

# 超流動ヘリウム冷却超伝導マグネットの研究

## Study on He II Cooled Superconducting Magnet

塩津 正博，白井康之

エネルギー科学研究科・エネルギー応用科学専攻

Masahiro Shiotsu, Yasuyuki Shirai

### 1. はじめに

核融合炉においては、一億度に近い超高温プラズマを閉じ込めておくために、強い磁場を必要とする。この強い磁場生成に必要な電力を核融合発電出力に比して著しく小さい値とするには、超伝導マグネットの利用が不可欠であり、核融合炉心の研究開発の進展と並行して、液体ヘリウム冷却大型超伝導マグネットの研究開発が、日本をはじめ欧米諸外国で取り組まれている。

この様な大型超伝導コイルの研究開発にとって装置の小型化と、その安定化が最も重要な研究開発の目標である。超流動ヘリウム(He II)は常流動ヘリウム(He I)に比し、革新的に優れた安定な冷却特性を持ち核融合実験装置や超伝導磁気エネルギー貯蔵装置、加速器等に用いられる大容量超伝導マグネットの小型化のための有力な冷却材として期待出来る。

私達は、He II 冷却超伝導マグネットの設計や安定性評価の基礎となる He II 中の定常及び非定常熱伝達特性について十数年にわたって実験的並びに理論的研究を行い、従来全くといって良いほど解っていなかった He II における 2 次元ないし 3 次元的熱流動現象を解明してきた<sup>1-27)</sup>。また、近年、その成果に基礎をおいて、He II 冷却超伝導コイルの安定性について実験的研究を進めており<sup>28)</sup>、新しい実験方式を開発して、実際の核融合実験装置に用いられた臨界電流数十 kA の大型複合導体について、安定性評価を行うまでになっている<sup>29,30)</sup>。以下に我々の研究結果の概要を説明する。

本題に入る前に超流動ヘリウムについて次章で簡単に説明する。本誌の読者の方には、こうした説明は不要ではないかと思われる。ご存知の方は飛ばして 3 章に移っていただきたい。

### 2. 超流動ヘリウム

#### 2.1 ヘリウム 4 の状態図

ヘリウム 4 の PT 状態図を図 2-1 に示す。ヘリウム 4 (以後簡単のためヘリウムと呼ぶ) は、他のクライオゲンや水等の通常液体と、以下の点で著しく異なっている。

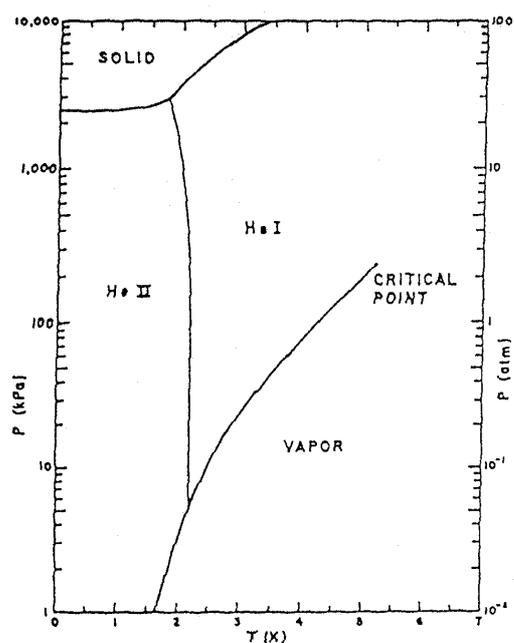


図 2-1 <sup>4</sup>He の状態図

a) 3重点がない。固体状態を得るためには、液体の温度を十分に低くするだけでなく圧力も加えなければならない。

b) 液体領域は線によって二つの領域 He 相と He 相に分けられる。線は、点(2.173K, 50.52 mbar)からはじまり、点(1.77 K, 30 bar)に終わる。He 相は通常の粘性流体であるが、He 相では超流動現象が存在し液の基礎的性質が大きく変化する。

## 2.2 超流動現象と二流体モデル

He は、熱あるいは物質移動に関して、はつきりとした特異性を示し、そこで観察される現象は古典的な熱流体力学では全く取り扱えない。超流動現象を説明するため、London, Tisza, Landau 等によって二流体モデルが提案された<sup>31)</sup>。このモデルでは He を相互作用の全くない二つの成分、スーパー成分とノーマル成分の理想的な混合と考える。

スーパー成分 (添え字 s) については、

$$\text{粘性係数: } \eta_s = 0 \quad (2-1)$$

$$\text{エントロピー: } s_s = 0 \quad (2-2)$$

ノーマル成分 (添え字 n) については、

$$T < T_\lambda \text{ では, } \eta_n = \eta(T) \quad (2-3)$$

$$s_n = s(T) \quad (2-4)$$

$$T = T_\lambda \text{ では, } \eta_n = 0 \quad (2-5)$$

ノーマル成分は普通の粘性流体のようにふるまい、スーパー成分だけが超流動性を示す。スーパー成分は粘性が零であるがエントロピもまた零である。従って、スーパー成分だけではエネルギーを輸送できない。He 全体の密度は、

$$\rho = \rho_s(T) + \rho_n(T) \quad (2-6)$$

このモデルによって、発見当初は不可解であった多くの現象に納得のいく定性的説明が与えられた。

## 2.3 He 中の固体面からの熱伝達機構

He 中の固体面からの定常熱伝達の概要を説明するため、He の入った円形一次元チャンネル一端の金属面をヒーターで加熱した場合を例にとる。(図2-2)



図2-2 He の入った円形一次元チャンネル

伝熱面近傍の液中で温度勾配が出来ると局所的にノーマル成分の比率が増加し、それを他の部分における比率と同一にするよう伝熱面に向かってくるスーパー成分と伝熱面からエントロピを持って離れ

ていくノーマル成分の対向流による一種の強制対流によって熱が除去される．定常状態では，スーパー成分の流れとノーマル成分の流れは等しく質量の移動は発生しない．熱流束  $q$  が大きくなるに従い両成分の相対速度が大きくなり，ある臨界値を越えると，スーパー成分に渦糸が発生し，ノーマル成分との間に相互摩擦を生じるようになる．この熱流束以下の領域を層流領域，それ以上の領域を乱流領域と呼ぶ．

超伝導マグネットの設計で予想される熱流束範囲は，乱流領域である．定常状態における一次元チャネル中の乱流熱移送は二流体モデルから次式で与えられる．

$$-\frac{dT}{dx} = f(T)q^3 \quad (2-7)$$

この式は，Gorter-Mellink 方程式と呼ばれている．ここで， $f(T) = A_n / (s^3 T^3)$ ， $s$  は単位質量あたりのエントロピである．

$f^1(T)$  は，常流動液体の場合の熱伝導率と良く似た働きをする液の物性値の関数で，圧力と温度に依存する． $f^1(T)$  の値は 1.9 K 付近で最大値を持っており，冷却チャネルの定常的な熱移送量は，運転温度を 1.9 K 付近に設定すれば最大になることが予想される．

また，伝熱面とそれに接する He との間には，図 2-3 に示すようなフォノンのミスマッチングによる温度ギャップが存在することが知られている．

この異種物質の境界における Thermal Conductance を発見者の名前をとって Kapitza Conductance という．液中の熱伝達は上述の Gorter-Mellink 式で記述され，この熱除去による液の等価的な熱伝達係数は銅の数百倍大きい．従って，ヘリウム流路が余程長くない限り伝熱面からの熱伝達は Kapitza Conductance によって決まると言っても良い．

さて，超流動現象に関する説明はこのくらいにして，我々の研究成果の概説に移ろう．

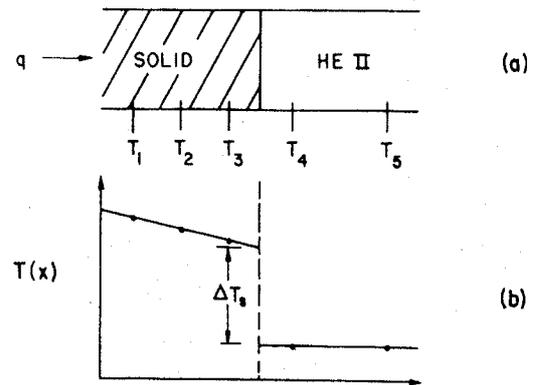


図 2-3 固液界面における Kapitza Conductance による温度ギャップ

### 3. He の浸漬冷却熱伝達

#### 3.1 He 中の定常熱伝達

系が飽和の場合の定常熱伝達曲線の一例を図 3-1 (上) に示す．臨界熱流束  $q_{cr}$  に至る迄は非沸騰域でその熱伝達は Kapitza Conductance に支配されている． $q_{cr}$  に至ると発熱体表面温度が急上昇して Kapitza Conductance 領域から膜沸騰領域の熱流束が  $q_{cr}$  と等しい点に瞬時に移行する．以後熱流束をゆっくり上昇下降させると，図示するような膜沸騰熱伝達が求められる．熱流束が膜沸騰極小値に至ると蒸気膜が崩壊し，対応する Kapitza

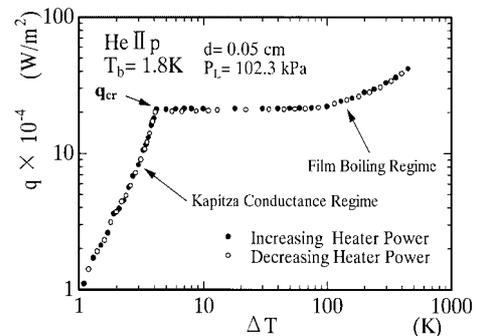
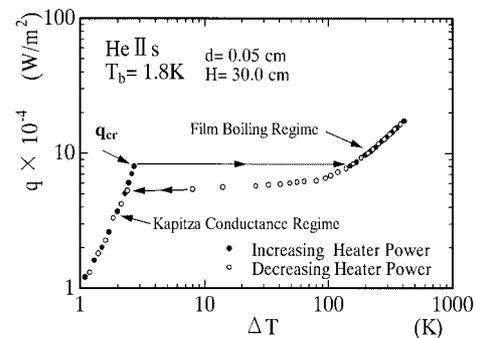


図 3-1 He II 中の水平円柱における定常熱伝達曲線

Conductance 曲線上の点にジャンプする。

系が飽和の場合、膜沸騰極小熱流束  $q_{min}$  は  $q_{cr}$  に比し著しく小さい値を示すが、大気圧下のサブクール状態では図 3-1 (下) に示すように温度のジャンプは殆どなく Kapitza Conductance 領域から膜沸騰領域へあるいは逆に膜沸騰領域から Kapitza Conductance 領域へ連続的に移行する。

なぜこうした差が生ずるのか。我々は次のように考えている。膜沸騰では、加熱固体面は蒸気膜で覆われ、蒸気膜と液体の界面では、Labuntzov and Ametistov<sup>32)</sup> が指摘したような非平衡凝縮と蒸発による温度ギャップが存在する。系が飽和の場合、蒸気膜は直接 He II に接しているため、温度ギャップが生じた途端に He II による除熱量が急減し、蒸発量が増え気液界面の面積が増える効果と放射熱の増加によって熱入力と釣り合うまで、発熱体温度がジャンプする。大気圧下では、蒸気膜と He II の間に薄い He I 層があり、気液境界の温度ギャップが He II による除熱量に影響を与えない(つまり、臨界熱流束点でも膜沸騰域でも He II 層の最高温度は  $\lambda$  温度) ため発熱体温度のジャンプは起こらない。

### 3.2 円柱及び平板発熱体の臨界熱流束

臨界熱流束は、図 3-2 の動作点 のように発熱体位置の圧力  $P_L (=P + \rho g H)$  が 点の圧力以下であれば発熱体に接したサブクール液が飽和温度に到達する熱流束であり、動作点 のように  $P_L$  が 点の圧力以上であれば、その圧力に対する 線上の温度に到達する熱流束である。

上述のように、1次元チャンネルにおける乱流域の熱伝達は(2-7)の Gorter-Mellink 式で記述されることが実験と理論で確かめられているので、もし  $f^1(T)$  が、熱が2次元、3次元的に伝わる場合についても1次元チャンネルの値と変わらなければ、臨界熱流束は、2次元、3次元に対する Gorter-Mellink 式を解いて求められるはずである。

このように Gorter-Mellink 式を解いて円柱に対する臨界熱流束を求めると、次式(3-1),(3-2)で  $K=1$  とした式となる。

$$q_{cr} = K \left[ \frac{4}{D} \int_{T_B}^{T_{sat}(P_L)} \frac{1}{f(T)} dT \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{for } T_{sat}(P_L) \leq T_\lambda \quad (3-1)$$

$$q_{cr} = K \left[ \frac{4}{D} \int_{T_B}^{T_\lambda} \frac{1}{f(T)} dT \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{for } T_{sat}(P_L) \geq T_\lambda \quad (3-2)$$

ここで、 $f(T)^{-1} = g(T_\lambda) [T_R^{6.8} (1 - T_R^{6.8})]^3$ 、

$g(T_\lambda) = \rho^2 s_\lambda^4 T_\lambda^3 / A_\lambda$ 、 $T_R = T / T_\lambda$ 、 $s_\lambda = 1559 \text{ J/(kg K)}$ 、

$A_\lambda \cong 1150 \text{ m}^2/\text{kg}$ 、 $D$  は円柱直径を示す。

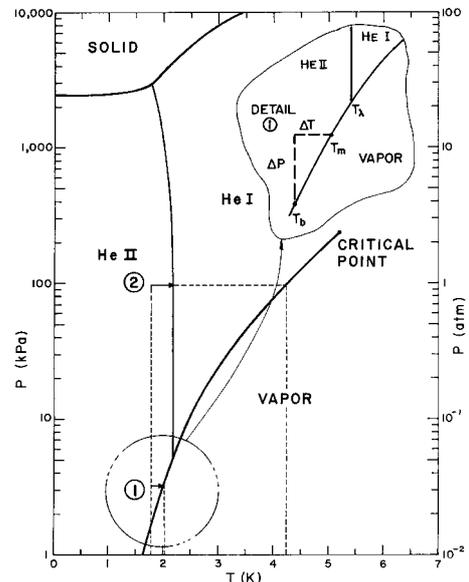


図 3-2 PT 状態図、豊和に近い状態、大気圧下サブクール状態を示す。

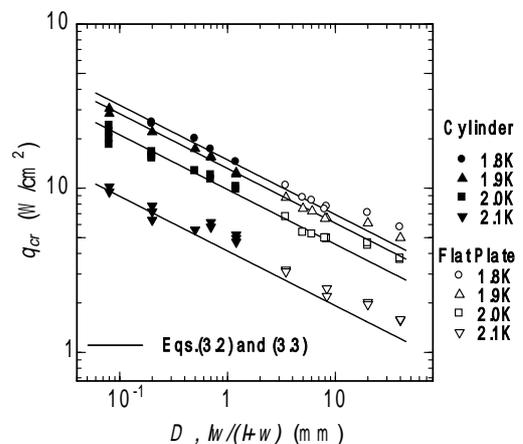


図 3-3 円柱及び平板の臨界熱流束実験結果と半理論式の比較。

一方、円柱径、He II 液温を種々変えて求めた臨界熱流束は、(3-1)、(3-2)式と円柱形や He II 液温に対する依存性は同一であるが全体に約 40% 低い値を示した。そこで、実験結果に基づいて修正係数  $K$  を 0.58 と定めた。同様に、たてよこ寸法 ( $l \times w$ ) を種々変えた平板における臨界熱流束を実験で求めると、(3-1)、(3-2)式における  $D$  の代わりに  $lw/(l+w)$  とおいた式で表されることがわかった。

$$q_{cr} = 0.58 \left[ \frac{4}{dw/(d+w)} \int_{T_B}^{T_\lambda} \frac{1}{f(T)} dT \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{for } T_{sat}(P_L) \geq T_\lambda \quad (3-3)$$

図 3 - 3 は、大気圧下における円柱及び平板の臨界熱流束実験結果と(3-2)、(3-3)式の比較を示す。図から分かるように実験結果は、この表示式で良く記述されている。

熱が 2 次元あるいは 3 次的に拡がる場合、臨界熱流束は大きくなるが、その増大は超流動の等価熱伝導率  $f(T)^{-1}$  が 1 次元チャンネルの場合と変わらないとして期待されるものより 40% 程度も小さくなることを初めて明らかにした。熱が 2 次的に広い空間に拡がっていく場合に、渦が発生する等の原因で等価熱伝導率のはるかに小さくなると推察される

### 3.3 オリフィス付きダクト中の平板発熱体における臨界熱流束

超伝導マグネット流路はスパーサー等のため多箇所局所的に狭くなっている。こうした断面積変化を伴う流路内での熱伝達を理解することは超伝導マグネットの冷却設計にとって重要である。そこで、オリフィス開口度を種々に変化させた場合の実験と数値解析を行った。

図 3 - 4 に試験発熱体の形状と寸法を示す。長さ 40 mm、巾 10 mm、厚さ 0.1 mm のマンガニン製の平板発熱体を中央部にオリフィスをもつ全長 100 mm の 1 次元方形ダクトの一端に貼り付けた片側断熱平板発熱体を用いた。オリフィス開口巾を 3.6, 9.9, 20.4, 29.0, 35.6, 40.0 mm に変化させ、開口度を 9 ~ 100% まで変化させた。

大気圧下で測定した臨界熱流束  $q_{cr}$  とオリフィス開口度の関係を液温  $T_B$  をパラメータとして図 3 - 5 に示す。図示するように臨界熱流束は液温とオリフィス開口度に依存し、開口度が一定であれば、液温が下がるにつれて、また、開口度の増加とともに増加する。

次に、実験結果を、我々<sup>15,16)</sup>が開発した 2 流体モデルに基づく He II 2 次元熱流動解析コード SUPER-2D による解析結果と比較して図 3 - 5 に示す。両者は 10% 以内で一致している。計算による臨

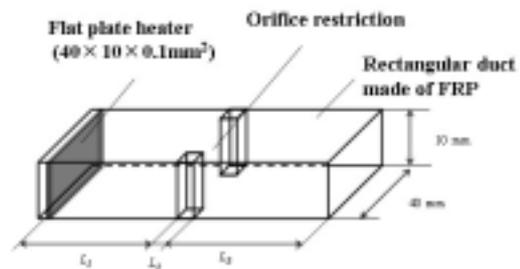


図 3 - 4 片側に試験発熱体を張り付けたオリフィス付きダクト

図 3 - 5 臨界熱流束とオリフィス開口度の関係。実験結果と解析結果の比較

界熱流束時の通常流体成分，超流体成分及び全流体（He II）の速度分布と温度分布を図 3-6 に示す．オリフィスの前後では，各成分に渦が発生し，熱輸送を妨げる結果，温度分布がオリフィスから相当離れたところまでついていることが解る．これまで，He II の中では，通常流体成分と超流体成分が整然とした対向流の形で流れ，全流体には流れが無いものと考えられてきたが，本研究の結果，熱流が拡大・縮小するところには渦が生じて熱輸送が阻害されることが解った．

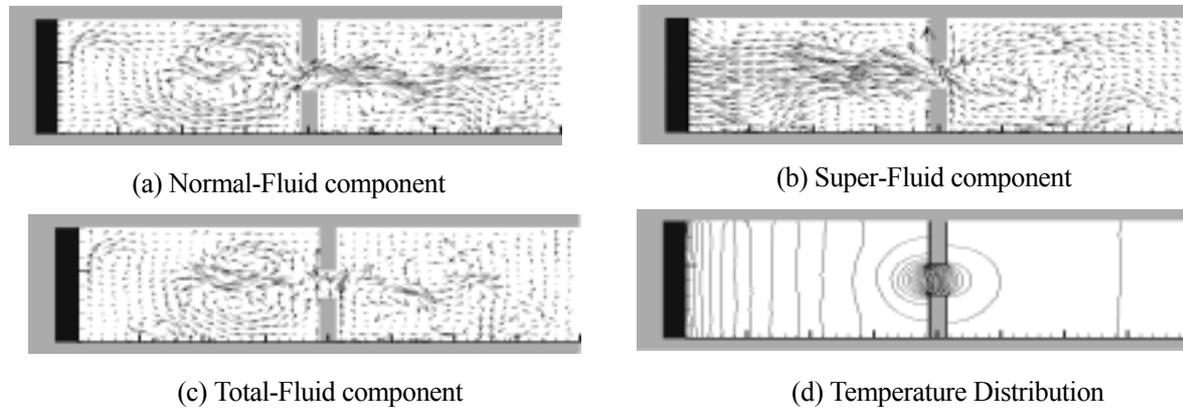


図 3-6 臨界熱流束時の各成分の速度分布と温度分布．液温 1.8 K.

#### 4. He の強制対流熱伝達<sup>22,23,26,27)</sup>

実際の大型超伝導マグネットでは，流路断面積が充分取れなかったり，冷凍機までが長くなったりして，浸漬冷却では優れた冷却特性が生かせない場合がある．このような場合でも，強制対流でマグネット内を一様に冷却することで，高磁場を安定して実現できる可能性がある．

##### 4.1 実験装置

強制対流熱伝達実験装置の構成図を図 4-1 に示す．実験装置は内径 45cm 高さ 157cm のクライオスタットで，加圧超流動を実現するために容器内部がガラスエポキシ製の仕切板（図中 3）で仕切られたクローゼ型構造となっている．仕切板より下部が He II 槽で試験流路発熱体(1)が設置されている．また強制対流を発生させるためペローズポンプ(2)が試験流路上部に設置されている．強制対流は最大流速時  $v=2.1$  m/s で約 90 s 継続が可能である．

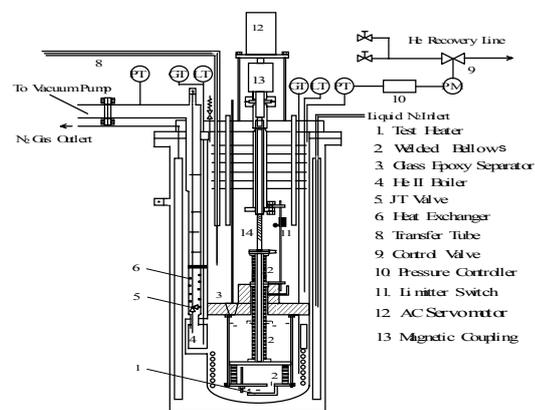


図 4-1 強制対流熱伝達実験装置

試験流路・発熱体は図 4-2 に示すように Type A 及び Type B の 2 種類の試験流路を用いて実験を行った．Type A, Type B 共に，全長 100 mm 幅 20 mm，高さ 3 mm の両端開放長方形流路である．Type A の試験流路は流路中央下部に長さ 20 mm 幅 6mm，厚さ 0.1 mm のマンガニン平板発熱体が設置されており，流路断面積  $A_D$  と発熱体表面積  $A_H$  の比

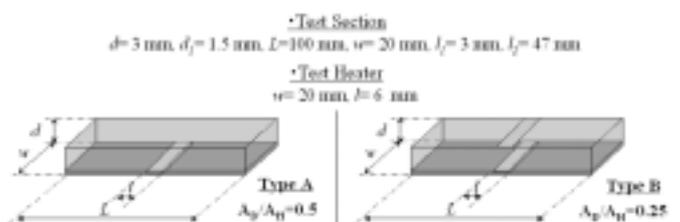


図 4-2 二つのタイプの強制対流試験部

$A_D/A_H$  が 0.5 であるのに対して TypeB は流路中央部の上下に発熱体を設置しているため  $A_D/A_H$  は 0.25 となっている。また流路内の温度を測定するために流路底面から 1.5mm 上部に 5 箇所 RuO<sub>2</sub> 温度センサを設置した。この二種類の試験流路において臨界熱流束及び流路内温度分布をバルク液温 1.6 K ~ 2.0 K，流速 0 ~ 2.1 m/s の範囲で測定した。

#### 4.2 実験結果

加圧 He II 中で流速  $v$  が 0 ~ 2.1 m/s までの Type A の熱伝達曲線(バルク液温  $T_B=1.8$  K)を図 4-3 に示す。まず  $v=0$  m/s の場合に注目すると、発熱体を準定常的に直流電流加熱すると発熱体表面の熱流束は徐々に増加し、臨界熱流束(CHF)  $q_{cr}$  に到達する。臨界熱流束までは非沸騰領域でその熱伝達は Kapitza Conductance に支配されている。臨界熱流束を越えると、発熱体表面の熱伝達が急激に悪化し、わずかの熱流束の増大で発熱体表面温度は大きく上昇し Kapitza Conductance 領域から膜沸騰領域へ連続的に移行する。流速の影響については、流速が増大しても非沸騰領域はあまり変化が見られないが臨界熱流束と膜沸騰領域の熱伝達係数は  $v$  の増大と共に大きくなり  $v=2.1$  m/s で最大になっていることがわかる。同様の傾向が Type B の試験流路に対しても見られた。

#### 温度分布

臨界熱流束に達したときの Type A における流路内温度分布の一例としてバルク液温  $T_B$  が 1.8 K の場合を図 4-4 に示す。図示する液温分布は流路底面から 1.5 mm 上部の液温である。 $v=0$  m/s の場合、温度分布は左右対称である。これは熱が両側に様に拡がっていることを意味しているが、流速が増大するにつれて温度分布は下流側へシフトしている。また流路中央部 ( $X=50$  mm) では流速が増加するにつれてこの部分の液温は下がる。つまりヒーター面上での温度境界層厚さが流速の増大と共に減少する傾向がある。

#### 強制対流臨界熱流束

臨界熱流束値  $q_{cr}$  の実験結果を我々の開発した 2 流体モデルに基づく 2 次元強制対流熱伝達コード<sup>5)</sup> による数値解析結果と比較して図 4-5 に示す。流速が増大するに従い臨界熱流束は上昇し、その増加率は 0 m/s から 2.1 m/s の範囲でこの図に示す Type A の場合は約

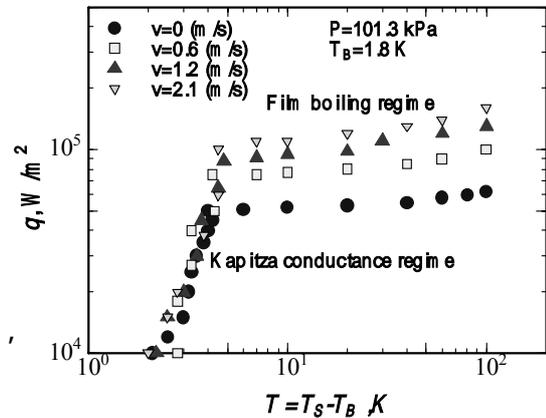


図 4-3 種々流速を変えたときの熱伝達曲線， Type A 試験部

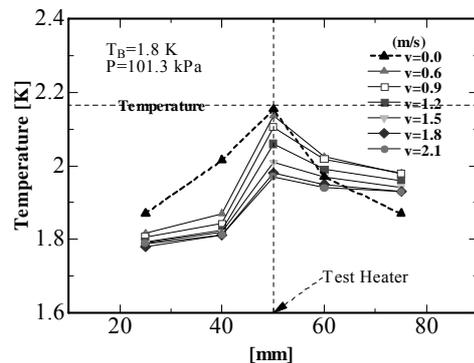


図 4-4 ダクト内軸方向温度分布

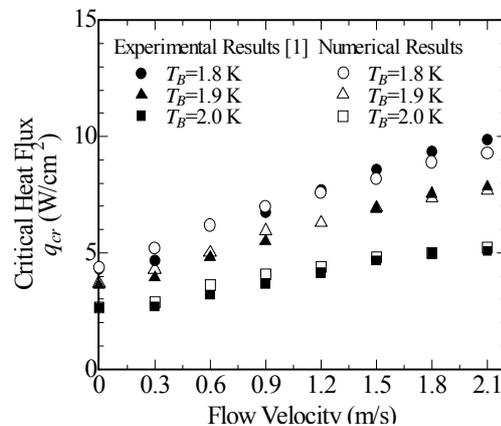


図 4-5 臨界熱流束と流速の関係， Type A 試験部

2.2 倍，Type B の場合は 4 倍になった．計算結果は実験結果を 8 %以内で表すことが出来た．

流速  $v$  がゼロ及び 0.9 m/s のときの， $X=44$  mm から  $X=56$  mm の範囲における，通常流体成分，超流体成分の速度ベクトル及び温度分布を図 4-6 (a)，図 4-6 (b)に示す．温度分布図において等温線間隔は 0.007 K となっている．

流速が零の場合，図 4-6 (a)に示すように発熱体表面で生成された常流体成分は流路上部を流れてバルクのほうへ流れるのに対して，超流体成分は流路下側を通り発熱体に向かって流れる．この対向流は発熱体近傍部の領域で見られるが，流路入り口，出口付近では両成分共にほぼ静止した状態にある．

流速  $v$  が 0.9 m/s の場合，図 4-6 (b)に示すように，流速  $v$  が零の場合に見られた超流体成分，通常流体成分による対向流はみられず，両成分共に下流側へ流れているが，通常流体成分に関しては，発熱体より上流側の流速が下流側に比べて小さくなっており，超流体成分はその逆の傾向を示している．

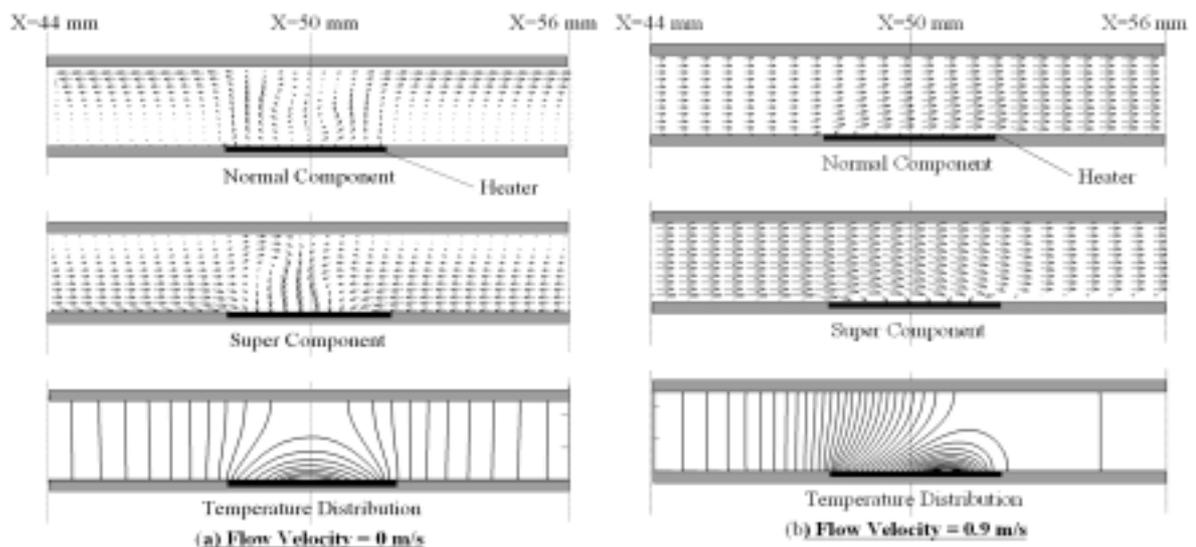


図 4-6 臨界熱流束点におけるダクト中心付近の各流動成分の速度分布と温度分布

すなわち，上流側から輸送されてきた超流体成分の何割かが発熱体近傍で常流体成分に変換され下流側へエントロピーを輸送していることが伺える．このため，温度分布図を見ても明らかのように，下流側の温度が上流側に比べて高くなっており， $\lambda$ 転移が生じている点も中心から下流側へシフトしている．

## 5 . He 冷却超伝導コイルの安定性<sup>28-30)</sup>

### 5 . 1 比較的細い超伝導線を使った過渡的冷却安定性試験

直径 0.86mm (裸線直径 0.80mm) の NbTi/Cu 複合多芯 PVF 被覆線 (銅比 6.5) を，10cm 径の溝付非磁性 SUS 製ボビンに 33 ターン巻きつけた小型導体試験体 A と，直径 0.50mm の NbTi/Cu 複合多芯裸線 (銅比 1.3) を，18cm 径の溝付 FRP 製ボビンに 33 ターン巻きつけた小型導体試験体 B を製作

し、安定性評価試験を行った。図5-1の試験部拡大図に示すように、両者ともボビン中央部の周に直径0.30mmのマンガニン線をヒータとして無誘導巻きし、常伝導転移測定のための電位タップ及び温度計を設置した。試験は、外部磁場印加用超伝導マグネットにより一定の磁場を作り、その内部に設置された試験コイルに外部電源により定電流を流した後、擾乱用ヒータによりパルス状加熱を行い局所的な常伝導の芽を作り、この常伝導部が超伝導に回復するか否かの電流値  $I_{c,7b}$  を閾値として安定性を評価した。

試験部に取り付けた電圧タップ及び温度計の信号を測定することにより、常伝導部の過渡的な伝播特性を把握した。この結果、PVF絶縁は絶縁層の熱抵抗と表面のKapitza抵抗が共に大きく、ジュール発熱を表面熱流束に換算した値が限界熱流束に比べて非常に小さな場合でも、発生した常伝導部が定期的に存在し続け、安定性を大きく損なうことが判明した。一方、4.2K冷却の限界電流からの限界電流上昇率を示した図5-2から分かるように、裸線を用いた試験体Bでは、試験体Aと同じように液温が低くなるほど限界電流は大きくなるが、常流動He冷却から超流動He冷却に移行した場合の安定性の改善率が非常に大きい。このように、超流動冷却の有効性と導体表面の皮膜が安定性に及ぼす影響について明らかにした。

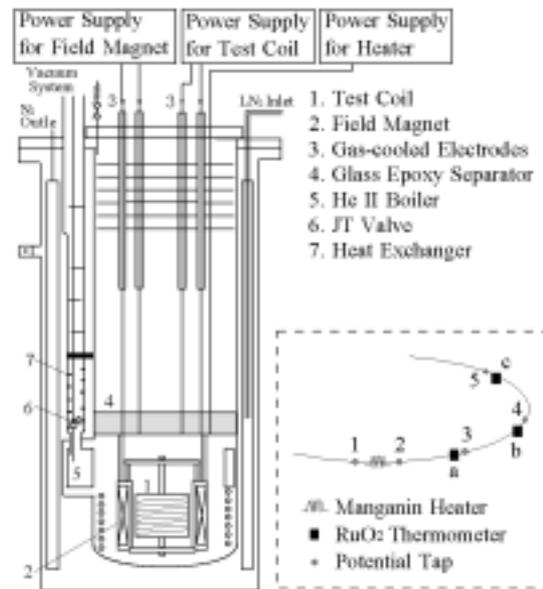


図5-1 超伝導コイル安定性実験装置。

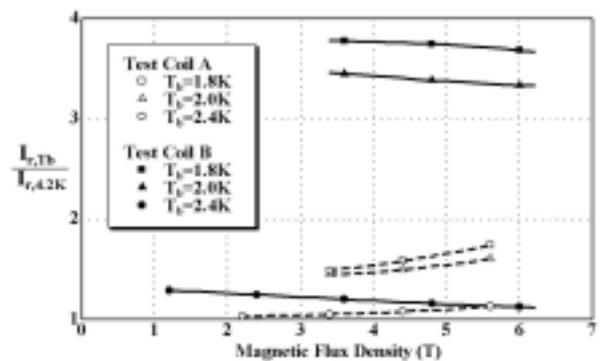


図5-2 4.2 Kヘリウム冷却の場合と比較した安定限界電流上昇比。

## 5.2 LHD用の大型導体を使った過渡的冷却安定性評価試験

長さ4.2mのLHD導体(核融合科学研究所に設置の核融合実験装置Large Helical Deviceのヘリカルコイルに用いられた導体の端材)を外径16cm、高さ26cmの非磁性SUS製ボビンに7ターン巻いて両端を短絡したLHD導体試験コイルCを製作した。図5-3にコイルの写真を示す。LHD導体の臨界電流が大きく外部電源で駆動することが難しいため、試験コイルを超伝導ループとし、試験コイル外周にある外部マグネットから電磁誘導を応用して電流供給をするためである。外部マグネットの電流を一定の増加率で上昇させることで、試験コイルにそれに比例した大電流が誘起される。この後、試験コイルに取り付けられたヒータにより常伝導部を作り、試験コイル電流だけを減衰させる。この操作を繰り返すことで、所望の外部印加磁場及び試験コイル電流を設定した。この時、試験コイル中心の磁場をホール素子で計測し、外部印加磁場を差し引いてコイルの自己磁場を求め、三次元磁場解析の結果を用いて試験コイル電流に換算した。実際の励磁試験から算出された接続抵抗は約0.5nΩとなり、接続抵抗に起因する試験コイル電流の減衰は非常に小さく、安定した電流供給が行えた。

試験は、小型導体試験体と同様に試験部に一定の磁場を設定し、試験コイルに一定の電流を流した状態でヒータによりパルス状加熱を行い局所的な常伝導部を発生させ、この常伝導部が回復あるいは

伝播する過程を導体に設置した電位タップ及び温度計によって観測した。

試験結果は、(I)ヒータ部周辺のみで常伝導部が発生し、ヒータを切ると超伝導に回復する場合、(II)ヒータ部で発生した常伝導部がコイル上側のみに伝播し、ヒータを切ると超伝導に回復する場合、(III)常伝導部が両側に伝播する場合の3つのグループに大きく分類できた。図5-4(a)はGroup IIIに属する試験結果の一例であり、試験条件は液温2.0K、磁束密度6.57T、電流17.4kA、投入熱量25J(パルス幅 $t = 200\text{ms}$ )で、電位タップの配置及び印加磁場と電流の向きは図5-4(b)に示すとおりである。ヒータ部で発生した常伝導部は両側に伝播し、巻き戻し部まで達して試験コイル電流減衰に到る。このような常伝導部発生時の電流減衰は試験方法に起因するものであるが、安定性評価に重要なヒータ入熱開始から60ms程度の時間内における電流減衰率はわずか2%であり、試験方法が安定性評価に与える影響はほとんどないことを確認した。

図5-5は、大気圧下で液温4.2Kから2.0K迄の範囲で行った安定性試験の結果で、実線が常伝導部が両側に伝播しない範囲での最大電流 $I_r$ を、斜線部が片側伝播の領域を示している。ヘリウム温度を4.2Kから2.2Kまで下げることによって限界電流は増加し、5Tにおける電流上昇率は約1.2倍である。He II(2.0K)冷却に移行することで限界電流はさらに増加し、同じく5Tにおける電流上昇率は約1.8倍である。このようにHe IIによってLHD導体の安定性は大きく向上することが分かったが、2.0Kでの電流上昇率は裸線を用いた試験体Bに比べてかなり小さい。この原因としてはLHD導体表面に施された黒化処理によるKapitza抵抗の増加、限界電流以下から発生している片側伝播現象の影響、安定化材が非常に厚いため導体内部の過渡的溫度上昇に対して超流動ヘリウムの優れた冷却機能が十分有効でない等が考えられる。今後、これらの要素について研究を進め、大型導体の高電流密度化に有用なデータベースを提供したいと考えている。

なお、片側伝播現象については、様々な磁場と電流の組み合わせについて試験を行った結果、その方向は通電電流の向きには依存せず、磁場の向きに依存することが分かり、現象解明のための大きな手掛かりが得られた。



図5-3 LHDテストコイル

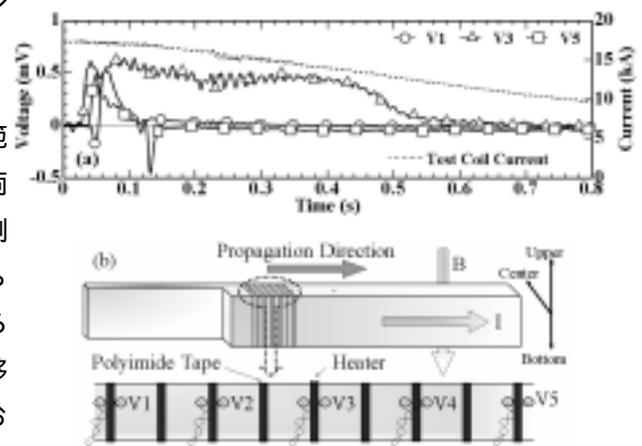


図5-4 (a) Group IIIの代表的実験結果。  
(b) 試験導体の展開図。

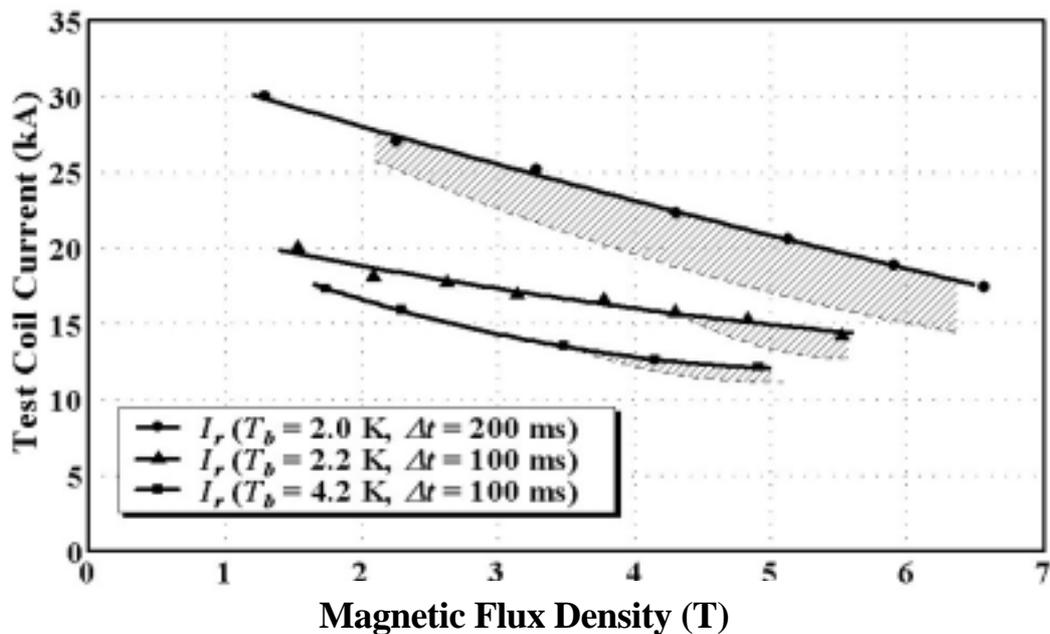


図 5 - 5 L H D 導体を用いた試験コイルに対する安定限界電流 .

#### 参考文献

- 1) Sakurai, A., Shiotsu, M. and Hata, K., "Transient Heat Transfer for Large Step-wise Heat Inputs to a Horizontal Wire in Saturated He II", Advances in Cryogenic Engineering, **37A**, p.25, 1992.
- 2) Shiotsu, M., Hata, K. and Sakurai, A., "Transient Heat Transfer for Large Step-wise Heat Inputs to a Horizontal Wire in Subcooled He II", Advances in Cryogenic Engineering, **37A**, p.37, 1992.
- 3) Shiotsu, M., Hata, K. and Sakurai, A., "Steady and Unsteady Heat Transfer from a Horizontal Wire in a Pool of Subcooled He II at Pressures from Near  $\lambda$ -Pressure to Atmospheric", Heat Transfer and Superconducting Magnetic Energy Storage, ed.by J.P. Kelly and M.J. Superczynski, ASME Publication HTD-Vol.211, p.19, 1992.
- 4) Shiotsu, M., Hata K. and A. Sakurai, A., "Effect of Test Heater Diameter on Critical HeatFlux in He II", Advances in Cryogenic Engineering, **39B**, p.1797, 1994.
- 5) Shiotsu, M., Hata, K., Takeuchi, Y., Hama, K. and Sakurai, A., "Steady and Unsteady Heat Transfer from a Horizontal Wire with a Wide Range of Diameter in a Pool of Subcooled He II at Pressures," ICEC16 (Proc. of the 16<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Material Conference), Vol.1, p.535, 1997.
- 6) Shiotsu, M., Hata, K., Takeuchi, Y. and Hama, K., "Steady and Unsteady Heat Transfer from a Flat Plate in Subcooled He II," Advances in Cryogenic Engineering, **43**, p.1409, 1998.
- 7) Tatsumoto, H., Hata, K., Takeuchi, Y., Hama, K., Shirai, Y. and Shiotsu, M., "Critical Heat Flux on Various Sized Flat Plates in Pressurized HeII," ICEC 17 (Proc. of 17<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering Conference), pp.683-686, Institute of Physics Publishing, Bristol, UK, 1998.
- 8) Hata, K., Shiotsu, M., Takeuchi, Y. and Hama, K., "A Model for the CHF of One-wall Heated Rectangular He II Channel," ICEC 17 (Proc. of 17<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering Conference), pp.789-792,

Institute of Physics Publishing, Bristol, UK, 1998.

- 9) Shiotsu, M., Hata, K., Takeuchi, Y., Hama, K. and Shirai, Y., "Transient Heat Transfer Caused by a Stepwise Heat Input to a Flat Plate in Pressurized HeII," ICEC 17 (Proc. of 17<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering Conference), pp.687-690, Institute of Physics Publishing, Bristol, UK, 1998.
- 10) Shiotsu, M., Hata, K., Takeuchi, Y., and Hama, K., "Steady and Unsteady Heat Transfer from a Flat Plate in Subcooled He II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **43**, pp.1409-1416, 1998.
- 11) Shiotsu, M., Hata, K., Hama, K., and Shirai, Y., "Transient Heat Transfer Caused by a Stepwise Heat Input to a Flat Plate on One End of a Rectangular Duct Containing Pressurized He II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **45**, pp.1065-1072, 2000.
- 12) Tatsumoto, H., Hata, K., Hama, K., Shirai, Y. and Shiotsu, M., "Critical Heat Flux on a Flat Plate Pasted on One End of a Rectangular Duct Containing Pressurized He II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **45**, pp.1073-1080, 2000.
- 13) Hama, K., Hata, K. and Shiotsu, M., "Film Boiling on a Horizontal Cyliner in Saturated and Subcooled Helium II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **45**, pp.1041-1048, 2000.
- 14) Tatsumoto, H., Hata, K., Hama, K., Shirai, Y. and Shiotsu, M., "Critical Heat Flux on a Flat Plate in Pressurized He II," *Cryogenics*, **41**, pp.35-38, 2001.
- 15) Tatsumoto, H., Fukuda, K., and Shiotsu, M., "Numerical Analysis for Steady-State Two Dimensional Heat Transfer from a Fat Plate at One-Side of a Duct Containing Pressurized He II," *Cryogenics*, **42**, pp.9-17, 2002.
- 16) Tatsumoto, H., Fukuda, K., and Shiotsu, M., "Numerical Analysis for Two Dimensional Transient Heat Transfer from a Flat Plate at One-Side of a Duct Containing Pressurized He II," *Cryogenics*, **42**, pp.19-28, 2002.
- 17) Tatsumoto, H., Hama, K., Hata, K., Shiotsu, M., and Shirai, Y., "Heat Transfer on a Flat Plate at One End of a Series-connected Rectangular Duct in Pressurized He II," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **12**, pp.1364-1367, 2002.
- 18) Shiotsu, M., Hata, K., Hama, K., Tatsumoto, H. and Shirai, Y., "Transient Heat Transfer on a Flat Plate at One End of a Duct with an Orifice in Pressurized He II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **47**, pp.1356-1363, 2002.
- 19) Tatsumoto, H, Hata, K., Hama, K., . Shirai, Y. and Shiotsu, M., "Critical Heat Fluxes on a Flat Plate Pasted on One End of a Rectangular Duct with an Orifice in Pressurized He II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **47**, pp.1364-1371, 2002.
- 20) Shiotsu, M, Tatsumoto, H., Hata, K., Hama, K. and Shirai, Y., Transient Heat Transfer Caused by a Stepwise Heat Input to a Flat Plate Located at the Middle of a Duct Containing He II, ICEC 19 (Proc. Of the Nineteenth International Cryogenic Engineering Conference), pp.783-786, Narosa Publishing House, New Delhi, India, 2003.
- 21) Tatsumoto, H., Hata, K., Hama, K., Shirai, Y. and Shiotsu, M., Critical Heat Flux on a Flat Plate at the Middle of a Parallel Duct Filled with Pressurized He II, ICEC 19 (Proc. Of the Nineteenth International Cryogenic Engineering Conference), pp.787-790, Narosa Publishing House, New Delhi, India, 2003.
- 22) Okamura, T., Tatsumoto, H., Hata, K., Hama, K., Shirai, Y. and Shiotsu, M., Critical Heat Flux in Forced Flow of Pressurized He II, ICEC 19 (Proc. Of the Nineteenth International Cryogenic Engineering

- Conference), pp.791-794, Narosa Publishing House, New Delhi, India, 2003
- 23) Okamura, T., Saeki, M., Hata, K., Hama, K., Shira, Y. and Shiotsu, M., "Critical Heat Flux on a Flat Plate Located at the Middle of Duct in Forced Flow of Pressurized He II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **49**, pp.1023-1030, 2004.
  - 24) Fujita, K., Tatsumoto, H., Shirai, Y. and Shiotsu M., "Numerical Analysis on Heat Transfer from a Flat Plate at One End of a Rectangular Duct with an Orifice Filled with Pressurized He II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **49**, pp.1015-1022, 2004.
  - 25) Tatsumoto, H., Hata K., Hama, K., Shirai, Y. and Shiotsu, M. "Numerical Analysis of Two-dimensional Steady-state and transient Heat Transfer in a Parallel duct Filled with Pressurized He II," *Cryogenics*, **44**, pp. 273-283, 2004.
  - 26) Okamura, T., Saeki, M., Hata, K., Hama, K., Shira, Y. and Shiotsu, M., "Critical Heat Flux on a Flat Plate Located at the Middle of Duct in Forced Flow of Pressurized He II," *Advances in Cryogenic Engineering*, **49**, pp.1023-1030, 2004.
  - 27) Okamura, T., Saeki, M., Hata, K., Hama, K., Shira, Y. and Shiotsu, M., "Critical Heat Flux on a Flat Plate Heater Located at the Middle of a Duct in Forced Flow of Pressurized He II," *Cryogenics*, **44**, pp.603-609, 2004.
  - 28) Ohya, M., Shirai, Y., Shiotsu, M., and Imagawa, S., "Study on Stability of Superconducting Coil Cooled by Subcooled He I and He II at Atmospheric Pressure," *Advances in Cryogenic Engineering*, **49**, pp.750-757, 2004.
  - 29) Higuchi, A., Ohya, M., Shirai, Y., Shiotsu, M. and Imagawa, S., "Cooling Stability Test of He II Cooled LHD Conductor (1) -Current Supply and Measuring Method-," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **14**, pp.1443 – 1446, 2004.
  - 30) Ohya, M., Higuchi, A., Shirai, Y., Shiotsu, M. and Imagawa, S., "Cooling Stability Test of He II Cooled LHD Conductor (2) -Experimental Results-," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **14**, pp. 1447 - 1450, 2004.
  - 31) London (井口家成 訳), *超流体*, 講談社, 東京(1975).
  - 32) D.A. Labuntzov, and Ye.V. Ametistov, "Analysis of Helium II Film Boiling," *Cryogenics*, **19**, p.401 1979.