

甲藤好郎先生ご遺稿
「沸騰の科学（8）」
Science of Boiling (8)

甲藤 好郎（東京大学名誉教授）

Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

8. 加熱管内の流れと沸騰

讃美歌の一節から

少し唐突ですが讃美歌の一節に、「むかし主イエスの捲きたまいし、いとも小さきいのちのたね、芽生え育ちて地の果てまで、その枝を張る木とはなりぬ」というのがあります。これはキリストの教えや神の国が、いつか大きな広がりを見せて来たということへの讃美なのでしょうが、それはともかく前章で説明した非加熱管の話からの発展として、これからお話ししようとする加熱管内の流れは、管内における蒸気発生とともに、管の入り口から出口の方に向かって気液の状態変化が確実に広がりを見せて行くのです。

もっとも加熱管と一口に言っても、火力発電所のボイラーの蒸発管では、例えば火炎に直接面している管壁側とその反対側とで加熱の強さが違ってきます。また沸騰水型原子炉では、平行に並んでいる多数の発熱燃料棒の間を水が流れていますが、燃料棒の発熱は棒の中央部が強く、端の方では少し弱くなっています。しかし本章では本筋的な話だけに絞るため、前面にわたって一様に加熱されている一本の垂直円管を考えることにします。そしてその管の下端入口から上向きに、ある圧力、温度のサブクール液体（その圧力に対応する飽和温度よりも低い温度の液体）が定常的に流入しているとき、加熱管内を流れる流体にどんな状態変化が生じていくか、それを見て行くことにしましょう。

ついでながら、こうした現象について実験をしたいときは、多くの場合、ステンレス鋼の円管を使い、その管壁に電流を直接流し管壁の電気抵抗による発熱を利用して流れを加熱するのです。もちろん通常の100ボルトとか200ボルトの電圧をそのままかけると、電源のヒューズがとび、また

電力が強すぎて管が融けてしまったりしますが、この場合のステンレス鋼管のように電気抵抗が極端に小さい場合には、電圧を普通の乾電池の電圧程度に低くし、その代り大電流を流す方法（低電圧大電流）で必要な加熱をすることが出来ます。なお精密な実験の場合には交流でなく直流を使います。なぜなら、たとえば50サイクルの交流を流すと、1秒間に100回の割で管壁が周期的に加熱され、管壁上の蒸気発生が同じ周期で断続することになって、1秒間に100回の割で管壁が周期的に加熱され、管壁上の蒸気発生が同じ周期で断続することになって、沸騰を伴う流れの状況に何らかの影響をもつかも知れないからです。

類似的な変化のパターン

さて一様に加熱される管入口から流れ込むサブクール液は管に沿ってしばらくの間、液相のまま加熱されながら温度が上がって行きます。一方、管壁の方も、そのサブクール液の温度よりほぼ一定の値だけ高い温度（その温度差で管壁から液体へ熱を与えて行く訳です）を取りながら、流れの方向に温度が上って行って、やがて沸点（飽和温度）より少し高い温度に達します。

そしてこの辺りでは、管壁に直接触れている附近の液体も飽和温度以上に過熱されていますから、いつか管壁上に核沸騰を生じ始めるわけで、この位置のことを「核沸騰開始点」と言います。ただし、この点から後流へかけて暫くの間はまだ、管壁近くを除く管内の大部分にサブクール液が流れています。従って、それに触れる蒸気はすぐに凝縮してしまうので普通、気泡や蒸気は管壁のごく近くにしか見られません。この状況は、2章の終わりでお話した、サブクール・プール沸騰の時の「表面沸騰」にやや様子が似ていると言えるでしょう。

しかし管路に沿って流れる液体がさらに加熱されて行き、液体の持つサブクール度が少し減って来ると、管壁から液中へ離脱する蒸気泡が急には消滅しなくなりますから、管内に蒸気の蓄積が始まるようになります。そして、これを「正味蒸気発生」の開始と言いますが、これから以降、管内の液体の流れは気泡を含むようになり、7章（「流れのパターン」の項参照）に述べた「気泡流」の状態になって行きます。

そしてまもなく管内を流れる流体の温度は実質上、飽和温度に到達します。それゆえ、前述の核沸騰開始点からここに至るまでが「サブクール沸騰」だったのに対して、これ以後は「飽和沸騰」と言うこととなります。そして以後、蒸気の蓄積量が増して行くにつれて、流れのパターンは次第に変化し、7章（「流れのパターン」の項参照）で述べた「チェーン流」、「環状流」、またやがて「環状噴霧流」という風に順じ変わって行きます。そして、この最後の「環状噴霧流」では管内の中心部に蒸気が流れる一方、壁面上に薄い液膜の流れがあるわけですが、この液膜流は管壁の加熱を受けて蒸発し、さらに薄くなって行って、やがて消滅することになります。つまり、ここで管壁は乾いてしまい、そして環状噴霧流の領域が終わりを告げることになりますが、この限界は考えてみると管壁が乾く点で限界熱流束現象の一形態に他ならず、管壁上の液膜流が乾いて生じるものゆえ特にドライアウトと呼ばれます。

さてここで再び温度の方に目を転じますと、まず流体の温度は前述の飽和温度に達した位置からこのドライアウト点までずっと、ほぼ飽和温度に保たれます。そしてこの間、非常に良好な熱伝達のため、管壁の温度も飽和温度よりやや高い程度の値—もちろん加熱の強さで高低に差はありますが—に保たれますが、しかしドライアウト点に来るや加熱面が乾いてしまうため、熱伝達が突然劣化、そのためその点以降、壁温は急上昇して高い温度になります。

そしてドライアウト点以降の流れは、多数の小さな液滴を伴った蒸気が管内を一杯に満たして流れるもので、このような流れを噴霧流（ふんわりゅう）と言います。この「噴霧流」は、前述のように高温加熱管の管壁が乾いた後に生じる高温加熱管の領域（ドライアウト発生後の領域という意

味でポストドライアウト領域と呼ばれます）に見られる流れのパターンであって、7章でお話したような非加熱管では見ることの出来ないものです。そしてこのポストドライアウト領域においては、管内を流れる蒸気は管壁からの直接加熱にさらされますから、飽和温度より温度が上がって過熱蒸気（飽和温度より高い温度の蒸気）になって行きます。また同時に、その蒸気に乗って流れている小液滴（これは飽和温度に保たれます）は、周囲の過熱蒸気からの加熱と、高温管壁からの熱放射を受けて蒸発し、やがて消滅するため、それ以降の流れは純粹に過熱蒸気だけの「単相流」に変わることになります。

現実に出会う加熱管内の流れの状況

前項では、加熱管内の流れの全般的なパターン（実はもう一つ追加すべき流れのパターン「逆環状流」がありますが、それについては後で触れることにします）を示すため、特別に管が長く、かつ加熱の強さが適当に低い場合を選んで説明をしたものです。実際には、与えられる条件によって、いろいろの状態を生じることになりますが、今それを見るため次のようにしてみましょう。すなわち、いま管の入口から常に同じ状態のサブクール液が流入するという条件の下に、まず ①管の長さ（あるいは流体の流量）を変えた場合、それから次に ②加熱の強さを変えた場合、この2つの場合のそれぞれについて管出口の流れの状態がどう変わるかを見てみます。

①「加熱管の長さを減少、または流量を増加した場合」

もし他の条件は一定のままにしておいて、いま加熱管の長さを短くする（あるいは流量を増加する）と、もちろん前項でお話した管内の状況変化の途中までしか変化は起こらないこととなります。つまり管出口の流れは、最初、管が長いうちは「環状噴霧流」ですが、管が短くなるにつれて「気泡流」など液体の多い流れに変わり、さらに管が短くなると、管内の沸騰は「飽和沸騰」から「サブクール沸騰」の状況に変わります。そして以後、さらに管が短くなると、やがて管壁表面近くだけに気泡や蒸気の見られる沸騰状態となり、ついに管出口が「核沸騰開始点」より上流の位置に来るよう管長が短くなれば、そのとき管内にあるのは、も

はや沸騰のないサブクール液の単相流だけになる訳です。

②「加熱を強める場合」

次に今度は十分に長い管で管長を一定にしておいて、管壁の加熱を強めて行くと、やがて管内にドライアウト点が生じ、それより後流にある管壁は赤熱焼損してしまうようになります。そしてそうなると、ドライアウト点以降の流れはもはや物理的に無意味になり、換言すれば管出口で丁度ドライアウトの発生する時が加熱の上限であって、それより熱流束の大きな加熱をするのは危険だということになります。そこで以下、この限界点以前の管内の流れだけに注目して考えることにしましょう。

いま、ある長い加熱管があって、その管出口にドライアウト形式の限界熱流束の状態が前述のように生じているものとします。この時、仮に管出口から上流の方へ加熱管を少し切り詰めてみて下さい。当然のことながら、新しい管出口（前述の切り詰めによって出来た）ところで流体はまだ限界熱流束の状態に達しておりません。だから、この切り詰めた管の出口で限界熱流束の状態を起こさせるには、前よりもっと熱流束をあげる必要があります。換言すれば、この切り詰められた管の限界熱流束の値は前より高くなります。そしてこの簡単な原理は、一様加熱管の場合、何もドライアウト形式に限らず、他の形式の限界熱流束でも一般に適用できる訳です。なぜなら、一様加熱管の場合、限界熱流束の状態は常に管出口で始まるということが知られているからです。

要するに、加熱管を短くすると加熱を強めることが出来る訳ですが、実はこれと一緒に、前の①で述べたような管出口の流れの状況変化も伴って起こります。つまり管出口の流れは、次第に液体の多い流れになり、やがてサブクール沸騰の状態へと変わって行くのですが、それと共に管出口の限界熱流束も、そうしたいろいろの流れの状態に対応したものに変わって行くことになります。なお加熱管内の流れに起こる状況変化として、加熱が強くなるとともに、管内の沸騰が弱い核沸騰の状況から強い核沸騰の状況（3章参照）へと移り変わって行くことも忘れてはならぬ事柄です。

加熱管内の限界熱流束の様相

前項で私たちは、加熱管出口のいろいろの流れの状況のもとに、それらに対応した限界熱流束現象が生じることを見ました。そこで以下、ここで限界熱流束にどんな性格の変化が生じることになるか、それについてごく簡単な説明をしておきましょう。

①「管が比較的長い（あるいは流量が小さい）場合」

長い管では一般に、低い熱流束のもとに徐々に発生する蒸気が管内に次第に蓄積されて行って環状噴霧流が作られ、その流れに付随する液膜流が管出口位置の管壁上で蒸発消滅するときに限界熱流束（ドライアウト形式）が発生します。そして管長が減るに連れて限界熱流束の値が上昇して行きます。なおここでの流れは環状流、つまり蒸気の流量割合の多い流れであって、従ってこの場合の限界熱流束は、加熱面のまわりに沢山の液体があり、そして強い核沸騰で生じる限界熱流束とは発生状況が非常に違います。また、現在のタイプの限界熱流束の発生にとっては、管内に「強い核沸騰」の存在は必ずしも必要ではありません。

②「中間の場合」

ところで、管長をもっと短くすると、それに伴って限界熱流束の値が高くなって来ます。そして管出口における限界熱流束の発生メカニズムは、まだ前述の①の領域と同じドライアウト形式を保つものの、管内のもっと上流の部分に次のような新しい状況が生じるようになります。すなわち、熱流束が高くなるため「強い核沸騰」が生じるようになり、そして熱流束の上昇とともに加熱面上の「核沸騰液膜」の限界厚さ（4章「加熱面を覆う核沸騰液層の厚さ」の項参照）が急速に薄くなります。そのため、管内の環状噴霧流を構成している液膜流について、その厚さがこの限界厚さに支配されてどんどん薄くなるようになり、ひいては限界熱流束の値がそれだけ抑えられることになります。従って、この状態に入ってから管を短くして行っても、もはや限界熱流束は前述の①の領域ほどの上昇率では増大出来なくなります。

③「管がかなり短い（あるいは流量が大きい）場合」

しかし、さらに管を短くすると、前項でお話したように液体の流量割合の多い流れ、あるいはさらにサブクールの流れが管内全体を占めるように

なります。そして熱流束が高いので、管出口まで「強い核沸騰」の状態に置かれ、従って5章で述べたプール沸騰の限界熱流束などに似たメカニズムで限界熱流束が発生することになります。もっとも現在は、管壁で限られた流路内を気液二相流が流れているのですから、気液の挙動と限界熱流束の発生メカニズムの間の関係が、プール沸騰の場合よりやや複雑化することはいうまでもありません。

限界熱流束の実験データの一般的な整理

一般に、沸騰に関する現象はすべて、複雑な気液の挙動を伴って起こるもので、これを理論的に厳密な形で表現したり記述したりすることは現在でも不可能に近いことです。けれども、もしそれが、かなりまとまりのある現象であるならば、適当なモデルを使って、現象の発生機構を説明したり理解することが出来る筈です。つまり、考えている現象がいろいろの条件の下に、ある程度統一的性格を持って現れることと、私たちがこの現象を物理的に理解できることは表裏一体の関係を持っています。

ところで、考えている現象がどの程度の統一的性格を持っているのか、それは広い条件範囲にわたる実験データを分析検討してみても分かる訳ですが、沸騰のように複雑な状況の場合は、ただやみくもにやっても成果は上がりません。ではどうすればいいのか？それには前に7章(「管内の流れに生じる圧力損失」の項参照)で、どんな自然法則も「無次元数」の間の関係として表されるものだということをお話したことを思い出して下さい。つまり実験データの分析から適当な「無次元数」をいくつか探し出して、それらの間に何か法則性が有るか否か検討する方がはるかに優れた方法ですし、また現象の理解のためにも助けになることになります。例えば前に5章(「限界熱流束の現象」の項参照)で、プール沸騰の限界熱流束の実験データの分析から、クタテラーゼが一般的な経験式を導いたことをお話しました。そしてこのクタテラーゼの成果が、この現象の発生機構に関するその後の研究を非常に助けたことは明らかです。

では、加熱管内の強制流動沸騰の限界熱流束については、どんなことになっているのでしょうか。ここでは加熱管の長さや直径、管内の流量、管出

口附近を流れる蒸気の流量割合など限界熱流束に関係しそうな因子の数が少なくありません。その上、前項で見たように限界熱流束発生の様相も単純なものではないのです。従って非常に広範囲にわたる条件下の限界熱流束 q_c の実験データを一般的な形に整理することは、必ずしも容易な問題ではないと言えましょう。

①「水の限界熱流束」

しかし加熱流路内の流れの限界熱流束について、その値の正確な予測は原子力発電所の設計やその他の実際技術面で非常に緊急かつ重要な問題です。そこで、特に重要な水の沸騰について、限界熱流束の実験データを経験式の形に整理する研究(なお整理式の代りに数表や図面の形で整理したのものもあります)がいろいろ行われて来ました。そしてその中で最も単純な形式としては、例えば前項に見たように管出口の流れが蒸気の流量割合が多いものか、または少ないものかによって限界熱流束のメカニズムに大きな差が現れるという事実注目する方法です。管内の気液二相流において、そこを流れる蒸気の質量流量の割合 x (これは1と0の間の値をとります) を一般に「クオリティ」(これは英語の「質」という意味) と言い、気液の流れの割合から見た二相流の「質」を表す量になります。そして蒸気の多い高クオリティの流れでは限界熱流束の値が低く、逆に液体の多い低クオリティの流れでは限界熱流束の値が高くなると言った比較的分かりやすい傾向を手がかりに、あとは言わば手探りにデータの整理を試みるのです。そしてこれらの整理式は確かに実用的に有用なものです。現実問題としては水の限界熱流束データの整理だけに限られ(流体が水以外の物質になると適用できません)、限界熱流束の発生機構を一般的に考えるなどの目的には有用でないと言わざるを得ません。

②「混迷状態」

その上、限界熱流束というものに対する考え方について、歴史的に長い間、次のような状況にあったことを記しておくのも無意味な事ではないでしょう。すなわち5章(「気液相対速度の限界」モデルの項参照)でお話したようにプール沸騰の場合、加熱面から逃げる蒸気と、加熱面に向う液体と間の相対速度の限界が限界熱流束をもたらすという考えが長い間、世界的に広く支配的な力を持

ちました。ところが、この理論モデルは、普通の「プール沸騰」の場合は仮に説明出来ても、それ以外のモードの沸騰への拡張はまったく不可能という非常に奇妙な性格を持つものでした。従って、「プール沸騰」の発生原因をこれに依存して考える限り、「強制流動沸騰」の場合はプール沸騰とはまったく異なる限界熱流束発生メカニズムを考えざるを得なくなる訳です。また事実、そうした発生機構モデルがいくつか提案されても来ませんでした。

しかし、ドライアウト形式の限界熱流束の場合は別として、プール沸騰の場合と同様に加熱面のまわりに多量の液体がある時の「強制流動沸騰」の限界熱流束が、「プール沸騰」のそれと少しの関連も無く、まったく別の機構で発生するというのも、何か納得のいかぬものを強く感じさせます。そしてそんな事情の下に、限界熱流束について論理的に何か閉そく的な、どうしようもない状態がかなり長い間続くことになりました。これは科学の研究の歴史上、興味ある事態の一つと言えるかも知れません。

③「各種流体の限界熱流束」

しかし最近では、その困難を乗り越えた道が一応拓かれ、まずプール沸騰についての新しい視点はすでに5章（「核沸騰層厚さの限界」モデルの項参照）でお話したところです。また加熱管内の限界熱流束の発生機構についても、すぐ前項において話したようなことが次第に明らかにされて来ました。そして、各種の流体および各種の状況下の限界熱流束がかなり統一的な視点から理解出来るようになった訳ですが、それと並ぶ形で、実験データの一般的な整理も進むようになって来ました。ここにはその代表例として、加熱管内の飽和沸騰の限界熱流束について、東京大学で求められた一般的な整理式について触れることにしますが、これは4個の特性領域のものから成り、それらに共通して次の形を取っています。

$$q_c / Gh_{fg} = \text{func}(\rho L \sigma / G^2 L_b, \rho_v / \rho_L, L_b / d)$$

ここに $\text{func}()$ はカッコ内の変数によって値が決まる意味で、つまり限界熱流束 q_c に関係する無次元数 q_c / Gh_{fg} の値が、右辺の3つの無次元数、つまり $\sigma \rho_L / G^2 L_b$ （ウェーバー数と呼ばれる無次元数の逆数）、 ρ_v / ρ_L （気体と液体の密度の比）、および L_b / d （管長と管径の比）の関数として整理され

ています。なおここで G は管内を流れる液体の質量速度、 h_{fg} は蒸発熱、 σ は表面張力、また L_b は流体が飽和温度に達した位置から管出口まで測った長さです。

そしてこの式に含まれる4個の無次元数について特に重要なことは、これらが5章（「水平円柱加熱面上の限界熱流束」の項参照）で述べた比較的基本的な強制流動沸騰時の q_c の整理式に現れた無次元数と同じ形のものであり、また、ここには説明を割愛しますが加熱管内の環状噴霧流の状態変化をコンピューターで解析し、その限界熱流束を求める時に現れる無次元数とも共通性を持っていることです。また最後に、最近ではプール沸騰の限界熱流束の発生メカニズム（5章「核沸騰液層厚さの限界」モデルの項参照）を拡張する形で、加熱管内の強制流動沸騰の限界熱流束の説明も成功していることを付記しておきましょう。

加熱管内の流れに現れる膜沸騰

さて読者の皆さんの中には、これまでの説明から何となく、管内の流れには核沸騰だけしか存在せず、どんなに熱流束を上げて、プール沸騰で見たような膜沸騰の状況は起こり得ないという思いを持たれた人が多いかもしれません。振り返って見ると本章においてこれまで、限界熱流束の発生点以後の後流部分の流れに関し、熱流束が低いときは単相流的な噴霧流になること、また熱流束がもっと高い時は、その部分の流れは管壁の焼損のため実現せず考えても無意味であるという風な感じに話を進めて来ました。

しかしそれは話を解り易くするため故意にすることで、そのため読者の皆さんに誤解を与えたとしたら許して頂かねばなりません。実を言うと、液体ヘリウム、液体水素、液体窒素、液化天然ガスなどきわめて低温の流体の流れなどでは、流体の飽和温度に比べて壁面がかなり高温になっても温度の絶対値自体がとても低いので、限界熱流束が生じてその発生場所から後流の管壁が少しも焼損を起こさず、そのまま耐えられることが少なくありません。従って、こうした例から見ても、膜沸騰の出現の可能性について考えてみる必要は十分にあり得ることになります。

そこでいま改めて、前々項でお話した限界熱流束を、便宜上、次のような2形式に大別してみま

しょう。一つは、蒸気の流量割合の大きな高クオリティの流れ（環状噴霧流）に起こるドライアウト形式の限界熱流束、もう一つは液体が多量に流れる低クオリティの流れに起こる限界熱流束です。そして、これらの限界熱流束より下流部分の管内流れが、それぞれの場合にどのようなになるかを見えます。

まず最初の形式の限界熱流束が生じる場合については、ドライアウト点以降の管内の流れが「噴霧流」の形であることを私たちはすでに知っています。この場合、気流に乗って流れている液滴は、流れの乱れのため管壁面に接近もしますが、管壁が高温のため蒸気膜に隔てられて普通は接触は出来ません。つまり壁面は液体で濡れずに乾いており、このような液滴と管壁の非接触状態は、すでに6章（「ラテン語の論文」の項参照）でお話した加熱面上に液滴を置く時のライデンフロスト現象とよく似たものです。そして、この両状態とも普通の感覚から言って、いわゆる膜沸騰と同一視するのはいささか無理がありましょう。

そこで問題は2番目の形式の限界熱流束の場合ですが、この時、前述のようにもし加熱管が焼損しないとすれば、限界点から下流の管内に低クオリティの流れ、つまり多量の液体の流れが残るわけですが。そして限界点から下流では、高温の乾いた管壁に沿って薄い膜状の蒸気流が出来、そして管内の残りの部分を液体の多い低クオリティの流れが満たして流れる形式になるのです。

しかもこの流れのパターンは、誰でもすぐ気が付くように、7章（「流れのパターン」の項参照）で述べた普通の「環状流」に似ています。ただ管内に占める液流と気流の場所が「環状流」の場合の丁度逆になっているので、この流れを一般的に「逆環状流」と呼んでいます。それはともかく、この場合は膜沸騰の状態にあると言えることとなります。つまり、こうして加熱管内の流れにも膜沸騰が生じ得る訳で、またこの「逆環状流」は、必ずしも低温流体の場合だけに起こるのではなく、次項に含めた項目③の中にも姿を現すこととなります。

リフラディングとクエンチ点

これまで加熱管内の定常的な流れと沸騰を見してきましたが、終りに加熱管内に生じる非定常的な

沸騰状態について少し触れておきましょう。

①「クエンチング」

一般に、高温の物体を液体で急冷することを英語でクエンチングと言います。従って英語では、鍋や刃物の硬さを増す時の「焼き入れ」のことも、また高温物体を液体中に入れるだけでなく、逆に高温の容器や流路内に外から液体を注入して急冷することも、すべて同じくクエンチングと言います。ただ日本では、後者の場合、つまり液体を高温の容器や流路に外から注入しておこなう急冷操作だけを「クエンチング」と言うのが普通です。そして、このクエンチングの場合、液体が流入して行く高温の容器や流路内で当然、非定常的な沸騰が発生することになります。

②「リフラディング」

前述のクエンチングは、高温の容器や流路を主体に考え、その壁面の急冷を指す言葉ですが、こうして急冷のため高温の容器に水を入れるにしても、その注水操作の方に注目して呼ぶ言葉もあります。すなわち、フラディング（冠水）がその一つですが、ただこれは7章（「フラディング現象」の項参照）でお話したフラディング（対向流限界）現象とまぎらわしい言葉なので、両者を混合しないよう特に注意して頂きたいと思います。一方、何かの事故で空だきになった加熱装置（原子炉の炉心など）に水を緊急に注入するような場合は、事故以前に水につかっていたものを再び元に戻して冠水状態にすることになるので、これをリフラディング（再冠水）と言います。そして最近では、前述の単純な注水だけのフラディング（冠水）の場合もこれに含めてしまい、すべてを一括してリフラディング（対向流限界）現象とはっきり区別が出来ますし、無用の混乱を避けるため、本書では以下これに従っておくことにします。

さて、いま簡単のため高温の垂直管の中に水を注入する場合を考えてみましょう。この場合、管内に流入した水はその付近の管壁を冷やしながら管内部の方へ進んで行くわけですが、そこで発生する蒸気は普通、上の方へ流れようとします。従って水が管下端から上向きに入って行くか、あるいは管上端から下向きに入って行くかで管内の流れの状況がまるで変わるので、以下それらを分けて考えることにしましょう。

③「管下端」の方から水が流入する場合」

高温の垂直管に下端から上向きに水を注入する時、水は管壁を冷却しながら上向きに上昇して行きます。そして、この時、注入水の先頭部近くの流れには、条件によって次のように水の流入速度などにより2つの特徴的なタイプが現れます。

第1のタイプは、水の注入速度が低く、かつ管壁が比較的高温でない時に生じるものです。この時は水の注入速度が低いので、管壁上の核沸騰で生じる蒸気（水に比べて通常、体積が非常に大きくなります）が管の中心部の方に集って高速の中心気流を形成し、それが管壁上にある水膜流を上方に引上げて行く形になります。つまり、注入水の先頭部付近の流れは、あたかも「環状噴霧流」のような形になる訳です。

また第2のタイプは、水の注入速度が高く、かつ管壁がかなり高温の場合に現れます。この時は水の注入速度が高いので、管内を満たして速く進む水流が、高温の管壁との間に薄い蒸気膜をはさんで流れる形になります。従って、このときの注入水の先頭部付近の流れは、あたかも前項の終わりの方で述べた「逆環状流」に似た状況になります。なお、この管壁に沿う薄い蒸気膜流の少し上流側の場所には当然、水が管壁を直接濡らし沸騰を起こしながら追隨して流れて行く部分を伴っていることになります。

④「管上端の方から水が流入する場合」

前述の③の場合とは逆に、高温の垂直管の上の方から下向きに水を注入する時は、管内で発生する蒸気は一般に管中心部を上の方に抜けようとするので、流れの状況はあたかも7章の終わりの方でお話した「逆に流れる気液二相流」のような傾向のものになります。ただ現在は非定常な流れであり、管壁に沿って下向きに流れて来る水膜流の先頭部が、高温の管壁に触れて沸騰を生じ、そこで激しく発生する蒸気が水膜流の先頭部付近を管壁から剥がし、かつ管内に飛散させるような現象（これをスパッタリングと言います）が起こりま

す。

⑤「クエンチ点」

前述のようなリフラディングの場合、水の流れが上向き、下向きいずれであろうと、乾いた高温の管壁を濡らしながら進んで行く水の先頭部分では、そこで壁温の非常に急激な低下を生じさせるので、技術上、特に重要な意味を持っています。そこでその位置を「クエンチ点」、あるいは「リウエット（再び濡らすの意味）点」と呼びます。ここで、クエンチ点はそれまで高温だった壁面温度が急降下することに注目した言葉であり、他方、リウエット点は水が高温壁を濡らし始めることに注目した言葉です。なおリウエットとは、リフラディングと同じく、前には濡れていた面が乾いて高温になった所へ冷却のため水を注入して、もう一度濡らすという感覚から来た言葉であります。

なお前に6章（「液体との復縁のいとぐち」の項参照）で、加熱面と液体の復縁、つまり高温のために液体と絶縁していた加熱面が、温度の低下と共に再び液体と接触を始める現象の話をしました。そしていま問題にしているクエンチ点は、6章の場合とはかなり気液の状況が違うので、それとまったく同一に考えるのは危険ですが、それでも本質的には共通の現象であると言えます。少しオーバーな言い方かも知れませんが、200年以上も前にライデンフロストが高温のスプーンに水滴を置いて観察した現象が、いまなおこのクエンチ点で生き生き活躍している訳で、こんな事柄を見るにつけ科学的な人間の理性的精神の生命の長さを強く感じさせられます。

（次号に続く）