

Title	二相流計算の物理モデルに関する一考察
Author(s)	標, 宣男
Citation	聖学院大学論叢, 5(2): 89-96
URL	http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/repos/modules/xoonips/detail.php?item_id=726
Rights	

聖学院学術情報発信システム : SERVE

SEigakuin Repository for academic archiVE

二相流計算の物理モデルに関する一考察

標 宣 男

A Study of Physical Models for Two-phase Flow Analysis

Nobuo SHIMEGI

Two different models were discussed to study the influence on analysis of two-phase flow dynamics. These models are the two-fluid model and the homogeneous model. The former is based on the unequal velocity and thermal nonequilibrium model, and the latter is based on the hypothesis of equal velocity and thermal equilibrium between two phases. For this study, the turbine-trip test performed using the Peach-Bottom Boiling Water Reactor (BWR), was numerically analysed by two different types of computer program which consist of the above-mentioned physical models, respectively. The calculated results show that the unequal velocity effect is more important in this type of BWR transient analysis than the thermal non-equilibrium effect.

1. 緒 論

気相と液相からなる二相流の挙動を記述する方程式には、(i)両相間の相対速度を異なった運動の式により考慮しかつ両相間の熱的非平衡を考慮した非平衡非均質の二流体モデル、(ii)両相間の非平衡性は考慮するが⁽¹⁾、相対速度について、より少ない相の運動を平均流れに対する相関式で表わすドリフトフラックスモデル⁽²⁾、(iii)さらに両相間には速度の差は無くかつ両相間の熱的平衡を仮定した平衡均質流モデル⁽³⁾等がある。これらの方程式系は場合に応じ使い分けられるべきものであるが、両相間の相対速度の大きさや、熱的非平衡性の程度が前もって判らない場合が多く方程式系の選択には困難がつかまとう。沸騰水型の原子炉 (Boiling Water Reactor: 以下 BWR と記す) の場合、特に通常運転時の炉心内流動では、2 相間に相対速度は存在するが、熱的には平衡状態にあると考えられる。しかし、過渡事象においては、この熱的平衡性からずれ非平衡状態を示すかどうか、もし非平衡であってもどの程度の非平衡状態になるのか明瞭に示した例は必ずしも無い。

Key word; Two-phase Flow, Physical Model, Unequilibrium, Two-fluid Model, Homogeneous Model, Transient Phase, Numerical Analysis

本論文は、水-蒸気の気液2相流を数值的に計算するコンピュータプログラムを用い、非平衡非均質の2流体モデル（以下非平衡非均質モデルという）による計算と平衡均質を仮定したモデルによる（以下平衡均質モデルという）による計算を比較し、過渡状態におけるその相異を検討する。特に、計算の対象として、Peach Bottom 炉の turbine-trip 実験⁽⁴⁾をとりあげ、上記2つのモデルによるこの実験の解析を通じ、事故とはいえない過渡事象における流速に関する非均質の程度および熱的非平衡の程度を検討する。

以下、第2章において、2相流計算の物理モデルと Peach Bottom における turbine-trip 実験の概要を述べ、第3章に計算結果とその検討、第4章では結論を述べる。

2. 物理モデルと実験の概要

2.1 2相流計算の物理モデル

2相流挙動を非平衡非均質の2流体モデルにより計算する場合の方程式として、通常用いられるのは、以下に示すような気、液両相各々に対する質量保存の式、運動量保存の式およびエネルギー保存の式である。

質量保存の式

$$\frac{\partial \alpha_K \rho_K}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_K \rho_K V_K) = \dot{m}_K \quad (K = l, g) \quad (2.1)$$

運動量の式

$$\frac{\partial \alpha_K \rho_K V_K}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_K \rho_K V_K^2)}{\partial x} + \alpha_K \nabla P_K = -F_{WK} - F_{JK} - F_{gK} \quad (K = l, g) \quad (2.2)$$

エネルギーの式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_K \alpha_K e_K) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_K e_K V_K) = & -P_{Ki} \left(\frac{\partial \alpha_K}{\partial t} + V_K \frac{\partial \alpha_K}{\partial x} \right) \\ & - P_K \alpha_K \frac{\partial V_K}{\partial x} + \dot{m}_K \left\{ e_K + \frac{P_K}{\rho_K} + \frac{1}{2} (V_K - V_{Ki})^2 \right\} \\ & + q_{Kw} + q_{K} \quad (K = l, g) \quad (2.3) \end{aligned}$$

ただし α_K : 体積率

ρ_K : 密度

V_K : 流速

\dot{m}_K : 気液界面における質量輸送量

e_K : 内部エネルギー

P_K : 圧力

P_{Ki} : 気液界面圧力

V_{Ki} : 気液界面速度

F_{wK}, F_{JK}, F_{gK} : 壁面摩擦項, 相間の摩擦項および, 重力項

添字 K : 気相 (g) および液相 (l) を示す

i : 界面を示す。

以上の式は, F_{wK}, F_{JK}, F_{gK} に対する相関式, m_K に対する相関式および, 状態の式を与えることにより完結するがここではその内容を省略する。これについては例えば参考文献(5)を参照されたい。

上記2流体モデルに対し, 均質流モデルにおいては, $V_g = V_l = V_{iK}$ とし, 状態の式は, 熱的平衡の式を用いる (参考文献(3))。

以上の式をコンピューターで解く場合の数値解法としては, 半陰解法を用いるのが2相流の方程式に対しては普通である。この方法はスタッガードメッシュを用い, 時間微分をオイラー法により, 対流項を1次の風上差分により離散化した後, 圧力項のみを陰に, 他を陽に解く方法である。時間ステップ中 Δt は $\Delta t \leq \frac{\Delta x_{min}}{V_{max}}$ (Δx_{min} : 最小空間分割巾, V_{max} : 最大流速) により制限されるが, 非線型の効果を少なくしているために収束計算の時間が短く結果として計算時間が短くなることがある。特に流速 V_{max} があまり大きくならない場合には Δt を大きくすることが可能である。又対流項に一次風上差分を用ると通常精度の面で問題を生ずるが, 2相流計算においては, F_{wJ}, F_{JK} 等を与える相関式の精度があまり良くなく, 現在のところ安定性の面で有利である一次風上差分を用いても十分意味がある。

2.2 Peach Bottom turbine-trip 実験の概要

表記の実験は, 定格出力1098MWeのBWR, Peach Bottom 2号炉において1977年原子炉安全性の為のデータ収集を目的で行われたものである。その詳細は参考文献(4)に記載されているが, 概要は, 次のようなものである。

Peach Bottom 2号炉の概念図を図1に示す。実験は, 出力を変え3回行われたが, その際の出力は, 定格の47.4%, 61.6%, 69.1%であり, それぞれTT1, TT2, TT3と名付けられている。ここではこの内の最初と2番目の実験であるTT1, TT2, を取上げ, 解析の対象とする。実験は時刻0秒において, タービン止弁 (turbine stop valve) (図1) を閉鎖することにより開始する。この急激な弁の閉鎖は圧力波の発生を引起こし, それが, 主蒸気管 (steam line) を伝わり, 蒸気ドーム (steam dome) に達し, 炉心 (core) を加圧する。その為炉心内に存在する蒸気がつぶれ, 正の反応度の挿入により出力は上昇するが, 原子炉停止系 (scram system) が働き, それにより出力は急激に下がる。又タービン止弁閉後, まもなくタービンバイパス弁 (turbine bypass valve) が開き炉心からの蒸気はその方向に流れるので一度上昇した炉心圧力も緩やかに低下し実験は終了

二相流計算の物理モデルに関する一考察

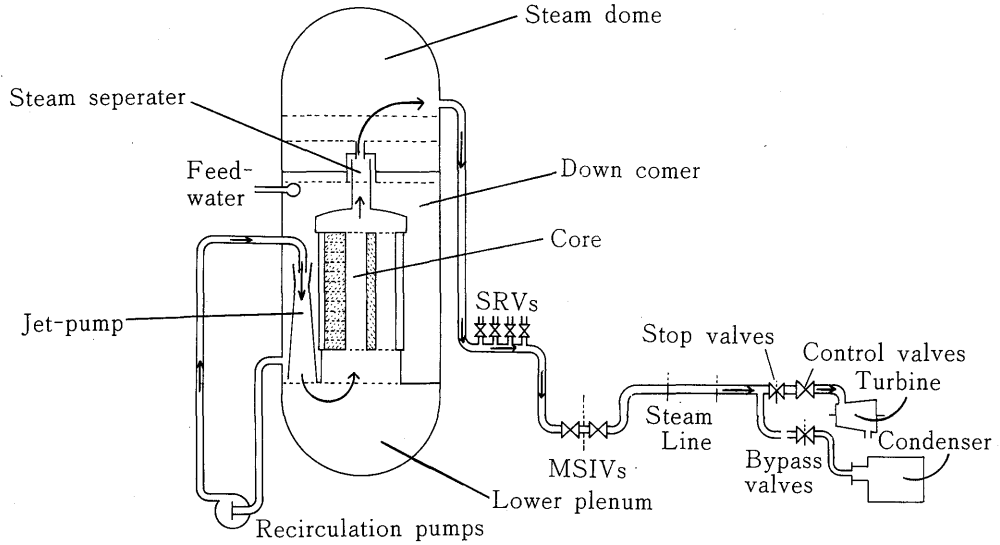


図1 Peach Bottom 炉の概念図
(→は通常運転時の流れ)

に向う。以上の実験において特徴的な点は、炉心にある蒸気量の相異により、炉に加えられる反応度が異なり、出力上昇の大きさに相異を生ずる点である。すなわち、もし、計算モデルが異なると、炉心内に存在する蒸気の計算量が異なることになり、それは出力の計算値の相異として明瞭にあらわれることになる。それ故、次章の計算ではこの出力上昇の大きさに注目し、両モデルの差、および、この種の過渡解析へのモデルの適応性を検討することにする。

TT1, TT2 に対する初期条件を表1に又、10秒間の生起事象を表2に示す。データの詳細は参考文献(4)にゆずる。

表1 初期条件

Test	Power (Mwt)	Core Flow (Lb/sec)	Feed Water Flow (Lb/sec)	Enthalpy of Flow from Separator to Down Comer (Btu/Lb)	APRM Scram Setting % Rated Power
TT1	1,562	28,140	1,583	541	85
TT2	2,030	23,030	2,174	539	95

表2 主な生起事象

Test	Recirculation Pump	Feed-water Pump	Steam Bypass Valves
TT1	Speed Reduction Initiated at approx.3sec	1 of 2 tripped at 7 sec	Valves started opening at 0.33 sec
TT2	Remained on-line	2 of 2 tripped at 8 sec	Valves started opening at 0.08 sec

3. 実験の解析とその検討

前章で述べた2種類の物理モデルにより、表1の初期条件のもと実験解析を行った。ただし、炉心の出力の計算には次に示す1点近似動特性モデルを用いた。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (3.1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i C_i \quad (i = 1 \sim 6) \quad (3.2)$$

ここで $n \equiv n(t)$ は炉出力であり、初期値を1に規格化してある (normalized power)。 C_i 、 β_i はそれぞれ i 種の遅発中性子先行核の濃度と割合、 λ_i はその崩壊定数である。又 l は即発中性子寿命を示す。又 ρ は反応度であり、本解析では炉心の蒸気泡 (ボイドという) のつぶれにより生ずるボイド反応度と実験の途中で働く原子炉停止系によるスクラム反応度の和としてあらわされる。

図2は、炉心内の蒸気体積率 (ボイド率, void fraction) を時間 $t = 0$ 秒と10秒において示したものである。図2-(1)および図2-(2)に示したように、非平衡非均質モデルを用いた場合には、初期における炉心ボイド率は平衡モデルを用いた場合より小さい。これは、気相の慣性が小さいため、非均質モデルにおいては炉心より気相の抜け出し方が多いためである。均質モデルでは気相の慣性も液相の慣性に支配され炉心からの気相の抜け出しが遅くなる。また、TT1と、TT2の蒸気量を比べると後者が多い。これは表1に示したように炉出力の初期値が後者の方が大きいためである。

タービン止弁を閉鎖し、その結果発生する圧力波は、主蒸気ラインを伝わる。図3-(1)および図3-(2)はTT1、TT2両実験各々のタービン入口 (turbine inlet) 圧力、主蒸気管 (steam line) 圧力、蒸気ドーム (steam dome) 圧力の時間変化を両モデルの結果と実測値の比較において示したものである。圧力波は伝播するにつれ、その時間変動はにぶくなるが、平均的圧力が徐々に上昇していくのが判る。この蒸気ドームからタービンまでの流体は単相の蒸気であり両モデルによる計算値の間に大きな差が無い。このことは、両モデルによる炉内温度の計算値に大きな差が無いことを示している。すなわち、熱的にみると、両計算において炉内は熱的平衡に近い状態を維持しており、蒸気ドームは飽和蒸気として計算されていると思われる。なおこれら圧力変動は実測値にも近いことから実際の炉心状態もこの過渡変化の間平衡に近い状態にあったと推定される。

図4-(1)および図4-(2)はTT1およびTT2における炉出力 (normalized power) の時間変化を示したものである。この図より次の2点が指摘される。まずTT1よりTT2の出力ピークの方が小さい。次にTT2の方が非平衡非均質モデルと均質平衡モデルの差がTT1より大きい。この2点の相異は図2-(1)および図2-(2)に示した炉心内の初期ボイド量の差に原因がある。まず第1の点に関し、単純に考えた場合、TT2は初期出力が高くボイドの量も多く圧力上昇に伴うボイド

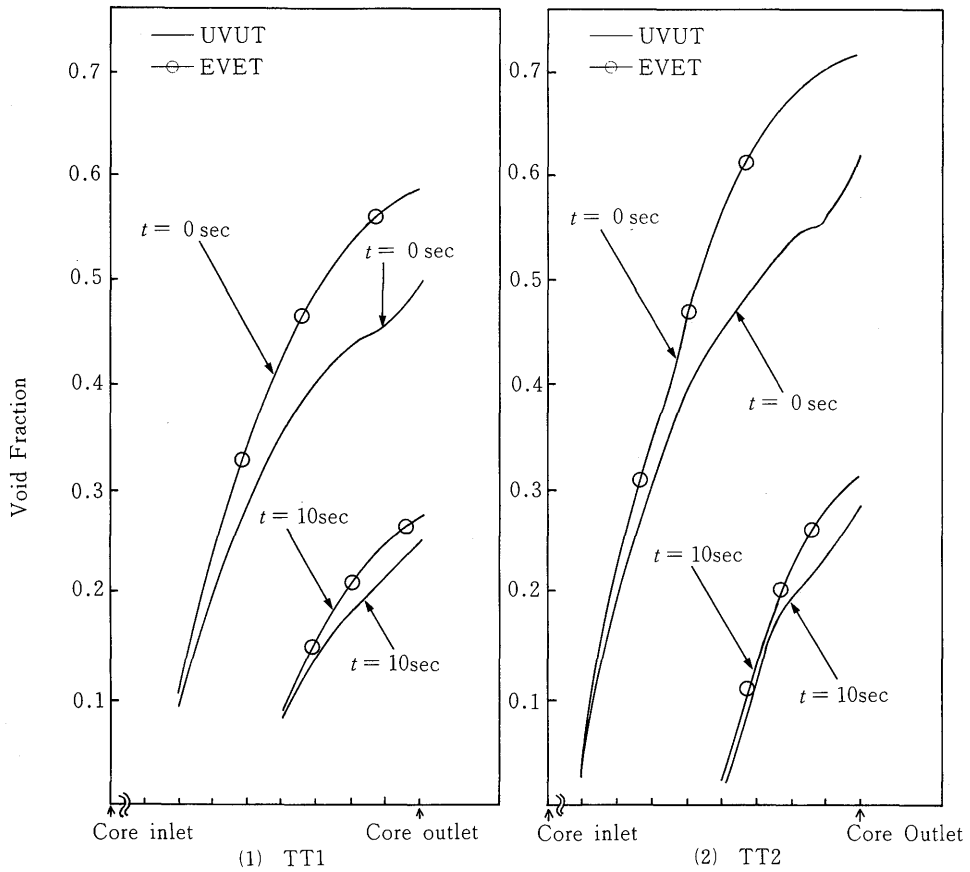


図2 炉心内蒸気体積率 (void fraction) 分布

(UVUT: 非平衡非均質モデル)
(EVET: 平衡均質モデル)

の崩壊とそれによるボイド反応度の引加量も多くなるはずであり、出力の上昇率も大きくなると考えられる。しかし実際にはその逆である。これは、第1に炉心の圧力上昇の大きさがボイドを十分多量につぶすほど大きくはないことを考慮しなければならない。次に圧力の変動の炉心内での伝播速度は2相状態下の音速であり、これはこの程度のボイド量では量が多いTT2の方が遅く、従ってボイドのつぶれ方は緩やかとなり、結果として引加される反応度がTT1より小さくなると解釈される。

次にTT2において非平衡非均質モデルによる計算と平衡均質モデルによる計算の差がTT1より大きい点についてその理由を考察する。TT2においては図2に示したようにTT1より初期ボイド量が多い。初期のボイド量が多いことは過渡状態において非均質と均質という物理モデルの差が出やすいことを示している。より詳しくいうと、出力が高くボイド量が多いTT2では、ボイド量を多く計算する均質モデルの方が炉心への圧力伝播の影響をうけにくいためである。これは、次

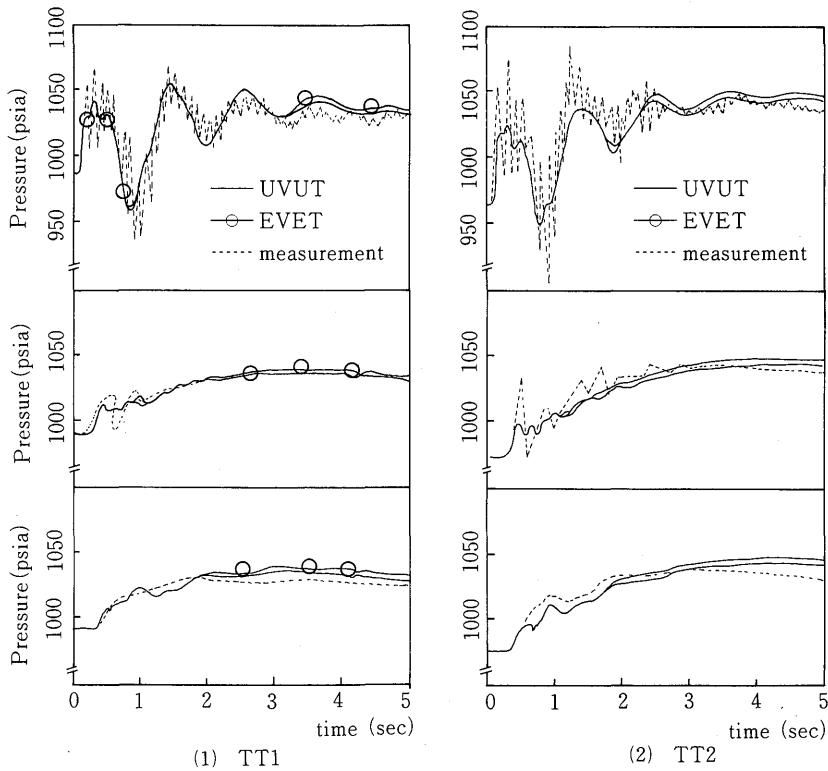


図3 圧力の時間変化の比較

(UVUT: 非平衡非均質モデル)
(EVET: 平衡均質モデル)

の2つの効果が合わさったものと考えられる。すなわち、均質モデルではボイド量が多い故に圧力変動が伝わりにくいこと。第2は、同じ大きさの圧力変動が炉心に達した場合でも、非均質モデルの蒸気の動きの方が敏感に反応する。この点を言い換えるなら、前にも述べたように均質モデルにより計算される蒸気の運動は液相部の慣性に支配され、動きがにぶいことを意味する。これらがTT2において非平衡非均質モデルより平衡均質モデルの方が出力ピークが小さい理由である。

4. 結論

2相流の挙動を計算するための2種類の物理モデルについて、BWRの過渡事象を計算対象にして検討した。BWRの場合、定常状態では、熱的平衡に達していると考えられる。この状態は非平衡非均質および平衡均質の両モデルのいずれによっても正しく計算されるが、均質モデルと非均質モデルとでは炉心内のボイドの量(蒸気量)に差を生じ、後者の方が少なく計算される。過渡状態

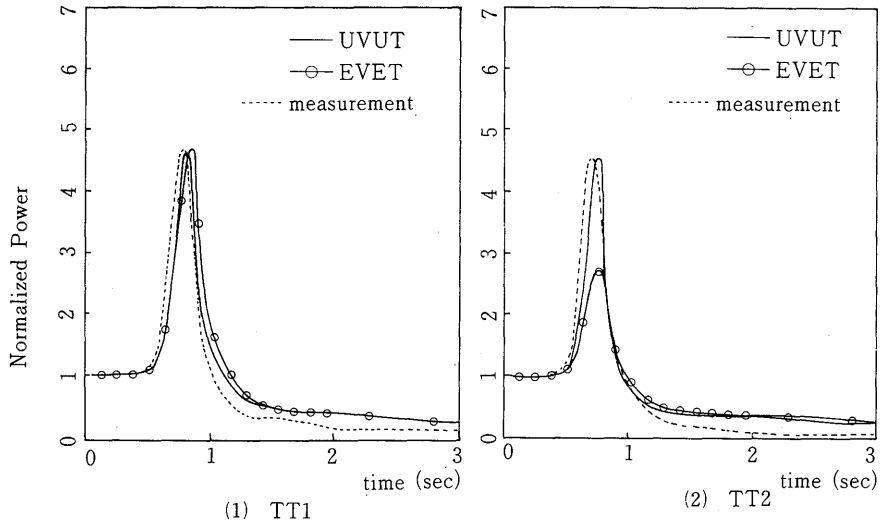


図4 炉出力の時間変化の比較
 (UVUT: 非平衡非均質モデル)
 (EVET: 平衡均質モデル)

においても、熱的平衡からのずれは小さいと考えられ、エネルギー計算モデルの差のもつ重要性は小さいが、均質か非均質かという運動量計算モデルによる計算結果の差は無視できない。

それ故、結果として、非平衡非均質の両方の効果が顕著になる大破断事故のような場合を除き反応度による出力変化を伴うBWRの過渡事象の計算においては、非平衡性より非均質性の方がより重要な役割をはたすことが結論され、特にそれはボイド量の計算を通じ炉出力変化の差として明瞭に表われる。

参考文献

- (1) V.H. Ranson et al. "RELAP 5/MOD 1 Code manual volume 1" NUREG/CR-1826, EG&G-2070 (1982)
- (2) M.J. Burwell et al. "DRUFAN-01/MOD 2 volume III: Model Description" GRS-A-846 (1983)
- (3) S.R. Fischer et al. "RELAP 4/MOD 6" CDAP-TR-003 EG&G 1 DAHO Inc., (1978)
- (4) L.A. Carmichael and R.O. Niemi "Transient and Stability Test at Peach Bottom Atomic Power Station Unit2 at End of Cycle 2", EPRI NP-546 (1978)
- (5) 熱流動数値解析特別専門委員会編「原子炉における数値解析の現状」日本原子力学会 (1986)