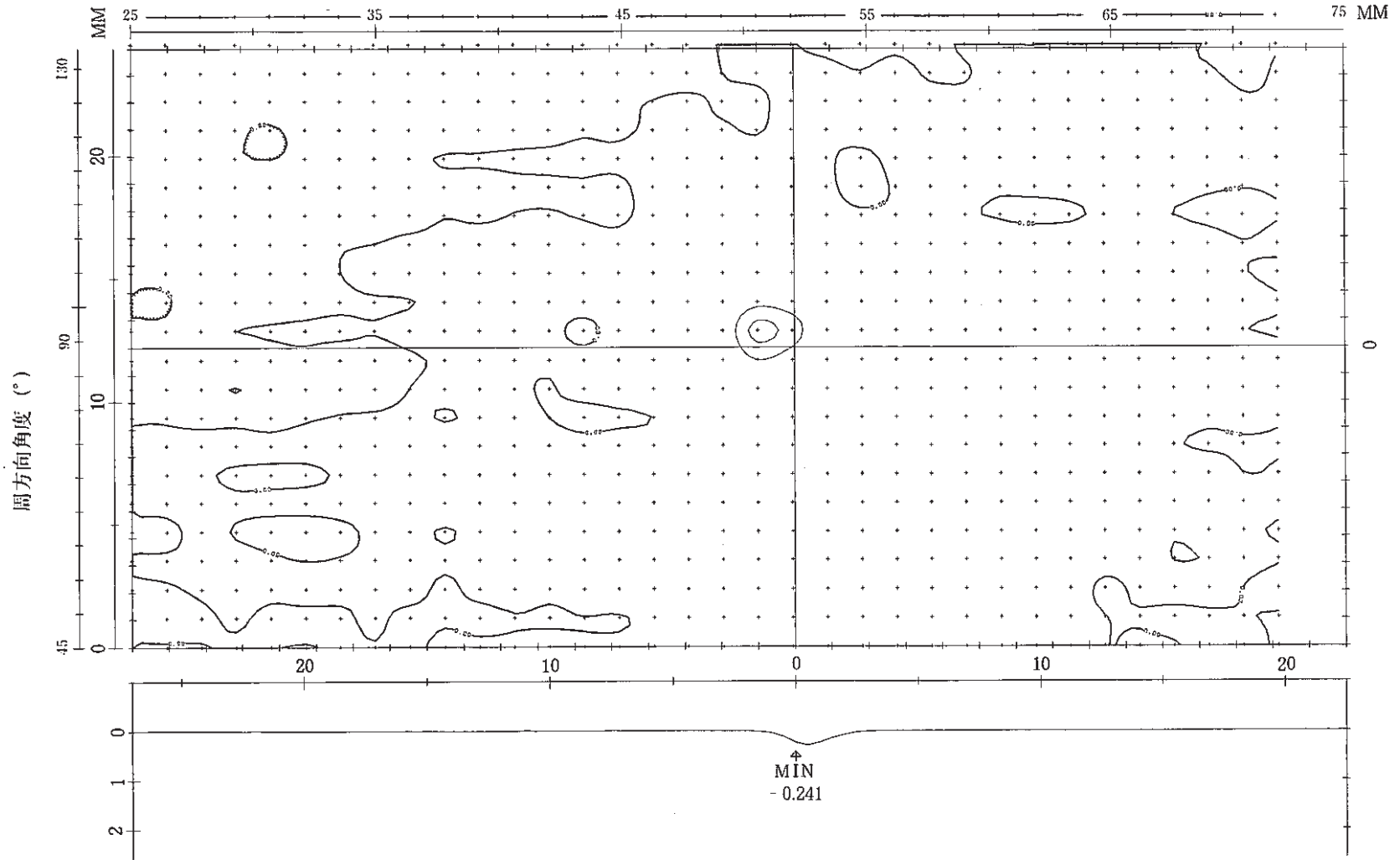
軸方向長さ (mm)



2-6 Wastage Map of Target Tube JN6 (Run-4206-①)

SWAT-2 RUN-4206 JN-8

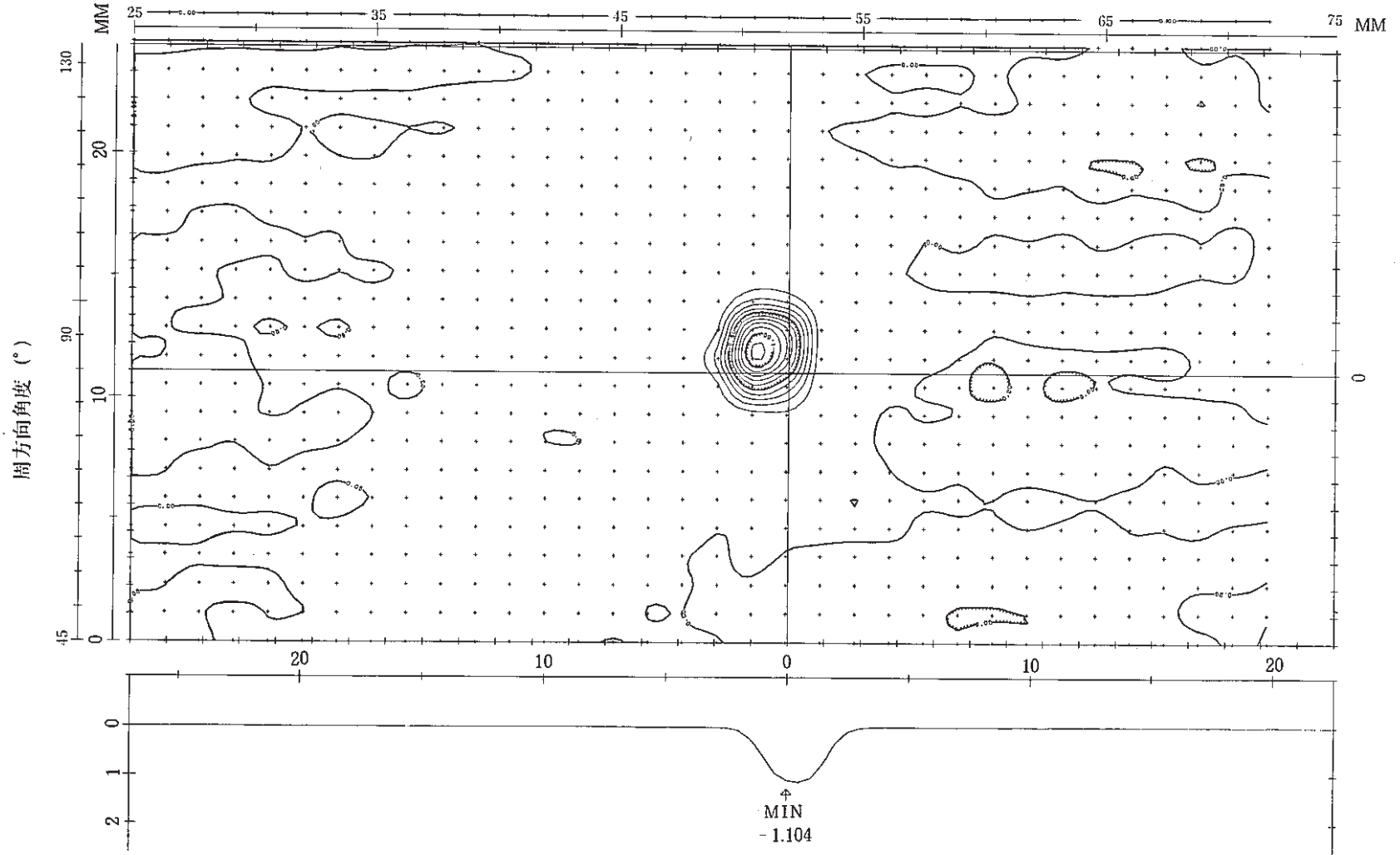
軸方向長さ (mm)



2-7 Wastage Map of Target Tube JN8 (Run-4206-2)

SWAT-2 RUN-4206 JN-9

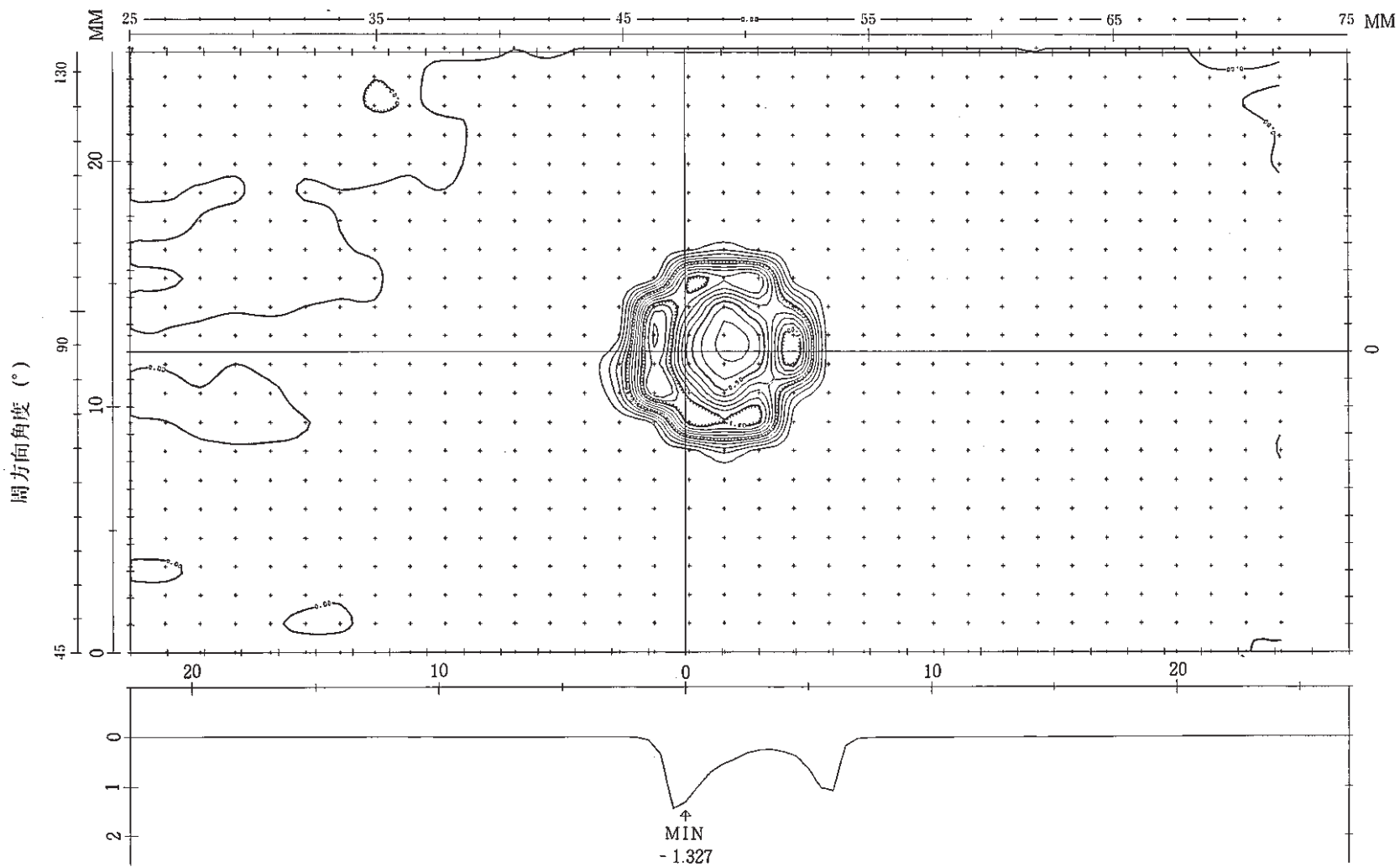
軸方向長さ (mm)



2-8 Wastage Map of Target Tube JN9 (Run-4206-②)

SWAT-2 RUN-4206 JN-10

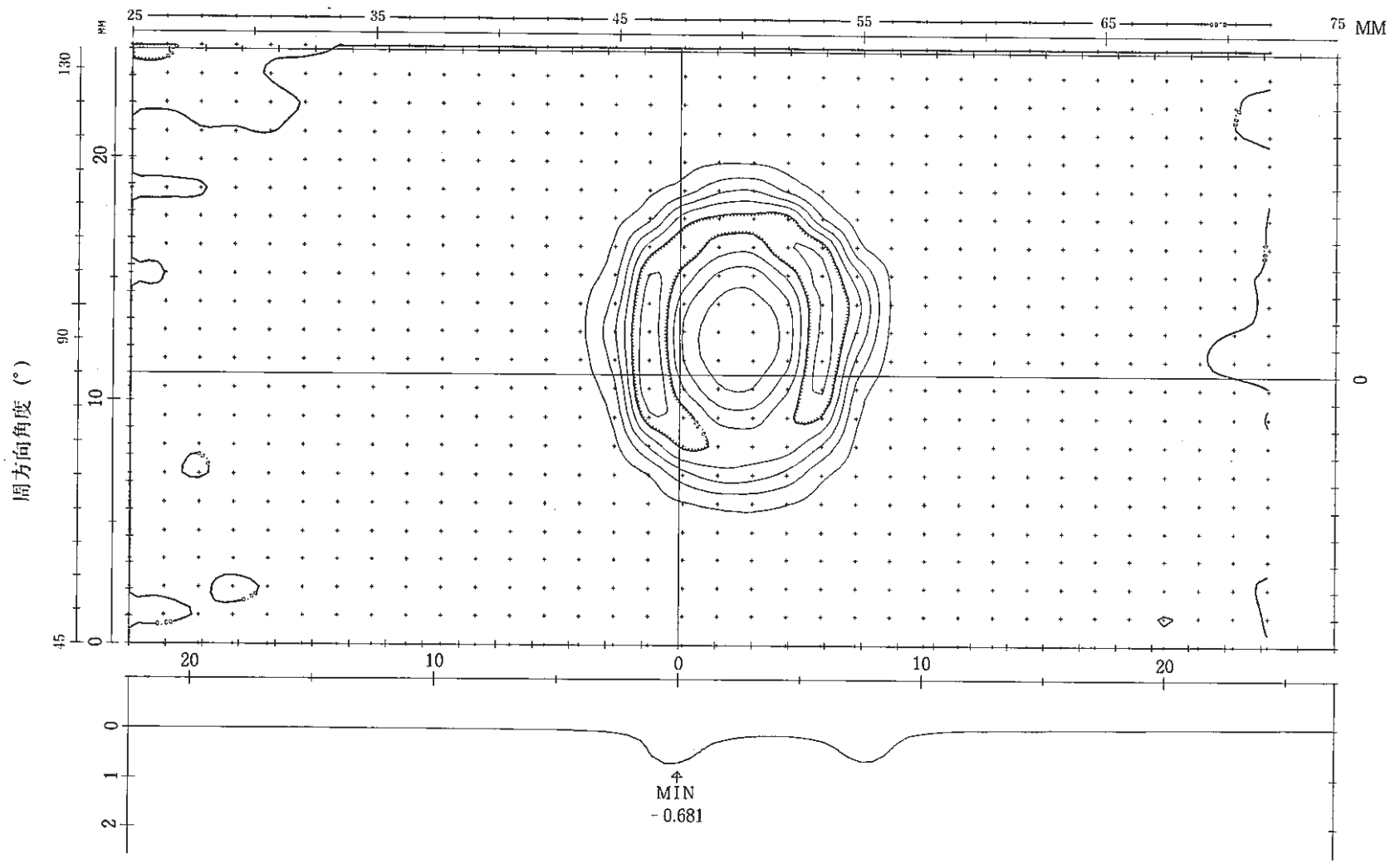
軸方向長さ (mm)



2-9 Wastage Map of Target Tube JN10 (Run-4206-②)

SWAT-2 RUN-4206 JN-11

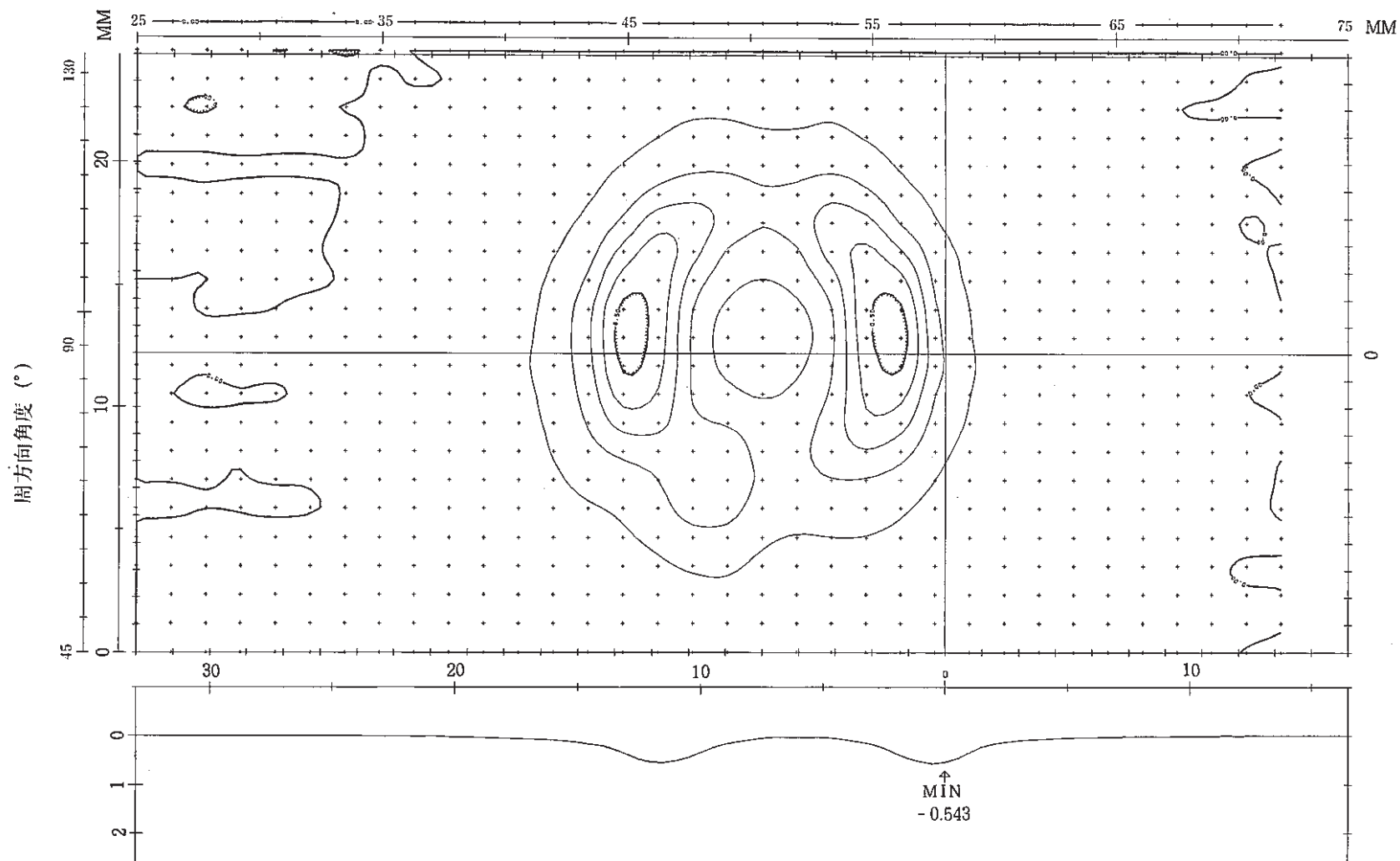
軸方向長さ (mm)



2-10 Wastage Map of Target Tube JN11 (Run-4206-②)

SWAT-2 RUN-4206 JN-12

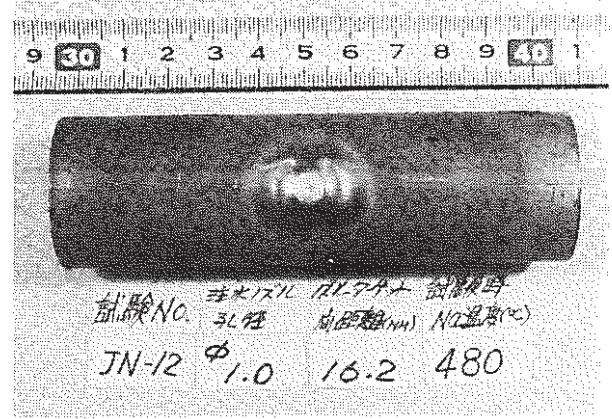
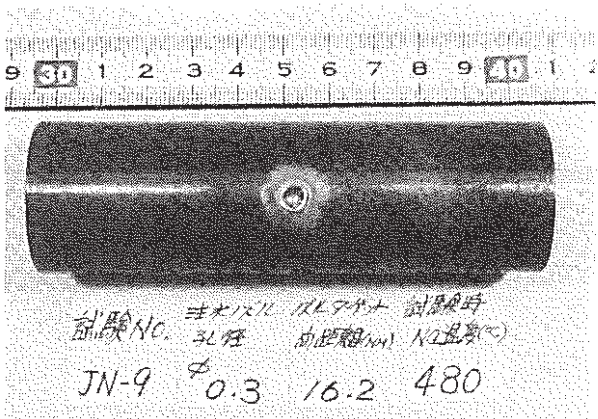
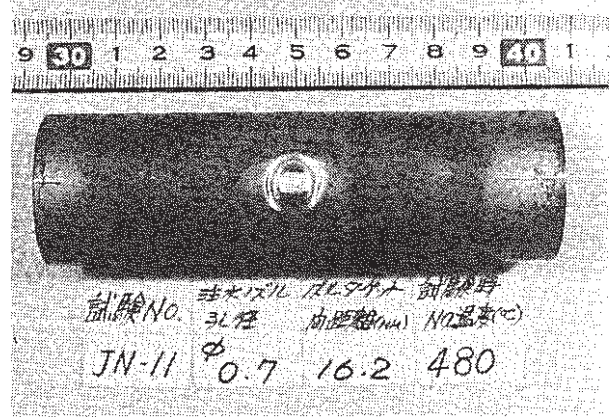
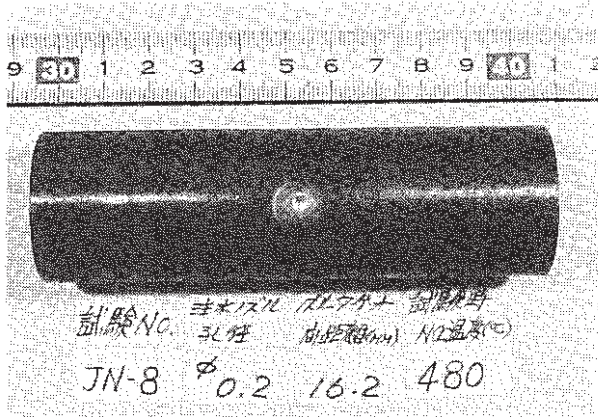
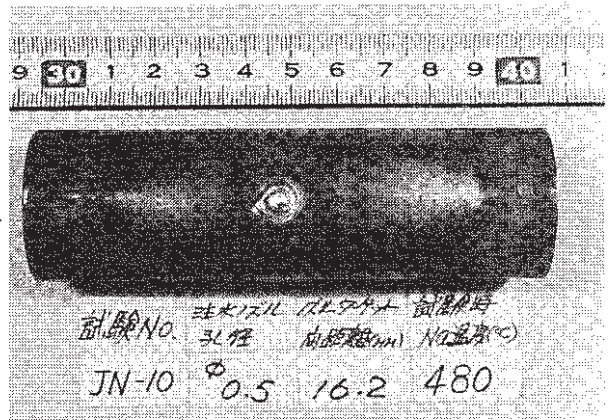
軸方向長さ (mm)



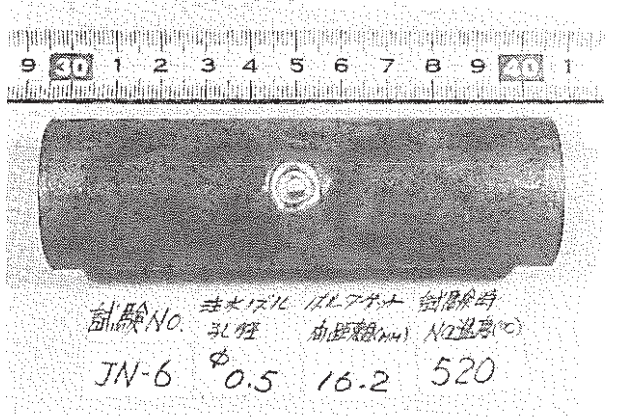
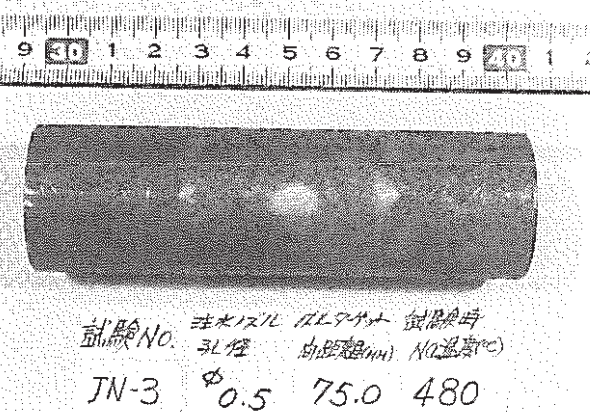
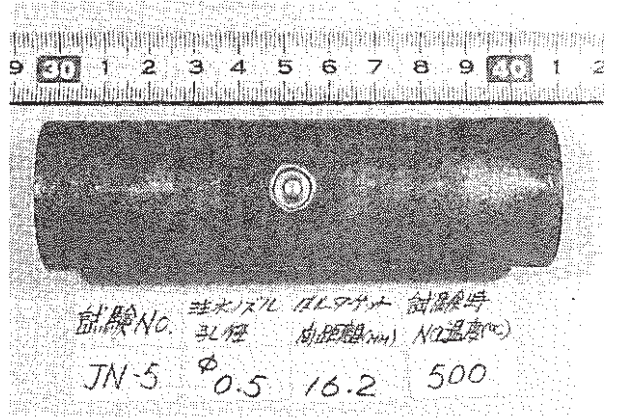
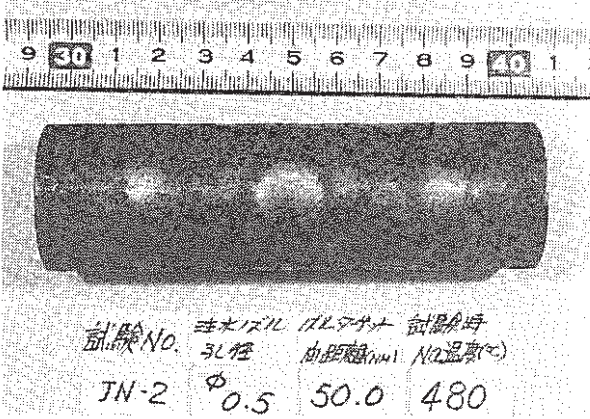
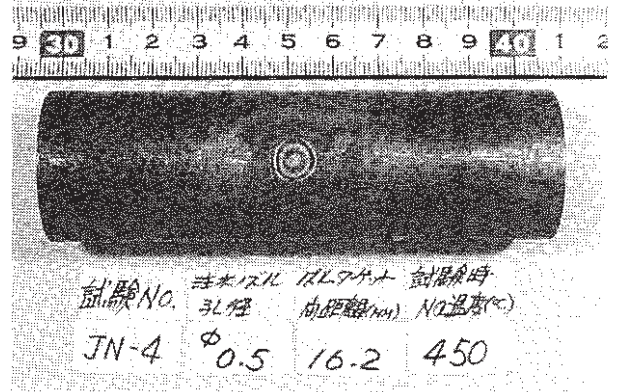
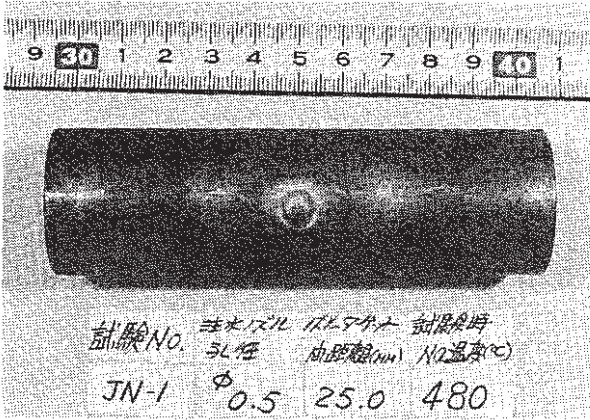
2-11 Wastage Map of Target Tube JN12 (Run-4206-②)

A p p e n d i x 3.

SWAT-2, Run-4206-①, Run-4206-②, Photograph of Target Tubes



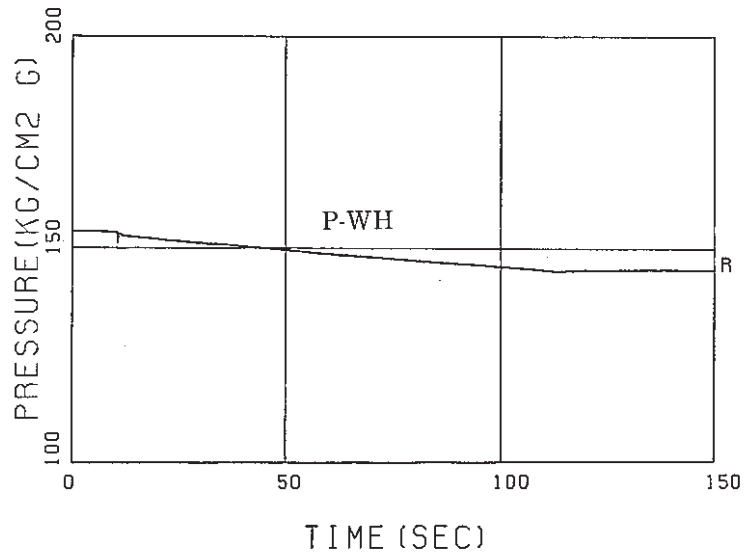
3-1 Wastage of Target Tubes Run-4206-②



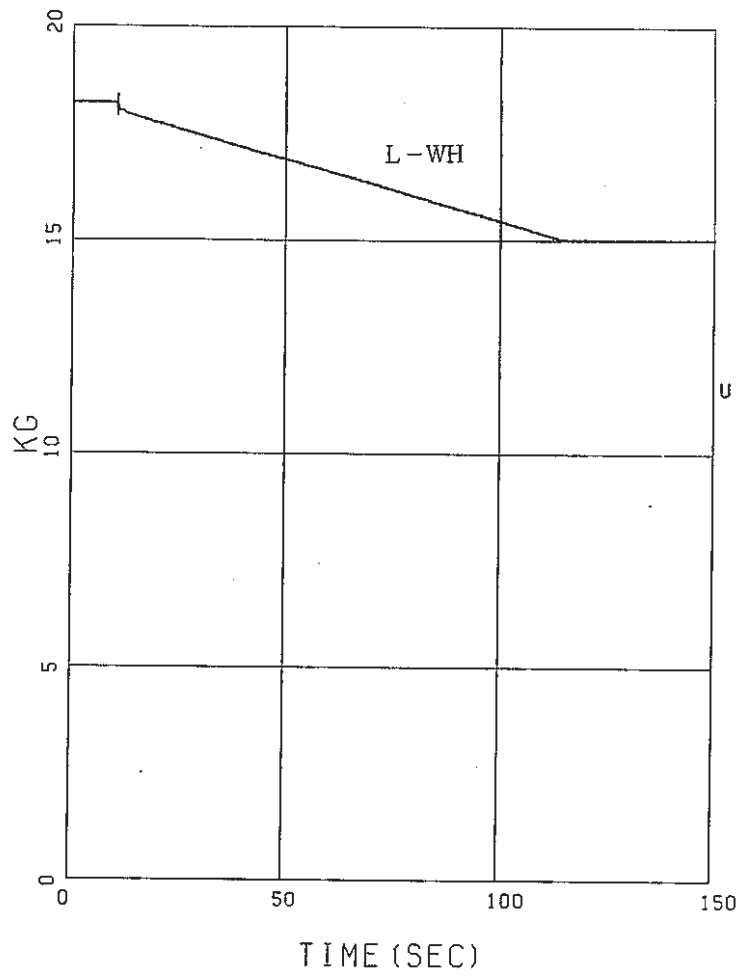
3-2 Wastage of Target Tubes Run-4206-①

A p p e n d i x 4.

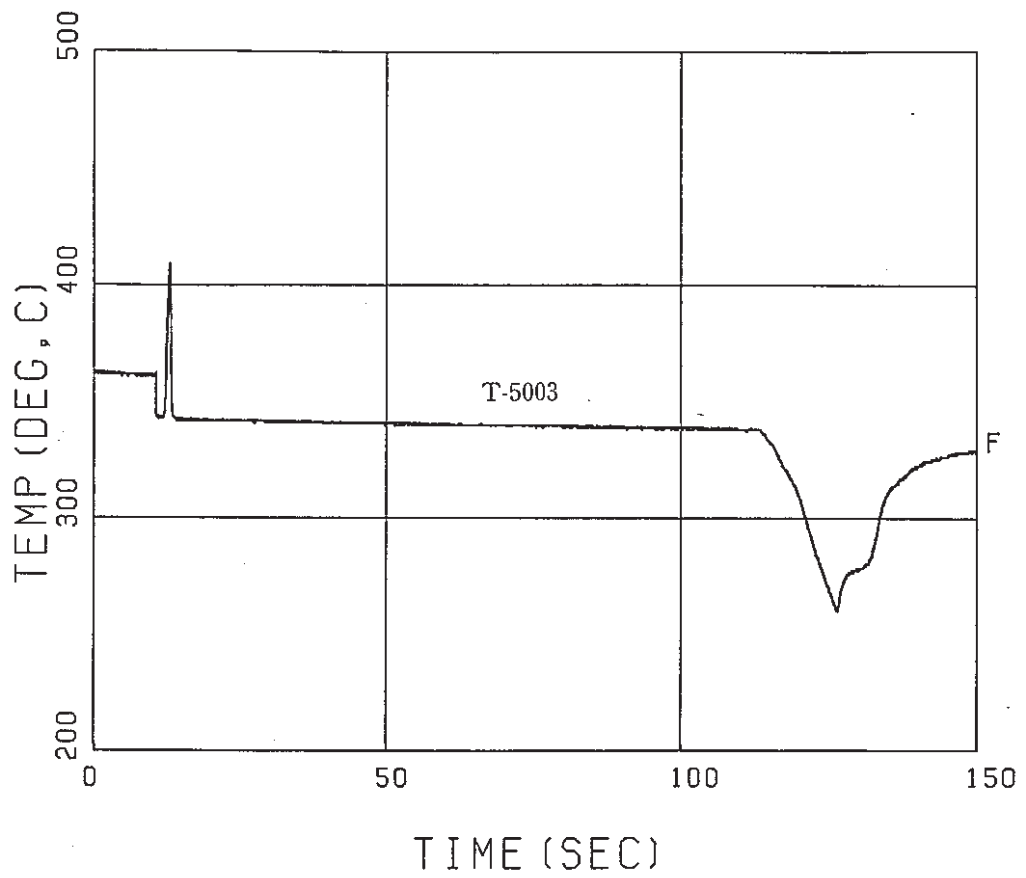
Test Results of Run-4117



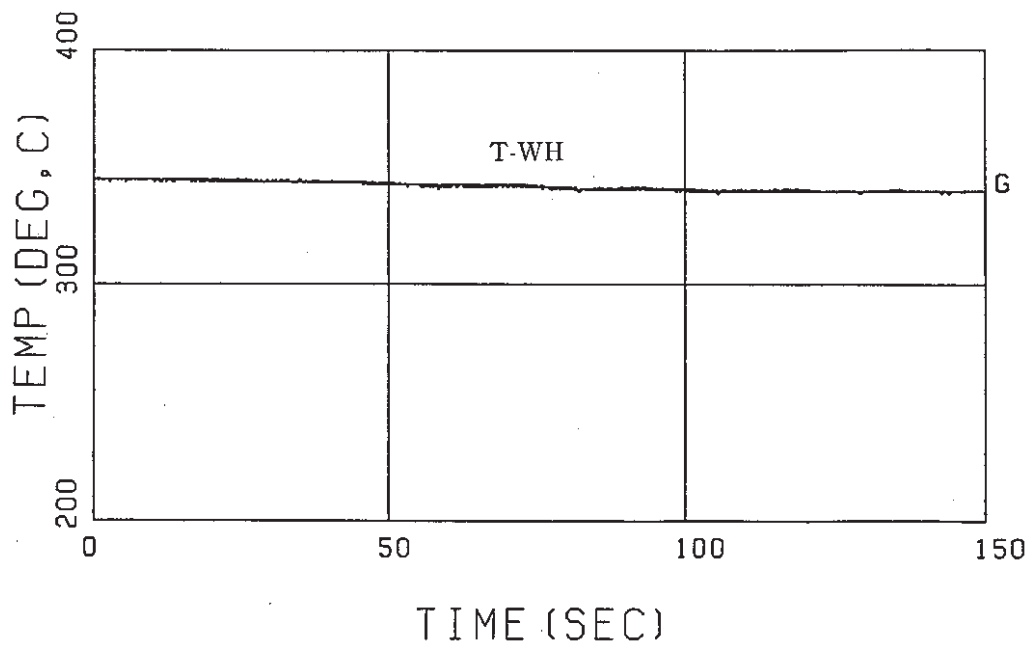
4-1 Water Heater Pressure



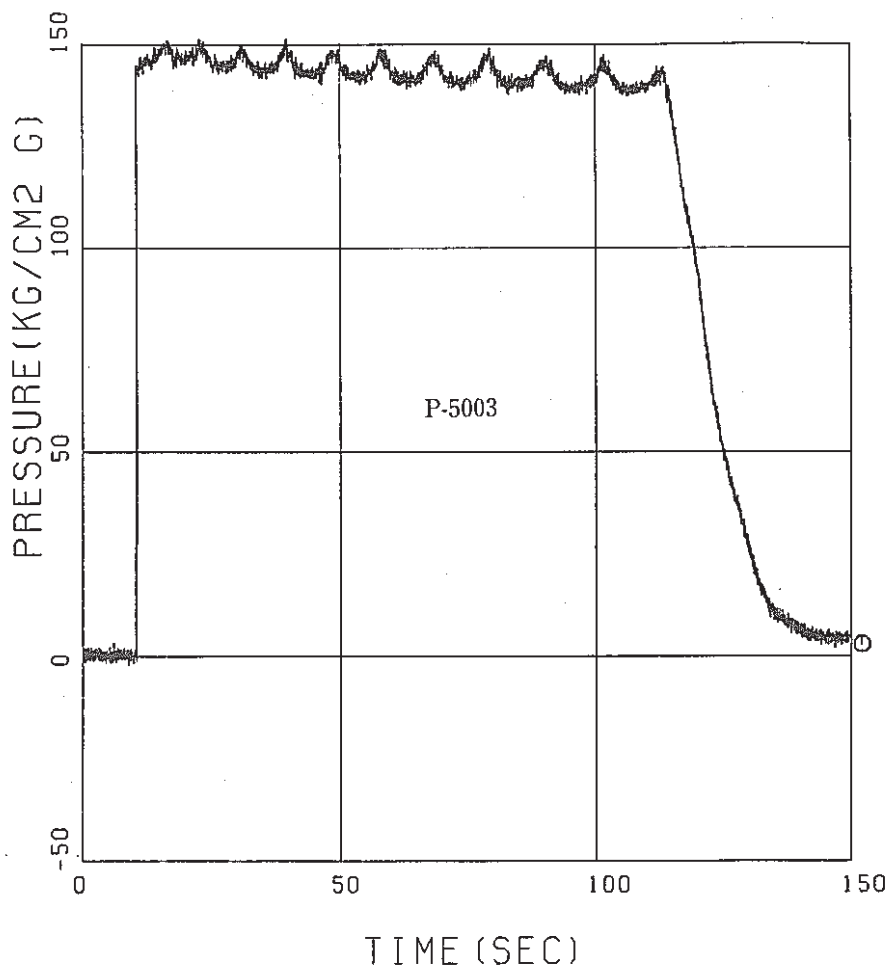
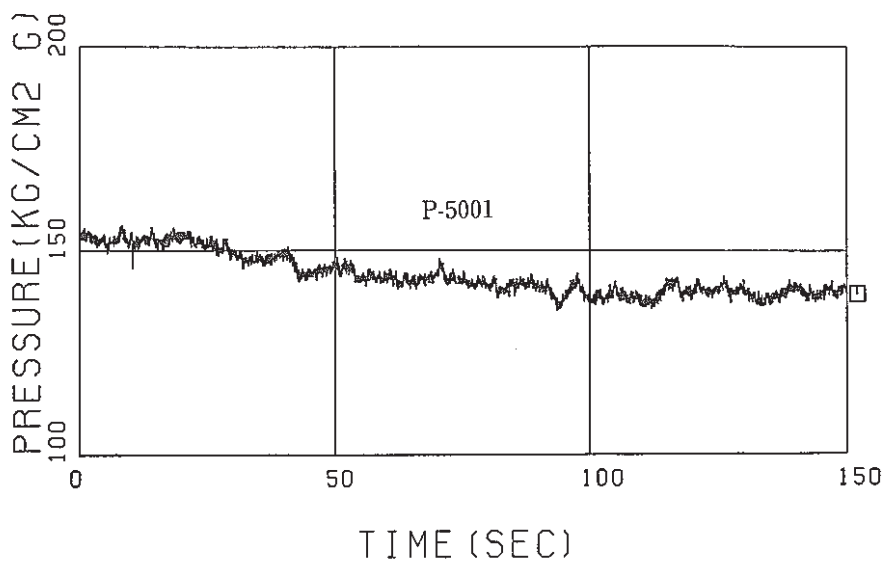
4-2 Water Heater Inventory



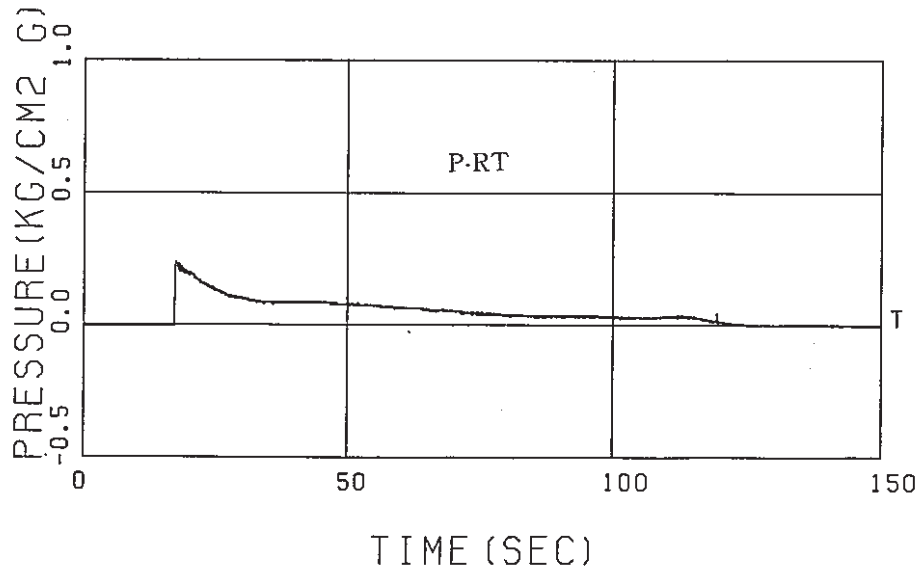
4-3 Water Injecting Line Temperature



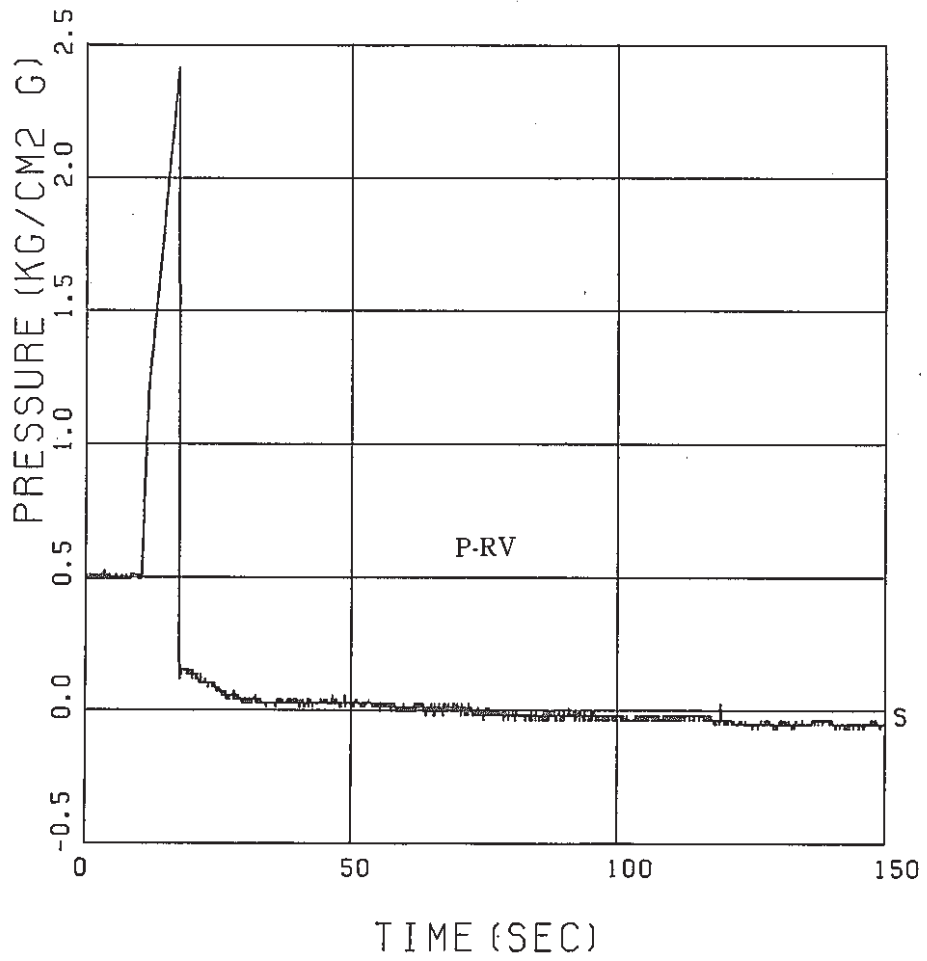
4-4 Water Heater Temperature



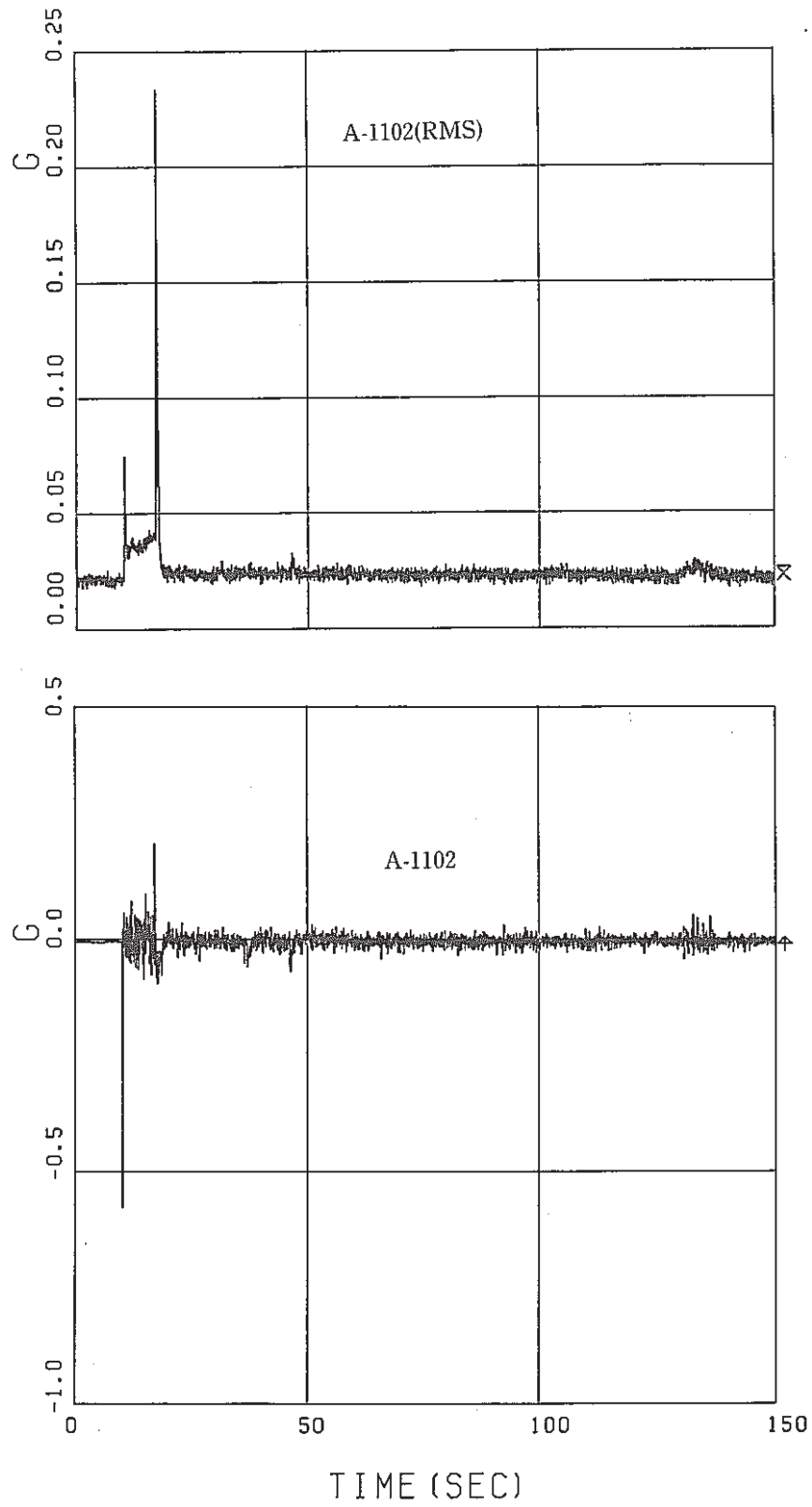
4-5 Water Injecting Line Pressure



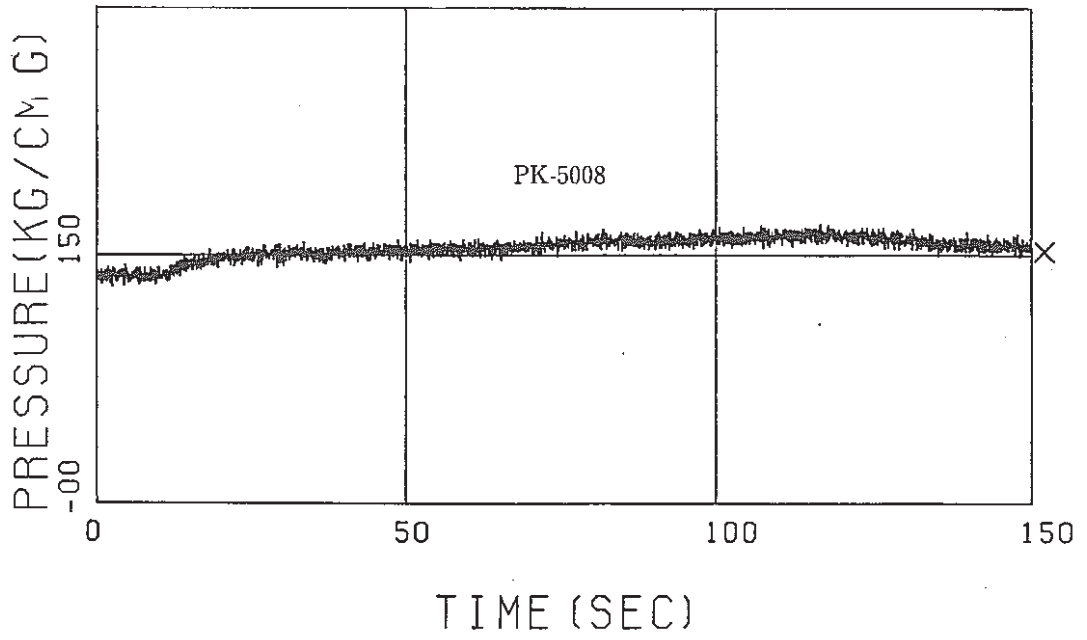
4-6 Pressure of Reaction Product Tank



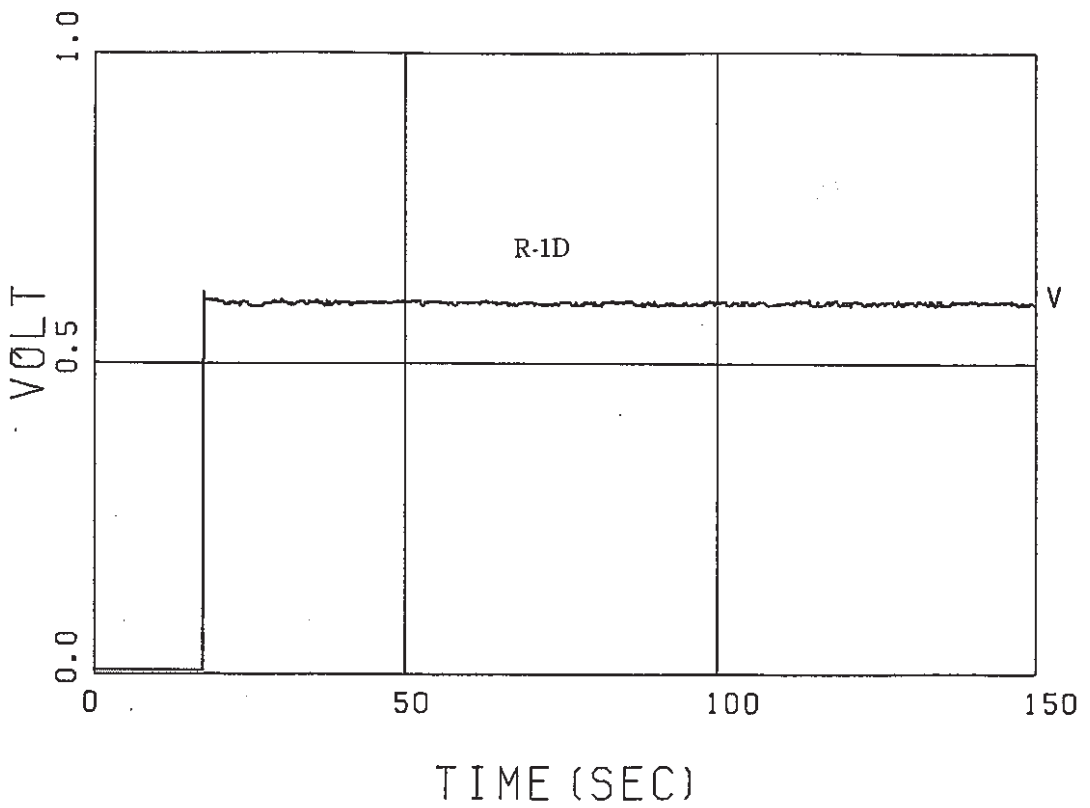
4-7 Pressure of Reaction Vessel



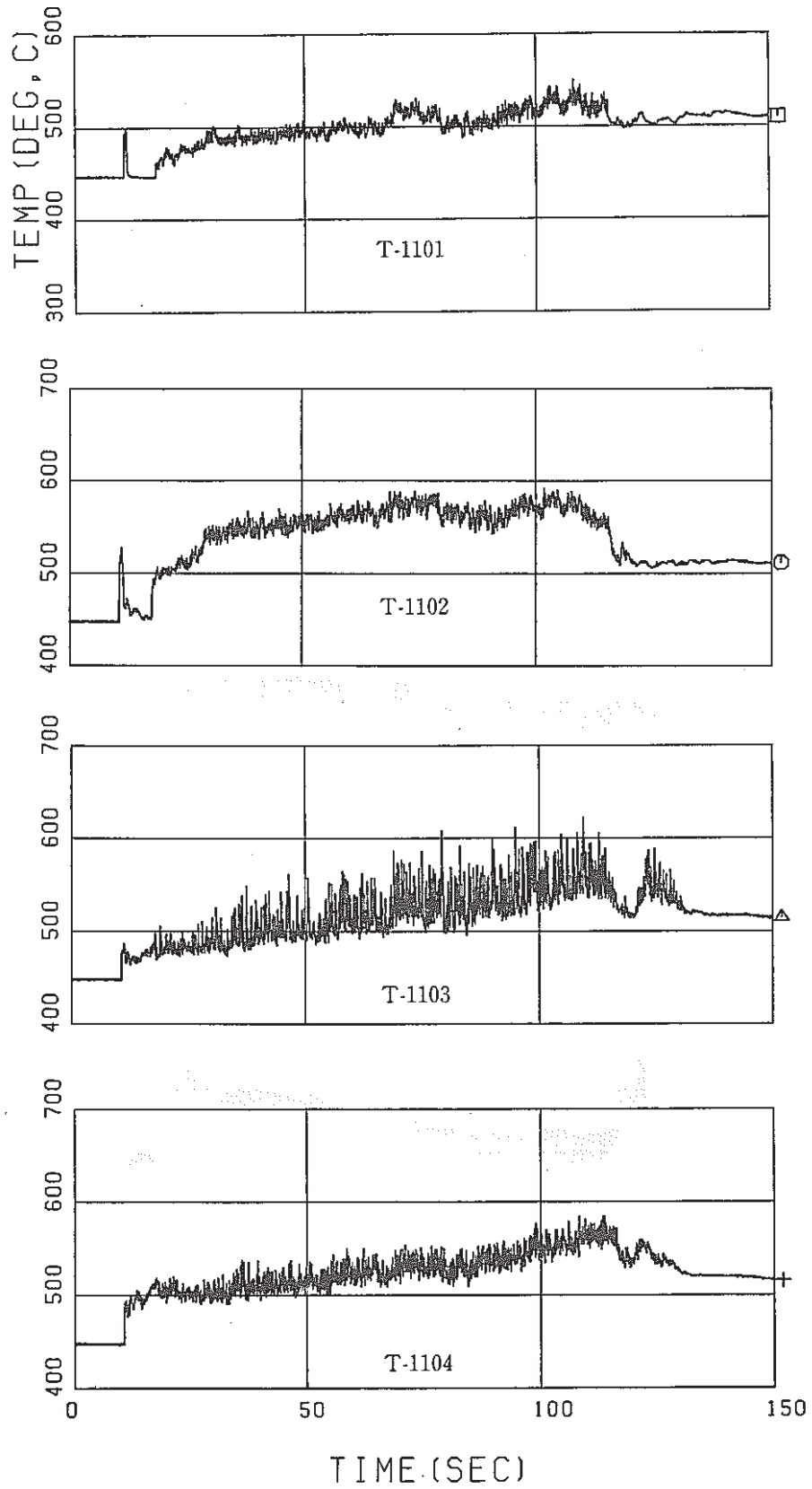
4-8 Acceleration of Reaction Vessel



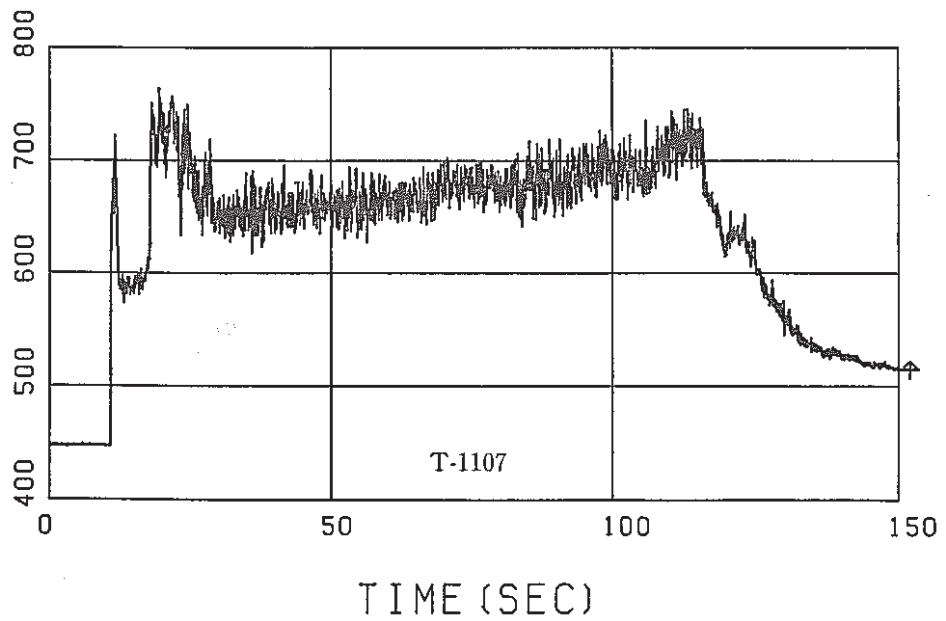
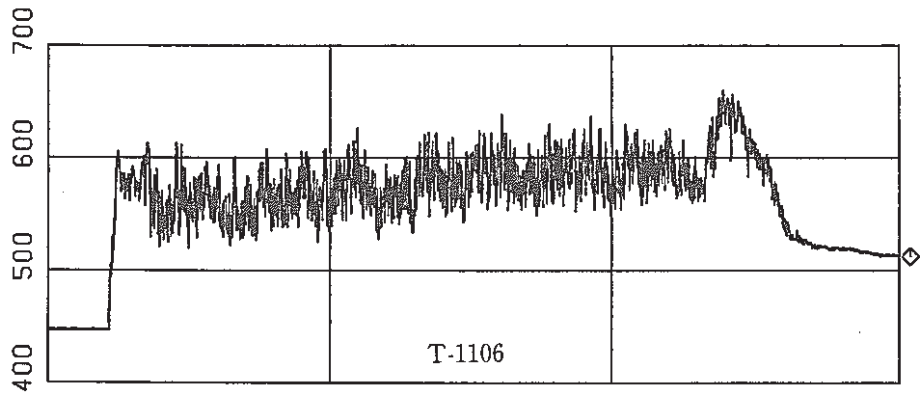
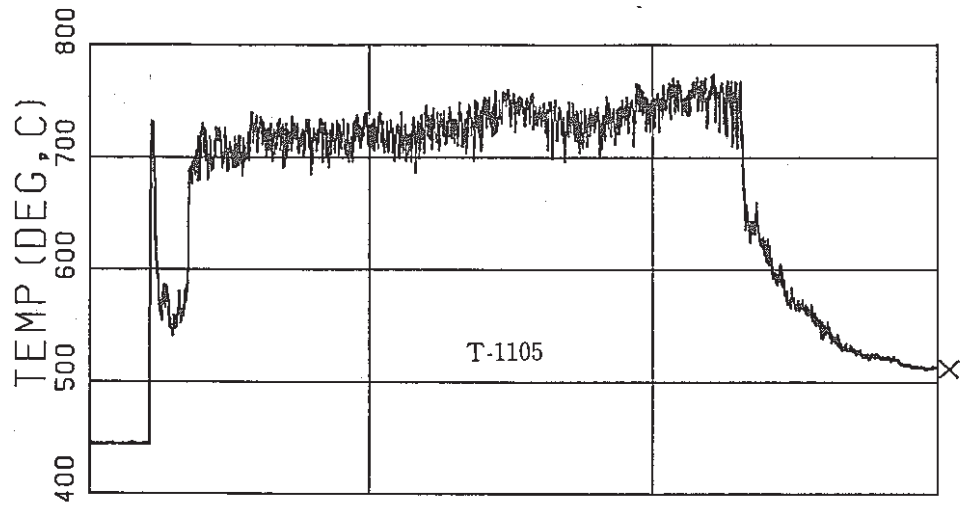
4-9 Pressure of Gas-filled Tube (No. 8 and No. 9)



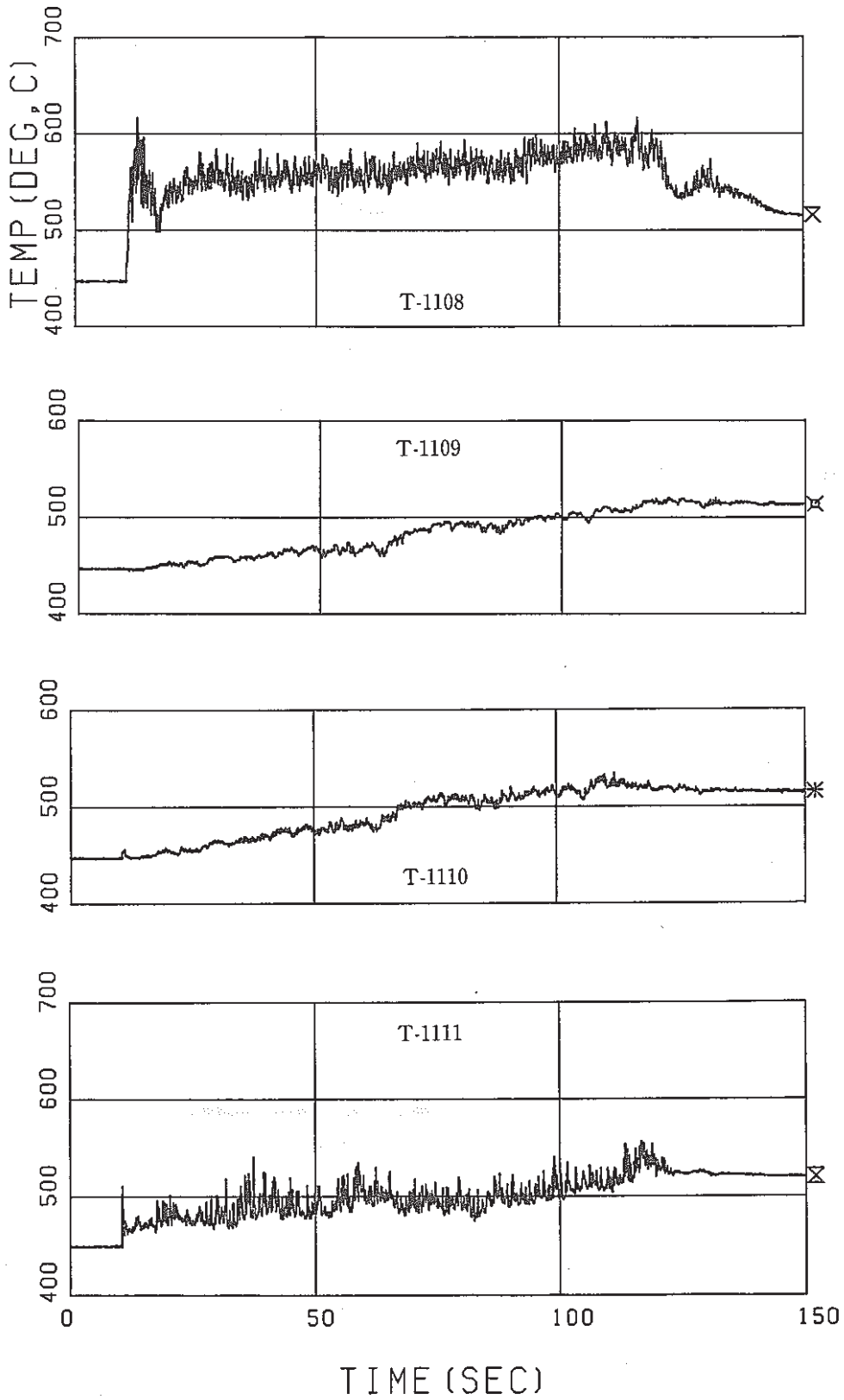
4-10 Rupture Disk Bursting Signal



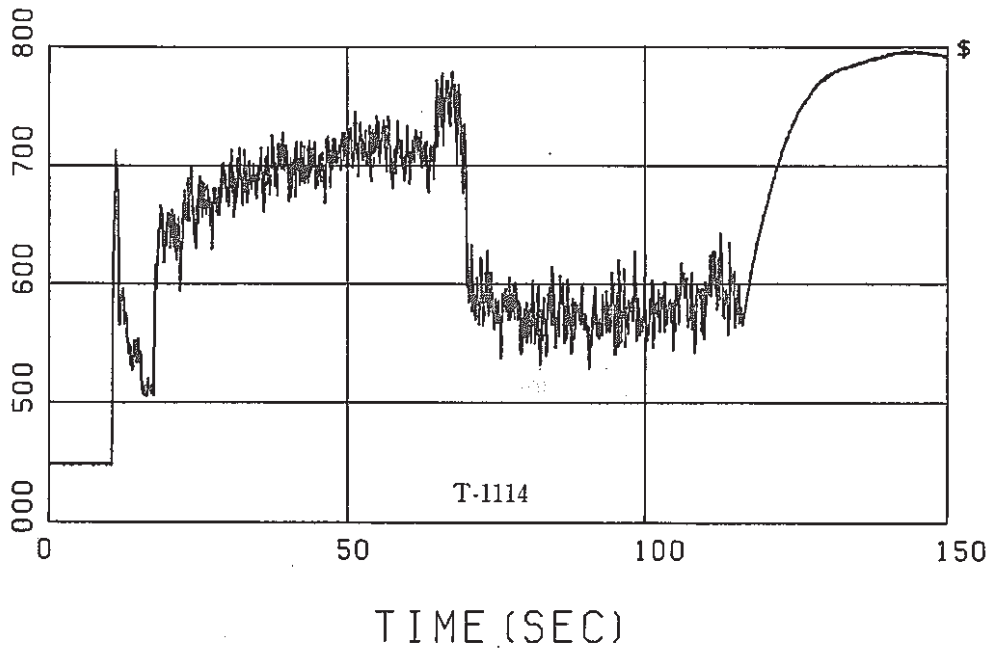
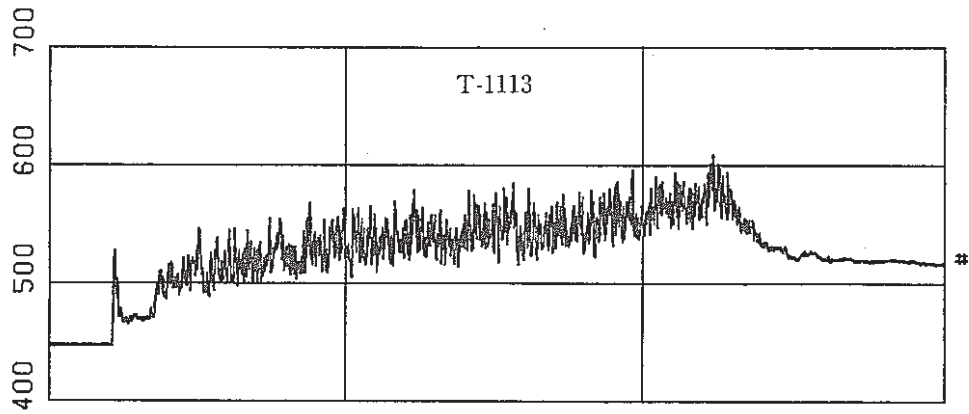
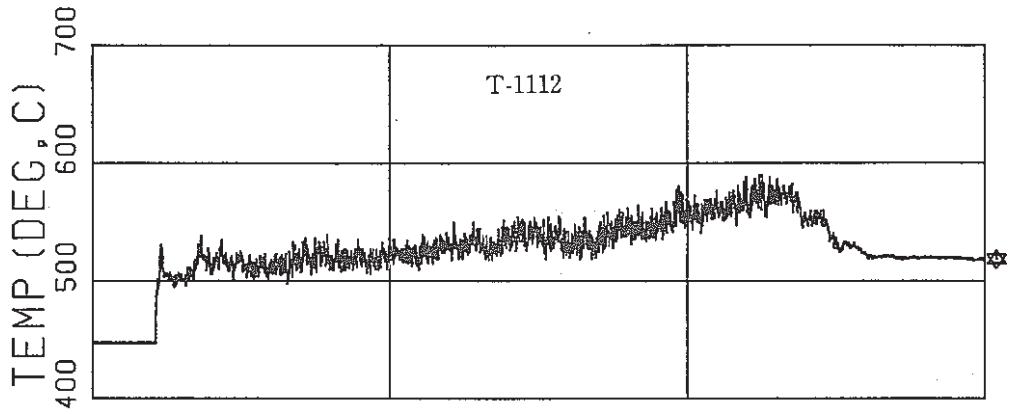
4-11 (a) Temperatures of Tube Bundle Region



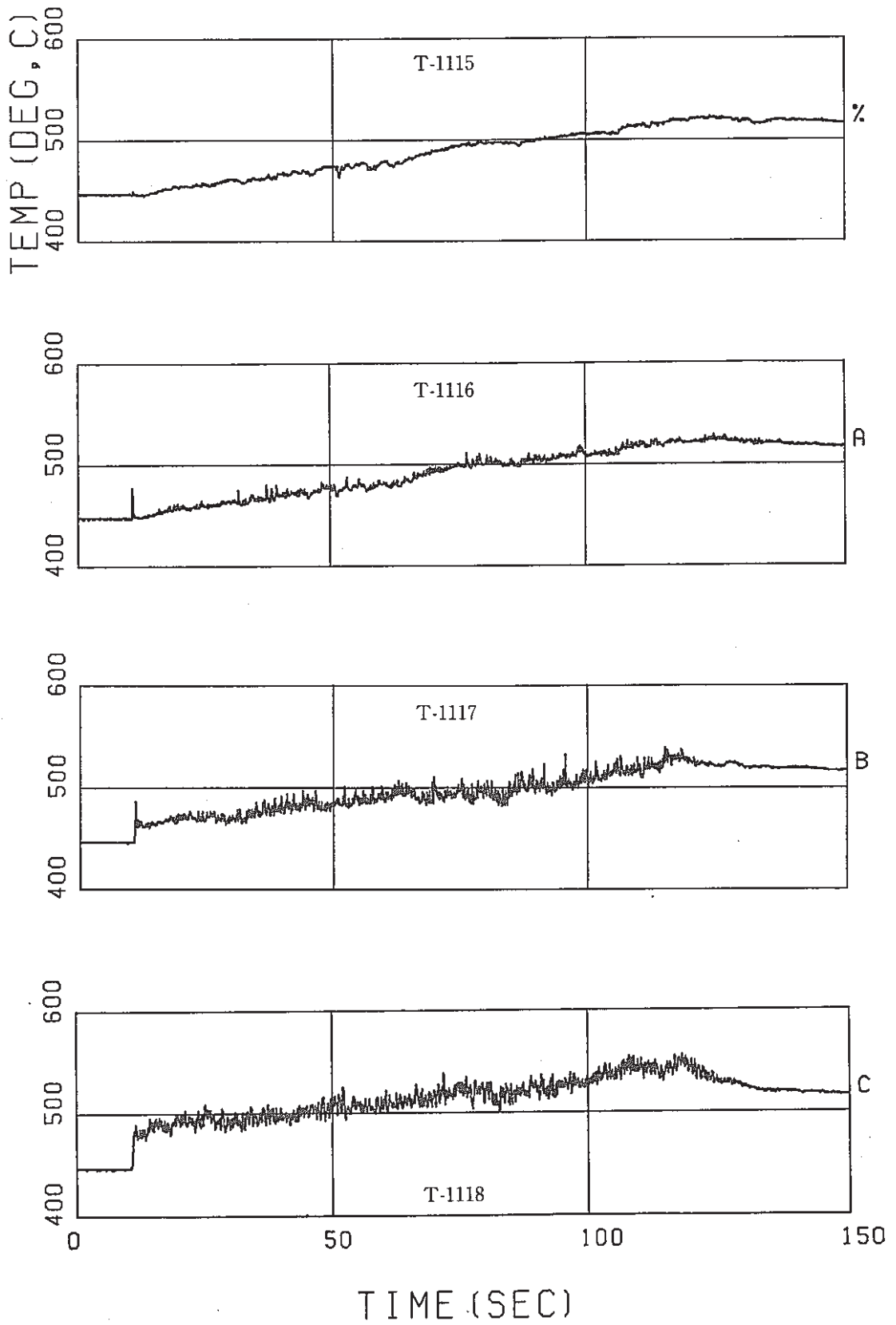
4-11 (b) Temperatures of Tube Bundle Region



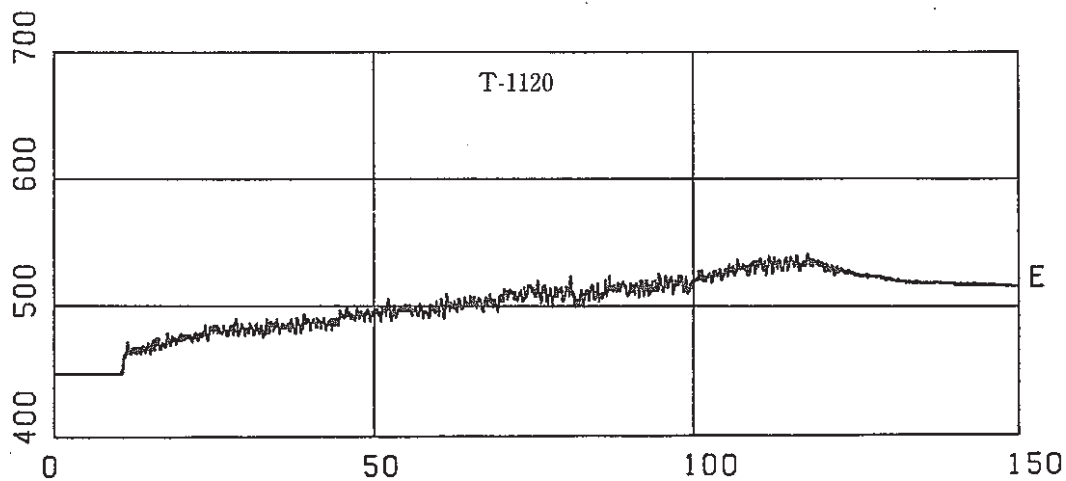
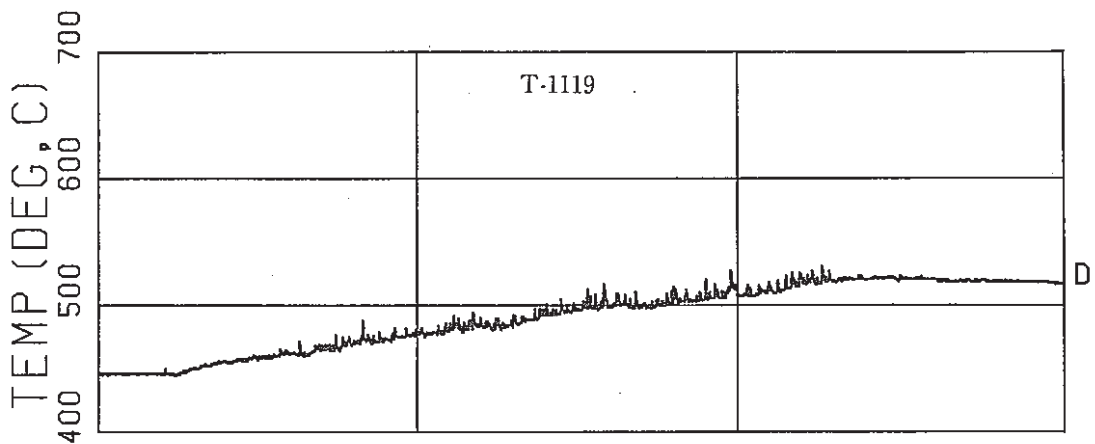
4-11 (c) Temperatures of Tube Bundle Region



4-11 (d) Temperatures of Tube Bundle Region



4-11 (e) Temperatures of Tube Bundle Region

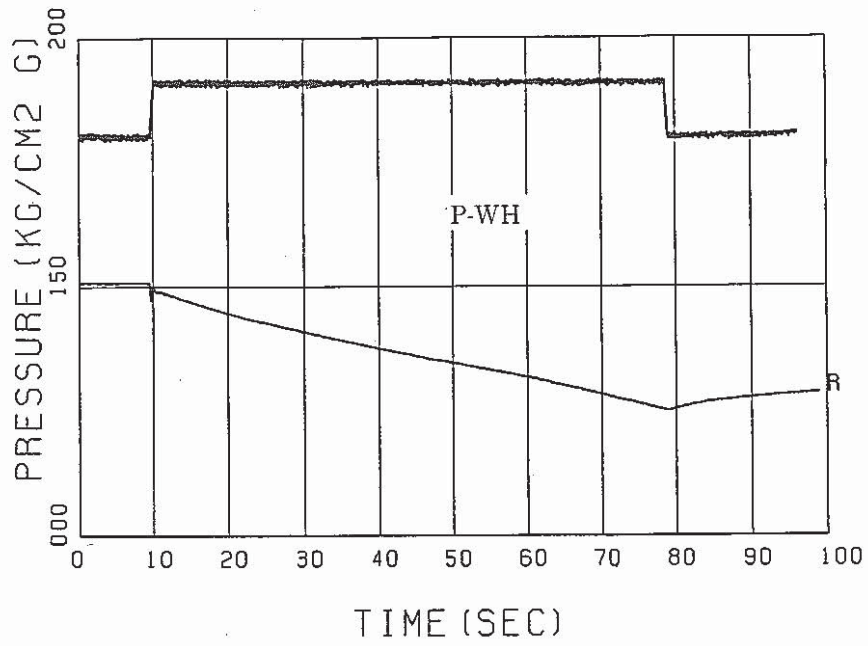


TIME (SEC)

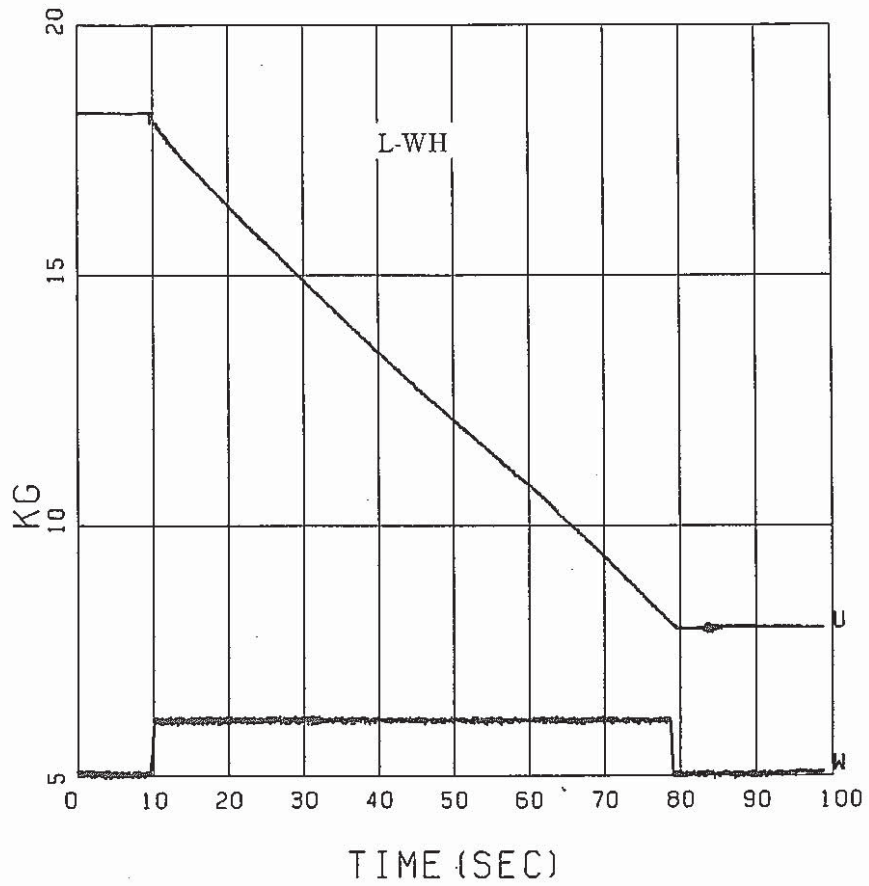
4-11 (f) Temperatures of Tube Bundle Region

A p p e n d i x 5.

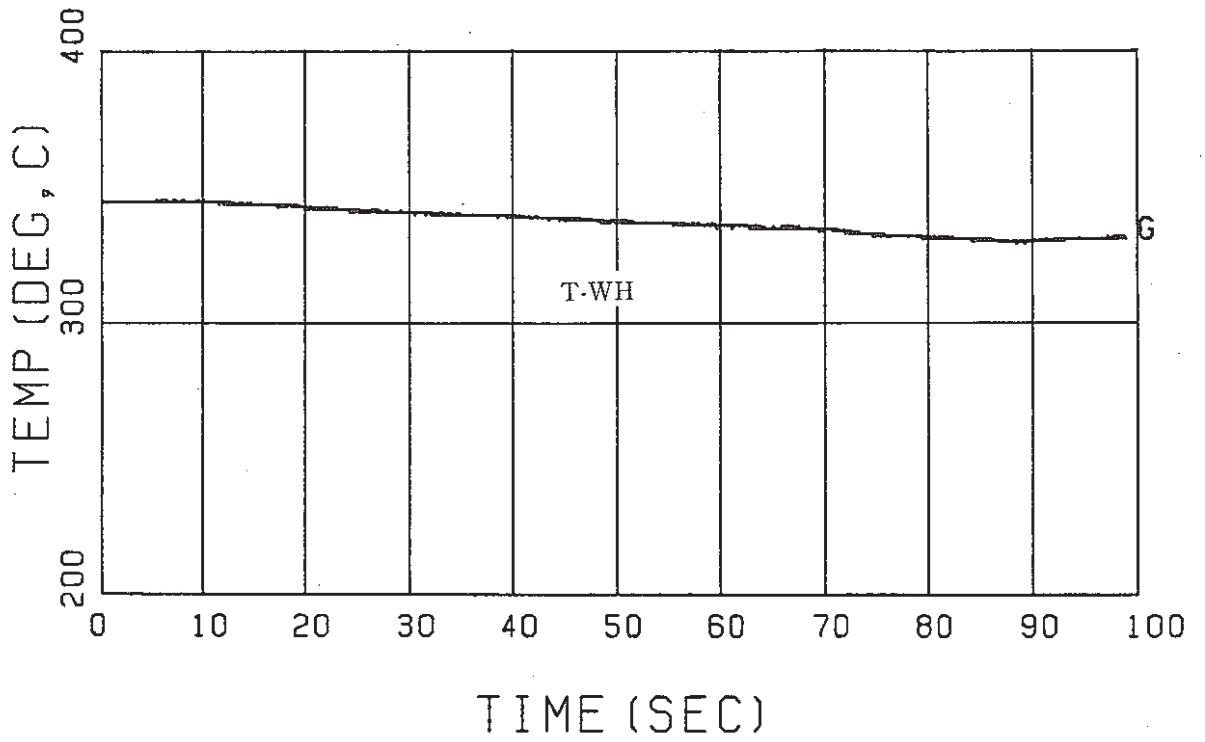
Test Results of Run-4118



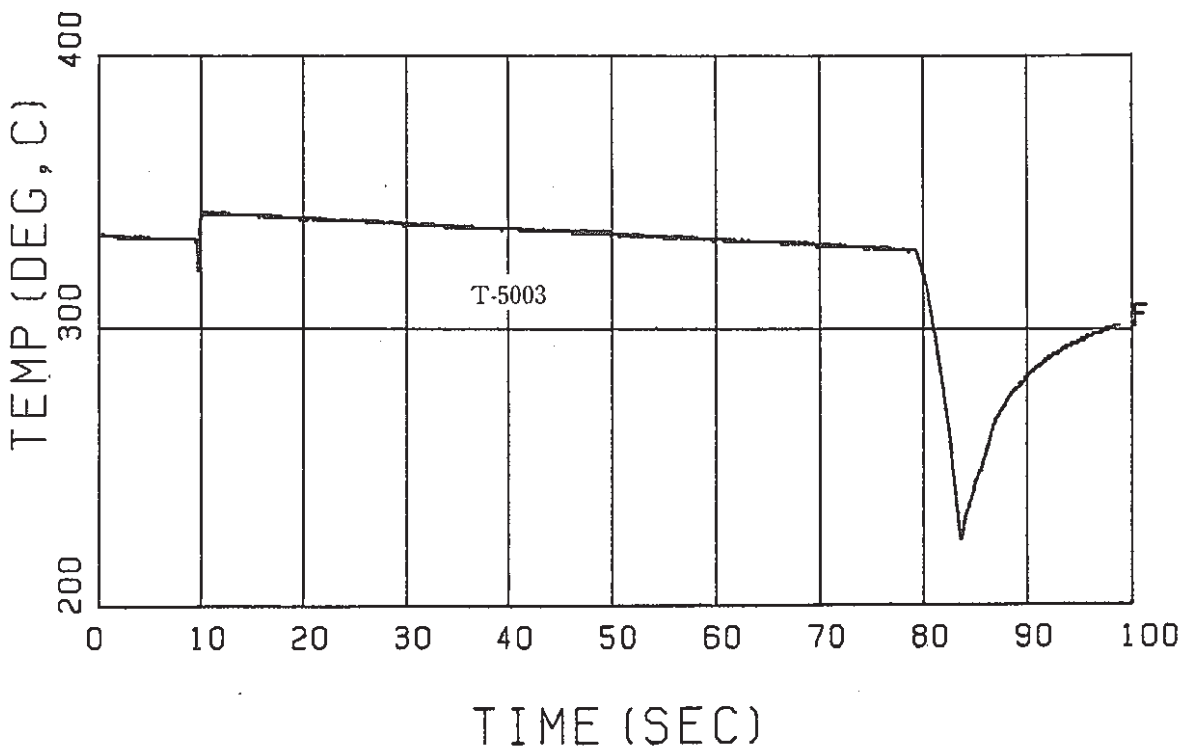
5-1 Water Heater Pressure



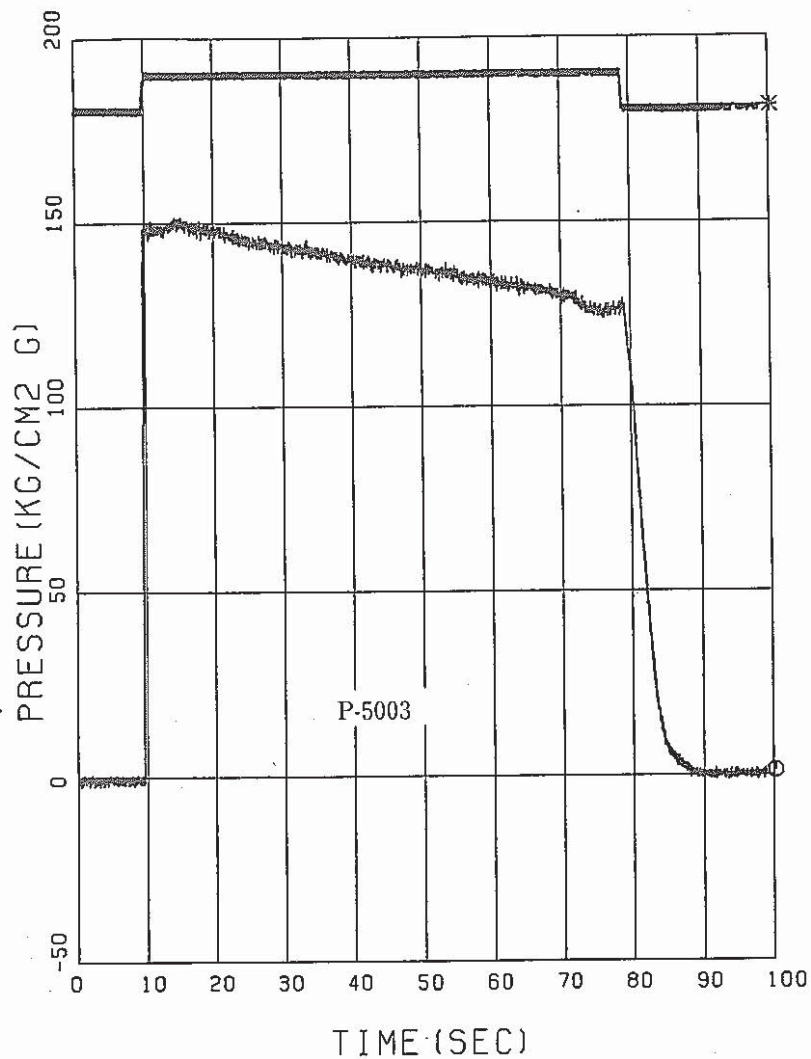
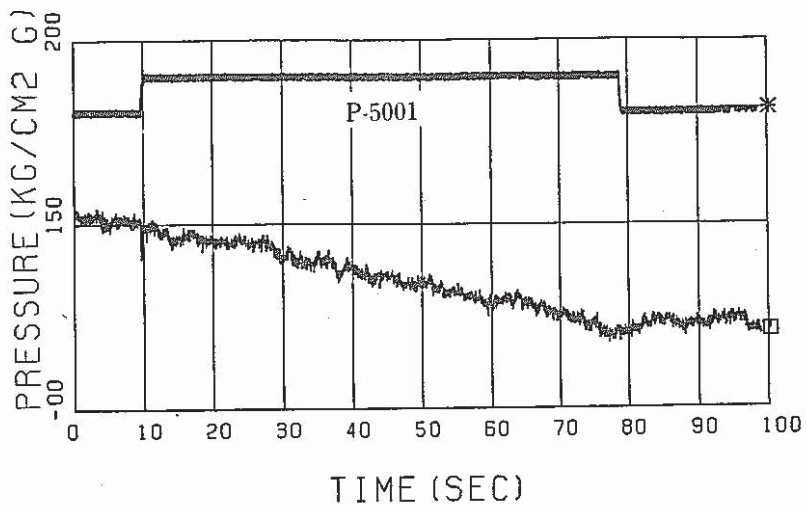
5-2 Water Heater Inventory



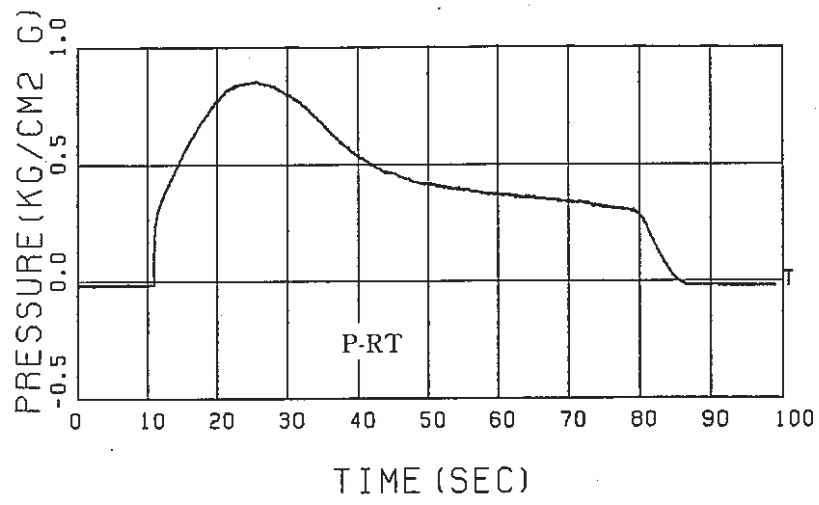
5-3 Water Heater Temperature



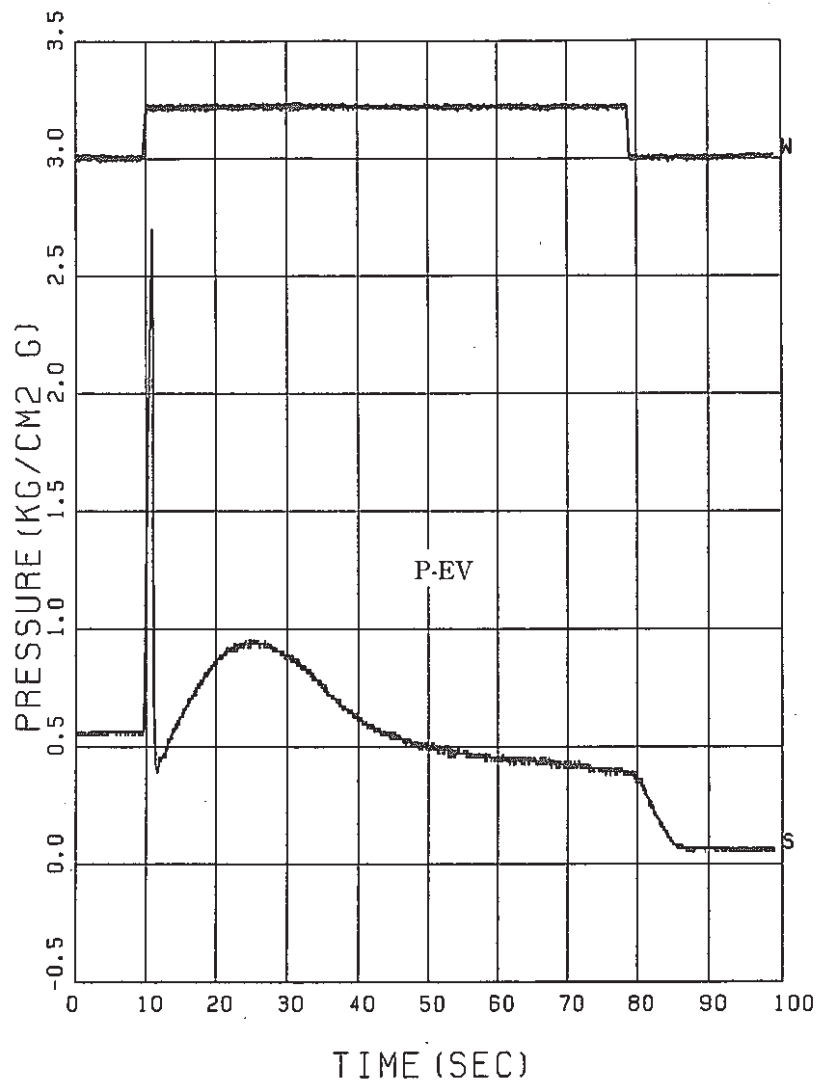
5-4 Water Injecting Line Temperature



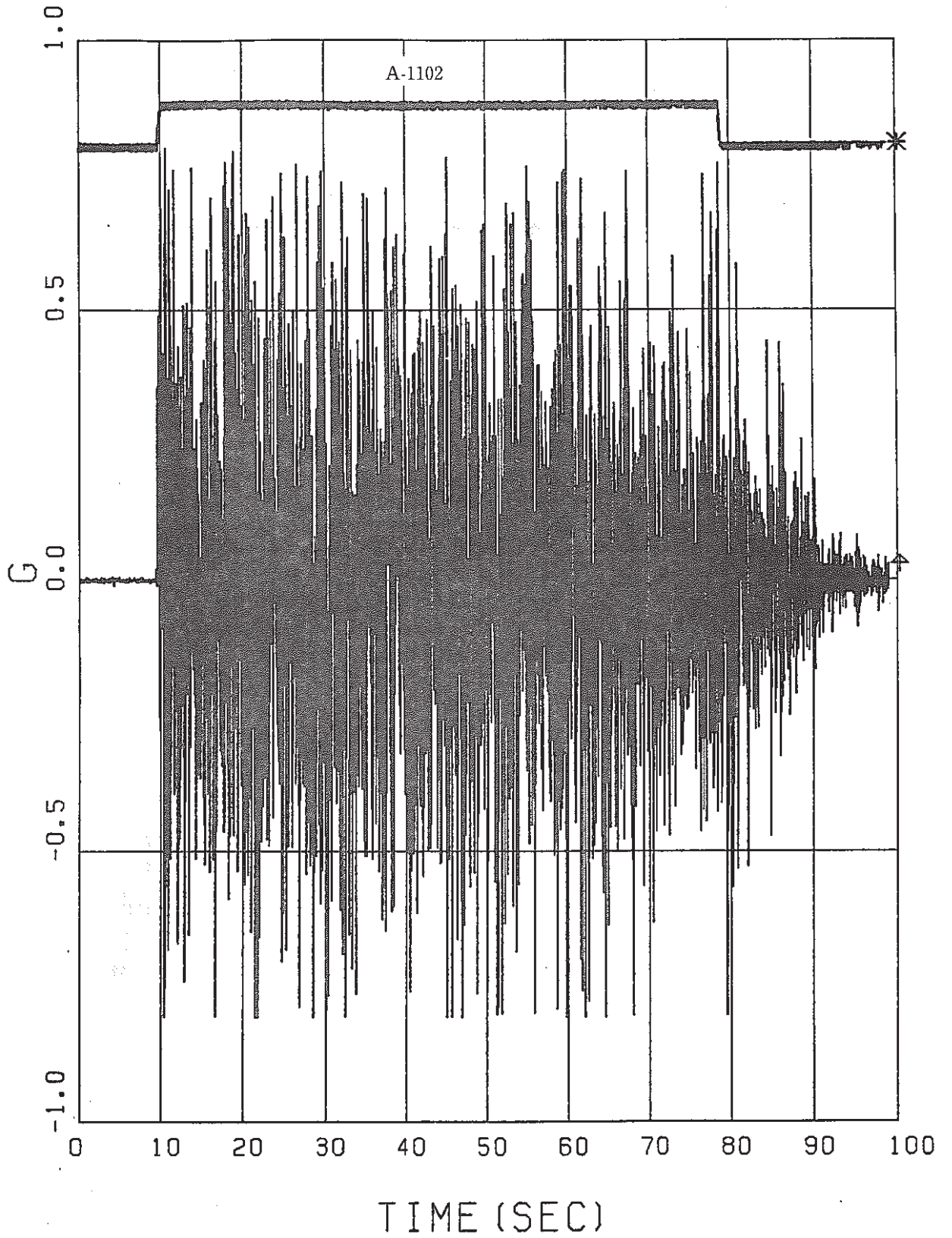
5-5 Water Injecting Line Pressures



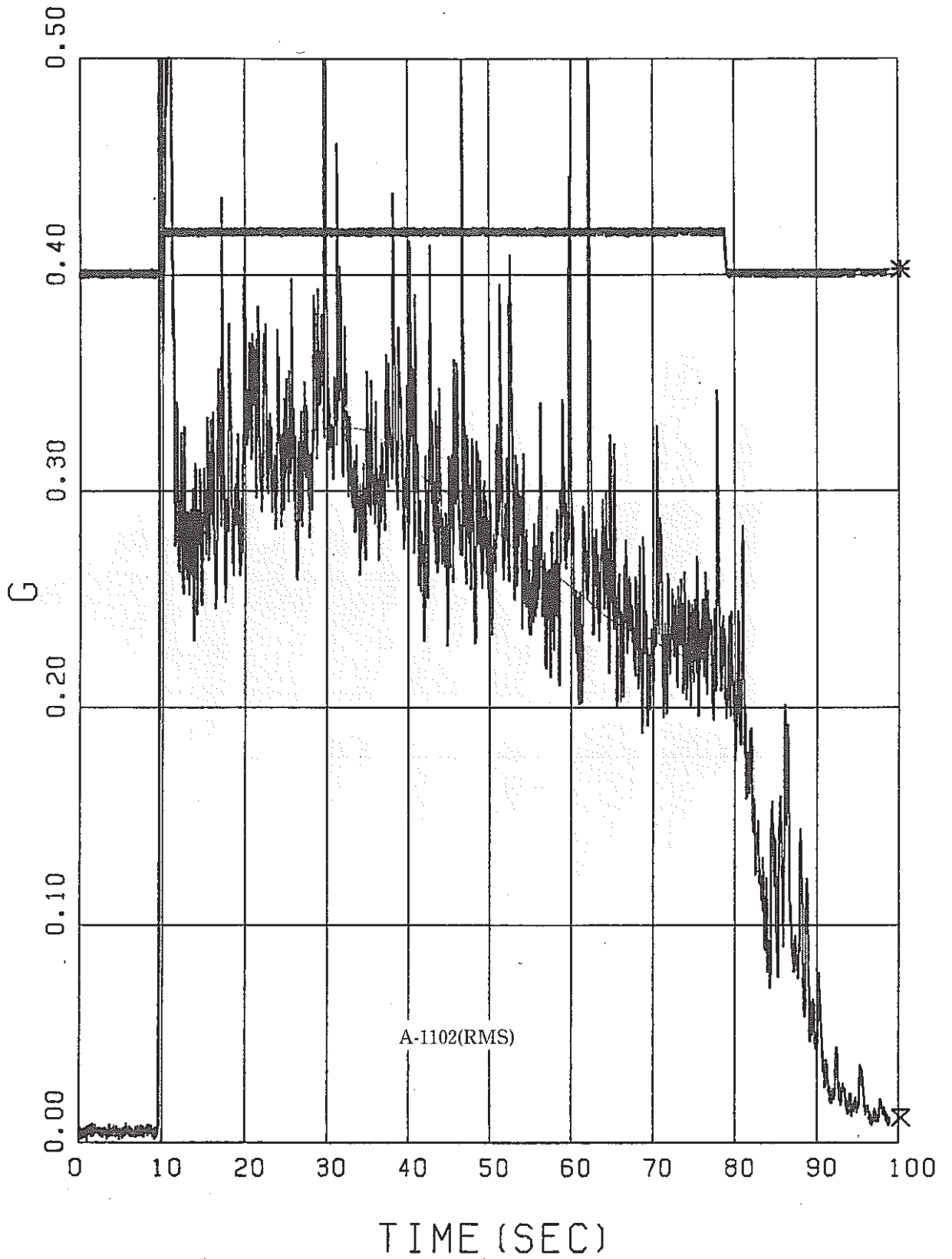
5-6 Pressure of Reaction Product Tank



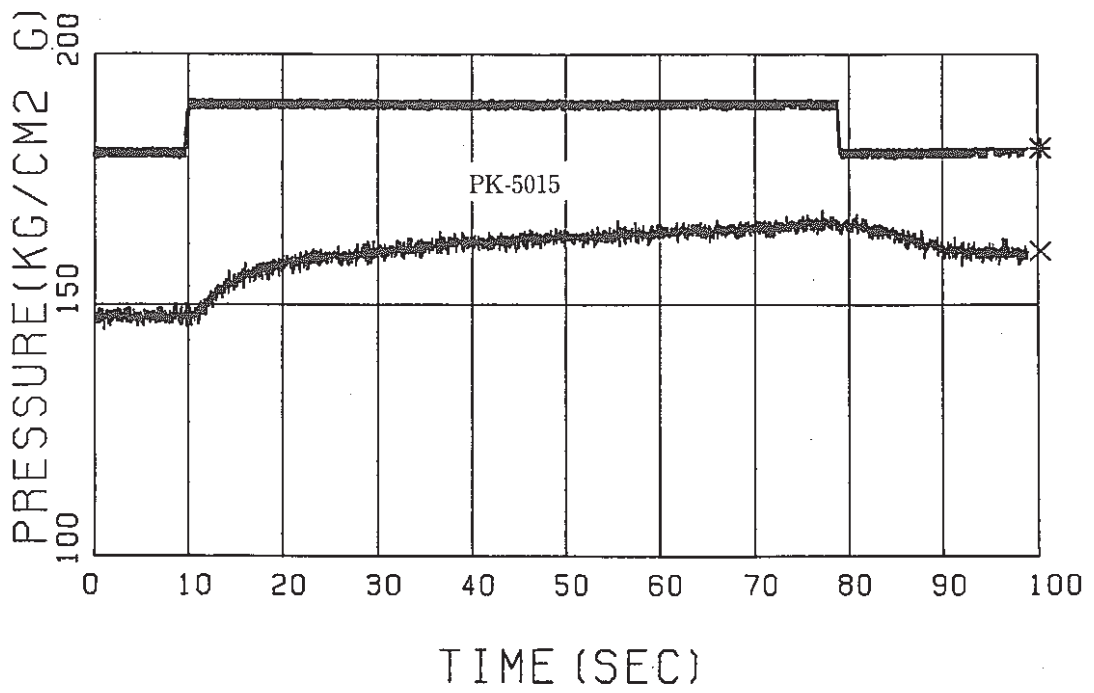
5-7 Pressure of Reaction Vessel



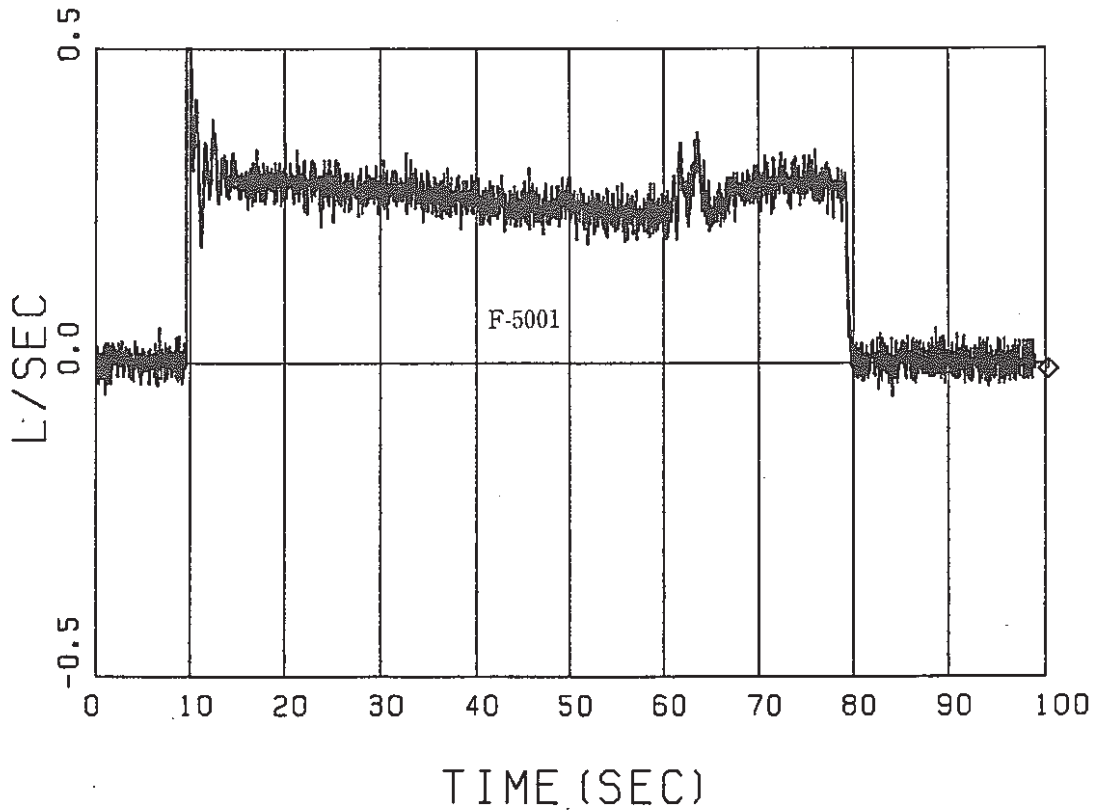
5-8 Acceleration of Reaction Vessel



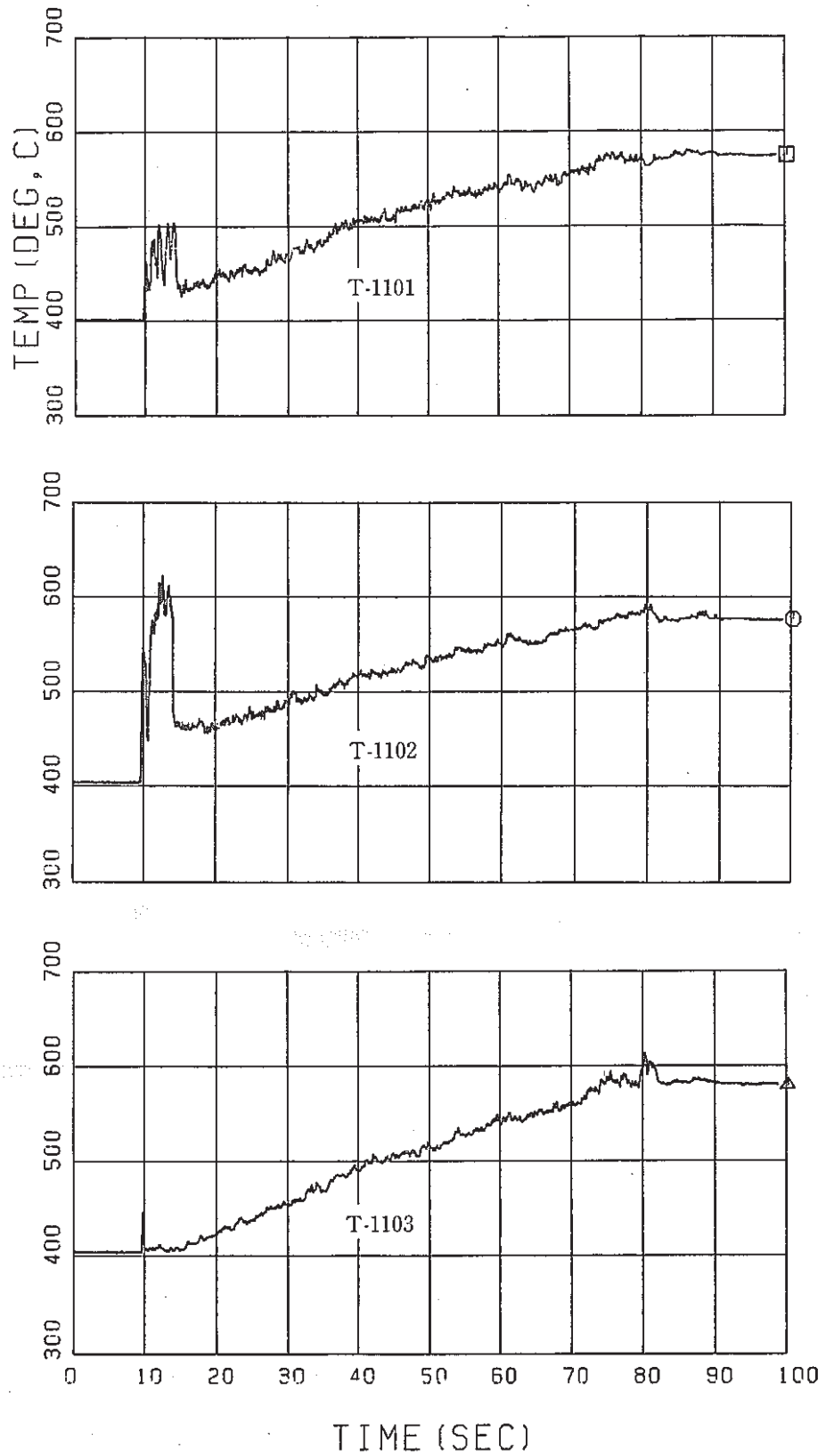
5-9 R. S. M Value of Acceleration of Reaction Vessel



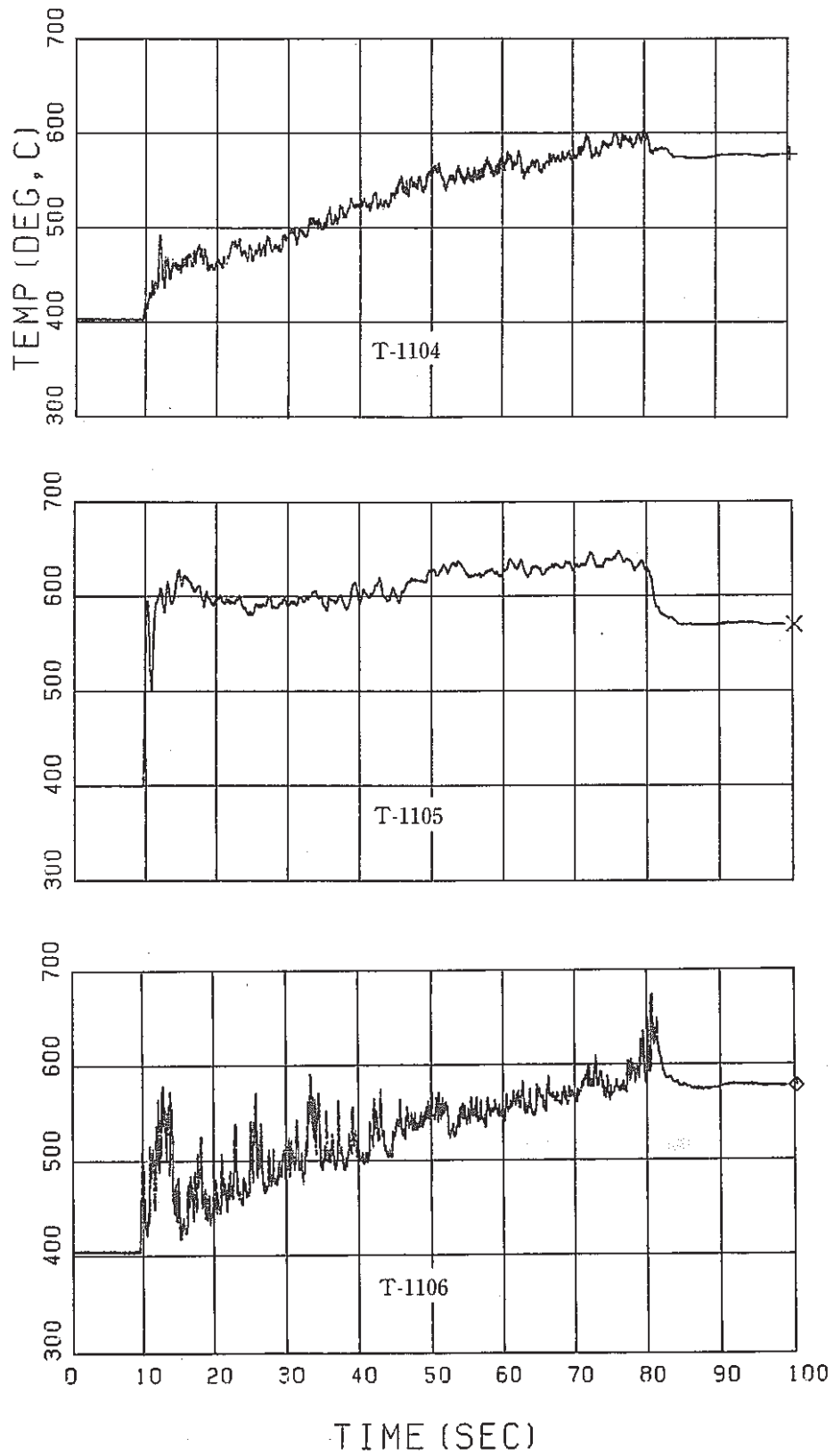
5-10 Pressure of Gas-Filled Tube (No.15)



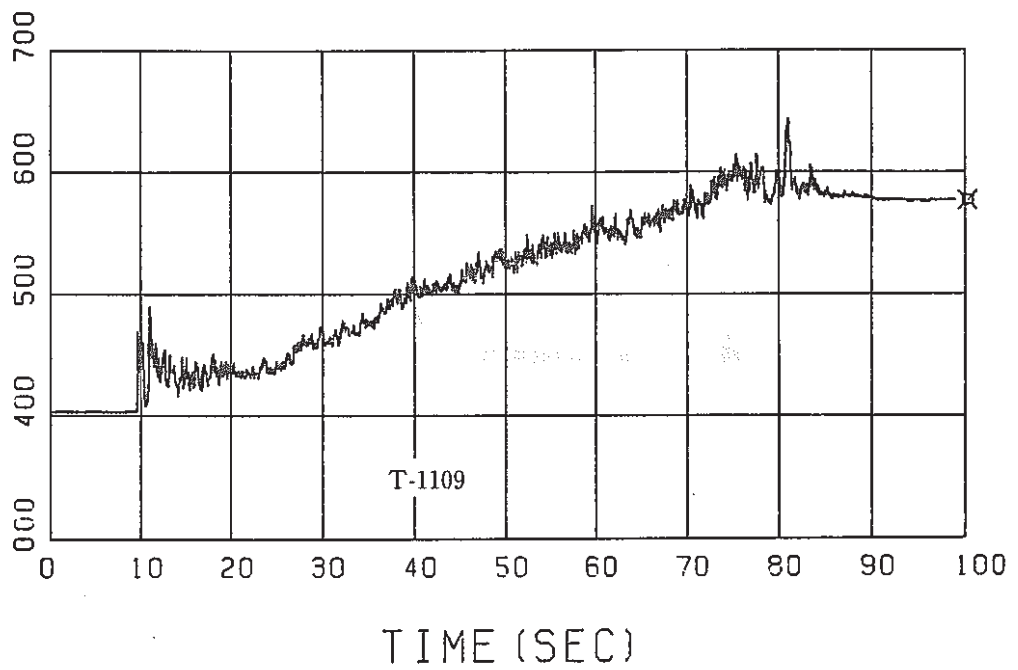
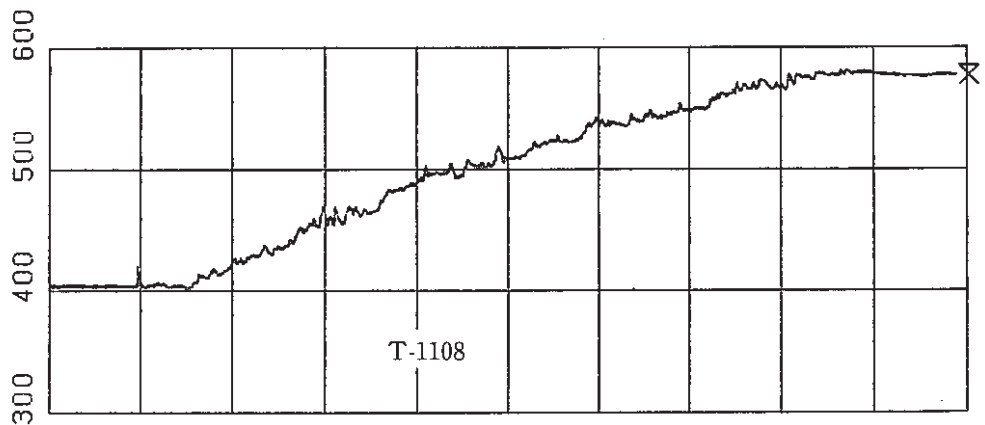
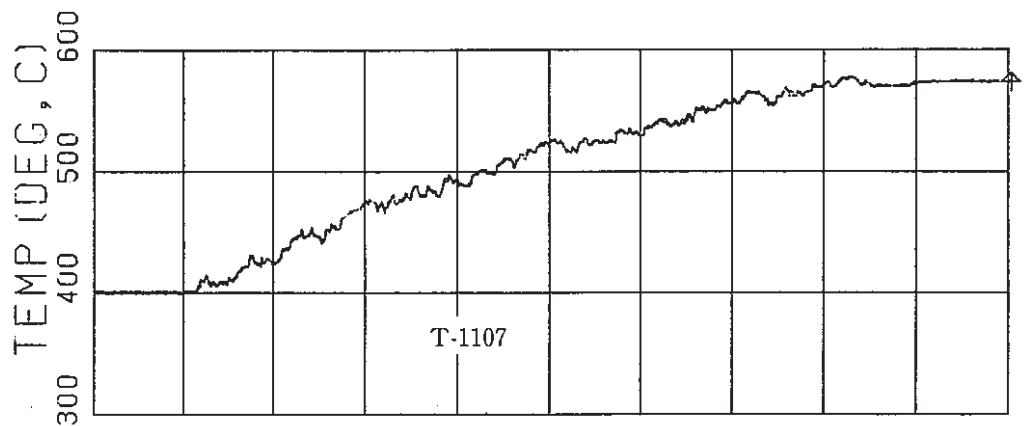
5-11 Water Injecting Line Flow



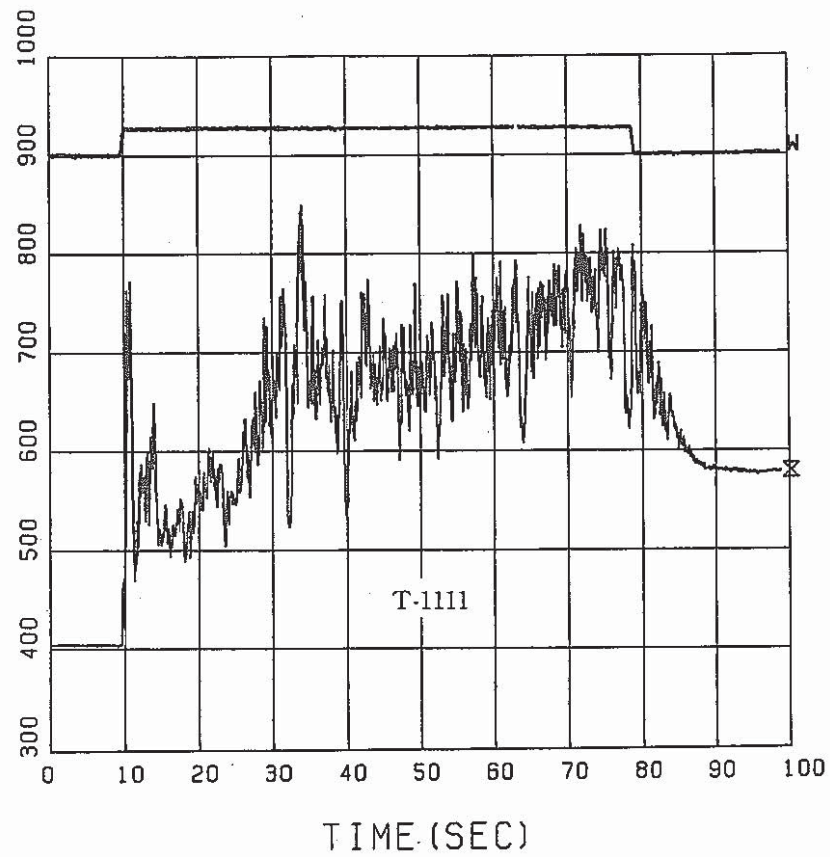
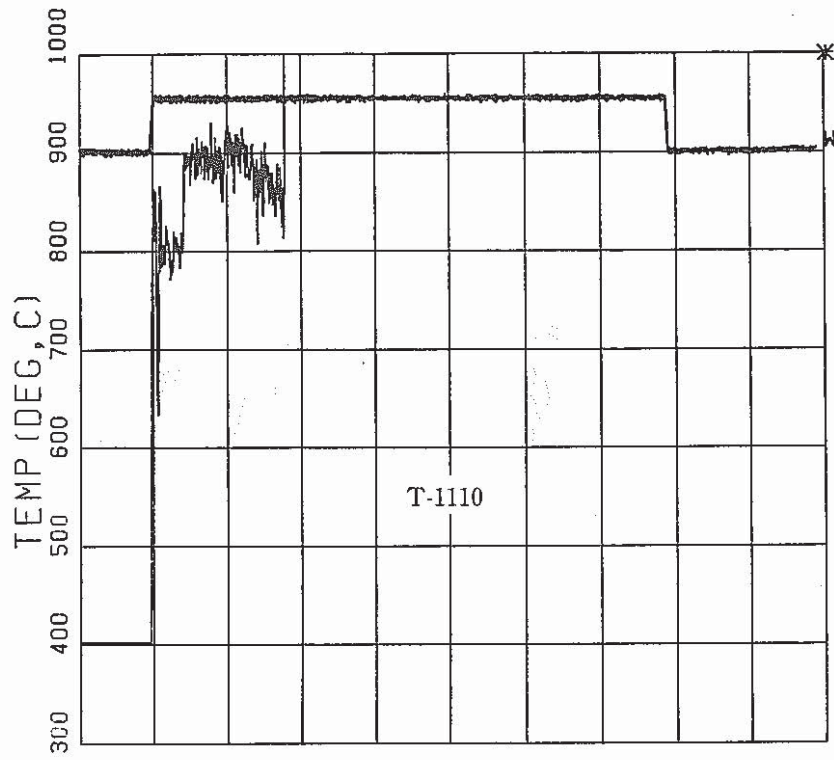
5-12 (a) Temperatures of Tube Bundle Region



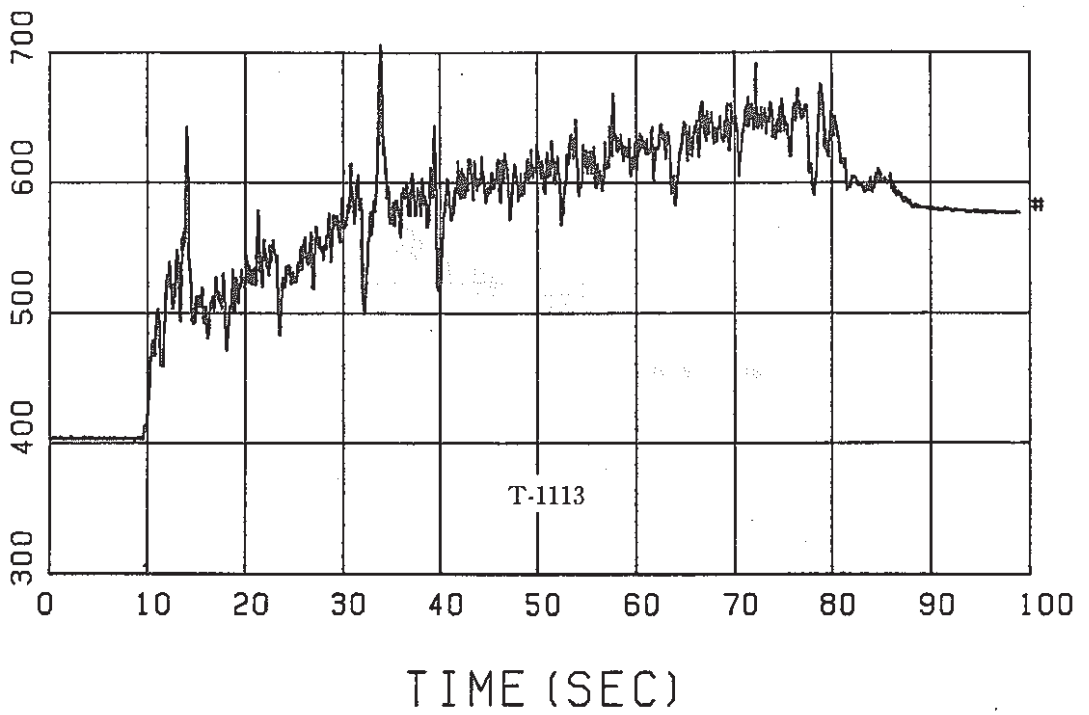
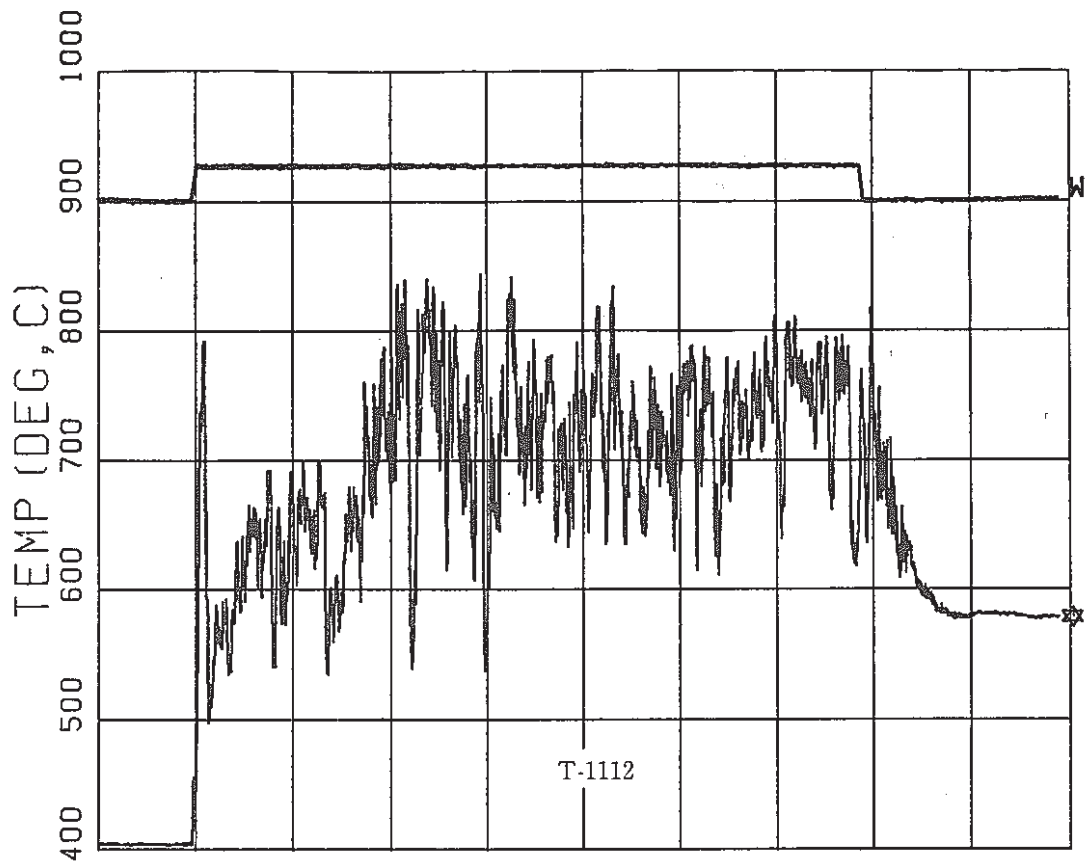
5-12 (b) Temperatures of Tube Bundle Region



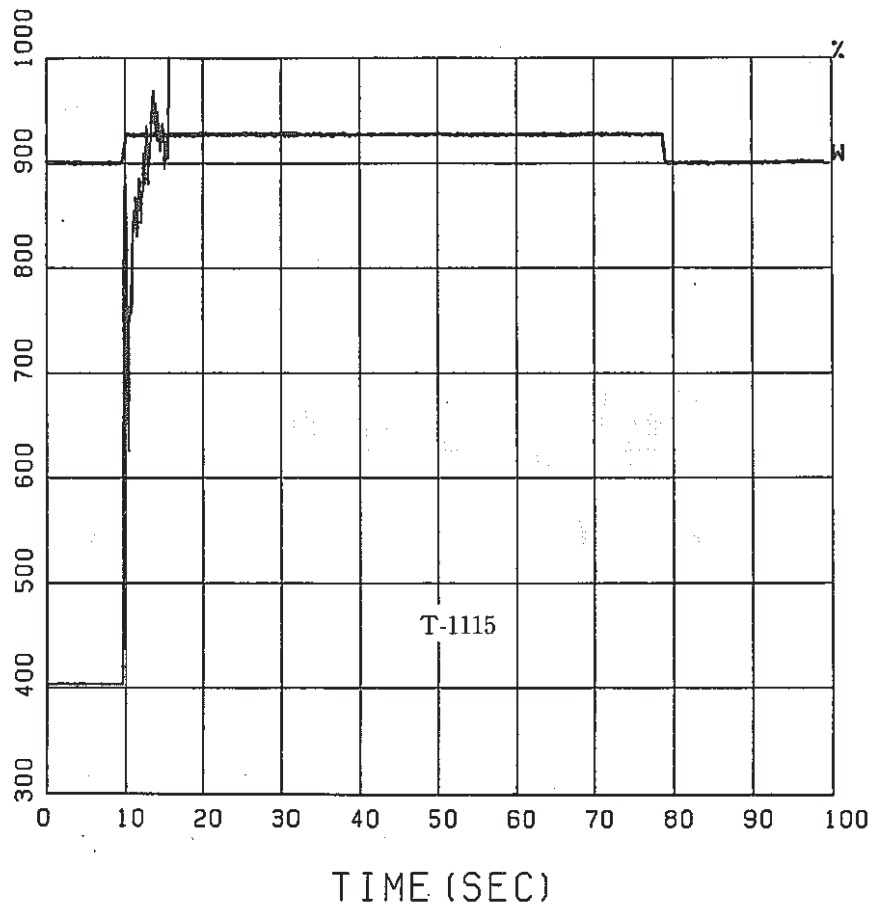
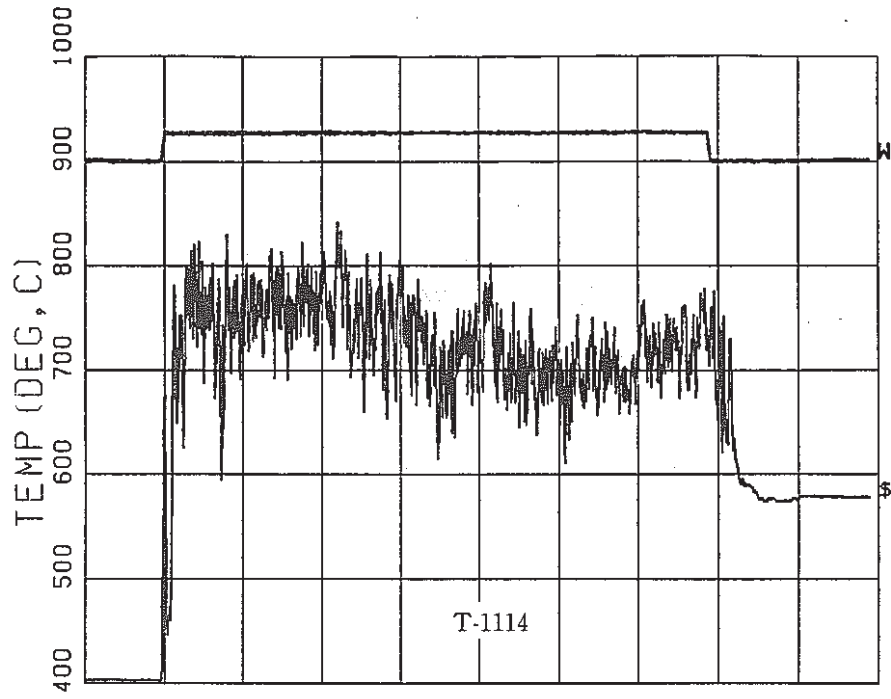
5-12 (c) Temperatures of Tube Bundle Region



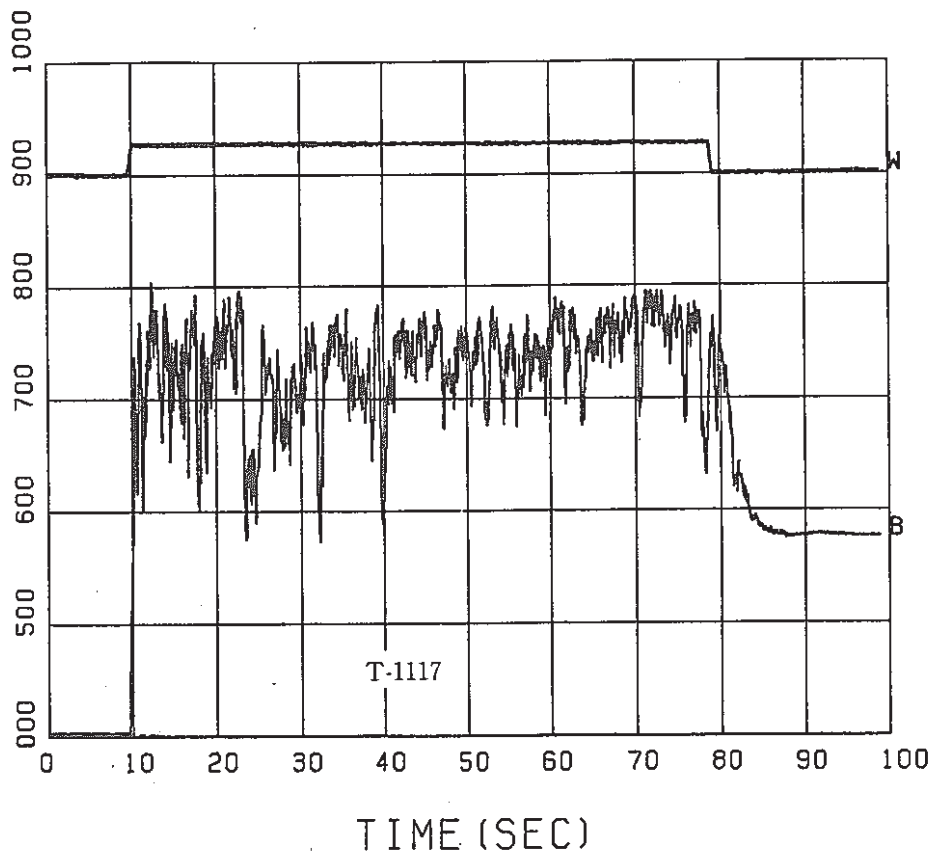
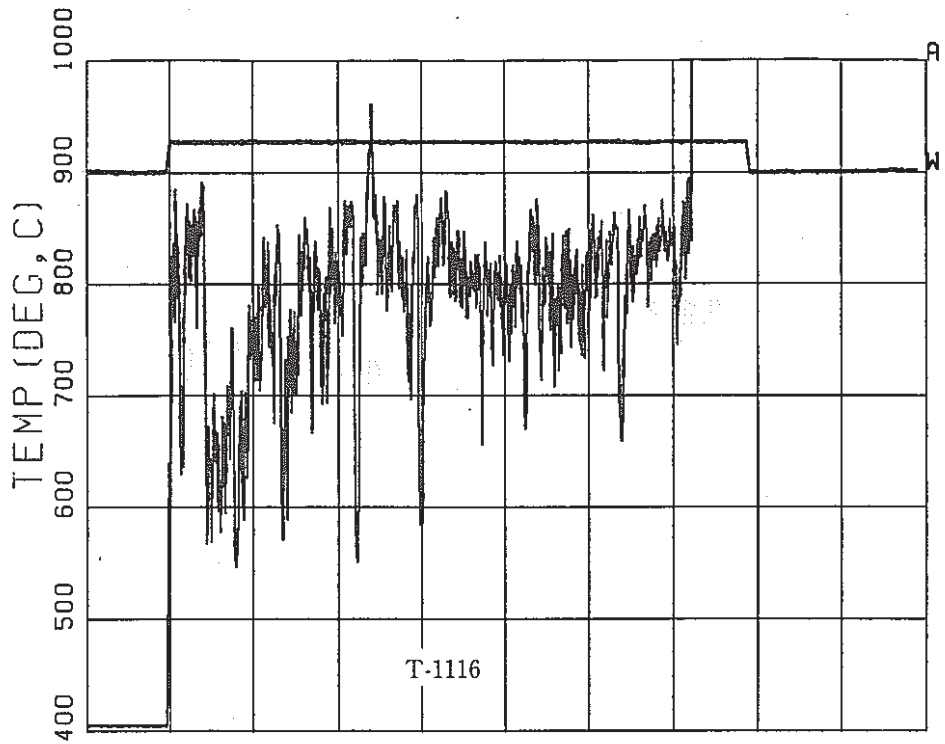
5-12 (d) Temperatures of Tube Bundle Region



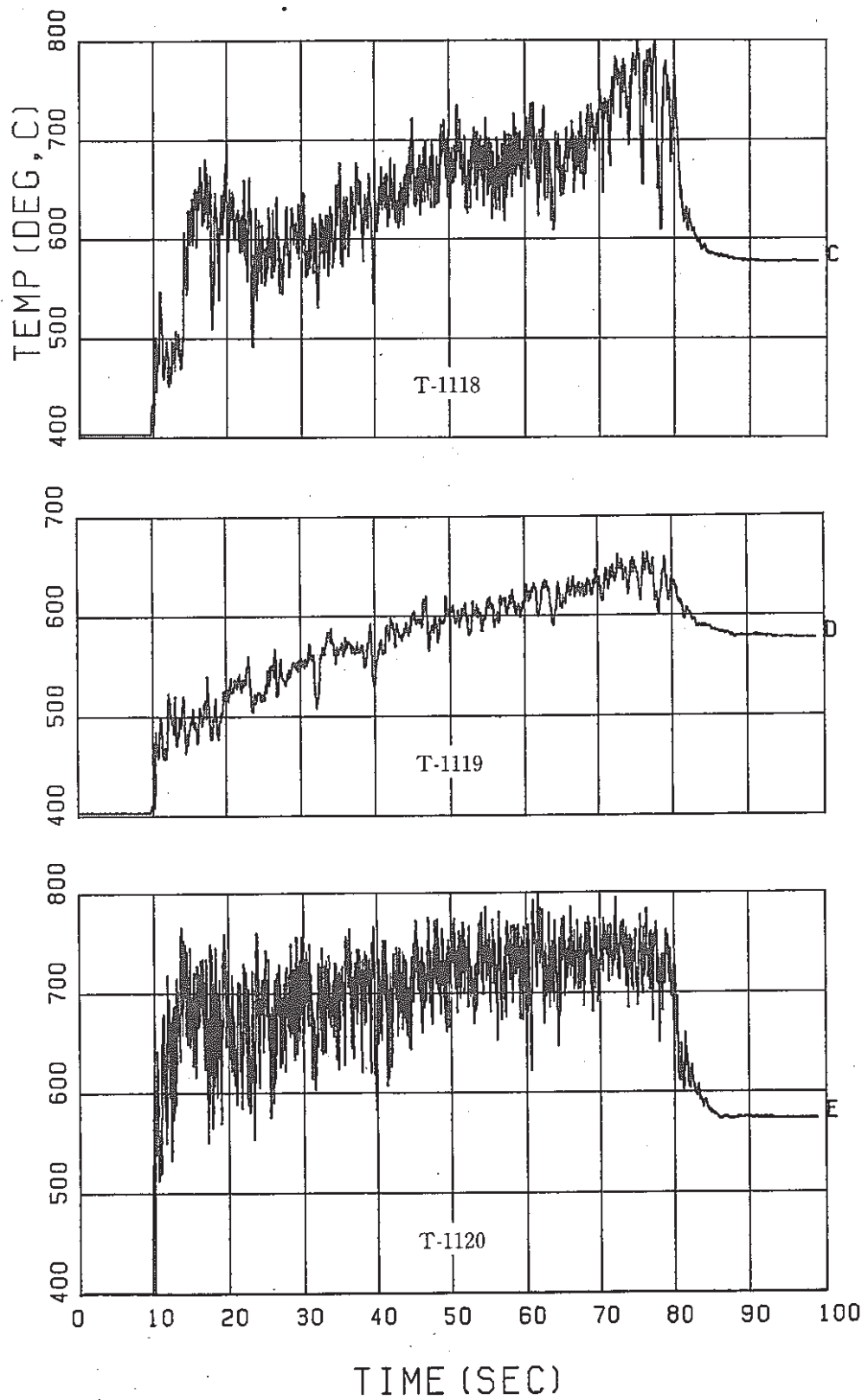
5-12 (e) Temperatures of Tube Bundle Region



5-12 (f) Temperatures of Tube Bundle Region



5-12 (g) Temperatures of Tube Bundle Region



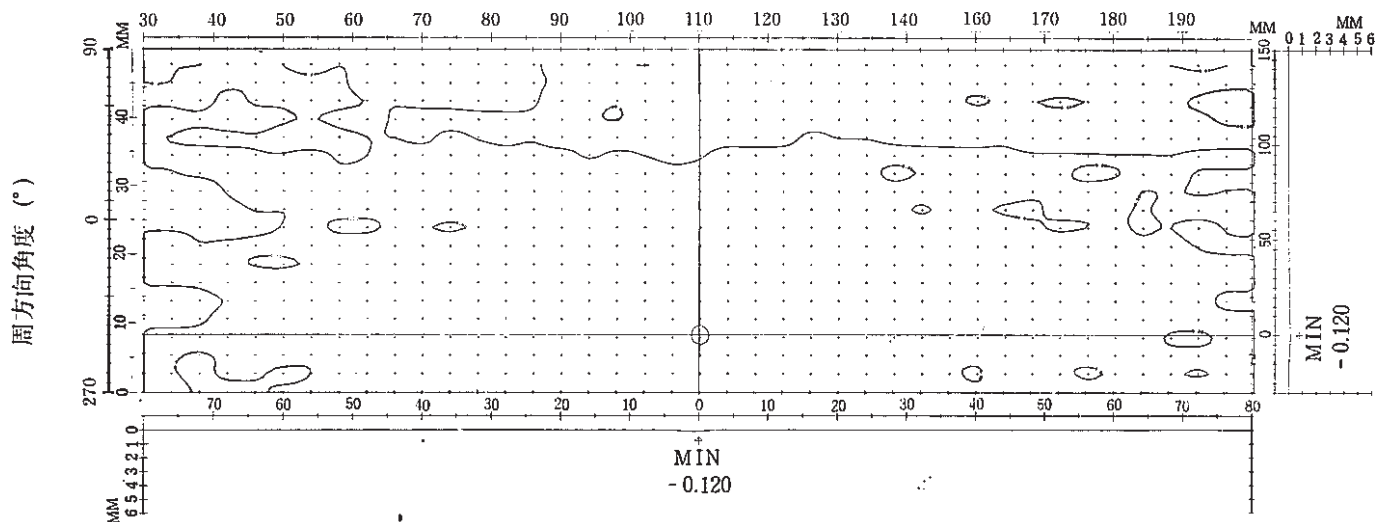
5-12 (h) Temperatures of Tube Bundle Region

A p p e n d i x 6.

SWAT-1 Run-4117, Run-4118 Wastage Map

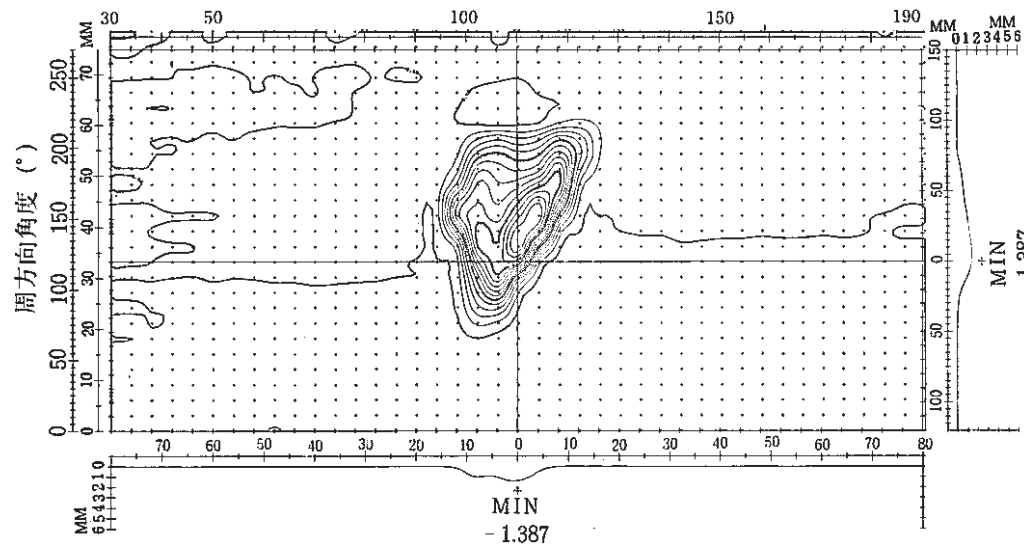
SWAT-1 RUN-4117 NO.3

軸方向長さ (mm)



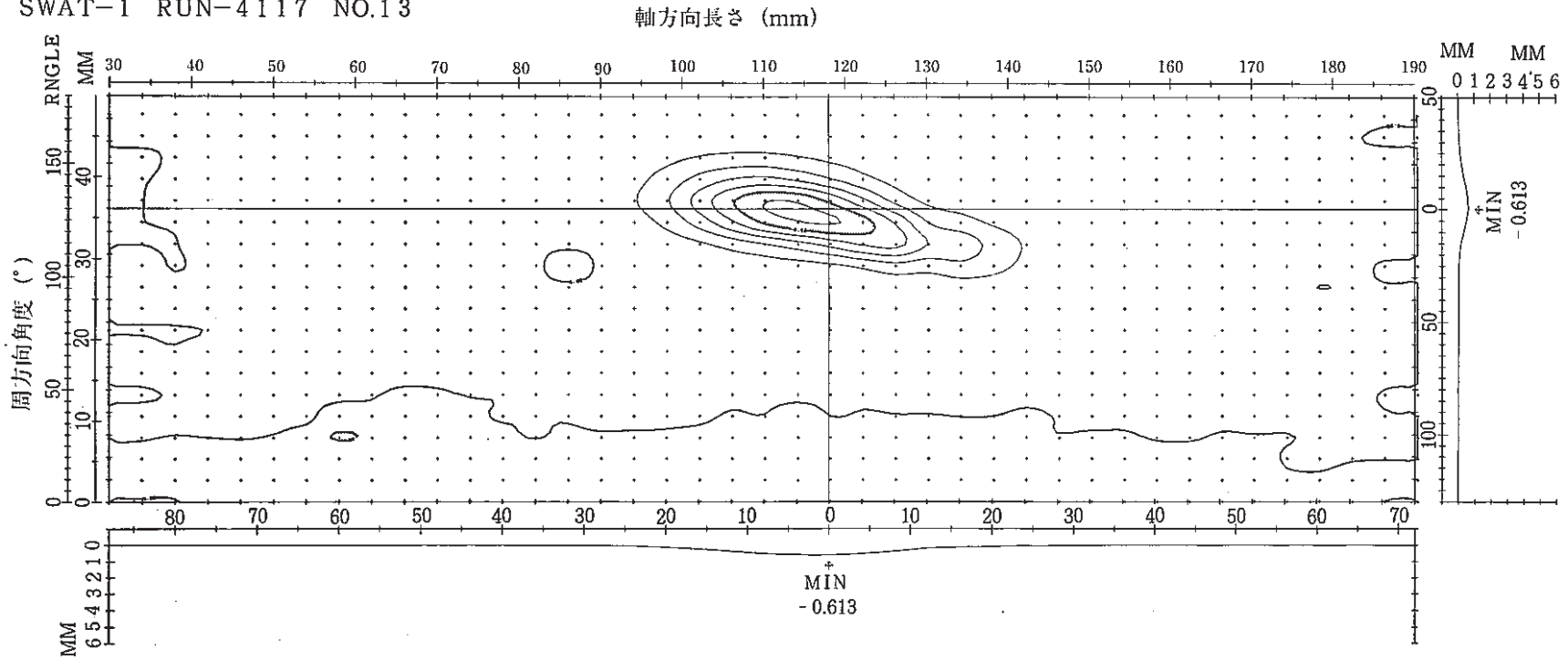
SWAT-1 RUN-4117 NO.8

軸方向長さ (mm)



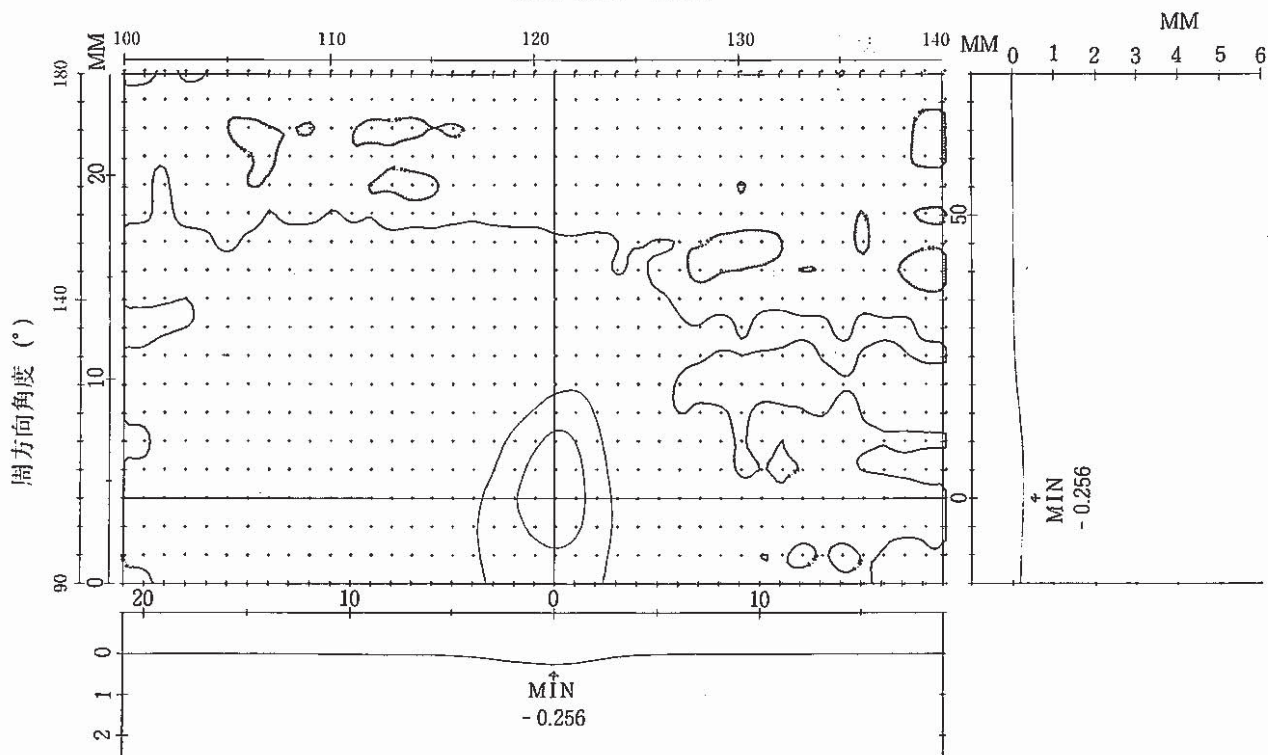
6-1 Wastage Map of Target Tubes (Run-4117)

SWAT-1 RUN-4117 NO.13

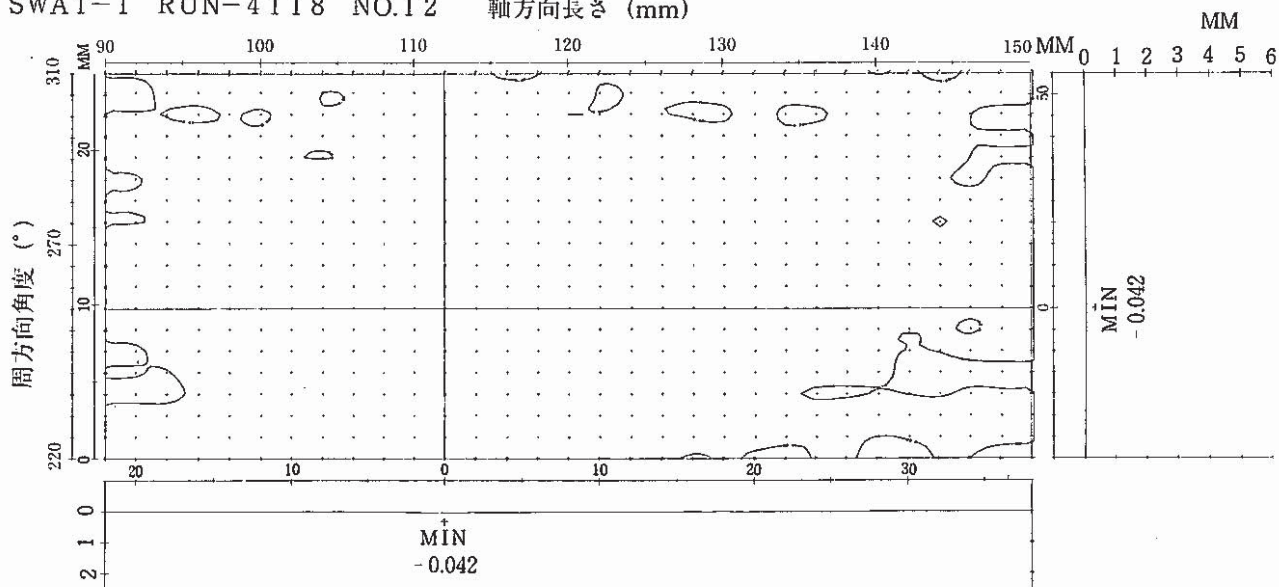


6-2 Wastage Map of Target Tube (Run-4117)

SWAT-1 RUN-4118 NO.11 軸方向長さ (mm)

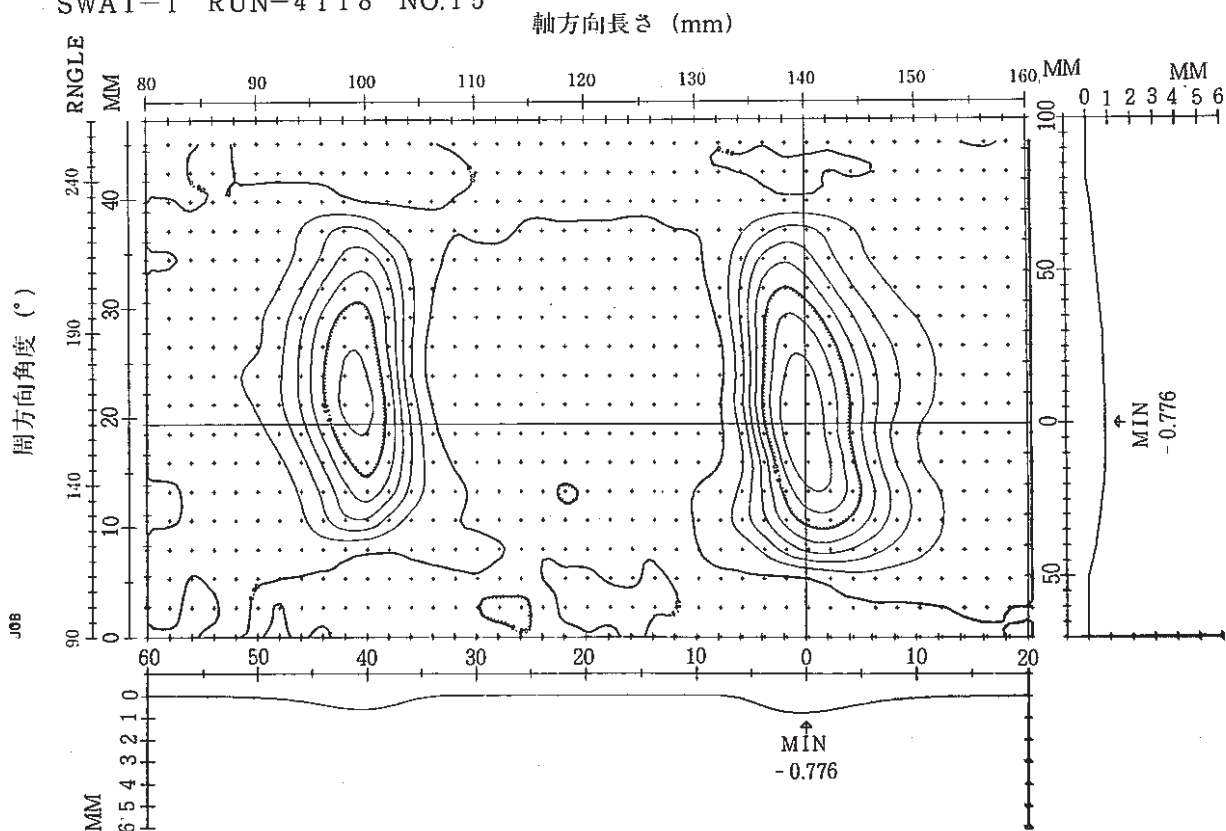


SWAT-1 RUN-4118 NO.12 軸方向長さ (mm)

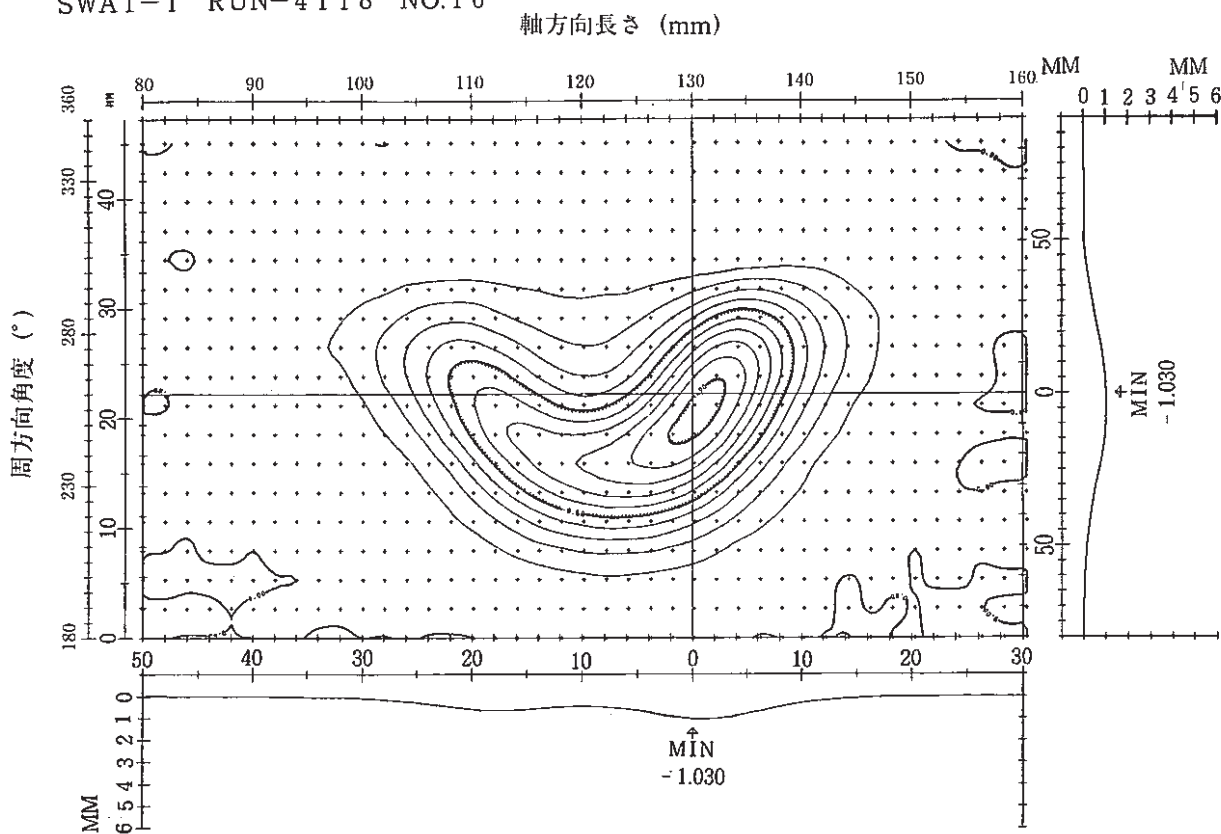


6-3 Wastage Map of Target Tubes (Run-4118)

SWAT-1 RUN-4118 NO.15



SWAT-1 RUN-4118 NO.16



6-4 Wastage Map of Target Tube (Run-4118)