

JAERI-Tech
99-017



JP9950149



RELAP5コードによる
水銀流動基礎実験装置の過渡解析
(第2報 水銀物性値の整備と試解析)

1999年3月

木下秀孝・神永雅紀・日野竜太郎

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

R E L A P 5 コードによる水銀流動基礎実験装置の過渡解析
(第 2 報 水銀物性値の整備と試解析)

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
木下 秀孝・神永 雅紀・日野竜太郎

(1999 年 2 月 1 日受理)

原研の中性子科学研究計画を推進するために、5 MW核破碎ターゲットシステムの概念設計を実用的な中性子性能と安全性の確保の観点から進めている。安全性に関しては、ターゲットシステムの異常事象時の過渡挙動を把握することが重要であり、軽水炉で実績のある R E L A P 5 コードを用いて、水銀ターゲットシステムの安全解析を行うこととした。本報告では、水銀ターゲットシステムの解析を行えるように、水に対して開発された R E L A P 5 への水銀物性値の組み込みと試解析の結果について述べる。解析は水銀流動基礎実験装置を単純モデル化して、定常状態を模擬した外乱なしの状態で行い、正常に解析できることを確認した。

Transient Analysis of Mercury Experimental Loop using RELAP5 Code
(2nd Report, Programming of mercury properties and test analysis)

Hidetaka KINOSHITA, Masanori KAMINAGA and Ryutaro HINO

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 1999)

To promote the Neutron Science Project of the Japan Atomic Energy Research Institute, the conceptual design of a 5MW-spallation mercury target system is in progress with a view to obtaining practical neutron performance while at the same time maintaining highest levels of safety. To construct a safety system, it is important to comprehend transient behaviors during abnormal events generated in the target system. The RELAP5 code, which has a proven record in producing excellent results for safety analysis of light water reactors (LWRs), was selected to conduct the safety analysis of the mercury target system. Since the RELAP5 code was originally developed to analyze the transient behavior in LWRs, it is necessary to incorporate mercury properties into the code in order to properly analyze the mercury target system. This paper describes the programming of mercury properties into the RELAP5 code and the analytical results obtained with a simplified model of the mercury experimental loop. During the analysis, no trouble was encountered under a null transient state accompanied by a steady-state condition.

Keywords : Spallation Target, Safety Analysis, RELAP5, Mercury Loop, Modeling, Mercury Properties, Test Analysis

目 次

1. はじめに.....	1
2. RELAP5用蒸気表データジェネレータの作成.....	2
3. 熱伝導率、粘性係数及び表面張力.....	25
4. 蒸気表関連サブルーチン.....	28
5. RELAP5用水銀テストループデータの作成と試解析.....	28
6. まとめ.....	33
参考文献.....	34
謝 辞.....	34

Contents

1. Introduction.....	1
2. Steam Table Generator for RELAP5.....	2
3. Thermal Conductivity, Viscosity and Surface Tension.....	25
4. Subroutine about Steam Table.....	28
5. Input Data of Mercury Experimental Loop and Test Analysis.....	28
6. Concluding Remarks.....	33
References.....	34
Acknowledgement.....	34

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究所では、近年の中性子利用研究分野における中性子の需要の増大に応えるため、次世代の中性子源として大強度陽子加速器から最高 5MW のパルス状陽子ビームを水銀等のターゲットに入射して中性子を発生させる核破碎中性子源の開発を進めている。

5 MW陽子入射(1.5 GeV、1.0 mA)による核破碎で中性子を発生させるターゲットは、水銀ターゲットをメインとし、バックアップに個体ターゲットを準備する計画である。ターゲット及びその循環系（水銀ターゲットシステム）の安全性を確立するためには、運転中に想定されるあらゆる事象に対して、安全保護系統の動作により事象が安全に収束することを示す必要がある。しかし、水銀を用いたシステムに対する熱流動安全解析コードは現在のところ確立されていないため、コードの整備が急務となっている。そこで、水銀ターゲットと、重水冷却固体ターゲット及びそれらの循環系の安全解析を同一コードで行えるよう、軽水炉で実績のある RELAP5 コードを用いることとした。

既報⁽¹⁾水銀ターゲットシステムのモデル化と水による予備解析結果について報告した。本報告では、RELAP5 に水銀物性値を組み込み、既報で用いた水銀流動基礎実験装置のモデル体系を踏まえて試解析した結果について述べる。

2. RELAP5 用蒸気表データジェネレータの作成

RELAP5 コードは、その実行初期にバイナリで作成された蒸気表データを読み込み、その後これを用いて水／蒸気の状態量を求める。水銀を取り扱う場合、この蒸気表データを作成する必要がある。Table 1 に水銀の飽和表^(2,3)を、Table 2 に水銀(気相)の物性⁽²⁾を、Table 3、Table 4 に作成した蒸気表ジェネレータの入出力の内容を示す。RELAP5 コードで使用される蒸気表データは Table 4 に示すように、

- ・ 温度に対する飽和値として、

飽和圧力(Pa)
 液相比体積(m³/kg)
 液相比内部エネルギー(J/kg)
 液相熱膨張率(1/K)
 液相圧縮率(1/Pa)
 液相定圧比熱(J/kg·K)
 液相エンントロピ(J/kg·K)
 気相比体積(m³/kg)
 気相比内部エネルギー(J/kg)
 気相熱膨張率(1/K)
 気相圧縮率(1/Pa)
 気相定圧比熱(J/kg·K)
 気相エンントロピ(J/kg·K)

- ・ 圧力に対する飽和値として、

飽和温度(K)
 液相比体積(m³/kg)
 液相比内部エネルギー(J/kg)
 液相熱膨張率(1/K)
 液相圧縮率(1/Pa)
 液相定圧比熱(J/kg·K)
 液相エンントロピ(J/kg·K)
 気相比体積(m³/kg)
 気相比内部エネルギー(J/kg)
 気相熱膨張率(1/K)

気相圧縮率(1/Pa)
 気相定圧比熱(J/kg·K)
 気相エントロピ(J/kg·K)

- ・圧力及び温度に対する単相の値として、

比体積(m³/kg)
 比内部エネルギー(J/kg)
 熱膨張率(1/K)
 圧縮率(1/Pa)
 定圧比熱(J/kg·K)
 エントロピ(J/kg·K)

が必要となる。以下に各値の作成方法を示す。

2.1 溫度或いは圧力に対する飽和値

Fig. 2.1～Fig. 2.11 に水銀の各熱物性飽和値を温度及び圧力に対して示す。基本的には Table 1 に示された値をテーブル形式のデータとして蒸気表ジェネレータプログラムに読み込み、各値を温度又は圧力で内挿して作成した。但し Table 1 に無い値は以下のように作成した。

- ・液相及び気相の比内部エネルギー

比内部エネルギー(u)はエンタルピ(h)、圧力(p)及び比体積(v)より以下のように算出した。

$$u = h - p v$$

- ・気相熱膨張率、気相圧縮率

Table 2 より、圧力一定で温度が変化した場合の比体積の変化と温度一定で圧力が変化した場合の比体積の変化より作成した。

又、温度を基にして得られる飽和圧力と、その逆に圧力より得られる飽和温度はそれぞれ一致しなければならないが、Table 1 を単にテーブル内挿した場合は誤差が生じるため、飽和圧力をフィッティングする以下の近似式を導出し、飽和温度及び飽和圧力を求めた。

$$P_{\text{sat}} = \exp(29.311972376909 - 7511.9042227636/T_{\text{sat}} - 0.550956392109816 \cdot \log(1/T_{\text{sat}}))$$

なお、 T_{sat} は上式を基に、 P_{sat} よりニュートンラプソン法による収束計算で求められる。

2.2 溫度と圧力に対する単相の値

Fig. 2.12～Fig. 2.16 に水銀の単相での各熱物性値を示す。液相に関する比体積は次式を用いて求めた。比体積以外の値に関しては、現在情報が得られていないため、温度に対する飽和液の物性⁽⁴⁾を用いた。

$$V(T, P) = V(T, 0) \{1 - C \log((B+P)/B)\} \quad (\text{cm}^3/\text{mol})$$

ここで、

T : 温度(°C)

P : 圧力(kbar)

$$V(T, 0) = aT + b$$

$$B = B_0 T + B_1$$

$$C = C_0 T + C_1$$

上記の各係数は水銀に対して以下のデータが設定されている。

$$a = 2.695 \times 10^{-3} \quad (\text{cm}^3/\text{mol°C})$$

$$b = 14.754 \quad (\text{cm}^3/\text{mol})$$

$$C_0 = 4.349 \times 10^{-5} \quad (\text{°C}^{-1})$$

$$C_1 = 2.084 \times 10^{-2}$$

$$B_0 = 7.586 \times 10^{-4} \quad (\text{kbar}/\text{°C})$$

$$B_1 = 4.811 \quad (\text{kbar})$$

なお水銀1 mol の質量は 200.6g である。

又、液相比エンタルピは、Table 1 に示した飽和表での比体積と比エンタルピの関係を採用し、以下の比体積による近似式により求めた。

$$h = -1.27041 \times 10^{14}v^2 + 2.91106 \times 10^{10}v - 1.41071 \times 10^6$$

気相に関しては、表2に示すように、比体積、比エンタルピ、比エントロピに関しては温度及び圧力依存の情報が得られているため、これを関数フィッティングして用いた。定圧比熱、圧縮率及び熱膨張率に関しては、温度に対する飽和蒸気の値を用いた。以下にフィッティング式を示す。

比エンタルピ

$$h = (0.10371907548T + 349.71072740) \times 1000 \quad [\text{j/kg}]$$

比体積

$$v = (4.1487022515 \times 10^{-4}T + 0.11253217858) / (P \times 10^{-5}) \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

比エントロピ

$$s = (-1.11949 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot 10^{-5} + 1.08931 \cdot 10^{-4}T + 0.928327) \times 1.0824k \times (P \cdot 10^{-5})^{-0.0388} / 1.0824 \times 1000 \quad [\text{j/kg} \cdot \text{K}]$$

ここで

T : 温度 [K]

P : 圧力 [Pa]

を表す。

Table 1 Properties of Mercury at saturation (1/2)

温度 (K)	飽和圧力 (Pa)	液相比体積 (m ³ /kg)	気相比体積 (m ³ /kg)	液相体膨張率 (1/Pa)	液相圧縮率 (1/Pa)	液相比熱 (J/kg K)	気相比熱 (J/kg K)	液相エントルピー (J/kg K)	気相エントルピー (J/kg K)	液相定圧比熱 (J/kg K)	気相定圧比熱 (J/kg K)	表面張力 (N/m)
2.73150E+02	2.72800E-01	7.35563E-05	4.15000E-05	1.81445E-04	3.91800E-11	4.30740E+04	3.49891E+05	3.66420E+02	1.48967E-03	1.40400E-02	1.03620E+02	4.886E-01
2.83150E+02	7.10100E-01	7.38898E-05	1.65300E+05	1.81265E-04	3.96600E-11	4.44760E+04	3.50927E+05	3.71460E+02	1.45375E+03	1.40000E-02	1.03620E+02	4.865E-01
2.93150E+02	1.72900E+00	7.38234E-05	7.02600E+04	1.81103E-04	4.01300E-11	4.58740E+04	3.51964E-05	3.76310E+02	1.42045E+03	1.39600E-02	1.03620E+02	4.845E-01
3.03150E+02	3.98800E+00	7.39572E-05	3.16700E+04	1.80980E-04	4.06100E-11	4.72680E+04	3.53000E-05	3.80990E+02	1.38951E-03	1.39200E-02	1.03620E+02	4.824E-01
3.13150E+02	8.62600E+00	7.40911E-05	1.50500E+04	1.80836E-04	4.10500E-11	4.85900E+04	3.55036E+05	3.86038E+02	1.38900E-03	1.38900E-02	1.03620E+02	4.804E-01
3.23150E+02	1.78600E+01	7.42525E-05	7.50100E+03	1.80731E-04	4.15800E-11	5.00460E+04	3.56108E+05	3.89860E+02	1.33378E+03	1.38500E-02	1.03620E+02	4.783E-01
3.33150E+02	3.53600E+01	7.43594E-05	3.90500E+03	1.80647E-04	4.20800E-11	5.14300E+04	3.561108E+05	3.94080E+02	1.30862E+03	1.38200E+02	1.03620E+02	4.763E-01
3.43150E+02	6.72400E+01	7.44938E-05	2.11500E+03	1.80583E-04	4.25700E-11	5.28100E+04	3.571145E+05	3.98160E+02	1.28505E+03	1.37900E+02	1.03620E+02	4.742E-01
3.53150E+02	1.23200E+02	7.46285E-05	1.18800E+03	1.80540E-04	4.30800E-11	5.41880E+04	3.58181E+05	4.02120E+02	1.26292E+03	1.37600E+02	1.03620E+02	4.722E-01
3.63150E+02	2.18200E+02	7.47633E-05	6.89900E+02	1.80518E-04	4.35900E-11	5.56530E+04	3.59217E+05	4.05960E+02	1.24213E+03	1.37400E+02	1.03620E+02	4.701E-01
3.73150E+02	3.74500E+02	7.48984E-05	4.13000E+02	1.80518E-04	4.41000E-11	5.63360E+04	3.60253E+05	4.08690E+02	1.22256E+03	1.37100E+02	1.03620E+02	4.681E-01
3.83150E+02	6.24700E+02	7.50331E-05	2.54200E+02	1.80541E-04	4.46200E-11	5.85600E+04	3.61289E+05	4.13310E+02	1.20408E+03	1.36900E+02	1.03620E+02	4.660E-01
3.93150E+02	1.01500E+03	7.51693E-05	1.61600E+02	1.80587E-04	4.51500E-11	5.98740E+04	3.62326E+05	4.16840E+02	1.18665E+03	1.36700E+02	1.03620E+02	4.640E-01
4.03150E+02	1.60800E+03	7.53052E-05	1.03900E+02	1.80656E-04	4.56800E-11	6.10390E+04	3.63362E+05	4.20270E+02	1.17017E+03	1.36500E+02	1.03620E+02	4.620E-01
4.13150E+02	2.49100E+03	7.54415E-05	6.87500E+01	1.80748E-04	4.62200E-11	6.24030E+04	3.64397E+05	4.23610E+02	1.15456E+03	1.36300E+02	1.03620E+02	4.619E-01
4.23150E+02	3.77300E+03	7.55780E-05	4.64300E+01	1.80865E-04	4.67600E-11	6.31650E+04	3.65433E+05	4.26810E+02	1.13978E+03	1.36100E+02	1.03620E+02	4.599E-01
4.33150E+02	5.61800E+03	7.57148E-05	3.19600E+01	1.81007E-04	4.73100E-11	6.51250E+04	3.66469E+05	4.30040E+02	1.12575E+03	1.36000E+02	1.03620E+02	4.578E-01
4.43150E+02	8.20400E+03	7.58520E-05	2.23900E+01	1.81173E-04	4.78700E-11	6.68480E+04	3.67504E+05	4.33140E+02	1.11242E+03	1.35800E+02	1.03620E+02	4.558E-01
4.53150E+02	1.17800E+04	7.59891E-05	1.59500E+01	1.81365E-04	4.84400E-11	6.78740E+04	3.68539E+05	4.36740E+02	1.09971E+03	1.35600E+02	1.03620E+02	4.537E-01
4.63150E+02	1.66400E+04	7.61277E-05	1.15400E+01	1.81563E-04	4.90100E-11	6.91980E+04	3.69574E+05	4.39130E+02	1.07619E+03	1.35600E+02	1.03620E+02	4.517E-01
4.73150E+02	2.31500E+04	7.62662E-05	8.46900E+00	1.81827E-04	4.96600E-11	7.05690E+04	3.70669E+05	4.42030E+02	1.07861E+03	1.35500E+02	1.03620E+02	4.496E-01
4.83150E+02	3.17700E+04	7.64051E-05	6.30100E+00	1.82097E-04	5.01900E-11	7.19080E+04	3.71642E+05	4.44860E+02	1.06652E+03	1.35400E+02	1.03620E+02	4.475E-01
4.93150E+02	4.30400E+04	7.65444E-05	4.74800E+00	1.82395E-04	5.07800E-11	7.32610E+04	3.72676E+05	4.47630E+02	1.05478E+03	1.35300E+02	1.03620E+02	4.454E-01
5.03150E+02	5.75800E+04	7.66843E-05	3.62100E+00	1.82720E-04	5.13900E-11	7.46140E+04	3.73708E+05	4.50350E+02	1.04479E+03	1.35300E+02	1.03620E+02	4.434E-01
5.13150E+02	7.61400E+04	7.68247E-05	2.79300E+00	1.83073E-04	5.20100E-11	7.58670E+04	3.74740E+05	4.53010E+02	1.03521E+03	1.35200E+02	1.03620E+02	4.413E-01
5.23150E+02	9.95900E+04	7.70565E-05	2.17600E+00	1.83454E-04	5.26300E-11	7.73190E+04	3.75711E+05	4.55620E+02	1.02611E+03	1.35200E+02	1.03620E+02	4.392E-01
5.33150E+02	1.25920E+05	7.71320E+00	1.71320E+00	1.83864E-04	5.32300E-11	7.88710E+04	3.76809E+05	4.58180E+02	1.01737E+03	1.35200E+02	1.03620E+02	4.371E-01
5.43150E+02	1.65270E+05	7.72491E+00	1.36130E+00	1.84303E-04	5.39100E-11	8.00230E+04	3.77829E+05	4.60690E+02	1.00899E+03	1.35200E+02	1.03620E+02	4.350E-01
5.53150E+02	2.08930E+05	7.73791E+00	1.09120E+00	1.84771E-04	5.45400E-11	8.13750E+04	3.78856E+05	4.63160E+02	1.00095E+03	1.35200E+02	1.03620E+02	4.329E-01
5.63150E+02	2.64350E+05	7.75351E+00	8.82130E+00	1.85268E-04	5.52300E-11	8.22780E+04	3.79880E+05	4.65580E+02	9.93240E+02	1.35200E+02	1.03620E+02	4.30810E+02
5.73150E+02	3.30150E+05	7.76790E+00	7.18740E+00	1.85796E-04	5.59000E-11	8.40800E+04	3.80904E+05	4.67196E+02	9.85840E+02	1.35300E+02	1.03620E+02	4.28730E+02
5.83150E+02	4.09100E+05	7.78230E+00	5.90020E-05	1.86354E-04	5.65900E-11	8.54340E+04	3.81925E+05	4.70300E+02	9.78730E+02	1.35300E+02	1.03620E+02	4.26650E+02
5.93150E+02	5.03200E+05	7.79690E+00	4.87790E-05	1.86943E-04	5.72800E-11	8.67880E+04	3.82944E+05	4.72600E+02	9.71900E+02	1.35400E+02	1.03620E+02	4.24570E+02
6.03150E+02	6.14600E+05	7.81150E+00	4.06000E-05	1.87563E-04	5.79800E-11	8.814430E+04	3.83980E+05	4.74870E+02	9.65320E+02	1.35500E+02	1.03620E+02	4.22480E+02
6.13150E+02	7.45670E+05	7.82620E+00	3.40080E-05	1.88213E-04	5.87100E-11	8.94990E+04	3.84973E+05	4.77090E+02	9.58990E+02	1.35600E+02	1.03620E+02	4.20390E+02
6.23150E+02	8.98960E+05	7.84090E+00	2.86600E-05	1.88896E-04	5.94400E-11	9.08560E+04	3.85984E+05	4.79290E+02	9.52890E+02	1.35700E+02	1.03620E+02	4.18290E+02
6.33150E+02	1.07720E+06	7.85580E+00	2.42910E-05	1.89610E-04	6.02000E-11	9.22150E+04	3.86991E+05	4.81450E+02	9.47020E+02	1.35800E+02	1.03620E+02	4.16190E+02
6.43150E+02	1.28340E+06	7.87070E+00	2.07020E-05	1.90360E-04	6.10000E-11	9.35750E+04	3.87994E+05	4.82900E+02	9.41350E+02	1.35900E+02	1.03620E+02	4.14070E+02
6.53150E+02	1.52070E+06	7.88580E+00	1.77350E-05	1.91140E-04	6.17000E-11	9.49370E+04	3.88994E+05	4.84680E+02	9.35680E+02	1.36100E+02	1.03620E+02	4.11960E+02
6.63150E+02	1.79250E+06	7.90080E+00	1.52680E-05	1.91950E-04	6.25000E-11	9.63000E+04	3.89889E+05	4.87740E+02	9.30610E+02	1.36200E+02	1.03620E+02	4.09550E+02
6.73150E+02	2.10240E+06	7.91600E+00	1.32070E-05	1.92790E-04	6.33000E-11	9.76660E+04	3.90980E+05	4.89780E+02	9.25520E+02	1.36400E+02	1.03620E+02	4.07450E+02

Table 1 Properties of Mercury at saturation (2 / 2)

温度 (K)	飽和圧力 (Pa)	液相比体積 (m ³ /kg)	気相比体積 (m ³ /kg)	液相体膨張率 (1/K)	液相圧縮率 (1/Pa)	液相比エンタルピ (J/kg)	液相比エントロピー [*] (J/kg·K)	氣相比エンタルピ (J/kg)	氣相比エントロピー [*] (J/kg·K)	液相定圧比熱 (J/kg·K)	氣相定圧比熱 (J/kg·K)	表面張力 (N/m)
6.83150E+02	2.45400E+06	7.93130E-05	1.14760E-01	6.41000E-11	9.90330E-04	3.91966E-05	4.91800E+02	9.20590E-02	1.36600E+02	1.04670E+02	1.04790E+02	1.04790E+02
6.93150E+02	2.65200E+06	7.94670E-05	1.00140E-01	6.49800E-04	6.49800E-11	1.00403E-05	3.92947E-05	4.92780E+02	9.15830E-02	1.37000E+02	1.04920E+02	1.04920E+02
7.03150E+02	3.29900E+06	7.96220E-05	8.77500E-02	1.95530E-04	6.58000E-11	1.01775E-05	3.93923E-05	4.95740E+02	9.11230E-02	1.37700E+02	1.06770E+02	1.06770E+02
7.13150E+02	3.80100E+06	7.97780E-05	7.71900E-02	1.96510E-04	6.68000E-11	1.03150E-05	3.94893E-05	4.97680E+02	9.06770E-02	1.38700E+02	1.082450E+02	1.082450E+02
7.23150E+02	4.36200E+06	7.99350E-05	6.03900E-02	1.97520E-04	6.75000E-11	1.04528E-05	3.95858E-05	4.98590E+02	9.02450E-02	1.39700E+02	1.08210E+02	1.08210E+02
7.33150E+02	4.98600E+06	8.00940E-05	6.03900E-02	1.98560E-04	6.84000E-11	1.05908E-05	3.96816E-05	5.01480E+02	9.08700E-02	1.37800E+02	1.053370E+02	1.053370E+02
7.43150E+02	5.67900E+06	8.02520E-05	5.36900E-02	1.99640E-04	6.93000E-11	1.07292E-05	3.97776E-05	5.03350E+02	8.94220E-02	1.38000E+02	1.05540E+02	1.05540E+02
7.53150E+02	6.44600E+06	8.04130E-05	4.78900E-02	2.00760E-04	7.02000E-11	1.08679E-05	3.98711E-05	5.05190E+02	8.90290E-02	1.38300E+02	1.05720E+02	1.05720E+02
7.63150E+02	7.29200E+06	8.05740E-05	4.28500E-02	2.01910E-04	7.12000E-11	1.10069E-05	3.99649E-05	5.07020E+02	8.86470E-02	1.38600E+02	1.05920E+02	1.05920E+02
7.73150E+02	8.22200E+06	8.07400E-05	3.84600E-02	2.03100E-04	7.20000E-11	1.11463E-05	4.00579E-05	5.08820E+02	8.82770E-02	1.38900E+02	1.06120E+02	1.06120E+02
7.83150E+02	9.24200E+06	8.09000E-05	3.46200E-02	2.04300E-04	7.30000E-11	1.12861E-05	4.01501E-05	5.10610E+02	8.79170E-02	1.39200E+02	1.05340E+02	1.05340E+02
7.93150E+02	1.03580E+07	8.11060E-05	3.12400E-02	2.05600E-04	7.40000E-11	1.14262E-05	4.02415E-05	5.12380E+02	8.75560E-02	1.39600E+02	1.05570E+02	1.05570E+02
8.03150E+02	1.15760E+07	8.12300E-05	2.82700E-02	2.06900E-04	7.50000E-11	1.15668E-05	4.03321E-05	5.14120E+02	8.72280E-02	1.39900E+02	1.06810E+02	1.06810E+02
8.13150E+02	1.29010E+07	8.14000E-05	2.56500E-02	2.08200E-04	7.60000E-11	1.17078E-05	4.04218E-05	5.15860E+02	8.68980E-02	1.40300E+02	1.07070E+02	1.07070E+02
8.23150E+02	1.43400E+07	8.15700E-05	2.33300E-02	2.09700E-04	7.70000E-11	1.18492E-05	4.05106E-05	5.17570E+02	8.65760E-02	1.40700E+02	1.07340E+02	1.07340E+02
8.33150E+02	1.58900E+07	8.17400E-05	2.12600E-02	2.10900E-04	7.80000E-11	1.19911E-05	4.05895E-05	5.19270E+02	8.62630E-02	1.41000E+02	1.07620E+02	1.07620E+02
8.43150E+02	1.75840E+07	8.19100E-05	1.94260E-02	2.12400E-04	7.90000E-11	1.21335E-05	4.06885E-05	5.20950E+02	8.59590E-02	1.41400E+02	1.07910E+02	1.07910E+02
8.53150E+02	1.94030E+07	8.20900E-05	1.77850E-02	2.13800E-04	8.00000E-11	1.22763E-05	4.07715E-05	5.228620E+02	8.56620E-02	1.41800E+02	1.08220E+02	1.08220E+02
8.63150E+02	2.13600E+07	8.22600E-05	1.63170E-02	2.15300E-04	8.20000E-11	1.24197E-05	4.08655E-05	5.24270E+02	8.53720E-02	1.42300E+02	1.08540E+02	1.08540E+02
8.73150E+02	2.34600E+07	8.24400E-05	1.50000E-02	2.16800E-04	8.30000E-11	1.25636E-05	4.09405E-05	5.25910E+02	8.50900E-02	1.42700E+02	1.08880E+02	1.08880E+02
8.83150E+02	2.57200E+07	8.26200E-05	1.38150E-02	2.18400E-04	8.40000E-11	1.27080E-05	4.10235E-05	5.27530E+02	8.48150E-02	1.43200E+02	1.09320E+02	1.09320E+02
8.93150E+02	2.81400E+07	8.28000E-05	1.27480E-02	2.20000E-04	8.50000E-11	1.28530E-05	4.11054E-05	5.29140E+02	8.45460E-02	1.43800E+02	1.09600E+02	1.09600E+02
9.03150E+02	3.07200E+07	8.30200E-05	1.17840E-02	2.21700E-04	8.60000E-11	1.29986E-05	4.11861E-05	5.30740E+02	8.42840E-02	1.44100E+02	1.09980E+02	1.09980E+02
9.13150E+02	3.34700E+07	8.31600E-05	1.09110E-02	2.23300E-04	8.80000E-11	1.31486E-05	4.12210E-05	5.32320E+02	8.40280E-02	1.44600E+02	1.10380E+02	1.10380E+02
9.23150E+02	3.64100E+07	8.33400E-05	9.25000E-03	2.25000E-04	9.00000E-11	1.32915E-05	4.13444E-05	5.33890E+02	8.37770E-02	1.45100E+02	1.10790E+02	1.10790E+02
9.33150E+02	3.95300E+07	8.35300E-05	8.40100E-03	2.27000E-04	9.00000E-11	1.34389E-05	4.14218E-05	5.35450E+02	8.35330E-02	1.45600E+02	1.11220E+02	1.11220E+02
9.43150E+02	4.28500E+07	8.37200E-05	7.87460E-03	2.29000E-04	9.20000E-11	1.35869E-05	4.14980E-05	5.37000E+02	8.32940E-02	1.46100E+02	1.11670E+02	1.11670E+02
9.53150E+02	4.65600E+07	8.39100E-05	8.15000E-03	2.30000E-04	9.30000E-11	1.37356E-05	4.15731E-05	5.38540E+02	8.30600E-02	1.46600E+02	1.12130E+02	1.12130E+02
9.63150E+02	5.00900E+07	8.41100E-05	7.60400E-03	2.32000E-04	9.40000E-11	1.38856E-05	4.16619E-05	5.40060E+02	8.28310E-02	1.47200E+02	1.12810E+02	1.12810E+02
9.73150E+02	5.40300E+07	8.43000E-05	7.10500E-03	2.34000E-04	9.60000E-11	1.40350E-05	4.17195E-05	5.41580E+02	8.26000E-02	1.47800E+02	1.13110E+02	1.13110E+02
9.83150E+02	5.82000E+07	8.45300E-05	6.64800E-03	2.36000E-04	9.70000E-11	1.41858E-05	4.17909E-05	5.43080E+02	8.23870E-02	1.48300E+02	1.13620E+02	1.13620E+02
9.93150E+02	6.25900E+07	8.46800E-05	6.22800E-03	2.38000E-04	9.90000E-11	1.43372E-05	4.18610E-05	5.44580E+02	8.21720E-02	1.48900E+02	1.14150E+02	1.14150E+02
1.003150E+03	6.72200E+07	8.48800E-05	5.84200E-03	2.40000E-04	1.00000E-10	1.44894E-05	4.19298E-05	5.46070E+02	8.19610E-02	1.49500E+02	1.14700E+02	1.14700E+02
1.013150E+03	7.21000E+07	8.50800E-05	5.48700E-03	2.42000E-04	1.02000E-10	1.46424E-05	4.19744E-05	5.47540E+02	8.17540E-02	1.50100E+02	1.15270E+02	1.15270E+02
1.023150E+03	7.72200E+07	8.55900E-05	5.15900E-03	2.44000E-04	1.03000E-10	1.47961E-05	4.20638E-05	5.49010E+02	8.15520E-02	1.50700E+02	1.15850E+02	1.15850E+02
1.033150E+03	8.26000E+07	8.55900E-05	4.85600E-03	2.46000E-04	1.05000E-10	1.48506E-05	4.21268E-05	5.50470E+02	8.13520E-02	1.51400E+02	1.16450E+02	1.16450E+02
1.043150E+03	8.82500E+07	8.57000E-05	4.57600E-03	2.48000E-04	1.06000E-10	1.49105E-05	4.21923E-05	5.51920E+02	8.11580E-02	1.52000E+02	1.17080E+02	1.17080E+02
1.053150E+03	9.41700E+07	8.59000E-05	4.31700E-03	2.50000E-04	1.08000E-10	1.50619E-05	4.22546E-05	5.53360E+02	8.09660E-02	1.52700E+02	1.17720E+02	1.17720E+02
1.063150E+03	1.00370E+08	8.61200E-05	4.07700E-03	2.52000E-04	1.10000E-10	1.54688E-05	4.23156E-05	5.54790E+02	8.07780E-02	1.53300E+02	1.18380E+02	1.18380E+02
1.073150E+03	1.06850E+08	8.63200E-05	3.85400E-03	2.54000E-04	1.13000E-10	1.55768E-05	4.23752E-05	5.56210E+02	8.05930E-02	1.54000E+02	1.19060E+02	1.19060E+02

Table 2 Thermodynamic Properties of Mercury Vapor (1/8)

<i>t</i> °C	v	<i>i</i>	s	v	<i>i</i>	s
$\rho=10^{-2}$ bar						
180	18.782	368.540	1.10652			
200	19.611	370.613	1.11100			
220	20.440	372.685	1.11529			
240	21.269	374.758	1.11941	4.2529	374.747	1.05268
260	22.098	376.831	1.12337	4.4188	376.820	1.05665
280	22.927	378.903	1.12719	4.5847	378.894	1.06047
300	23.756	380.976	1.13087	4.7506	380.967	1.06415
320	24.585	383.049	1.13442	4.9164	383.040	1.06770
340	25.414	385.121	1.13786	5.0822	385.113	1.07114
360	26.243	387.194	1.14118	5.2480	387.186	1.07446
380	27.072	389.266	1.14441	5.4139	389.259	1.07769
400	27.901	391.339	1.14753	5.5797	391.332	1.08082
420	28.730	393.411	1.15057	5.7455	393.405	1.08385
440	29.559	395.484	1.15352	5.9114	395.478	1.08680
460	30.388	397.556	1.15638	6.0772	397.551	1.08967
480	31.217	399.629	1.15917	6.2430	399.623	1.09246
500	32.046	401.702	1.16189	6.4088	401.696	1.09517
520	32.875	403.774	1.16453	6.5746	403.769	1.09782
540	33.704	405.847	1.16711	6.7405	405.842	1.10040
560	34.533	407.919	1.16963	6.9063	407.914	1.10292
580	35.362	409.992	1.17209	7.0721	409.987	1.10538
600	36.191	412.064	1.17449	7.2379	412.060	1.10778
620	37.020	414.137	1.17684	7.4037	414.132	1.11012
640	37.849	416.209	1.17913	7.5695	416.205	1.11242
660	38.678	418.282	1.18138	7.7353	418.278	1.11466
680	39.507	420.354	1.18357	7.9011	420.350	1.11685
700	40.336	422.427	1.18573	8.0670	422.423	1.11901
800	44.481	432.789	1.19586	8.8960	432.786	1.12915
900	48.926	443.152	1.20510	9.7250	443.149	1.13838
1000	52.771	453.514	1.21357	10.554	453.512	1.14686
1200	61.061	474.238	1.22869	12.212	474.237	1.16198
1400	69.351	494.963	1.24188	13.870	494.962	1.17517
1600	77.641	515.688	1.25358	15.528	515.687	1.18687
1800	85.931	536.413	1.26410	17.186	536.412	1.19739
2000	94.221	557.138	1.27364	18.844	557.137	1.20693
$\rho=10^{-1}$ bar						
260	2.2089	376.808	1.02790			
280	2.2919	378.882	1.03172	1.1455	378.358	1.00296
300	2.3748	380.956	1.03540	1.1870	380.933	1.00665
320	2.4578	383.029	1.03896	1.2285	383.008	1.01021
340	2.5407	385.103	1.04240	1.2700	385.083	1.01365
360	2.6237	381.177	1.04573	1.3115	387.158	1.01698
380	2.7066	389.250	1.04895	1.3530	389.232	1.02020
400	2.7895	391.323	1.05208	1.3944	391.306	1.02333
420	2.8725	393.397	1.05511	1.4359	393.381	1.02637
440	2.9554	395.470	1.05806	1.4774	395.454	1.02932
460	3.0383	397.543	1.06093	1.5188	397.528	1.03219
480	3.1212	399.616	1.06372	1.5603	399.602	1.03498
500	3.2042	401.689	1.06644	1.6018	401.676	1.03769
520	3.2811	403.762	1.06908	1.6433	403.750	1.04034
540	3.3700	405.835	1.07166	1.6878	405.823	1.04292
560	3.4529	407.908	1.07418	1.7262	407.896	1.04544
580	3.5358	409.981	1.07664	1.7677	409.970	1.04790
600	3.6187	412.054	1.07904	1.8092	412.043	1.05030
620	3.7017	414.127	1.08139	1.8506	414.116	1.05265
640	3.7846	416.200	1.08369	1.8921	416.190	1.05495
660	3.8675	418.273	1.08593	1.9336	418.263	1.05719
680	3.9504	420.346	1.08813	1.9750	420.336	1.05939
700	4.0333	422.418	1.09028	2.0165	422.409	1.06154
800	4.4479	432.782	1.10042	2.2238	432.774	1.07168
900	4.8624	443.145	1.10965	2.4111	443.139	1.08092
1000	5.2769	453.508	1.11813	2.6383	453.503	1.08939
1200	6.1060	474.234	1.13325	3.0529	474.229	1.10452
1400	6.9350	494.960	1.14644	3.4674	494.956	1.11771
1600	7.7640	515.636	1.15814	3.8819	515.682	1.12941
1800	8.5930	536.411	1.16865	4.2965	536.408	1.13992
2000	9.4220	557.136	1.11820	4.7110	557.133	1.14945

Table 2 Thermodynamic Properties of Mercury Vapor (2/8)

v: 比体積(m³/kg) i: エンタルビ(kJ/kg) s: エントロビ(kJ/kg·K)

<i>t</i> ,°C	v	i	s	v	i	s
$\rho=3 \cdot 10^{-1}$ bar						
300	0.79105	380.910	0.98982			
320	0.81873	382.987	0.99338	0.61385	382.966	0.98143
340	0.84641	385.063	0.99682	0.63462	385.043	0.98488
360	0.81408	387.139	1.00015	0.65538	387.120	0.98821
380	0.90175	339.214	1.00338	0.67614	389.196	0.99144
400	0.92942	391.289	1.00651	0.69690	391.272	0.99457
420	0.95708	393.364	1.00955	0.71766	393.348	0.99761
440	0.98474	395.439	1.01250	0.73841	395.424	1.00056
460	1.0124	397.514	1.01537	0.75916	397.499	1.00343
480	1.0401	399.588	1.01816	0.77991	399.574	1.00622
500	1.0677	401.662	1.02088	0.80066	401.649	1.00894
520	1.0954	403.737	1.02353	0.82140	403.724	1.01159
540	1.1230	405.811	1.02611	0.84215	405.798	1.01417
560	1.1507	407.885	1.02863	0.86289	407.873	1.01669
580	1.1783	409.958	1.03109	0.88363	409.947	1.01915
600	1.2060	412.032	1.03349	0.90437	412.021	1.02156
620	1.2336	414.106	1.03584	0.92511	414.095	1.02391
640	1.2613	416.179	1.03813	0.94585	416.169	1.02620
660	1.2889	418.253	1.04038	0.96659	418.243	1.02845
680	1.3161	420.326	1.04258	0.98733	420.317	1.03065
700	1.3442	422.400	1.04473	1.0081	422.391	1.03280
800	1.4824	432.766	1.05487	1.1117	432.758	1.04294
900	1.6206	443.132	1.06411	1.2154	443.125	1.05218
1000	1.7588	453.496	1.07259	1.3191	453.490	1.06066
1200	2.0352	474.224	1.08771	1.5264	474.220	1.07578
1400	2.3116	494.952	1.10090	1.7336	494.948	1.08898
1600	2.5879	515.679	1.11260	1.9409	515.676	1.10068
1800	2.8643	536.405	1.12312	2.1482	536.402	1.11119
2000	3.1406	557.131	1.13266	2.3554	557.129	1.12073
$\rho=5 \cdot 10^{-1}$ bar						
320	0.49092	382.944	0.97216			
340	0.50755	385.023	0.97561	0.42283	385.003	0.96803
360	0.52417	387.101	0.97894	0.43669	387.082	0.97137
380	0.54078	389.178	0.98217	0.45054	389.160	0.97460
400	0.55739	391.255	0.98530	0.46439	391.238	0.97773
420	0.57400	393.332	0.98834	0.47824	393.316	0.98077
440	0.59061	395.408	0.99130	0.49208	395.393	0.98373
460	0.60722	397.484	0.99417	0.50592	397.469	0.98660
480	0.62382	399.560	0.99696	0.51976	399.546	0.98939
500	0.64042	401.635	0.99968	0.53360	401.622	0.99211
520	0.65703	403.711	1.00233	0.54744	403.698	0.99476
540	0.67362	405.786	1.00492	0.56128	405.773	0.99735
560	0.69022	407.861	1.00744	0.57511	407.849	0.99987
580	0.70682	409.935	1.00990	0.58894	409.924	1.00233
600	0.72342	412.010	1.01230	0.60278	411.999	1.00474
620	0.74001	414.085	1.01465	0.61661	414.074	1.00709
640	0.75661	416.159	1.01695	0.63044	416.149	1.00938
660	0.77320	418.233	1.01919	0.64427	418.223	1.01163
680	0.78979	420.307	1.02139	0.65810	420.298	1.01383
700	0.80638	422.381	1.02355	0.67193	422.372	1.01598
800	0.88933	432.750	1.03369	0.74106	432.742	1.02613
900	0.97228	443.118	1.04293	0.81019	443.111	1.03537
1000	1.0552	453.484	1.05141	0.87930	453.478	1.04385
1200	1.2210	474.215	1.06653	1.0175	474.210	1.05897
1400	1.3869	494.944	1.07913	1.1557	494.940	1.07217
1600	1.5527	515.672	1.09143	1.2939	515.669	1.08387
1800	1.7185	536.400	1.10194	1.4321	536.397	1.09438
2000	1.8843	557.126	1.11149	1.5703	557.124	1.10393

Table 2 Thermodynamic Properties of Mercury Vapor (3/8)

<i>t</i> °C	v	<i>i</i>	s	v	<i>i</i>	s
		$\rho = 7 \cdot 10^{-1}$ bar			$\rho = 8 \cdot 10^{-1}$ bar	
340	0.36232	384.983	0.96162	0.32734	387.044	0.95940
360	0.37420	387.063	0.96946	0.33774	389.124	0.96264
380	0.38608	389.142	0.96819	0.34813	391.204	0.96578
400	0.39796	391.221	0.97133	0.35852	393.283	0.96882
420	0.40983	393.299	0.97437	0.36891	395.362	0.97178
440	0.42170	395.377	0.97732	0.37930	397.440	0.97465
460	0.43357	397.455	0.98020	0.38969	399.518	0.97745
480	0.44544	399.532	0.98299	0.40007	401.595	0.98017
500	0.45730	401.608	0.98571	0.41046	403.672	0.98282
520	0.46916	403.685	0.98836	0.42084	405.749	0.98541
540	0.48103	405.761	0.99095	0.43122	407.825	0.98793
560	0.49289	407.837	0.99347	0.44160	409.901	0.99039
580	0.50475	409.913	0.99593	0.45198	411.977	0.99280
600	0.51661	411.988	0.99834	0.46236	414.053	0.99515
620	0.52846	414.063	1.00070	0.47273	416.128	0.99744
640	0.54032	416.138	1.00299	0.48311	418.203	0.99969
660	0.55218	418.213	1.00523	0.49348	420.278	1.00190
680	0.56403	420.288	1.00743	0.50336	422.353	1.00405
700	0.57589	422.363	1.00959	0.51333	424.430	1.00619
800	0.63516	432.734	1.01973	0.55572	432.727	1.01419
900	0.69441	443.104	1.02897	0.60758	443.097	1.02343
1000	0.75366	453.472	1.03745	0.65942	453.466	1.03193
1200	0.87214	474.205	1.05258	0.76310	474.200	1.04704
1400	0.99060	494.936	1.06578	0.86676	494.932	1.06024
1600	1.1090	515.666	1.07748	0.97041	515.662	1.07194
1800	1.2275	536.394	1.08799	1.0740	536.391	1.08246
2000	1.3459	557.122	1.09754	1.1777	557.119	1.09200
		$\rho = 9 \cdot 10^{-1}$ bar			$\rho = 1$ bar	
360	0.29089	387.025	0.95450	0.26173	387.005	0.95012
380	0.30013	389.106	0.95774	0.27005	389.088	0.95336
400	0.30938	391.187	0.96088	0.27838	391.170	0.95649
420	0.31862	393.267	0.96392	0.28670	393.251	0.95954
440	0.32786	395.341	0.96688	0.29501	395.331	0.96250
460	0.33710	397.425	0.96975	0.30333	397.410	0.96538
480	0.34633	399.503	0.97255	0.31164	399.489	0.96817
500	0.35557	401.531	0.97527	0.31996	401.568	0.97090
520	0.36480	403.659	0.97793	0.32827	403.646	0.97355
540	0.37403	405.736	0.98051	0.33658	405.724	0.97614
560	0.38326	407.813	0.98303	0.34489	407.801	0.97866
580	0.39249	409.890	0.98550	0.35319	409.878	0.98112
600	0.40171	411.966	0.98791	0.36150	411.955	0.98353
620	0.41094	414.042	0.99026	0.36980	414.031	0.98588
640	0.42016	416.118	0.99256	0.37811	416.108	0.98818
660	0.42939	418.193	0.99480	0.38641	418.184	0.99043
680	0.43861	420.269	0.99700	0.39472	420.259	0.99263
700	0.44784	422.344	0.99916	0.40302	422.335	0.99479
800	0.49394	432.719	1.00931	0.44452	432.711	1.00494
900	0.54004	443.090	1.01855	0.48601	443.083	1.01418
1000	0.58612	453.460	1.02703	0.52749	453.454	1.02266
1200	0.67829	474.196	1.04216	0.61044	474.191	1.03779
1400	0.77044	494.928	1.05536	0.69338	494.925	1.05099
1600	0.86257	515.659	1.06706	0.77631	515.656	1.06269
1800	0.95470	536.388	1.07757	0.85923	536.386	1.07320
2000	1.0468	557.117	1.08712	0.94214	557.114	1.08275

Table 2 Thermodynamic Properties of Mercury Vapor (4/8)

v: 比体積(m³/kg) i: エンタルピ(kJ/kg) s: エントロピー(kJ/kg·K)

<i>t</i> °C	v	i	s	v	i	s
$\rho = 1.2 \text{ bar}$						
380	0.22493	389.052	0.94576	0.19270	389.016	0.93934
400	0.23187	391.135	0.94891	0.19866	391.101	0.94248
420	0.23881	393.218	0.95195	0.20461	393.185	0.94554
440	0.24575	395.300	0.95491	0.21056	395.269	0.94850
460	0.25268	397.381	0.95779	0.21651	397.351	0.95138
480	0.25962	399.461	0.96059	0.22245	399.433	0.95418
500	0.26655	401.541	0.96332	0.22840	401.514	0.95691
520	0.27348	403.620	0.96597	0.23434	403.594	0.95956
540	0.28040	405.699	0.96856	0.24028	405.674	0.96215
260	0.28733	407.777	0.97109	0.24622	407.753	0.96468
580	0.29426	409.855	0.97355	0.25216	409.832	0.96714
600	0.30118	411.933	0.97596	0.25810	411.911	0.96955
620	0.30810	414.010	0.97831	0.26403	413.989	0.97191
640	0.31503	416.087	0.98061	0.26997	416.066	0.97421
660	0.32195	418.164	0.98286	0.27590	418.144	0.97646
680	0.32887	420.240	0.98506	0.28184	420.221	0.97866
700	0.33579	422.316	0.98722	0.28777	422.298	0.98082
800	0.37038	432.695	0.99737	0.31743	432.679	0.99097
900	0.40497	443.070	1.00661	0.34708	443.056	1.00022
1000	0.43954	453.442	1.01510	0.37672	453.430	1.00870
1200	0.50868	474.181	1.03023	0.43598	474.172	1.02383
1400	0.57779	494.917	1.04343	0.49523	494.908	1.03703
1600	0.64690	515.649	1.05513	0.55447	515.643	1.04874
1800	0.71601	536.380	1.06565	0.61371	536.374	1.05926
2000	0.78511	557.110	1.07519	0.67294	557.105	1.06880
$\rho = 1.6 \text{ bar}$						
400	0.17374	391.067	0.93692	0.15437	391.032	0.93200
420	0.17896	393.153	0.93997	0.15900	393.120	0.93506
440	0.18417	395.237	0.94294	0.16364	395.206	0.93803
460	0.18937	397.321	0.94582	0.16827	397.292	0.94091
480	0.19458	399.404	0.94862	0.17290	399.376	0.94372
500	0.19978	401.487	0.95135	0.17753	401.460	0.94645
520	0.20498	403.568	0.95401	0.18215	403.542	0.94911
540	0.21019	405.649	0.95660	0.18678	405.624	0.95170
560	0.21539	407.729	0.95913	0.19140	407.705	0.95423
580	0.22058	409.809	0.96159	0.19603	409.786	0.95669
600	0.22578	411.888	0.96400	0.20065	411.866	0.95910
620	0.23098	413.967	0.96636	0.20527	413.946	0.96146
640	0.23617	416.046	0.96866	0.20989	416.025	0.96376
660	0.24137	418.124	0.97091	0.21451	418.104	0.96601
680	0.24656	420.202	0.97311	0.21913	420.183	0.96822
700	0.25176	422.279	0.97527	0.22374	422.261	0.97038
800	0.27771	432.663	0.98543	0.24682	432.647	0.98053
900	0.30366	443.042	0.99467	0.26989	443.028	0.98978
1000	0.32960	453.418	1.00317	0.29295	453.406	0.99827
1200	0.38146	474.162	1.01829	0.33906	474.152	1.01340
1400	0.43331	494.901	1.03150	0.38515	494.893	1.02661
1600	0.48515	515.636	1.04320	0.43123	515.630	1.03832
1800	0.53698	536.369	1.05372	0.47731	536.363	1.04883
2000	0.58881	557.100	1.06326	0.52338	557.095	1.05838
$\rho = 2 \text{ bar}$						
400	0.13887	390.998	0.92760			
420	0.14304	393.087	0.93066	0.12998	393.054	0.92668
440	0.14722	395.175	0.93363	0.13378	395.144	0.92965
460	0.15139	397.262	0.93652	0.13757	397.232	0.93254
480	0.15556	399.348	0.93933	0.14137	399.319	0.93535
500	0.15972	401.432	0.94206	0.14516	401.405	0.93808
520	0.16389	403.516	0.94472	0.14895	403.490	0.94075
540	0.16805	405.599	0.94731	0.15273	405.574	0.94334
560	0.17222	407.681	0.94984	0.15652	407.658	0.94587
580	0.17338	409.763	0.95231	0.16031	409.740	0.94834
600	0.18054	411.844	0.95472	0.16409	411.822	0.95075
620	0.18470	413.925	0.95708	0.16787	413.903	0.95311
640	0.18886	416.005	0.95938	0.17166	415.984	0.95542
660	0.19302	418.034	0.96163	0.17544	418.064	0.95767
680	0.19718	420.163	0.96384	0.17922	420.144	0.95987
700	0.20134	422.242	0.96600	0.18300	422.224	0.96203
800	0.22211	432.631	0.97616	0.20189	432.615	0.97220
900	0.24288	443.014	0.98541	0.22078	443.001	0.98146
1000	0.26364	453.393	0.99390	0.23965	453.381	0.98994
1200	0.30514	474.142	1.00904	0.27738	474.133	1.00508
1400	0.34662	494.885	1.02224	0.31510	494.877	1.01829
1600	0.38810	515.623	1.03395	0.35281	515.616	1.02999
1800	0.42957	536.358	1.04446	0.39051	536.352	1.04051
2000	0.47104	557.090	1.05401	0.42821	557.086	1.05006

Table 2 Thermodynamic Properties of Mercury Vapor (5/8)

<i>t</i> °C	v	i	s	v	i	s
<i>p</i> =2.4 bar						
420	0.11910	393.022	0.92305	0.10989	392.989	0.91970
440	0.12258	395.113	0.92602	0.11311	395.082	0.92268
460	0.12606	397.203	0.92891	0.11632	397.173	0.92557
480	0.12954	399.291	0.93172	0.11954	399.262	0.92838
500	0.13302	401.378	0.93446	0.12275	401.351	0.93112
520	0.13649	403.464	0.93712	0.12596	403.438	0.93378
540	0.13997	405.549	0.93972	0.12916	405.524	0.93638
560	0.14344	407.634	0.94225	0.13237	407.610	0.93891
580	0.14691	409.117	0.94472	0.13558	409.694	0.94138
600	0.15038	411.800	0.94713	0.13878	411.778	0.94380
620	0.15385	413.882	0.94949	0.14199	413.861	0.94616
640	0.15132	415.963	0.95179	0.14519	415.943	0.94846
660	0.16079	418.044	0.95405	0.14839	418.025	0.95072
680	0.16426	420.125	0.95626	0.15159	420.106	0.95293
700	0.16772	422.205	0.95842	0.15479	422.186	0.95510
800	0.18504	432.599	0.96858	0.17079	432.584	0.96526
900	0.20236	442.987	0.97784	0.18677	442.973	0.94751
1000	0.21966	453.369	0.98633	0.20275	453.357	0.98301
1200	0.25425	474.123	1.00147	0.23468	474.113	0.99815
1400	0.28883	494.869	1.01468	0.26660	494.862	1.01136
1600	0.32340	515.610	1.02639	0.29852	515.603	1.02307
1800	0.35796	536.347	1.03690	0.33042	536.341	1.03358
2000	0.39252	557.081	1.04645	0.36232	557.076	1.04313
<i>p</i> =2.8 bar						
420	0.10200	392.956	0.91660			
440	0.10499	395.050	0.91958	0.097948	395.019	0.91669
460	0.10797	397.143	0.92247	0.10074	397.113	0.91958
480	0.11096	399.234	0.92528	0.10353	399.206	0.92240
500	0.11394	401.324	0.92802	0.10631	401.296	0.92514
520	0.11692	403.412	0.93069	0.10910	403.386	0.92781
540	0.11990	405.499	0.93329	0.11188	405.474	0.93041
560	0.12288	407.586	0.93582	0.11466	407.562	0.93294
580	0.12586	409.671	0.93830	0.11744	409.648	0.93542
600	0.12884	411.755	0.94071	0.12022	411.733	0.93784
620	0.13182	413.839	0.94307	0.12300	413.818	0.94020
640	0.13479	415.922	0.94538	0.12578	415.902	0.94250
660	0.13776	418.005	0.94763	0.12856	417.985	0.94476
680	0.14074	420.086	0.94984	0.13133	420.067	0.94697
700	0.14371	422.168	0.95200	0.13411	422.149	0.94913
800	0.15857	432.568	0.96217	0.14798	432.552	0.95931
900	0.17341	442.959	0.97143	0.16184	442.945	0.96857
1000	0.18825	453.345	0.97993	0.17569	453.333	0.97706
1200	0.21791	474.104	0.99507	0.20337	474.094	0.99221
1400	0.24755	494.854	1.00828	0.23104	494.846	1.00542
1600	0.27718	515.597	1.01999	0.28635	515.590	1.01713
1800	0.30681	536.336	1.03051	0.31400	536.330	1.02765
2000	0.33644	557.071	1.40060	0.31400	557.067	1.03720

Table 2 Thermodynamic Properties of Mercury Vapor (6/8)

v: 比体積(m³/kg) i: エンタルピ(kJ/kg) s: エントロピー(kJ/kg·K)

t°C	v	i	s	v	i	s
		$\rho=4 \text{ bar}$			$\rho=6 \text{ bar}$	
460	0.075413	396.964	0.90753			
480	0.077510	399.063	0.91036	0.051494	398.776	0.89331
500	0.079606	401.160	0.91311	0.052899	400.886	0.89608
520	0.081700	403.255	0.91578	0.054302	402.993	0.89877
540	0.083792	405.349	0.91839	0.055704	405.098	0.90139
560	0.085883	407.441	0.92093	0.057104	407.200	0.90394
580	0.087973	409.532	0.92341	0.058503	409.300	0.90643
600	0.090062	411.622	0.92583	0.059902	411.399	0.90887
620	0.092150	413.711	0.92820	0.061299	413.496	0.91124
640	0.094237	415.798	0.93051	0.062695	415.591	0.91356
660	0.096323	417.885	0.93277	0.064091	417.685	0.91583
680	0.098409	419.971	0.93498	0.065485	419.778	0.91805
700	0.10049	422.056	0.93715	0.066879	421.869	0.92022
800	0.11091	432.472	0.94733	0.073841	432.313	0.93043
900	0.12131	442.876	0.95660	0.080791	442.738	0.93972
1000	0.13171	453.272	0.96511	0.087733	453.150	0.94924
1200	0.15248	474.046	0.98026	0.10160	473.949	0.96341
1400	0.17325	494.806	0.99348	0.11545	494.727	0.97664
1600	0.19400	515.557	1.00519	0.12930	515.491	0.98836
1800	0.21474	536.302	1.01572	0.14314	536.246	0.99889
2000	0.23549	557.043	1.02527	0.15697	556.995	1.00845
		$\rho=8 \text{ bar}$			$\rho=10 \text{ bar}$	
500	0.039544	400.609	0.88393			
520	0.040602	402.729	0.88663	0.032382	402.463	0.87717
540	0.041659	404.845	0.88927	0.033232	404.590	0.87982
560	0.042714	406.957	0.89184	0.034080	406.713	0.88240
580	0.043768	409.067	0.89434	0.034926	408.833	0.88492
600	0.044821	411.175	0.89678	0.035772	410.950	0.88737
620	0.045873	413.280	0.89916	0.036617	413.063	0.88976
640	0.046924	415.383	0.90149	0.037461	415.174	0.89210
660	0.047914	417.485	0.90377	0.038304	417.283	0.89438
680	0.049023	419.584	0.90600	0.039146	419.390	0.89662
700	0.050072	421.682	0.90818	0.039937	421.494	0.89880
800	0.055307	432.153	0.91842	0.044186	431.993	0.90907
900	0.060530	442.599	0.92772	0.048373	442.461	0.91840
1000	0.065745	453.029	0.93626	0.052552	452.907	0.92694
1200	0.076158	473.853	0.95145	0.060893	473.757	0.94216
1400	0.086558	494.649	0.96468	0.069220	494.570	0.95540
1600	0.096947	515.426	0.97641	0.077537	515.360	0.96714
1800	0.10733	635.191	0.98695	0.085848	536.135	0.97768
2000	0.11771	556.947	0.99651	0.094155	556.900	0.98724
		$\rho=12 \text{ bar}$			$\rho=14 \text{ bar}$	
540	0.027613	404.334	0.87207			
560	0.028323	406.468	0.87466	0.024211	406.221	0.86808
580	0.029032	408.597	0.87719	0.024821	408.361	0.87062
600	0.029739	410.723	0.87965	0.025430	410.496	0.87310
620	0.030446	412.846	0.88205	0.026033	412.627	0.87551
640	0.031152	414.965	0.88440	0.026645	414.754	0.87786
660	0.031857	417.081	0.83669	0.021252	416.878	0.88016
680	0.032561	419.195	0.88893	0.021857	418.999	0.38241
700	0.033264	421.306	0.89112	0.028462	421.117	0.88461
800	0.036772	431.832	0.90142	0.031476	431.672	0.89494
900	0.040268	442.322	0.91077	0.034479	442.182	0.90430
1000	0.043757	452.785	0.91933	0.037474	452.663	0.91288
1200	0.050716	473.660	0.93455	0.043447	473.563	0.92813
1400	0.057661	494.491	0.94782	0.049405	494.412	0.94139
1600	0.064597	515.294	0.95956	0.055354	515.223	0.95315
1800	0.071526	536.079	0.97010	0.061297	536.024	0.96370
2000	0.078452	556.852	0.97967	0.067235	556.804	0.97326

Table 2 Thermodynamic Properties of Mercury Vapor (7/8)
 v: 比体積(m³/kg) i: エンタルピ(kJ/kg) s: エントロピー(kJ/kg·K)

t°C	v	i	s	v	i	s
		$\rho=16 \text{ bar}$			$\rho=18 \text{ bar}$	
580	0.021663	408.123	0.86491	0.019206	407.884	0.85985
600	0.022198	410.268	0.86740	0.019683	410.038	0.86235
620	0.022732	412.407	0.86982	0.020160	412.187	0.86478
640	0.023265	414.543	0.87218	0.020636	414.331	0.86715
660	0.023798	416.674	0.87449	0.021111	416.470	0.86947
680	0.024329	418.802	0.87675	0.021585	418.605	0.87174
700	0.024860	420.927	0.87896	0.022058	420.737	0.87395
800	0.027505	431.510	0.88931	0.024415	431.349	0.88433
900	0.030138	442.043	0.89869	0.026761	441.903	0.89313
1000	0.032762	452.541	0.90728	0.029098	452.418	0.90234
1200	0.037995	473.466	0.92255	0.033755	473.369	0.91762
1400	0.043213	494.333	0.93583	0.038397	494.254	0.93091
1600	0.048422	515.162	0.94759	0.043030	515.096	0.94268
1800	0.053624	535.968	0.95814	0.047657	535.912	0.95324
2000	0.058822	556.756	0.96771	0.052279	556.709	0.96282
		$\rho=20 \text{ bar}$			$\rho=30 \text{ bar}$	
600	0.017672	409.807	0.85781			
620	0.018103	411.965	0.86026			
640	0.018533	414.118	0.86264	0.012221	413.038	0.84508
660	0.018962	416.265	0.86497	0.012512	415.227	0.84745
680	0.019390	418.408	0.86724	0.012802	417.408	0.84976
700	0.019817	420.546	0.86946	0.013092	419.582	0.85202
800	0.021944	431.187	0.87987	0.014529	430.371	0.86258
900	0.024059	441.763	0.88930	0.015954	441.060	0.87210
1000	0.026166	452.296	0.89791	0.017370	451.681	0.88079
1200	0.030362	473.272	0.91321	0.021085	472.786	0.89619
1400	0.034544	494.174	0.92652	0.022986	493.779	0.90955
1600	0.038717	515.031	0.93829	0.025777	514.701	0.92137
1800	0.042883	535.856	0.94885	0.023561	535.578	0.93195
2000	0.047045	556.661	0.95843	0.031342	556.423	0.94155
		$\rho=40 \text{ bar}$			$\rho=50 \text{ bar}$	
680	0.0095073	416.389	0.83716			
700	0.0097279	418.601	0.83946	0.0077086	417.603	0.82955
800	0.010821	429.546	0.85016	0.0085954	428.711	0.84042
900	0.011901	440.351	0.85980	0.0094689	439.636	0.85015
1000	0.012972	451.062	0.86855	0.010333	450.439	0.85899
1200	0.015096	472.299	0.88405	0.012044	471.310	0.87458
1400	0.017206	493.382	0.89747	0.013739	492.985	0.88806
1600	0.019307	514.372	0.90932	0.015425	514.042	0.89995
1800	0.021400	535.300	0.91994	0.017104	535.021	0.91059
2000	0.023490	556.184	0.92955	0.018779	555.946	0.92023
		$\rho=60 \text{ bar}$			$\rho=80 \text{ bar}$	
800	0.0071113	427.865	0.83235	0.0052550	426.141	0.81939
900	0.0078473	438.914	0.84220	0.0058196	437.452	0.82947
1000	0.0085738	449.812	0.85111	0.0063742	448.547	0.83854
1200	0.010008	471.319	0.86682	0.0074640	470.333	0.85444
1400	0.011428	492.588	0.88034	0.0085380	491.791	0.86811
1600	0.012837	513.712	0.89227	0.0096021	513.052	0.88010
1800	0.014240	534.743	0.90294	0.010660	534.186	0.89082
2000	0.015639	555.709	0.91259	0.011713	555.233	0.90052
		$\rho=100 \text{ bar}$			$\rho=120 \text{ bar}$	
820	0.0042335	426.718	0.81123			
840	0.0043264	429.051	0.81334			
860	0.0044189	431.368	0.81540	0.0036339	429.742	0.80690
880	0.0045108	433.671	0.81742	0.0037123	432.102	0.80897
900	0.0046023	435.963	0.81939	0.0037902	434.445	0.81098
1000	0.0050540	447.265	0.82864	0.0041737	445.967	0.82041
1200	0.0059374	469.340	0.84475	0.0049196	468.341	0.83674
1400	0.0068044	490.991	0.85853	0.0056487	490.189	0.85065
1600	0.0076614	512.391	0.87061	0.0063676	511.730	0.86281
1800	0.0085118	533.630	0.88139	0.0070800	533.074	0.87364
2000	0.0093579	554.159	0.89112	0.0077878	554.285	0.88341

Table 2 Thermodynamic Properties of Mercury Vapor (8/8)

v: 比体積(m³/kg) i: エンタルピ(kJ/kg) s: エントロピー(kJ/kg·K)

t°C	v	i	s	v	i	s
$\rho=140 \text{ bar}$						
860	0.0030725	428.078	0.79954	0.0026508	426.375	0.79300
880	0.0031413	430.498	0.80166	0.0027125	428.859	0.79518
900	0.0032096	432.898	0.80372	0.0027737	431.319	0.79729
1000	0.0035446	444.651	0.81334	0.0030726	443.317	0.80711
1200	0.0041926	467.336	0.82990	0.0036474	466.323	0.82390
1400	0.0048233	489.385	0.84393	0.0042043	488.578	0.83807
1600	0.0054436	511.068	0.85618	0.0047407	510.405	0.85040
1800	0.0060573	532.518	0.86706	0.0052903	531.963	0.86133
2000	0.0066664	553.812	0.87687	0.0058255	553.339	0.87118
$\rho=180 \text{ bar}$						
920	0.0024893	432.204	0.79360			
940	0.0025439	434.676	0.79565			
960	0.0025981	437.126	0.79765			
980	0.0026518	439.555	0.79961			
1000	0.0027052	441.965	0.80152	0.0024112	440.593	0.79643
1200	0.0032233	465.304	0.81856	0.0028240	464.272	0.81972
1400	0.0037229	487.769	0.83286	0.0033378	486.958	0.82818
1600	0.0042118	509.742	0.84527	0.0037808	509.079	0.84066
1800	0.0046940	531.408	0.85626	0.0042169	530.854	0.85170
2000	0.0051715	552.668	0.86614	0.0046484	552.397	0.86162
$\rho=200 \text{ bar}$						

Table 3 Input of RELAP5 Steam Table Generator Program

書式（固定長テキスト）			
順序 TYPE			
1	a72	hed	タイトル
2	5x,2i5	nt,np	温度点数、圧力点数
3	5x,6f10.0	a(1)~a(nt)	温度点数分の温度
4	5x,6f10.0	a(nt+1)~a(nt+np)	圧力点数分の圧力

Table 4 Output of RELAP5 Steam Table Generator Program (1 / 2)

書式（バイナリ）	
レコード	
1	タイトル1（注）
2	タイトル2（注）
3	ttrip 3 重点温度（注） ptrip 3 重点圧力（注） vtrip 3 重点比体積（注） tcrit 臨界点温度（注） pcrit 臨界点圧力（注） vcrit 臨界点比体積（注） tmin 最低温度（注） pmin 最低圧力（注） tmax 最高温度（注） pmax 最高圧力（注） nt 温度点数（注） np 圧力点数（注） nst 臨界温度以下の温度点数（注） nsp 臨界圧力以下の圧力点数（注） it3bp nt+np-12（注） it4bp nt+np+13×nst-12（注） it5bp nt+np+13×nst+13×nsp-6×nt-6+1（注） nprpnt 6×n（注） it3p0 nt+np（注）
4	ntot nt+np+13×nst+13×nsp+6×nt+np（注）

注：今回の計算においては使用していない

Table 4 Output of RELAP5 Steam Table Generator Program (2 / 2)

5 温度点数分の温度 圧力点数分の圧力 温度点 1 ~ 温度点 nst までの以下の値を nst 点数分 (温度に対する飽和) 飽和圧力(Pa) 液相比体積(m ³ /kg) 液相比内部エネルギー(J/kg) 液相熱膨張率(1/K) 液相圧縮率(-) 液相定圧比熱(J/kg.K) 液相エントロピー(J/kg.K) 気相比体積(m ³ /kg) 気相比内部エネルギー(J/kg) 気相熱膨張率(1/K) 気相圧縮率(-) 気相定圧比熱(J/kg.K) 気相エントロピー(J/kg.K) 圧力点 1 ~ 圧力点 nsp までの以下の値を nsp 点数分 (圧力に対する飽和) 飽和温度(K) 液相比体積(m ³ /kg) 液相比内部エネルギー(J/kg) 液相熱膨張率(1/K) 液相圧縮率(-) 液相定圧比熱(J/kg.K) 液相エントロピー(J/kg.K) 気相比体積(m ³ /kg) 気相比内部エネルギー(J/kg) 気相熱膨張率(1/K) 気相圧縮率(-) 気相定圧比熱(J/kg.K) 気相エントロピー(J/kg.K) 圧力点 1 ~ 圧力点 np まで np 点数分繰り返す (単相) 温度点 1 ~ 温度点 nt まで nt 点数分繰り返す 比体積(m ³ /kg) 比内部エネルギー(J/kg) 熱膨張率(1/K) 圧縮率(-) 定圧比熱(J/kg.K) エントロピー(J/kg.K)
--

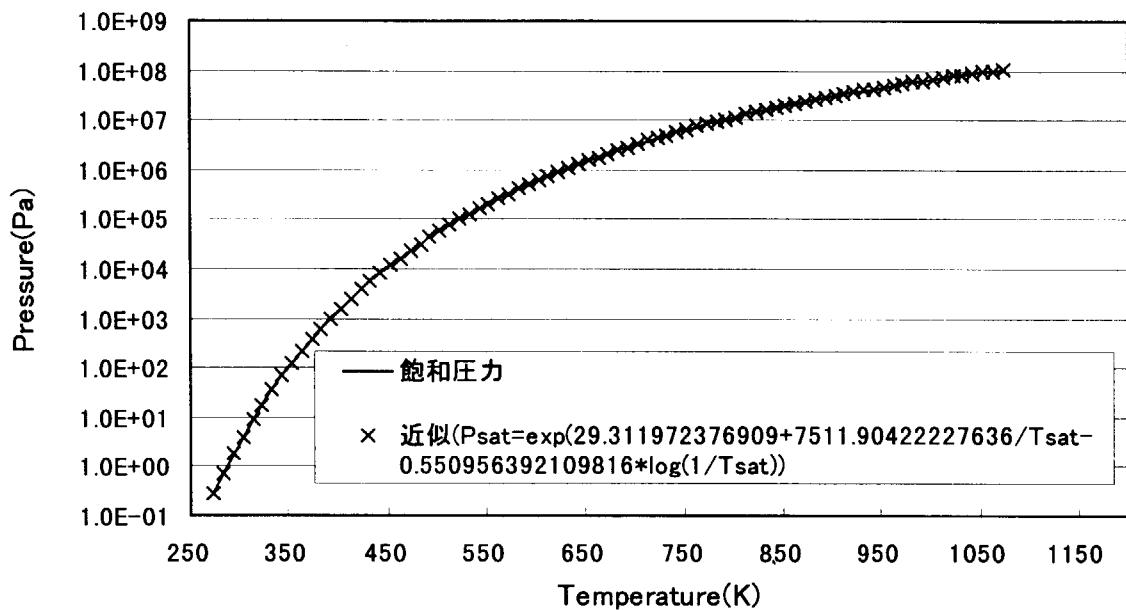


Fig.2.1 Saturation Pressure (Full Range)

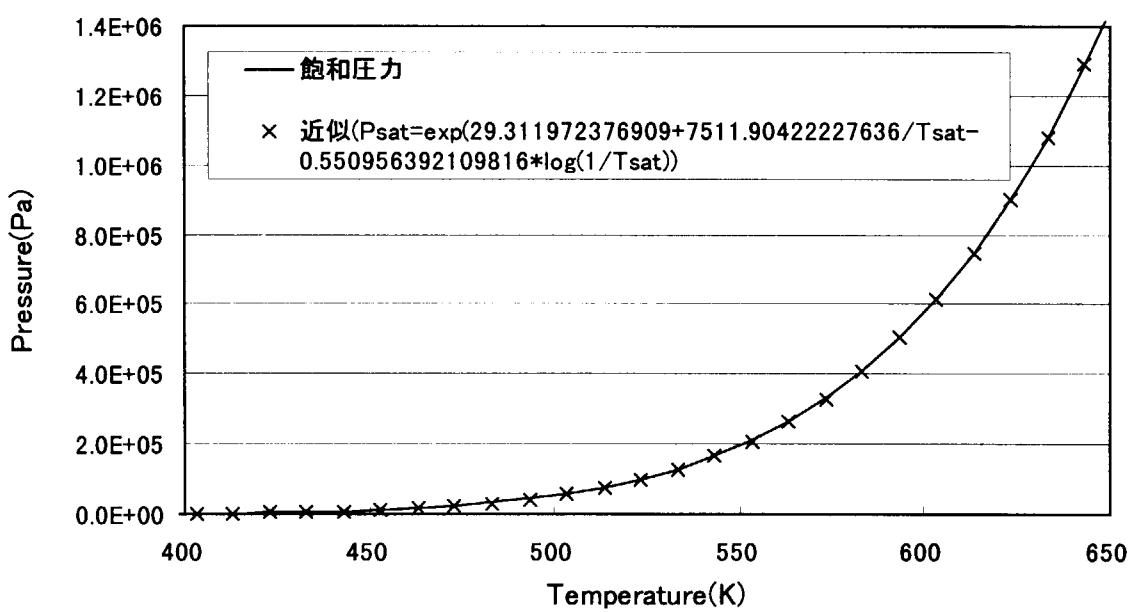


Fig.2.2 Saturation Pressure (Middle Range)

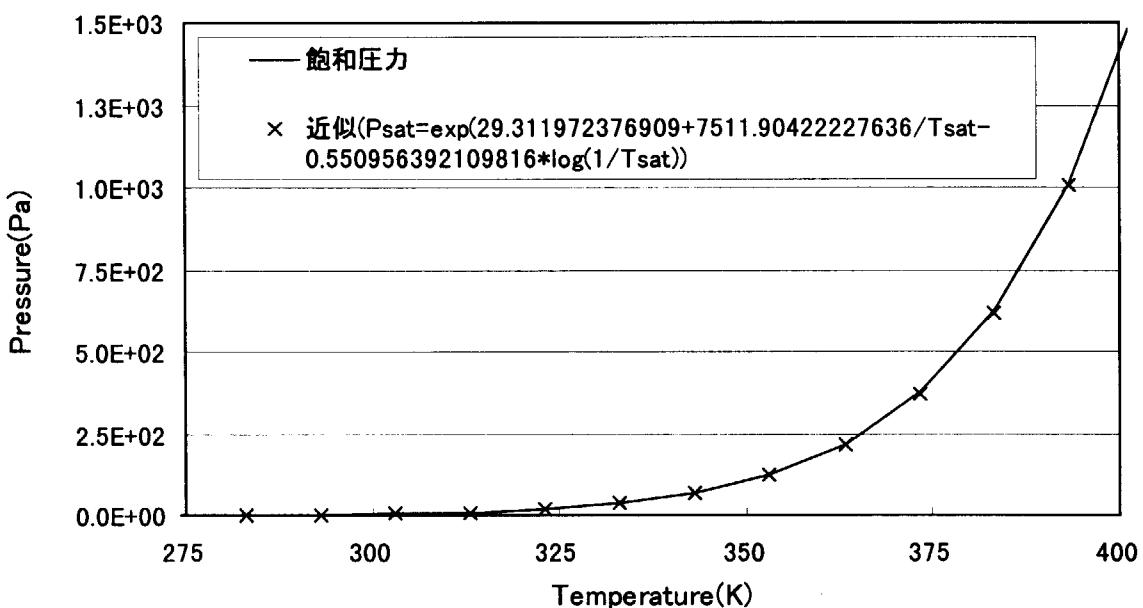


Fig.2.3 Saturation Pressure (Low Range)

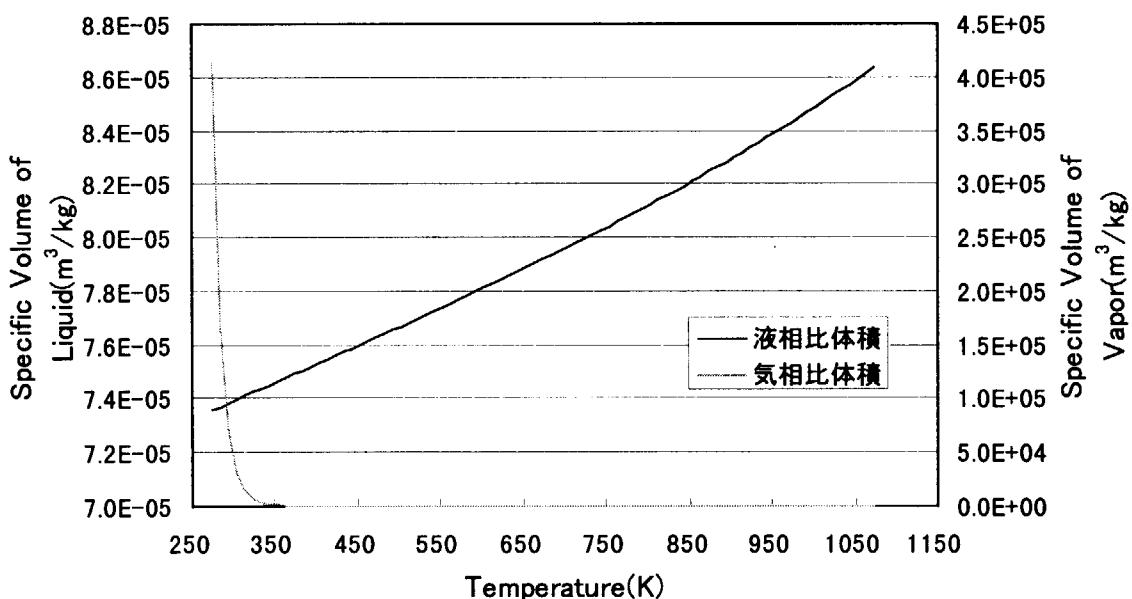


Fig.2.4 Specific Volume (Full Range)

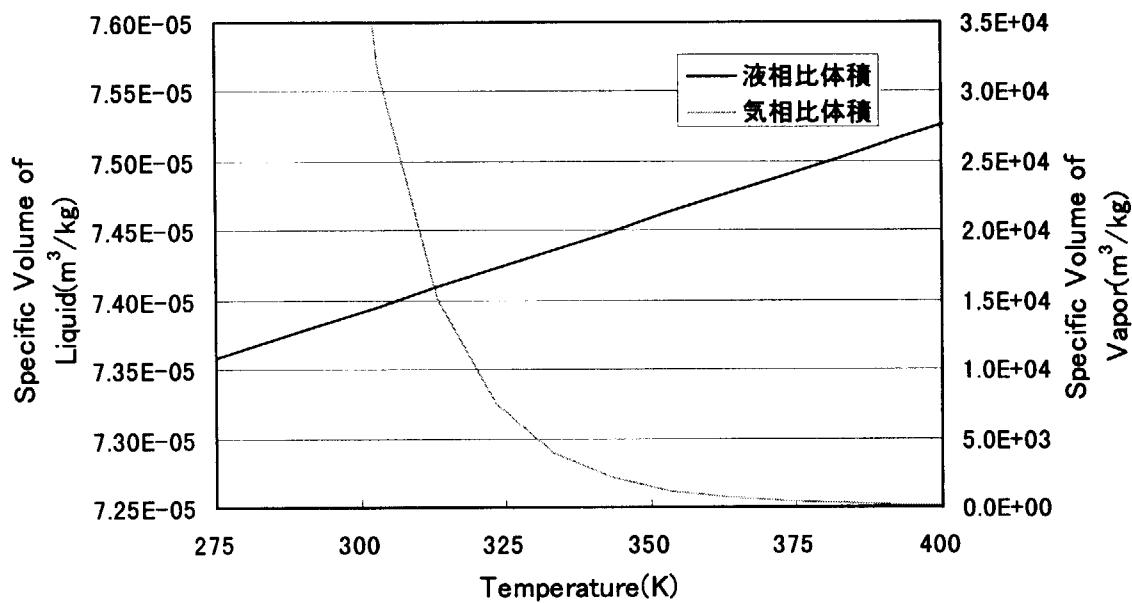


Fig.2.5 Specific Volume (Low Range)

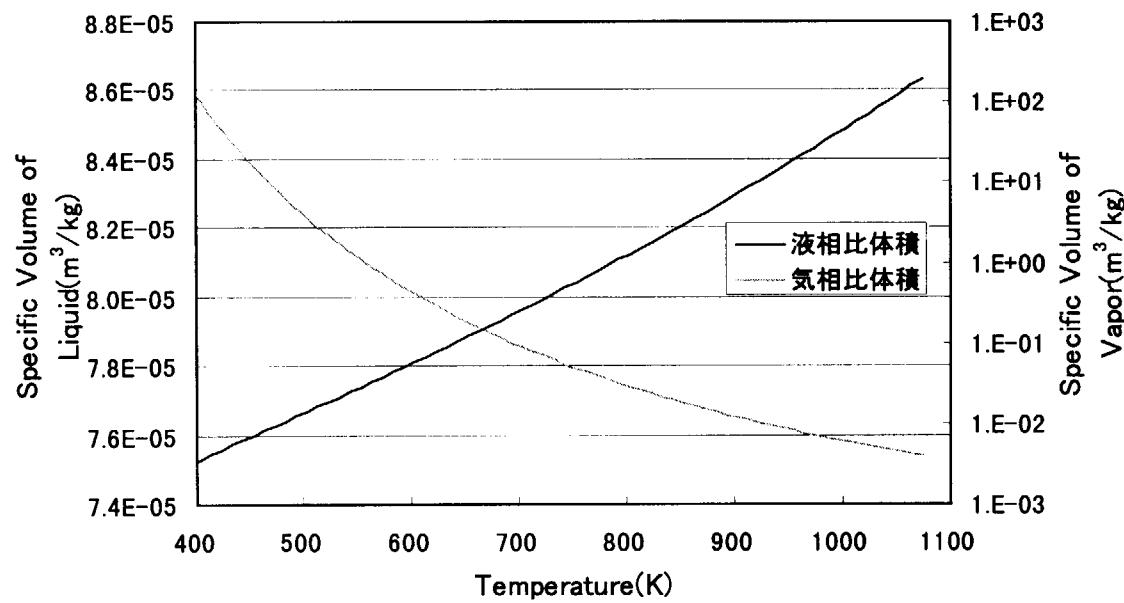


Fig.2.6 Specific Volume (High Range)

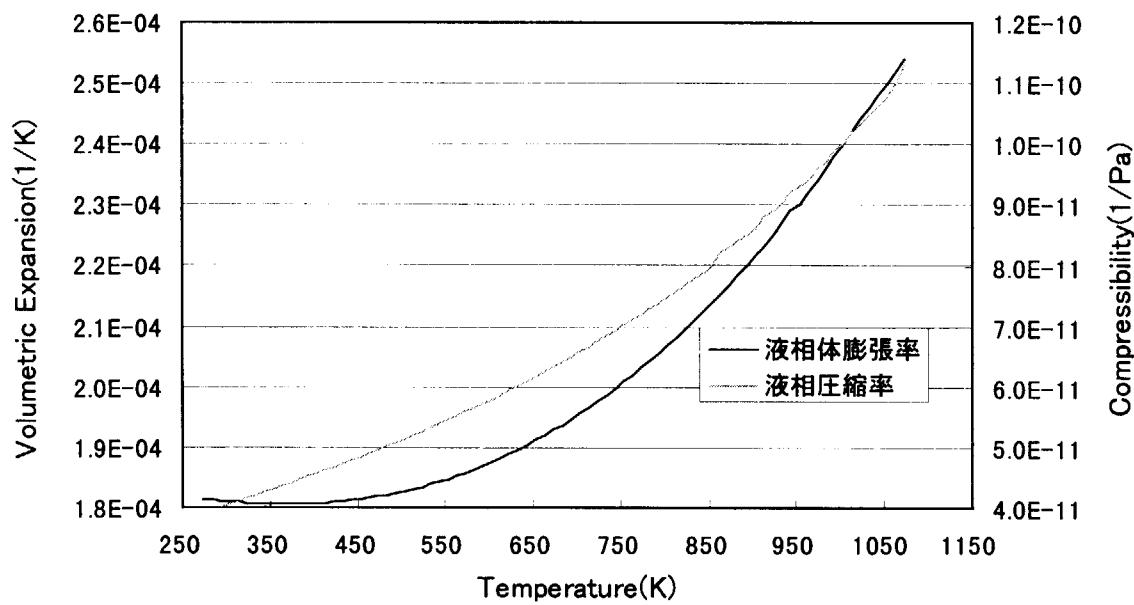


Fig.2.7 Expansion and Compressibility

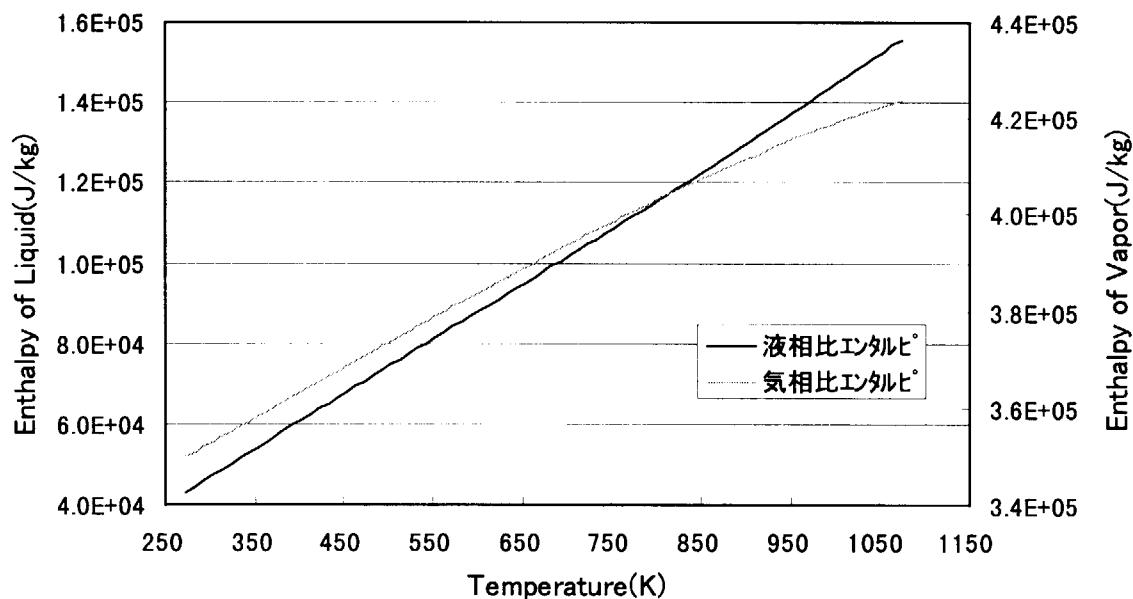


Fig.2.8 Specific Enthalpy

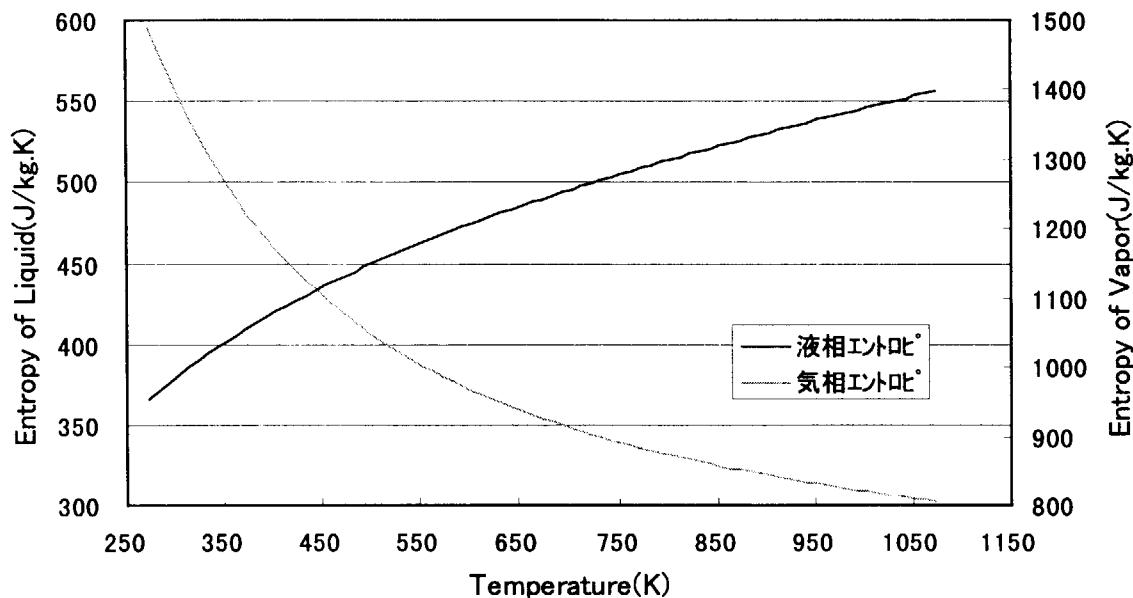


Fig.2.9 Entropy

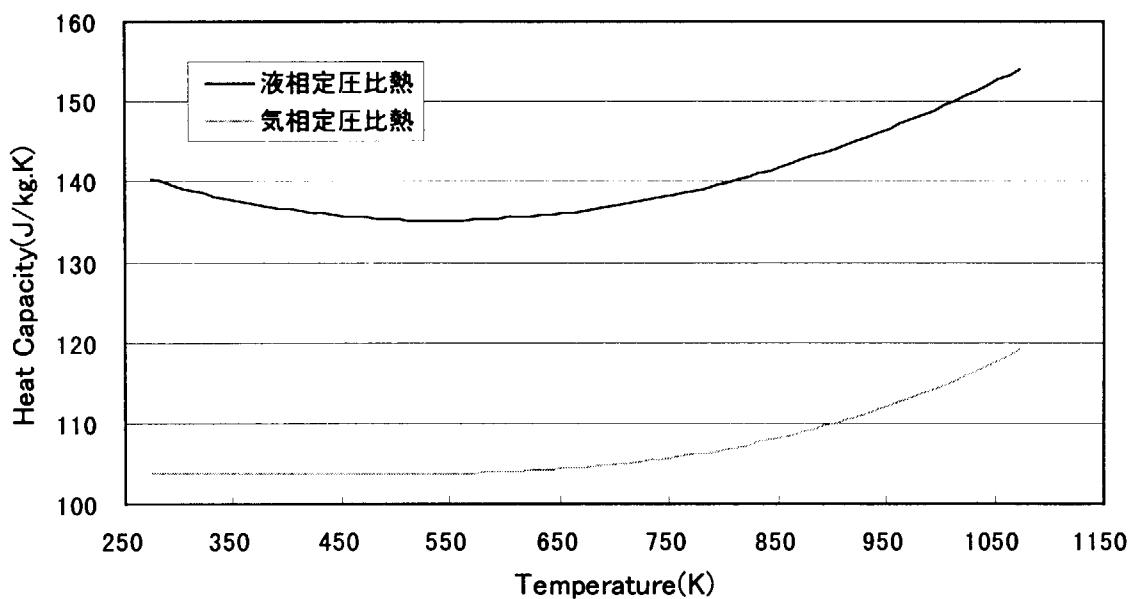


Fig.2.10 Heat Capacity at constant pressure

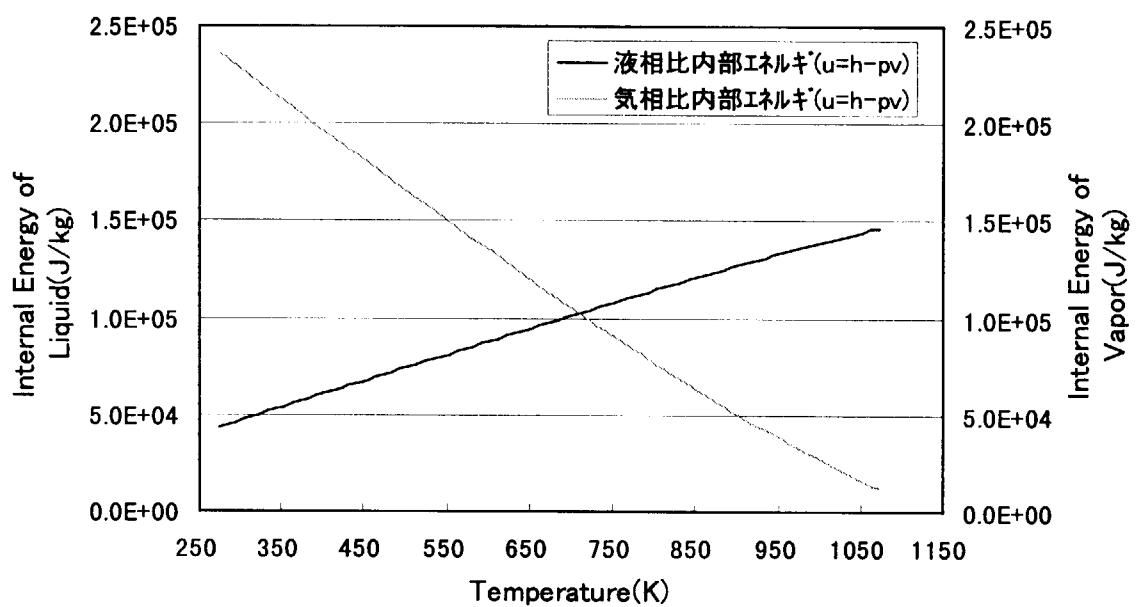


Fig.2.11 Specific Internal Energy

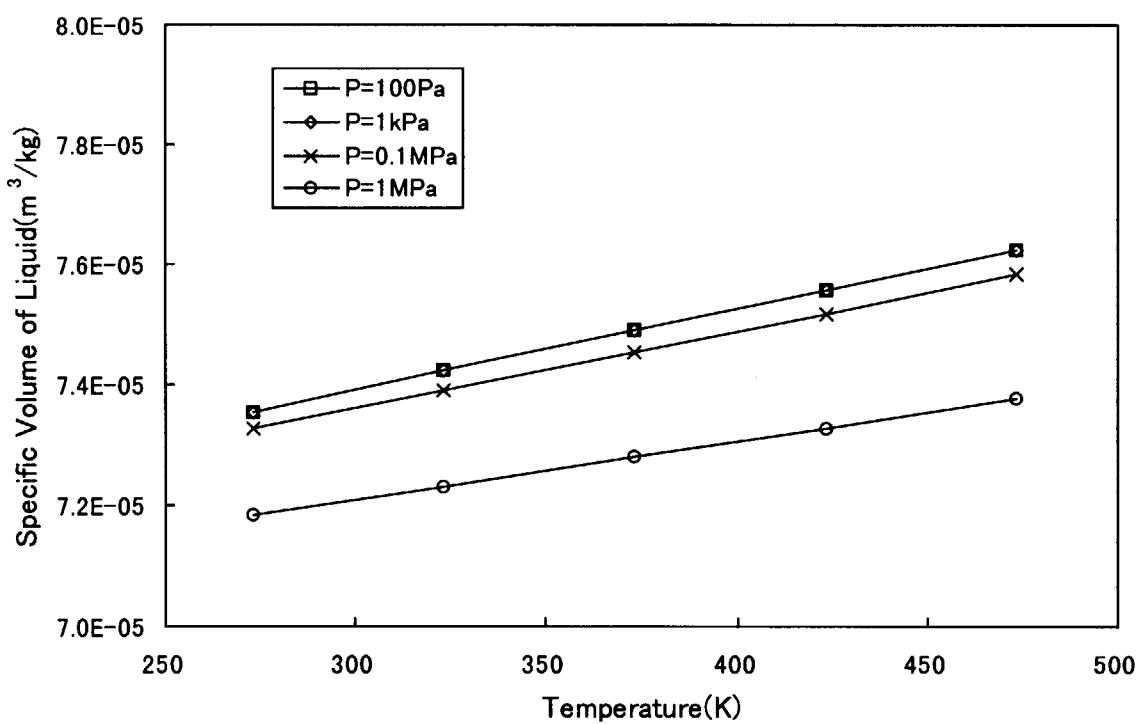


Fig.2.12 Specific Volume of Liquid

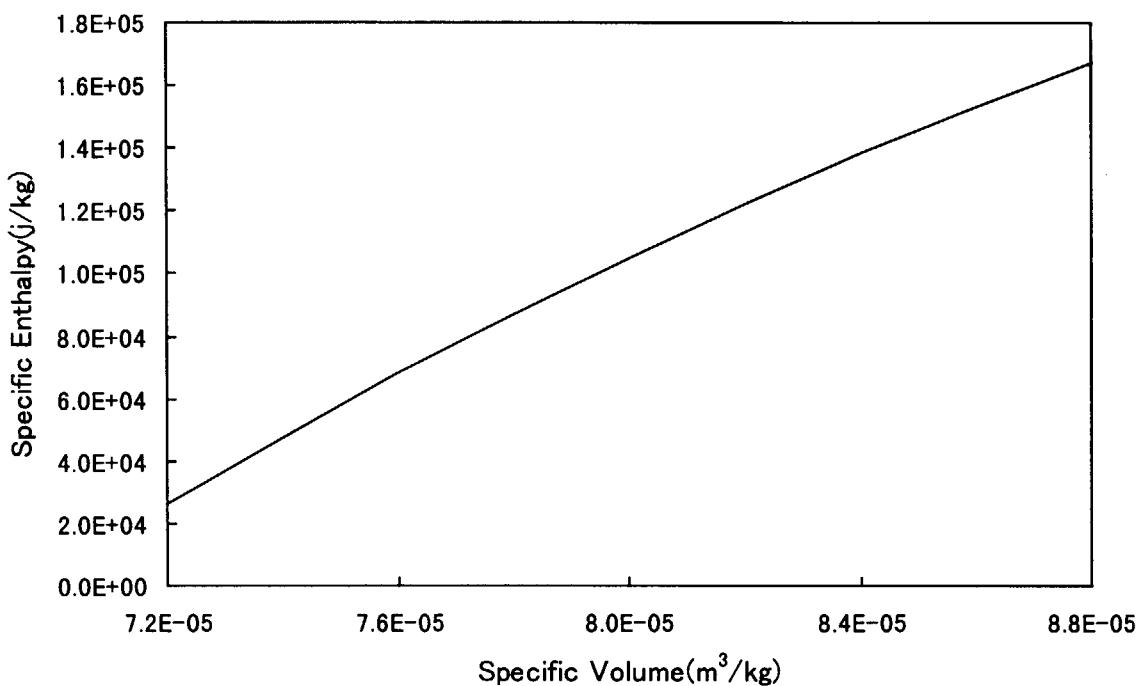


Fig.2.13 Specific Volume of Liquid

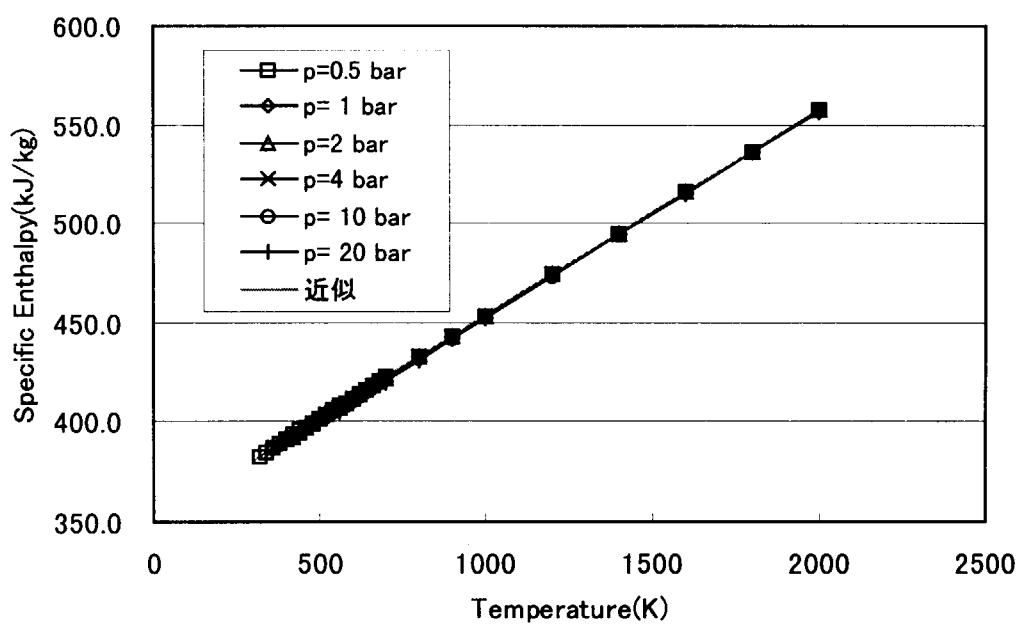


Fig.2.14 Specific Enthalpy of Vapor

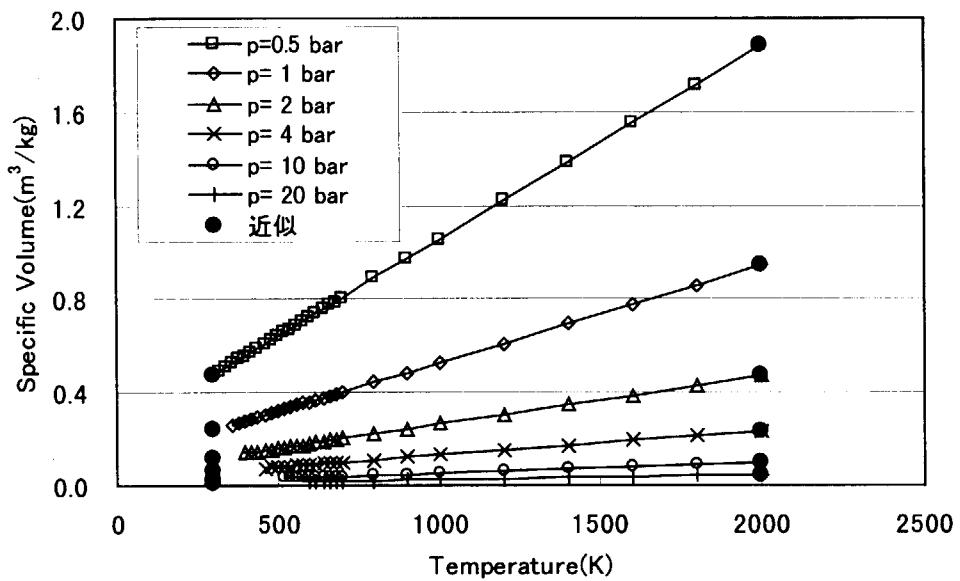


Fig.2.15 Specific Volume of Vapor

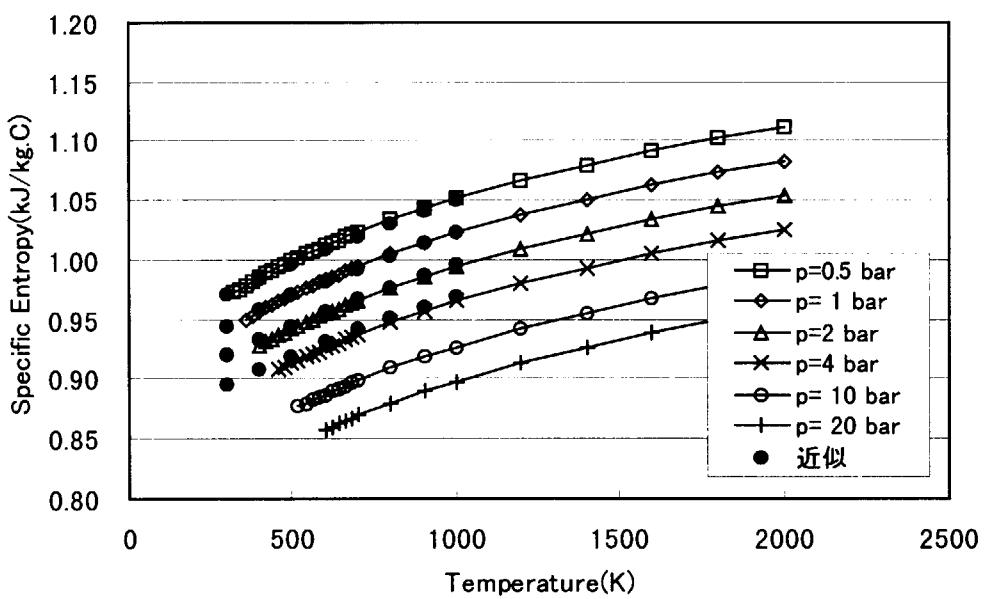


Fig.2.16 Specific Entropy of Vapor

3. 热伝導率、粘性係数及び表面張力

RELAP5 では、热伝導率、粘性係数及び表面張力は以下のサブルーチンで計算される。

热伝導率 : THCON

粘性係数 (液相) : VISCOL

粘性係数 (気相) : VISCOG

表面張力 : SURTEN

热伝導率及び粘性係数は Table 5⁽⁵⁾ 及び Table 6⁽³⁾ に示す値をサブルーチン THCON、VISCOL 及び VISCOG の DATA ステートメントに入力し、引数で渡された温度により線形内挿することで各値を得るようにした。表面張力は表 1 に示された値を基に、以下のフィッティング式を導き、引数で渡された温度により値が得られるようにした。

$$\text{SURTEN} = 0.545 - 0.0002T$$

Fig. 3.1 に表面張力と温度の関係を表す。

Table 5 Properties of Liquid

温度 (°C)	熱伝導率 (W/m·K)	粘性係数 (mPa·s)
-38.87	7.64	2.051
-20	7.90	1.852
0	8.18	1.688
20	8.45	1.559
40	8.71	1.455
60	8.97	1.369
80	9.22	1.298
100	9.48	1.238
120	9.72	1.187
140	9.96	1.142
160	10.19	1.104
180	10.42	1.070
200	10.64	1.040
250	11.18	0.978
300	11.69	0.931
350	12.16	0.894
400	12.60	0.863
450	13.01	0.838
500	13.39	0.817
550	13.73	0.800
600	14.04	0.785
650	14.33	0.772
700	14.58	0.760
750	14.79	0.750
800	14.98	0.742

Table 6 Properties of Vapor

温度 (K)	粘性係数 (μ Pa·s)	熱伝導率 (mW/m·K)
640.00	62.03	9.642
660.00	64.22	9.983
680.00	66.43	10.330
700.00	68.65	10.670
720.00	70.87	11.020
740.00	73.09	11.360
760.00	75.32	11.710
780.00	77.55	12.050
800.00	79.78	12.400
850.00	85.35	13.270
900.00	90.90	14.130
950.00	96.42	14.990
1000.00	101.90	15.840
1050.00	107.35	16.690
1073.15	109.86	17.080

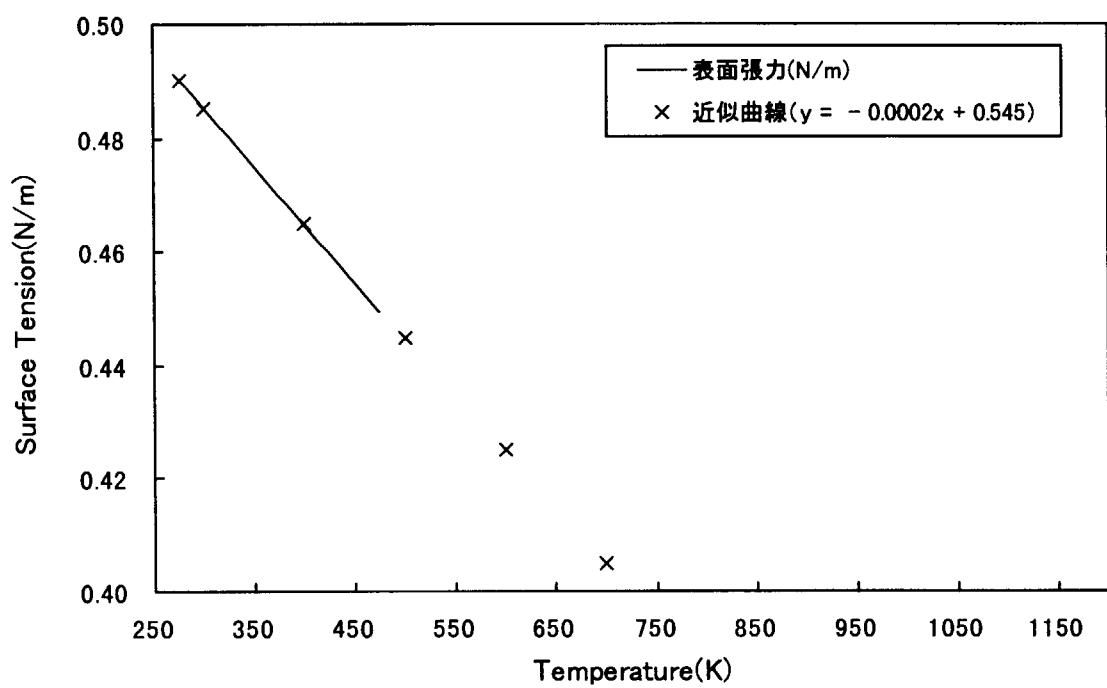


Fig.3.1 Surface Tension

4. 蒸気表関連サブルーチン

RELAP5 では起動時に第 1 章で作成された蒸気表データを読み込み、その後は以下のサブルーチンで流体の状態量を得る。

- STH2X0 温度から飽和圧力を得る
- STH2X1 温度に対する飽和状態を得る
- STH2X2 圧力に対する飽和状態を得る
- STH2X3 温度及び圧力より状態量を得る
- STH2X6 圧力及び比内部エネルギーより状態量を得る

状態量は蒸気表データをテーブル内挿することで得るが、その内挿方法は水の状態量が誤差無く得られるよう複雑なものとなっており、水の性質を考慮した定数が使われている。従って蒸気表データのみを水銀に置き換えるも適切な水銀の状態量は得られないため、ここで示したサブルーチンに若干の変更を加えて用いることとした。

5. RELAP5 用水銀ループデータの作成と試解析

RELAP5 用の水銀ループデータを作成し、2 章から 5 章で作成した蒸気表を水銀とした RELAP5 を用いて、試計算を実施した。

作成したデータのノード図を Fig. 5.1 に示す。

試計算では、200 秒間の外乱無しの過渡計算（ヌルトランジエント）を実施し、定常状態達成を確認した。添付した入力データは、膨張ポッド上端を $2\text{kg}/\text{cm}^2\text{-G}$ (0.297MPa) の圧力境界とし、コンポーネント 10 番の最上流セルでの流速がポンプの定格流量($0.84\text{m}^3/\text{hr}$)となるようポンプ回転数を制御している。また、冷却器 2 次側温度は 300K の温度境界としている。ヌルトランジエント中の主なパラメータの時間変化を Fig. 5.2、Fig. 5.3、Fig. 5.4 に示す。200 秒間のヌルトランジエントにより各値はほぼ一定値となっており、定常状態が達成されたことが分かる。Fig. 5.5 Fig. 5.6、Fig. 5.7 に時刻 200 秒の圧力、温度及び流速の分布を示す。今後の実験結果を基に圧力、温度分布等が妥当な値となるよう境界条件の調整等が必要である。

なお、実験装置の膨張ポッド上部には比凝縮性ガスが封入されているが、ここで作成した解析モデルでは膨張ポッド内は水銀で満たされているものとしている。これは解析モデルで膨張ポッド上部に比凝縮性ガスを封入すると、初期設定でエラーとなるためである。比凝縮性ガスを考慮した場合、その温度での飽和圧力に応じた気相の水銀が存在することになるが、 300K での水銀の飽和圧力が 3Pa 程度と非常に低いことが原因しているとも考えられる。なお、これに関しては、制御系を用いて膨張ポッドのガス体積の変化による圧力変化を算出し、それを時間依存ボリュームの圧力として、実際の圧力挙動が再現可能であると考えられる。また本計算では電磁ポンプを RELAP5 で考慮可能な遠心ポンプで代用したが、定格回転数で運転した場合、水銀の温度上昇が非常に大きくなつた。現在行われている実験での温度上昇が 10°C 程度であることから、ここで示した計算では温度上昇が実験結果と同程度となるようポンプ回転数を調整した。

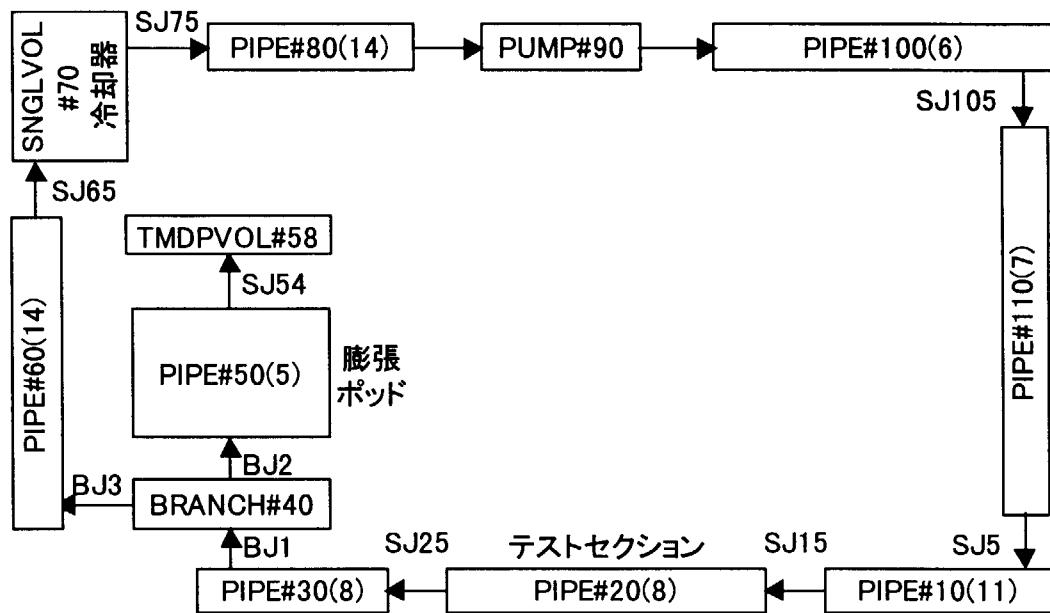


Fig.5.1 Nodalization of Mercury Experimental Loop

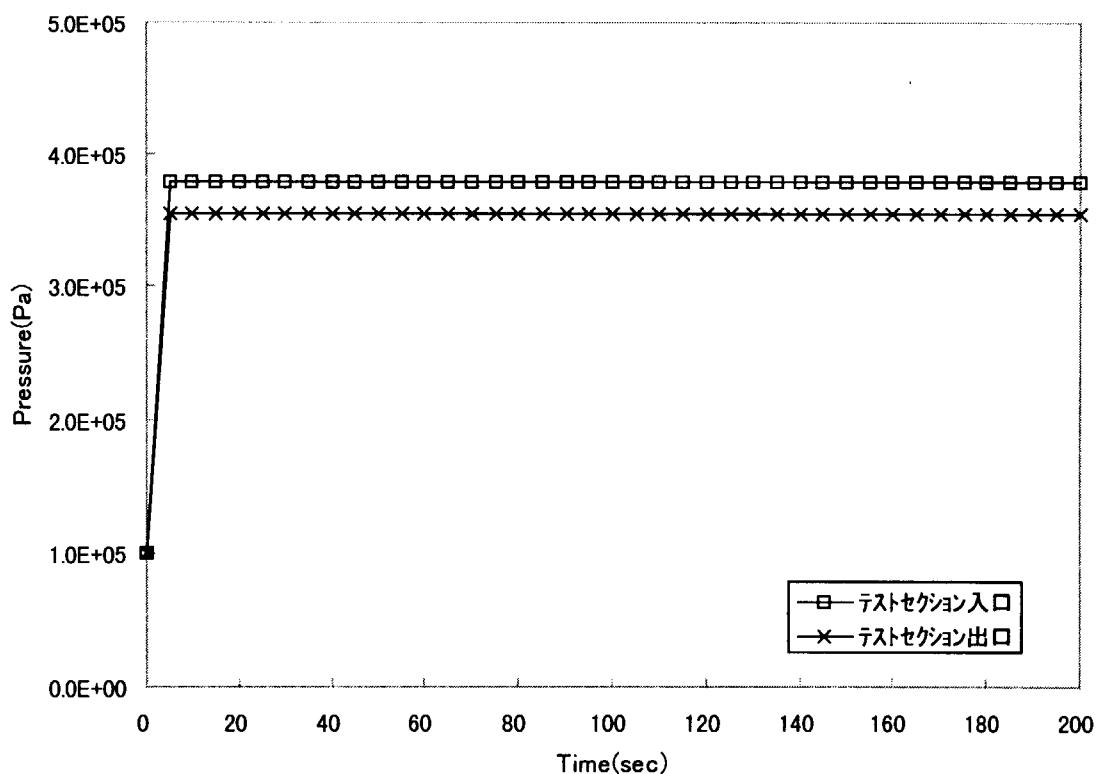


Fig.5.2 Pressure at Test Section during Null Transient Analysis

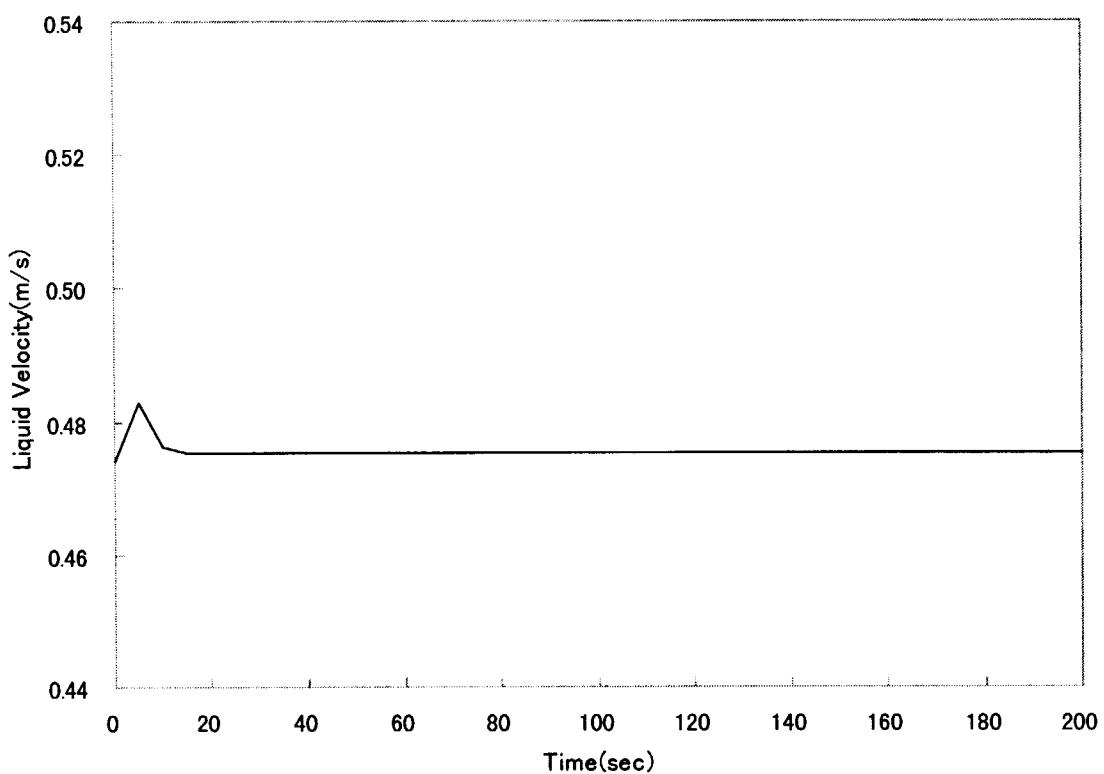


Fig.5.3 Mercury Velocity at upstream of Test Section

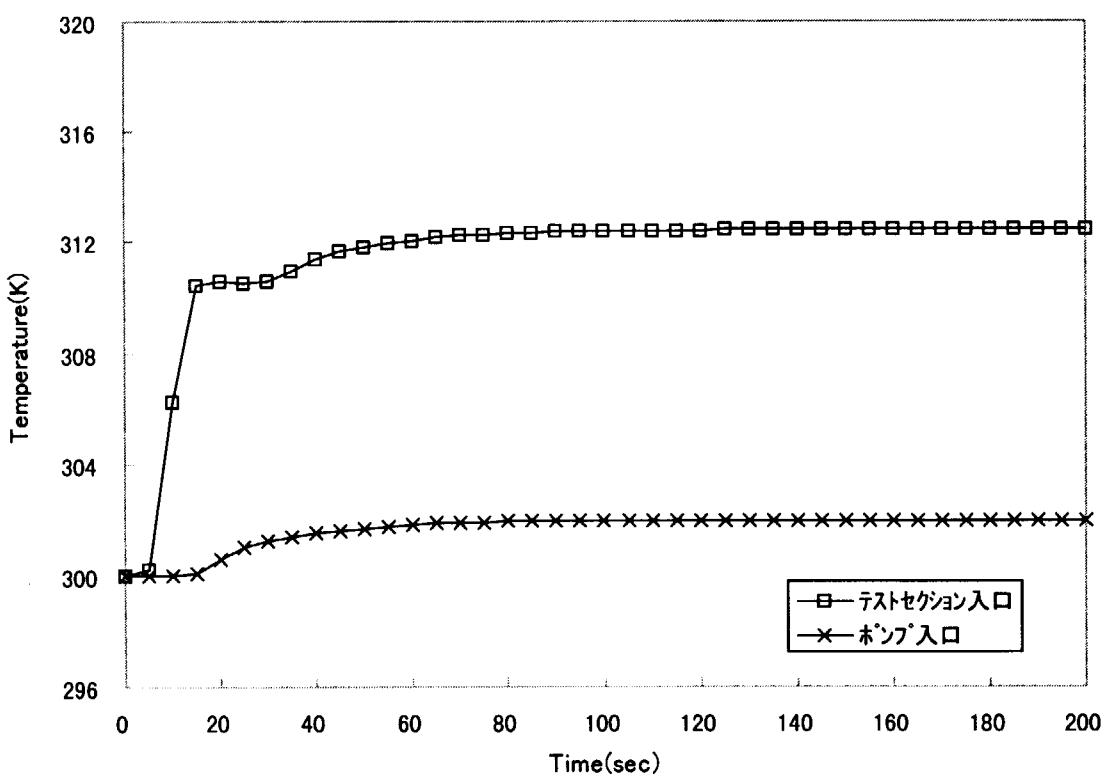


Fig.5.4 Mercury Temperature

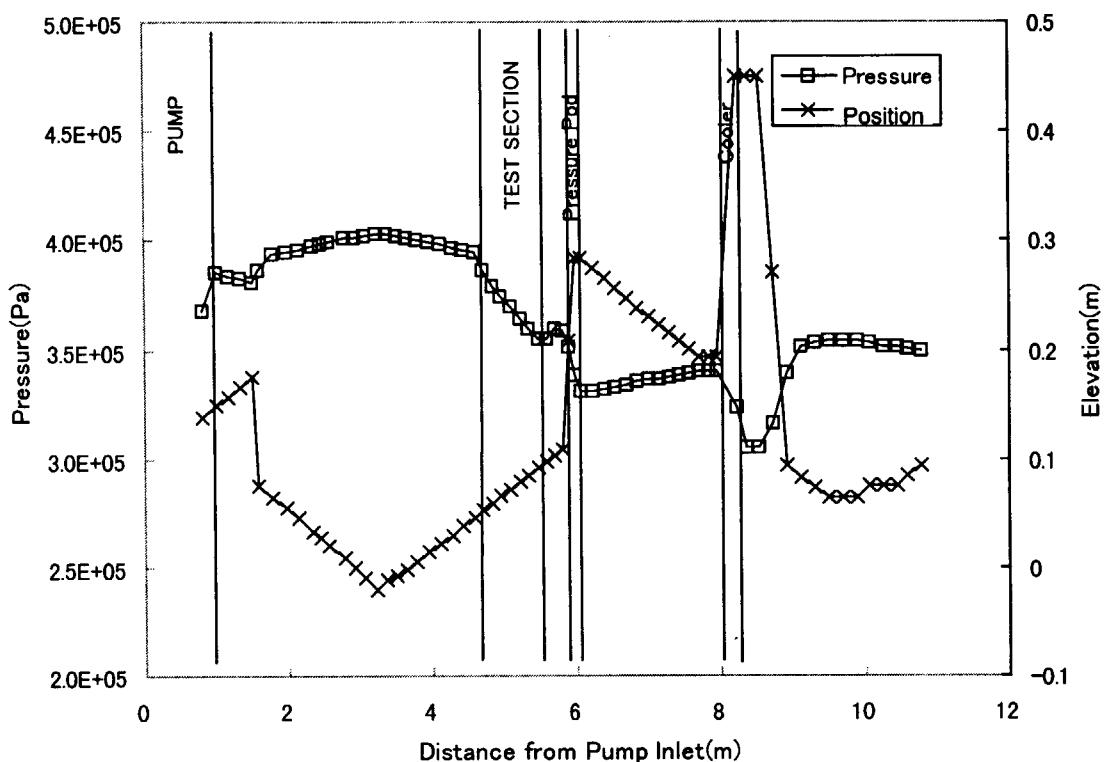


Fig.5.5 Pressure Distribution

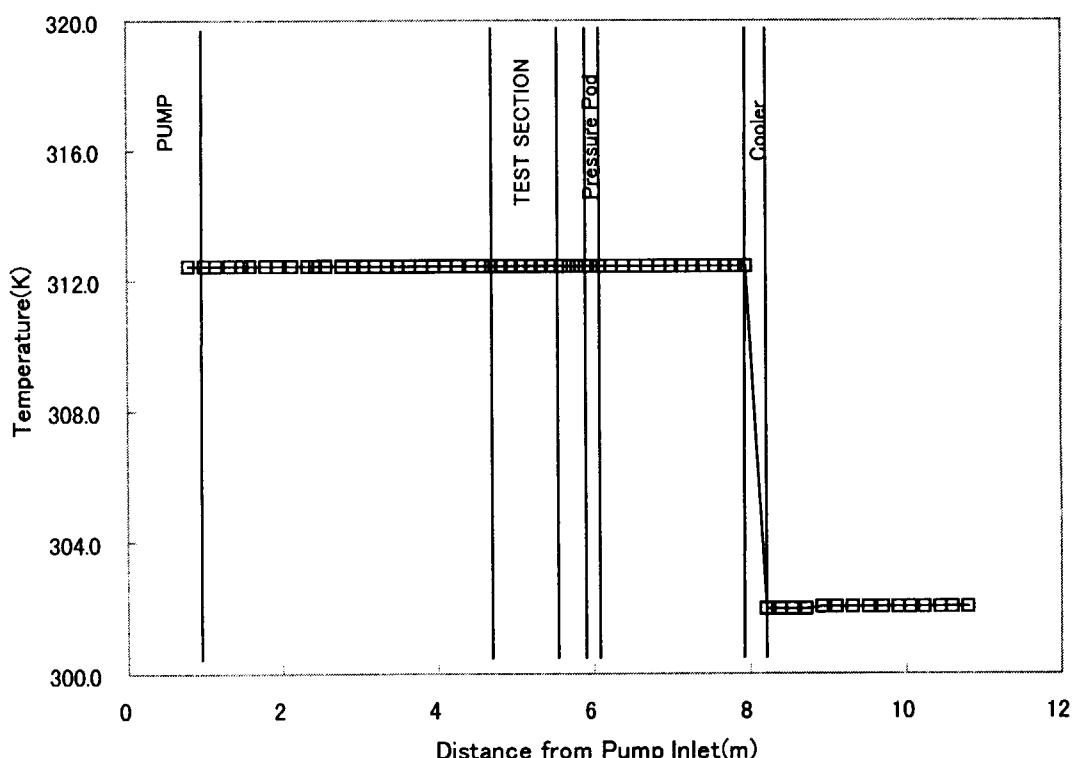


Fig.5.6 Temperature Distribution

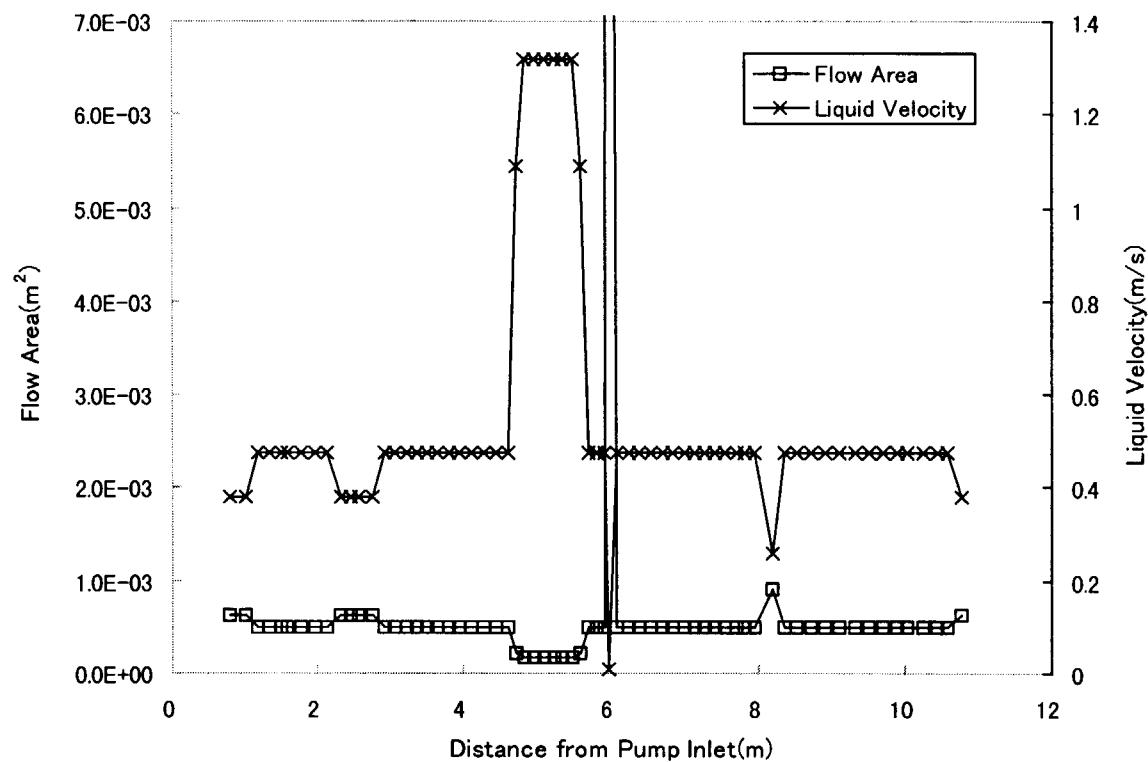


Fig.5.7 Flow Area and Velocity Distribution

6.まとめ

水銀を用いたシステムに対する熱流動安全解析コードの整備として、RELAP5 用水銀物性値の整備及び水銀物性値を用いた水銀流動基礎実験装置の解析を実施し、以下の結論を得た。

- 1 水銀物性に関しては参考資料より物性値を整理し、RELAP5 コードが実行時に読み込むバイナリ形式の蒸気表を整備した。同時に整備した蒸気表データを用いて物性値を算出する STH ルーチンも整備した。更に蒸気表データに記述されていない粘性係数、表面張力及び熱伝導率に関しては RELAP5 コードの該当するサブルーチンを変更した。
- 2 RELAP5 コード用にターゲット開発室が所有する水銀流動基礎実験装置の入力データを作成し、水銀用に改良した RELAP5 コードを用いて同実験装置の定常状態の解析を実施し、正常に解析できることを確認した。

今後は水銀流動基礎実験装置を用いた実験により得られた知見を解析コードに反映し、その解析精度を高めると同時に、水銀を用いたシステムの解析を実施していく予定である。

参考文献

- (1) 木下秀孝、神永雅紀、日野竜太郎, “RELAP5 コードによる水銀流動基礎実験装置の過渡解析（第 1 報 モデル化と予備解析）” JAERI-Tech 98-061, (1999-1)
- (2) HANDBOOK of PHYSICAL PROPERTIES of LIQUIDS and GASES, PURE SUBSTANCES AND MIXTURES, Third augment and revised edition, N.B.Vargaftic et al., p321-340, 1996
- (3) 技術資料 流体の熱物性値集、日本機会学会編、p193-194、1983
- (4) A.R.Hansen and C.A.Eckert, “ Volumetric Measurement for Some Liquid Metals at High Pressure and Temperature”, Journal of Chemical and Engineering Data, Vol.36, No.2, p252-255, 1991
- (5) 热物性ハンドブック、日本热物性学会編、p96-103, 1990

謝 辞

RELAP5 への水銀物性値の組み込みに当たっては、(株) IEAJ 前田俊哉氏に多大なご協力をいただいた。また、本報告書をまとめるに当たっては、核熱利用研究部 稲垣嘉之氏より貴重なご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s ²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m ²
工率、放熱束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
吸線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038	
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²	
6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								1	= 4.184 J(熱化学)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.1855 J(15 °C)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1868 J(国際蒸気表)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	
3.7 × 10 ¹⁰	1	

吸収線量	Gy	rad
1	100	
0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

水銀物性値の整備と試験
装置の過渡解析(第20報)
— さくらの水銀流動基礎実験