

# THERMAL HYDRAULICS

熱流動部会ニュースレター (第74号)

AESJ-THD

NEWSLETTER (No.74)

Sep. 12, 2011

## 研究室紹介

福井大学附属国際原子力工学研究所 原子力システム研究室  
望月弘保

福井大学における原子力教育は、2004年の4月から大学院の原子力・エネルギー安全工学専攻として出発しました。博士前期課程の学生定員は27名で、ほぼ毎年定員の学生が修了しております。当初は、機械工学、電気・電子工学、応用物理学、建築建設工学、知能システム工学の先生が集まって原子力の科目を教え始めましたが、残念ながら伝熱流動に関して担当する先生はおりませんでした。私は、2006年より大学院で原子炉システムの教育と研究を始めました。2009年4月に、附属国際原子力工学研究所が設立され、原子力を専門とする先生が増えるとともに、私も高速炉工学部門の一員として再出発をしました。

現在私の研究室には、学部卒研究生3名、博士前期課程学生9名、博士後期課程学生3名、フランス国立原子力科学技術院 (INSTN) の修士相当学生1名、インドインディラガンジー研究センターの研究者1名が在籍しており、高速炉の熱交換器の実験、「もんじゅ」計測データを利用した1次元、3次元での自然循環解析手法の研究、タービン・給水系の配管内の乱流による腐食の解析的研究、IAEA ベンチマーク問題のPhénix 炉自然循環解析等を行っております。以下に研究テーマの一部についてその概要を紹介します。

### 1) 高速炉熱交換器の内部流動伝熱研究

高速炉では、種々の熱交換器を利用していますが、中でも中間熱交換器 (IHX) が最も重要な熱交換器の一つです。かつて動力炉・核燃料開発事業団事業団の大洗工学センターに設置されていた50MWの蒸気発生器施設のIHXで計測されたデータを元に熱伝達率を評価したところ、熱伝達率が、従来から知られてい

る相関式よりかなり低くなるのが分かり、その原因を見出すための研究を始めました。

### 1. IHX 縮小実験装置を用いた研究

実験装置は、50MW施設のIHXの径方向を1/2に縮小し、伝熱管を千鳥配列で1列分設け、長さ方向は正確に縮小せずに1mの伝熱長さを有するFig.1に示すような水-水実験装置を製作し研究を始めました。図右側にある一点鎖線が、IHXの外側と内筒を示します。

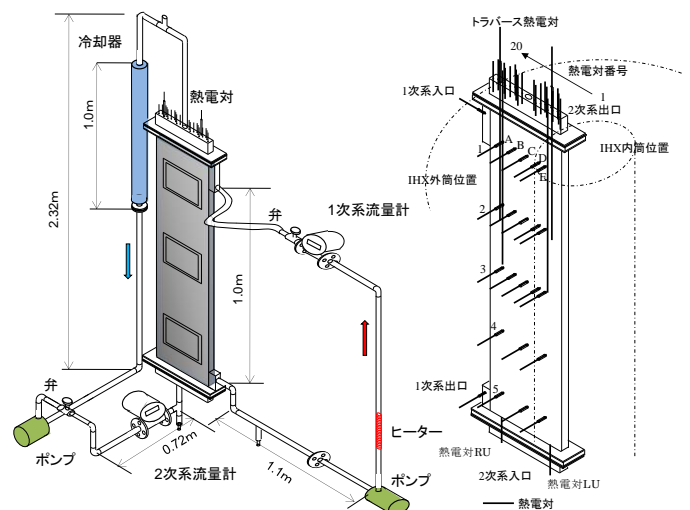


Fig.1 縮小水試験装置と熱交換器部

当初、熱交換器の中では、偏流が生じており、それによって、伝熱に寄与しない伝熱管部があり、熱伝達率が低下したと予測しておりましたが、実験結果は、

予想とは異なるものでした。計測された結果では、自然循環のような層流の状態では、ある高さの径方向の温度分布はほぼ平坦で、偏流は生じていないとの結論になりました。

## 2. IHX 内部の 3 次元伝熱流動解析<sup>[1]</sup>

実験で上記のような結果が出たことにより、CFD コードを用いて同じことを確認するための解析を行うことにしました。この研究は、まず熱交換器の 1 次系と 2 次系の連成解析を行う手法を確立して、その手法を、高速炉の大型の IHX に適用できるようにすること、さらには、高速炉の機器すべてを結合した 3 次元解析ができるようにする事を目指しています。

解析結果は、Fig.2 に示すように、強制循環の状態では、僅かに径方向の温度分布が生じておりますが、低流量では温度分布が平坦になる結果となっており、実験結果を裏付けるものとなっております。定量的にも、計測した結果と 3 次元の解析結果は、良い一致を示していますので、現在は 1 次系と 2 次系全てを 3 次元でモデル化して、自然循環の解析を実施中です。

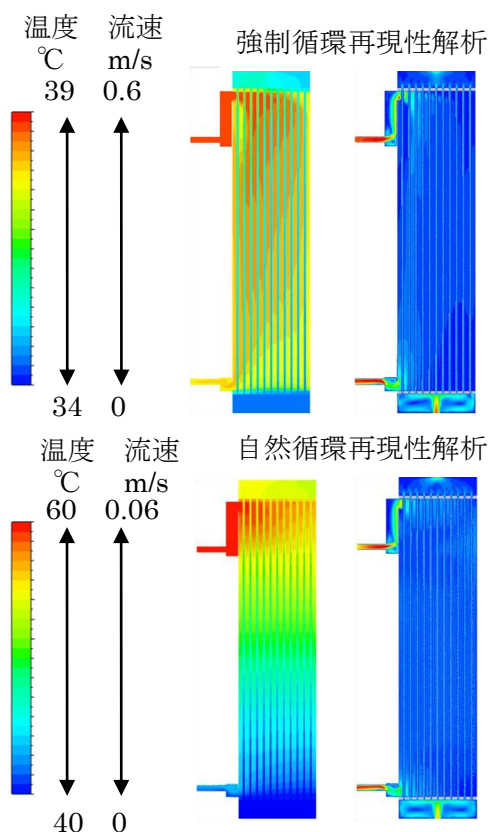


Fig.2 熱交換器実験装置内部の 3 次元解析

## 3. 「もんじゅ」 IHX 内部の 3 次元伝熱流動解析

本テーマは、文部科学省の競争的資金のテーマとして、2009 年より実施しています。熱交換器の低流量での熱伝達率が低下する原因を把握し、さらには、詳

細な解析を行えるようにするためには、3000 本以上の伝熱管を有し、内部に複雑な流量配分や整流機構を有する熱交換器の解析ができるモデルを構築する必要があります。まだ研究の途上にあるため、最終的な解析結果は出ておりませんが、「もんじゅ」の IHX を詳細に CAD で作成して、出来る限り詳細なメッシュを用いて解析しようとしております。それでも、研究室のワークステーションで扱える範囲は、5000 万メッシュ程度の体系に限られ、この大きさにするために、色々と工夫をして解析しようとしています。Fig.3 は、IHX の CAD モデルの一部である、整流機構部を図示したのですが、1 次系のナトリウムを 60° 毎に設けられている入口窓に均一に配分するための工夫がされており、この部分を適切にモデル化する必要があります。また、伝熱管は、7 枚の整流板で保持されており、整流板には小さな穴が多数設けられているのですが、これらを忠実にモデル化するとメッシュ数が極めて大きくなってしまったため、ポアス近似を行う必要も出ています。このようなことを工夫しながら、計算体系を作成し、2011 年度には、既述のモデルを取り込んで、「もんじゅ」の IHX60° セクター体系に対して、1 次系と 2 次系の伝熱連成解析ができるようにする予定です。

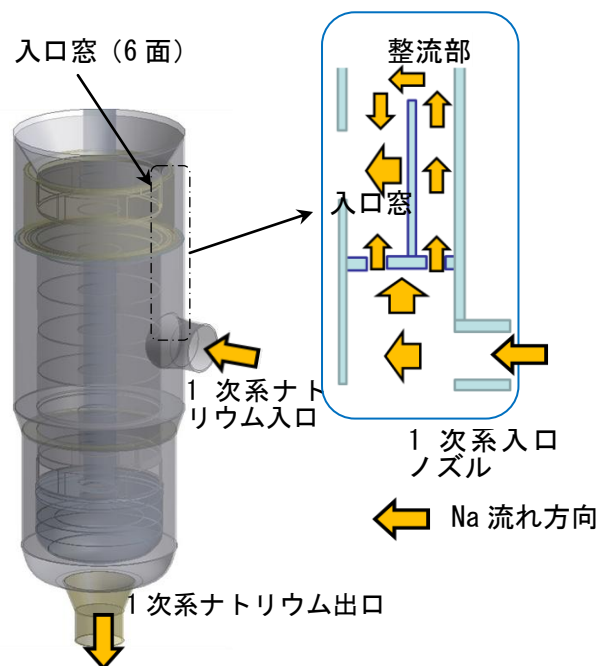


Fig.3 「もんじゅ」 IHX の解析モデル

## II) 管路内乱流挙動に関する研究

現在 ATR 「ふげん」 が解体中ですが、タービン系と給水系の配管は、内部の腐食状況を計測しながら解体しております。実際にプラントに用いられた配管の腐食を計測してデータベース化することによって、関西電力美浜発電所で起きたような、給水系の流れ加速

腐食(FAC)の研究に役立てようとしています。このため、3次元 CFD コードを用いた乱流解析が重要になってきており、私の研究室でも日本原子力研究開発機構からの委託で幾つかの解析的研究を行っています。

### 1. タービン・給水系の二相流動の研究<sup>[2]</sup>

これらの系統の乱流挙動による腐食を解析する前に、系統全体にどのような水単相流あるいは二相流が流れていたのかを把握する必要があります。このため、Fig.4 に示す「ふげん」のタービン系統の解析を行いました。代表的な結果を、Fig.5 に示します。解析ではこの他に、圧力分布、温度分布、液滴分布などを求め、FAC や LDI による腐食が生じやすい箇所を選定して、3次元解析につなげています。

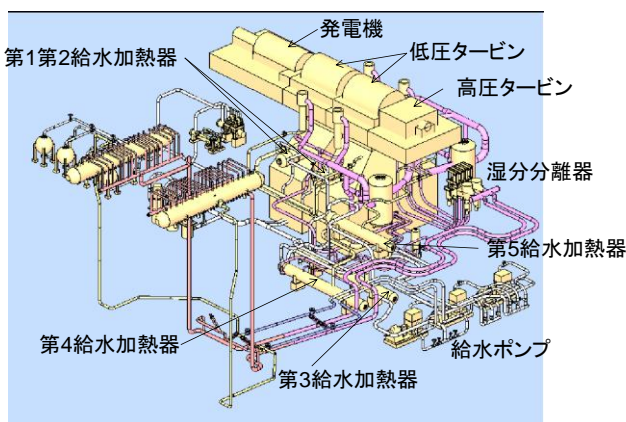


Fig.4 「ふげん」のタービン・給水系

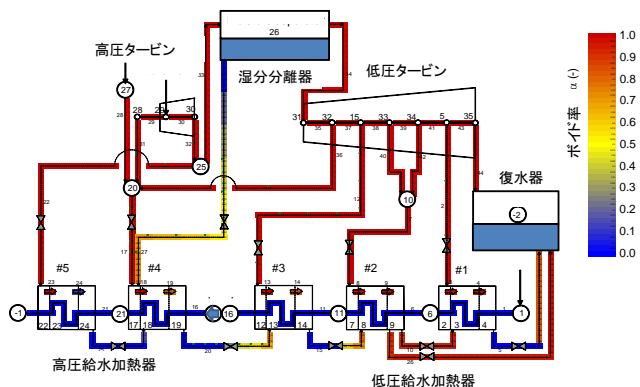


Fig.5 管路内のボイド率分布

### 2. 配管内乱流や液滴による腐食の研究<sup>[3]</sup>

「ふげん」で生じている僅かな配管内面腐食の状態を乱流エネルギーとの関係で説明するため、1次元解析で選定した単相流配管に対しての解析を行っています。Fig.6 には、同じく1次元解析で選定した高圧タービンの抽気ラインに含まれる液滴の流動状況を示しています。このような解析を精度良く行うためには、解析コードの性能を把握しておく必要がありますので、同じ図内に示しているように矢内等<sup>[4]</sup>の計測結果や、OECD/NEA でベンチマーク問題として提案さ

れている計測結果を、CFD コードを用いて解析し、乱流解析手法の適合性を検討しながら複雑な体系での解析を実施しています。

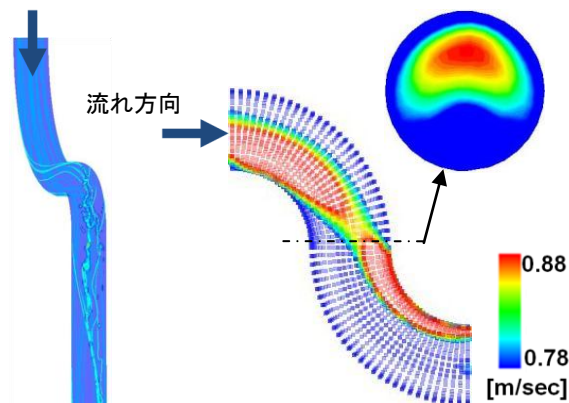


Fig.6 2重ベンドを有する抽気配管内の液滴流動と2重ベンドで生じる速度分布

### III) 高速炉全熱輸送系の解析モデルの研究

高速炉に限らず、原子力プラント全体の動特性を把握するためには、炉心からタービン・給水系までが高速で解析出来る必要があります。これを実現するために、1次元のネットワーク解析コードを開発し、種々の原子炉の型に対応した機器モデルを開発してきました。開発の途中では、例えばポンプの場合、大型の試験装置に用いられているポンプの運転停止の実験を行い、記述したプログラムが正しく試験結果をトレースできるかの検証を行ってきました。このような検証を、熱交換器、制御弁等の機器に対して行い、解析コード NETFLOW++<sup>[5]</sup>が完成しました。

#### 1. 高速炉の全系解析モデルの開発と検証

上述のようにして作成された解析コードを用いて、高速実験炉「常陽」や高速増殖炉原型炉「もんじゅ」で実施され公開されているデータを用いて、解析コードの性能を調べてきました。

「常陽」は、2つのループから構成されており、各ループには空気式の冷却器が2基並列に設けられており、炉心で発生する熱は、すべて空気に放出されています。当研究室では、これらの機器全てをモデル化して自然循環状態が解析できるようにしております。自然循環のような低流量状態では、燃料集合体の外側を浸している液体ナトリウムが、中心から外側の領域に向かってゆっくりと流れることによる熱輸送が存在し、この伝熱を考慮しないと、ドライバー燃料出口温度が実際よりも高く予測されてしまうことが MK-II 照射炉心(100MW 熱出力)で実施された全系自然循環試験結果を用いて研究されてきました。また、常陽の MK-III 照射炉心(140MW 熱出力) 状態で行われた原子炉トリップ後の2次系自然循環計測結果を用いて解析コードを検証しました。<sup>[6]</sup>

「もんじゅ」に対しては、Fig. 7, 8に示すように、非常に管路の多い複雑な解析体系になりますが、このモデルによって、プラントの任意の部分で生じた異常による過渡現象が解析できるようになりました。Fig. 9は、「もんじゅ」で実施された、45%熱出力時のタービントリップ試験結果を NETFLOW++コードで解析した結果ですが、主要なパラメータは、試験結果をトレースしています。また、解析に要する時間は、普通のパソコンで、実時間の100倍以上の速度で実施することができ、プラントの状態を素早く把握できるようになっております。

現在は、この解析モデルを用いて、タービンと給水系で生じる、警報レベル以下の異常によるプラント挙動を解析し、このような異常を兆候レベルで把握できるようにする研究を行うと共に、自然循環時3次元流動伝熱解析の境界条件にも利用しています。

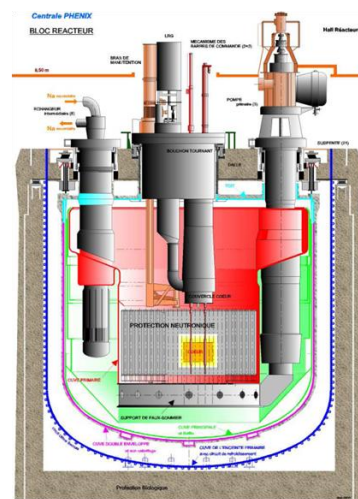


Fig.10 Phénix の1次系概略

## 2. Phénix 炉 EOL 自然循環試験ベンチマーク解析

フランス原子力庁(CEA)は、Fig.10に示す高速増殖炉 Phénix を閉鎖する直前に、End-Of-Life としての自然循環試験を行い、IAEA にベンチマーク問題として提案しました。このベンチマークには、フランス CEA、IRSN、アメリカの ANL、ロシアの IPPE、インドの IGCAR、スイスの PSI、韓国の KAERI と私の研究室が参加しました。Phénix は、プール型的高速炉であるために、解析経験のない私は、試行錯誤の連続でしたが、修士の学生と2人で何とか解析を終了し、他の研究機関が提出してきた解析結果とほぼ同じ結果になっていることが確認できました。この結果は、現在 ANL の研究者が取りまとめている最中ですが、近々 IAEA より公開されるものと思われます。

この解析を終了した時点での課題は、Hot-pool と Cold-pool 間の伝熱でした。解析では両者は断熱されていると仮定していたのですが、炉心出口から IHX に熱いナトリウムが到達する間に温度がかなり低下していることが分かりました。現在フランス国立原子力科学技術院からの長期インターンシップ学生が、修士論文の課題としてこの部分をモデル化し直して計算することに取組んでおり、以前に比べより計測結果に近い結果が得られています。今後は、ANL との共同研究の一環として EBR-II のベンチマーク解析に参加する予定です。

## IV)参考文献

[1] M. Takano and H. Mochizuki, ICONE-19, 43412, Chiba, Japan (2011).

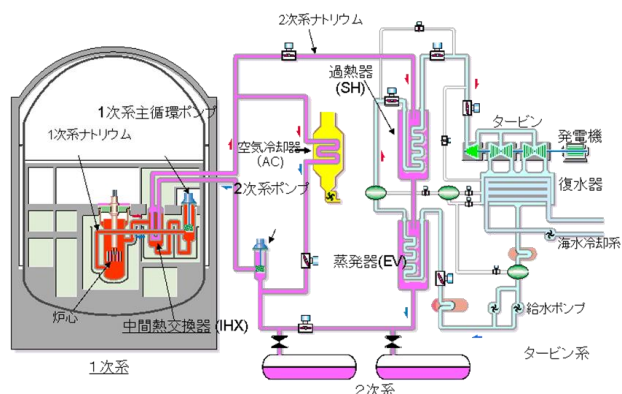


Fig.7 「もんじゅ」の熱輸送系の概略

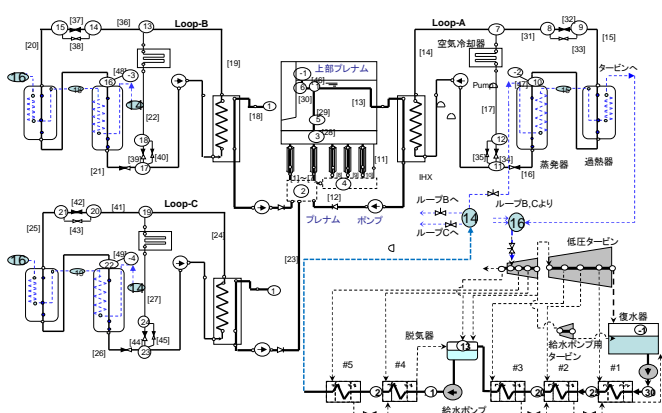


Fig.8 「もんじゅ」の全熱輸送系解析モデル

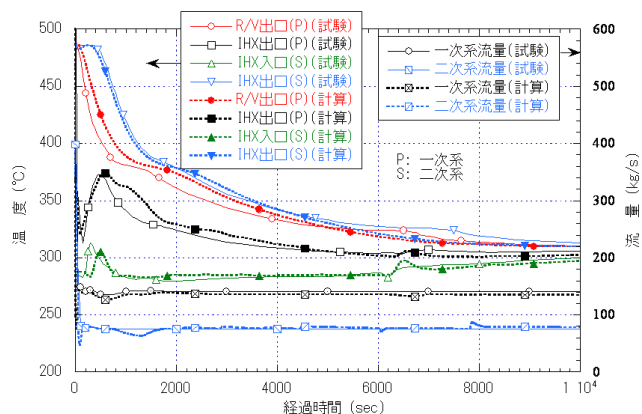


Fig.9 45%熱出力でのタービントリップ試験の解析

[2] H. Mochizuki and T. Tsukamoto, J. of Nuc. Sci. & Tec. **48**, 5, (2011), pp.786-796.  
 [3] M. Takano et al., ICONE-19, 43415, Chiba, Japan (2011).

[4] 矢内等、日本原子力学会 2010 年春の年会、E24.  
 [5] H. Mochizuki, NED, **240**, (2010) p.577-587.  
 [6] H. Mochizuki, FR09, Kyoto, FR09P1270, (2009).

## 運営委員会報告

### 熱流動部会運営委員会(H23-1) 議事録

- (1) 日時：平成 23 年 6 月 15 日(水) 13:00-16:30
- (2) 場所：電力中央研究所 本部第 3 会議室
- (3) 配布資料：
  - ① 議事次第・平成 23 年度役員リスト
  - ② 総務小委員会活動報告
    - 参考資料②-①熱流動規約
    - 参考資料②-②平成 22 年度収支予算及び実績表
    - 参考資料②-③組織別 長期事業・予算規模計画案
    - 参考資料②-④平成 22 年度末報告
  - ③ 企画委員会活動報告
  - ④ 研究小委員会活動報告
  - ⑤ 国際委員会活動概要
  - ⑥ 出版編集小委員会の活動概要

### 議事

#### 1. 部会長挨拶 (片岡部会長)

第 1 回運営委員会の開催にあたって、片岡部会長より挨拶があり、震災と福島事故により原子力にとって厳しい状況が続くが、原子力の信頼回復のため出来る限りのことを行いたいとの所信が述べられた。

#### 2. 自己紹介

平成 23 年度役員の自己紹介が行われた。

#### 3. 総務委員会報告 (西総務委員長)

資料 2 および参考資料を用いて、以下に示す議事が行われた。

##### 3.1. 部会表彰規約について

「表彰委員会」を「表彰小委員会」、「総会」を「全体会議」と改訂するとして上で、改訂を全体会議に諮ることとした。

##### 3.2. 熱流動部会予算

H22 年度の決算が確認され、H23 年度の繰越金については、10%が本部管理費として繰り入れられたことが確認された。WG 予算については、H22 年度期中から部会予算とは別に管理されることになったこと、H23 年度は期首から別管理となること

が確認された。また、H23 年度からは、セミナーについても別管理となることが確認された。さらに、部会長期予算計画について、日本開催の不定期事業(Dr.フォーラム、日韓学生セミナー、国際会議)への支出予定や、部会予算の繰越金のあり方について議論がなされた。また、安全工学シンポジウムへの共催金支出：安全部会との調整を図ることが確認された。

#### 3.3. 部会等運営委員

熱流動部会の部会等運営委員として、大川委員の任期満了に伴い、西委員が推薦されたことが確認された。

#### 3.4. 部会等運営委員会からの連絡

「2011 秋の大会」が 4 日間の開催となること、熱流動部会からの提案企画(2 件)が採択されたこと、学生連絡会ポスターセッション審査委員について、片岡部会長を推薦すること、などが議論された。

#### 4. 企画委員会報告 (木村企画委員長)

Dr フォーラムの本年度の開催について、参加者数の減少、日程の制約が懸念されるものの、例年通り開催(9/22~9/23)することが確認された。また、内容の見直しについては、今後検討を進め次回以降の改善に反映させることが確認された。

#### 5. 研究小委員会報告 (吉田研究委員長)

資料 4 を用い、以下に示す議事が行われた。

##### 5.1. 専門委員会活動

「熱水力安全評価基盤技術高度化検討 WG」の活動について報告がなされた。

##### 5.2. 新規専門委員会

「福島事故をうけた伝熱流動現象の調査・検討」研究専門委員会(仮称)の新規設立について議論された。伝熱流動の側面からみた課題抽出、R&D のアクションプラン等の検討に重きを置くこと、既設の委員会(分科会)との連携をとること、計算科学技術部会等との連携強化すること、主査、委員候補、他学会の活動との差別化に配慮すること、活動期間は 2011.10 から 2 年間で予定することなどの意見があった。

##### 5.3. 「2011 年秋の大会」部会企画セッション

2 件が予定されていることが確認された。

#### 5.4. 「2010年秋の大会」部会企画セッション講演スライド

公開準備中であるとの説明があった。

#### 6. 国際委員会活動概要報告（池田国際委員長）

資料5を用い、以下に示す活動状況が報告された。

##### 6.1. NURETH-14（2011.9.25～30）

共催手続が完了していることが説明された。

##### 6.2. NTHAS8

国内の原子力関連国際会議は福島事故を受けて中止や延期されるケースもあるが、原子力熱流動専門家による原子力安全に資する討議を尽くすことが極めて重要であるとの観点から、実施に向けて準備を進める方針であることが説明された。また、場所・日程（案）、組織委員会・役員候補（案）について説明があった。また、学生セミナーについても、NTHAS8の準備進捗に合わせて準備開始されることが説明された。

#### 7. 広報小委員会の活動概要（染矢広報委員長）

部会ニュースレター(73号)の発行準備状況の報告

がなされた。

#### 8. 出版編集小委員会活動報告（波津久出版編集委員長）

論文編集委員（伝熱流動）の紹介と掲載状況の報告、JNSTのTaylor & Francis社との同出版化について、またJNSTのインパクトファクター推移の報告がなされた。

#### 9. その他

「2011年春の年会」における全体会議での承認未了事項について、「2011年秋の年会」における全体会議において実施されるべき事項が確認された。

#### 10. 副部長挨拶（木下副部長）

木下副部長より挨拶があり、熱流動の面から原子力を支えていくために運営委員として努力したい旨の所信が述べられた。

以上

---

## 秋季セミナー「Dr.フォーラム」の御案内

---

熱流動部会および計算科学技術部会（共催）では、原子力学会「秋の大会」に併せて毎年実施しております秋季セミナー「Dr.フォーラム」の開催を予定しております。秋季セミナー「Dr.フォーラム」は、学位取得後数年の方々を講師に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11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。

今回は小倉から近く、関門海峡を一望にできる国民宿舎、めかり山荘で、5名の講師の方々から知的興奮に満ちた研究成果を発表いただけます。

場所: 国民宿舎 めかり山荘(TEL: 093-321-5538)

<http://www.kcta.or.jp/mekari/>

(「秋の大会」会場、北九州国際会議場から車で約30分: 北九州市門司区大字門司3270-8-3(めかり山頂))

#### 【プログラム】

1日目 9月22日(木)

Dr.フォーラム・その1(15:00～)

○ 学位取得者による研究紹介1

(1) ナトリウム燃焼、ナトリウム-水反応の数値解析手法の構築(大阪大学) 高田 孝 氏

(2) 蒸気爆発トリガリングにおける蒸気膜崩壊過程に関する研究(電力中央研究所) 新井 崇洋 氏

(3) 超音波の音響定在波中の浮遊物体挙動に関する研究(株式会社東芝) 青木 一義 氏

2日目 9月23日(金)

Dr.フォーラム・その2(9:00～11:00)

○ 学位取得者による研究紹介2

(4) 乱流LESの高度化・高速化の研究(日本原子力研究開発機構) 小野寺 直幸 氏

(5) 高精度気液二相流数値解析手法の研究(日本原子力研究開発機構) 伊藤 啓 氏

問合先: 木村 暢之(原子力機構)

(E-Mail: [kimura.nobuyuki@jaea.go.jp](mailto:kimura.nobuyuki@jaea.go.jp))

過去のフォーラムの実施報告が熱流動部会のWebsite(<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/division/thd/>)の「ニュースレター・アーカイブス」にあります。(ニュースレター第60号、第63号、第71号)あわせてご参照ください。

---

## 平成 23 年度 熱流動部会役員

---

部会長	片岡 勲 (大阪大学)	同副委員長*	山野 秀将 (JAEA)
副部会長	木下 泉 (電力中央研究所)	企画委員長**	木村 暢之 (JAEA)
総務委員長	西 義久 (電力中央研究所)	出版編集委員長**	波津久 達也 (東京海洋大学)
総務副委員長	守田 幸路 (九州大学)	同副委員長*	齊藤 泰司 (京都大学)
広報委員長**	染矢 聡 (産業技術総合研究所)	表彰委員長	大塚 雅哉 (日立製作所)
同副委員長*	的場 一洋 (三菱重工)	海外担当役員	二ノ方 壽 (東京工業大学)
研究委員長*	吉田 啓之 (JAEA)		
国際委員長**	池田 秀晃 (三菱重工)		

\*:任期2年の1年目、 \*\*:任期2年の2年目

---

## 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。

---

---

### <編集後記>

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。74号は北九州市における2011秋の大会直前の発行となりました。熱流動部会員の皆様にはドクターフォーラムにも積極的に御参加頂き、今後の熱流動部会をますます盛り上げるであろう若手研究者らとのコミュニケーションを促進して頂けると幸いです。

ニュースレターに関するご質問・ご意見・ご要望等ございましたら、下記宛にe-mailを頂けると幸いです。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： [s.someya@aist.go.jp](mailto:s.someya@aist.go.jp)  
[ichiyo\\_matoba@mhi.co.jp](mailto:ichiyo_matoba@mhi.co.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。