

THERMAL HYDRAULICS

熱流動部会ニューズレター（第 84 号）

AESJ-THD

NEWSLETTER (No.84)

Apr. 9th 2014

研究室紹介

早稲田大学理工学術院 共同原子力専攻
師岡研究室 師岡慎一

1. まえがき

本研究室は、原子炉熱流動に関する研究を行っています。

自己紹介をしますと、早稲田大学機械工学専攻博士課程を卒業し、東芝原子力の研究所に 30 年近く在籍し、2010 年 4 月に早稲田大学にもどり本研究室を立ち上げました。専門は、原子炉熱流動で、30 数年もメーカーの研究所にいましたので、軽水炉の伝熱流動研究はほとんどやりました。本研究室を立ち上げて 1 年目に福島原発事故が発生して、学生の就職そして新入生動向が気になりましたが、就職も好調で、本研究室に多数の優秀な希望者がおり、一安心をしています。本専攻は学部がないのですが、学部の 4 年生が、原子力をやりたいということで、本研究室に所属し卒業研究をやっています。



Fig.1 Member of our laboratory

2014 年 3 月に 3 回目の卒業生がでます。就職先は、原子力関係のメーカー、電力、石油、海運などエネルギー関係へ就職しています。Fig.1 が、本研究室のメンバ

の写真です。合計 13 名（社会人 Dr1、修士 2 年 4、修士 1 年 4、学部 4 年生 4 名）です。本研究室の特徴は、原子力施設見学、実習そしてインターンシップを多数行なっていることです。ほとんどの学生が修士 1 年の夏に 1 ヶ月のインターンシップを行なっています。マニラの大学そして海運会社の海外インターンシップへ行った強者もいます。本研究室の学生は 8 割くらいが学部では物理関係の理学を修め、卒論で初めて工学関係を学んでいます。理学の真理を追求するという姿勢と、工学の俯瞰的な力を持った倫理観を備わった学生が育っています。毎週ゼミでは、全員が 1 週間の成果を説明しています。ゼミでは、学生からプレゼンの方法、研究成果に対する厳しいコメントもあり、学会よりも緊張するというのが学生からの感想です。その成果かどうかわかりませんが、日本機械学会若手優秀講演フェロー賞など計 7 回の受賞を得ています [1,2]。定期的に研究室の懇親会を開催しておりまして、昨年は、ボーリング、高尾山登山、夏のバーベキュー、勝浦 세미나ハウスでの夏合宿、パークゴルフ、冬合宿を行いました。

本研究室の自慢は、学生が元気で仲がいいということです。4 月からは、女性を含む卒論生 6 名が入ってくる予定です。

2. 研究テーマ

研究テーマは、大きく分けて原子炉の性能を向上する研究と苛酷事故を含む安全に関する研究です。

①原子炉の性能を向上する研究

- ・ 垂直円管内強制対流サブクール沸騰における CHF 発生機構の解析
- ・ 数値解析と二相流相似則を用いた稠密燃料集合体の圧力損失予測に関する研究

- ・直接混合式給水加熱による ABWR 熱効率向上に関する研究
- ・単一ロッドを円管に挿入した体系における限界出力の予測に関する研究

② 苛酷事故を含む安全に関する研究

- ・二相流における自然循環流量予測手法の構築
- ・ナノ流体による限界熱流束増大効果の実験的研究
- ・ループ型ヒートパイプを用いた使用済み燃料プール冷却に関する実験的研究
- ・ポストドライアウト領域における熱伝達特性の解析
- ・流路閉塞がある場合の二相流自然循環流量の予測に関する実験的研究

以下に今年の修論そして卒論の主要なものについて紹介します。

2.1 垂直円管内強制対流サブクール沸騰における CHF 発生機構の解析[3,4]

PWR において燃料集合体の CHF (限界熱流束) を正しく評価することは、安全性および経済性の観点から非常に重要です。現在の PWR の新燃料開発では、新燃料を開発する毎にモックアップ試験 (実規模試験体再現試験) を行い CHF の評価をしています。CHF を解析のみにより正しく評価することが出来れば、大幅な開発期間とコストの削減につながります。そこでまずは単純な体系である垂直円管内強制対流サブクール沸騰における CHF 発生機構を検討し、正しく CHF を予測できる手法を構築するというのが本研究の目的です。本解析手法は CHF 発生機構として蒸気ブランケット機構および均質核生成機構の2つの機構を考慮した現象論的解析手法であり、先行研究では報告されていない、現象論的予測モデルによる軸方向非一様加熱条件の CHF および CHF 発生位置の予測手法を構築できました。本解析手法は、Fig.2 に示すように予測精度 $\pm 30\%$ の範囲で CHF を予測可能であり、CHF 予測精度 (予測値 \div 試験値) の平均は 0.923、標準偏差は 0.223 です。CHF 発生位置は Fig.3 に示すように予測精度 $\pm 20\%$ の範囲で予測可能です。以上のように本解析手法は、既存の設計式に応用されている経験的相関式と同等以上の予測精度を有しています。この成果を論文に投稿しています。(修士2年 山田充)

2.2 二相流における自然循環流量予測手法の構築 [5-7]

福島原発事故を契機に自然循環を利用した過酷事故時の熔融炉心が無電源で冷却するシステム (PCCS = Passive Corium Cooling System) が検討されるなど、無電源で大きな流れを生み出す二相流の自然循環が注目を集めています。このような自然循環を用いた

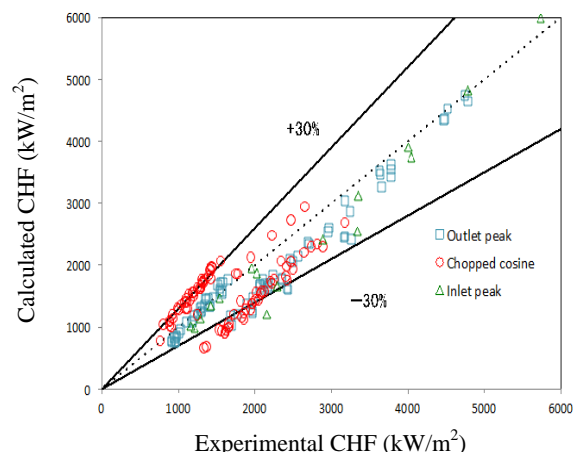


Fig.2 Comparisons with CHF

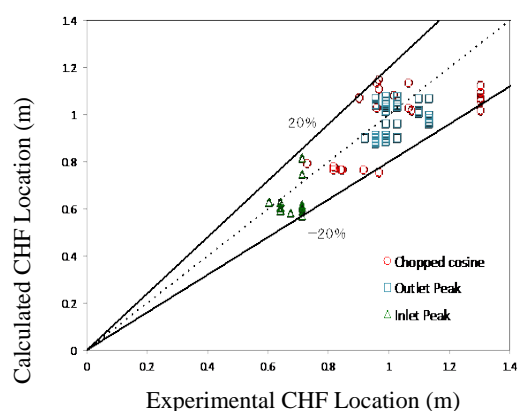


Fig.3 Comparisons with CHF location

システムの除熱量は自然循環流量に依存するため、自然循環流量を正確に予測することは安全設計上極めて重要です。本研究の目的は二相流での自然循環流量を予測する手法を構築することであり、本研究では実験と解析の両面からアプローチしてきました。

自然循環流量を測定した試験は少ないうえに、自然循環流量を予測するために必要な駆動力と圧力損失までを測定している試験はほとんどありません。また、自然循環流量を測定していたとしても、自然循環流量予測に必要な試験装置の詳細な寸法までの記載がほとんどなされておらず、自然循環流量の評価手法の妥当性を検証できる自然循環流量データが公開されていないのが現状でした。そのため、Fig.4 のような空気・水系自然循環試験装置を製作し、自然循環流量・駆動力・圧力損失を検証できるデータをまず取得しました。その検証データと予測手法による計算値を比較することで、本予測手法の妥当性と課題を示しました。次に、本予測手法の実機への適用のため、広範囲の圧力、さらに蒸気・水系での適用性を検証する必要があります。二相流自然循環流量の予測への影響が大きいパラメータはボイド率と二相増倍係数であり、広範囲

の圧力で自然循環を用いて測定されたボイド率データと二相増倍係数データとの比較から相関式の検討を行いました。ここで、明らかになったことはボイド率・二相増倍係数の相関式は高压領域の評価を目的として作成されたものが多く、低压領域(0.1MPa-1.0MPa)の試験データを良好に予測できるモデルは少ないということです。その中で、Tomの実験結果を整理した世古口の実験式[8]は低压領域のサブクール沸騰を考慮したボイド率を精度よく予測でき、二相増倍係数においては中里見らによって提案された実験式[9]が低压領域において精度良い予測が可能であることを示しました。世古口の実験式、中里見の実験式を用いて作成した予測手法を用いて、BARCによって行われた広範囲の圧力での自然循環流量測定試験データ[10]との比較を行うと、Fig.5に示すように低压領域から高压領域まで良好に自然循環流量を予測することができることを示すことができました。この成果を論文に投稿しています。(修士2年 金川慎一郎)

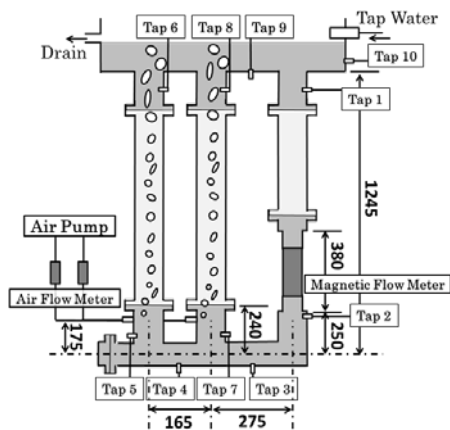


Fig.4 Schematic of natural circulation loop

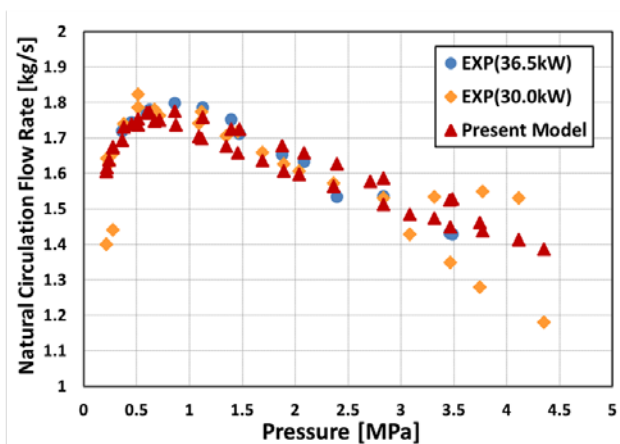


Fig.5 Comparison with measured natural circulation flow rate

2.3 ポストドライアウト領域における熱伝達特性の解析[11,12]

原子炉のポンプトリップや配管破断等の過渡事象時には、燃料棒表面においてドライアウトが発生する可能性があります。ポストドライアウト領域では、伝熱面での熱伝達率が著しく低下するため、伝熱面温度が高くなり燃料損傷に至ることが想定されます。したがって、ポストドライアウト領域における熱伝達特性を明らかにすることは、原子炉の安全上重要な課題です。

ポストドライアウト領域では、Fig.6に示すように伝熱面、蒸気、液滴の間で熱伝達と輻射による熱の収支が発生します。これらの熱のやり取りを見積もることにより、伝熱面の温度を予測することができます。本研究では、蒸気の過熱や液滴径分布も考慮して伝熱面温度の予測を行い、BWR 運転条件を想定した条件における実験結果と比較しました。伝熱面温度の予測に当たり、最も感度の大きいパラメータは、伝熱面から蒸気への熱伝達率 h_{wg} です。また、従来モデルによる伝熱面温度予測値と実験データの差を参照したところ、計算による h_{wg} が小さくなるような条件、すなわち低流量ほど予測精度が低下することが分かりま

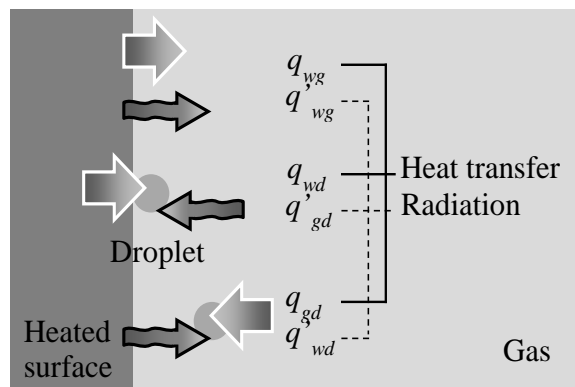


Fig.6 Heat transfer process

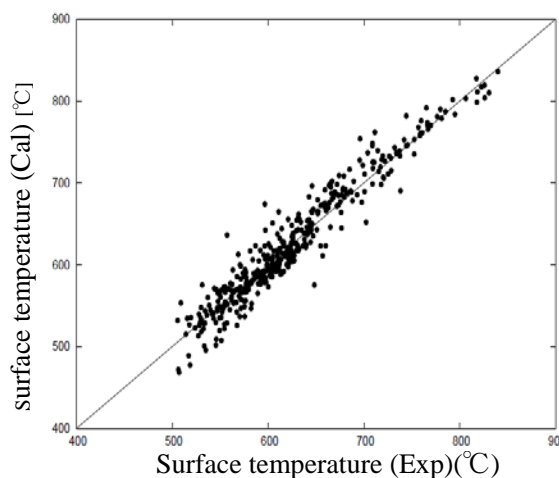


Fig.7 Prediction accuracy of surface temperature

した。そこで、従来よりも低流量で熱伝達率が向上するようモデルを変更した結果、Fig.7 に示すように伝熱面温度を 5%以内の誤差で予測する手法を構築することができました。（修士1年 山田創平）

2.4 数値解析と二相流相似則を用いた稠密燃料集合体の圧力損失予測に関する研究 [13,14]

この研究では沸騰水型原子炉(BWR)燃料集合体の圧力損失を解析的に予測することを目指しています。現在、燃料集合体の圧力損失は形状が複雑であることから実規模試験にて求められています。形状が複雑になる要因としては燃料棒間隔を維持するために取り付けられているスペーサ等にあります。実規模試験には多大な経費と時間がかかっているのが現状であることから、この研究では試験を実施することなく燃料集合体の形状から圧力損失の予測を解析的に行おうといったテーマとなります。

解析手法として CFD（数値流体力学）と二相流相似則を用います。この CFD 解析を用いることで燃料集合体の形状に依存するパラメータである单相流の摩擦損失係数、スペーサ損失係数を算出します。また二相流相似則とは、单相流と二相流とを繋ぐための相似則であり、单相流における圧力損失に二相増倍係数を乗ずることで二相流における圧力損失を評価しました。この研究で解析を行った試験体の断面図を Fig.8 に示します。左から順に 7,14,37 本ロッド稠密燃料集合体となります。37 本ロッド稠密燃料集合体についてはロッド間距離が 1.0mm,1.3mm の試験体について取り扱いました。 Fig.9 は各燃料集合体の圧力損失の予測精度を示しています。グラフに示してある通り±10%程度の予測精度で燃料集合体の二相流における圧力損失を予測しました。この研究の目的である試験を実施することなく燃料集合体の形状のみから圧力損失を予測することが可能となりました。（学部4年 多田宏次郎）

2.5 ループ型ヒートパイプを用いた使用済み燃料プール冷却に関する実験的研究[15,16]

福島第1原子力発電所事故では、全交流電源が喪失し使用済み燃料プールの使用済み貯蔵燃料が損傷する危険性がありました。そこで、崩壊熱をループ型ヒートパイプ熱交換器により電源を用いることなく冷却する自然空冷機構の研究開発を行っています。 Fig.10 が開発した熱交換器です。使用済み燃料の崩壊熱(約 2MW)を空冷で除熱可能です。空気冷却装置は約 10m の煙突をつけて自然循環を利用して除熱しています。（修士2年 高柳）

3. あとがき

本研究室で行っている主な研究を紹介させていただきました。学生には、ルールを守る良識のある社会



Fig.8 Test Bundle for verification

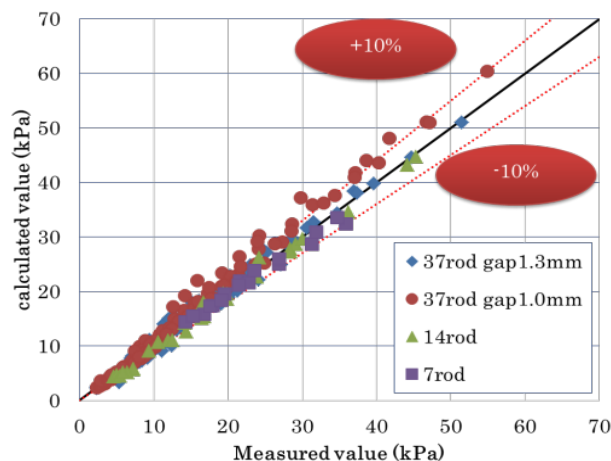


Fig.9 Verification results

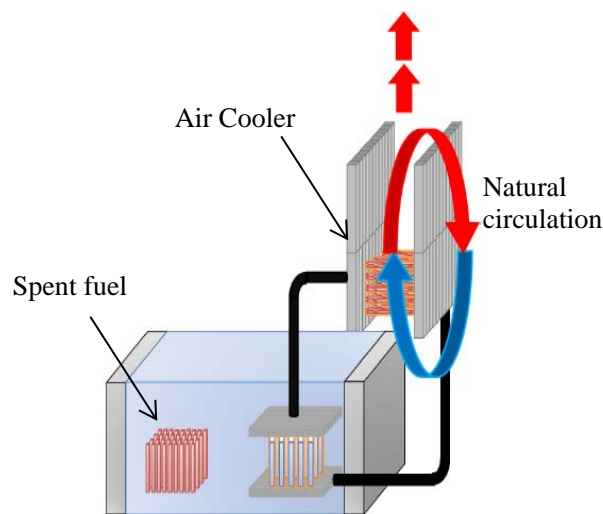


Fig.10 Loop heat pipe for cooling spent fuels

人になることが重要であることを教育しています。元気のある学生が沢山いますので、ぜひ遊びに来てください。時間がありましたら、研究室のホームページをご覧ください。

HP アドレス：<http://www.f.waseda.jp/morooka/>

参考文献

- [1] 原子力学会 関東甲越支部ホームページ
<http://www.aesj.or.jp/shibu/kanto/index.html>
- [2] 早稲田大学 先進理工学研究科 共同原子力専攻師岡研究室ホームページ
<http://www.f.waseda.jp/morooka/soheiward.html>

- [3] 山田充, 師岡, サブクール沸騰における CHF 発生機構の解析, 日本機械学会 熱工学コンファレンス, B121 (2013).
- [4] 山田充, 師岡, サブクール沸騰における CHF 発生機構の解析:DNB 熱流束予測手法の構築と評価, 日本原子力学会 春の年会, M24 (2014).
- [5] 金川, 師岡, 二相流における自然循環流量予測手法の構築, 日本機械学会 熱工学コンファレンス, B122 (2013).
- [6] 金川, 師岡, 自然循環による熔融炉心冷却性能評価手法の構築, 日本機械学会 第 17 回動力・エネルギー技術シンポジウム, B202 (2012).
- [7] 金川, 師岡, 二相流における自然循環流量予測手法の構築:低圧領域における二相流相関式の検討, 日本原子力学会 春の年会, M59 (2014).
- [8] 世古口, 田中, 江崎, 今坂, 沸騰流の低クオリティ領域におけるボイド率の算定法, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.46(401), 111-120 (1980).
- [9] 中里見, 清水, 角野, 森, 垂直上昇気液二相流の摩擦圧力損失に及ぼす系内圧力の影響, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.65(635), 276-283 (1999).
- [10] Naveen, Kumar, Rajalakshmi, R., Kulkarni, R.D., Sagar, T.V., Vijayan, P.K. and Saha, D., Experimental Investigations in High Pressure Natural Circulation Loop, BARC/2000/E/002 (2000).
- [11] 山田充, 師岡, ポストドライアウト領域における熱伝達機構の解析 (燃料棒壁面温度予測手法の構築と評価, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79(806), 2301-2311 (2013)).
- [12] 山田創平, 山田充, 師岡, 垂直円管上昇流の沸騰遷移と伝熱面温度の予測に関する研究, 日本機械学会 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム, C112 (2013).
- [13] 加藤, 師岡, 数値解析と二相流相似則を組み合わせた軽水炉燃料の圧力損失予測に関する研究, 日本原子力学会 春の年会, N40 (2013).
- [14] 多田, 師岡, 数値解析と二相流相似則を用いた稠密燃料の圧力損失予測に関する研究, 日本原子力学会 関東・甲越支部 第 7 回学生研究発表会, A5 (2014).
- [15] 大橋, 師岡, 自然対流による使用済燃料プール無電源冷却の検討, 日本原子力学会 春の年会, M28 (2013).
- [16] 高柳, 師岡, ループ型ヒートパイプを用いた使用済み燃料プール冷却に関する実験的研究, 日本原子力学会 関東・甲越支部 第 7 回学生研究発表会, A18 (2014).

運営委員会報告

熱流動部会運営委員会(H25-2) 議事録

- (1) 日時:平成 26 年 2 月 4 日 (火) 14:00-17:00
- (2) 場所:日本原子力学会 会議室
(新橋第二中ビル 3F)
- (3) 出席者:
中田 部会長 (東芝)
杉本 副部会長 (京大)
守田 総務小委員会委員長 (九大)
西田 総務小委員会副委員長 (日立GE)
伊藤 広報小委員会委員長 (JAEA)
坂田 広報小委員会副委員長 (三菱重工)
波津久 研究小委員会委員長 (東京海洋大学)
木藤 国際小委員会委員長 (日立)
劉 出版編集小委員会委員長 (神戸大学)
木下 表彰小委員会委員長 (電力中央研究所)

二ノ方 海外担当役員 (ミラノ工科大学)

(4) 配布資料:

- 2-1:日本原子力学会 熱流動部会運営会議 (平成 25 年度第 2 回)
- 2-2:企画小委員会活動報告
- 2-3:研究小委員会の活動報告
- 2-4:国際小委員会の活動報告
- 2-5:広報小委員会の活動報告
- 2-6:出版編集小委員会活動概要
- 2-7:表彰小委員会活動報告

議事

1. 部会長挨拶 (中田部会長)

「元気のでる活動」の一環として昨年秋の大会で「若手交流フォーラム」を開催し、熱流動部会の活動の成果が出つつある。引き続き原子力学会及び熱流動部会の

発展につながる活動を長期的に継続したいとの挨拶があった。

2. H26年度熱流動部会役員候補

平成26年度熱流動部会役員候補（案）について本運営委員会で審議し、承認された。未定の企画小委員会委員長の後任については、別途メールにて審議することになった。

3. 総務小委員会活動報告（守田委員長）

3-1 H25年度第2回部会等運営委員会

昨年11/12に実施された部会等運営委員会の議事の中で、熱流動部会関連の議事について紹介があった。

- ・2014年春の年会で、4部会（核燃料部会、水化学部会、熱流動部会、計算科学技術部会）合同企画セッション「事故時評価におけるソースタイム解析の課題と今後の対応」が承認された。
- ・2014年の年会から、学生連絡総会ポスターセッションが再開されることになった。また、会場責任者を廃止し、座長不在の場合には聴講者の中から選出することになった。
- ・H26年度の予算から、部会の独自の活動に繰越金を活用する場合、予算化を条件に部会繰越金の使用が認められることになった。

3-2 H25年度決算、H26年度予算

H25年度決算（案）及びH26年度予算（案）が説明された。H26年度予算のうち、旅費交通費（運営委員会・小委員会旅費、日韓学生セミナー渡航費補助、熱水力WG旅費）、及び独自事業である若手交流フォーラムの支出については繰越金を利用することが説明された。また、昨年11月25日に学会に提出した「繰越金利用に関する理由書」についても説明された。

3-4 長期予算計画

これまで通り日本開催時の日韓学生セミナー、国際会議（NTHAS, NUTHOS, NURETH）、若手交流フォーラムを部会予算による主な事業とすることが紹介された。

3-5 その他

JNST50周年 海外著者レビュー論文執筆者の熱流動部会からの3名の推薦のうち、2名が編集委員会により選ばれたと紹介があった。「東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会」には、片岡先生（大阪大学）に出席して戴いていることが紹介された。H26年度フェロー候補に熱流動部会から木下前部会長（電力中央研究所）を推薦し、フェローに決定したとの紹介があった。「2014年度春の年会」ポスターセッション発表選考委員として、熱流動部会として中田部会長を選出することになった。

二ノ方海外担当役員から、シカゴで開催されるNURETH16（2015年）の後、NURETH17（2017

年）はアジアで開催される順番であり、中国、韓国等が公募に応じる可能性が高いとの見解が示された。熱流動部全体会議において国際小委員会から情報を提供し、開催国としての日本の応募について意見を受けることになった。本件については、次回の熱流動部会運営委員会にて再度議論することになった。

4. 企画小委員会活動報告（江原委員長欠席、守田委員長が代読）

企画小委員会で昨年実施した「第1回若手交流フォーラム」について、参加者アンケートでは、「非常に良かった」との意見が多かったことが紹介された。

第2回若手交流フォーラムは、現在、若手交流WGで議論中であり、春の年会前に開催する会場で議論した結果を反映して部会総会向けの小委員会報告に記載するとの報告があった。

学会規定の改訂により、部会負担が「交通費（宿泊費含む）が実費の50%まで（学生は全額OK）、懇親会費が実費の50%以内かつ3,000円以内」となったため、参加費の目安として学生2,000円程度、一般6,000円程度になる予定であることが報告された。

若手交流フォーラムへの参加者にインセンティブを与えるため、優れたポスター発表を表彰するなどの方策について提案があった。

5. 研究小委員会活動報告（波津久委員長）

「熱水力安全評価基盤技術高度化検討WG」、「シビアアクシデント評価研究専門委員会」、「高温ガス炉の安全設計方針研究専門部会」の状況について報告された。「シビアアクシデント評価研究専門委員会」の2つのSWG（SAMPSON,PIRT）については、当初2013年11月にSWGを終了する予定であったが、1年延長することになったことが報告された。2014年春の年会で、水化学部会、核燃料部会、計算科学部会との合同企画セッション「事故評価におけるソースタイム解析の課題と今後の対応」が開催され、高温ガス炉の安全設計方針研究専門委員会」の中間報告が実施されることの予定が報告された。

6. 国際小委員会活動報告（木藤委員長）

NUTHOS-10の開催準備状況について説明があった。2014年12月14～18日、沖縄コンベンションセンターで開催する。業務委託（資金管理、ホテル・航空券手配、テクニカルツアー）は予算回答額の安かった業者に決定した。企画運営（プログラム、吊り看板、名刺、案内板の印刷、USBへのプロシーディングス書き込み）は国際会議の実績があり、予算回答額が最も安かった業者に決定したとの報告があった。

テクニカルツアー（12月19日）は、沖縄やんばる海水揚水発電所、沖縄科学技術大学院大学等とすること

で調整中であることが紹介された。

尚、NUTHOS-10の開催準備に関しては、海外へのFirst Announcementが遅れていることから、TPCへのフォローアップを進める必要があり、進捗状況について運営委員会（部会長、副部会長）にも適宜報告することになった。

国際会議における著者一人での複数研究発表の可否について問題提起があった。連名者の一人であり、発表内容について討議できるのであれば認めるべきとの考えもあるが、原子力学会としての発表基準との整合性も必要であり、本熱流動部会運営部会で議論を継続することとなった。

7. 広報小委員会活動報告（伊藤委員長）

部会ホームページの更新、部会ニュースレター（81号、82号）の掲載、メーリングリストを用いた会員への情報提供について報告があった。

原子力学会誌「アトモス」編集委員会の企画にオブザーバーとして参加し、熱流動部会の動向と取組みについて紹介したとの報告があった。学会記事として、「学生研究紹介」、「AESJテキストシリーズ」を提案し、「学生研究紹介」については編集委員会で好評であり、企画の提案を依頼されたとの紹介があった。学会記事のアイデアがあれば、広報小委員に連絡することとした。

8. 出版小委員会活動報告（劉委員長）

論文編集委員（伝熱流動）の紹介、最近5年の論文集投稿掲載状況、英文論文誌JNSTのTaylor &

Francis社との共同出版化、JNSTのインパクトファクター推移について報告された。

英文論文誌JNSTはH25年1月から新システムによる投稿が開始され、第6分野（熱流動）については8月22日までに22編の投稿があったことが報告された。また、2012年度のインパクトファクターは1.033であり、他の論文誌と比較しても高い値であることが紹介された。

9. 表彰小委員会活動報告（木下委員長）

2013年「秋の大会」優秀講演賞の候補者の選考について説明され、優秀講演賞の内規にもとづき3名の贈賞を決定したことが報告された。また、2013年熱流動部会賞については、表彰小委員会での審査の結果、3名の贈賞（功績賞1名、業績賞2名）を決定したことが報告された。表彰小委員会の決定について本運営委員会で審議し、承認された。

10. 副部会長挨拶（杉本副部会長）

第1回の「若手交流フォーラム」も成功裏に終わり、今後も若手の人材育成を重要な部会活動として位置付け継続していきたい。また、国の次期のエネルギー基本計画が定まりつつある中、ベース電源の一つとして原子力発電の再稼働を支援できるよう部会活動に協力をお願いする旨挨拶があった。

以上

研究紹介～平成 24 年度熱流動部会奨励賞

Research Activities on the Advanced Two-Phase Flow Regime Identification Methodologies in Thermal-Hydraulic Applications

（先進ニューラルネットワークを用いた革新的な流動様式判別手法の開発）

J. Enrique Julia*, Leonor Hernandez*, Takashi Hibiki**, Mamoru Ishii**

*Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I. Castellon. Spain

**Nuclear Engineering Department. Purdue University. Indiana. USA

I) INTRODUCTION

Much effort has been directed to the study on two-phase flow in the last decades because of its important industrial applications, as for example, nuclear power plant steam generators, boilers, paper-making industry, processing of chemicals for the production of food, pharmaceuticals, petroleum transportation, etc. The two phases can flow according to several topological configurations called flow patterns or flow regimes, which are determined by the interfacial structure between

both phases. The existence of a particular flow regime depends on a variety of parameters. These parameters include the fluids properties, flow channel size, geometry and orientation, body force field and flow rates.

Despite the wide use of multiphase systems, their hydrodynamic and kinematic mechanisms are not completely understood. The interfacial structure has a profound impact on all transport processes in a two-phase flow system. Consequently, flow regime identification and the prediction of their transition boundaries are

relevant in the study of two-phase flow systems.

Various models have been developed to predict the transition criteria between the flow regimes. The first studies in this field have been confined to circular flow geometry (Taitel et al., 1980; Mishima and Ishii, 1984). Additionally, models for other flow channel geometries such as annuli (Kelessidis and Dukler, 1989; Das et al., 1999; Sun et al., 2004; Julia and Hibiki, 2011), rod bundles (Venkateswararao et al, 1982) and rectangular channels (Hibiki and Mishima, 2001) have been developed.

In particular, flow regime transition models are important in Drift-Flux and Two-Fluid formulations since the available constitutive relations for the drag coefficient and interfacial area concentration show strong flow regime dependence. In all the cases, reliable experimental flow regime maps are needed to understand the physical phenomena involved in the flow regime transitions as well as to validate the models.

In the last ten years, a collaborative research task has been developed between Universitat Jaume I (Castellon, Spain) and Purdue University (Indiana, USA) in order to obtain more objective, accurate and fast two-phase flow regime identification methodologies in thermal-hydraulics applications. In the next sections a brief summary of this research is given.

II) FLOW REGIME IDENTIFICATION METHODOLOGY

Flow regime definitions are based on linguistic descriptions and graphical illustrations like those in Figure 1, and therefore, their identification is strongly subjective. Many researchers have been working on developing objective flow regime identification methodologies. Every identification process comprises at least two main performers (Figure 2): indicator and classifier. First of all, a feature that is intrinsic to the subject to be identified and that makes it different from the other subjects in the group is needed (flow regime indicator). Secondly, a procedure to classify the subjects according to this feature is required (flow regime classifier).

Consequently, most flow regime identification approaches have two steps in common: the first step consists of developing an experimental methodology for measuring certain parameters that are intrinsic to the flow and are also suitable flow regime indicators. In the second step, a non-linear mapping is performed to obtain an objective identification of the flow regimes in accordance with these indicators.

Flow regime identification results are plotted in flow

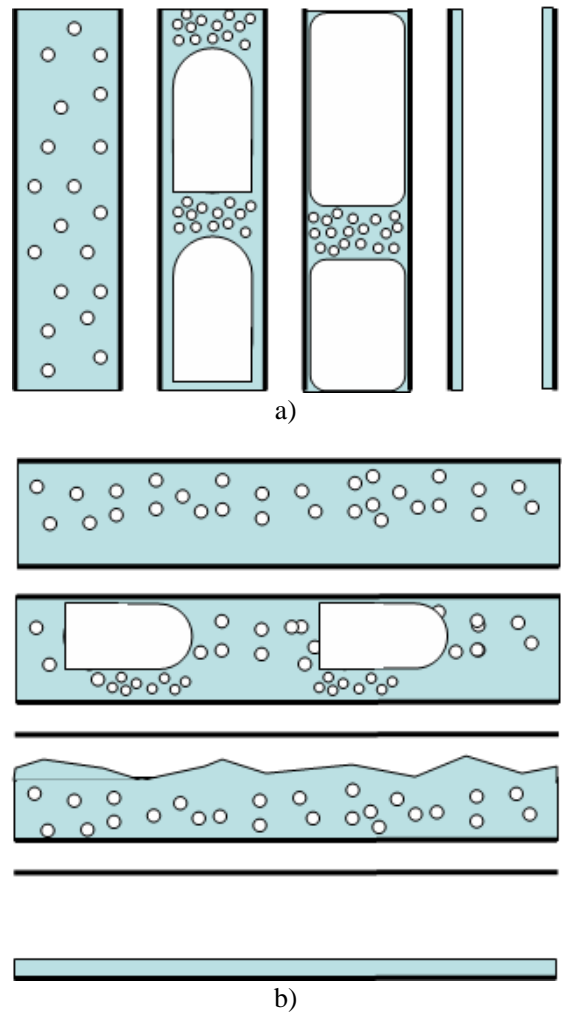


Figure 1. Two-phase flow regime representations in a) upward vertical flow: bubbly, slug, churn and annular flow regimes, b) horizontal flow: bubbly, plug-slug, wavy, annular

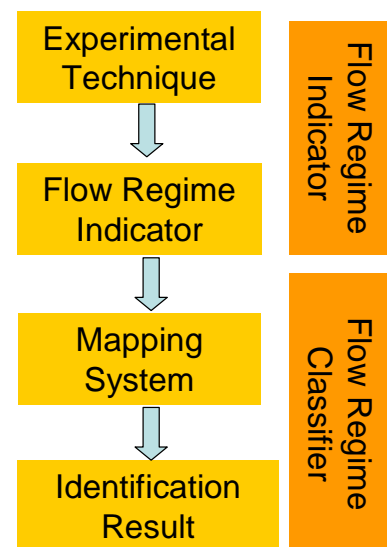


Figure 2. Two-phase flow regime identification process.

regime maps (FRM). These maps are graphs displaying the flow condition information in which the flow regime is identified in the x-y coordinates. Different options for the x-y axis variables in the flow maps are available. If the superficial velocity values are known this is the preferred option. The superficial velocity, j_g or j_f , is defined as the volumetric flow rate divided by the flow channel area. However, in steam-water flows the local superficial gas velocity is not usually known accurately. In this case, other options for the x-y axis are considered, for instance mass velocity vs. flow quality have been used in different works.

III) FLOW REGIME INDICATORS

In the last decades, important work obtaining more objective flow regime indicators has been developed. There are two important parameters to characterize the two-phase flow geometry, namely void fraction and interfacial area concentration (α and a_i). Consequently, the flow regime indicators have to be related to such parameters. In order to obtain the flow regime indicator two different procedures are needed. First, a signal measured with an experimental device related to void fraction or interfacial area concentration is needed. Then, some statistical parameters of the signal are calculated and used as indicators.

Experimental techniques:

The duration of the experimental signal used to build the flow regime indicator represents the 95% of the total duration of the identification process. Consequently, the experimental technique should be chosen carefully (Figure 3).

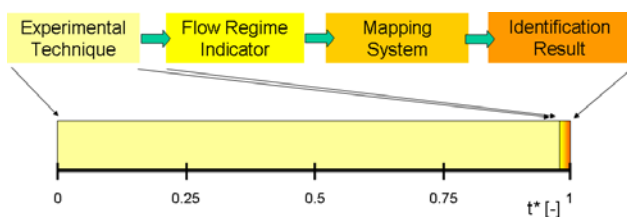


Figure 3. Two-phase flow regime identification process time length scale.

- Visual observation: This represents the easiest flow regime to be obtained; therefore it was the first one used in experiments. Both researcher sighting and CCD/CMOS cameras can be used. Even if high speed CCD/CMOS cameras are used important drawbacks are present in this approach: partial information is obtained in high velocity, large diameter pipe flows or flow regime transitions.

- Indicators related with void fraction signals: The first experimental techniques that were used in two-phase

flow regime identification methodologies provided void fraction information. Thus, the flow regime is defined as a time-averaged, volume-averaged or area-averaged pattern. In this regard, Jones and Zuber (1975) employed a linearized X-ray system to obtain very accurate area-averaged void fraction measurements, $\langle \alpha \rangle$. This experimental set-up allows measurements in almost every experimental set-up. However, the use of radioactivity complicates this approach and it is only indicated for applications in which other experimental techniques can not be applied.

Local pressure transducers have been also used for volume-averaged void fraction measurements (Cai et al., 1994). This represents a quite simple experimental set-up. However, some difficulties are not easily overcome owing to the presence of gas which might be trapped in pressure lines. It is still used in some experimental work.

Area-averaged void fraction measurements obtained from impedance meters have been used to obtain flow regime indicators (Mi et al., 1998; 2001). The experimental set-up needed for this experimental technique is more complex than the one used in dP measurements and is based in the difference in electrical conductivity between gas and liquid. An alternating current is supplied to the electrodes of the meter and the electrodes are connected to the electronic circuit, which is specially designed so that the output voltage of the circuit is proportional to the measured admittance between the electrodes. The void fraction measured by the void meter is an instantaneous, area-averaged void fraction.

- Indicators related with bubble chord length signals: In this case conductivity probes are used to provide the flow regime indicator. Conductivity probes signals are based on the difference of conductivity between water and air. The first probe designs were composed of two sensors; however, these probes were only utilizable with spherical bubbles (bubbly flows). This limitation was overcome with the use of four-sensor conductivity probes (Kim et al., 2000). The a_i calculation is a time consuming process, so bubble chord lengths, L_B , are used as flow regime indicators. L_B is directly connected with a_i and it can be obtained by multiplying the local residence time and the bubble interface velocity. Thus, the flow regime is defined as a time-averaged bubble chord length pattern. The main advantages of this approach (Julia et al., 2008) are that provide local information which can be very useful for a multi-dimensional computational fluids dynamics (CFD) two-phase codes where different flow regimes in the flow geometry can be used. In addition, the simultaneous identification of local flow regime in different radial locations provides 2D local flow regime maps that can be used to identify new standard flow

regime configurations, not available with the conventional identification methods.

- Other indicators: More sophisticated flow regime indicators are also available. Ruzicka et al. (1997) used the Kolmogorov entropy from pressure signals in order to discriminate between flow regimes. Furthermore, Zhang and Shi (1999) developed a methodology using the Shannon entropy of the power spectral density, PSD, of pressure oscillation signals in a two-phase flow loop. In addition, Elperin and Klochko (2002) used the wavelet transform in order to identify two-phase flow regimes. Finally, Lee et al. (2008) used the chaotic characteristics of time sequential impedance probe signals in order to identify flow regimes in upward vertical two-phase flows.

Statistical parameters:

In general, flow regime indicator signals can not be directly used as flow regime indicator. Instead, some statistical distributions obtained from these signals are used to obtain the indicators. The probability distribution function (PDF) and its cumulative version (CPDF) are frequently used. The CPDF is an integral parameter and is therefore more stable than the PDF. In addition, it has a smaller input data requirement that makes it useful for fast identification purposes.

The complete distributions are not directly used as flow regime indicators. In order to facilitate the classification, some statistical parameters of the distributions are employed:

- Mean value, standard deviation and skewness of the PDF (Mean+std+skw): this set of 3 statistical parameters represents the indicator most used in flow regime identification work (Mi et al., 1998; 2001).
- Principal Component Analysis (PCA): PCA is a useful statistical technique that compresses the data by reducing the number of dimensions, without much loss of information. This is done by transforming the data into orthogonal components (Mohamad-Saleh and Hoyle, 2002).
- Four indexes (4IND): In order to characterize the CPDF following a simple and fast procedure, the four indexes of the components at which 0.25, 0.5, 0.75 and 1 values of the CPDF are reached, were selected as characteristic of the CPDF shape (Hernandez et al., 2006).
- Entropy (S_i): The entropy computation is based on the CPDF distribution of the area-averaged void fraction or local bubble chord length. The area-averaged void fraction entropy (S_a) and the bubble chord length entropy (S_B) are defined as a conventional Shannon entropy.

Thus, the entropy provides quantitative information about the disorder in the area-averaged void fraction or bubble chord length distributions (Hernandez et al., 2010). Figure 4 shows a summary of the two-phase flows indicators used in literature (Julia et al., 2009).

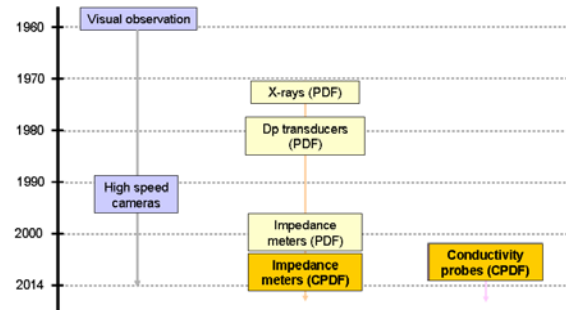


Figure 4. Timeline of two-phase flow regime indicators: Experimental technique (statistical parameter).

IV) FLOW REGIME CLASSIFIERS

In the last decades different flow regime classifiers have been used:

- Researcher (visual Flow Regime Map): In the first flow regime identification works the flow regime indicator was the visual information obtained by the researcher. Then, the only flow regime classifier is the researcher him- or herself. Obviously, this mapping methodology is strongly subjective, and the results are highly dependent on the researcher.
- Researcher rules: After the introduction of some statistical parameters of the PDF of void fraction signals as flow regime indicators (Hubbard and Dukler, 1966; Lee et al., 2008), it was possible to introduce some rules regarding the mean and standard deviation of the PDF distributions were used to perform the classification. However, these rules were decided based on the researcher’s knowledge, so the objectivity of the classification is not guaranteed. In addition, some classification problems arise in the transition boundaries between flow regimes since the rules are static by nature. Nevertheless, this type of classifier is still used.
- Artificial Neural Networks (ANN): A significant advance in objective flow regime mapping was achieved by the use of artificial neural networks (Cai et al., 1994; Mi et al., 1998; 2001). ANNs are able to self-identify these complicated relationships, generating non-parametric methods which are capable of non-linear mapping. In the case of flow regime identification, where the traditional classifier systems present some difficulties in classification, this ANN advantage implies an enormous simplification. Another important advantage of the ANN approach is its fast response, which enables it to be included in more complex procedures, such as decision trees and optimization

applications. In the case of two-phase flow regime identification, two ANN types have been used as classifiers: Self-Organized Neural Networks (SONN) and Probabilistic Neural Networks (PNN). SONN are trained without supervision and was developed by Kohonen (1987). PNN belong to the family of radial basis networks and are trained by supervised learning. PNNs are based on the combination of Bayes decision strategy and Panzen's method of PDF approximation (Specht, 1990).

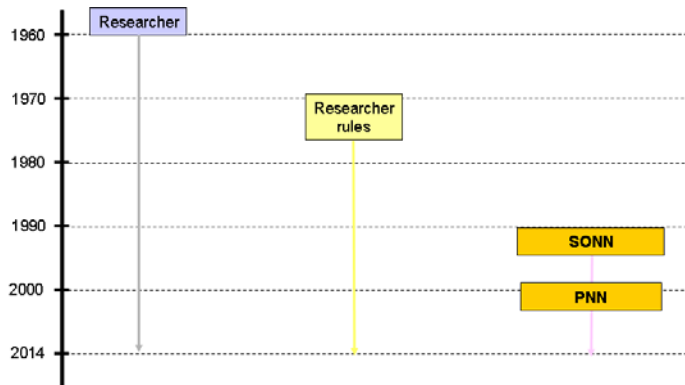


Figure 5. Timeline of two-phase flow regime classifiers.

In addition, in order to minimize the effect of the fuzzy flow regime boundaries on the flow regime identification results, a committee of neural networks, SONN or PNN, can be assembled. If a single neural network is used, some of the flow regime identification results are unstable, mainly in the flow regime transition zones. If a committee of neural networks is used, flow regime map repeatability higher than 95% can be achieved (Hernandez et al., 2006). The number of ANN needed in the committee depends on the experimental matrix, flow regime indicators and flow channel geometry. In most cases 50 ANNs in the committee are enough to

obtain stable identification results. If an ANN committee is used the PNN architecture is preferred due to its fast training process. The same training and identification groups are used for all the neural networks that integrate the committee. Finally, the identification result is obtained by averaging the results provided by all the neural networks that compose the committee. Figure 4 shows a summary of the two-phase flows classifiers used in literature (Julia et al., 2009).

V) EXAMPLE

- Flow Regime Map obtained by conductivity probe in air/water upward vertical flow:

Technical details: 50.8 mm ID pipe, $z/D=67$, 115 flow conditions: $0.01 \text{ m/s} < j_g < 10 \text{ m/s}$; $0.03 \text{ m/s} < j_f < 2.5 \text{ m/s}$, 4 sensor conductivity probes in 3 radial locations ($r/R=0, 0.5, 0.9$), Flow Regime indicator: 4 Indexes of CPDF distribution of bubble chord length, Flow Regime Classifier: committee of 50 ANNs (SONN type), published in: Julia et al., Nucl. Eng. Des., vol. 238, pp. 156-169, 2008.

Local flow regimes in three different radial locations provide identification of eight global flow regimes.

VD) CONCLUSIONS

Two-phase flow regime identification methodologies are important in order to understand the physical phenomena involved in the flow regime transitions as well as to validate the flow regime transition models. Two main components are involved in the identification process: flow regime indicator and classifier. In

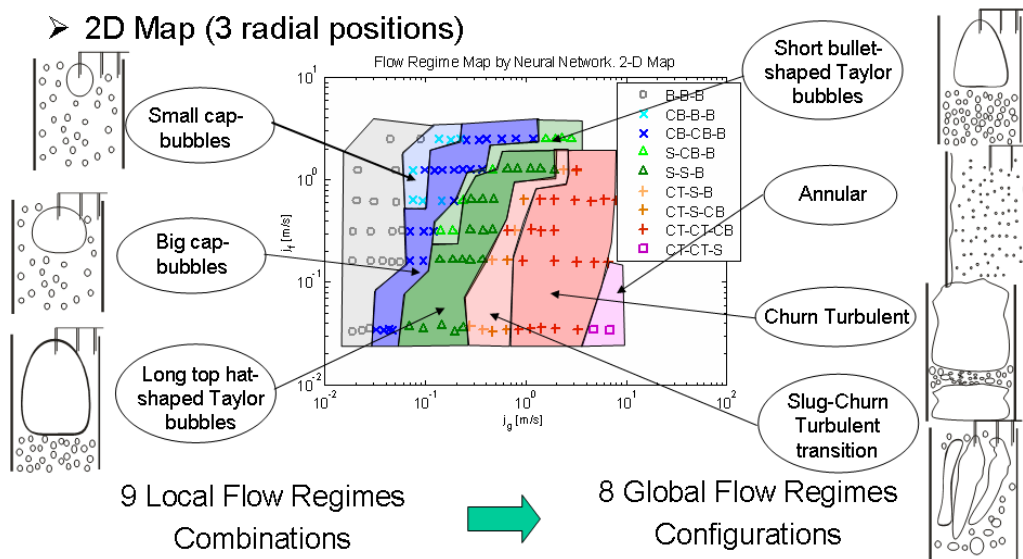


Figure 6. Flow regime map obtained by using three conductivity probes in different radial locations.

the first flow regime identification works, visual information and the researcher him- or herself were used as flow regime indicator and classifier. However, this identification methodology provides subjective results. Since then, a great effort has been made in order to improve performers and obtain more objective results, however visual flow regime maps can still be found in recent literature.

An important development in two-phase flow regime identification methodologies can be observed in the last decades ranging from totally subjective visual criteria to a combination of signals from experimental devices and automatic computational classifiers providing more objective and reliable results.

VII) REFERENCES

S. Cai, H. Toral, J. Qiu, and J. S. Archer, “Neural network-based objective flow regime identification in air-water two-phase flow”, *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 72, pp. 440–445, 1994.

G. Das, P. K. Das, N. K. Purohit, and A. K. Mitra, “Flow pattern transition during gas liquid upflow through vertical concentric annuli—part II: mechanistic models”, *J. Fluids Eng.-Trans. ASME*, vol. 121, pp. 902-907, 1999.

T. Elperin, and M. Klochko, “Flow regime identification in a two-phase flow using wavelet transform”, *Exp. Fluids*, vol. 32, pp. 674-682, 2002.

L. Hernandez, J. E. Julia, S. Chiva, S. Paranjape, M. Ishii, “Fast classification of two-phase flow regimes based on conductivity signals and artificial neural networks”, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 1511–1521, 2006.

L. Hernandez, J. E. Julia, S. Paranjape, T. Hibiki and M. Ishii, “On the use of area-averaged void fraction and local bubble chord length entropies as two-phase flow regime indicators”, *Exp Fluids* 49, pp. 1147–1160, 2010.

T. Hibiki and K. Mishima, “Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical narrow rectangular channels”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 203, pp. 117–131, 2001.

N. G. Hubbard, and A. E. Dukler, “The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow”, in *Proceedings of the 1996 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*. Stanford University Press, CA, pp. 100–121, 1966.

O. C. Jones, and N. Zuber, “The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow”. *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 3, pp. 273–306, 1975.

J. E. Julia, Y. Liu, S. Paranjape, and M. Ishii, “Local flow regimes analysis in vertical upward two-phase flow”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 238, pp. 156-169, 2008.

J. E. Julia, T. Hibiki and M. Ishii, “Two-Phase Flow Regime Identification Methodologies in Thermal-Hydraulic Applications”, *Advances in Multiphase Flow and Heat Transfer* vol. 1, pp. 1-23, 2009.

J. E. Julia and T. Hibiki, “Flow regime transition criteria for two-phase flow in a vertical annulus”. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, vol. 32, pp. 993-1004, 2011.

V. C. Kelessidis, and A. E. Dukler, “Modeling flow pattern transitions for upward gas–liquid flow in vertical concentric and eccentric annuli”, *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 15, pp. 173–191, 1989.

S. Kim, X. Y. Fu, X. Wang and M. Ishii, “Development of the miniaturized four-sensor conductivity probe and the signal processing scheme”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 43, pp. 4101-4118, 2000.

T. Kohonen. *Self-Organization and Associative Memory*, Berlin: Springer-Verlag. 1987.

J. Y. Lee, M. Ishii, and N. S. Kim, “Instantaneous and objective flow regime identification method for the vertical upward and downward co-current two-phase flow”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, pp. 3442-3459, 2008.

J. Y. Lee, N. S. Kim, and M. Ishii, “Flow regime identification using chaotic characteristics of two-phase flow”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 238, pp. 945-957, 2008.

Y. Mi, M. Ishii, and L. H. Tsoukalas, “Vertical two-phase flow identification using advanced instrumentation and neural networks”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 184, pp. 409–420, 1998.

Y. Mi, M. Ishii, and L. H. Tsoukalas, “Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 204, pp. 87–100, 2001.

K. Mishima, and M. Ishii, “Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 27, pp. 723-737, 1984.

J. Mohamad-Saleh, and B. S. Hoyle, "Determination of multi-component flow process parameters based on electrical capacitance tomography data using artificial neural networks", Meas. Sci. Technol., vol. 13, pp. 1815-1821, 2002.

M. C. Ruzicka, J. Drahos, J. Zahradnik, and N. H. Thomas, "Intermittent transition from bubbling to jetting regime in gas-liquid two-phase flow", Int. J. Multiph. Flow, vol. 23, pp. 671-682, 1997.

D. F. Specht, "Probabilistic neural networks", Neural Netw., vol. 3, pp. 109-118, 1990.

X. Sun, S. Kuran, and M. Ishii, "Cap bubbly-to-slug flow regime transition in a vertical

annulus", Exp. Fluids, vol. 37, pp. 458-464, 2004.

Y. Taitel, D. Barnea, and A. E. Dukler, "Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes", AIChE J., vol. 26, pp. 345-354, 1980.

P. Venkateswararao, R. Semiat, and A. E. Dukler, "Flow pattern transition for gas-liquid flow in a vertical rod bundle", Int. J. Multiph. Flow, vol. 8, pp. 509-524, 1982.

Z. Zhang, and L. Shi, "Shannon entropy characteristics in two-phase flow systems", J. Appl. Physics, vol. 85, pp. 7544-7551, 1999.

国際会議等に関するお知らせ

第9回「原子炉熱流動と安全に関する日韓シンポジウム (NTHAS9)」開催のご案内

1998年より隔年で開催されております日韓シンポジウム NTHAS (Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety) を2014年11月に百済文化の中心地、扶余にて開催いたします。シンポジウムでは、原子炉熱流動・安全分野における日韓のコアメンバーが集結し、集中的に討論を行う予定です。

また、NTHAS9に先立って日韓学生セミナーも開催される予定です。

是非、皆様方の積極的な参加を宜しくお願い致します。

概要：日韓の原子力研究開発における協力関係の発展を目指すことを目的とした原子炉熱流動・安全などに関する2国間会議

主催：日本原子力学会および韓国原子力学会

共催：日本原子力学会・熱流動部会および韓国原子力学会・熱流動部会

会場：韓国扶余市 Lotte Resort Buyeo

(<http://www.lottebuyeoresort.com/jpn/>)

会期：2014年11月16日(日)-19日(水)

アブストラクト投稿〆切：【5月16日】

詳細は以下のWebサイトでご確認下さい。

<http://www.nthas9.org/>

平成25年度 熱流動部会役員

部会長	中田 耕太郎 (東芝)	同副委員長*	石渡 祐樹 (日立 GE)
副部会長	杉本 純 (京都大学)	企画委員長**	江原 真司 (東北大学)
総務委員長	守田 幸路 (九州大学)	出版編集委員長**	劉 秋生 (神戸大学)
総務副委員長	西田 浩二 (日立 GE)	同副委員長*	師岡 慎一 (早稲田大学)
広報委員長**	伊藤 啓 (JAEA)	表彰委員長	木下 泉 (電力中央研究所)
同副委員長*	坂田 英之 (三菱重工)	海外担当役員	二ノ方 壽 (ミラノ工科大学)
研究委員長*	波津久 達也 (東京海洋大学)		
国際委員長**	木藤 和明 (日立製作所)		

*:任期2年の1年目、 **:任期2年の2年目

<編集後記>

今号では、早稲田大学の師岡先生および研究室の学生の方々より、原子炉の性能・安全性を向上させる様々な研究についてご紹介頂きました。また、昨年度の部会奨励賞を受賞されたJ. Enrique Julia氏より、受賞題目である革新的な流動様式判別手法について、記事を作成して頂きました。本号は、H25年度最終号となります。研究室紹介等の記事を作成頂いた皆様、読者の皆様、1年間ありがとうございました。

ニュースレターへの原稿は、随時受付を行っております。研究室紹介、会議案内、エッセイ等寄稿お願い致します。

ます。またニュースレターに関するご質問、ご意見、ご要望等ありましたら、ぜひe-mailをいただければ幸いです。また、熱流動部会に入会したい方、入会しているがメールが届かない方が身近におられましたらご相談ください。

e-mail宛先： ito.kei@jaea.go.jp
hideyuki_sakata@mhi.co.jp

熱流動部会のホームページ：
<http://www.aesj.or.jp/~thd/>
からニュースレターのPDFファイルは入手可能です。