

THERMAL HYDRAULICS

熱流動部会ニュースレター (第 91 号)

AESJ-THD

NEWSLETTER (No.91)

Mar. 31th 2016

研究室紹介

福井大学 附属国際原子力工学研究所
熱水力部門 渡辺 正

1. まえがき

福井大学附属国際原子力工学研究所は、2009年に福井大学文京キャンパス（福井市）に設置され2012年に敦賀市に移転しました。敦賀駅前に研究所の建物があるだけですが、福大敦賀キャンパス、福大原研として活動を続けています。熱水力部門をはじめ、炉物理、燃材料、構造廃炉、防災危機管理、国際交流などの部門があり、現在9名の専任に加え、特命、客員等、幅広い分野の教員が所属しています。敦賀市とその周辺に多い原子力関連施設との協力も含め、セミナーや実習、講演会などを通じ、地域に根差した大学として活発な研究教育活動を行っています。学部卒研生から大学院生まで24名の学生が所属しており、留学生、研修生、社会人博士等も含め、研鑽研究に努めています。卒業後の進路としては、原子力関連とその他の企業、研究機関、電力、官公庁等が多くなっています。

熱水力部門は、原子炉事故の防止や緩和対策の進展に寄与するために、過渡変化や事故時の熱水力現象、原子力分野の様々な気液二相流現象の研究を通して、安全評価手法の高度化と最適なアクシデント・マネージメントの確立を目指しています。原子炉の安全解析コード、数値流体力学（CFD）コード、自作の二相流解析コードなどを利用した数値シミュレーションによる研究が中心で、他大学や研究機関の、実験や理論グループ、シミュレーショングループとの協力も行っています。本稿では、最近取り組んでいる研究テーマについて紹介させていただきます。

2. 研究テーマの紹介

2.1 原子炉事故時の熱水力挙動

原子炉事故時の熱水力挙動と運転員操作の有効性を明らかにするために、安全解析コードやCFDコードによる研究を進めています。これまで、原子炉に特

徴的な高温高圧下での各種個別効果実験や総合効果実験の解析を通して、原子炉の安全評価に使われる安全解析コードの物理モデルや数値モデルの検討を進めてきました。

代表的な安全解析コードであるTRACを用いた福島第一原発事故の解析では、炉心溶融までの熱水力挙動がよく再現できることを示し、海水注入のタイミングや時間余裕の検討を行いました[1]。これに基づき、当初議論のあった、格納容器内の圧力上昇が緩やかである原因について解析を進め、格納容器破損による漏洩と津波による外部冷却の影響について明らかにしました[2]。Fig.1は、格納容器の圧力変化を実測値と比べたものですが、漏洩と冷却のいずれを仮定しても圧力上昇は緩やかになること、炉内の熱流動現象には大きな影響を及ぼさないこと等がわかりました。

事故の際に注入される非常用炉心冷却水は、炉心の冷却に必要なのはもちろんですが、配管や圧力容器といった構造物の観点からは、加圧熱衝撃の原因になることが懸念されています。そこで、構造物の健全性評価において、重要な境界条件となる低温冷却水の流動挙動についての検討を進めています。これまで、注入水は、配管から圧力容器まで、低温領域を保ったまま流れることを三次元CFD解析により明らかにしてきました[3]。現在、詳細なCFD解析に基づき、構造物の応力評価が構造グループによって進められており、より厳しい条件などを安全解析コードにより検討しているところです。Fig.2は、蒸気発生器伝熱管破断事故の際の低温側配管での注入水による温度低下を、安全解析コードRELAP5により調べたものです[4]。ここでは、低温側配管と同時に上部プレナムに注入する効果を調べており、ベースケースでは両方有り、ケースIでは、配管のみ、ケースIIでは、両方

無し、ケース III では、上部プレナム分を配管に上乘せして注入、という条件を検討しています。この解析により、上部プレナム注入の効果が小さいこと、配管注入のみで、温度は大きく低下することなどが明らかになりました。

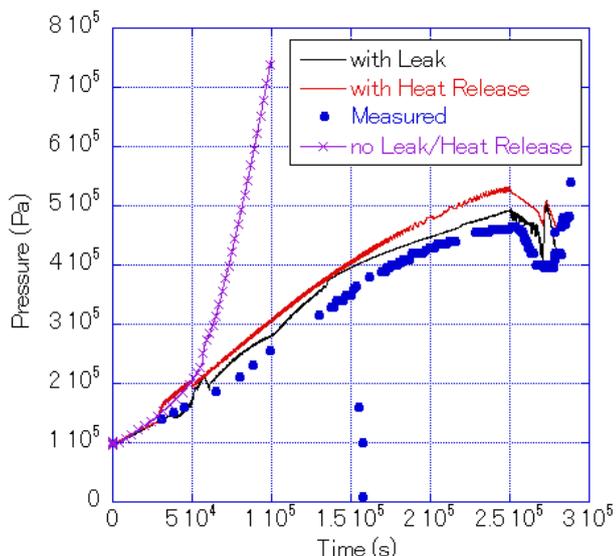


Fig. 1 Analysis of station blackout accident: Containment pressure

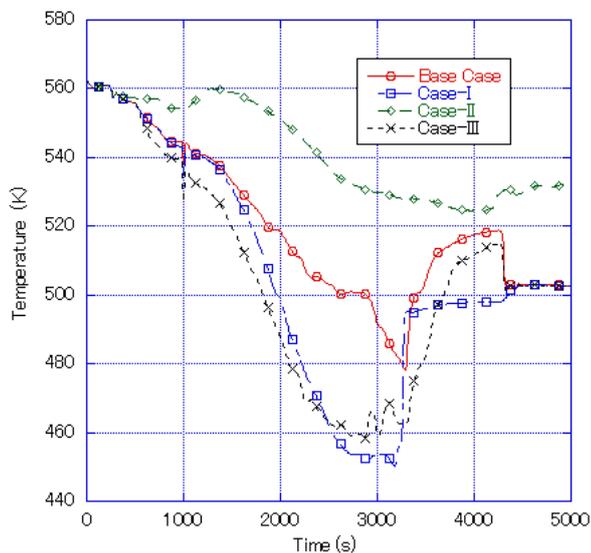


Fig. 2 Analysis of steam generator tube rupture accident: Cold-leg fluid temperature in broken loop

これらの知見に基づき、さまざまな小破断冷却材喪失事故の解析を進め、構造材にとってより厳しくなる条件を検討するとともに、詳細な冷却水の流動挙動を CFD 解析により検討しているところです。また、安全解析コードにより、地震時の冷却水挙動を解析するための手法を定式化し[5]、冷却材喪失事故と地震が重畳するような複合現象についても検討を進める予定です。

2.2 蒸気発生器での自然循環挙動

加圧水型原子炉の冷却材喪失事故時や電源喪失時には、炉心で発生する熱を自然循環により取出すことが期待されています。これは、炉心で温められた冷却水が、蒸気発生器で熱を取られて冷やされることで、密度差による自然対流を起こすことを利用しています。蒸気発生器は、逆 U 字型の細長い伝熱管が多数設置された熱交換器で、出口側が温度が低く、密度が高くなるため、入り口側より圧力が高くなります。このため、一部の伝熱管では逆流が起こることが知られており、事故時の冷却特性に影響を及ぼすことが懸念されています。

本研究では、自然循環時の蒸気発生器内の流動について、理論解析、安全解析コードによるシステム解析、CFD コードによる詳細三次元解析、個別効果実験を行い、安定性と不安定流動について検討してきました。

まず、Fig.3 に示すように、伝熱管内の流動と、それ以外の原子炉のループ流動とを、それぞれモデル化し連成させる解析モデルの定式化を行いました。この系において、冷却水の自然循環を表す定常解に、微小な摂動が加えられた際の、その後の時間変化を調べる線形安定性解析を行い、安定な循環流の成立性を明らかにしました [6]。Fig.4 は、伝熱管の長さに対して、安定な順流が保てるかどうかを示した安定性マップです。実線が安定条件を示し、記号が伝熱管の状態を表しており、実線より上の領域にあれば、安定な順流が成立します。図は、ある自然循環条件において、長さの異なる 9 種類の伝熱管がある場合、長いほうの 2 種類の管が停滞することにより、残り 7 種類の伝熱管内の流動が安定な順流になることを示しています。この判定結果は、実験の観測とも一致しました。

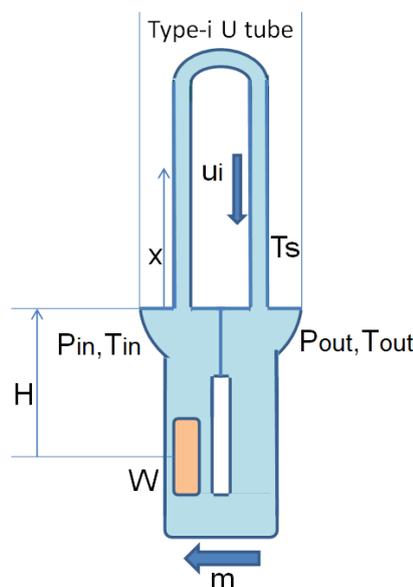


Fig. 3 Analysis of steam generator flow instability: Analytical model

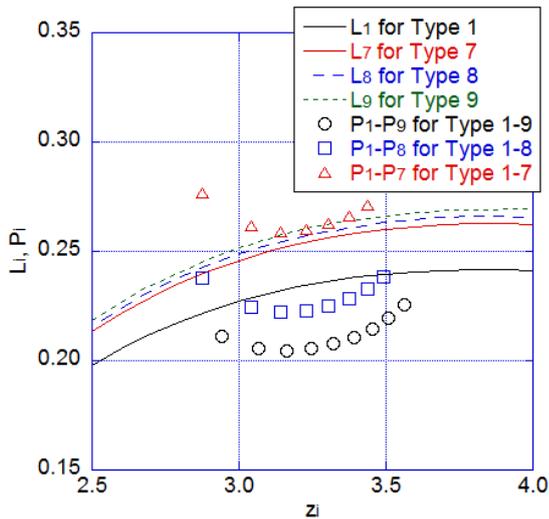


Fig. 4 Analysis of steam generator flow instability: Stability map

次に、Fig.5 に示すような、加熱部と複数の伝熱管を持つ熱交換部分からなる小規模なループ試験装置により、伝熱管の一部で逆流が起こる状態を実験的に模擬し、ループ全体の流動を安全解析コード RELAP5 により、また、個々の伝熱管内の流動を CFD コード FLUENT により解析しました[7]。

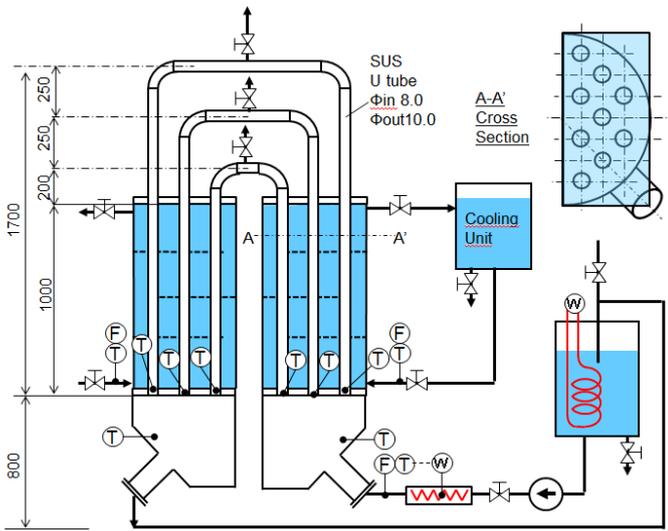


Fig. 5 Analysis of steam generator flow instability: Small-scale experiment

Fig.6 は、RELAP5 によって得られたループ流動の解析結果を境界条件として行った三次元流動解析の結果の一部で、伝熱管群の入り口付近の温度分布と速度ベクトルを示したものです。ループ全体では自然循環が成立している条件でも、一部の伝熱管で逆流や停滞が起こることが確認され、また、細い伝熱管の内部に上昇流と下降流が同時に現れることもわかりまし

た。自然循環の安定性は、これまで考えられていたような、管毎の単純な順流、逆流現象ではなく、複雑な流動現象であることが明らかになりました。

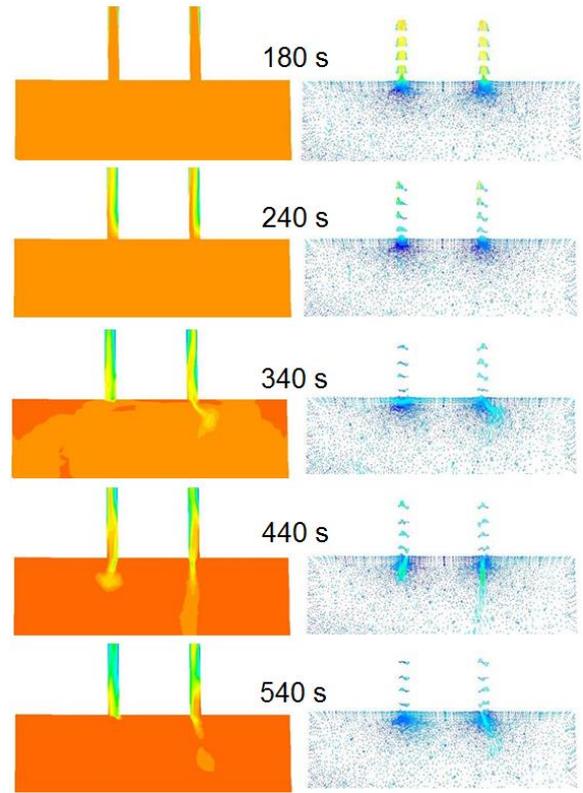


Fig. 6 Analysis of steam generator flow instability: Temperature and velocity distributions

この解析では、安全解析コードによる一次元のシステム解析と、CFD コードによる三次元解析を、計算の途中経過を交換しながら連成させて実行することにより、それぞれの流動の微妙な変動まで正確に取り入れた解析を実現しました。CFD コードのみで原子炉の流動シミュレーションを行うことは、まだ容易ではないため、この連成解析の手法は、より詳細な安全評価解析の現実的な実施手段と考えられます。このため、本解析手法を、より大きな総合効果実験や実炉での様々な事故条件へ応用するための取り組みを進めているところです。

2.3 浮遊液滴の回転振動挙動

原子炉の過酷事故解析を行う際には、高温熔融物の物性が必要になります。また、熔融金属利用や材料創製技術にとっても、高温熔融材料の物性評価は不可欠です。しかしながら、炉心熔融が起こるような高温下では通常の直接接触による測定は困難となり、材料と保持容器との相互作用による影響も懸念されます。このため、浮遊液滴を用いて、その形状振動や回転形状の変化から粘性や表面張力を測定する技術が検討さ

れています。

本研究では、回転、振動する液滴挙動の数値シミュレーションを、レベルセット法と呼ばれる手法により定量的に行うことを目指しており [8]、これまで、回転数や形状振動の振幅が大きくなると、線形理論から外れる、いわゆる非線形効果について、検討してきました。まず、回転数が増加すると振動周波数も増加すること、振幅が増加すると、逆に、振動周波数は減少することを示し [9]、回転数と振幅を制御することで、周波数変化がなくなることを確認しました [10]。次に、周波数変化は、表面張力と遠心力のバランスにより生じていることを示し、平均液滴形状を球に保つことで周波数変化をゼロとすることができることを明らかにしました [11]。この関係は液滴の種類に関わらず成り立つことがわかり、後に、実験でも確認されました [12]。

地上で液滴を浮遊させるためには、何らかの外力が必要となりますが、液滴の挙動にはその影響が現れます。超音波を利用する手法では、圧力定在波の節の位置に液滴が保持されることを利用しますが、これが周囲気体の密度変動によって引き起こされており、一方、液滴周囲に現れる音響流は、圧力変動に起因していることがわかりました [13]。また、液滴表面には複雑な渦が現れることが知られていますが、詳細なシミュレーションを行うことにより、表面近傍の薄い層には、周囲と位相の異なる流れが誘起されることがわかりました [14]。Fig.7 は、超音波の1周期の間での表面近傍の流れの変化を示したもので、左側の青い部分が液滴内部、右側の赤い部分が周囲の気体です。表面流は時間帯によっては、周囲の流れに対し逆流になっていることがわかります。この振動流が何周期もの後、平均流として渦を含む音響流に発展することがわかりました。

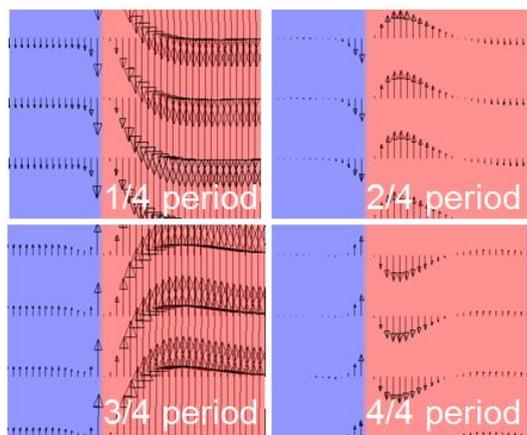


Fig.7 Analysis of levitated liquid droplet:
Surface flow on droplet in acoustic standing wave

液滴の回転形状の変化から粘性を求める手法では、

液滴形状が、球から回転楕円体を経て非軸対称形状になることを利用します。Fig.8 は、回転により形状が変化する様子を示したのですが、アレイ状になってからの回転数と伸びの関係は実験で得られているものとよく一致することがわかりました [15]。

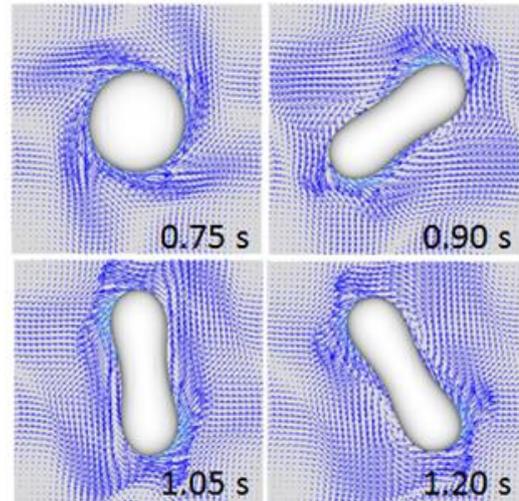


Fig.8 Analysis of levitated liquid droplet:
Shape variation of rotating droplet

浮遊液滴の利用技術は、様々な分野への応用が考えられており、理論、実験グループとの協力のもとに検討を進めてきましたが、液滴内外の流れ場は非常に複雑であることがわかってきました。現在、回転変形や液滴表面での蒸発凝縮の影響等の検討を進めているところです。今後、さらに現象の理解を深めるとともに、適用範囲の広い物性測定技術や材料創製のための制御技術として確立するための検討を続けていく予定です。

3. あとがき

本稿では、熱水力部門での、数値シミュレーション研究について、最近のトピックスを中心に紹介させていただきました。福大原研は、大学院中心のこじんまりした研究所ですが、そのため、分野を超えて、また、先輩後輩のつながりが大変良好です。2016 年度から工学部の機械・システム工学科に原子力安全工学コースが設置され、学部 3 年次から研究所に配属されることとなります。教育の充実と合わせ、研究開発についても、より一層進展させていきたいと考えています。

最後になりましたが、このような研究紹介の機会を与えていただきましたことに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 渡辺他、”BWR 全電源喪失事故の解析 福島第 1 発電所 2 号機における炉心損傷まで

- の熱水力挙動”、日本原子力学会和文論文誌、10 (2011) 240-244.
- [2] T. Watanabe, et al., “Analysis of BWR long-term station blackout accident using TRAC-BF1,” *Annals of Nucl. Energy*, 49 (2012) 223-226.
- [3] J. Cai and T. Watanabe, “Numerical simulation of thermal stratification in cold legs by using OpenFOAM,” *Progress in Nucl. Sci. and Tech.*, 2 (2011) 107-113.
- [4] T. Watanabe, “Effects of ECCS on the Cold-Leg Fluid Temperature during SGTR Accidents,” *Int. J. of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 9 (2015) 1439-1443.
- [5] T. Watanabe, “On the numerical approach for simulating reactor thermal hydraulics under seismic conditions,” *Annals of Nucl. Energy*, 49 (2012) 200-206.
- [6] T. Watanabe, et al., “Stability of single-phase natural-circulation flows in steam generator U tubes,” *Annals of Nucl. Energy*, 60 (2013) 344-349.
- [7] T. Watanabe, et al., “System-CFD coupled simulations of flow instability in steam generator U tubes,” *Annals of Nucl. Energy*, 70 (2014) 141-146.
- [8] T. Watanabe, “Nonlinear oscillations and rotations of a liquid droplet,” *Int. J. Geology*, 1(2010)5-13.
- [9] T. Watanabe, “Numerical simulation of oscillations and rotations of a free liquid droplet using the level set method,” *Computers and Fluids*, 37(2008)91-98.
- [10] T. Watanabe, “Zero frequency shift of an oscillating-rotating liquid droplet,” *Physics Letters A*, 372(2008)482-485.
- [11] T. Watanabe, “Frequency shift and aspect ratio of a rotating-oscillating liquid droplet,” *Physics Letters A*, 373(2009)867-870.
- [12] Y. Abe, et al., “Nonlinear Dynamics of Levitated Droplet”, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, Vol. 30 No. 1, 42-49(2013).
- [13] T. Watanabe, “Numerical Simulation of Droplet Motion and Two-Phase Flow Field in an Oscillating Container,” *Int. J. Multiphysics*, 5(2011)35-46.
- [14] T. Watanabe, “Numerical Simulation of oscillating flow field including a droplet,” *Int. J. Multiphysics*, 7(2013)19-30.
- [15] T. Watanabe, “Deformation of a rotating two-lobed droplet,” to appear in *Int. J. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*.

運営委員会報告

熱流動部会 H27 年度第 2 回運営会議 議事録

1. 日時：平成 28 年 2 月 8 日(月)13:30～16:30

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：

上出 部会長(JAEA)

谷本 副部会長(三菱重工)

西田 総務小委員会委員長(日立 GE)

吉田 総務小委員会副委員長(JAEA)

米本 広報小委員会委員長(熊本大学)

野崎 研究小委員会委員長(テプコシステムズ)

中村 国際小委員会委員長(INSS)

永武 国際小委員会副委員長(JAEA)

小瀬 企画小委員会委員長(大和システムエンジニア)

山本 出版編集小委員会委員長(東芝)

杉本 表彰小委員会委員長(京都大学)

4. 布資料

27-2-1:日本原子力学会 熱流動部会運営会議
(平成 27 年度第 2 回)

27-2-2:企画小委員会活動報告

27-2-3:研究小委員会活動報告

27-2-4:国際小委員会活動概要報告

27-2-5:広報小委員会活動報告

27-2-6:出版編集小委員会活動概要

27-2-7:表彰小委員会報告

5. 議事

1) 部会長挨拶(上出 部会長)

「もんじゅ」の件については、各方面にご心配をおかけした。様々な方から応援をいただいたことについて感謝している。熱流動部会の活動に関しては、皆様の協力の下、H27 年度は表彰もそれなりに応募があり、また、若い人を巻き込んだ活動などが活発に実施できて良かったと思う。残り少ないですが、ご協力について、宜しくお願ひしたいとの挨拶があった。

2) H28 年度熱流動部会役員(案)について

H28 年度熱流動部会役員(案)が配布資料を基に説明された。3 月の全体会議で承認予定である旨の説明があった。なお、ミラノ工科大学の二ノ方先生については、来年度継続の可否を上出部会長から問い合わせることになった。

3) 総務小委員会活動報告(西田 総務小委員会委員長)

3-1) 春の年会における全体会議の予定について

日本原子力学会 2016 年春の年会における、熱流動部会全体会議について、3 月 26 日の 12 時～13 時に、D 会場において開催されることが説明された。予定の確保及び資料の準備などの依頼があった。

3-2) H27 年度決算予定、H28 年度予算：

昨年度、沖縄で開催された NUTHOS10 の余剰金や次年度繰越金に関する説明がされた。また、H28 年度予算では、若手交流フォーラム、NTHAS 併設の学生セミナー等の経費に関する説明がされた。NTHAS に関して、支部からの収入の確定の有無、国際協力推進費について質問があった。各支部の収入は予算として確保していただいている金額を提示していること、国際協力推進費は学会本部からの予算であることが説明された。また、熱流動部会は活動が活発であり、そのため支出や収入も多くなっていることが補足として説明された。

3-3) その他

部会賞だけでなく、学生を海外に派遣するような事業を検討中であることが説明された。部会等運営会議の熱流動部会の担当が 2016 年 6 月までであることが説明された。ポスターセッション発表選考委員として上出部会長を選出したこと、プログラム編成委員などについて、配布資料をもとに説明があった。さらに、内規として部会のホームページに掲載されている内容について、(内規は部会内に留めるという本来の意味からすると)細則とする予定であることが説明された。

4) 企画小委員会報告(小瀬 企画小委員会委員長)

4-1) 企画小委員会の構成について

配布資料を用いて、現在の企画小委員会の構成について、若手交流 WG と小委員会委員長で構成されること、来年度、WG についても構成を変更の予定であることが説明された。

4-2) 若手交流フォーラムについて

第 3 回の若手交流フォーラムが、静岡大学の 2015 秋の大会と併せて開催され、参加者が 11 名(うち学生 7 名)であったこと報告された。浜岡原子力発電所の見学は、防潮堤や炉心の実物大模型など、興味深い内容であり、学生にも

好評であったことが紹介された。フォーラム開催に関する、参加費、懇親会費などについて資料をもとに報告された。部会優秀発表賞（若手交流フォーラム）の選考結果について優秀者3名の提示があり、この中から部会優秀発表賞選出を依頼する旨の説明があり、協議の結果、以下の一名を選出した。

宮野 直樹（電気通信大学）
「サブクール沸騰における蒸気泡の伝熱面離脱メカニズムの解明」

また、H28年度は秋の大会に連続させるか、別の日程とするか検討中であることが説明された。

4-3) 第二回企画小委員会の開催報告

第二回企画小委員会を開催し、優秀発表者の選考や第4回に向けた計画検討が行われたことが説明された。

5) 研究小委員会の活動概要（野崎 研究小委員会委員長）

5-1) 研究専門委員会等の活動概要について

「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス研究専門委員会」、「水素安全対策高度化特別専門委員会」及び「熱水力技術戦略マップのローリング（継続的改訂）」WG(仮)の状況について報告があった。WGはJAEA中村氏を中心に設立趣意書を準備中であることが紹介され、今後、設立趣意書正式版受領後、運営委員会内でメール審議を行い、了承された場合には全体会議での説明が行われる予定であるとの説明があり、了承された。これらについて、「水素安全対策高度化」特別研究専門委員会について、活動報告が必要ではとの質問があり、一般公開セミナーなどが開催されているので、報告に記載することとなった。

5-2) 企画セッションについて

春の年会において、熱流動部会関係の企画セッションとして、「福島第一原子力発電所時の核分裂生成物挙動：事故時のFP挙動の概要と今後の総合的ソースターム解析への道」及び、「高温ガス炉の安全性について」（「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」研究専門委員会中間報告）が行われることが資料を用いて紹介された。

6) 国際小委員会の活動概要（中村 国際小委員会委員長）

NTHAS10(2016年11月27日～30日、京都市、メルパルク京都)の開催準備状況について報告

があった。ホームページの仮運用を始めたので、運営委員会委員に対して試用の依頼があった。NTHASの特別企画として、京大杉本先生が27日午後に「シビアアクシデントショートコース（仮）」を企画中であること、日本及び韓国から2名ずつの講師を選出し講演が行われる予定であることが紹介された。併設して日韓学生セミナーを、神戸大細川先生が中心となり企画している。次期委員長の永武氏と中村が細川先生を訪問し、準備状況の引き継ぎ等を行う予定である旨が報告された。また、講演論文とCopyrightについて検討結果の報告があった。

7) 広報小委員会の活動概要（米本 委員長）

広報小委員会の活動として、ホームページの更新、ニュースレターの発行、メーリングリストを用いた情報提供、及びNUTHOS11の案内配信の原子力学会事務局への依頼などを実施したことが、配布資料を用いて説明された。

8) 出版小委員会報告（山本 委員長）

編集委員会より熱流動に関する論文を学会の論文賞に推薦したが、残念ながら選に落ちたが今後とも積極的に推薦を行いたいとの説明があった。また、部会に論文賞を作ってはどうかという提案があり、出版小委員会や表彰小委員会を中心に検討を進めることになった。

9) 表彰小委員会報告（杉本 委員長）

表彰小委員会の表彰案について説明があり、以下の方々の受賞（功績賞除く）を承認した。功績賞については運営委員会役員でメール審議して受賞を承認した。

【優秀講演賞】

①伊藤 大介（京都大学）C52

「X線および中性子を用いた複合可視化手法の開発」

②海保 和宏（電気通信大学）C53

「サブクール沸騰中における沸騰挙動の可視化解析」

③本多 剛（東京電力）C26

「東京電力福島第一原子力発電所炉内状況把握の解析・評価

一(58)福島第一原子力発電所1～3号機の事故進展に関する分析一」

④河内 拓也（東京工業大学）C28

「燃料デブリ実態把握のための超音波計測技術に関する基礎研究」

【功績賞】

有富 正憲 (東京工業大学)
「原子炉熱流動の安全解析と日本原子力学会
発展への貢献」

【業績賞】

改訂熱水カロードマップ策定幹事チーム：代表
中村秀夫 (日本原子力研究開発機構)
メンバー：新井 健司 (東芝)、及川 弘秀 (東
芝)、大貫 晃 (三菱重工)、西 義久 (電力中
央研究所)、藤井 正 (日立 GE ニュークリア・
エナジー)
「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ
2015 の完成に対する貢献」

【奨励賞】

①伊藤 啓 (日本原子力研究開発機構)
「ナトリウム冷却高速炉内の気液二相流現象
の研究」

②ペレグリニ マルコ (エネルギー総合工学研
究所)
「蒸気の水中凝縮挙動に関する研究および福
島第一原子力発電所事故事象解明への寄与」

③Shao-Wen Chen (国立清華大学、台湾)
「原子炉熱水力安全に関する構成方程式の開
発と台湾原子力プラントの安全解析に関する
顕著な貢献」

10) 副部長挨拶 (谷本 副部長)

非常に良い活動を継続的に実施されてい
ると感じていること、引き続き若手の育成に力
を入れ、活性化への正のスパイラルを目指した
いなどの挨拶があった。

以上

平成 27 年度 熱流動部会役員

部会長	上出 英樹 (JAEA)	同副委員長*	永武 拓 (JAEA)
副部長	谷本 浩一 (三菱重工)	企画委員長**	小瀬 裕男 (大和 SE)
総務委員長	西田 浩二 (日立 GE)	出版編集委員長**	山本 泰 (東芝)
総務副委員長	吉田 啓之 (JAEA)	同副委員長*	帆足 英二 (大阪大学)
広報委員長**	米本 幸弘 (熊本大学)	表彰委員長	杉本 純 (京都大学)
同副委員長*	金井 大造 (電力中央研究所)	海外担当役員	二ノ方 壽 (ミラノ工科大学)
研究委員長*	野崎 謙一朗 (テプコシステムズ)		
国際委員長**	中村 晶 (INSS)		

*:任期 2 年の 1 年目、 **:任期 2 年の 2 年目

<編集後記> 2015 年度第 4 号のニュースレターをお
届け致します。ニュースレターへの原稿は随時受け付
けております。研究室紹介、会議案内、エッセイ等寄稿お
願い致します。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 を頂ければ幸いです。
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 : yonemoto@mech.kumamoto-u.ac.jp
t-kanai@criepi.denken.or.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。