

比較的低い温度のカバーガス空間のナトリウム濃度

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNC <u>TN941 85-121</u>
決裁年月日	平成 <u>10</u> 年 <u>3</u> 月 <u>26</u> 日

1985年8月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討及び周知を目的とする社内資料です。刊行物に引用する場合には、事業団の承認が必要です。

比較的低い温度のカバーガス空間のナトリウム濃度

林 謙 二 * 松 本 明 * 佐藤和二郎 *

要 旨

ナトリウム温度が比較的低いカバーガス空間におけるナトリウム蒸気(または、ミスト)濃度を測定した。試験はカバーガス空間の軸方向に温度差があり、その内部に自然対流が誘起されている試験容器を用い、ナトリウム温度 150 ~ 300℃ およびカバーガス空間軸方向温度差 70 ~ 150℃ の範囲で実施した。

比較的低いナトリウム温度(150 ~ 300℃)のカバーガス空間におけるナトリウム濃度は、ナトリウム温度の低下とともに指数的に低下し、高温領域(300 ~ 600℃)のデータを外挿できる特性を示した。200℃におけるナトリウム濃度($3.0 \times 10^{-8} \sim 9.0 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$)はナトリウム飽和蒸気濃度($1 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3$)に比較して約 2桁大きい。これは温度の低いナトリウム液面においても、液面近傍の急激な温度低下によりナトリウムミストが発生するためと考えられる。

ここで得られた実験データは高速原型炉「もんじゅ」の回転プラグの低温環状部壁面へのナトリウム付着量の評価に用いられる。

* 大洗工学センター, 安全工学部, 高速増殖炉工学室

Sodium Concentration in Argon Cover Gas
at Relatively Low Temperature

K. Hayashi*, A. Matsumoto* and
K. Satoh*

Abstract

Sodium vapor (or mist) concentration in argon cover gas space was measured at relatively low temperature conditions. The tests was conducted using a small pot in which natural convection was inducted by the axial temperature difference. Sodium temperature 150 ~ 300°C and axial temperature difference in the pot are dependent variables in the tests.

Sodium concentration in the cover gas space above the surface of relatively low temperature (150 ~ 300°C) logarithmically decreases with decreasing sodium surface temperature. The present data exist in the extrapolation zone of the previous data obtained in the high temperature range, however, there is almost two orders of magnitude difference between the present data ($2 \times 10^{-8} \sim 9 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$) and the saturated vapor concentration ($1 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3$) at 200°C. The cause of this large difference is considered to be attributed to mist formation at just above sodium surface where sodium vapor should nucleate due to steep temperature drop.

The data obtained in the present tests will be reflected on the evaluation of sodium deposition rates for the low temperature annulus wall of the Monju rotating shield plug.

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

目 次

1. まえがき	1
2. 試験装置	2
3. 試験方法および結果	3
3.1 軸方向および径方向温度分布	3
3.2 ナトリウムミスト濃度測定	3
4. 考 察	5
5. 結 言	6
謝 辞	7
参考文献	8

List of Figures

Fig. 1	Schematic of the Test Loop	9
Fig. 2	Sectional View of the Test Pot (Pot M)	10
Fig. 3	Thermo-couple Traverse Rod	11
Fig. 4	Mist Sampler	12
Fig. 5	Mist Sampling Line	13
Fig. 6	Temperature Distributions in the Pot M	14
	(Sodium Surface : 295°C)	
Fig. 7	Temperature Distributions in the Pot M	15
	(Sodium Surface : 248°C)	
Fig. 8	Temperature Distributions in the Pot M	16
	(Sodium Surface : 197°C)	
Fig. 9	Temperature Distributions in the Pot M	17
	(Sodium Surface : 149°C)	
Fig. 10	Mist Concentration VS. Sodium Surface Temperature	18

1. ま え が き

原子炉容器の回転プラグ周囲等のような上下に温度差が生じる環状部には、ロール状の自然対流が発生する。この自然対流は周方向に温度不均一を引き起こすとともに、ナトリウム液面上に生成されるミストを環状部空間の低温部に輸送する。輸送されたミストは低温壁に付着するが、これが進行して環状部を閉塞すると、機器の回転障害等の故障原因となる。

高速原型炉「もんじゅ」(以下、実機とする)には上記のナトリウム・ミストの輸送を抑制するため、回転プラグの温度が150～200℃になる軸方向位置に、高さ5mm、幅155mmの水平ギャップ部を設けている(固着防止リング)。この固着防止リング部には原子炉運転中に垂直壁に付着したナトリウムが流下して滞留し、水平ギャップ部を閉塞する。このためナトリウム・ミスト濃度が高い原子炉容器カバーガス空間と回転プラグ上部の低温環状部空間とは隔離され、低温壁へのナトリウム付着量が大幅に低下する。

しかし、固着防止リング部に滞留する比較的低い温度のナトリウムが再蒸発して、その上部の環状部に付着することも考えられる。これまで一連のナトリウム・ミスト蒸発に関する試験・研究⁽¹⁾、⁽²⁾により、ミスト濃度および蒸発速度に関するデータが得られてきたが、これらは300℃以上のナトリウム温度のものであり、固着防止リング部に滞留する150～200℃のナトリウム表面からのナトリウム蒸発量を評価することはできない。

そのため、150～200℃のナトリウム液面を有するカバーガス空間のナトリウム濃度を測定し、回転プラグの低温環状部壁へのナトリウム付着量の評価に必要なデータを得た。

2. 試 験 装 置

試験装置は Fig. 1 に示した既設ミスト・熱伝達試験装置，試験部は既設のナトリウムミスト蒸発速度測定用試験容器「ポットM」を，Fig. 2 に示すように本試験用に改造して使用した。

装置には2基の試験部ポットM，およびポットDがナトリウム循環系に並列に設置されている。これら2基の試験部のナトリウム循環の並行運転は，それぞれの液面制御が非常に難しく行なえない。そのため片方ずつ循環・精製運転を実施した。本試験はポット内ナトリウムを静止状態にして行なうため，両ポットにナトリウムを充填し片方ずつの循環・精製運転を実施した後にループを静止させた。

ポットMの側面および上面にはカバーガス雰囲気中の温度分布測定用熱電対とミストサンプラーを挿入するための案内管が設けてある。

ポットの上部には可視化ガラス窓が2個設けてあり（目視観察用と照明用），ナトリウム液面の状態およびカバーガス空間のミスト発生状態が目視観察できる。

ポット内にはナトリウム受皿があり，これにナトリウムを充填し，このナトリウム液面よりナトリウムを蒸発させる。受皿内のナトリウム温度の設定は，受皿の底面に接続された配管内にある内挿ヒータ（シースヒータ）により行なう。本試験では受皿外側のアニュラス空間に自然対流が生じ，周方向および径方向に不均一な温度分布ができやすいと考えられるため，受皿よりも高いレベルまでナトリウムを充填し，アニュラス空間が形成されないようにした。

ポットの外面にはマイクロヒータおよび取外し可能な保温材が施工されており，壁面の断熱や液面-ポット頂部温度差の条件が設定できるようになっている。

Fig. 3 に温度分布測定用の熱電対トラバースロッドを示す。熱電対は $\phi 1.6$ のCAであり，ロッドの先端にある細い棒に添わして固定し，ロッド内を通して末端のコンプレッション・フィッティングによりシールし引き出している。

Fig. 4 にミストサンプラーを示す。サンプラーはパイプの先端にカートリッジタイプのフィルターを取り付け，サンプラーの後方よりポット内のガスを一定量吸引してナトリウム蒸気またはミストをフィルターで捕獲するものである。フィルターは焼結金属製でメッシュサイズ $2\mu\text{m}$ のものが2個組み込んである。また，このフィルターとは別にサンプラーの末端には，バックアップ用として $2\mu\text{m}$ のフィルターが組み込まれている。

Fig. 5 にミストサンプリング用の真空系統図を示す。ミストサンプラーと真空系とは真空ホースにより接続されている。標準タンクの容量は 1000cc で，この標準タンク内を真空に引いて，その後このタンクにポット内カバーガスを吸引することによってサンプリングを行なうものである。標準タンク内の圧力はピラニー計およびブルドン管式圧力計により確認した。

3. 試験方法および結果

3.1 軸方向および径方向温度分布

温度分布はカバーガス雰囲気中の軸方向および径方向について測定した。試験条件はナトリウム温度を 300℃、250℃、200℃ および 150℃ として、ポット頂部のマイクロヒータを切り、ポット内に軸方向温度分布が生じるようにして実施した。このときの軸方向温度差はそれぞれ 160℃、130℃、90℃ および 50℃ となった。温度測定はポット内の自然対流が十分に発達するように、上記の条件設定後充分時間が経過してから実施した。測定方法はトラバースロッドをポット内の測定点まで挿入し、数分間その位置に保持させ熱電対周辺の温度場が安定するのを待ってからデータを採取した。この操作を繰り返し行ない各点のデータを採取した。

Fig. 6 にナトリウム液面温度が 295℃、上部カバーガス温度約 130℃ のときの軸方向および径方向の温度分布を示す。軸方向温度分布は液面とその上 20 mm の間で 295℃ から 190℃ まで急激に下り、その上部では緩い勾配で低下し、頂部より 30 mm 下の付近から再び急激に下る。径方向温度分布測定箇所の軸方向高さはナトリウム液面の約 200 mm 上部であり、径方向 -150 mm 側右図の横軸より熱電対トラバースロッドを挿入したもので、軸上の 0 mm 位置はポットの中央である。径方向温度分布は -150 mm からポット中央付近まで徐々に上昇して行くが、中央から +150 mm まではほぼ一定温度になっている。-150 mm 側から 0 mm まで径方向温度が徐々に増加する特性は、Fig. 2 に示す先端にシャッターを有するサンプリング用ノズルからの放熱の影響と考えられる。よって、カバーガスのサンプリングはサンプラーの先端が温度分布が一様になる高温領域に入るまで挿入し、ポット内の自然対流の上昇流領域と考えられる空間で行なった。

Fig. 7, 8 および 9 にナトリウム液面温度がそれぞれ 248℃、197℃ および 149℃ のときの軸方向および径方向の温度分布を示している。これらはすべて Fig. 6 に示した 297℃ のときのデータと同じ傾向を示している。

3.2 ナトリウム濃度測定

ナトリウム濃度測定はナトリウム液面温度およびポット内軸方向温度差をパラメータとして、前述のミストサンプラーでカバーガス中のナトリウムを捕獲し、中和滴定分析によりナトリウム量を求めたものである。

Fig. 10 にナトリウム濃度測定結果を示す。図の縦軸はナトリウム濃度で中和滴定分析により求めたナトリウム量とサンプリング系により吸引したガス容量の比である。横軸はナトリウム液面温度で図中のシンボルにより、軸方向温度差が異なるデータを区別している。

図中のシンボル◎は以前に当試験室において実施されたナトリウム温度 250℃～600℃、液面－上部カバーガス温度差 150℃ の条件のナトリウム・ミスト濃度測定結果である。⁽²⁾ シンボル◇

は試験ポット内にナトリウムを充填せず（内壁および受皿内に小さなナトリウム滴が付着している状態）、室温でサンプリングを実施したときの結果で本測定の測定限界濃度を示している。

本試験は既存データとの整合性をみるため、ナトリウム液面温度 300℃ および 250℃ のナトリウム濃度測定も実施した。その結果両液面温度とも、液面－上部カバーガス温度差 150℃ の条件で既存データとほぼ同じ $1.5 \times 10^{-7} \sim 3.0 \times 10^{-7}$ (g/cm³) の範囲の濃度であった。ここで試験した比較的低い温度におけるナトリウム濃度のナトリウム温度条件が 150℃ および 200℃ のときナトリウム濃度測定結果は次に示す通りである。

(ナトリウム液面温度)	(軸方向温度差)	(ナトリウム濃度)
200℃	70℃～150℃	$2.5 \times 10^{-8} \sim 9.0 \times 10^{-8}$ (g/cm ³)
150℃	100℃～150℃	$2.0 \times 10^{-8} \sim 5.0 \times 10^{-8}$ (g/cm ³)

ナトリウム液面温度 200℃ および 150℃ のナトリウム濃度はあまり差はなく、150℃～200℃ の範囲の濃度は $2.0 \times 10^{-8} \sim 9.0 \times 10^{-8}$ (g/cm³) 内に分布している。

また、ナトリウム液面温度 200℃ および 150℃ のとき濃度は、液面－上部カバーガス温度差が 70℃～150℃ の範囲で温度差にそれほど依存しないことがわかった。

4. 考 察

今まで実施されたミスト濃度測定実験などから得られたデータにより、固着防止リング部におけるナトリウムの再蒸発量や上部環状部壁への付着量が評価されている。それによると、実機の固着防止リング部の温度 200℃ のナトリウム濃度 C_i を 9.3×10^{-8} (g/cm³) と推定(外挿)している。本試験により得たナトリウム温度 150 ~ 200℃ のときの濃度 C_i は $2 \times 10^{-8} \sim 9 \times 10^{-8}$ (g/cm³) で上記の外挿値に近く、これまでの評価が妥当であったことがわかる。

なお、上記のナトリウム濃度測定値と 200℃ におけるナトリウムの飽和蒸気濃度 (1×10^{-10} g/cm³) を比較すると、測定値の方が約 2 桁大きい。これは比較的ナトリウム温度が低い場合においても、液面近傍の急激な温度低下により、ナトリウム蒸気が過飽和状態となり、液面近傍でナトリウム・ミストが形成されることを示している。

ただし、布留川らの実験によれば、液面近傍の温度境界層における ΔT が 50℃ 以下になるとミスト形成が抑制され、カバーガス空間のナトリウム濃度が急激に低下することが実験的に示されている。⁽²⁾

本試験により得たナトリウム温度 150 ~ 200℃ のときのナトリウム濃度からナトリウム蒸着速度は、次に示す既存の関係式を使い算出する。⁽¹⁾

$$\phi_1 = k \cdot C_i \quad (1)$$

$$\therefore k = \phi_1 / C_i$$

ここで ϕ_1 : ナトリウム蒸着速度 (g/cm²・s)

C_i : ナトリウム濃度 (g/cm³)

k : 係数 [$k = 1.1 \times 10^{-3}$ (cm/s) : 文献(1)参照]

ナトリウム濃度の最大値 9.0×10^{-8} (g/cm³) を用いて算出するとナトリウム蒸着速度 ϕ_1 は 9.9×10^{-11} (g/cm²・s) となる。

ここで実機炉の使用年数は 30 年であり、この間固着防止リング部に滞留したナトリウムが再蒸発し上部環状部に輸送され壁に付着するものとしたとき、上部環状部が閉塞に至らないためにはナトリウム蒸着速度は 4.9×10^{-10} (g/cm²・s) 以下でなければならない(アニュラスギャップ 10mm から算出)。本試験により得られた実機想定温度 (200℃) でのナトリウム蒸着速度は 9.9×10^{-11} (g/cm²・s) と小さく、これから実機回転プラグの低温環状部は運転期間中に閉塞しないものと推定される。

5. 結 言

高速原型炉「もんじゅ」の回転プラグ環状部壁へのナトリウム付着量推定に必要なデータを得るため、比較的低いナトリウム温度のカバーガス空間のナトリウム濃度測定を行った結果、次のことがわかった。

- (1) 実機固着防止リング部の温度（150～200℃）でのナトリウム濃度 C_i は $2 \times 10^{-8} \sim 9.0 \times 10^{-8}$ (g/cm^3) の範囲にあり、ナトリウム飽和蒸気濃度（ $1 \times 10^{-10} \text{g}/\text{cm}^3$: 200℃）より約2桁大きい。
- (2) ナトリウム濃度はナトリウム液面温度の低下とともに指数的に低下し、高温領域（300～600℃）のデータを外挿できる特性を示した。
- (3) また、ナトリウム濃度は今回試験した試験ポット内軸方向温度差70～150℃の範囲では有意な差がなかった。
- (4) ナトリウム濃度 C_i の最大値 9.0×10^{-8} (g/cm^3) でのナトリウム蒸着速度 ϕ_1 は 1.1×10^{-11} ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) 程度と推定される。
- (5) このナトリウム蒸着速度 ϕ_1 は炉の使用年数30年の間に固着防止リング上部の環状部が閉塞に至らないための許容値（ $4.9 \times 10^{-10} \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ）よりも小さい。

ここで得られたナトリウム濃度データは今後、回転プラグ環状部へのナトリウム付着量の評価に反映される。

謝 辞

本試験の実施にあたり御指導および協力を頂いた安全工学部・三本保秀部長，動力炉研究開発本部・服部直三主任研究員，動力炉建設運転本部・仲村喬副主任研究員および大貫康二研究員の諸氏に厚く御礼申し上げます。また，昼夜にわたりループ運転，試験条件設定に御尽力頂いた常陽産業（株）職員の諸氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 姫野, 磯崎他, “回転プラグ用対流抑制板評価開発試験(Ⅱ) — 対流抑制板とドリップレシーバのナトリウム試験 —” SN941 82-87 1982年4月
- (2) 布留川, 古谷他, “回転プラグ熱伝達試験 — カバーガス空間の自然対流・放射熱伝達試験(3) —” SN941 81-250 1981年12月

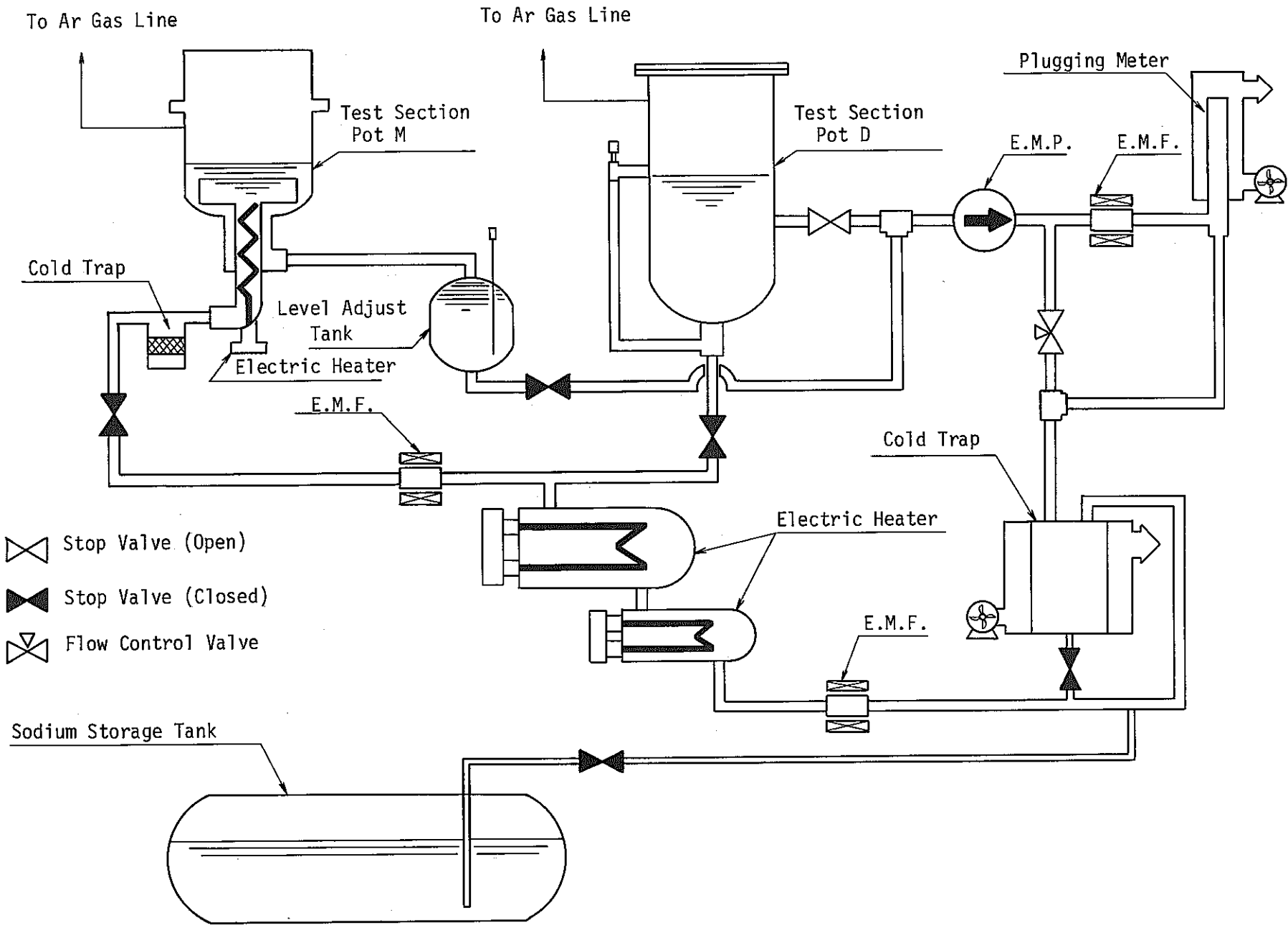


Fig. 1 Schematic of the Test Loop

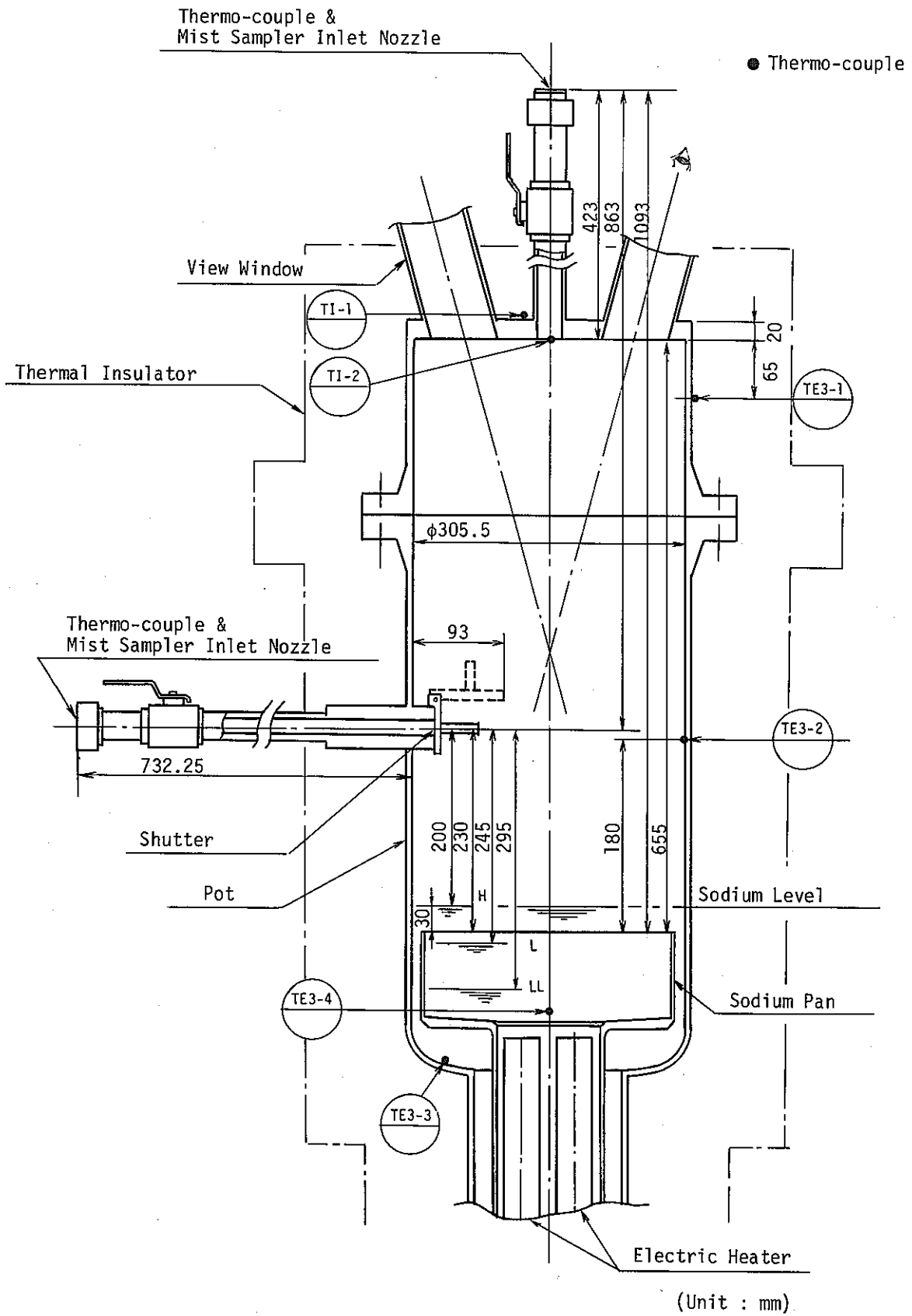


Fig. 2 Sectional View of the Test Pot

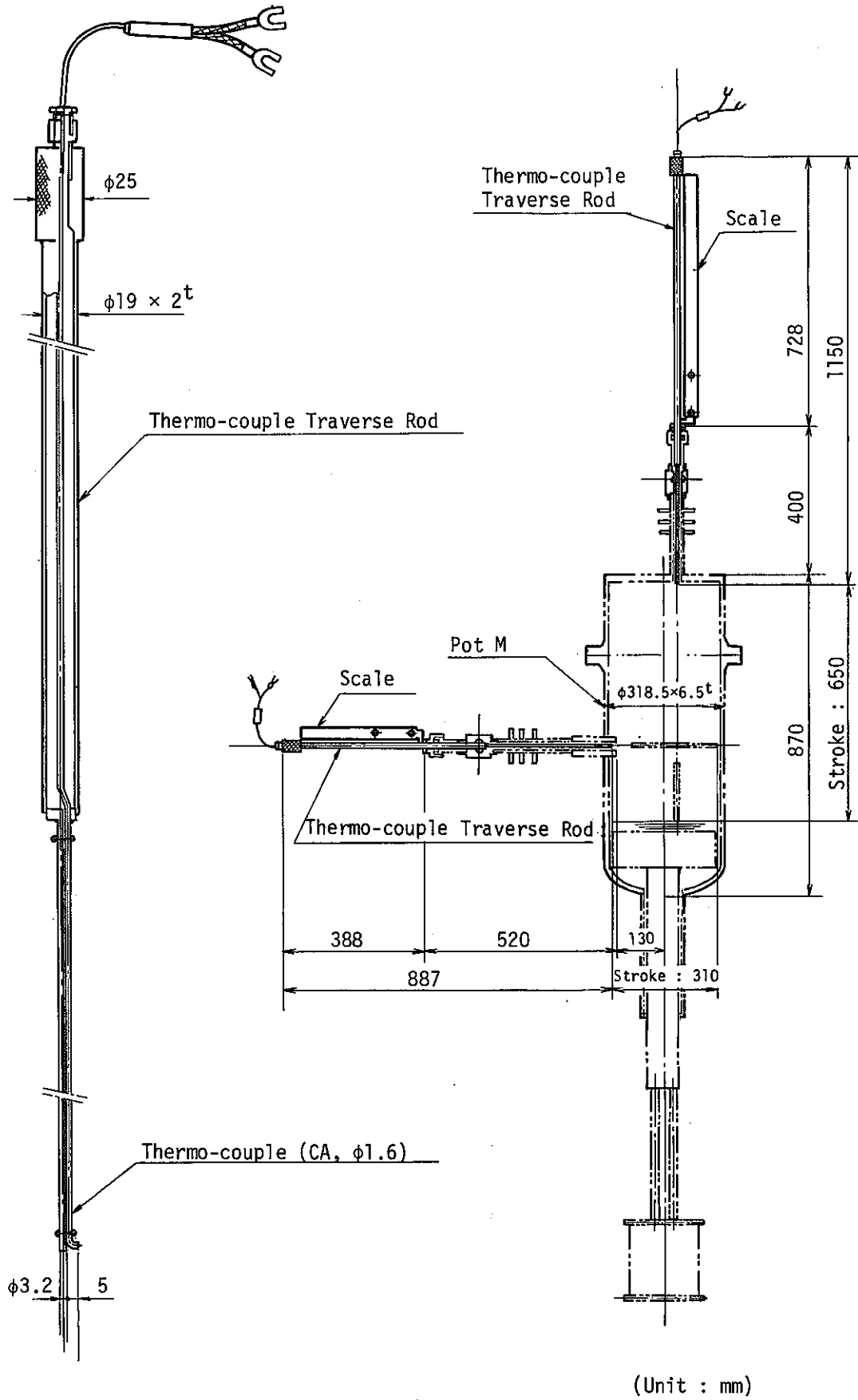
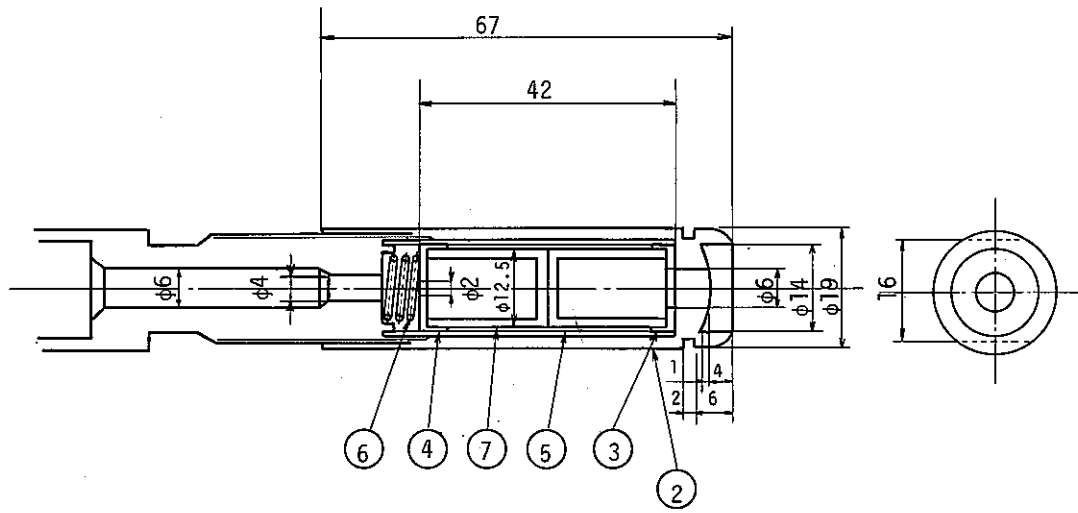
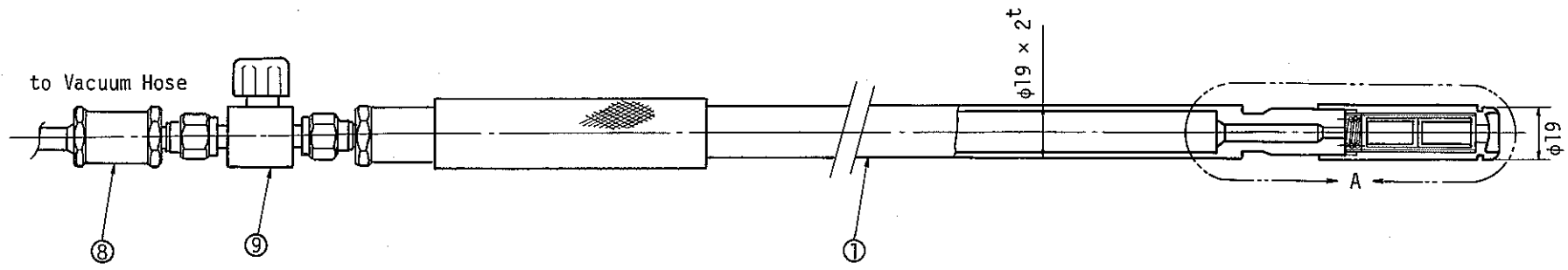


Fig. 3 Thermo-couple Traverse Rod



Details of A

(Unit : mm)

- ① Mist Sampler
- ② Cap
- ③ Spacer
- ④ Spacer
- ⑤ Inner Tube
- ⑥ Spring
- ⑦ Filter 2 μ m
- ⑧ Filter 2 μ m (Back Up)
- ⑨ Stop Valve

Fig. 4 Mist Sampler

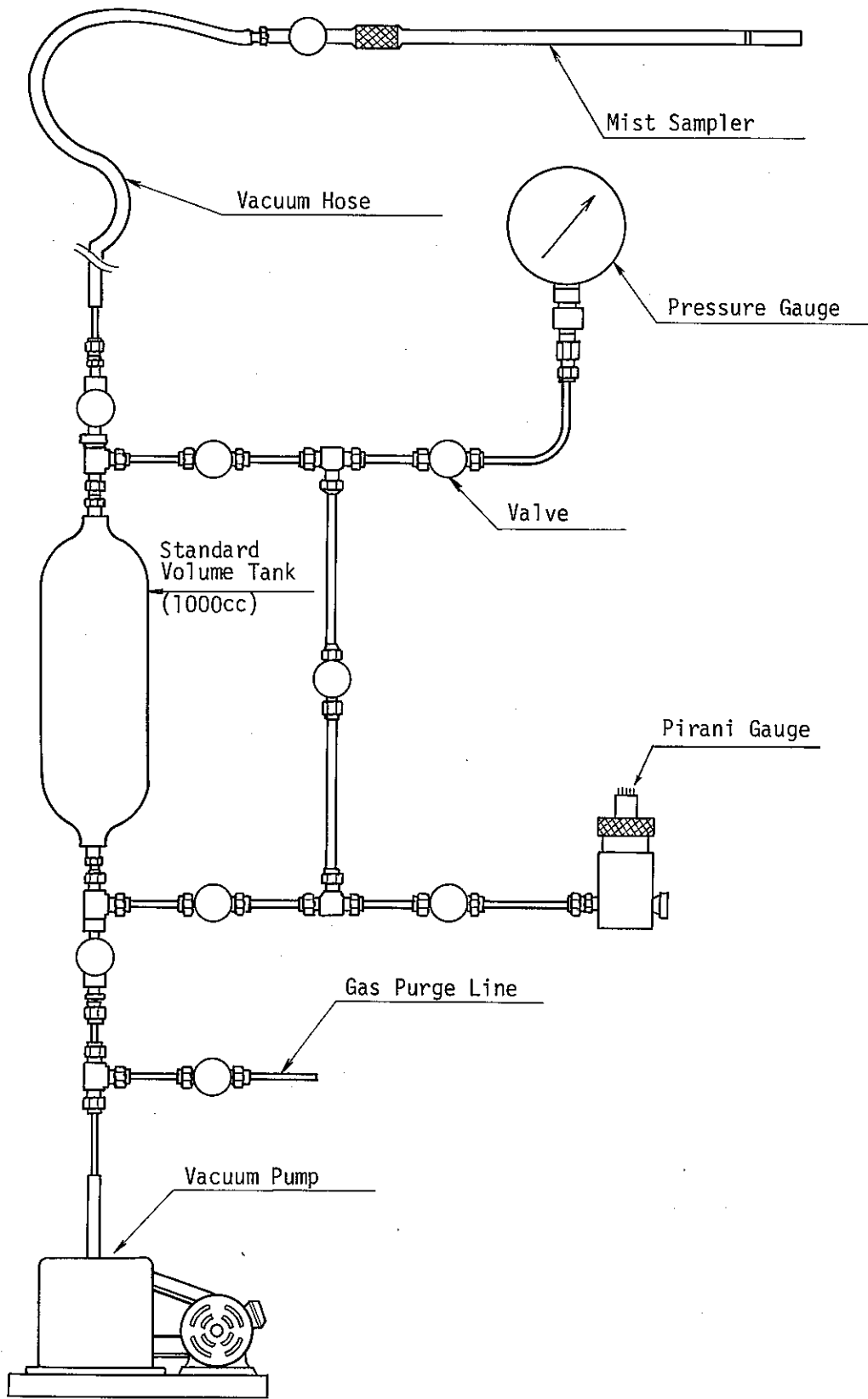


Fig. 5 Mist Sampling Line

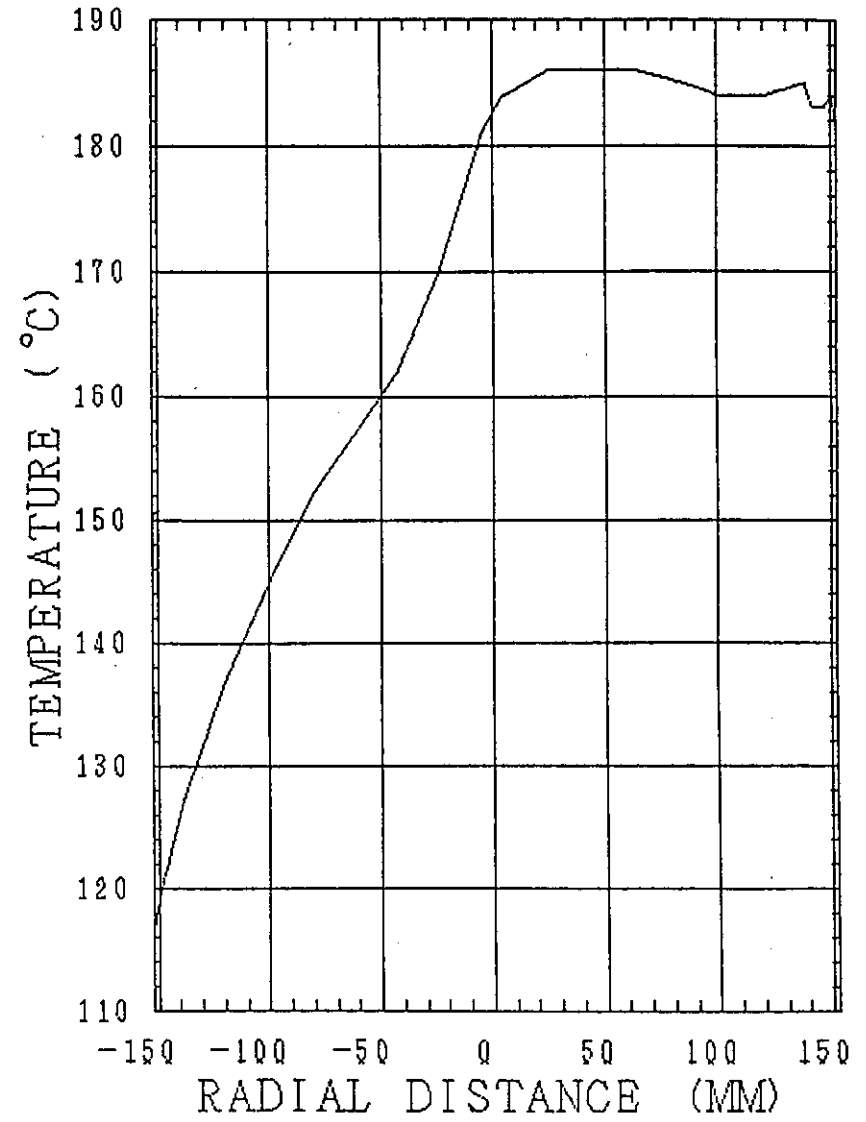
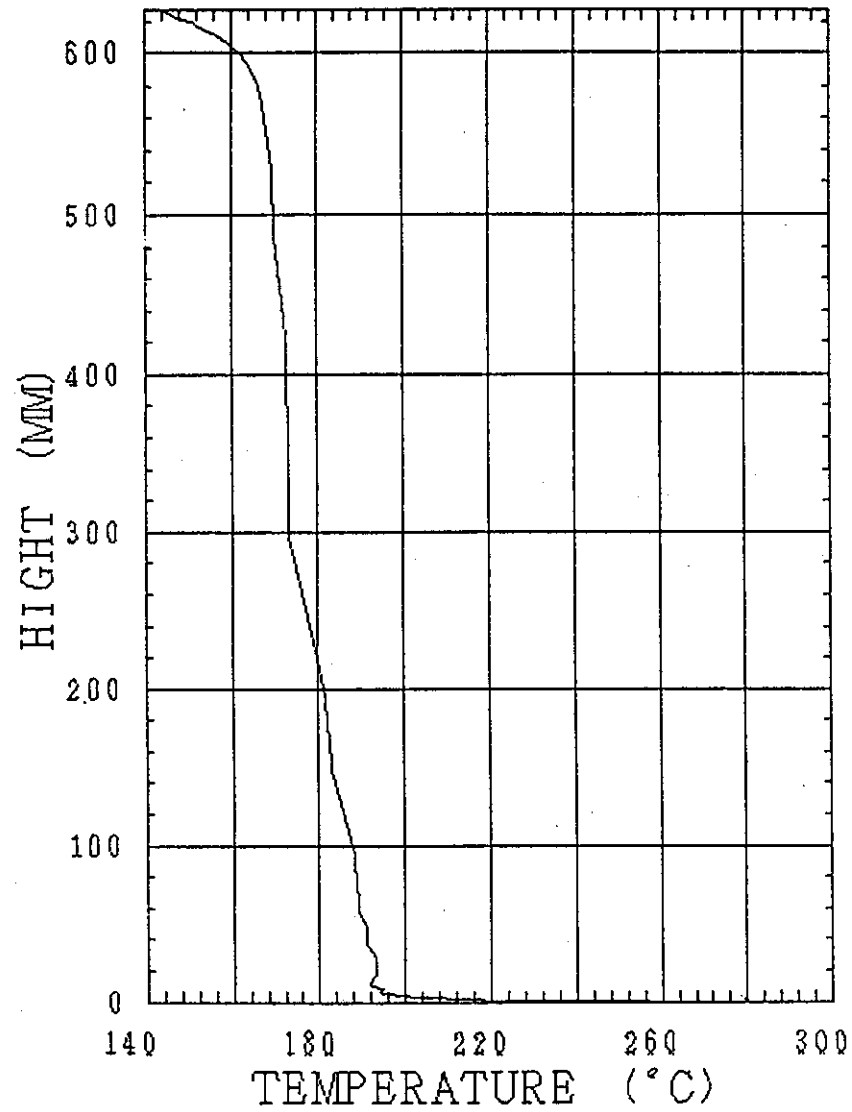


Fig. 6 Temperature Distributions in the POT M (Sodium Surface : 295°C)

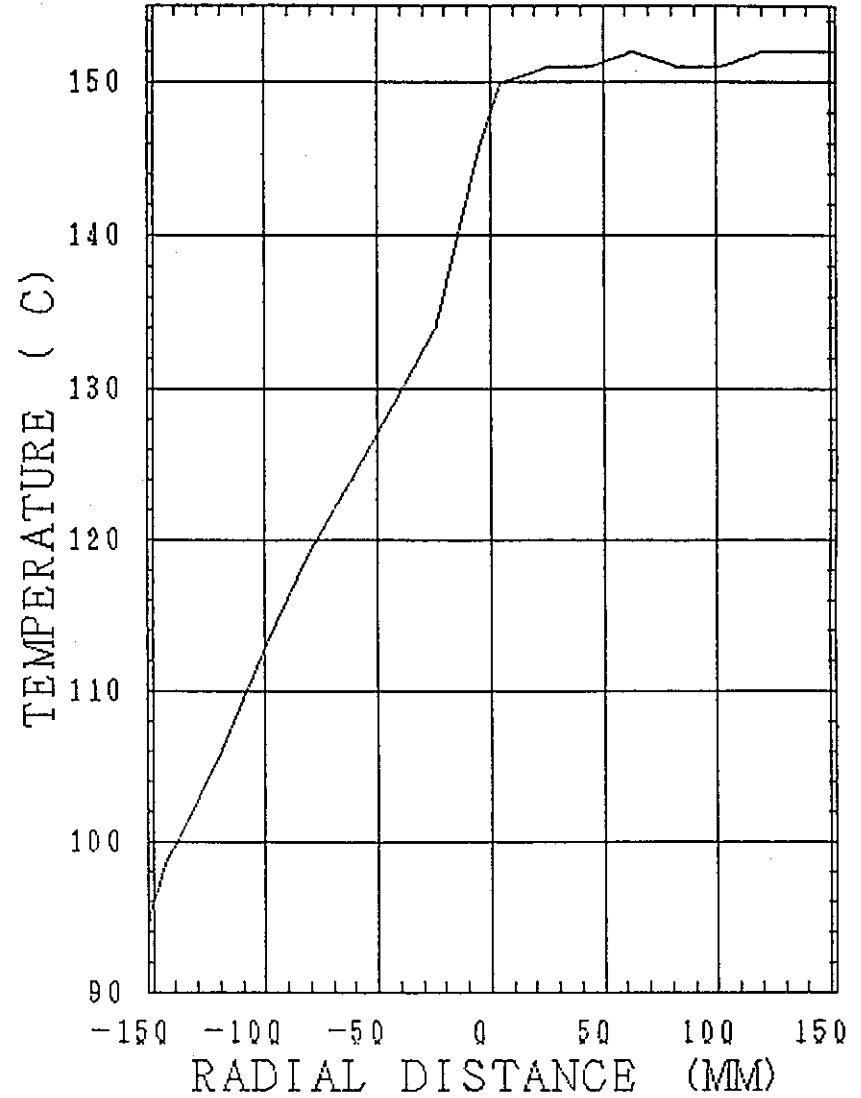
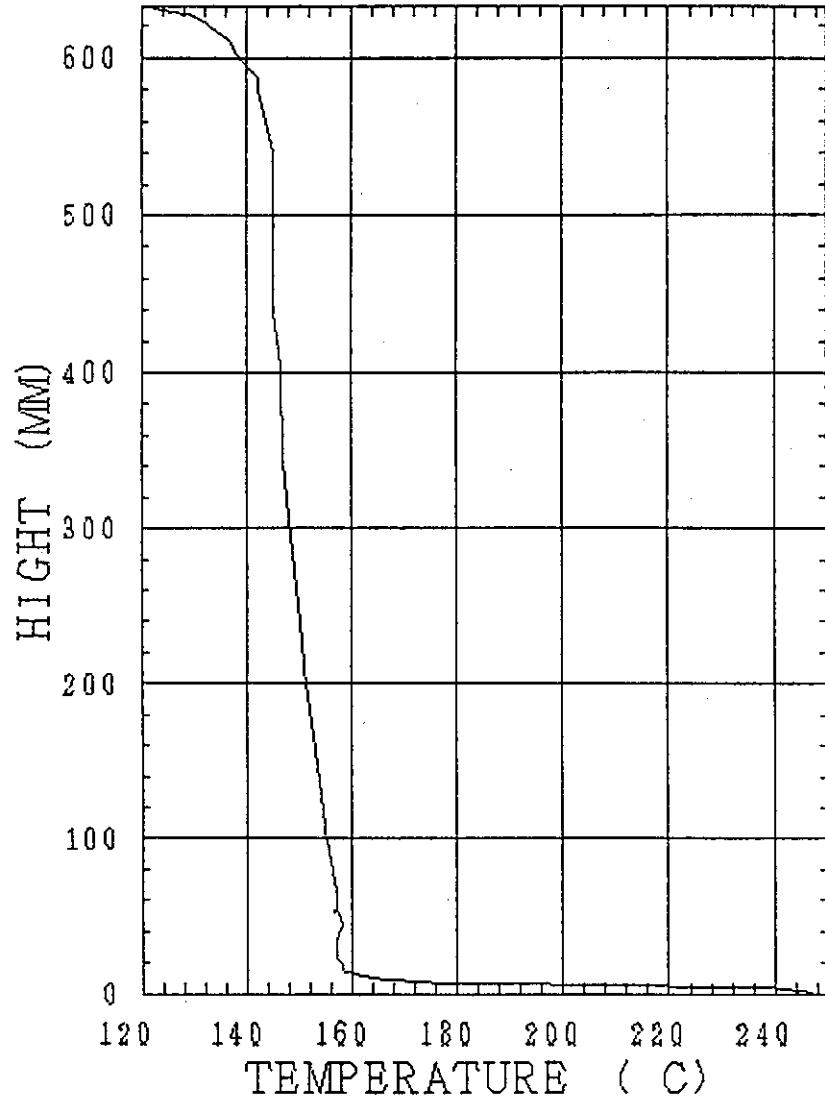


Fig. 7 Temperature Distributions in the POT M (Sodium Surface : 248°C)

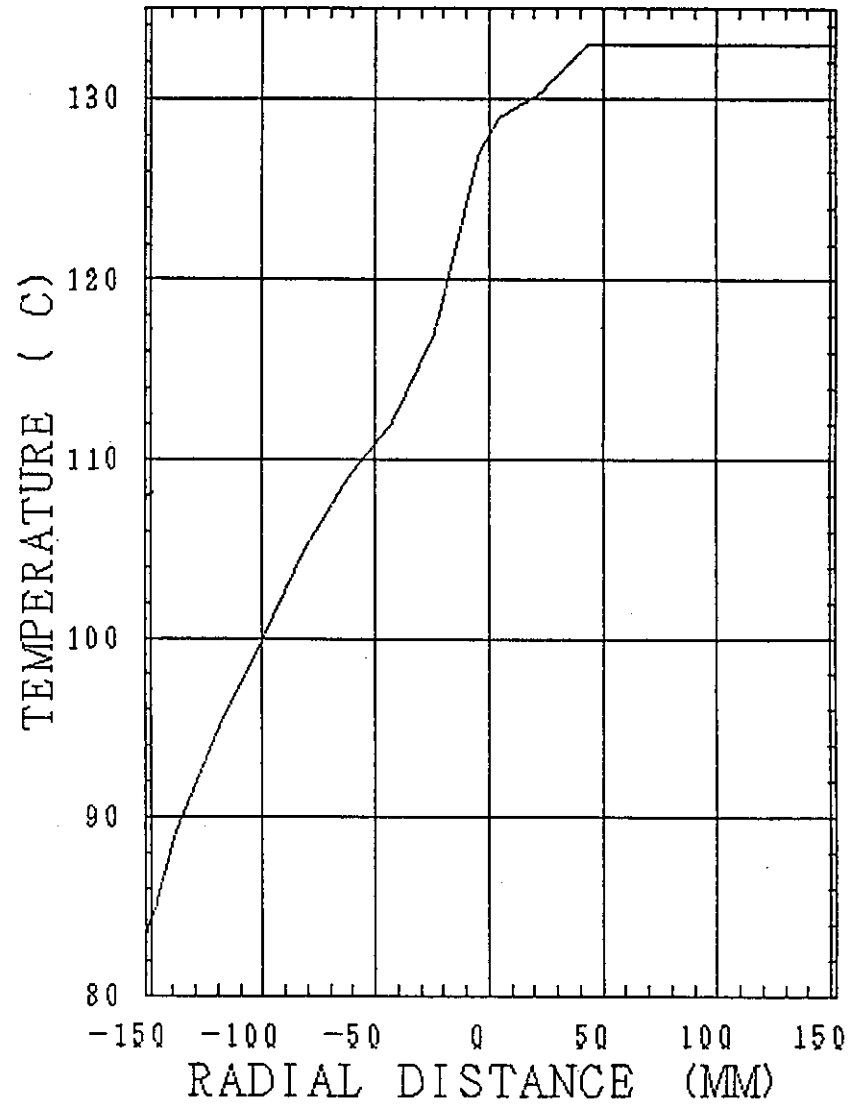
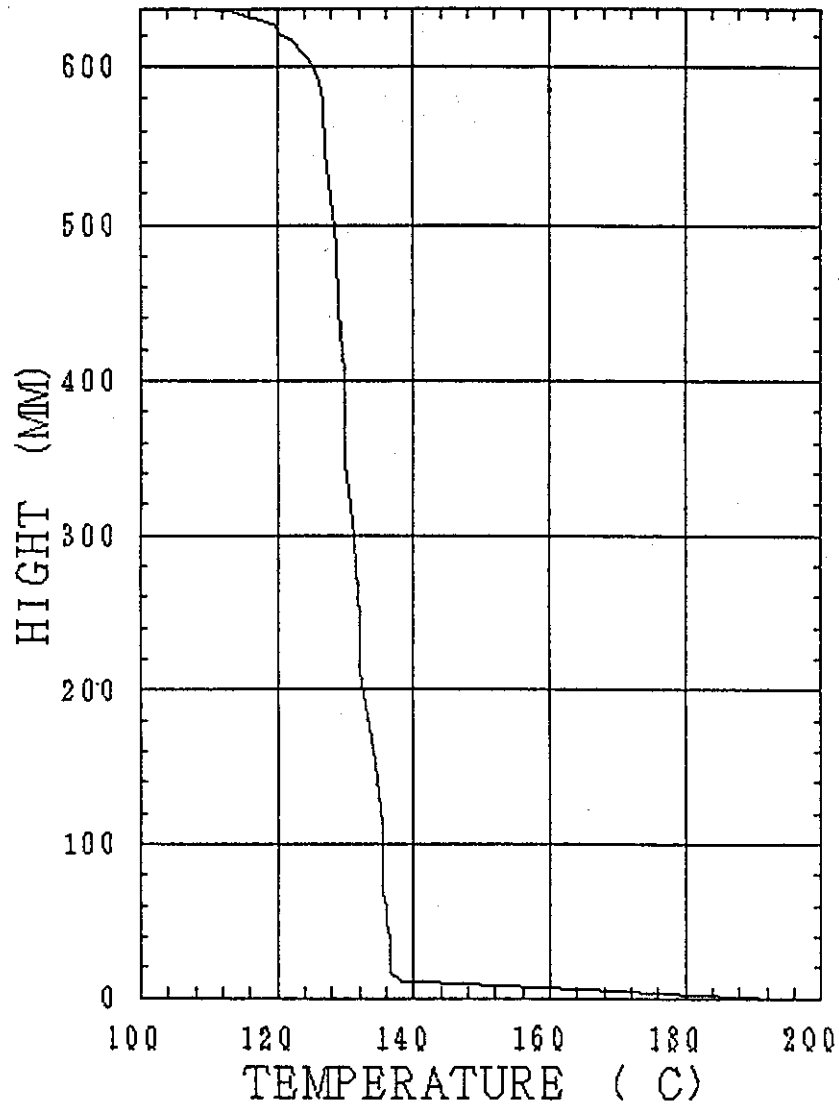


Fig. 8 Temperature Distributions in the POT M (Sodium Surface : 197°C)

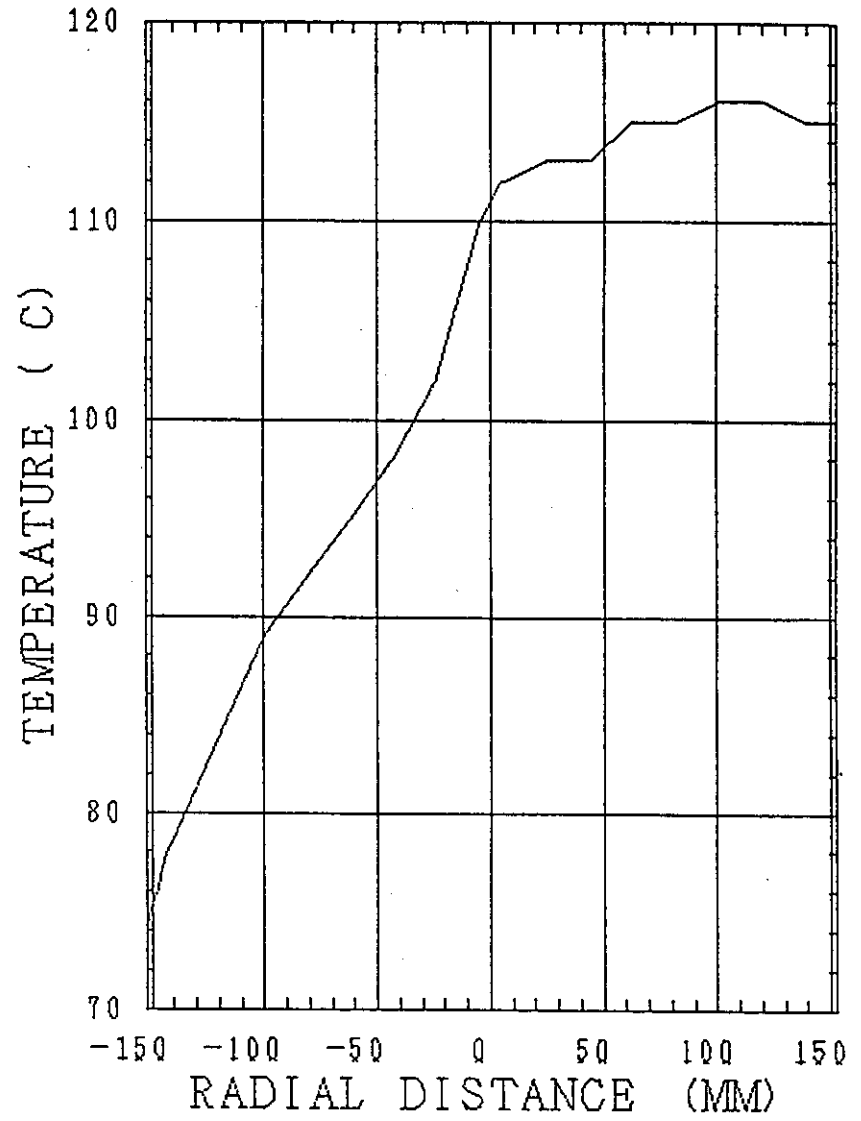
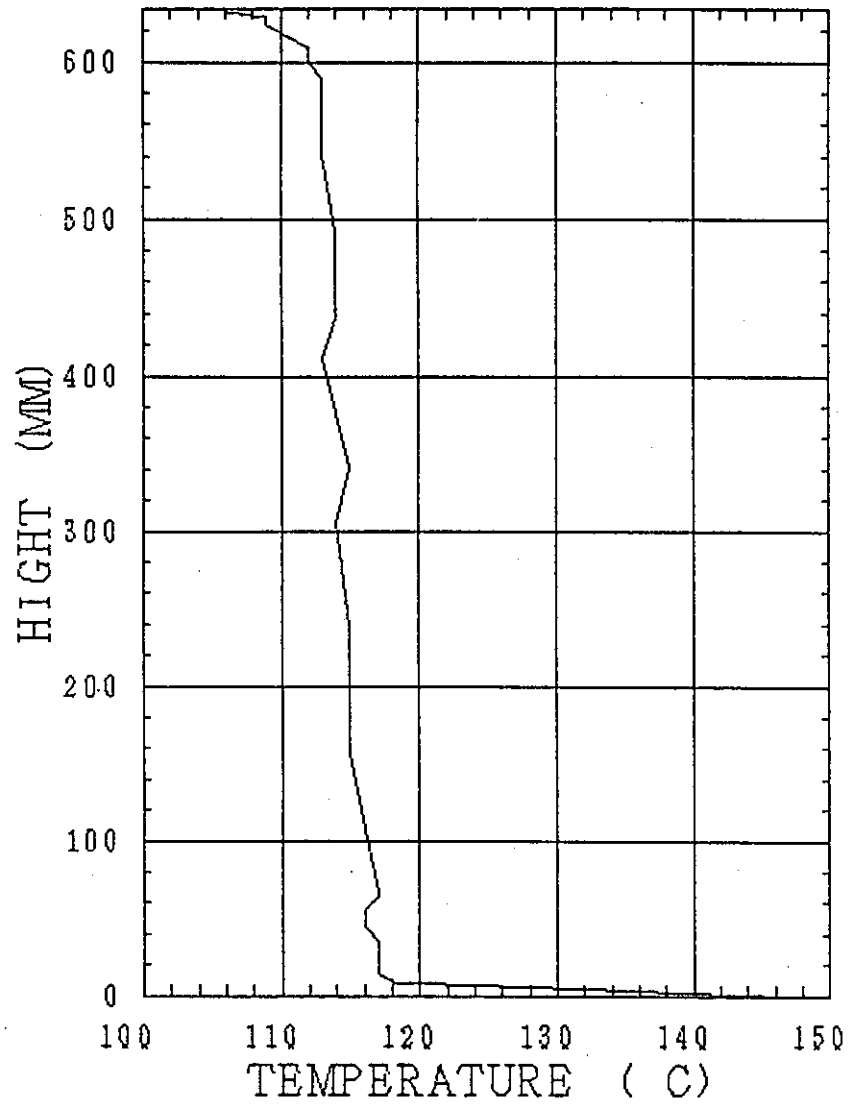


Fig. 9 Temperature Distributions in the POT M (Sodium Surface : 149°C)

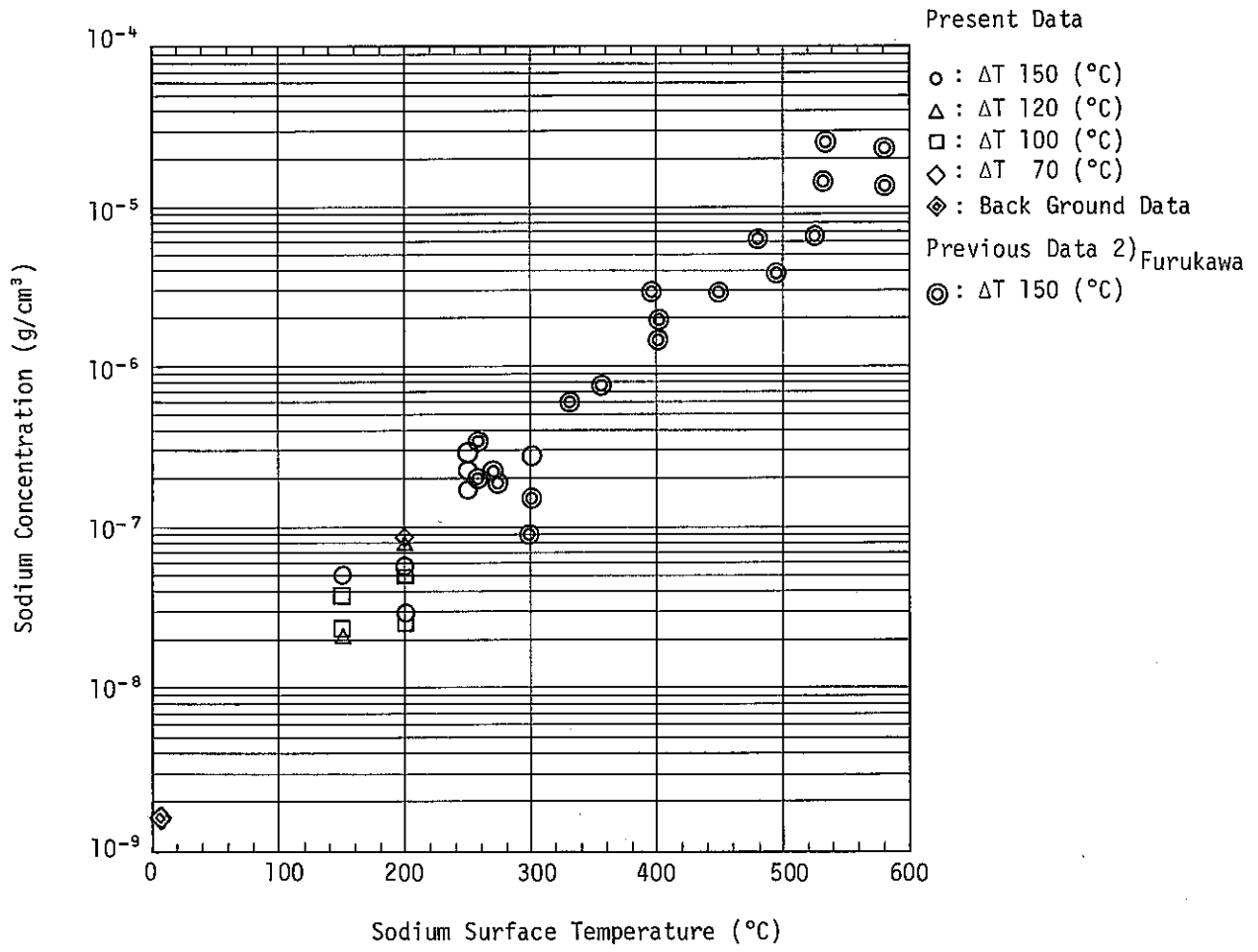


Fig. 10 Mist Concentration vs. Sodium Surface Temperature