

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

—先行基礎工学分野に関する平成8年度報告書—

1997年3月

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。

〒311-13 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Nareta-machi, 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) 1996

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
— 先行基礎工学分野に関する平成8年度報告書 —

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、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的とする。平成8年度は、実験開始以前履歴の影響、コールドトラップ温度の影響について実験を実施した。

その結果、沸騰開始過熱度について、実験開始以前の加熱履歴の明確な影響は認められず、沸騰開始過熱度が10℃から50℃近傍に到る一群と100℃から250℃近傍に到る一群の大きくばらついた結果が得られた。沸騰開始過熱度が50℃以下の場合には一旦核沸騰を経過して限界熱流束に到達し発熱体温度が急上昇したが、沸騰開始過熱度が100℃以上の場合には、非沸騰状態から沸騰開始と同時に膜沸騰遷移が起こり温度が急上昇した。100℃以上の沸騰開始過熱度はコールドトラップ温度が120℃以下に集中しており、酸素濃度が初期沸騰に大きく影響することが推測される。

† 京都大学エネルギー応用科学専攻

†† 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

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 試験体発熱体、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	7
参考文献	7

1. 緒言

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。

昨年度は予備実験として、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について実験的検討を行い、充分精度良く表面温度の算出が可能であることを確かめた。

本年度は、この測定方式を採用して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、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した結果を報告する。

2. 実験装置

第1図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。同図でエコマイザーより上の試験部及び配管つまり、エコマイザー、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止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、第 2 図に示すように外形 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

試験発熱体は第 3 図に示すように直径 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。

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

発熱リボンを近似的に円筒として扱うと、シース表面熱流束が q (W/m^2) の時の熱伝導による発熱リボン平均温度とシース表面温度の差 ΔT は、昨年報告したように次式で記述される。

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = \alpha q \quad (2)$$

ここで、 ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 はそれぞれ発熱リボン平均温度と発熱リボン表面温度、発熱リボン表面温度とシース内面温度、及びシース内外面の温度差、 α は発熱リボン、シース及びBNの熱伝導率と寸法に依って決まる定数である。

タンタルリボンの電気抵抗測定値から(1)式を用いて求めたその平均温度を T_m 、その時のシース表面熱流束を q (W/m^2) とすると、シース表面温度 T_s は、

$$T_s = T_m - \Delta T \quad (3)$$

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 α を、(2)、(3)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。

$$Nu = 10^z \quad (4)$$

ここで、

$$z = 0.193385 + 0.145037 \log R_f + 0.664323 \times 10^{-2} (\log R_f)^2 - 0.232432 \times 10^{-3} (\log R_f)^3 - 0.238613 \times 10^{-4} (\log R_f)^4$$

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

実験条件

系圧力 $P_{sys}=3$ kPa近傍の低圧の飽和に近い条件（液温約590℃）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、それにと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。

沸騰開始過熱度

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。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。 ΔT_i の実験結果を、Table 1に示す。Run No.が大きくなる程同一条件でも 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℃近傍から50℃近傍に到る1群と100℃から250℃近傍に到る1群の大きくばらついた結果が得られた。 ΔT_i が50℃以下の場合には一旦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したが、100℃以上の場合には、非沸騰状態から沸騰開始の瞬間に膜沸騰遷移が起こり温度が急上昇した。前者の限界熱流束値を q_{cr} 、後者のそれを $*q_{cr}$ として区別しTable 1に示す。

実験結果を詳細に検討したところ、実験期間中にナトリウム中の酸

酸素濃度を管理するコールドトラップ温度が変動しており、各Runの時のコールドトラップ温度が Table 1 に示すように種々異なることが解った。各Runの沸騰開始過熱度 ΔT_i をコールドトラップ温度に対してプロットしてみると、第4図に示すように 100°C 以上の ΔT_i は、コールドトラップ温度 120°C 以下に集中しており、酸素濃度が初期沸騰に大きく影響することが推測される。ただし、このデータは酸素濃度がコールドトラップ温度に依存した定常値に到達してから測定したとは言えないので、コールドトラップ温度を自動制御するよう装置を改造し、酸素濃度をはっきりさせてデータを集積中である。

限界熱流束

この実験で得られた、核沸騰限界熱流束 q_{cr} のデータを、その時点の液温の $T_{sat}(P_L)$ に対するサブクール度 $\Delta T_{sub}(P_L)$ に対して、第5図に●で示す。液位の影響等により $\Delta T_{sub}(P_L)$ 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⁾。

先に説明した沸騰開始過熱度が 100°C を越えて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直接膜沸騰へ移行する場合の限界熱流束 (= 初期沸騰熱流束) を第5図に△で示すが、最大値は核沸騰限界熱流束の2倍以上に達している。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

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、表面温度を正しく測定できることを確かめた。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表面過熱度 260°C 、熱流束 $5.6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 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。

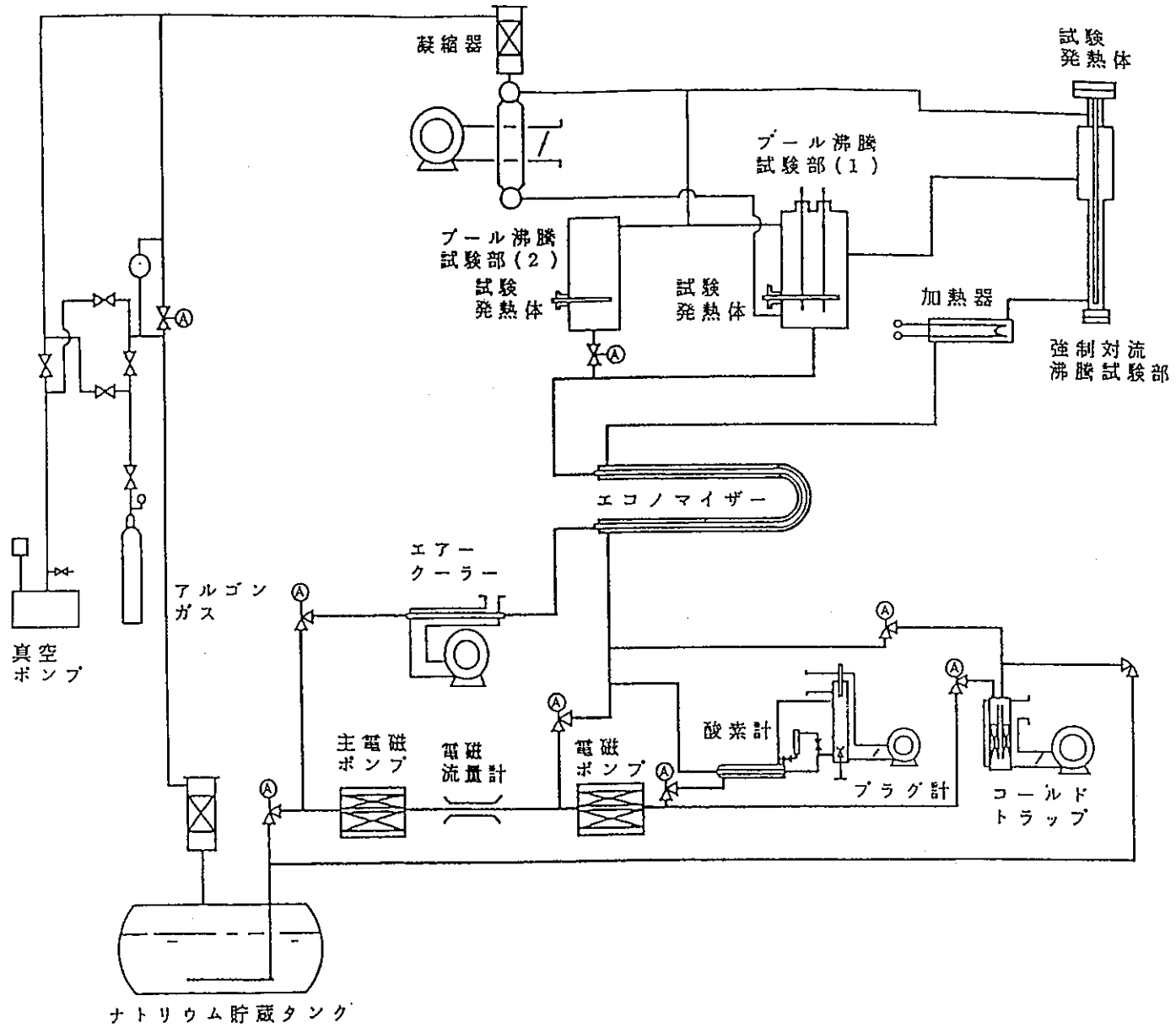
ΔT_i には、加熱開始以前の加熱履歴の明確な影響は認められず、 10°C 近傍から 50°C 近傍に到る1群と 100°C から 250°C 近傍に到る1群の大きくばらついた結果が得られた。 50°C 以下の場合には一旦核沸騰を経過して限界熱流束値 q_{cr} に到達し発熱体表面温度が急上昇したが、 100°C 以上の場合には、非沸騰状態から沸騰開始の瞬間に膜沸騰遷移が起こり温度が急上昇した。

100°C 以上の ΔT_i は、コールドトラップ温度 120°C 以下に集中しており、酸素濃度が初期沸騰に大きく影響することが推測される。

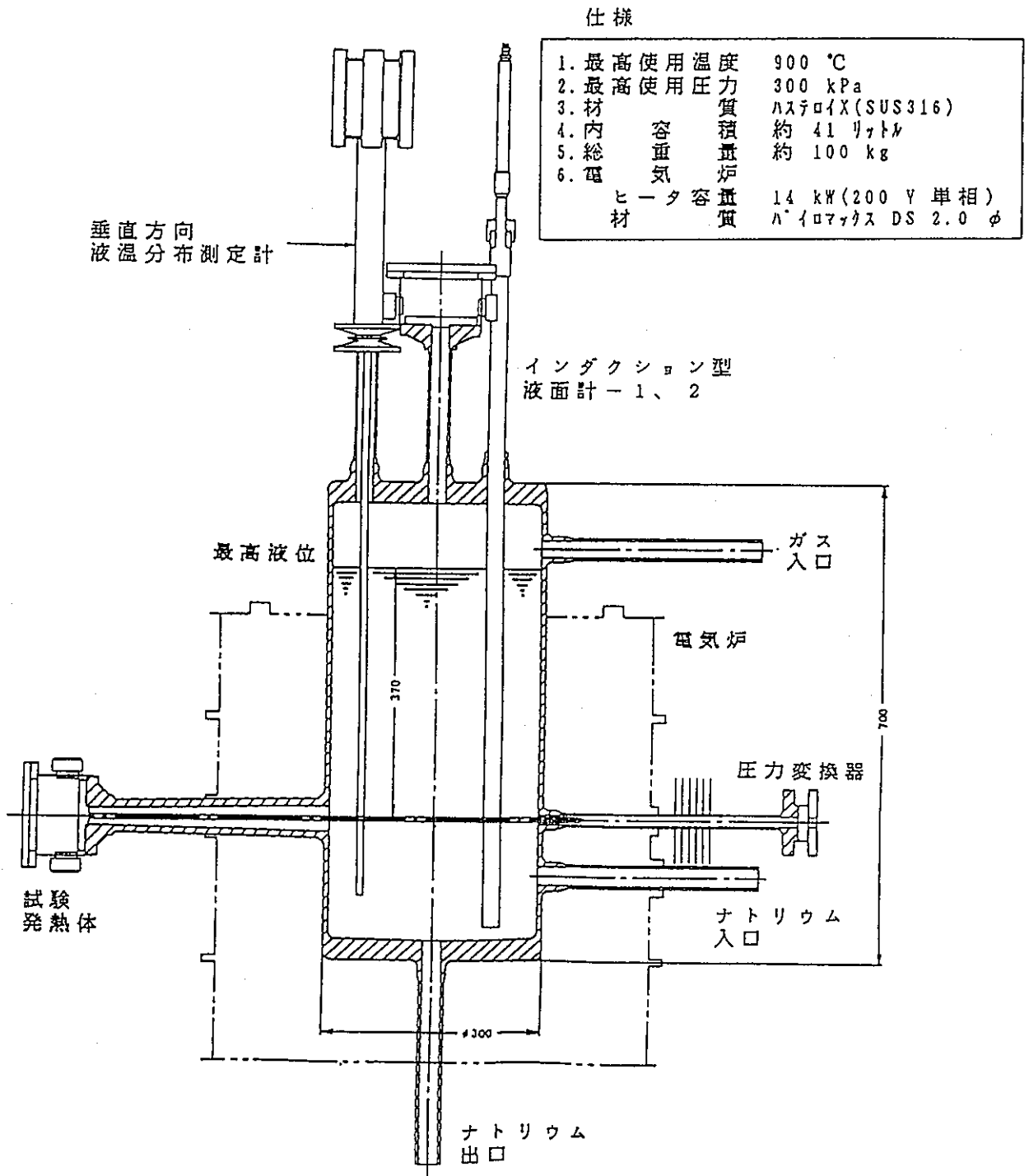
参考文献

- 1) A. Sakurai, M. Shiotsu, I. Kataoka and K. Hata, Heat Transfer 1978, Vol. 1, p. 193, Hemisphere Pub. Co., Washington D. C. (1978).

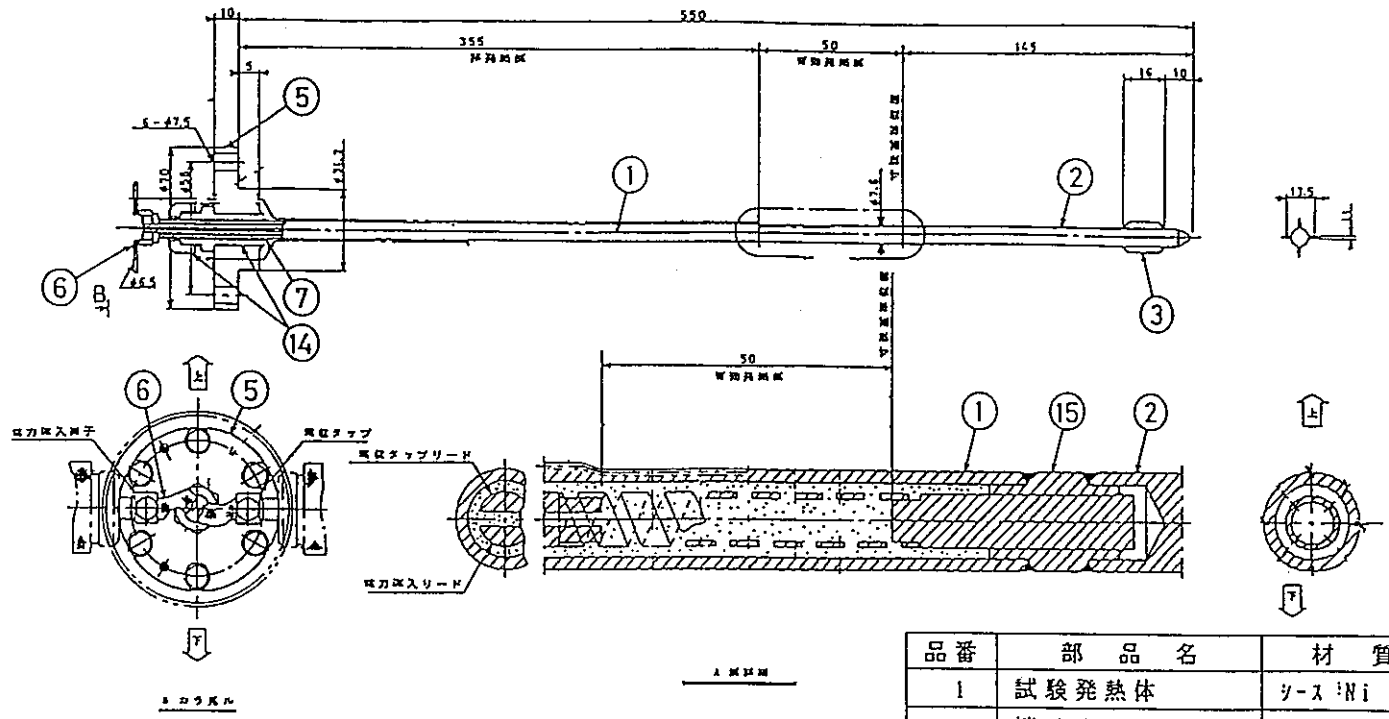
- 2) A. Sakurai, M. Shiotsu and K. Hata, Heat Transfer 1982, Vol.4, p.345, Hemisphere Pub. Co., Washington D.C. (1982).
- 3) A. Sakurai, M. Shiotsu and K. Hata, in Instability in Two-Phase Flow Systems, ed. By J.H. Kim, pp.27-39, ASME HTD-Vol. 260 (1993).



第1図 高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の構成図



第2図 プール沸騰試験部(1)



試験発熱体仕様

1. 型式	電気抵抗間接発熱方式 接地型(電位タップ付)
2. シース材質	Ni
3. 発熱体材質	Ta
4. リード線材質	Cu-Ta
5. 絶縁材材質	BN
6. 出力	30 kW(電力密度 250 W/cm ²)
7. 最高使用温度	900 °C(シース表面温度)

品番	部品名	材質
1	試験発熱体	シース Ni
2	端せん	Ni
3	スペーサ	SUS316
4	熱電対	シース SUS316
5	ヒータフランジ	SUS 316
6	リード線	Cu
7	スリーブ	Ta
8	熱電対取出スリーブ	SUS316
9	熱電対保護スリーブ	SUS316
10	アダプタ	SUS304
11	補償導線	ガラス-ルビド
12	圧着端子	Cu
13	マークバンド	
14	スウェジロック	SUS316
15	シース捲き	Ta

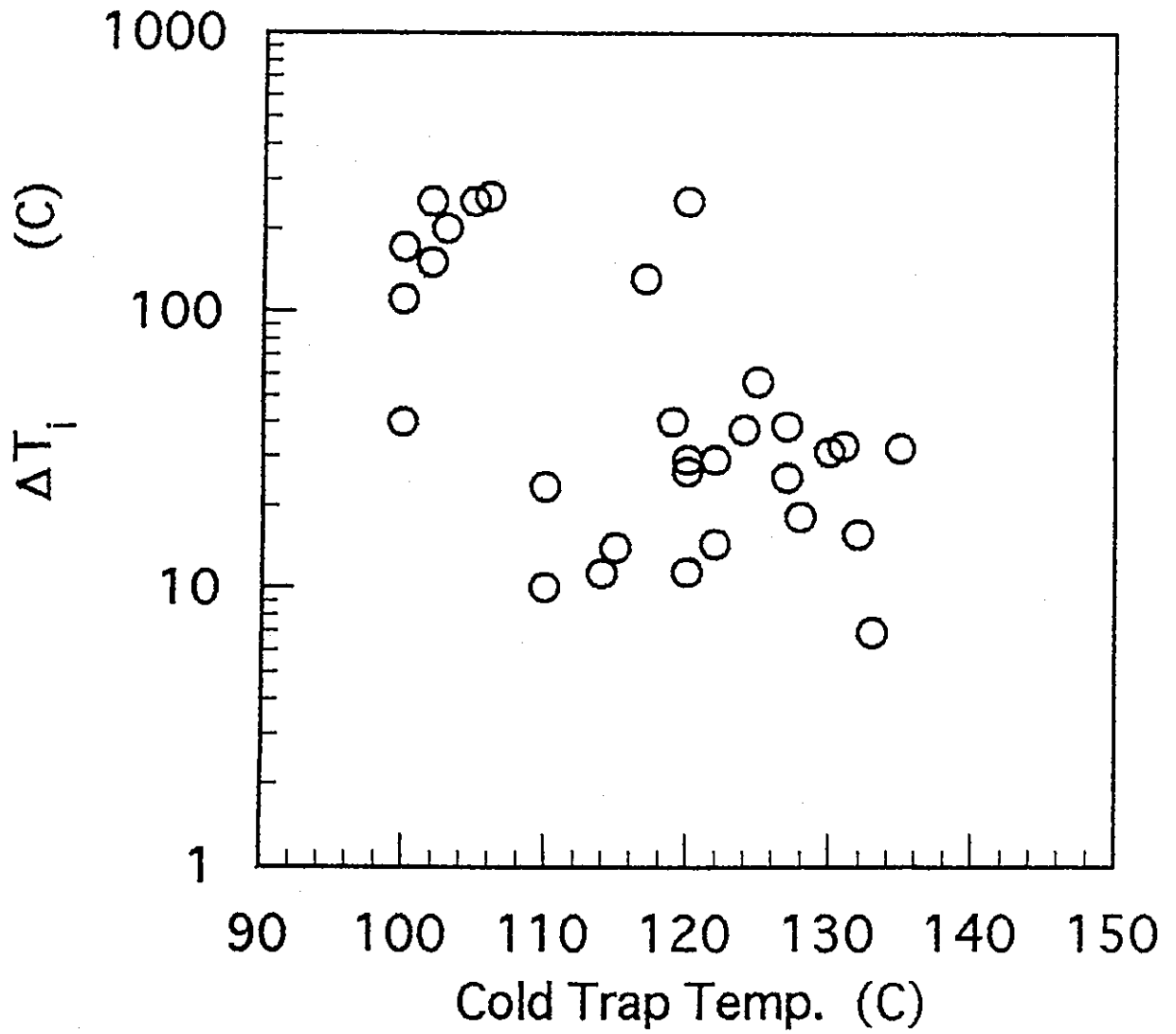
第3図 高熱流束試験発熱体

Table 1

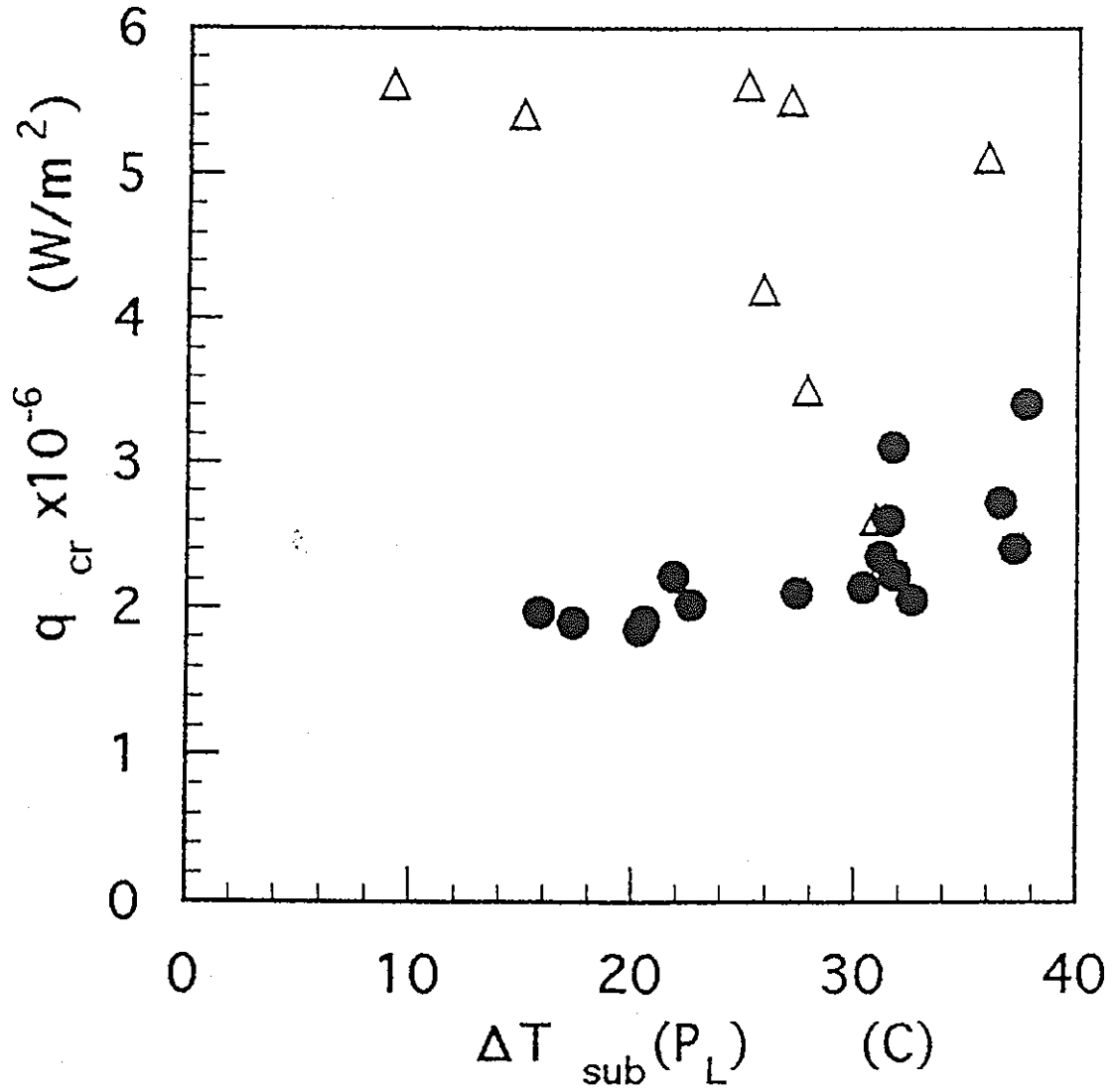
Run No.	P _{sys} (kPa)	Liquid Head (mm)	P _L (kPa)	T _{sat} (P _L) (°C)	Δ T _i (°C)	q _{cr} (W/m ²)	Δ T _{sub} (P _L) at q _{cr} (°C)	Cold Trap Temp. (°C)
1	3.01	118	3.95	611.9	37.5	-----	16.9	124
2	3.04	123	4.02	613.0	11.4	-----	18.0	120
3	2.98	126	3.98	612.4	6.9	2.14×10 ⁶	18.7	133
4	2.98	137	4.07	613.8	15.6	2.05×10 ⁶	32.6	132
5	2.99	116	3.91	611.3	31.0	1.85×10 ⁶	20.3	130
6	2.98	115	3.89	611.0	38.4	1.90×10 ⁶	17.3	127
7	2.94	112	3.83	610.0	14.4	1.91×10 ⁶	20.5	122
8	3.01	200	4.60	621.7	29.0	2.35×10 ⁶	31.2	120
9	2.93	183	4.38	618.6	14.0	2.02×10 ⁶	22.6	115
10	2.96	194	4.50	620.3	11.3	3.10×10 ⁶	31.7	114
11	2.99	205	4.62	621.9	110.0	*2.60×10 ⁶	30.9	100
12	3.00	200	4.59	621.5	40.0	2.60×10 ⁶	31.5	100
13	2.97	197	4.53	620.8	170.0	*4.20×10 ⁶	25.8	100
14	2.95	195	4.50	620.2	26.3	2.40×10 ⁶	37.2	120
15	2.89	177	4.30	617.3	56.0	2.21×10 ⁶	21.8	125
16	2.99	198	4.56	621.2	28.0	2.22×10 ⁶	31.8	122
17	2.98	195	4.53	620.7	25.0	2.10×10 ⁶	27.4	127
18	2.99	99	3.78	609.1	18.0	1.97×10 ⁶	15.8	128

Table 1 (continued)

Run No.	P _{sys} (kPa)	Liquid Head (mm)	P _L (kPa)	T _{sat} (P _L) (°C)	Δ T _i (°C)	q _{cr} (W/m ²)	Δ T _{sub} (P _L) at q _{cr} (°C)	Cold Trap Temp. (°C)
19	3.00	202	4.60	621.7	10.0	3.40 × 10 ⁶	37.7	110
20	3.06	202	4.66	622.6	23.0	2.72 × 10 ⁶	36.6	110
21	3.00	204	4.62	622.0	250.0	*5.50 × 10 ⁶	27.0	102
22	2.96	199	4.54	620.8	150.0	*3.50 × 10 ⁶	27.8	102
23	2.99	205	4.62	621.9	200.0	*5.10 × 10 ⁶	35.9	103
24	2.97	191	4.49	620.1	260.0	*5.60 × 10 ⁶	25.1	106
25	3.01	103	3.83	610.0	250.0	*5.40 × 10 ⁶	15.0	105
26	3.00	98	3.78	609.1	250.0	*5.60 × 10 ⁶	9.1	120
27	3.00	99	3.79	609.4	32.0	1.70 × 10 ⁶	22.4	135
28	2.96	200	4.55	621.0	32.5	2.10 × 10 ⁶	29.0	131
29	3.00	198	4.57	621.3	40.0	2.20 × 10 ⁶	30.3	119
30	2.97	193	4.50	620.3	130.0	*4.0 × 10 ⁶	26.6	117



第4図 沸騰開始過熱度とコールドトラップ温度の関係



第5図 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