

THERMAL HYDRAULICS

熱流動部会ニュースレター (第 58 号)

AESJ-THD

NEWSLETTER (No.58)

July 31, 2007

研究開発の現状紹介

(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
中村 晶 / 村瀬 道雄

原子力安全システム研究所は 1991 年に起こった関西電力美浜発電所 2 号機の蒸気発生器細管破断事故を契機に、翌 1992 年に関西電力により設立された。研究成果を国内外に公開し、原子力発電の安全性と信頼性を向上させることが設立目的である。技術面だけでなく社会・人間科学面からの研究を行うため、社会システム研究所と技術システム研究所の両研究所から構成されている。2004 年に関西電力美浜発電所 3 号機の 2 次系配管破損事故を受けて高経年化対策の重要性が強く再認識されたことから、翌 2005 年に技術システム研究所に高経年化研究センターを設置し、包括的な高経年化研究を行っている。

熱流動に関連した研究は、主に高経年化研究センターの熱流動・構造グループと、技術システム研究所の技術支援研究プロジェクトとが行っている。熱流動・構造グループでは経年劣化要因となる熱流動挙動を実験・数値解析の両面から評価する研究を行っている。熱流動関連の主要なテーマは、「熱疲労に関連する流体温度ゆらぎの評価」「キャビテーションの検知手法開発」「配管劣化に及ぼす局所流況挙動評価」である。技術支援研究プロジェクトは原子力発電所の運転および保守の安全性向上のため、プラント安全評価と原子力防災支援に関する研究を行っている。熱流動関連の主要なテーマは、「RELAP を用いた事故時のプラント挙動評価」である。これらの研究内容について簡単に紹介したい。

(1) 熱疲労に関連する流体温度ゆらぎの評価

配管の合流部や分岐部では、高低温水の合流・混合

により流体に温度差が生じ、配管壁面へ伝わって熱疲労によるき裂発生・漏洩を生じる場合がある。このような部位の健全性を評価するため、日本機械学会は「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」を策定した。この指針の評価フローにおいては、最新の技術を取り入れた詳細評価を行うことが許されている。この詳細評価の例として数値解析を活用し、具体的な流動条件・配管形状に対して、より精緻な熱荷重を算出することが考えられる。そこで本研究では図 1 に示す統合熱疲労評価システム IMAT-F を開発した。(大塚他、INSS Journal No.13, 2006)

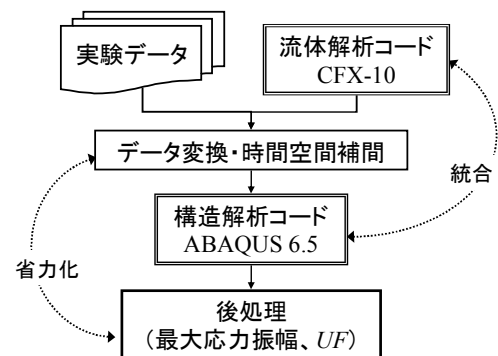


図 1 汎用の解析コードを活用した統合熱疲労評価システム IMAT-F の概要

具体的な評価対象として、これまで閉塞分岐配管の曲がり部に生じる熱成層界面近傍の温度変動現象の解明に取り組んできた。実験による現象解明と温度変動の計測を、神戸大学竹中教授との共同研究により実施した。神戸大学工学部に設置した試験ループを用い

て、アクリル配管による可視化実験と、図2に示すステンレス配管による壁面温度変動計測を行った。得られた配管内面温度変動の時間・空間分布を用いてIMAT-Fにより算出した応力分布を図3に示す。

配管合流部に対しては、数値解析を用いた評価に取り組んでいる。図4には配管合流部に生じる壁面噴流周りに発達する渦の例を示す。渦は、速度勾配テンソルの第二不変量 (Q 値) の等値面を灰色に示して可視化した。この流速比条件では Ω 型のアーチ渦が、噴流後流で交互配列になる様子が観察された。温度分布や温度変動強度は、日本原子力研究開発機構が行った実験結果とよい一致を示した。(中村、INSS Journal No.14, 2007)

(2) キャビテーションの検知手法開発

弁やオリフィスなどの配管絞り部では流速が局所的に増加するため、局所的な沸騰であるキャビテーションが発生する場合がある。キャビテーション気泡が崩壊すると振動や配管の壊食 (エロージョン) を引き起こす。日本機械学会が策定した「発電用設備規格配管減肉管理に関する規格 (2005年、増訂版)」では、キャビテーション・エロージョンは“配管減肉に関する技術知見の現状”の中で減肉の一つの要因として整理された。

キャビテーションの発生は運転状態に依るため、運転操作時にキャビテーションの発生の有無を確認することが出来れば、トラブルの未然防止に有効である。そのため、本研究では配管の外部からキャビテーション発生を確認する手段として、加速度センサーとマイクロフォンを用いた検知手法を開発してきた。オリフィス下流をアクリルで視認できるようにした試験体を実験ループに設置して、キャビテーション状態を示す指標であるキャビテーション数 σ に対する気泡発生状態と加速度センサーの出力を対比させた結果を図5に示す。

キャビテーション数 σ は小さくなるとキャビテーションが発生しやすい条件となり、図5では $\sigma=0.7$ で気泡が雲状に発生していることと、それに応じて加速度センサーの出力に特徴的なパルス状の波形が見られるようになっている。このように加速度センサーを設置することにより配管外面からキャビテーション発生を確認することができる。マイクロフォンを用いると配管の保温によって感度が低下するが、非接触で同様にキャビテーションを検知することができる。これらのセンサー、パソコンと処理ソフトを組み合わせ開発した検知システムを図6に示す。運転員が持ち運べる大きさであることが特徴である。(水山他、INSS Journal No.13, 2006)

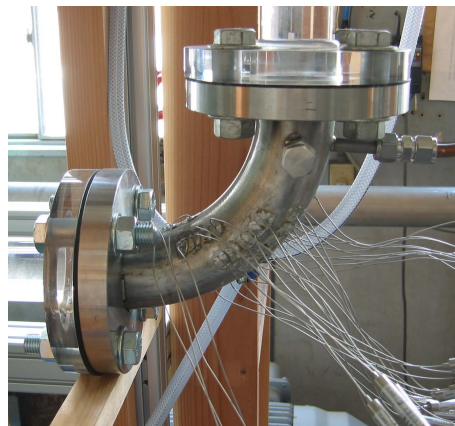


図2 分岐配管曲がり部に設置したステンレス配管 (内面温度計測用)

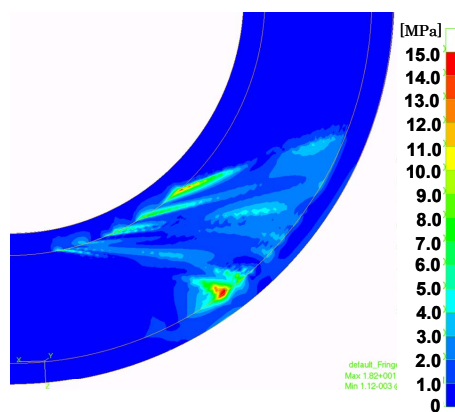


図3 配管内面温度から得られた応力分布 (温度ピークの時点に対する差分のミーゼス応力)

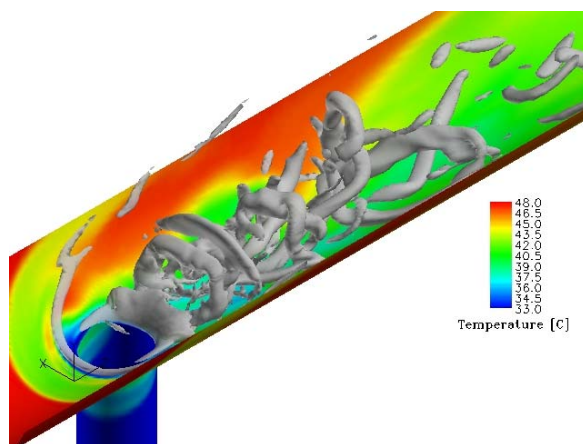


図4 壁面近傍の流体温度分布 (色) と渦構造 (灰色の Q 値の等値面) (壁面噴流条件、瞬時)

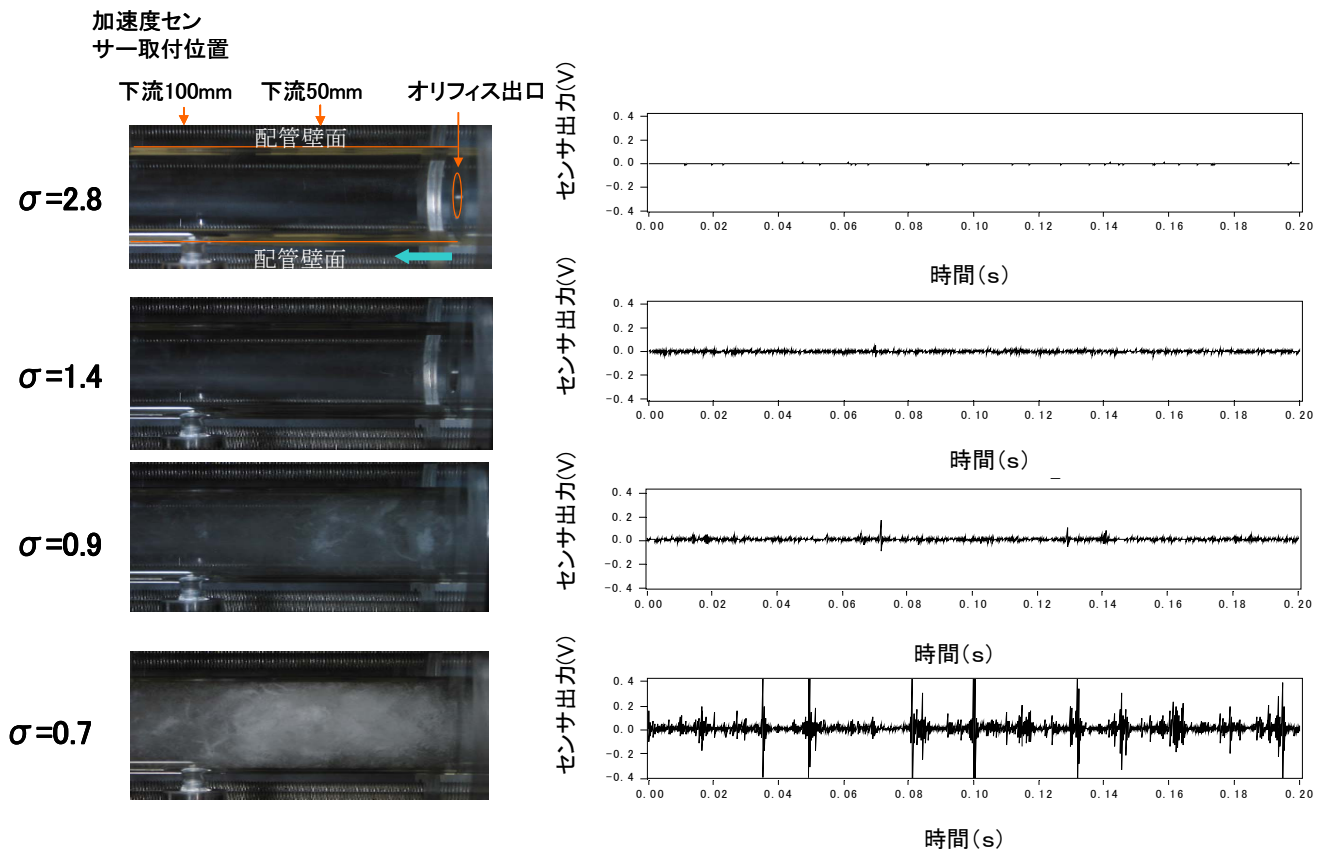


図5 各キャビテーション数における流動状態と加速度センサーの出力波形



図6 マイクロフォンによる簡易型キャビテーション検知装置

(3) 配管劣化に及ぼす局所流況挙動評価

配管の減肉で全面的な腐食（コローション）となり、(2)で既出の「配管減肉管理に関する規格」で最も注意して管理する必要がある現象は、流れ加速型腐食（以下、FAC）である。FACは温度では150℃前後に減肉速度のピークを持ち、流速と共に増加する腐食であり、水中の溶存酸素濃度の小さい範囲で生じる。すなわち、環境要因（溶存酸素濃度、pH、温度）・流れ要因（流速、配管形状）・材料要因（鋼中のCr濃度など）の3つの主たる要因が重なるところで生じる。FACは従来

から配管の肉厚を測定することによりトラブル防止が図られているが、減肉速度に部位毎のばらつきが多いと言われている。先の要因のうち局所的な影響が大きいのは流れ要因であり、例えばエルボやオリフィスといった配管要素が減肉速度に及ぼす影響を、従来は経験的なパラメータとして定量化している。

FACに対する局所的な流況影響のメカニズム解明と定量評価精度向上を目的として、それまでのループを改造して図7に示す「局所熱流動・配管劣化評価実験装置」を設置した。



図7 局所熱流動・配管劣化評価実験装置

この装置はループ全体がステンレス鋼製であり、口径が2インチの配管試験体内に炭素鋼のセンサーを設置して1μm程度の減肉が測定できるようになっている。温度が150℃、溶存酸素濃度が5ppb以下（指示値0.1ppb程度）の水を試験部平均流速で5m/s程度まで流すことができる。現在、実験を開始したところである。

(4) RELAP を用いた事故時のプラント挙動評価

設計基準事故(DBA)を超えるシビアアクシデントを対象として、熱水力解析コード RELAP5/MOD3.2 を用いて確率論的安全評価(PSA)の成功基準となる条件を決定するための解析を行い、設備の安全余裕の確認、設備改善検討、運転手順の変更検討等による安全管理の向上、PSA 成功条件の適正化を行うことを目的としている。このため、プラント停止時のミッドループ運転中に余熱除去(RHR)システムの冷却機能が喪失した場合のプラント挙動を対象に、RELAP5 の熱流動モデルの検証と改良を進めている。ミッドループ運転中に RHR システムの冷却機能が喪失し他の代替冷却手段も失敗した場合には、炉心冷却手段の一つとして蒸気発生器(SG)によるリフラックス冷却が期待される。リフラックス冷却では、原子炉容器内で1次冷却材が沸騰して発生した蒸気を SG の伝熱管内で凝縮させ、凝縮水が重力で炉心に還流されて炉心の冷却を維持する。

ミッドループ運転では、1次冷却系統内に非凝縮性ガス(空気)が存在し、凝縮熱伝達率が低下する。RELAP5 で使用されている非凝縮性ガス存在下の凝縮伝熱相関式は熱伝達率を過小評価する。そこで、パーデュー大学(Prof. Karen Vierow, 現在テキサス A&M 大学)との共同研究として気液対向流条件で非凝縮性ガス(空気)を含む凝縮伝熱実験を行い、凝縮伝熱相関式を改良して RELAP5 に組み込み、蒸気・空気混合気体の流れ方向温度変化を精度良く計算できることを確認した(Nagae, et al., JNST, 44 [2], 171, 2007)。

ミッドループ運転中の RHR 機能喪失の模擬実験は ROSA-IV/ LSTF, BETHSY (フランス), PKL-III (ドイツ) などで行われた。BETHSY 実験では、非凝縮性ガスとして窒素ガスを注入した実験が行われ、SG の伝熱管34本中の10本~15本で窒素ガスの逆流が観察された。これは、炉心での蒸気発生量が少ない場合には、下降(低温)側の密度水頭の影響で出口プレナム圧力が入口プレナム圧力より高くなることによる。この窒素ガスの逆流を RELAP5 で計算できるかを確認するために、伝熱管群を2流路で模擬した解析を行った。プレナムと伝熱管との間の圧力損失計算において、プレナムと伝熱管流路の流路面積比を用いて気液界面摩擦と壁面摩擦を計算していることから、伝熱管の2流路

で流路面積が異なると摩擦力が異なり、これが窒素ガスの逆流を抑制し、逆流を計算できなかった。そこで、伝熱管流路の面積によらず摩擦力が一定になるように水力等価直径の比を用いて摩擦力を計算するよう変更して窒素ガスの逆流を再現できるようにした。伝熱管21本と13本の2流路に分割した場合の計算結果の一例として、伝熱管入口での気相流量を図8に示す。伝熱管群1流路模擬では、窒素ガス注入時を除いて蒸気流量は炉心での蒸気発生量0.047 kg/s で一定である。伝熱管群2流路模擬では、窒素ガス注入前の純蒸気状態では伝熱管本数21本(流路1)と13本(流路2)に応じて蒸気が流入しているが、窒素ガス注入後、流路2で逆流が生じている。窒素ガス注入量が増加するに従って窒素ガスの逆流流量(流路2)が増加し、流路1への再循環流量(1流路との流量差)が増加している。

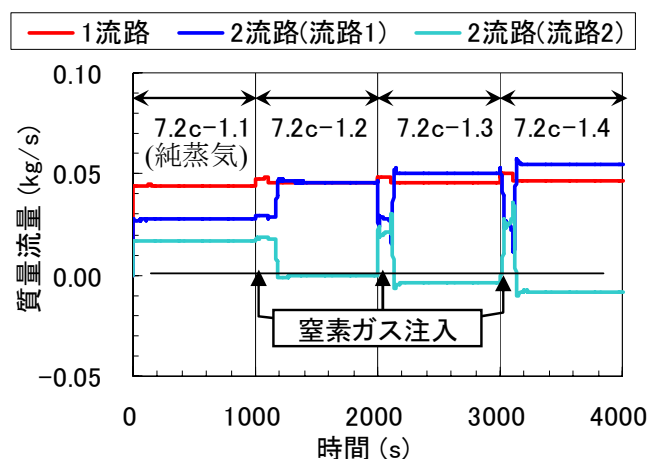


図8 SG 伝熱管入口での気相流量

気液対向流条件で非凝縮性ガス(空気)を含む凝縮伝熱相関式の改良と RELAP5 への組み込み、及び BETHSY 実験で観察された窒素ガスの逆流の再現解析により、SG 内での熱流体挙動を現実的に計算できるようになった。

SG 内での熱流体挙動の他に、ホットレグ内での気液対向流挙動と流動様式、炉心内でのボイド率、サージ管での気液対向流制限(CCFL)と加圧器内の非凝縮性ガス(空気)の挙動などが1次系圧力や炉心水位の計算に影響する可能性がある。ホットレグ内での気液対向流挙動については、神戸大学の富山研究室と共同で空気・水実験を行っており(ニュースレター第57号)、熱流体解析コード FLUENT を用いた数値解析を実施している。また、炉心内のボイド率と加圧器内の挙動については予備的な検討を行っている。

運営委員会報告

平成 19 年度 熱流動部会運営委員会 (第 1 回) 議事録

- (1) 日時：平成 19 年 6 月 22 日 (金) 14:00-16:00
- (2) 場所：日本原子力学会 会議室
- (3) 出席者：前川部会長 (サワサキプラントシステムズ)、三島副部会長 (京都大学)、坂場総務委員長 (三菱重工)、中村広報委員長 (INSS)、宇井研究委員長 (JNES)、望月国際委員長 (JAEA)、守田企画委員長 (九州大学)
- (4) 配布資料：
 - ① 日本原子力学会 熱流動部会運営委員会 議事
 - ② 平成 18 年度収支及び予算資料
 - ③ 秋の大会企画セッション提案書
 - ④ 部会等運営委員会申し送りメモ
 - ⑤ 秋季セミナー「Dr.フォーラム」の準備状況について
 - ⑥ 熱流動部会 研究委員会報告
 - ⑦ ⑦-1 国際委員会活動概要, ⑦-2 NTHAS6, ⑦-3 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics(NURETH-13)
 - ⑧ H19 年度上期 広報委員会活動報告

[議事]

1. 熱流動部会長挨拶

来年度、再来年度は国際会議が 2 件続くため、今年準備に余念がないようにかからねばならない旨の挨拶があった。

2. 総務委員会報告 (総務委員長)

資料-②をもとに平成 18 年度決算及び平成 19 年度予算 (案) の報告があった。また、(熱流動) 部会特別予算 (案) について平成 23 年度までの予算計画の報告があった。

平成 20 年度に開催される NTHAS6 及び関連する日韓ジョイントスクールの予算案について議論があり、総務委員長より本予算案については、国際会議の状況を把握した上で再度策定する予定である旨の回答があった。

3. 企画セッション及び部会等運営委員会状況報告 (総務委員長)

資料-③及び資料-④をもとに、原子力学会秋の大会熱流動部会企画セッション提案の内容及び部会等運営委員会状況の報告があった。

4. 企画委員会の活動概要 (企画委員長)

資料-⑤をもとに、秋季セミナー「Dr フォーラム」の準備状況について報告があった。今回は特に予算が厳しく、一般の参加が 20 名以上ないと赤字になる旨の説明があった。また、学生の参加数が増えるなど予算を圧迫するなどの説明があり、部会補助金を増やせないかとの要請があった。これに対し、各委員より後進の育成の観点から、学生参加数を抑制するような状況は好ましくない、などの意見があり、部会補助金枠の拡大や計算科学技術部会との予算の分担など、総務サイドでも対応を検討することとなった。

5. 研究委員会の活動概要 (研究委員長)

資料-⑥をもとに、学会依頼に基づく「高速炉熱流動・安全評価」特別専門委員会の立ち上げと新規設立予定の委員会として「熱水力安全評価基盤技術高度化検討」特別専門委員会の状況報告があった。

6. 国際委員会の活動概要 (国際委員長)

資料-⑦-1、資料-⑦-2 をもとに、NURETH-13 と NTHAS6 への取り組み状況の報告があった。また、部会長より資料-⑦-3 をもとに NURETH-13 について、ANS への提案状況について説明があった。NURETH-13 については、本委員会開催時点で海外担当役員のニノ方先生が米国にて ANS へ説明中であることから、ニノ方先生の帰国を待って役割と分担を決めることとなった。NTHAS また、NTHAS6 及び NURETH-13 の両方について予算案が提示された。

日韓若手研究者セミナーも来年開催されることから、NTHAS と同期させる予定 (日本で開催) であることやセミナーの形態とするためテキストが必要であるなどの意見があった。テキストについては、JAEA や東京大学でのカリキュラムのものが活用できるので活用を検討することとした。また、NTHAS の実行委員の選出は望月委員長と田中副委員長で行い、来年早々に Web を立ち上げることにした。

NURETH については、現地委員は東工大と福井大学で連携して構成する、ということがニノ方先生の意向で、JAEA の理事とも相談予定。金沢への交通や開催場所、宿泊ホテルなどについては業者候補などと今後調査していく予定。具体的なアクションはニノ方先生帰国後の行き、8 月までに決定することとした。また、現在暫定で選定されている現地委員リストについては、今後各人の承認を得て確定する。

7. 広報委員会の活動概要（広報委員長）

資料-⑧をもとに広報活動が報告された。ニュースレターの「研究室紹介」については、今後、大学だけではなく企業の研究活動についても報じていきたい旨の報告があった。これに対して、「ソフトウェアの宣伝にならないようにすること。」や「タイトルの“研究室”という言葉を変えればどうか」といった意見があった。

誤配信についての実例とそれに対する対策について議論があった。

また、次年度以降といった長い期間で、今後行われる国際会議についての情報をまとめ提示できるようにしたいとの要望があった。部会内では国際委員長から広報委員長へ情報を伝達するとともに、学会には情報化推進委員会があり、学会 HP に掲載できればよりよいので部会等運営委員会などで提案していくこととなった。

以上

部会行事のご案内

秋季セミナー「Dr.フォーラム」参加者募集

主催 本会「熱流動部会」
共催 本会「計算科学技術部会」
会期 2007年9月29日（土）～9月30日（日）
会場 サンスカイホテル（北九州市小倉北区神幸町2-1）<http://www.sunsky.co.jp/>
（「秋の大会」会場・北九州国際会議場から車で約7分）

概要 秋季セミナー「Dr.フォーラム」は、学位取得後数年の方々に講師を迎えて学位論文での研究成果を講演いただき、次代を担う研究者を会員各位に紹介するとともに、参加者の方々が今後広い視野で研究を進めていく機会も担っています。今回で7回目となる秋季セミナー「Dr.フォーラム」は、最先端かつ完成度の高い研究成果についてまとまった内容がじっくりと聴けることから、毎年、参加者の皆様から大変好評を頂いております。今回も「秋の大会」会場からのアクセスも便利な北九州市内の会場にて、6名の講師の方々が、知的興奮に満ちた研究成果をもって待ち受けています。

○プログラム○

- 1日目 9月29日（土）
Dr.フォーラム・その1（15:00～19:00）
- (1) ミニチャンネル内強制流動沸騰の構成式に関する研究（原子力機構）張 維忠氏
 - (2) 気体ブローダウンにより水中に生じる動荷重の評価と荷重発生機構（東芝）内田 憲氏
 - (3) Immersed-Boundary法によるせん断流中におけるベシクルの流動解析（日立）山田雄士氏

- (4) 超音波パルスを用いた流動モニタリングに関する基礎研究（東電）和田守弘氏
懇親会（19:00～）

- 2日目 9月30日（日）
Dr.フォーラム・その2（9:00～11:00）
- (5) 時空間的広がりをもつ複雑な動的システムの情報を如何にして縮約してモデル化するか — Forsmark安定性試験データを題材とした適用研究 —（東電）渡辺史紀氏
 - (6) スーパー軽水炉の安全性に関する研究（東大）石渡祐樹氏

参加費（運営費、テキスト代、宿泊費、懇親会費を含む）

一般：15,000円、学生：4,000円

Dr.フォーラム当日、会場にてお支払い下さい。

申込締切 8月20日（月） 但し、定員（30名）になり次第、締切り

申込方法 タイトル「Dr.フォーラム参加」として氏名、所属、連絡先（電話、E-mail）、会場での宿泊の可否、会員種別（正、学生など）、所属部会（熱流動、計算科学技術など）を明記の上、E-mailにて下記まで

問合せ先（熱流動部会「Dr.フォーラム」担当）
九州大学大学院工学研究院 エネルギー量子工学部門 守田 幸路（もりた こうじ）
電話: 092-802-3498
E-mail: morita@nucl.kyushu-u.ac.jp

※個人情報について
本フォーラムへの申込みに伴いご提供いただく個

人情報は、本フォーラムの運営に利用するもので、それ以外の目的では一切使用しません。

国際会議カレンダー（Web のみに掲載）

熱流動部会のホームページ <http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/division/thd/> より最新の情報を入手して下さい。

8月から、まだ確定していなくても熱流動部会で把握した情報は積極的に載せるようにする予定です。また主なキーデータを目安として分かるようにします。申込期限など締め切りは変更されることがありますので、各会議のホームページにて最新情報をご確認していただくようお願い申し上げます。もし誤記、変更などお気づきになりましたら、下記までご連絡をお願いいたします。

<編集後記>

遅れがちなニュースレターの発行に皆様のご協力を頂きましてありがとうございます。本年度も中村がニュースレターの編集を担当させていただきます。冒頭は従来「研究室紹介」と題して各所の研究状況を執筆いただいておりましたが、今回から「研究開発の現状紹介」と題名を変更いたしました。原子力に関係する技術が成熟し多くの研究機関・会社に関係する中、大学の研究室をイメージする従来の題から裾野を広げようとの思いがあります。運営委員会議事録に経緯が載せてあります。

ニュースレターへの原稿は、随時受付を行っております。

す。是非熱流動部会員への情報発信として、研究紹介・会議案内・エッセイ等寄稿お願い致します。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、ぜひ下記宛にe-mailをいただければ幸いです。

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：a-naka@inss.co.jp

sou@mech.kobe-u.ac.jp

熱流動部会のホームページ：

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/division/thd/>

からニュースレターの PDF ファイルは入手可能です。