

ポストドライアウト熱伝達に関する今後の研究動向の調査

—Trends in the Research on Post-Dryout Heat Transfer—

西尾 茂文*

Shigefumi NISHIO

1. はじめに

三好研究助成金の援助により、昭和 59 年 4 月 1 日より 8 日の日程で、米国ソルトレーク市で開催された The 1st International Workshop on Fundamental Aspects of Post-Dryout Heat Transfer に出席し研究状況の総括を行うとともに、同分野で最近勢力的に研究を展開している UCLA を見学し、今後の研究動向の調査を行った。

2. Post-CHF Heat Transfer とは

今回の調査のテーマである Post-Dryout Heat Transfer (Post-CHF Heat Transfer と呼ぶべきであると思うが、上記会議名はこうなっている) という言葉は耳なれないと思われるので、まずこの現象について説明する。いま、加熱された円管内に液体を流し、液体を蒸気に変換するシステムを考える。これは、ボイラ、蒸気発生器、原子炉などにおける熱伝達過程の基本系である。このシステムにおいて円管加熱量を増大していくと、ある加熱量で円管出口の伝熱面温度の急上昇が発生する。これを、CHF (Critical Heat Flux) 状態と呼ぶ。CHF の発生機構は未だに解明されていないが、現象的には、液体が完全に蒸気に変換される以前に伝熱面表面が乾き状態となるために発生する。さらに円管加熱量を増大していくと、伝熱面の乾き状態が円管上流側へ伝播してゆき、円管下流部の一定長さが乾き状態の熱伝達に支配された高温状態にさらされるようになる。このように乾き状態が発生する CHF 点以降の熱伝達を Post-CHF Heat Transfer と呼ぶ。

CHF の発生様式には、以下の二つがある。第一は、十分な量の未蒸発液体が管内を流動しているにもかかわらず、熱的な原因により、未蒸発液体と伝熱面との間に蒸気膜が形成され (Inverted Annular Flow) 伝熱面が乾き状態となる場合であり、DNB (Departure from Nucleate Boiling) とも呼ばれる。DNB が発生すると、Post-CHF Heat Transfer は、Inverted Annular Flow, Inverted Slug Flow, Transition Flow, Dispersed Flow

(蒸気流中に液体が液滴の形で存在する熱的非平衡状態) を経て、蒸気単相流熱伝達へ遷移する。DNB の場合は、一般に伝熱面温度の急上昇量が大きく、時として伝熱面の溶融など物理的崩壊に至るので、この条件は沸騰をともなう熱機器の熱交換限界値を与えることになる。第二は、液体の欠乏によるもので、Dryout と呼ばれている。円管に過大な熱量が投入されずとも、流路が長い場合は流路下流になるにつれ、Dispersed Annular Flow が形成され、この液膜の消耗による Dryout が発生することにより伝熱面が乾き状態となる。この場合は、蒸気流中に液体が液滴の形で存在し非平衡状態となり熱伝達解析が複雑となる。

3. Post-CHF Heat Transfer が問題となる具体例

通常の熱機器では、CHF 条件以下で運転されるので、Post-CHF Heat Transfer が問題となるケースは少ない。しかし、軽水炉の実用化とともにこの問題は注目されるようになった。軽水炉での代表例は、反応度事故や冷却水喪失事故などの想定事故および Operational

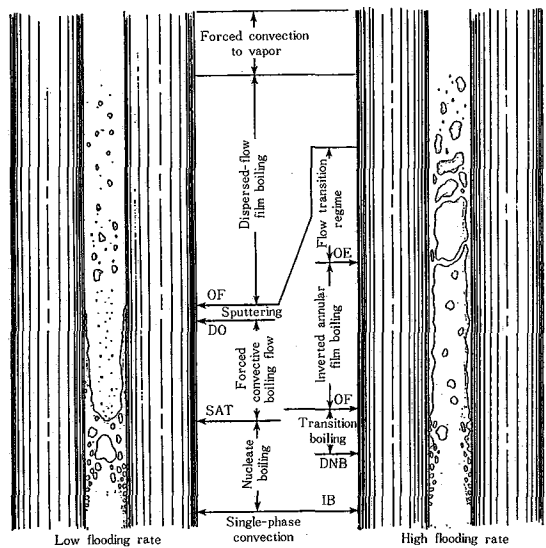


図 1 Reflooding における熱伝達様式 (G. Yadigaroglu, Nucl. Safety, 19-1 (1978), 20)

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

Transientsなどの過度解析である。たとえば、冷却水喪失事故(Loss of Coolant Accident)では、Blowdown Phase, Refill Phaseに続き Reflood Phaseが想定される。この Reflood Phaseにおける熱伝達様式を図1に示した。Reflood Rateが高い場合は上記の DNB型, 低い場合は Dryout型の熱伝達が始まる。いずれにしても、Reflood Phaseでは高温となった燃料被覆管は緊急冷却水により、Post-CHF Heat Transfer, Rewet, CHFを経て、燃料被覆管の温度が再上昇しない十分高い熱伝達状況まで冷却される。Post-CHF Heat Transferは、このように、軽水炉のさまざまな炉心健全性解析において重要課題であることは言うまでもない。しかしこの現象が基本的に膜沸騰熱伝達、極小熱流束点条件および遷移沸騰熱伝達と関係していることを考え、対象を管内流から外部沸騰流、プール沸騰にまで拡張すると、広義の Post-CHF Heat Transferの問題は、鋼材などの制御冷却解析、蒸気爆発発生条件解析および超電導マグネットの安定性解析などにおいて極めて重要な課題であるといえる。こうした状況認識に基づき、筆者の研究室では、膜沸騰熱伝達、Post-CHF Heat Transfer, リウエット、極小熱流束点条件などを総合的に解明し、新たな冷却システムを開発すべく研究を行っている。今回の調査は、こうした研究の流れの一環である。

4. The 1st International Workshop on Fundamental Aspects of Post-Dryout Heat Transfer

上記の会議では、Post-Dryout (CHF) Heat Transfer研究の現状総括と今後の問題について整理・討議を行った。出席者は59名(USA 34名, イギリス8名, 西ドイツ5名, カナダ4名, フランス, スイス, 日本各2名, イタリア, スウェーデン各1名)で、(1)Computer Code Modeling and Flow Phenomena, (2)Quenching Phenomena, (3)Low-Void Heat Transfer, (4)Dispersed Flow Heat Transfer, (5)Effects of Grids and Blockageの、五つの sessionが開かれた。会議の内容は、U. S. Nuclear Regulatory Commissionの report (NUREG/CP-0060)として公表されている。

会議では、上記(1)~(5)について、以下の問題が検討された。すなわち、(1)Flow Regimes, Drop Size, Drop Formation and Behaviour, Interfacial Area, Interfacial Drag, Computer Modeling, (2)Nature of

Rewetting, Maximum Wetting Temperature, Leidenfrost Phenomena, Heat Transfer in the Vicinity of Quench Front, (3)Inverted Annular-Flow Heat Transfer, Inverted Slug-Flow Heat Transfer, Thermal Non-Equilibrium, Computer Modeling, (4)Drop Interfacial Heat Transfer, Vapor Convection, Correlation and Models, (5)Interaction with Continuous-Phase Fluid, Interaction with Dispersed-Phase Fluid, Downstream Effects, Computer Modeling. 筆者は特に(2)(3)のテーマに興味を持つが、この会議の中で、筆者が展開してきた研究を傍証するいくつかの貴重なデータが公表されたのは興味が深かった。また、Post-CHF領域における熱伝達に対する伝熱表面のぬれ性を実験的に検討した Birmingham大学の報告、上記テーマにおける各種相関式・コードを相互比較した LANLの報告、Dispersed Flow Heat Transferに関する AEREの Hewittの総括は示唆に富んだものであった。

この会議では特別な結論は出さなかったが、私なりにまとめると、以下の問題が今後の重要な課題となる。(1)流動状態、蒸気流中の非平衡液滴の諸量の評価(特に Inverted Annular Flow から Dispersed Flow への遷移過程)、(2)Inverted Annular Flowあるいは強制対流膜沸騰の熱伝達、(3)リウエット温度あるいは極小熱流束点条件の評価・モデリング、(4)強制対流下での遷移沸騰熱伝達のモデリング。また、本会議の後に見学した、UCLAの Dhir教授の研究室では、これらの問題について基礎研究が行われており、本分野における基礎研究の重要性を再確認した。また、デブリ(Debris)冷却の研究に研究室の半数の人員を投入しており、今後我が国でも研究が盛んとなると思われる。

5. おわりに

すでに述べたように、Post-CHF Heat Transferの問題は、軽水炉の炉心健全評価のみでなく、制御冷却、超電導マグネットの安定性などに対象が拡がりつつある。現象の統一的把握と新たな冷却システムの開発のために、今後、こうした異なる分野の研究者相互の交流が盛んとなることを期待する。こうした意味で、今回の調査に対し助成を得られたことに感謝する次第である。

(三好研究助成報告書 1985年4月10日受理)