

沸騰二相流の伝熱

大阪大学工学部機械工学科 中西重康

1. まえがき

人類は古くからいろいろな形態で各種の目的に蒸気を用いて来たのであるが大規模な蒸気消費が行なわれるようになったのはもちろん蒸気機関が出現した時点 すなわち産業革命からである。以来、蒸気発生プロセスは産業の各分野で広く見られるものとなっているが、特に火力および原子力発電、船用機関、冷凍・冷房設備、石油精製プラント、化学プラントではそれが重要な役割を演じている。

液体を加熱して蒸気を得る際にはその圧力が臨界圧力以下であれば沸点が存在し液体の平均温度がそれを通過する時に一時的に蒸気と液体が共存する二相流状態——湿り蒸気——を経過する。また沸点に達しなくても加熱が十分強ければ正味の蒸気発生はないものの加熱面の付近には蒸気が存在する状況も生じる（前者を飽和沸騰、後者をサブクール沸騰と称する）。蒸気ないし加熱液は連続的に取り出されるのが普通であるから上記の状態に流動が付加される。これを沸騰二相流と呼んでいる。

二相流、一般に多相流の場合各相の動きやすさに差があるため流動時にそれらは均質的に挙動せず通常きわめて複雑な様相を呈する。加熱等を受けず各相の量が流動中に変化しない断熱二相流でも現象は十分複雑で容易に解析的研究を受けつけないがこれに加熱が加わり各相の量が変化して行く沸騰二相流になると状況はさらに苦しいものになる。しかし伝熱の面にしぼって考えると沸騰時の熱伝達がきわめて良好であって伝熱抵抗をゼロとして良いため原子力発電が問題になるまでは詳しい資料がなくても実用上は大きな支障を来たさなかつた（ただし大きな例外として自然循環ボイラの循環障害があっ

たがこれは経験的に処理されていた。）しかし沸騰には流動のない場合（自然対流沸騰またはプール沸騰と呼ぶ）も流動のある場合すなわち沸騰二相流の場合もいわゆるバーンアウト現象（厳密には伝熱悪化ないし Heat Transfer Crisis と呼ぶ）があり加熱強度（熱負荷ないし熱流束と呼ぶ）がある限度を越すと急激に伝熱が悪化する事実があり原子力発電の開発や高熱負荷ボイラの開発が始まるとその安全確保の面からバーンアウト発生条件を予測する必要が出て来、そのため大戦後世界各国において沸騰二相流の研究が精力的に進められることとなった。また近年高速中性子炉の開発が日程にのぼって来ると液体金属（Na や NaK）を熱媒体として蒸気発生器を設計するための熱伝達率自体の数値も必要となっている。その外、蒸気発生装置の動特性・安定性、原子炉事故時の伝熱状態および緊急冷却法、海水淡水化装置の伝熱等多くの重要な問題があり沸騰二相流に関する研究の量はぼう大なものとなっており、伝熱工学の中で確固とした地位を占めつつある。しかしなにもぶんにまだ若い分野であり、その結果もきれいにまとまった形では得られていずかなり個別性の強いものであるため、伝熱学の教科書の扱いも不当に低くその記述も不十分なものが多い状態で沸騰二相流に関する知見を得るにはかなり不便であった。ソヴィエトではかなりアップトゥデートな単行書の発表は見られているが英文でも最近になって沸騰二相流に関するレビューや単行書が次々と発表されるようになってきている。たとえばレビューとしては

- 1) Mario Silvestri; *Advances in Heat Transfer*, Vol. 1(1964), 355~445;
- 2) Robert V. Macbeth; *Advances in Che-*

mical Engineering, Vol. 7 (1968), 207 ~293.

また単行書としては

- 3) L. S. Tong; Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow (1965);
- 4) G. F. Hewitt, N. S. Hall-Taylor; Annular Two-Phase Flow (1970);
- 5) John G. Collier; Convective Boiling and Condensation (1972)

がある。

ここでは数値的詳細，解析的理論についてはこれらにゆずり現在まで確立された沸騰二相流の像を定性的に説明し，加えて今後の問題点を略述する。

2. 基本的な事項

沸騰二相流の伝熱も他の伝熱現象と同じく物質，加熱面の形状寸法，流れの状況に支配される。現在研究対象となっているのは水がほとんどであるがその外にはフロン系冷媒，液体金属，低温液化ガス等も実験の対象となっている。しかしこれらの結果を関係付ける相似則が得られていないため実験データの一般化は不可能である。以下では主として水について得られた結果に基づいて議論を進めることとする。

伝熱面の形状は最も基本的なものは平板と考えて良いであろうが，実用的には単数ないし複数個の円筒で構成されたものが重要である。しかもこまかに見ると平面加熱面で起こっている現象は一般的にはその他の形状におけるものより著しく単純であるとは言えない。したがって研究の主流は円筒で構成された伝熱面に向けられている。その配列を示すと図1のごとくなる。単管の場合，二相流は管内を流れることも管外を流れることも可能である。後者の場合流れがゆるやかであると現象はプール沸騰にごく

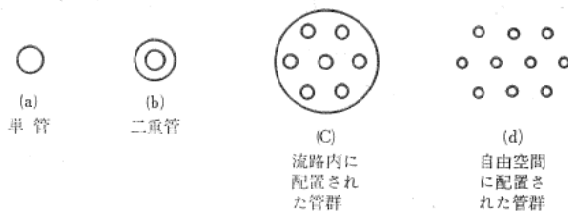


図1

似たものになる。これは管群（ロッドバンドル）の場合も同じであってこれらに対しては古くから研究されているプール沸騰の結果（これについては標準的な伝熱の教科書，たとえば W. H. McAdams; Heat Transmission, 3rd ed. (1954) を参照されたい) をそのまま適用するのが普通である。したがって沸騰二相流は単管内，二重管，まれにはチャンネル内の管群（図1(c)）で研究されている。なお管の形状

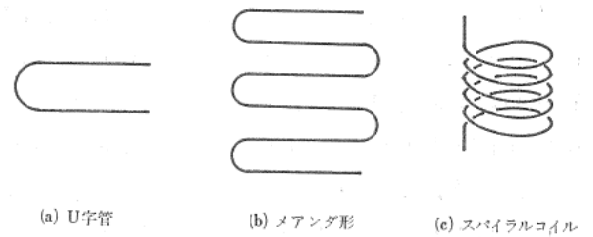


図2

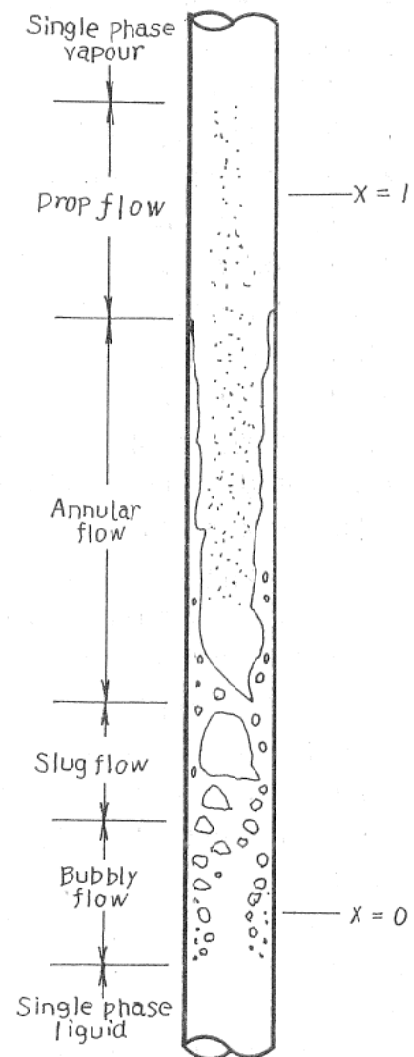


図3

は直管の外、図2に示すようなものがとられる。

単管の内部でどのような状況が生じるかを誇張して示したのが図3である。(なお図中の x は乾き度 Quality と称する量で $x=(i-i')/r$ で定義される。ただし i —— 流体のエンタルピ; i' —— 飽和液のエンタルピ; r —— 蒸発潜熱。) 管の下部から入った液体は加熱の進むに従い気ほう流, スラグ流, 環状流, 噴霧二相流状態を経過したのち過熱蒸気となって管の上部を去る。このように流れの様相(流動様式と呼ぶ)が加熱とともにまったく変化するため伝熱機構は蒸発生プロセス全体にわたって同一であるはずがない。ただスラグ流は低圧では大きな役割を示すが高圧では存在しなくなると考えられている。したがって“正常な”状態の沸騰現象は図4のようにモデル化される。“異常な状態”すなわちバーンアウト時のモデルについては次節でのべる。

上述したごとく二相流では両相が同じ速度で運動しないため流路断面積で蒸気が占める割合 α (ボイド率) は蒸気の容積流量と全容積流量の比とは異なって来る。この α は流動抵抗のうち加速損失と位置水頭を支配する上、沸騰水形原子炉では反応度も支配する重要な量である。これを予測する方法は種々あるが二相流研究の初期の1944年に R. C. Martinelli が発表した方法を大きく越えたものは見当たらない。彼の方法は二相流の諸量が λ (カイ) パラメータ注) の関数となるとするもので、摩擦圧力損失およびボイド率を求める図表が彼によって与えられている(前に挙げた単行書のいずれにも記載されている)。これはもちろん断熱二相流について得られたものであるが沸騰二相流に対してもそのまま適用するのが普通でイギリスで行なわれた大規模な実験の結果でもボイラ程度の熱負荷なら十分正しいことがわかっている。しかし熱負荷が高くなれば断熱二相流とは違ったものになることがソヴィエトにおける研究によって示されているが、それがどれ位ずれて来るかを予測する方法は与えられていない。

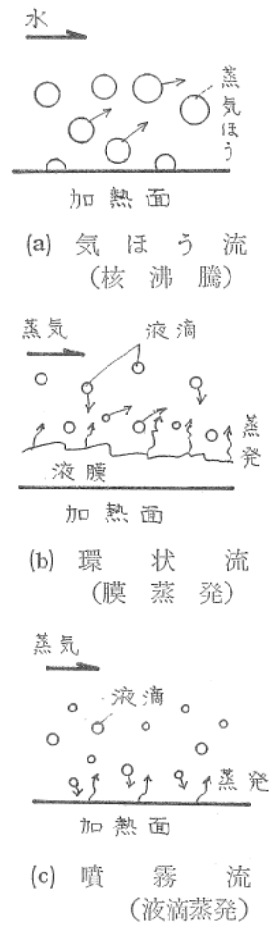


図4

3. 伝熱悪化

§1で述べたごとく沸騰二相流にも伝熱悪化現象が存在する。これがどのように生ずるかを均一に加熱した円管内に水を流し、熱負荷を上げて行った時の出口壁温の記録からたどって見よう(図5)。なお入口乾き度 x_{in} は負、すなわち入口水温は沸点より低い場合である。

(a)の場合熱負荷の増加とともに一たん壁温は上昇するが核沸騰の開始とともに低下を見せたのちある点で急激な上昇を見せる。この時熱負荷を一定に保ったままにしておくと千度近くに上昇し管の破壊をもたらす。この時の出口乾

注) カイパラメータのうち λ_{tt} は次式で定義される： $\lambda_{tt} = [(dp/de)_{LFF} / (dp/dl)_{GPF}]^{(1/2-n)}$ 。ここで $(dp/de)_{LFF}$, $(dp/dl)_{GPF}$ —— それぞれ液相、気相のみを流した時の摩擦圧力こう配; n —— プラジウスの公式中のレイノルズ数の指数の絶対値。

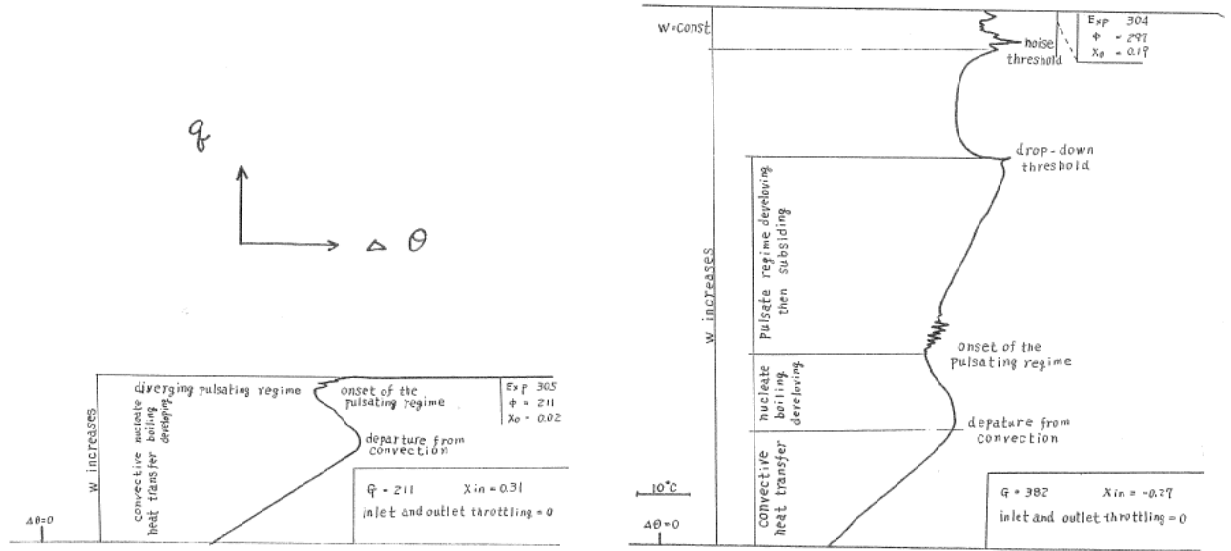


図5

き度 x_0 は低く時には負である場合がある。
 (b) の場合は乾き度の低い領域で伝熱悪化が生じなかった例で熱負荷増加を続けるとある個所で不規則な壁温の振動が生じ、この点 (Noise Threshold と呼ぶ) を越えて熱負荷を上げると壁温は振動しながら割合ゆるやかに上昇し、その落ちつく温度も比較的低い。前者では伝熱悪化後熱負荷を下げると壁温は熱負荷上昇時と異なる経路を通過して低下しヒステリシスを示すが後者ではこのようなヒステリシスが存在しない。構造的に “素直な” 実験装置で伝熱悪化点 (この時の熱負荷を限界熱負荷 Critical Heat Flux CHF と呼ぶ) を求め横軸に入口乾き度、縦軸に限界熱負荷をとって実験データをプロットすると図6の様なものが見られる。得られた曲線には $x_0 = 0$ 近傍と $x_{in} = 0$ 近傍にくぼみがあるがこれは装置によって差があり研究初期におい

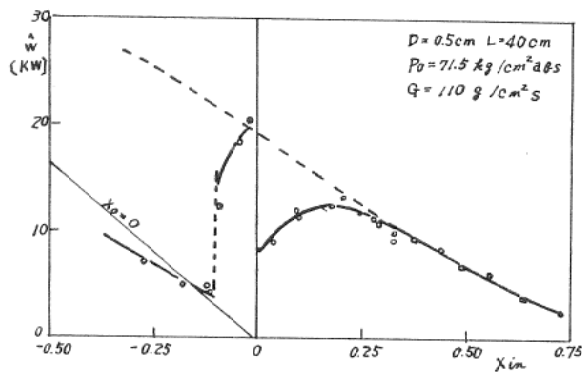


図6

ては各研究者ごとにデータが異なる原因の一つとなっていたが現在ではそれが実験装置に発生した自励振動によるものであり適当な処置 (管入口に大きな水力学的抵抗を与えるなど) により除去でき曲線を破線の位置に持ち上げることが知られている。初期におけるデータのバラつきのもう一つの大きな原因は高乾き度における伝熱悪化発生の定義がマチマチなことであったが現在では上記の Noise Threshold ないし壁温急変点として定義することによりデータの不一致は著しく減少した。その結果データの “素直な” 装置を用いれば管入口の影響が出ぬ範囲では各研究者のデータは良い一致を示すようになり、水に限って言えばかなり広い適用範囲の相関式が均一加熱の円管内流について得られている。しかし不均一加熱条件や他の形状についてはまだ満足できるような一般的な予測法は得られるにいたっていない。

沸騰二相流の最も自然な形は入口乾き度が負の状態の加熱管路に存在するものであるが、入口乾き度が正の場合でもあまり極端な相分布を入口で与えぬかぎりかなりの程度は限界熱負荷の数値で見ると両者は一致する。図7は熱負荷がある程度以下になると入口乾き度が負である限り出口乾き度がある限界値に達すると伝熱悪化が生じることを暗示している。しかし実際には実験装置上の制約から熱負荷が小さくなれば

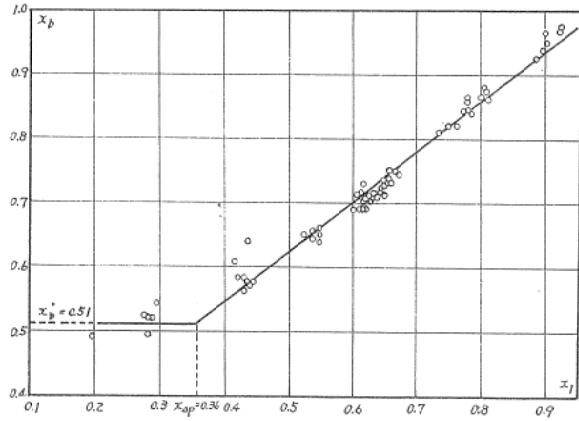
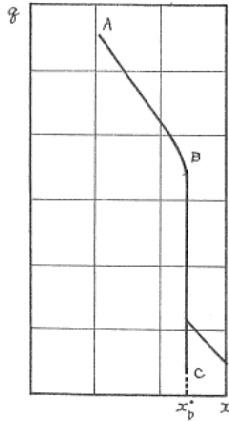


図7

x_{in} も正にせざるを得なくなるがその場合も x_{in} が限界乾き度にある程度接近するまでは伝熱悪化が生じる出口乾き度は変化しない。これは管内の沸騰が比較的早く流れの条件を画一化する傾向を示すものと解釈してよいであろう。

次に伝熱悪化発生機構について考えてみる。図4(a)および図5(a)に対応する状況は本質的にはプール沸騰と同一であって核沸騰から膜沸騰への遷移である。ただ流動の存在が多少の修正因子として働いている。(この考えに基づいて限界熱負荷をプール沸騰の限界負荷と対流熱伝達による項の和として整理している例がある)。したがって、発生機構として i) 発生した蒸気によって伝熱面が全面的におおわれる; ii) 伝熱面上で気ほうが発生する途中で伝熱面が過熱するの二つが考えられている。これはいずれにして局所的条件が支配する。そのため相関式が作りやすく割合早い時期に信頼すべきものが得られている。この種類の伝熱悪化をたんにバーンアウトと呼ぶことがある。図4(b)および図5(b)に対応する状況はまったく沸騰二相流に特徴的なものである。図4(b)の状況下では伝熱面での気ほう発生はほとんどないかあってもその役割は小さく空気は伝熱面に付着している液膜の表面でほとんどが発生する。伝熱悪化がどのような局面に対応するかは種々議論されたが現在ではそれは液膜の乾き切りないしそれにごく近い場所に対応することがほぼ通説となっている。図8は加熱部出口で液流量を測定した C.F.Hewitt らの実験結果であるがこれ

から限界熱負荷と液膜乾き切り点はかなり近いことが見てとれよう。この事実からこの種類の伝熱悪化をドライアウトと呼ぶこともある。さてこの場合の限界熱負荷は出口での液膜流量ゼロの条件で与えられるのであるから液膜流量を計算する方法が解析的に可能であれば推測可能である。しかし実際には多くの困難があって一筋縄では行かない。液膜厚さは i) 入口条件、すなわちドライアウト点からかなり離れた断面における液膜流量; ii) 蒸气流から液膜へ飛びこんで行く液滴の量; iii) 逆に膜液から蒸气流へ飛び出して行く液滴の量; iv) 熱負荷によって定まる。このうち簡単にきまるのは iv) だけで i), ii), iii) とともに理論計算で求めることは不可能に近く、また沸騰二相流について実験的に求めることもきわめて困難である。そのため通常はそのうちのいくつかを断熱二相流のデータを

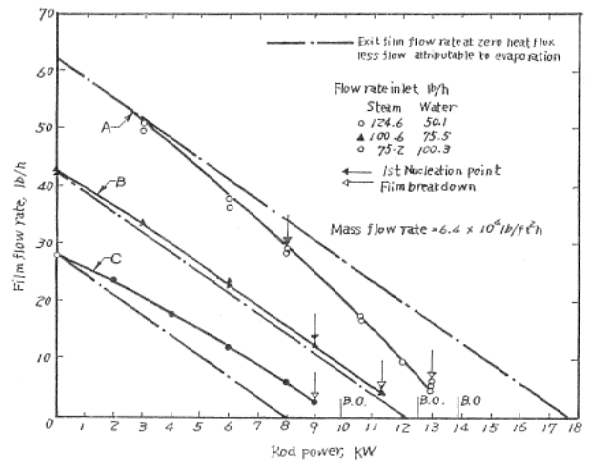


図8

使って求め、またいくつかに、時にはすべてに適切な関数形を仮定し限界熱負荷の実験データによくフィットするよう定数を定めており、実験データ整理法の一変種にすぎなくなっているものも多い。ドライアウトの場合の限界熱負荷が積分的性格を持っていることが不均一加熱実験の整理をむつかしくしている一因である。

以上は単管の管内流の場合であるがその結果は定性的には他の形状に適用できても定量的に換算することができないため、実用に供せられる特殊な形状の伝熱面については現在のところ実物試験以外厳密な確証はないといつてよい。伝熱悪化は熱伝達率のようにならして考えることのできないものであることはたとえば図 1

(c) のようなものをして見ればよく了解できよう。単相流の熱伝熱の場合であれば相当直径の考え方をもちこめば容易に計算できるものであるが、伝熱悪化について言えばどの部分が最も危険であるかはなかなか予測できないし、また配置のわずかな変化が状況をがらりと変える可能性があり個々の場合について実験的検証が要求される。

現在の所あまり研究されていないが、実用上重要なものに、図 1 (d) のような配置のバンドルでロッドの間隔がきわめて密な場合の中央部で生じる現象がある。これをプール沸騰のデータのみで解釈することはきわめて危険なことであると思われる。

4. 熱伝達率

伝熱の際の熱抵抗は他の熱抵抗に比較すると十分に小さく無視しうるのが普通であり、熱伝達率の値は大ざっぱなものでもよいが、高速中性炉用液体金属蒸気発生器 LMSG のようなものになると熱抵抗の各成分の大きさがほぼ同じオーダーのものとなるためその設計にあたっては正確な熱伝達率の数値が必要となってくる。しかし現在のところ沸騰二相流の熱伝達率相関式は数も少く信頼しうるものはまだないといつてよい。その大きな原因の一つは実験データが各研究者によって同じ条件と思われるもの同志についてもかなりの相異があり信頼しうるデー

タを集積することが困難なためである。これは

i) 熱伝達率は熱負荷を加熱面表面温度と被加熱液体の温度差で割ったものとして定義されるが、熱伝達の良さのためこの温度差がごく小さい上、加熱面表面温度が直接測定できず誤差も大きく温度差と同程度に容易になりうる；

ii) 熱伝達率は限界熱負荷よりも装置特性の影響を受けやすい；

iii) 一般的に熱伝達率測定実験は装置がかさばる上に時間と手間がかかるため実験の数自体が少ない。

などによる。しかも次のような事実も報告されている(図 9)。伝熱悪化がドライアウト状況

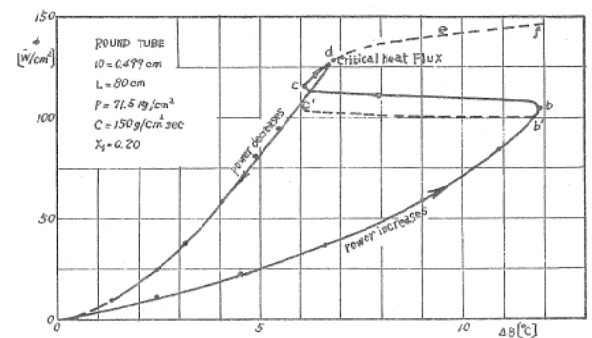


図 9

に対応する場合に加熱を強めて限界熱負荷を越えさせしかるのちに加熱をゆるめる。この時に温度差——熱負荷曲線を書かせて見ると熱負荷上昇線と下降線は一致せずヒステリシスループがえがかれる。ただこれに対する追認実験はなされていないようである。

上述のような事情であるため整理対象の生データ自体の質が悪く、実験値と相関式の予測値の間の差も相当バラつくことは避けられない。整理の方法は限界熱負荷の場合と同じく図 4 に示すモデルに応じて異なる。すなわち、

i) 核沸騰形(図 5(a))；サブクール沸騰および低乾き度の飽和沸騰に対し適用されるモデルであつて、この場合の熱伝達率はプール沸騰と同一であるとされる。W. H. Jens と P. A. Lottes の相関式が有名で設計にもよく用いられている；

ii) 膜蒸発形(図 5(b))；環状流領域の飽和沸騰に対し適用されるモデルである。この場

合の熱伝達率は单相流の熱伝達率に類似した挙動を示すが、さらに Martinelli のカイパラメータの関数になるとして整理されている。最も新しい関数式は J. C. Chen によるものでこれは i) の形の沸騰も含め熱伝達率を推測する目的で作成されている。これは無次元化形で表現されているものの水以外の物質にどの程度適用性を有しているかは疑わしい；

iii) 液滴蒸発形 (図 5(c))；これは伝熱悪化後の二相流をモデル化している。この伝熱は原子炉用蒸気発生器に貫流形の採用が考えられるようになったため研究されるようになった。このような機器では軽度なものではあるが伝熱悪化発生を避けることはできず、熱設計を完ぺきなものにするには伝熱悪化時点後の熱伝達率の数値が必要となる。しかしこの領域の研究はあまり盛んでなく研究の数も少ない。

以上の議論はすべて図 1 の (a), (c) に属する流路に限られることは十分留意しておく必要がある。いずれにしても熱伝達率に関する研究は伝熱悪化に関する研究にくらべるとかなり遅れていると言っておく。

5. 不安定流動と二相流障害

二相流が関係を持つ異常現象はいろいろありまた実際にしばしば発生している。これが伝熱とからみあって来ると時として重大な事故の発生を招く。二相流障害中の大物は蒸気発生器の不安定流動である。不安定流動の存在は伝熱悪化の早期発生をもたらすことがあり過去に多くの事故の原因となっている。蒸気発生器は分布定数系であるが、ボイラや沸騰水形原子炉は本質的には 1 次元系を並列接続したものと見なすことができるから不安定限界の計算は、原理的には可能なのであるが、現在までのところあやふやな仮定を入れない完ぺきに近いものとして STABLE コードが発表されている。しかし加圧水形原子炉の蒸気発生器 (図 1 (d), 図 2 (a) の形態をとる) 2 次元として近似することも不可能で 3 次元系として扱わねばならぬがこうなると基礎式自体を得ることもまた解くこ

とも不能に近くなる。したがってこれは実験的に研究せざるを得ないが相似則が確立されていないから非常にむづかしく得られた結果を他の条件に拡張できず定性的な主張しかし得ない。

不思議なことに不安定流動の理論解析を行っている研究者はどうも二相流の他の分野の新しい結果をあまり使用しないようである。しかしこの状態は最近多数の研究者が沸騰二相流の流動不安定を手がけ始めていることによって間もなく解消されるものと思われる。流動不安定の研究に対するもう一つの不満は実験結果、特に大規模な実物試験結果と理論解析の結果との比較が十分に行なわれていないことで解析が実験とはまったく独立して単に理論的興味だけで研究されているように見えることさえある。

二相流障害にはこれ以上にもいろいろあるが系統的研究を許さないものが多く事故発生のたびに個別的对策が追求されるのが普通である。少し複雑な形状の蒸気発生器となると実際に運転した場合予想以外の事故発生があり驚かされるものであるが、その対策もわかってしまえば十分根拠付けのできるものであることが多いがさがし出すまでが大変である。またどの対策に効果があったかわからぬうちに障害となる異常に現象が消滅することも多い。

この外の重要問題としては原子炉暴走時の伝熱面の挙動、緊急冷却法、溶液の沸騰二相流があるがここでは省略する。

5. 結 語

以上のべたように沸騰二相流の伝熱の研究は必ずしもすべてが良好に進行しているわけではなく、また研究に対する意欲が一時停滞した時期があったが、高速中性子炉開発が刺激剤となり再びかなりの活況を呈するようになっている。

現在までかなりの資料が蓄積された分野、すなわち伝熱悪化についてはもっと統一した見地からの整理がなされるべきである。熱伝達率については信頼しうるデータの蒐集が第一であろう。原子力開発とともに展開して来た沸騰二相流の研究は逆に原子力への利用という点から大きな制約を受けている。すなわち、(i) きわめ

生産と技術

て大きな熱負荷によって実験する必要があること；(ii) 安定性を研究する場合にはきわめて大きな装置が必要とされることである。このような事情は相似則が見出されればかなり解決できるのであるから相似則の追求は今後に残された大きな課題とあって良からう。

沸騰二相流を扱う機器，すなわち蒸気発生器の設計はボイラを通じて長い経験を積み重ねて来たが原子力発電の登場はそれによっては処理しえないまったく新しいタイプの蒸気発生器を必要とし，かくして沸騰二相流は伝熱工学の一

分野としての市民権を獲得した。しかし学問としてはまだ青年期の直前と言え体系的に整っておらずまださらに多くの研究努力を必要としている。そのネックは何といても実験にはばく大な熱量（すなわち電力）を必要とし電力容量が1 MWを越える実験装置も稀ではないこと，現象を支配する変数の量がきわめて多くすっきりした結果が得にくいことであるが，原子力発電の開発の一つの鍵を握るものであり，わが国における研究の一層の隆盛が望まれる。

〔以上〕