

ナトリウムの沸騰開始過熱度と 限界熱流束に関する研究

— 伝熱面予圧縮の影響 —

共同研究報告書

1998年 3月

京都大学
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下さい。

〒311-1393 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-1393, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束に関する研究
—伝熱面予圧縮の影響—
共同研究報告書

塩津正博[†]、白井康之[†]、畑 幸一^{††}
竹内右人^{††}、濱 勝彦^{††}、堺 公明^{†††}

要 旨

本研究は、ナトリウムの沸騰開始過熱度や沸騰開始後の膜沸騰への遷移がどのような条件下で発生するかを明確にするため、プール条件の水平円柱発熱体における初期沸騰温度と限界熱流束を系統的に求め、実験開始以前の履歴、コールドトラップ温度、液サブクール度等の沸騰開始過熱度及び限界熱流束への影響を明らかにし、それらの物理的機構を解明することを目的とする。平成9年度は、伝熱面を予圧縮した実験を実施することによって、活性キャビティの影響について評価した。

その結果、沸騰開始過熱度に対する伝熱面予圧縮の影響は明確ではなく、昨年度実施したコールドトラップの影響は明確に認められた。したがって、ナトリウムの沸騰開始機構はあらかじめ気泡を捕捉した活性キャビティからの発生によるものではないことが推定された。

† 京都大学エネルギー科学研究科
†† 京都大学エネルギー理工学研究所
††† 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 熱流体技術開発室

Incipient Boiling Superheat and Critical Heat Flux in Liquid Sodium
- Effect of the Pre-pressure on the Heated Surface -

Masahiro SHIOTSU*, Yasuyuki SHIRAI*, Koichi HATA**, Yuto TAKEUCHI**,
Katsuhiko HAMA** and Takaaki SAKAI***

ABSTRACT

Incipient boiling superheat and critical heat flux on a horizontal cylinder in liquid sodium have been systematically measured to know effects of the history of experimental condition, the cold-trap temperature, subcooling of the liquid sodium. The effect of pre-pressure on the heated surface was confirmed in FY1997 to evaluate the effect of active cavities on the heated surface.

As a result, the effect of the pre-pressure on the incipient boiling superheat was not observed for the range of cold-trap temperature from 378K to 433K at the bulk liquid sodium temperature of 863K and 973K.

* Graduate School of Energy Science, Kyoto Univ.

** Inst. of Advanced Energy, Kyoto Univ.

*** Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験装置	1
2.1 プール沸騰試験部	2
2.2 試験発熱体、加熱装置、バーンアウト検出器、オンラインデータ処理	3
3. 実験結果	5
4. まとめ	9
参考文献	10

表リスト

表1	実験結果	11
----	------	----

図リスト

図1	高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の構成図	16
図2	プール沸騰試験部(1)	17
図3	高熱流束試験発熱体	18
図4	代表的熱伝達経過	19
図5	沸騰開始過熱度とコールドトラップ温度の関係;系圧力3kPa	20
図6	沸騰開始過熱度とコールドトラップ温度の関係;系圧力7kPa	21
図7	沸騰開始過熱度とコールドトラップ温度の関係;系圧力14kPa	22
図8	沸騰開始過熱度とコールドトラップ温度の関係;系圧力25.9kPa	23
図9	キャビティーモデルによる液体ナトリウム中の種々の大きさの活性キャビティーからの沸騰開始過熱度評価、水の値との比較	24
図10	限界熱流束と発熱体位置の圧力に対するサブクール度の関係;系圧力3kPa	25
図11	限界熱流束と発熱体位置の圧力に対するサブクール度の関係;系圧力7kPa	26
図12	限界熱流束と発熱体位置の圧力に対するサブクール度の関係;系圧力14kPa	27
図13	限界熱流束と発熱体位置の圧力に対するサブクール度の関係;系圧力25.9kPa	28

1. 緒言

高速増殖炉（FBR）は、エネルギー資源の少ない我国でウラン資源の有効利用を計る将来の動力炉として開発が進められている。本研究は、高速炉の安全裕度を評価する上で、燃料破損の要因となりうるような大きなナトリウムの沸騰開始過熱度や沸騰開始後の膜沸騰への遷移がどのような条件下で発生するかを明確にするため、自然対流下並びに強制対流下のナトリウム中の試験発熱体における初期沸騰温度と限界熱流束を系統的に求め、実験開始以前の履歴、発熱率上昇速度、液サブクール度等の沸騰開始過熱度及び限界熱流束への影響を明らかにし、それらの物理的機構を解明することを目標とする。

これまでに、試験発熱体の発熱線の温度から発熱体表面温度を算出する新しい表面温度測定方式を確立し、熱電対を用いない試験発熱体（タンタル発熱リボン、BN電気絶縁、タンタルシース）を製作して、実験開始以前の履歴の影響、コールドトラップ温度の影響について検討を行った。

2. 実験装置

図1に本実験で用いた高温液体ナトリウム熱伝達実験装置のブロック図を示す。本装置は、ナトリウム冷却高速増殖炉における重大事故

時の安全性評価に関連する基礎データを集積することを目的としたもので、最高液体ナトリウム温度 900 °C (ナトリウムの沸点は大気圧下で 883 °C) で自然対流及び強制対流下の非沸騰及び沸騰熱伝達実験が可能である。この装置は、プール沸騰試験部 (1) 及びプール沸騰試験部 (2)、強制対流沸騰試験部、加熱器、エコノマイザー、エアークーラー、主電磁ポンプ、電磁流量計等からなる主ループ系、コールドトラップ、プラグ計、酸素計、精製系用電磁ポンプ、電磁流量計からなるナトリウム精製系、アルゴンガス及び真空ポンプからなるカバーガス調整系よりなっている。同図でエコノマイザーより上の試験部及び配管つまり、エコノマイザー、加熱器、強制対流沸騰試験部、プール沸騰試験部 (1) 及び (2) とそれらを結ぶ配管はハステロイ X 製である。電磁ポンプの最高使用ナトリウム温度は 500 °C であり、図のエコノマイザーより下の部分のナトリウム温度は、それより上の高温部のナトリウム温度が 900 °C の場合にもエコノマイザーとエアークーラーによって常に 500 °C 以下に保持される。

本実験装置の運転にあたっては、多数のバルブの開閉や圧力調整を正確に順序良く行わなければならない、又、常温から 900 °C 近傍まで広い温度範囲を取り扱う為に、試験部及び配管局所での異常な温度上昇、部分的な凝固・閉塞を起こさぬ様常に監視を行わなければならない。確立したバルブ操作の最適手順をデジタル計算機に記憶させてバルブ操作を間違いなく容易に行える様、又、予熱ヒーターの温度管理を行わせ、それと同時に、試験部及び配管上の 128 点の温度情報を、グラフィックディスプレイに色別で集中表示する様にデジタル計算機による運転管理システムを用いている。また、装置高温部を鋼板製の部屋に収納し窒素ガスで置換するナトリウム漏洩に伴う発火抑制装置が付属している。

2.1 プール沸騰試験部

本実験に用いたプール沸騰試験部 (1) は、図 2 に示すように外形 30 cm、高さ 70 cm の円筒形で、フランジを使用して高熱流束試験発

熱体が水平に取り付けられている。容器上部のフランジを使用すると垂直取り付けも可能である。試験部 2 本のインダクション型液面計を備えており、1 本は精度 ± 10 mm の連続表示型モニターで、他は液位の精密測定に使用する精度 ± 1 mm の上下可動式である。垂直方向液温分布測定が可能な 20 本の熱電対よりなる液温分布測定計も挿入されている。そして、試験槽内の液の静圧及び動圧を計測する圧力変換器が高熱流束発熱体を水平に取り付けるノズルと反対側のノズルに取り付けてある。試験槽内のナトリウムの昇温及び保温は電気炉で行う。

2.2 試験発熱体、加熱装置、バーンアウト検出器、オンラインデータ処理

試験発熱体は図 3 に示すように直径 7.6 mm、全長 550 mm で、発熱部長さ 50 mm、発熱線はタンタルリボン、シース材質はタンタルで、シースとの電気絶縁材はボロンナイトライド (BN)、最高熱流束は約 500 W/cm^2 である。

この発熱体の加熱電力を供給する電力増巾器の入力信号は、発熱体の焼け切れを防止するための保護回路 (バーンアウト検出器) を介してデジタル計算機の DA 変換インターフェースから供給される。又、発熱体加熱電流と発熱体端子電圧の信号は、絶縁増巾器で増巾された後 AD 変換されて計算機にとり込まれる。液温、流速等の信号も同様である。AD 変換時間は、チャンネル当たり $10 \mu\text{s}$ であり、16 チャンネル使用すると一巡するのに $160 \mu\text{s}$ を要する。

バーンアウト検出器の入力信号には、高速アナログ除算器を用いて算出した試験発熱体の発熱リボン電気抵抗信号を用いた。発熱リボンの電気抵抗が約 50°C 分急上昇した時点で発熱体の加熱電流を急速遮断して発熱体を実際に焼き切ることなく限界熱流束の計測を行っている。

試験発熱体表面温度は、以下に示すように、タンタル発熱リボンの平均温度をその電気抵抗から求め、発熱体中の熱伝導の解から算出し

た。まず、タンタル発熱リボンの電気抵抗 r と平均温度 T_m の関係を室温及び非通電時の数点のナトリウム温度で測定し、次の1次式で近似した。

$$r(T_m) = r_0(1 + 4.03 \times 10^{-3} T_m) \quad (1)$$

タンタル発熱リボンの平均温度 T_m をその電気抵抗測定値から予め校正した電気抵抗と温度の関係(1)式を用いて求め、試験発熱体表面熱流束 q (W/m^2) は、ジュール発熱率と試験発熱体加熱部表面積から求めた。発熱リボンを近似的に円筒として扱うと、発熱体表面温度 T_s は、半径方向の熱伝導式から次式で記述される。

$$T_s = T_m - K(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, d_0, d_1, d_2, d_3)q \quad (2)$$

ここで、 K は熱伝導率 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ と寸法 d_0, d_1, d_2, d_3 の関数。ただし、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ はそれぞれ発熱リボン、BN絶縁材、シースの熱伝導率、 d_0, d_1, d_2, d_3 は発熱リボンとシースの内外径である。BNの熱伝導率や内部寸法等に不確定要素があるので、(2)式の q の係数 K を、(2)式を用いて算出した表面温度による自然対流熱伝達実験結果が次に示す自然対流熱伝達の一般的表示式の値と合うよう定めた。

$$Nu = 10^z \quad (3)$$

ここで、

$$z = 0.193 + 0.145 \log Rf + 0.664 \times 10^{-2} (\log Rf)^2 - 0.232 \times 10^{-3} (\log Rf)^3 - 0.239 \times 10^{-4} (\log Rf)^4$$

$$Rf = Gr \cdot Pr^2 / (4 + 9Pr^{1/2} + 10Pr)$$

この一般的表示式は、研究代表者等が、境界層近似を施さない水平円柱自然対流熱伝達の厳密な数値解を求め、最小自乗法により求めたもので、Pr数が0.005, 0.7及び10に対するこれらの数値解を±4%以

内の誤差で記述することが確かめられている。

3. 実験結果

3-1 実験条件

系圧力 P_{sys} を3 kPa, 7kPa, 14 kPa, 及び25.9 kPaと変え、それぞれの圧力の飽和に近い条件で実験を行った。こうした低圧では、系が飽和でも水平円柱上部の液位によって発熱体中心軸位置の圧力 P_L は上昇し、それにもなって発熱体近傍の液は P_L に対する飽和温度 $T_{sat}(P_L)$ よりサブクールされている。各Runの実験条件 (P_{sys} 、液位、 P_L 、 $T_{sat}(P_L)$) をTable 1に示す。

3-2 代表的熱伝達経過

試験発熱体の加熱電流をゆっくり連続的に上昇させて得られた代表的な熱伝達経過は、図4のA~D及びA'~D'に示すように大きく2つに分類される。AB, A'B'は共に自然対流域であり(3)式の値と良く一致している。沸騰開始点は、図中B及びB'である。経過BDでは、沸騰開始後表面温度が一旦核沸騰曲線上の対応点まで下降した後、熱流束が核沸騰曲線上を上昇して限界熱流束点Dに至ると表面温度が膜沸騰域の対応点に向かって急上昇している。一方、B'点のように沸騰開始過熱度が70 K程度より高い場合、沸騰開始以後表面温度が下降することなく膜沸騰へ移行する。この場合には、沸騰開始熱流束が同時に限界熱流束である。沸騰開始過熱度が100 Kの場合、この直接遷移の限界熱流束は同一条件の核沸騰臨界熱流束とほぼ同じであり、250 Kでは約2.5倍になる。

3-3 沸騰開始過熱度

加熱履歴の影響

液体ナトリウムは、カバーガス(Ar)の溶解度が、水の場合とは逆に温度が高いほど大きく、発熱体表面の沸騰核となるキャビティ(くぼみ)内に初期に捕捉されたカバーガスが、発熱体加熱時間の経過と共に少なくなって、初期沸騰を起こす溶存ガスや蒸気が捕捉された活性なキャビティが少なくなり沸騰開始過熱度が高くなる可能性がある

る。そこで、加熱履歴の影響をみるため、繰り返して実験を行い沸騰開始過熱度 ΔT_i を求めた。その結果は、昨年報告したように実験を繰り返すに従って同一条件でも ΔT_i が大きくなるといった加熱履歴の明確な影響は認められず 10°C 近傍から 50°C 近傍に到る 1 群と 100°C から 250°C 近傍に到る 1 群の大きくばらついた結果が得られた。

コールドトラップ温度の影響

ナトリウム中の酸素濃度を調節するコールドトラップ (CT) 温度を 378 K から 434 K まで種々変えて沸騰開始過熱度を測定した。図 5 は、系圧力 3 kPa、バルク液温 863 K の場合の沸騰開始過熱度 ΔT_i と CT 温度の関係を示す。CT 温度が 398 K 以上の場合 ΔT_i は 3 K から 40 K の範囲であるが、CT 温度が 388 K から 398 K の間では、10K から 250K まで大きくばらついている。CT 温度が低くなるに従い ΔT_i が大きくなる傾向にあり、CT 温度 383K 以下では殆どのデータが 100K 以上である。

図 6 は、系圧力 7 kPa、バルク液温 923 K の場合の沸騰開始過熱度 ΔT_i と CT 温度の関係を示す。この場合も、上述の系圧力 3 kPa の場合と同様、CT 温度が低くなるに従い ΔT_i が大きくなる傾向にあり、CT 温度 400 K 以下では殆どのデータが 100K 以上である。

図 7 は、系圧力 14 kPa、バルク液温 973 K の場合の沸騰開始過熱度 ΔT_i と CT 温度の関係を示す。この場合には、上述の系圧力 3 kPa 及び 7 kPa の場合のような系統的な CT 温度の影響は見られず、CT 温度 383K では ΔT_i は 140K から 240K の範囲、CT 温度 393K と 403K では 40K から 200K の範囲で 3 kPa, 14 kPa の場合とあまり変わらないが CT 温度がそれ以上になっても ΔT_i は 70K から 200K の範囲で、40K 以下の結果は一つも得られていない。

図 8 は、さらに圧力の高い系圧力 25.9 kPa、バルク液温 1023 K の場合の沸騰開始過熱度 ΔT_i と CT 温度の関係を示す。この場合も、14 kPa と同様、系統的な CT 温度の影響は見られず、CT 温度 392 K 近傍に 1 点 $\Delta T_i = 35$ K のデータがあるのを除けば全て ΔT_i が 90 K 以上で沸騰開始と共に膜沸騰へ遷移している。

予圧の影響

キャビティーモデルに従えば、沸騰が発熱体表面の気体を捕捉したキャビティーから開始しているのであれば、加熱を開始する前に、加熱実験を予定している系圧力より高い圧力で予圧を与えてやると、その圧力で力の釣り合いがとれる特性径以上の大きさのキャビティーには液が進入してしまうため、以後圧力を下げてから加熱を行うと ΔT_f が上昇すると推測される。沸騰開始機構を考察するため、予め大気圧近傍まで加圧して5分間保持した後、それぞれ3 kPa及び14 kPaまで減圧してから加熱を開始した実験を行った。実験結果を比較のためそれぞれ図5及び図7上に▲で示す。予圧の影響が全く見られず、バルク液温863 Kの場合のCT温度の系統的な影響も同様である。こうしたことから、沸騰は活性なキャビティーから開始しているのではなくCT温度に依存する別の機構で開始していると推測される。

ナトリウムの表面張力は、液温863K~973 Kの場合大気圧飽和状態の液体窒素の約100倍、水の約10倍大きい。従って、他の液体に比較して伝熱面上のキャビティーに気体を捕捉しやすいが、同一の特性半径 r_c を持つ活性なキャビティーからの沸騰開始にはるかに大きな過熱度を要することが推測される。図9は、沸騰開始過熱度を簡単な式、 $\Delta P = 2\sigma/r_c$ から計算し、水の場合と比較して r_c に対して示す。図示するように、水と同程度の ΔT_f となるには、水よりはるかに大きな活性キャビティーを必要とすることが解る。このような大きな径のキャビティーが伝熱面に存在しないか存在しても気体を捕捉出来ないことが考えられる

3-4 沸騰開始熱流束と限界熱流束

系圧力3 kPa, 7kPa, 14 kPa, 及び25.9 kPaにおける沸騰開始点の熱流束 q_f を、液温のサブクール度 $\Delta T_{sub}(P_L)$ に対して、それぞれ図10~図13に□で示す。沸騰開始過熱度 ΔT_f が約60℃以下の場合には、沸騰開始後、キャビティーの活性化にともなって温度が一旦下降して発達した核沸騰が実現し、以後熱流束は核沸騰領域を限界熱流束迄上

昇し、温度が急上昇して膜沸騰に遷移する。発達した核沸騰の限界熱流束データを、比較のため●で示す。サブクール度の実験範囲が一番広く、かつ、核沸騰限界熱流束のデータが多い系圧力 3 kPa の場合 (図 10) を見ると、 $\Delta T_{\text{sub}}(P_L)$ が大きくなるほど、 q_{cr} が増大する傾向が見られる。発達した核沸騰の限界熱流束については、研究代表者等^{1,2)} が既に系統的な実験を行い、系圧力の低い領域で液体金属のみならず、水等の非金属液体においても、飽和沸騰限界熱流束は従来の理論値より大きい値を示し、蒸発の寄与以外に対流の寄与を含むことを実験的に明らかにした。そして、発熱体表面近傍の二相境界層からの上昇蒸気に伴う過熱液の流出による顕熱輸送により対流の寄与を説明する新しい理論モデルを提案し、系圧力の高い領域より超低圧領域にいたる迄の飽和及びサブクール沸騰限界熱流束を統一した理論式で表示しうることを示した²⁾。

沸騰開始過熱度 ΔT_i が 60 K 程度以上となると、沸騰開始と同時に表面温度の下降が全く検出されることなく熱流束が下降して直接膜沸騰へ遷移する。この場合には、沸騰開始熱流束がとりもなおさず限界熱流束である。膜沸騰直接遷移の場合の限界熱流束 ($q_w = q_c$) を図 10 ~ 図 13 に Δ で示すが、核沸騰限界熱流束より低い値からの核沸騰限界熱流束の 2 倍以上迄広範囲に分布している。

こうした直接遷移は、伝熱面上に活性なキャビティーが無くなって高い温度まで過熱し、液で満たされたキャビティー中での不均質自発核生成温度に到達すると、不均質自発核生成が一斉に起こり伝熱面近傍の過熱液からエネルギーの供給をうけて瞬時に蒸気膜が生成することによると考えられる。研究代表者等は、液体窒素、エタノール、高圧で予圧した水等の非金属液体中の加熱固体面で、活性なキャビティーが無い場合の不均質自発核生成によると考えられる膜沸騰直接遷移の研究結果を報告³⁾しているが、非金属液体の場合には初期沸騰熱流束が発達した核沸騰限界熱流束の数十分の一と低くなっている。ナトリウムの場合には自然対流熱伝達が良いのでこのように大きな値となる。

4 まとめ

- 1) 臨界熱流束実験に最適な試験発熱体として、発熱リボンとシースを共にタンタルとし、発熱リボンの電気抵抗から表面温度を算出する方式の試験発熱体を開発した。寿命の短い熱電対を止めたこと及びシースを耐熱性の高いタンタルとしたことで、本実験の最も過酷な条件である液温1023 K、表面過熱度230 K、熱流束 5.6×10^6 W/m²にも耐えて全てのデータを実際に発熱体を焼損することなくとることが出来た。
- 2) ΔT_i には、加熱開始以前の加熱履歴の明確な影響は認められない。
- 3) 系圧力が3 kPa(液温863 K)と7 kPa(液温923 K)では、沸騰開始過熱度 ΔT_i は、コールドトラップ温度の低下と共に高くなり、コールドトラップ温度の影響が明確に認められる。
- 4) 系圧力が14 kPa(液温973 K)と25.9 kPa(液温1023K)では、 ΔT_i は40 K近傍から200 K近傍までばらついているが、コールドトラップ温度の系統的影響は認められない。
- 5) 沸騰開始過熱度が60 K程度以下の場合には一旦発達した核沸騰を経過して限界熱流束値 q_{cr} に到達し発熱体表面温度が急上昇するが、70 K程度より大きいと、非沸騰状態から沸騰開始の瞬間に膜沸騰直接遷移が起こる。
- 6) 沸騰開始過熱度に対する予圧の影響は殆ど認められず、予圧を行った場合でも、上記項目3)に示したコールドトラップ温度の影響が明確に認められる。この事実から、沸騰は予め気体を捕捉した活性化キャビティから開始するのではなく、予圧に依存しない別の機構で開始すると予想される。

参考文献

- 1) A. Sakurai, M. Shiotsu, I. Kataoka and K. Hata, Heat Transfer 1978, Vol.1, p.193, Hemisphere Pub. Co., Washington D. C. (1978).
- 2) A. Sakurai, M. Shiotsu and K. Hata, Heat Transfer 1982, Vol.4, p.345, Hemisphere Pub. Co., Washington D.C. (1982).
- 3) A. Sakurai, M. Shiotsu and K. Hata, in Instability in Two-Phase Flow Systems, ed. By J.H. Kim, pp.27-39, ASME HTD-Vol. 260 (1993).

表1 実験条件

Run No.	P _{sys} (kPa)	Liquid Head (mm)	P _L (kPa)	T _{sat} (P _L) (K)	ΔT _{sub} (P _L) at q _{cr} (K)	Cold Trap Temp. (K)
1	3.01	118	3.95	885.1	16.9	402
2	3.04	123	4.02	886.2	18.0	398
3	2.98	126	3.98	885.6	18.7	411
4	2.98	137	4.07	887	32.6	410
5	2.99	116	3.91	884.5	20.3	408
6	2.98	115	3.89	884.2	17.3	405
7	2.94	112	3.83	883.2	20.5	400
8	3.01	200	4.60	894.9	31.2	398
9	2.93	183	4.38	891.8	22.6	393
10	2.96	194	4.50	893.5	31.7	392
11	2.99	205	4.62	895.1	30.9	378
12	3.00	200	4.59	894.7	31.5	378
13	2.97	197	4.53	894	25.8	378
14	2.95	195	4.50	893.4	37.2	398
15	2.89	177	4.30	890.5	21.8	403
16	2.99	198	4.56	894.4	31.8	400
17	2.98	195	4.53	893.9	27.4	405
18	2.99	99	3.78	882.3	15.8	406
19	3.00	202	4.60	894.9	37.7	388
20	3.06	202	4.66	895.8	36.6	388
21	3.00	204	4.62	895.2	27.0	380
22	2.96	199	4.54	894	27.8	380
23	2.99	205	4.62	895.1	35.9	381
24	2.97	191	4.49	893.3	25.1	384
25	3.01	103	3.83	883.2	15.0	383
26	3.00	98	3.78	882.3	9.1	398
27	3.00	99	3.79	882.6	22.4	413
28	2.96	200	4.55	894.2	29.0	409
29	3.00	198	4.57	894.5	30.3	397
30	2.97	193	4.50	893.5	26.6	395
31	3.02	206	4.66	895.7	31.5	403
32	3.01	210	4.68	896	31.8	403
33	3.01	207	4.66	895.7	32.5	403
34	3.00	206	4.64	895.4	30.2	403
35	3.00	205	4.63	895.3	29.1	403
36	3.00	208	4.66	895.7	37.5	403
37	3.00	213	4.70	896.3	32.1	403
38	3.00	211	4.68	896	32.8	413
39	3.02	212	4.71	896.3	32.1	413

表1 実験条件 (続き)

40	3.01	211	4.69	896.1	32.9	412
41	3.00	212	4.68	896.1	30.9	412
42	3.01	207	4.66	895.7	33.5	413
43	3.02	209	4.68	896	33.8	413
44	3.00	216	4.72	896.5	31.3	393
45	2.99	216	4.71	896.4	35.2	392
46	3.04	217	4.77	897.2	32.0	392
47	3.04	218	4.77	897.3	33.1	392
48	3.00	212	4.69	896.1	34.9	393
49	3.03	216	4.75	896.9	33.7	392
50	2.99	218	4.72	896.6	35.4	393
51	3.01	212	4.70	896.2	33.0	392
52	3.00	212	4.69	896.1	32.9	392
53	3.00	202	4.60	895		395
54	3.00	201	4.59	894.8	21.6	382
55	3.00	177	4.40	892	26.8	382
56	2.99	203	4.61	895	33.8	399
57	2.93	202	4.54	894	30.8	399
58	3.01	205	4.64	895.4	29.2	397
59	2.99	207	4.64	895.4	32.2	397
60	2.99	209	4.65	895.6	32.4	397
61	3.05	214	4.75	897	31.8	423
62	3.05	213	4.74	896.9	32.7	422
63	3.03	213	4.72	896.6	32.4	422
64	2.99	202	4.60	894.8	33.6	423
65	3.00	200	4.59	894.8	30.6	423

表1 実験条件 (続き)

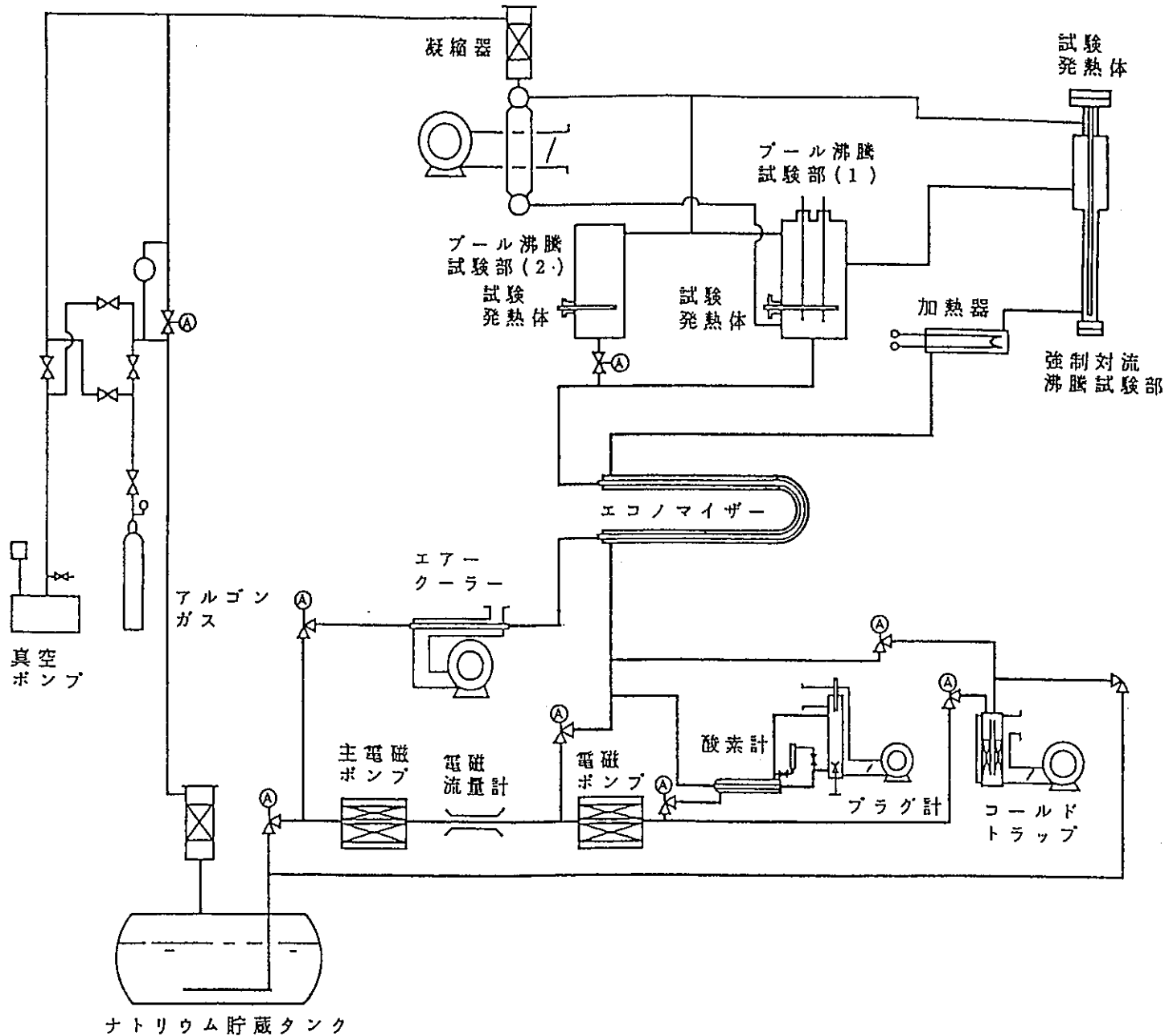
Run No.	Psys (kPa)	Liquid Head (mm)	P _L (kPa)	Tsat(P _L) (K)	ΔTsub(P _L) at q _{cr} (K)	Cold Trap Temp. (K)
66	13.94	215	15.60	981.7	12.5	423
67	13.92	215	15.57	981.6	8.4	422
68	13.89	216	15.55	981.5	11.3	422
69	13.87	216	15.53	981.4	12.2	422
70	13.98	210	15.60	981.7	11.5	423
71	14.01	210	15.63	981.9	15.7	423
72	13.88	219	15.57	981.6	11.4	433
73	13.92	219	15.60	981.8	6.6	433
74	13.92	219	15.61	981.8	12.6	433
75	13.81	215	15.46	981.1	19.8	413
76	13.98	215	15.63	981.9	8.7	412
77	13.88	215	15.53	981.4	6.2	412
78	14.01	206	15.60	981.7	11.5	413
79	13.93	207	15.52	981.4	10.2	413
80	13.93	218	15.61	981.8	9.6	402
81	13.88	217	15.55	981.5	11.3	402
82	13.95	217	15.62	981.9	8.7	402
83	13.88	216	15.54	981.5	9.3	402
84	13.98	205	15.56	981.5	8.3	403
85	13.97	204	15.54	981.5	9.3	403
86	13.97	211	15.60	981.7	15.5	392
87	13.97	211	15.60	981.7	12.5	392
88	14.04	212	15.67	982.1	12.9	392
89	14.12	212	15.75	982.5		
90	13.95	209	15.56	981.5	9.3	393
91	13.91	210	15.53	981.4	12.2	394
92	13.90	211	15.52	981.4	10.2	383
93	13.97	211	15.60	981.7	12.5	383
94	14.00	212	15.63	981.9	19.7	383
95	13.99	212	15.62	981.9	9.7	382
96	13.94	212	15.57	981.6	9.4	381
97	14.02	211	15.64	982.	11.8	381

表1 実験条件 (続き)

Run No.	Psys (kPa)	Liquid Head (mm)	P _L (kPa)	Tsat(P _L) (K)	ΔTsub(P _L) at qcr (K)	Cold Trap Temp. (K)
98	7.04	196	8.57	937.1		384
99	7.00	186	8.46	936.2	16.0	385
100	7.05	185	8.50	936.5	26.3	385
101	7.03	205	8.63	937.6	16.4	398
102	7.07	204	8.67	937.9	13.7	396
103	6.99	198	8.54	936.8	15.6	407
104	7.03	195	8.56	937	16.8	406
105	7.02	201	8.59	937.2	15.0	413
110	6.94	198	8.49	936.4	28.2	412
111	6.99	200	8.55	937	17.8	411
112	7.00	197	8.54	936.8	14.6	424
113	6.98	197	8.52	936.7	14.5	434
114	6.90	196	8.43	936	15.8	422
115	7.00	198	8.54	936.8		431
116	6.92	197	8.46	936.1	12.9	431
117	6.94	197	8.48	936.3	13.1	432
118	6.93	201	8.51	936.6	16.4	402
119	6.93	200	8.49	936.4	15.2	403
120	7.02	199	8.57	937.1	14.9	402
121	7.05	201	8.62	937.5	15.3	402
122	6.98	200	8.54	936.8	15.6	394
123	7.00	202	8.58	937.2	20.0	393
124	7.08	201	8.56	937.8	15.6	392
125	7.00	202	8.58	937.2	16.0	384
126	7.00	200	8.56	937	14.8	383

表1 実験条件 (続き)

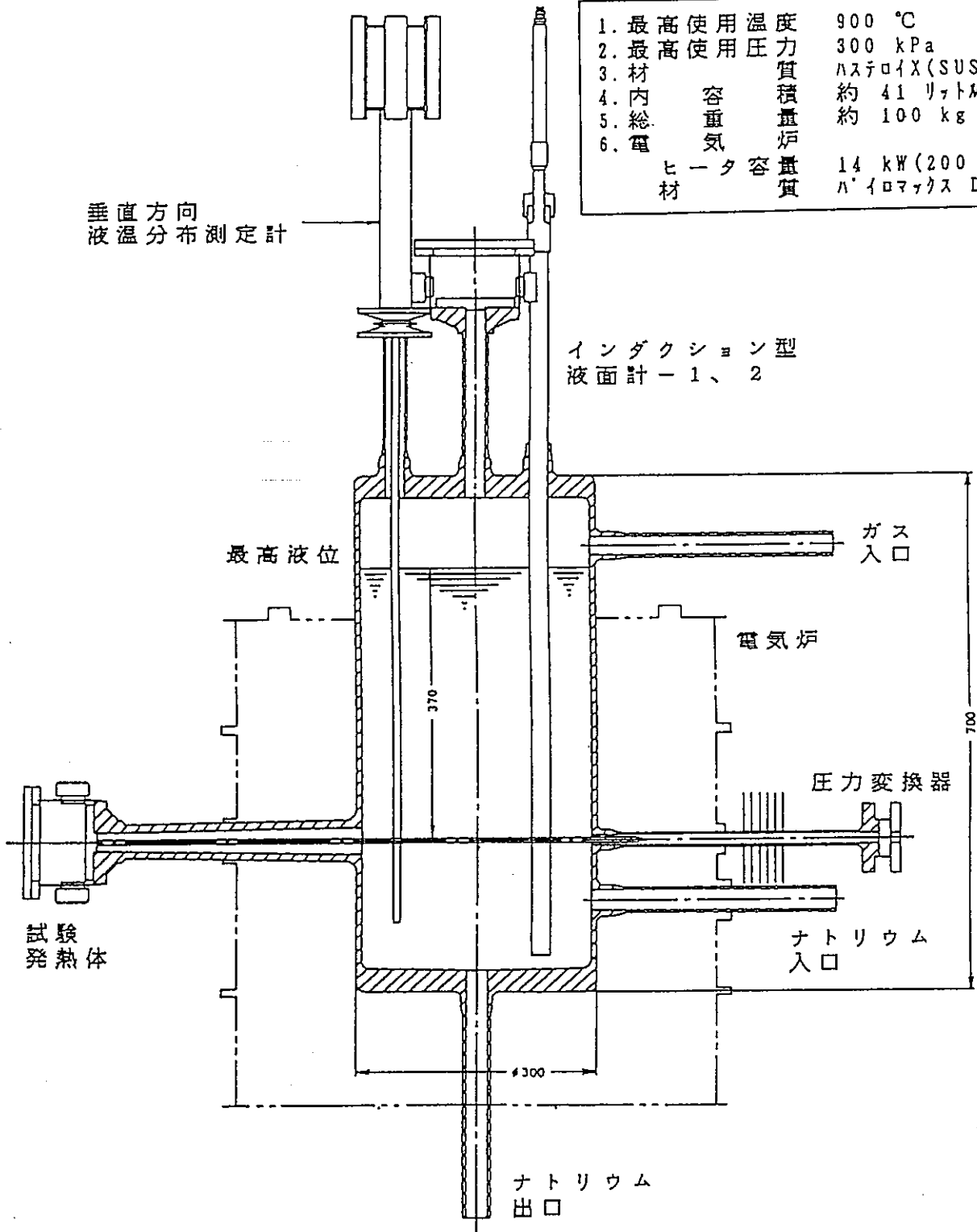
Run No.	Psys (kPa)	Liquid Head (mm)	P _L (kPa)	Tsat(P _L) (K)	ΔTsub(P _L) at qcr (K)	Cold Trap Temp. (K)
127	25.47	201	27.0	1026.6	10.4	430
128	25.91	201	27.4	1028.0	5.8	434
129	25.78	202	27.3	1027.6	5.4	433
130	25.62	200	27.1	1027.1	9.9	423
131	25.96	198	27.5	1028.1	2.9	422
132	25.91	204	27.4	1028.1	2.9	413
133	25.83	201	27.4	1027.8	8.6	413
134	25.89	201	27.4	1027.9	4.7	412
135	25.90	199	27.5	1027.9	5.7	412
136	25.93	206	27.5	1028.2	4.0	403
137	25.98	206	27.5	1028.3	5.1	403
138	25.96	206	27.5	1028.3	5.1	403
139	25.75	207	27.3	1027.6	6.4	394
140	25.86	205	27.4	1027.9	2.7	392
141	25.97	204	27.5	1028.3	3.1	391
142	25.76	204	27.3	1027.6	4.4	384
143	25.91	204	27.5	1028.1	5.9	384
144	25.93	204	27.5	1028.1	4.9	384



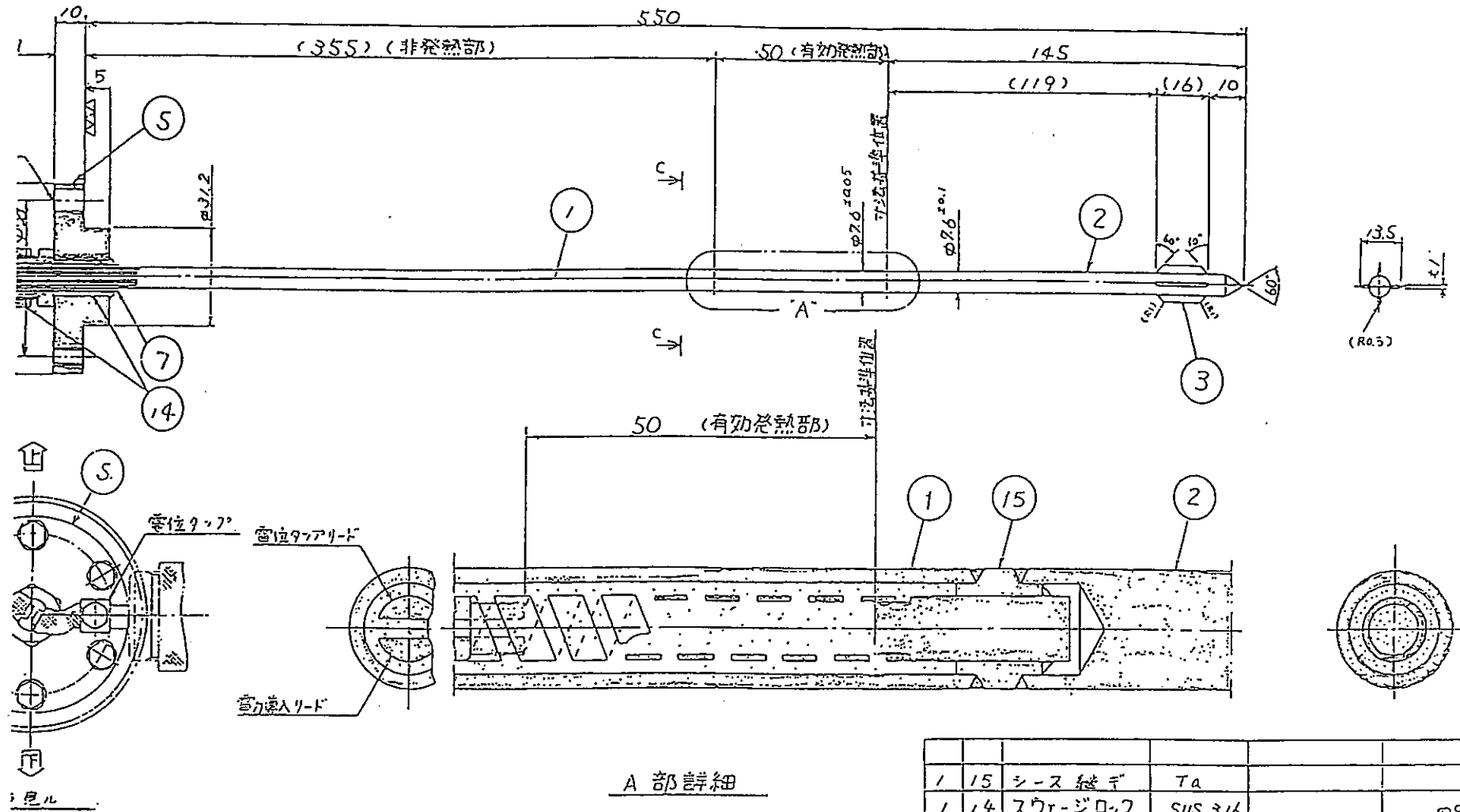
第1図 高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の構成図

仕様

1. 最高使用温度	900 °C
2. 最高使用圧力	300 kPa
3. 材質	ハステロイX(SUS316)
4. 内容積	約 41 リットル
5. 総重量	約 100 kg
6. 電気消費量	14 kW(200 V 単相)
ヒータ材質	ハ・イロマックス DS 2.0 φ



第2図 プール沸騰試験部(1)



A 部詳細

ヒータピン仕様

1. 型式	電気絶抗耐発熱方式 接地型(電位タップ付)
2. シース材質	Ta
3. 発熱体材質	Ta
4. リード線材質	Cu-Ta
5. 絶縁体材質	D.I.

1	15	シース継ぎ	Ta	
1	14	スウェージロック	SUS 316	φ9.5 厚
	13	穴 番		
	12	↑		
	11			
	10			
	9	↓		
	8	穴 番		
1	7	スリーブ	Ta	

第3図 高熱流束試験発熱体

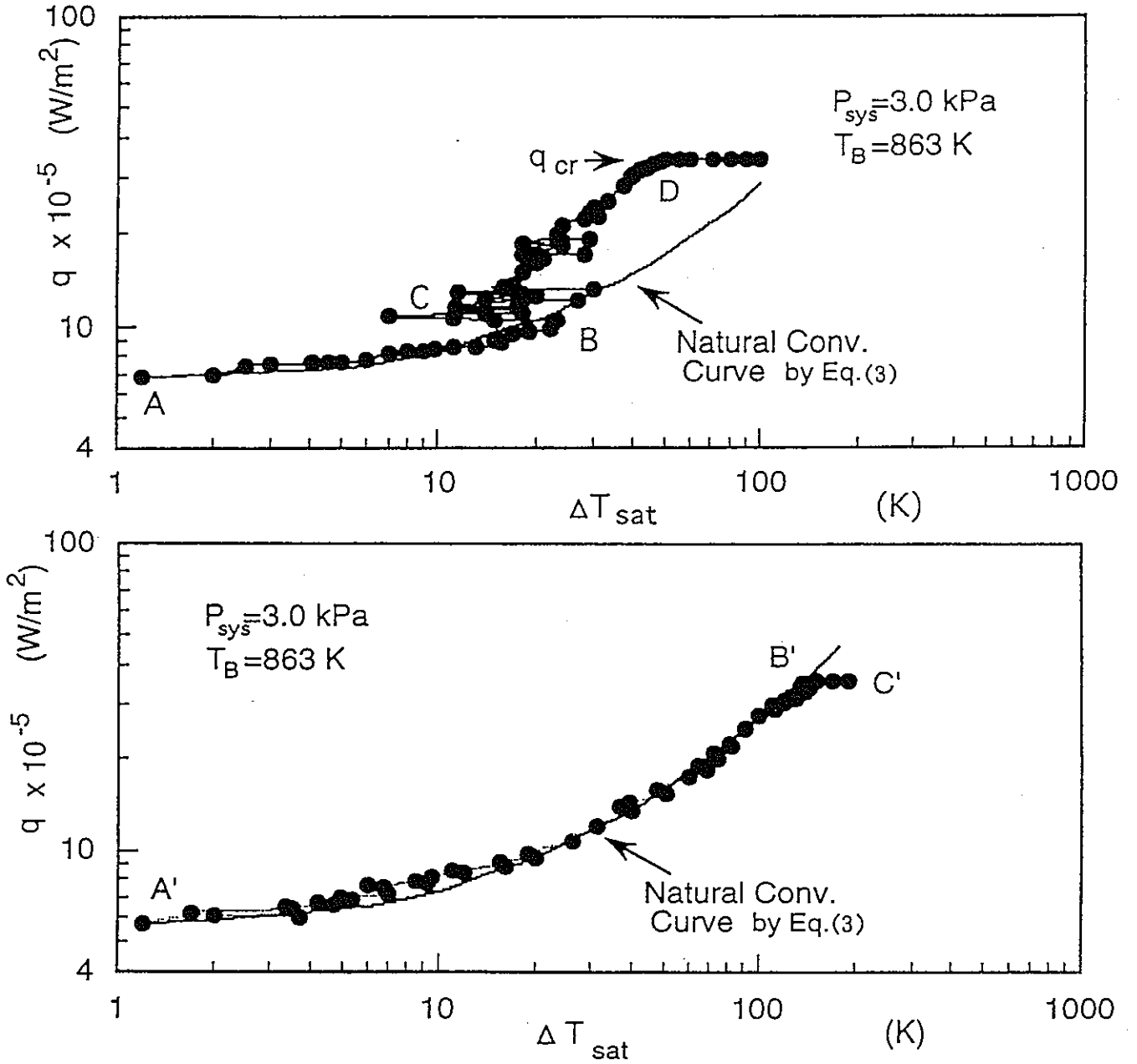
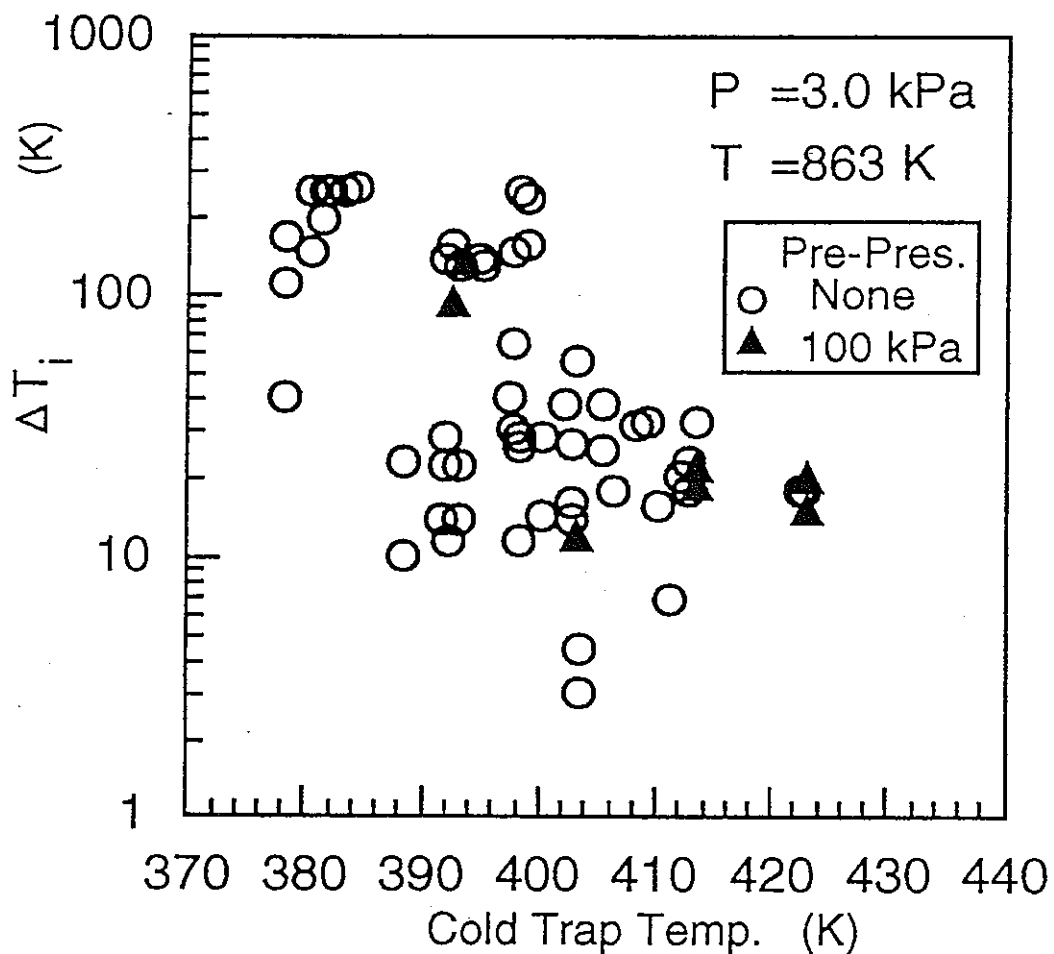


图 4 代表的熱伝達経過



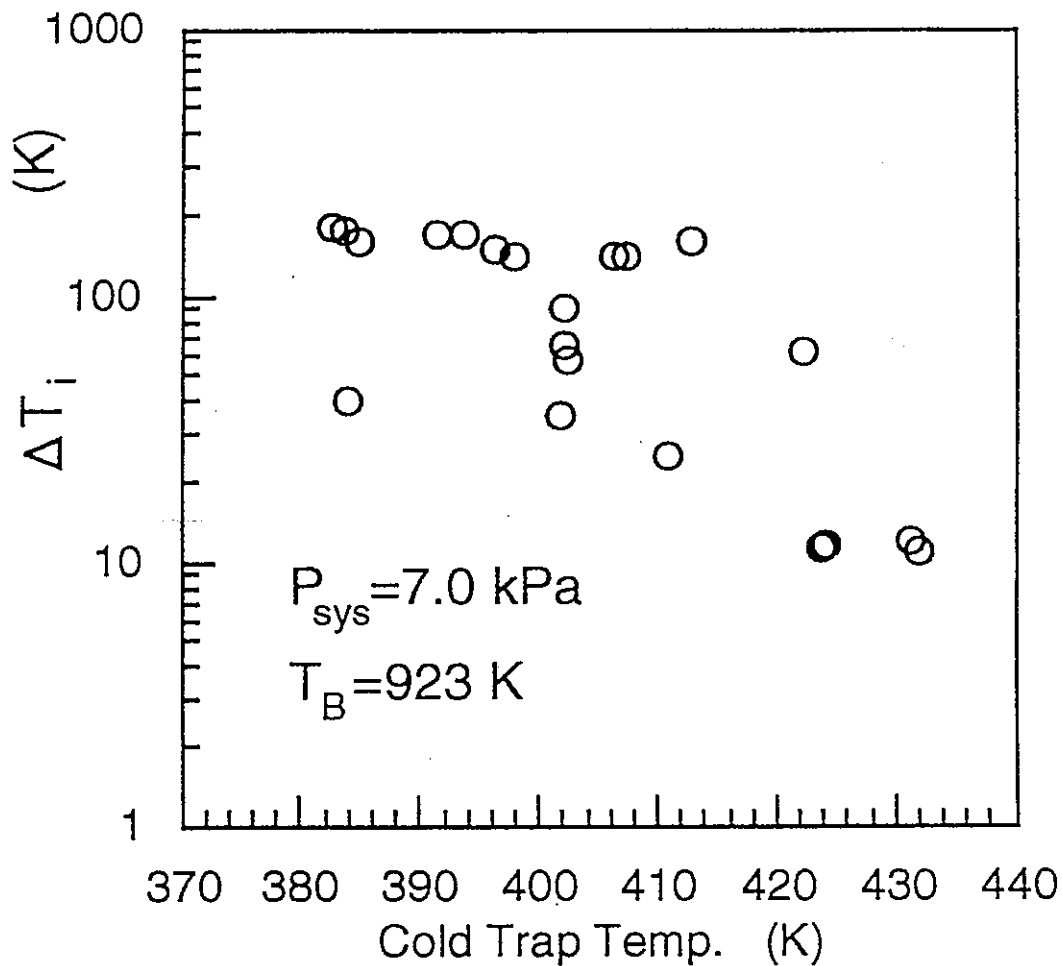


図 6 沸騰開始過熱度とコールドトラップ温度の関係；
 系圧力 7 kPa

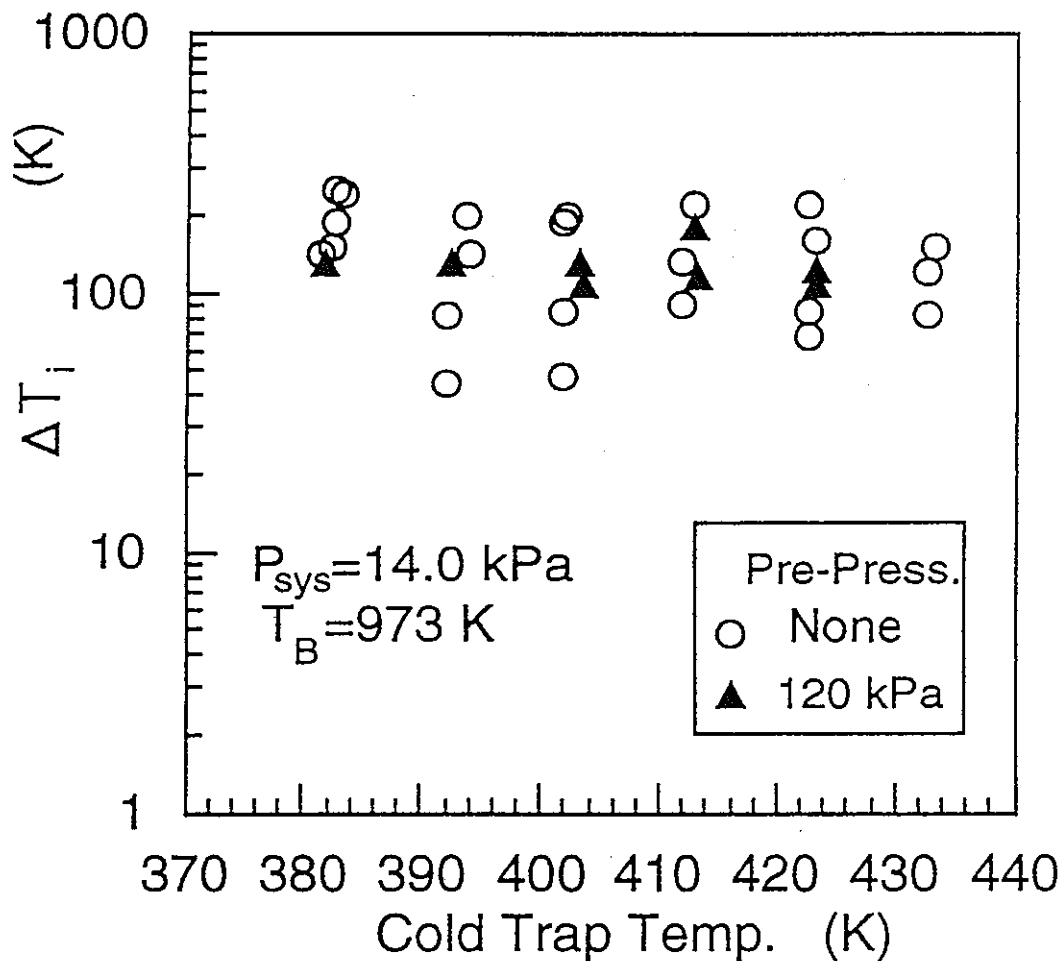


図7 沸騰開始過熱度とコールドトラップ温度の関係；
系圧力 14 kPa

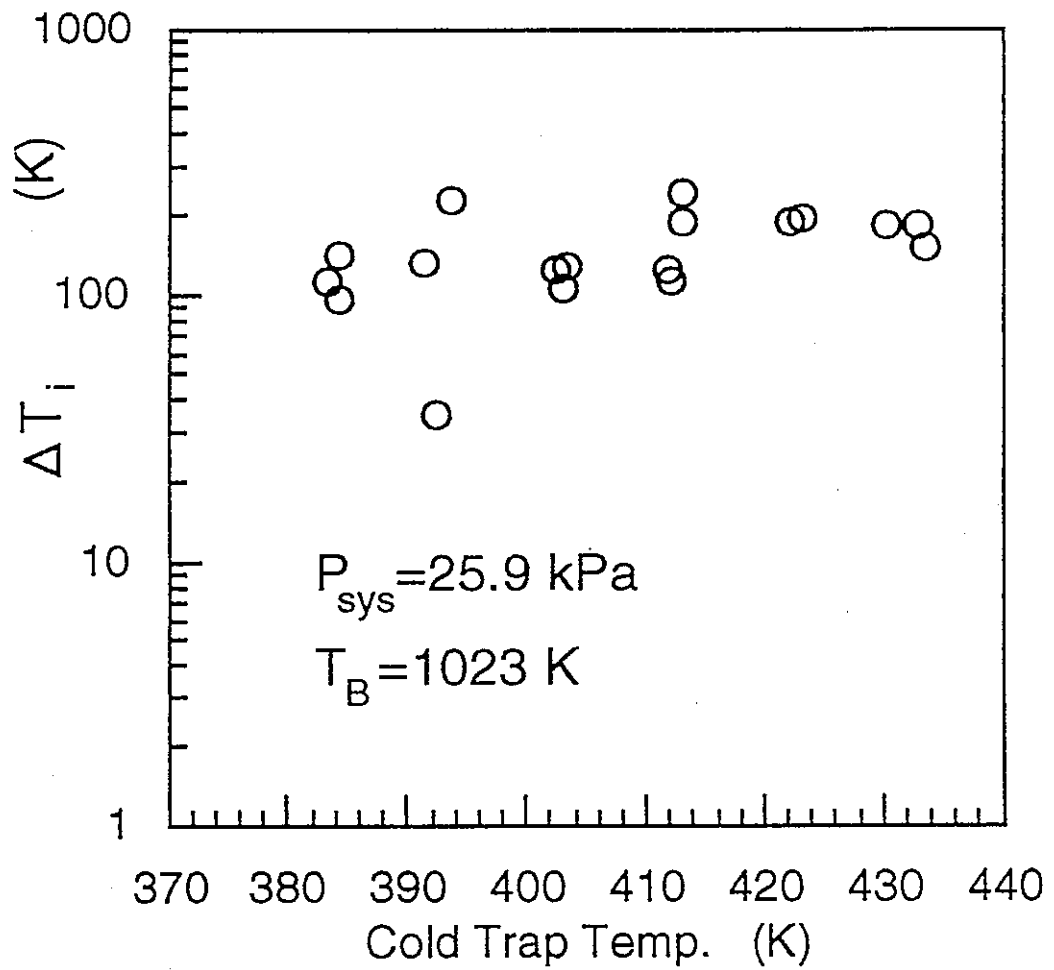


図 8 沸騰開始過熱度とコールドトラップ温度の関係；
系圧力 25.9 kPa

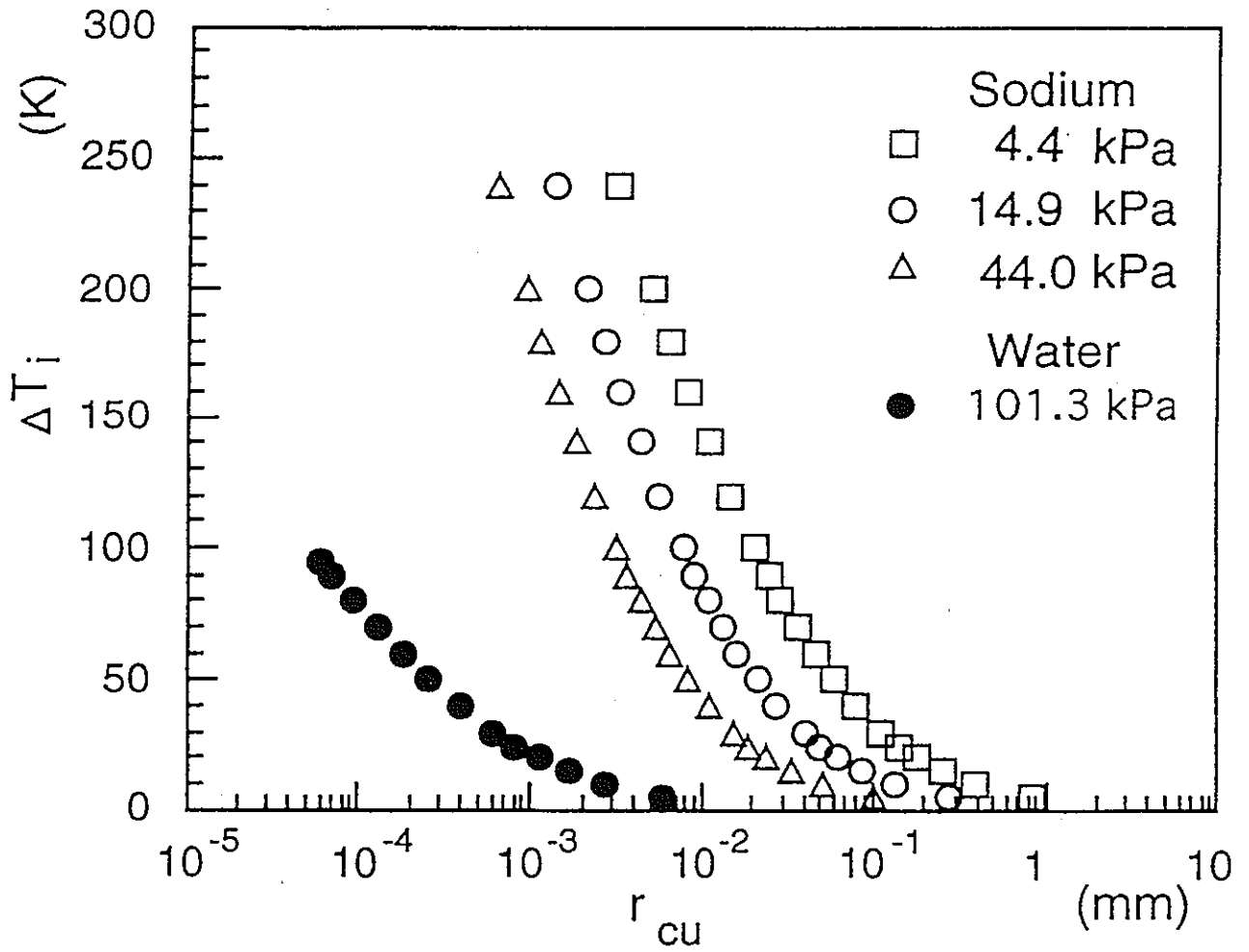


図9 キャビティーモデルによる液体ナトリウム中の種々の大きさの活性キャビティーからの沸騰開始過熱度評価、水の値との比較

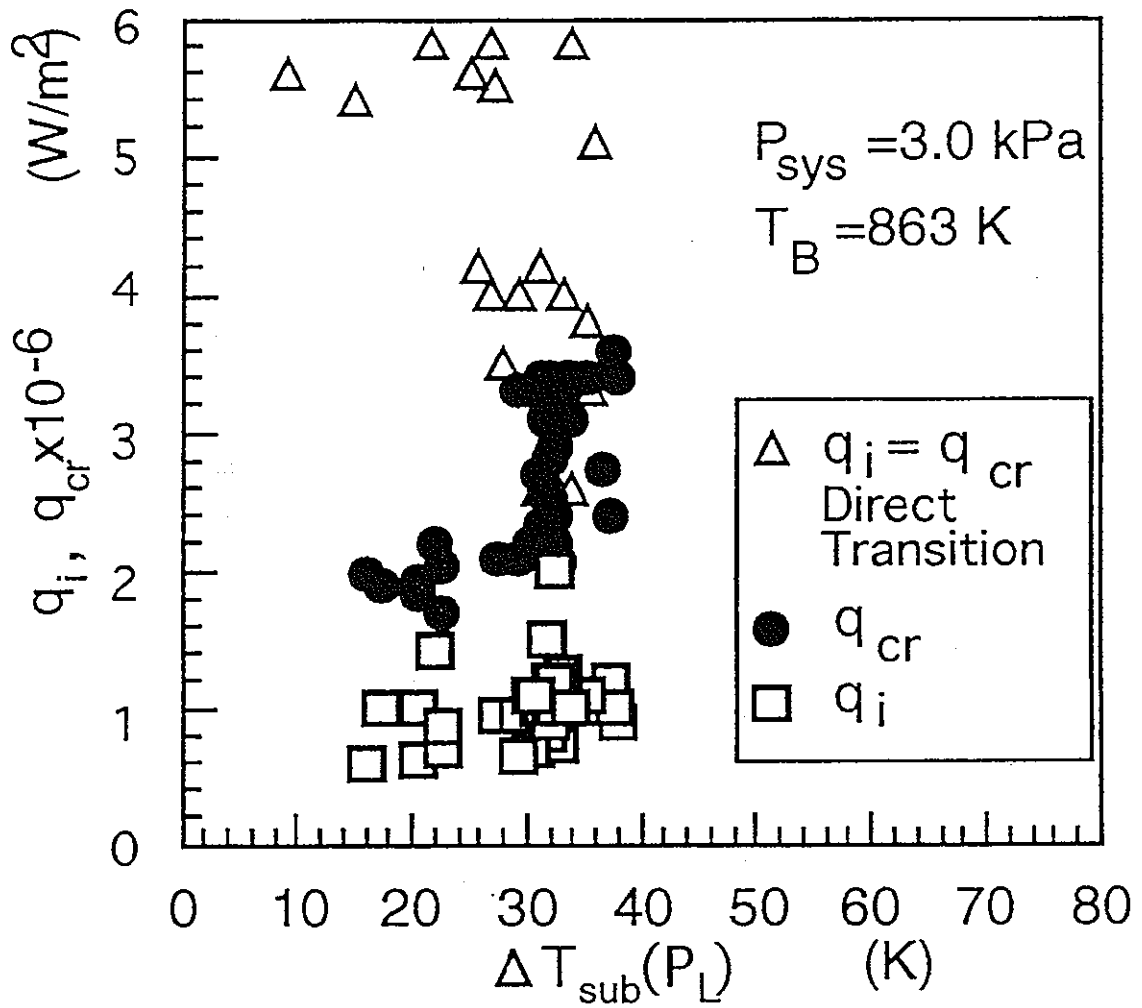


図 1 0 限界熱流束と発熱体位置の圧力に対するサブクール度
の関係；系圧力 3 kPa

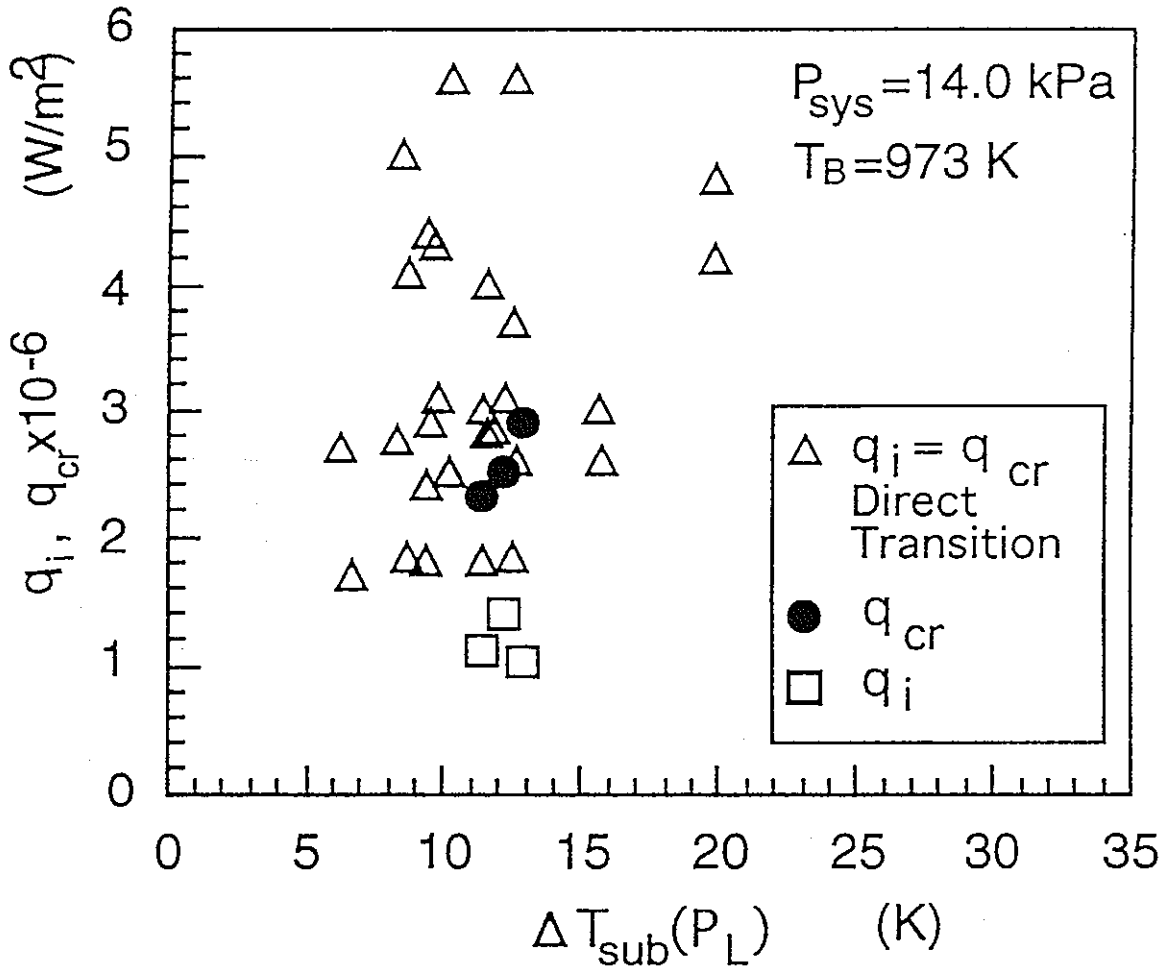


図 1.2 限界熱流束と発熱体位置の圧力に対するサブクール度
 の関係；系圧力 14 kPa

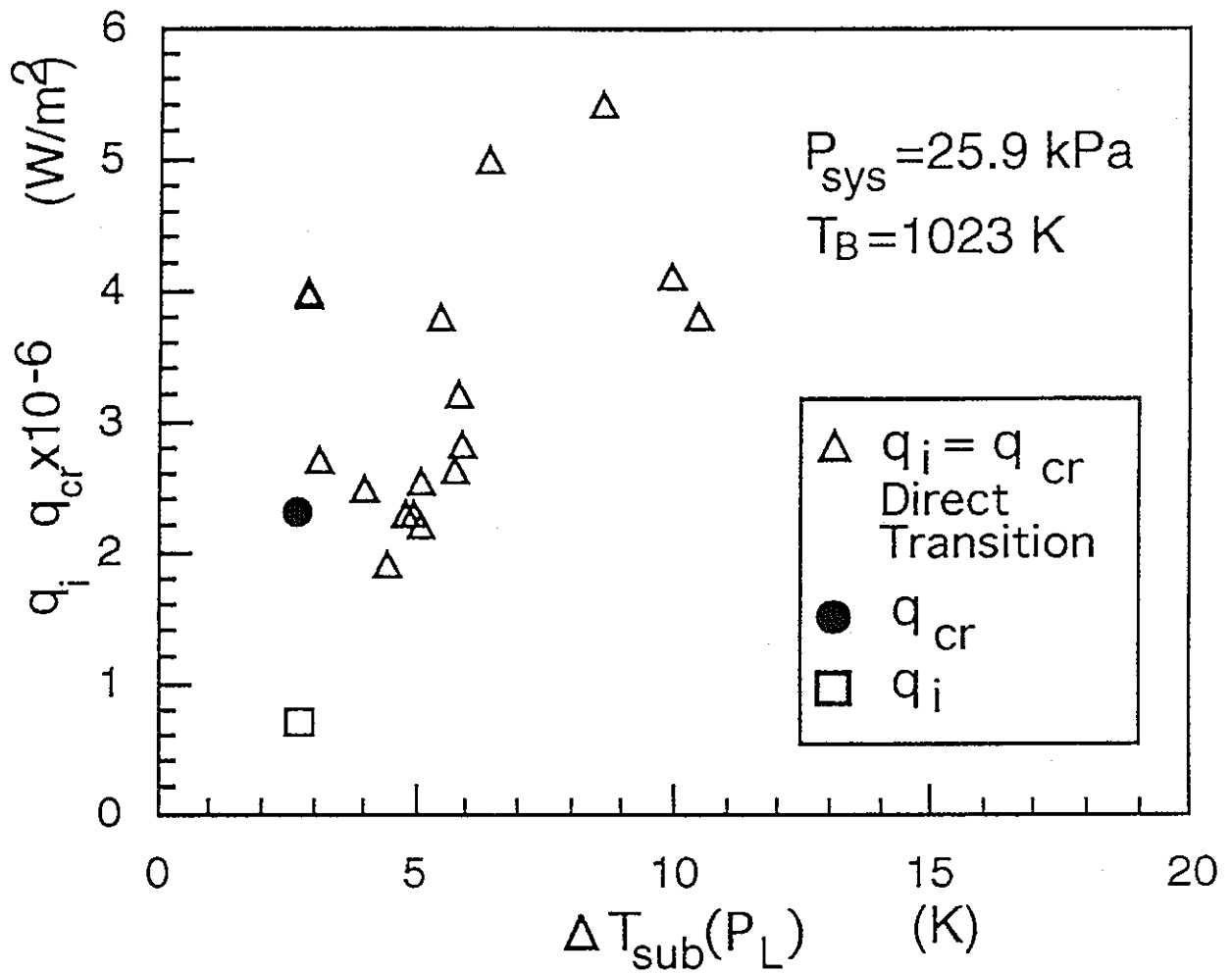


図 1 3 限界熱流束と発熱体位置の圧力に対するサブクール度
の関係；系圧力 25.9 kPa