

THERMAL HYDRAULICS

熱流動部会ニュースレター (第 64 号)

AESJ-THD

NEWSLETTER (No.64)

Mar. 22, 2009

研究室紹介

大阪大学大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻
量子エネルギー工学講座 量子システムデザイン工学領域
山口 彰 / 高田 孝 / 真鍋 勇一郎

大阪大学における原子力工学分野に関する研究は、昭和 32 年(1957)から始まり (原子核工学専攻の発足) 今日に至っております。現在の環境・エネルギー工学専攻は、平成 17 年(2005)に旧原子力工学専攻、環境工学専攻ならびに地球総合工学専攻の一部が結合したもので、持続可能な人類社会の文明を支える工学的な教育と研究を行っています。

量子システムデザイン工学領域には山口教授、高田准教授、真鍋助教の 3 名の教員で構成されており、平成 20 年度では博士前期課程学生 9 名、学部 4 年生 5 名の 14 名が在籍しています。本研究室では、計算機を用いたシミュレーションにより目に見えない測定できない現象を調べ、モノの理を探求する数値科学研究や、良いシステムを人間が決める (意思決定) 方法に関する統計的意思決定に関する研究などを行っています。

以下に、研究テーマの一部についてその概要を紹介いたします。

(1) ナトリウム-水反応に関する数値実験研究

液体ナトリウムは次世代原子炉である高速炉の冷却材として有力視されていますが、ご存知の通り化学的に活性が高く、空気と反応しナトリウム燃焼を、水と反応しナトリウム-水反応を生じます。高速増殖炉の場合、熱エネルギーを機械エネルギーに変換するために必要な水蒸気を生成する蒸気発生器において、伝熱管が破損することでナトリウム-水反応が発生します。

ナトリウム-水反応自体は一般に良く知られてい

ますが、我々が知っているのは反応が終わって十分に時間が経った状況でどのような反応生成物が生じているかで、反応自体の素課程は良く判っていません。

そこでナトリウム-水反応の素課程を評価するために、ナトリウム蒸気と水蒸気との対抗流拡散反応場に関する数値実験を日本原子力研究開発機構 (以下、JAEA と略す) との共同研究で実施しています。

図 1 は対交流拡散反応場実験 (三菱重工業株式会社長崎研究所で実施) での可視化画像です。実験装置中央部に直径約 3cm のナトリウムプールを設置し、ナトリウム温度を調整することでナトリウム蒸気をコントロールし、上部から Ar ガスで希釈した水蒸気を吹き付けることでナトリウム-水反応の界面が捉えられています。

数値解析では、二次元円筒座標系を用い、化学反応モデルとして Gibbs 自由エネルギー極小化法を、また化学反応により発生したエアロゾルの凝集、移流、拡散をモデル化しました[1]。数値解析結果の一例を図 2 に示します。

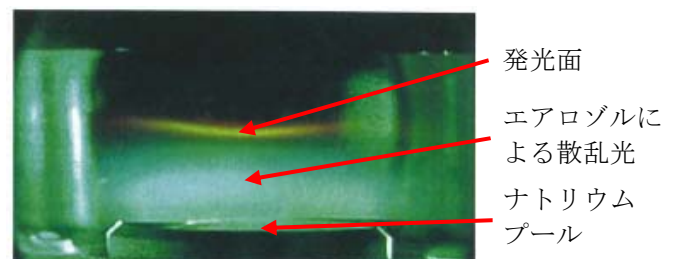
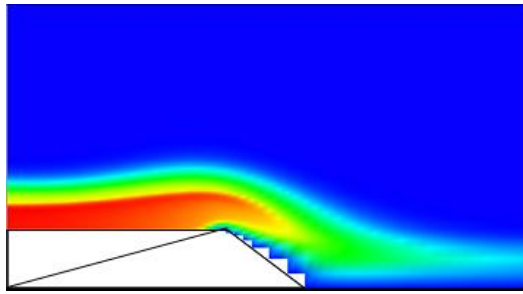
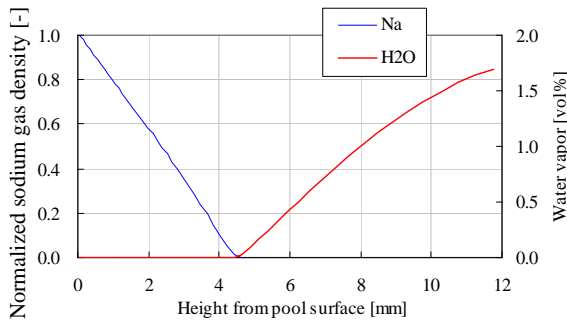


図 1 ナトリウム-水蒸気対抗流拡散反応実験 (JAEA との共同研究)



エアロゾル濃度



プール中心鉛直方向でのナトリウム蒸気
および水蒸気濃度分布

図 2 数値解析結果

実験では、LIF や CARS を用いた温度、濃度、エアロゾル分布に関する計測が計画されており、実験結果と数値解析結果を比較することで反応の素課程を明らかにする予定です。

また、上記対抗流拡散反応場実験をもとに機構論的なナトリウム-水反応モデルを構築し、蒸気発生器で発生するナトリウム-水反応を含んだ多成分・多相流伝熱数値解析手法の開発[2]も併せて実施しています。

(2) 高速炉プラント安全に関する研究

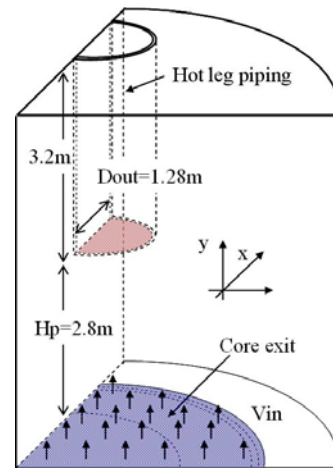
ナトリウム冷却高速炉の炉心上部プレナムでは、液体ナトリウムの熱膨張を防ぐために Ar ガスによるカバーガス空間が設置されています。このため自由液面からの Ar ガスの溶存や液面での揺動やガス巻き込みにより、1次冷却系に Ar ガスが流入します。また制御棒からも He ガスが放出されます。これらのガスは冷却材温度が高い場合には溶存していますが、中間熱交換器(IHX)で冷却されると冷却材中に気泡が生成されます。この結果、炉心反応度印加、沸騰核、キャビテーションの生成、冷却性への影響および流動不安定性を引き起こす可能性があり、高速炉プラントの安全性の観点から、不活性ガスの挙動を知ることが重要です。

これまでに高速炉プラントにおける不活性ガスの挙動を解析するコード[3]が開発されていますが、各解析要素での気泡挙動は単純な物理モデルおよび一点近似型モデルが使われており、その予測精度は十分とは言えません。

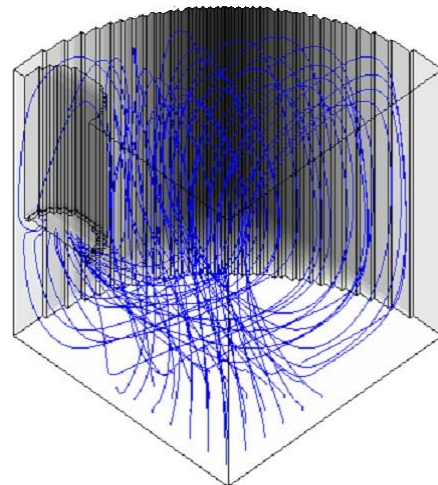
そこで気泡の溶存挙動でもっとも重要となる炉心

上部プレナム内流動を多次元伝解析で再現し、気泡挙動を数値解析することで、炉心出口からの気泡挙動をモデル化しました。図 3 に多次元解析結果の、図 4 に気泡挙動の数値実験結果の一例を示します。

図 3, 4 に示した気泡挙動の多次元効果に加え、IHX での気泡生成モデルの高精度化を行い、プラント動特性コードに反映した結果[4]を図 5 に、また本研究で得られたガス巻き込み量と炉心入口でのボイド率への影響を評価した結果を図 6 に示します。



炉心上部数値解析体系



気泡挙動評価例

図 3 炉心上部多次元数値解析領域

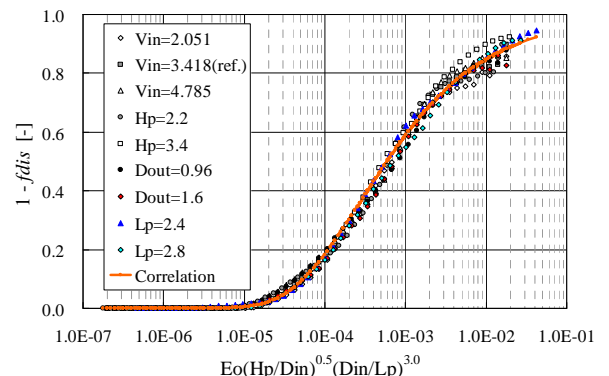


図 4 数値実験結果 (溶存割合 fdis の評価)

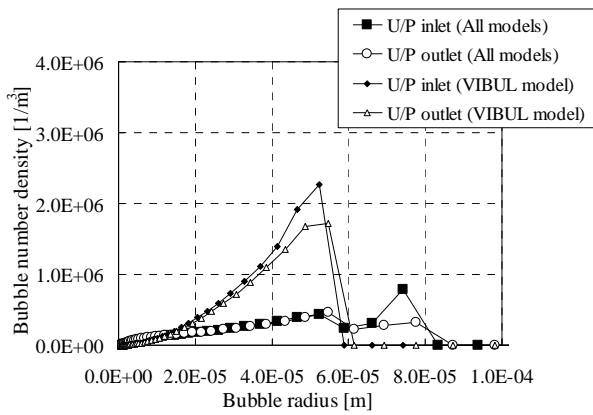


図 5 炉心出入口での気泡個数密度評価

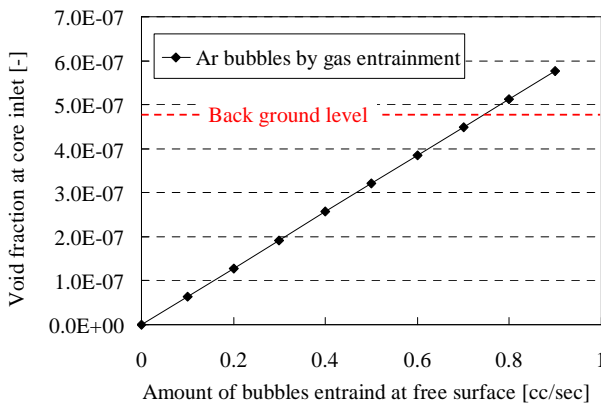


図 6 ガス巻き込み量と炉心入口ボイド率

炉心上部ではホットレグ配管入口 (図 3 参考) 面積が炉心出口面積に比べて小さく、流れの多次元効果のため図 5 に示すように従来モデルに比べて気泡個数密度の分布は大きく異なる結果が得られました。また数値シミュレーションを用いたプラント評価により、ガス巻き込み量をどの程度押さえ込む必要があるかを定量的に評価することが可能となっています。

(3) 確率論的安全評価(PSA)に関する研究

確率論的安全評価 (Probabilistic Safety Assessment, PSA) は原子炉施設の安全管理を効果的・効率的に行うことが可能であり、欧米諸国のみならず我が国でも PSA に関する学会標準が作成されつつあります。

PSA では、イベントツリーやフォルトツリー等を用いた事象進展の定量評価を行います。例えば除熱源喪失事故 (Protected Loss of Heat Sink, PLOHS) では時間とともに構造バウンダリ機器の破損確率も変化し、機器損傷の相互依存も変化してしまい、上述の手法では柔軟な対応が難しくなる課題があります。

マルコフ連鎖モンテカルロ法 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) は、システムの状態がその直前の状態にのみ依存されるモデルにおいて、乱数によりシステムの状態を変化させ、そのモデルからサンプルを作り出す手法であり、機器損傷確率の時間変化や

相互依存関係を容易に評価することができます。実際に、高速炉での PLOHS に対して MCMC による状態遷移を評価した結果 [5] を以下に示します。

図 7 は PLOHS 時の高速炉主要機器と核分裂生成物 (Fission Product, FP) の漏えいパスを示したものです。この時の主要機器の相互依存関係に加え各機器の修復を考慮した MCMC でのネットワークを図 8 に示します。

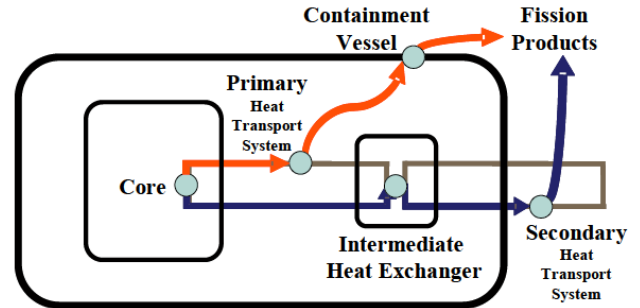


図 7 PLOHS 時の高速炉主要機器と FP 漏えいパス

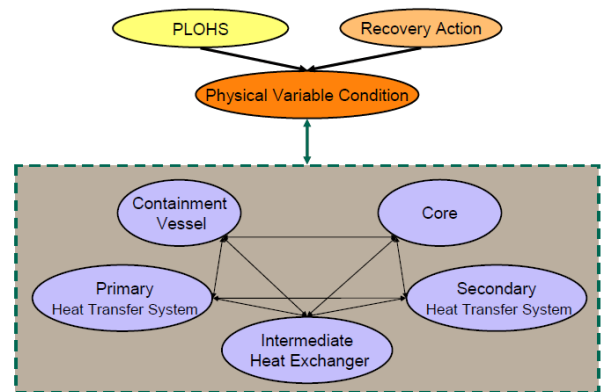
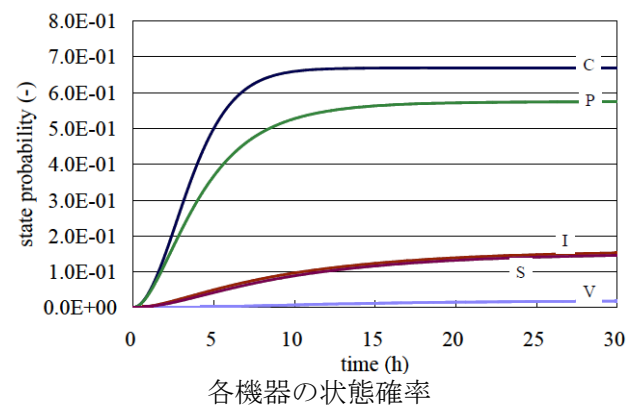


図 8 MCMC での相互ネットワーク

図 8 で示したネットワークでの各機器における故障確率を時間依存とし、その時刻における各機器の状態をもとに相互関係を決定した MCMC を行った結果 (サンプル数 500 万) を図 9 に示します。図 9 に示すとおり、MCMC を用いることで複雑な相互依存関係においても事象進展の定量化が容易であることが判ります。



各機器の状態確率

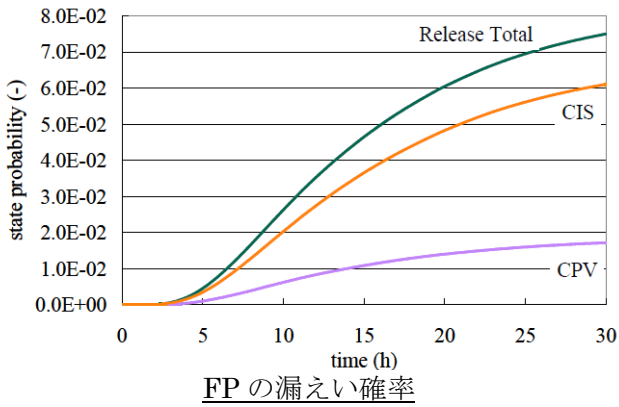


図 9 MCMC による評価結果 (CIS は図 7 中の紺色に、CPV はオレンジ色に相当)

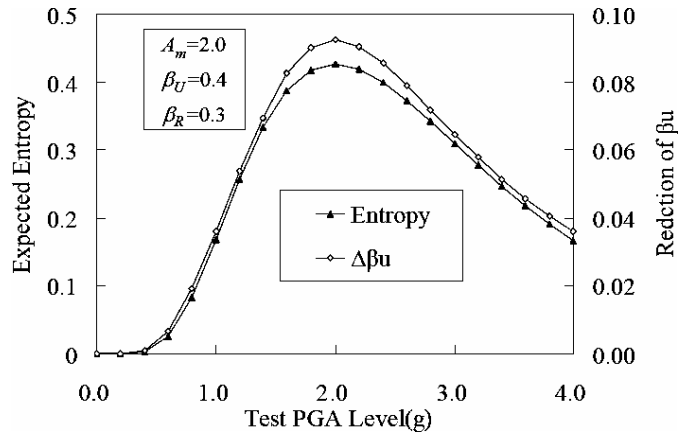


図 11 情報エントロピーと機器強度不確かさの減少幅

また地震 PSA では、各機器のフラジリティは機器強度に関する不確かさに加え、発生する地震動に関する不確かさが存在し、安全評価の不確かさの要因となっています。機器強度の不確かさについては、振動実験により低減することが可能ですが、最適な実験条件を決定する必要があります。

この意思決定を機構論的に行うために、振動実験による機器強度の確率密度分布の更新方法と、情報基準を用いた最適条件の決定方法に関する研究を行っています[6]。確率密度分布の更新についてはベイズ更新を提案し(図 10)、実験後の密度分布を対数正規分布で近似させます。情報基準については情報エントロピーを用い、情報エントロピーと不確かさ幅に関する検討を行いました。図 11 は実験によるベイズ更新を 1 回実施した後に得られた密度分布における不確かさ(図 11 中の $\Delta\beta_u$)の減少幅と情報エントロピーとの相関を示したものです。

図 11 に示すとおり、情報エントロピーの最大値と機器強度の不確かさ幅の減少の最大値が一致しており、情報エントロピーを用いることで最適な実験条件の意思決定が可能になると考えられます。

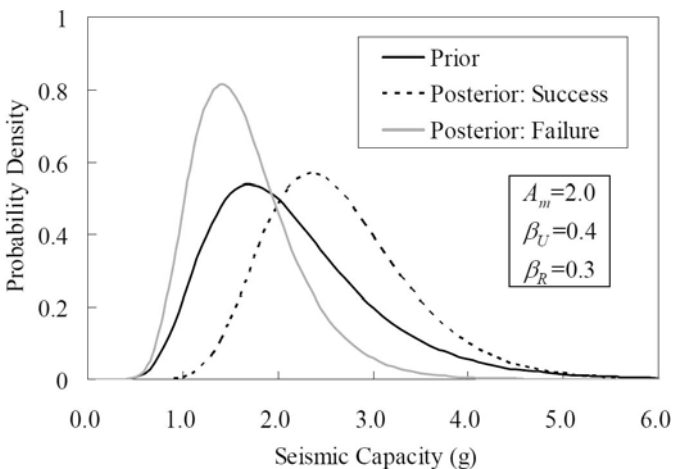


図 10 機器強度の確率密度分布とベイズ更新

機器のフラジリティは機器強度と地震ハザードにより決定されます。図 12 は情報エントロピーと機器のフラジリティの不確かさに関する相関を示しています。ここでは機器のフラジリティの 5%、95%信頼区間幅と情報エントロピーとの相関を示しており、情報エントロピーが最大となる位置で信頼区間幅が最小になることが示されており、機器のフラジリティ評価の観点からも情報エントロピーが不確かさを減少させる有効な指標となることが判りました。

また最近では、配管等における破損についても確率論的に評価することを目的とした、確率論的破壊力学 (Probabilistic Fracture Mechanism, PFM)に関する研究も行っています。

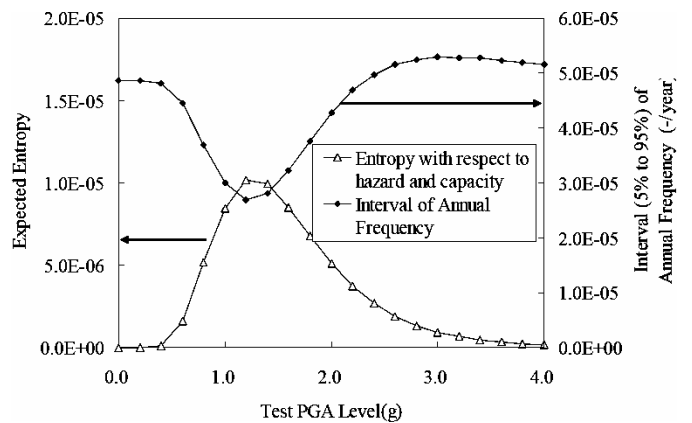


図 12 情報エントロピーと機器のフラジリティの不確かさ幅(5%、95%信頼区間幅)との相関

- [1] 小原他, 原学会 2007 年秋の大会, K40, 2007
- [2] T. Takata, et al., J. of Nuclear Science and Tech., 43, 5, 514-525, 2006
- [3] A. Yamaguchi, et al., Proc. of NURETH11, 477, 2005
- [4] A. Yamaguchi, et al., Proc. of NUTHOS7, 265, 2008
- [5] S. Yabuuchi, et al., Proc. of PSAM9, 0141, 2008
- [6] M. Kato, et al., Proc. of NTHAS6, N6P1036, 2008

運営委員会報告

平成 20 年度 熱流動部会運営委員会 (第 2 回) 議事録

- (1) 日時：平成 20 年 1 月 13 日 (火) 13:30-16:30
- (2) 場所：三菱重工業 品川本社 301 会議室
- (3) 出席者：三島部会長 (京都大学)、秋本副部会長 (JAEA)、坂場総務委員長 (三菱重工業)、大川総務副委員長 (大阪大学)、高田企画委員長 (大阪大学)、宇井研究委員長 (JNES)、望月国際委員長 (福井大学)、宋広報委員長 (神戸大学)、田中編集委員長 (茨城大学)、前川表彰委員長 (カワサキプラントシステムズ)
- (4) 配布資料：
 - ① 議事次第
 - ② 平成 20 年度収支予算及び実績
 - ③ 「熱流動」部会・委員会長期計画予算 (案)
 - ④ 企画委員会活動報告
 - ⑤ 研究委員会報告
 - ⑥ 国際委員会活動概要報告
 - ⑦ 広報 平成 20 年度下期活動経過報告 (無番)来年度予算及び長期予算計画に関するメール

議事

1. 熱流動部会長挨拶 (三島部会長)

NTHAS6 は、130 名ほどの参加があり盛況に終わった。今年は NURETH-13 が開催される。この会議の特集及び優秀な論文は NED への投稿を呼びかけることとしている、などの挨拶があった。

2. 熱流動部会予算 (H20 年度予算実績及び H21 年度申請) について (坂場総務委員長)

資料②より、今年度の予算収支及び来年度予算申請の内容について報告し、了承が得られた。また、資料③より、学会の公益法人化に向けた長期予算計画について、国際会議費用として部会独自に予算枠を取っておくこと、及び若手育成のための予算枠を設けておくこと、という方針を説明した。若手育成用予算の活用方法は、次の総会にて了承を得る必要があるため、部会の主だった人の意見も取り入れ方針を具体化することとなった。また学会に対して、熱流動部会の予算枠を設けることが今後の活動に必要な旨を説明していくこととなった。他の部会 (バックエンドや炉物理) の方針も参考にすることとなった。

3. 企画委員会活動報告 (高田企画委員長)

資料④により昨年秋の大会時に開催された Dr フォーラムについての決算及び実施状況が報告された。本フォーラムの今後のあり方について議論となった。

- ・ドクター取得者数が減少していることから、講演者の枠を広げる必要がある。
 - ・フォーラムの中で学生だけで運営する枠を設ける。
- などの意見があり、今後フォーラムの形態を検討していくこととなった。

4. 研究委員会活動報告 (宇井研究委員長)

資料⑤により、専門委員会活動として「高速炉熱流動・安全評価」特別専門委員会及び「熱水力安全評価基盤技術高度化検討」専門委員会は活動期間を 1 年間延長する可能性があり、延長する場合は総会での承認が必要である旨の報告があった。

また、NURETH-13 関連として OECD/NEA/CSNI にて論文投稿を呼びかけ、参加してもらう方針で対応することとなった。

部会長より委員会の活動報告をニュースレターに入れていくようにとの指示があった。

5. 国際委員会活動報告 (望月国際委員長)

資料⑥より、NTHAS6 での開催状況と決算報告があった。NTHAS6 において発表された論文の中で良いものを選び特集号を出す予定で、現在選定中との報告があった。良い論文については NED への投稿も呼びかける旨の説明があった。日本側の優秀講演賞受賞者に受賞の言葉を貰い HP に公開するよう部会長より指示があった。

また、NURETH-13 の準備状況 (現時点で 321 件の投稿がある)、及び活動状況が報告された。参加者は国内 200 名+海外 200 名を想定している。技術プログラム委員への委嘱手続きは未了。なお、来年の国際会議は別に 4 件及び NURETH の開催時期が原子力学会秋の大会と接近していることなどに留意する必要がある旨の報告があった。

6. 広報委員会活動報告 (宋広報委員長)

資料⑦により、活動状況として、部会ホームページの更新及びニュースレターの発行などが報告された。

7. その他

部会表彰について、現在業績賞の推薦が1件のみで、功労賞及び奨励賞がない（昨年度も1件もなかった）ことから、功労賞の推薦及び奨励賞については、過去3年の優秀講演賞受賞者から選ぶ方針となった。

今年度で任期満了となる委員の交代（副部長、

総務副委員長、研究委員長、国際副委員長、広報副委員長）の候補者について、春の大会の総会時に承認が必要となることから、各委員長にて後任者を選定し、メール等にて運営委員へ連絡することとなった。

以上

NTHAS6 学生セミナー 優秀プレゼンテーション賞受賞の言葉

京都大学大学院 工学研究科 原子核工学専攻 功刀研究室
永武 拓

この度はNTHAS6学生セミナーで優秀プレゼンテーション賞受賞することができ、非常に光栄に思っております。

本セミナーは2年に1度行われており、会場は日韓から交互に選ばれます。今回のセミナーは沖縄の琉球大学で開かれました。この時期の沖縄は気候が良く、セミナーの期間中は快適に過ごすことができました。

セミナーでは2日間に亘って講師の方々に講演して頂いたり、学生が各々行っている研究のポスター発表を行い、その中で活発な議論がなされていました。講演では4つの原子炉に関して話を聞くことができ、どれも非常に興味深いものでした。またポスター発表では、私も発表を行い色々と議論しました。私は数値計算を主に行っており、今回は数値計算を検証するための実験について発表しました。第一線で活躍されている研究者の方々や分野を同じくする学生との議論は、学ぶことが多くあり、今後の研究に有用なものとなりました。また他の学生の研究内容にも触れることができ、同じような苦勞をしながら研究を進めているという話を聞いて、自分もより一層努力しながら、また楽しみながら研究を進めていこうと再び気を引き締めることができました。

セミナーでは懇親会も開かれ、韓国の学生と交流することができ、韓国の学生のモチベーションの高さを実感しました。さらに研究以外にも年齢が近いということもあり、非常に楽しく話すことができました。

本セミナーに参加することで得た経験や、優秀プレゼンテーション賞受賞は、私にとって非常に大きなものになったと感じております。また韓国の学生と交流できたことで、自分のモチベーションを高めることができ、原子力分野に関してそれぞれの国の観点から話をすることで色々と学ぶことができました。これから

もこの経験を生かし研究に励んで行こうと思っております。



図1 NTHAS6 学生セミナー参加者



図2 NTHAS6 学生セミナー会場内の様子

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。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 : sou@maritime.kobe-u.ac.jp
kazuaki.kito.vp@hitachi.com

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。