



研究ノテ

気液二相流体中の圧力波伝播と 原子炉事故

宮崎慶次

筆者が上記の課題に強い関心を抱いたのは、原子炉の工学的安全上の重要性のほかに、波動伝播、臨界流、衝撃波等の物理的興味にひかれたからである。軽水炉の設計基準事故（あらかじめ想定し、保守的仮定による解析評価に従って、設計上安全側に考慮しておくべき事故）の一つとして1次冷却系の管破断が挙げられ、冷却材喪失事故（LOCA: Loss of Coolant Accident）と呼ばれている。その際の冷却材の最大流出速度が臨界流によって決まる。臨界流とは、上流の亜音速から下流の超音速に移るような流れでは、下流の媒質の流速が圧力変化の伝播上より速いので、圧力の影響が上流に伝わらず、流れが遷音領域の特性で規定される現象である。すなわち、媒質の流速が圧力伝播速度に等しくなることで流量が決まる。单相流ならば教科書に載っている話ではあるが、二相流となるといささかややこしい問題である。

液体の大きな慣性と気体の小さな体積弾性率が結合される結果、等体積比の空気と水の一様混合体中の波動伝播速度は、圧力が1 barで20 m/sec程度、100 barでも200 m/sec余となり、気体の350 m/sec、液体の1440 m/secより著しく低下する。そこで、1) 気液間の速度のずれ、すなわち、スリップと、2) 一成分二相流における相変化、すなわち、蒸発または凝縮過程が起こると複雑となる。筆者達が、衝撃波管の簡単な装置で行った実験結果の要約は次の通りである。

窒素-水二相流体

- 1) 気液間のスリップが起こると液体の慣性効果が殺減され、一様等速流の理論速度より伝播速度が増す（理論と実験両面から）。
- 2) スリップが加圧波の衝撃波生成を緩和す

*宮崎慶次 (Keiji MIYAZAKI) 大阪大学工学部、
原子力工学、助手、工博、原子炉工学

る。

- 3) 圧力波は位相速度で、また、実効密度（ポイド）変動は群速度で伝わる。

蒸気-水二相流体

- 4) 加圧波の速度は、波頭での相変化が凍結されて、空気-水系と類似の伝播機構を示す。
- 5) 加圧波後方で完全凝縮した液柱の水撃作用により高い衝撃圧（理論と一致）を発生する。（初期ポイド率が15%、1.5 barから2.5 barへの階段状加圧で60 barを越すパルスを観測）
- 6) 減圧波は、波頭での相変化が速いため、減衰が大きく、ほとんど伝わらない。
- 7) 圧縮水を階段状に減圧すると、一旦、飽和圧力以下に減圧後、沸騰により飽和圧力まで回復する。この回復過程の時定数、すなわち、熱力学的非平衡の緩和時間はほとんど飽和圧力にのみ依存する。

（以上の詳細は原子力学会欧文誌の一連の論文参照）しかし、これらの伝播機構に関する考察も、どの程度実用に供しているかとなると、研究がもう一步不十分な点もあり、安全研究における即物的な実証性要求との間に距離がある。実際の安全解析（例えば計算コードLELAP-4）では、Moodyの式に係数（もちろん、実験に基づいて定める）をかけて流出量を評価している。この式のモデルは層状分離流であるため、気液間の結合がほとんど失われ、気液相対速度比、臨界流量を過大評価することになる。モデルの非現実性がうまく保守主義（Conservatism）と組み合わせられて有名となっている例で、安全解析上は稀な例でなく一種の必要悪的な要素といえよう。しかし、最近では、正確な実験の解析と安全余裕度の評価に対する必要上、TRAC-1コードのごとく、最適評価を目的としたモデルの作成に目が向けられているの

は歓迎される。そのためには、気液間の相互作用項を相対速度で正しく記述するような努力が払われるべきである。日本人で二相流研究の専門家として米国（現在 ANL）でご活躍の石井護氏と機会あって知己を得、その重要性を確認し合った。

従来の大規模な実験で相当量のデータは蓄積されているが、気液各相の流速、ボイド率等の測定が非常に困難なこともあって、流れの機構はブラックボックスのまま、安全確認上、当面必要な量の測定で済ませるきらいがなきにしもあらずの感がする。米国では、Zuber, Tong といった二相流の専門家が原子力規制委員会 (NRC) の技術顧問となって以来、まず、測定技術の開発、充実を進め、実証試験と基礎研究の統合を図るという試みが、やっと、結実を始める頃だときている。

一方、二相臨界流の物理的な解釈については東大の甲藤好郎教授の優れた考察がある。しかし、気体と液体の流速が異なる場合の媒質の速度の定義、圧力波伝播速度との関連性等、未だ明確になっていない。圧力波伝播の研究者としてはぜひとも知りたい点なのだが……。

阪大・石谷清幹教授や神大・赤川浩爾教授らのご努力で、今夏日本で開催予定の「二相流ダイナミクスに関する日米セミナー」が楽しみである。

筆者は、ここ数年来、別の研究課題である原子炉、特に液体金属冷却型高速増殖炉の仮想事故としての炉心破壊事故の問題を扱っている。炉心破壊過程を想定するシナリオは複雑で、確立されていない。兎に角、現象が激しいものになるか否かは、熔融燃料と冷却材の液々直接々触による熱的相互作用（蒸気爆発）の如何によると考えられている。現在までの実験では、熱力学的上限値に比べて、桁違いに低い値しか起こっていない。蒸気爆発の機構について英国の Board & Hall の衝撃波伝播によるデトネーション説と Fauske & Henry の自発的な蒸気核生成による温度しきい説の間で論争が続いている。筆者は相互作用時の圧力発生・伝播、エネルギー変換等の研究に取り組んでいる。幸い、Fauske と Henry に招かれて、今年初めまで

の1年9カ月間、米国シカゴ郊外の Argonne National Laboratory で研究と原子炉安全性の知識習得の機会を得た。

本稿も当初は、仮想事故と蒸気爆発について書く心積りであった。締切前、折しも Three Mile Island の原発事故が起き、ご紹介するはずの China Syndrome の話がいかに現実味を帯びて喧伝されるに及んで、米国での研究題目で蒸気爆発云々と書いたがために「日本に帰って核爆発の研究を行う積りか」と誤解の詰問を連邦調査官から受けたことを思い浮かべた。そのような訳で、新しい研究ノートは今しばらく手許にとどめ、いささかカビのついた方の研究ノートと差し替えた次第である。

米国での原子力安全性研究の印象を記す。

- 1) 人口が日本の2倍の割には安全性の研究者人口が非常に多く、多重層をなしている。
- 2) 時として、同一研究者が機構解明のための小規模な基礎研究と同時に大規模実証実験を合わせて担当している。
- 3) 原子力規制委員会 (NRC) が独自の研究スタッフや予算をもち、強力な権限をもつ。
- 4) 部分的には、日本の安全性研究の成果が高い評価を受けている。
- 5) 技術、情報の流れに対し閉鎖的となる傾向を強めている。

今度の米国の原発事故は日本にも大きな心理的衝撃を与えたが、推進側に対して、安全性、信頼性の高い原子炉は高価であっても、結局は経済性に優れているという教訓を再認識させたはずである。核アレルギーと稠密人口による酷しい立地条件を克服できるような世界一安全性と信頼度の高い原子力発電システムを目指す戦略に転ずる契機とせねばなるまい。筆者は、円高で一段と高価になった日本製自動車や電気製品が、低故障率と品質の良さのゆえ、米国市場を席捲する態を目のあたりに接した。原子力は総合技術を要し、軍事政治経済戦略が絡むだけに国際協力なしの自主開発は不可能である。しかし、こと安全性に関する研究開発の積極的推進に対しては、外国から干渉される筋合いもなく、原子力発電に対する不安や疑念を除く近道ではあるまいか。