

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05845

研究課題名(和文) 高温高熱容量狭隘流路における沸騰流動ダイナミクス

研究課題名(英文) Boiling Flow Dynamics in High-Temperature Large-Heat Capacity Tubes

研究代表者

小澤 守 (Ozawa, Mamoru)

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：60112009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：強制注水ならびに重力注水条件下で高温に過熱された伝熱管の冷却実験を行った。冷却初期には逆環状流で膜沸騰状態に有り、熱伝達率はかなり低いが、温度低下と共に遷移沸騰、核沸騰に移行するに従って10倍以上の熱伝達率に達した。冷却特性は集中定数系近似が可能であり、冷却時間も含めて精度よく表現できる定式化ができた。さらに並列管についても実験を行い、2本の管の間で脈動が発生することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The forced-feed and gravity-feed re-flooding experiments of a laboratory scale were conducted with a single and a parallel channel system, and phenomenological analysis was conducted. Boiling curves were estimated based on a rather simplified model, while sufficient for discussing dynamics during the quench. The estimated representative heat transfer coefficients in film and nucleate boiling process were nearly the same level of the conventional data presented in so-far published literatures. The cooling process of superheated high-temperature tubes is controlled mainly by the heat capacities of wall and water and the injected amount of water, and the formulated lumped-parameter model well represented the wall-temperature history during the re-flooding. In addition, in a parallel-channel system, flow oscillation between tubes, being so-called density wave oscillation, was observed. This oscillation deteriorates the cooling capability in film and transition boiling region.

研究分野：熱工学

キーワード：重力注水 リフラディング 膜沸騰 クエンチ 逆環状流 遷移沸騰 集中定数系 並列管

### 1. 研究開始当初の背景

原子炉等の安全研究の代表としての高温チャンネルにおけるリフラディングに関する研究は欧米のみならずわが国においても1969年代から1980年代にかけて盛んに行われ、米国 TMI 原発事故以降、受動的安全炉の概念から1980年代には重力注水 (Gravity-Feed Re-Flooding) に関する研究が行われた。確かに重力による注水ではポンプ駆動などの動力源が不要で、原子炉安全系として、ある一定の役割を果たすのは間違いない。しかし本当にそれによって急速冷却が可能なのか、内部流動にまで立ち入って急冷時の沸騰二相流挙動と冷却特性の関係は十分明らかになっていったのか、疑問をもっていた。様々な角度からの文献などを調査した結果、特に原子力分野においては二相流の高度化されたモデリングやそれらを用いた詳細な数値シミュレーションは行われているが、実現象を短時間で、しかも全体として把握するためのツールや方法論については全くといっていいほど検討されていなかった。

### 2. 研究の目的

高温に過熱した管に下部から冷却水を供給してリフラディング実験を行い、冷却過程の可視化、壁温変化を測定する。管の肉厚を種々変更し、管の熱容量の影響を調べると共に、現象の支配因子を同定する。冷却水の注入にはポンプによる強制注入と重力による注水の2種類について実験を行い、冷却過程に及ぼす影響を明らかにする。さらに過熱管を並列2本とし、冷却中の熱流動ダイナミクスを明らかにする。

### 3. 研究の方法

実験は SUS304 管を用いた冷却実験と石英ガラス管を用いた可視化実験に大別されるが、圧力、初期温度、供給水量などの実験条件はほぼ同じである。図1に実験装置の概要を示す。

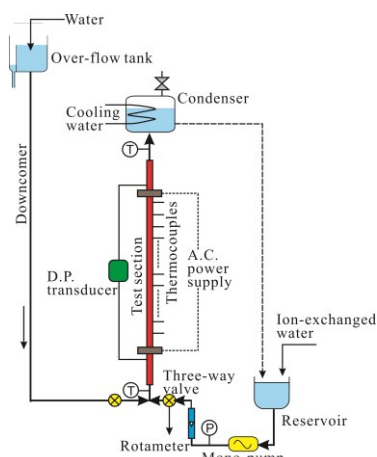


図1 実験装置の概要

実験装置の基本構成は、SUS304 管試験部、ポンプ、流量計、汽水分離タンク、水タンク、およびオーバーフロータンクと降水管であ

る。オーバーフロータンクと降水管は重力注水用であり、流量は若干精度が落ちるが、出口で受止め法にて求めた。管の過熱には水を供給しない状態で、管外壁温度が 600°Cあるいは 800°Cまで通電加熱によって昇温し、また過熱管を石英ガラスにする場合には、分割式電気炉によって上記の所定温度まで過熱したのち、いずれの場合にも下部のバルブを急開放して水を管内に導入した。SUS304 管の内径はいずれも 10mm とし、外径は 12, 14, 16, 18mm, 過熱長さは 600mm, 入口流速は 0.1~2m/s である。またガラス管の場合には内径 10mm, 外径 12mm とした。

### 4. 研究成果

まず可視化実験での結果を温度記録と共に示す。

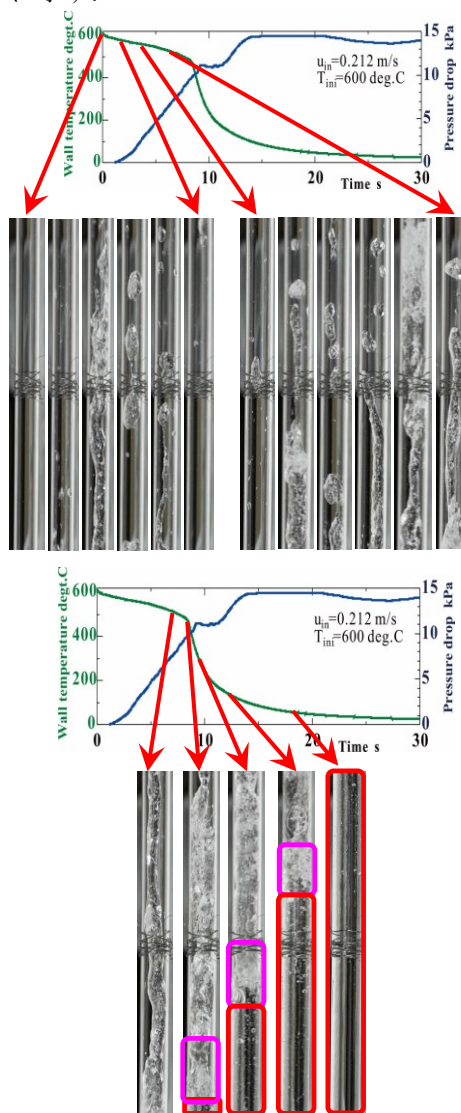


図2 リフラディング過程 (紫枠: クエンチフロント, 赤枠: 核沸騰部分, 初期温度 600°C)

図2に実験結果の一例を示しておく。管壁温は冷却水投入直後には比較的緩やかに下降し、ここに示した例では8秒あたりから冷却の速度が大きくなり、12~13秒あたりからは再び緩やかに低下していく。このような傾向は測定位置によらず同様である。可視化写

真との対応を見れば、初期の過程ではまず比較的大きな液滴が出現し、ついで周囲を蒸気で覆われ中心部に液柱状の塊が存在する逆環状流が出現する。この状態は伝熱的には膜沸騰状態にある。蒸気膜は徐々に薄くなり、図2の場合には9秒あたりで蒸気膜が破断したり再形成されたりする状態、すなわち蒸気膜が破断すると液膜が一時的に管壁にクエンチし、また逆に乾くといった過程を繰り返す。これが遷移沸騰の特徴である。その後は核沸騰状態に移行し、速やかに冷却が行われる。

以上のような冷却曲線から沸騰曲線を求めたものを図3に例示しておく。膜沸騰から遷移沸騰、核沸騰へと変化して行く様子が明確に見て取れる。

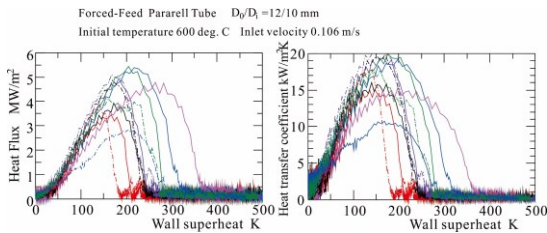


図3 沸騰曲線と熱伝達率

さて、過熱管の各場所での温度応答を示しておく。

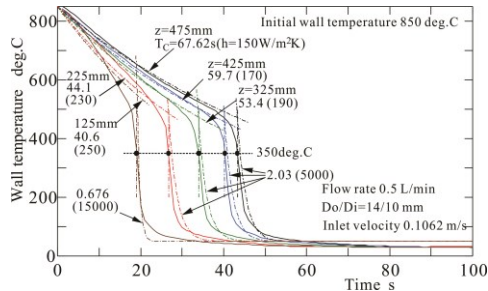


図4 管外壁温度の変化

管の下部から125mm, 225mmと100mmごとに管外壁に設置した熱電対記録の一例である。ボトムリフラディングであるから下部から順次温度が低下していく。いまビオ数が小さいとして(管外径12mm, 14mmが該当)集中定数系モデルを当てはめれば、各場所の温度応答は

$$\frac{T_W - T_L}{T_{W0} - T_L} = \exp\left(-\frac{hS}{c_W \rho_W V_W} t\right) = \exp\left(-\frac{t}{T_C}\right) \quad (1)$$

で与えられる。ここで $T_W$ は管外壁温度、 $T_{W0}$ は初期温度、 $T_L$ は液体温度、 $c_W$ 、 $\rho_W$ 、 $V_W$ は管の比熱、密度、体積、 $h$ は熱伝達率、 $S$ は冷却水に接する伝熱面積、 $t$ は時間である。また時定数は管内径外径を $D_i$ 、 $D_o$ として次式で与えられる。

$$T_C = \frac{c_W \rho_W V_W}{hS} = \frac{c_W \rho_W}{h} \frac{D_o^2 - D_i^2}{4D_i} \quad (2)$$

膜沸騰、核沸騰に対して、それぞれ一定の熱

伝達率を与えることによって、図4に示すように、実験結果をかなりうまく表現できる。場所ごとに40~67秒の間で時定数が異なるが、これは本モデルに管内流動が組み込まれていないためであり、その意味でまだ予測モデルとしては問題があるが、おおよその見当をつけるには十分なモデルである。なお図4においてはクエンチ温度すなわち膜沸騰終了温度を350℃として計算している。

さて、全体を通じて連続関数で表すには、膜沸騰から核沸騰熱伝達への変化を、シグモイド関数を用いて近似することによって可能となる。具体的には、

$$x = \frac{T_W - T_Q}{\Delta T_W}, \quad h = h_N + \frac{h_F - h_N}{1 + \exp(ax)} \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{T_C} \left( x + \frac{T_Q - T_L}{\Delta T_W} \right) \quad (4)$$

ここで $T_Q$ はクエンチ温度、 $h_N$ 、 $h_F$ は核沸騰熱伝達率、膜沸騰熱伝達率、 $a$ はパラメータである。図5にその結果を示しておこう。

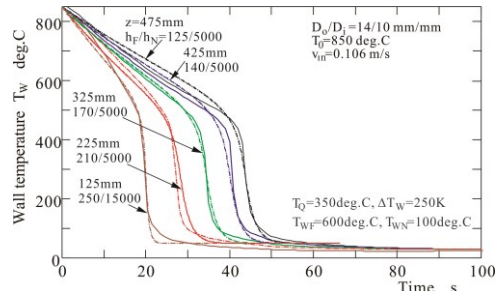


図5 シグモイド関数を用いた集中定数系モデル

各温度応答の時間ずれから、クエンチフロントの伝播速度が求められる。

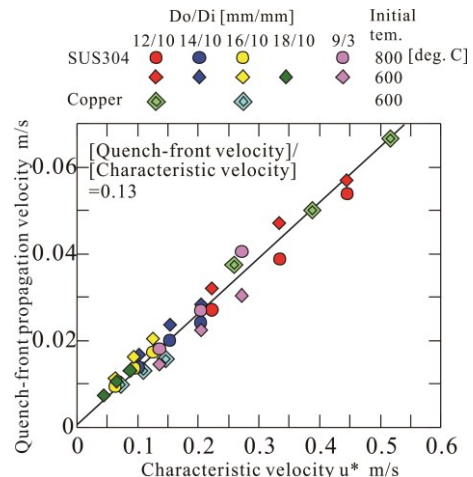


図6 クエンチフロントの伝播速度

図6に示すように、クエンチフロントの伝播速度は管の熱容量を考慮した特性時間を用

$$u_Q = 0.13u \frac{c\rho}{c_W \rho_W} \left( \frac{D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} \right) \quad (5)$$

いてかなりうまく整理できる。ここで $u$ 、 $c$ 、 $\rho$



は入口流速，水の比熱，水の密度である。  
次に重力注水の場合についてみておく。

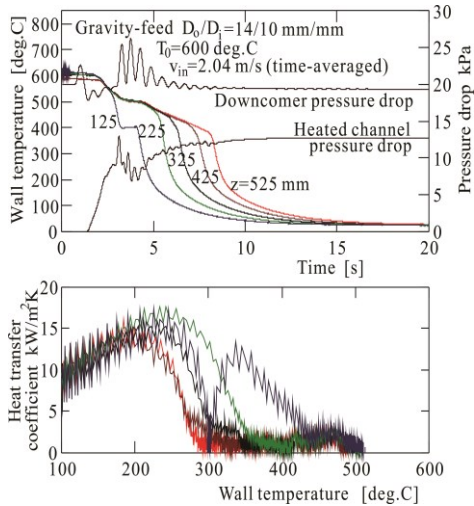


図 7 重力注水時の温度応答と熱伝達率の変化

重力注水の場合には，過熱管と降水管の重力項の違いによって駆動されるため，入口流速が過熱管内のボイド率に応じて変化する．そのため差圧信号に変動が認められる．その変動に応じて温度低下が一時的に停滞する傾向が見て取れる．このような挙動のモデル化には例えば図 8 のダイナミクスモデルが考えられる．

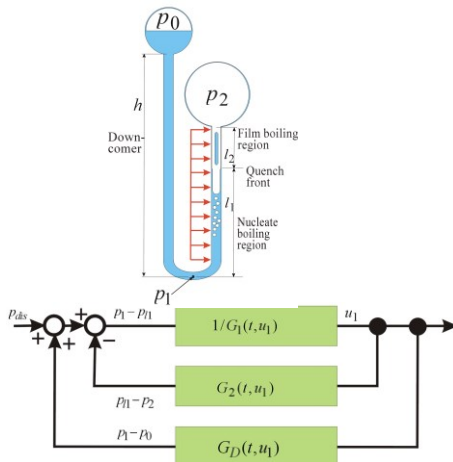


図 8 重力注水時のダイナミクス

ここで，各ブロックは上から核沸騰部のダイナミクス，膜沸騰・遷移沸騰部のダイナミクス，そして降水管との動的干渉を表し．全体としてフィードバック系として表現することが可能であろう．

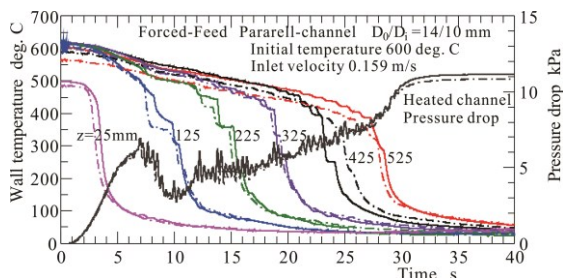


図 9 並列管の冷却特性  
過熱管が並列であれば，ヘッダ間で交互に流量分配が変化する流量脈動が発生しうる．さらにまた図 8 のブロック線図からも推定されるように，降水管との干渉による脈動も発生しうる [1, 2]．本研究では比較的短い過熱管を用いたため，それほど顕著ではないが，図 9 に示すように，壁温変動に逆位相の変動が認められた．この変動は並列管間で発生した密度波振動と考えられる．この振動も先の図 8 のようなブロック線図を用いて考えるとかなり分かりやすくなる．  
最後に，ここで対象とした問題では，どのくらい短時間で冷却できるかが重要である．そこでまず入口流速と冷却開始からクエンチに至るまでの時間，すなわちクエンチ時間をプロットした結果を図 10 に示す．

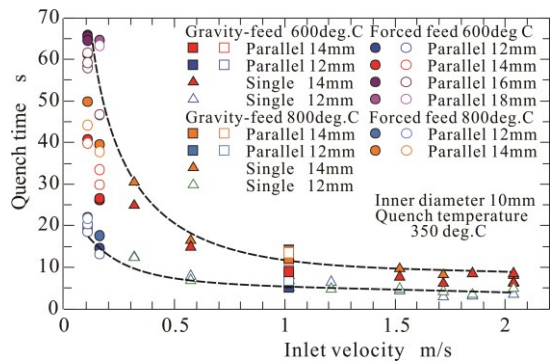


図 10 クエンチ時間と流速の関係

流速が遅い場合には条件ごとに大きくばらついているが，流速が大きい場合には，クエンチ時間そのものはかなり短くなり，またばらつきも相対的に小さい．これらデータを先に示した時定数を用いてプロットすると図 11 に示すように，全体がかなりうまく取りまとめられる．

以上，述べたように，リフラディング時の温度の動的挙動すなわち冷却特性把握には管の熱容量に準拠した時定数が非常に重要であることが明らかとなった．

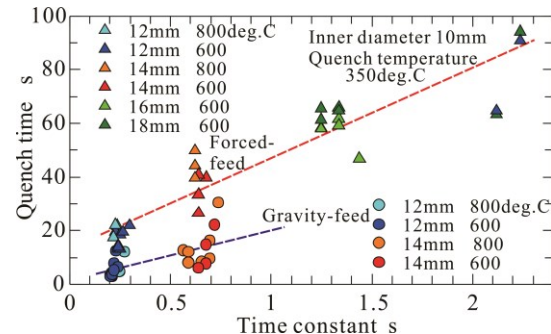


図 11 クエンチ時間と管の熱容量に基づく時定数の関係

<参考文献>

[1] F. J. Erbacher and K. Wiehr, Reflood Heat Transfer in Tight Lattice PWR Fuel Rod Bundles in a LOCA, Proc. 2nd Int. Symp. On Heat Transf., Beijing (1988).

[2] H. Umekawa, M. Ozawa and N. Ishida, Quenching Phenomena in Natural Circulation Loop, Proc. 7th Int. Meeting Nuclear Reactor, Thermal-Hydraulics (NURETH-7), Vol. 1 (1995), pp. 487-496.

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

[1] Mamoru Ozawa, Takeaki Yoshimi and Atsushi Okawara, Re-Flooding in Single- and Parallel-Channel Systems at High Temperature, 10<sup>th</sup> International Conference on Boiling and Condensation, Nagasaki, Paper No. 2202 (2018).

[2] Takeaki Yoshimi, Atsushi Okawara, Mamoru Ozawa, Re-Flooding of High-Temperature Tube and Simplified Modeling of Cooling Process, Proc. of the 4th International Forum on Heat Transfer, IFHT2016, Sendai, Paper No. IFHT2016 -1914 (2016).

〔図書〕(計1件)

[1] Mamoru Ozawa, Gravity-Feed Re-Flooding: A Fundamental Feature of the Cooling Process of High-Temperature Tube Wall and Scaling Parameter, in Y. Koizumi, M. Shoji, M. Monde, Y. Takata and N. Nagai eds, Boiling - Research and Advances, Elsevier, Amsterdam (2017), 801 (759-777).

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小澤 守 (OZAWA, Mamoru)

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：60112009