

# THERMAL HYDRAULICS

熱流動部会ニュースレター (第56号)

AESJ-THD

NEWSLETTER (No.56)

March 19, 2007

## 研究室紹介

京都大学 原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門 極限熱輸送工学研究室  
三島嘉一郎 / 齊藤泰司 / 沈秀中 / 張俊

原子炉実験所は、昭和 38 年に京都大学の附置研究所として「原子炉による実験及びこれに関連する研究」を目的として設置され、以来、定格熱出力 5000kW の研究用原子炉 (KUR) を中核とした実験施設を利用する共同利用研究所としての役割を果たしてきた。KUR の利用分野は、中性子光学や物質構造解析、短寿命 R I の生成・利用、生命・医科学、材料照射効果、放射化分析、中性子ラジオグラフィ、超ウラン元素の物理・化学、放射線管理、環境科学など多種多様である。特に近年は、中性子捕捉療法によるガン治療の症例が、皮膚がんや脳腫瘍にとどまらず、頭頸部がんや肝臓がん、肺がんなどにも広がり、大きな期待を集めている。また、昭和 49 年には臨界集合体実験装置 (KUCA) が運転を開始し、これを利用して炉物理の研究を行うほか、京都大学の学生のみならず、国内外の他大学大学院生を対象とした体験的炉物理教育も行われている。平成 14 年度からは、文部科学省の委託を受けて、加速器駆動未臨界炉 (ADS) に関する基礎研究を実施しており、この事業の中で、固定磁場・強収束型 (FFAG) 加速器を導入し、これと KUCA とを結合させて ADS 実験を開始する予定である。原子炉実験所では、今後も、研究用原子炉と加速器を中核施設とし、原子力研究と放射線・粒子線の利用による科学研究を車の両輪として、研究活動を展開していくことにしている。

極限熱輸送工学研究室は、この原子炉実験所においては主役ではないが、原子力研究のみならず KUR 等の運転管理においても重要な役割を果たしている。研究室の研究テーマは、とくに制約があるわけではない

が、すべて核エネルギーシステムの熱流動・安全性に関連している。

核融合炉や軽水炉、ADS などの核エネルギーシステムにおける熱流動現象の特徴の一つに高密度のエネルギー発生や強放射線、狭小流路などの極端条件がある。我々の研究室では、こうした核エネルギー発生系で遭遇する極端条件下の熱流動現象の特性の解明とその利用、並びにこれらの核エネルギー発生系の熱水力設計と安全性向上に関連した基礎研究を行っている。具体的には、水による超高熱負荷除熱、核エネルギーシステムで遭遇する様々な極端条件下での熱流動現象の特性、気液二相流モデルの構成式を対象とした研究を、熱特性実験装置およびその周辺設備を利用して行っている。また、KUR や  $^{60}\text{Co}$  ガンマ線源を有する原子炉実験所の特徴を活かして、中性子ラジオグラフィを用いた熱流動現象の可視化・計測に関する研究や放射線誘起表面活性 (RISA) を利用した伝熱促進に関する研究も行っている。以下にそれぞれの研究テーマの概要と成果の一部を紹介する。

### 1. 水による超高熱負荷除熱

#### (1) ミニチャネル内強制流動沸騰熱伝達

核融合炉や ADS、高出力電子回路等においては高密度のエネルギーが発生するため、この除熱や熱利用が問題となっている。当研究室では、環境に優しく技術的に最も経験が豊富で安定な水を流体として、どこまで高密度の熱輸送が可能か、その限界を極めること、またそのような高熱流束を実現するメカニズムを究明することを目的に研究を進めている。これまでに、

高出力の研究用原子炉や核破砕中性子源固体ターゲット、コンパクト熱交換器等への応用を想定した狭間隙矩形流路や細管内の水の強制流動沸騰熱伝達及び限界熱流束（CHF）に関する実験的研究を実施した。このような、いわゆるミニチャンネル内の強制流動サブクール沸騰においては、高い CHF が得られることが知られており、過去に実施した細管内の大気圧近傍の水の強制流動沸騰の実験では、内径 1mm、 $L/D=5$  の細管において  $158\text{MW/m}^2$  の CHF を実現している。

実験的研究に並行して、これらの実験結果及び既存のデータベースをもとに、ミニチャンネル内強制流動沸騰における熱伝達率相関式及び CHF 相関式の開発も行っている。これらの相関式には様々なパラメータが関与するので、ニューラルネットワークを用いて客観的にパラメータ依存性を整理し、それをもとに相関式を作成した。

## (2)気泡微細化沸騰

一般に沸騰による除熱限界は CHF によって決められるが、比較的小さい伝熱面においてサブクール度が大きい場合、遷移沸騰領域で CHF を超える極めて高い熱流束が観測されている。この状態では、微細な気泡が無数に射出されることから、気泡微細化沸騰（Micro-bubble Emission Boiling: MEB）と呼ばれている。MEB では伝熱面温度の大幅な上昇がなくても CHF を超える熱流束が実現できることから、高熱負荷除熱への応用が期待されている。当研究室では、 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  の大きさの伝熱面をもつ同ブロックを用いて、強制流動沸騰およびプール沸騰条件での沸騰熱伝達実験を行い、MEB に及ぼす流動条件の影響を調べた。図 1 に  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  の伝熱面上の強制流動サブクール沸騰における沸騰曲線の例を示す。図中点 1 では核沸騰、2 では CHF、3 では MEB が観察された。それぞ

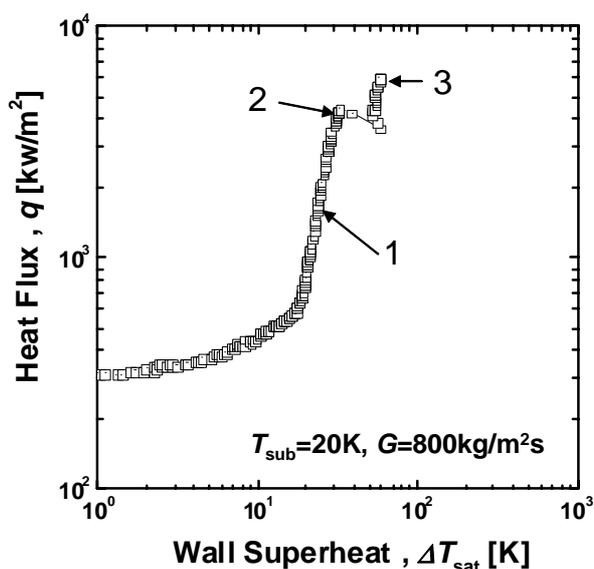


図 1  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  伝熱面における沸騰曲線の例

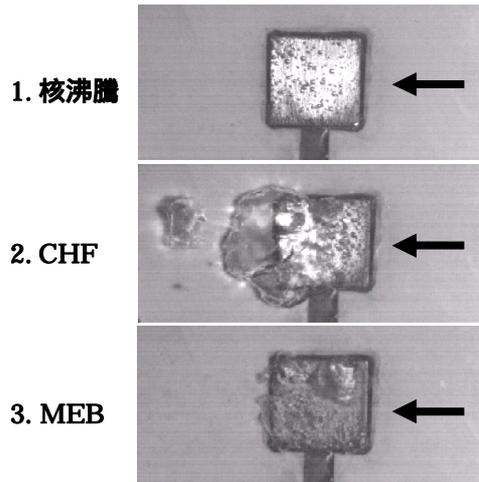


図 2 沸騰曲線上の点 1、2、3 における沸騰の様子

れの状態における伝熱面上の沸騰の様子を図 2 に示す。図中の矢印は流れの方向を示す。核沸騰では細かな気泡が伝熱面の各位置で穏やかに生成と消滅を繰り返しており、CHF 近傍では気泡が合体して大気泡が形成され下流に流され消滅する。CHF が起これば合体してできた大気泡下で薄液膜の消滅が起こっているものと推測される。MEB においては、細かな気泡が生成・消滅を繰り返す点で核沸騰に似ているが、伝熱面全体で界面が激しく揺動するので、明確に識別できる。MEB においては、サブクール水に触れた沸騰気泡が激しく凝縮して、その衝撃によって気泡の微細化が起こるものと推測される。このため、実験範囲において沸騰曲線に及ぼす影響は、流速よりもサブクール度のほうが顕著である。当研究室では、さらに実験データを蓄積して、MEB 発生条件及びそのメカニズムを明らかにして、それを積極的に利用して、更なる高熱負荷除熱を実現したいと考えている。

## (3)CHF 後熱伝達の機構論的モデルの開発

CHF 後のいわゆるポストドライアウト時の熱伝達の機構論的モデルに関する研究を行った。このモデルは、蒸気相に覆われた伝熱面と蒸気相及び液滴との間の熱交換をモデル化したもので、熱非平衡状態を想定して伝熱面と過熱蒸気相との間の強制対流熱伝達、伝熱面と液滴との近接・接触による熱交換、過熱蒸気相と液滴との間の界面熱伝達、及びこれら 3 者の間の輻射による熱交換をそれぞれモデル化したものである。このモデルにより、ポストドライアウト時の熱伝達は、高質量速度の条件では伝熱面、過熱蒸気及び液滴間の対流熱伝達が支配的であるが、低圧力・低質量速度・低クオリティの条件では液滴衝突と輻射による熱交換は無視できないことを明らかにした。

このほかにも、逆環状流領域での熱伝達モデルや液滴衝突及び蒸気膜崩壊によるリウエットモデルなどの研究も行った。これらの研究の過程で明らかになったことは、CHF 後の熱伝達に関するモデル開発に必要な

な実験データの数に限られており、モデルの検証に十分な知見が得られていないことである。

## 2. 核エネルギーシステムにおける熱流動現象の研究

### (1) 軽水炉シビアアクシデント時の溶融炉心冷却

軽水炉シビアアクシデント時において、炉心溶融物が下部ヘッドに落下しプールを形成した場合、炉心溶融物の圧力容器内保持に対して、図3に示すように、溶融物プールと圧力容器下部ヘッドとの間のギャップにおける熱伝達及び冷却水と溶融物プール表面との間の液液界面における熱伝達が重要な役割を果たすと考えられている。

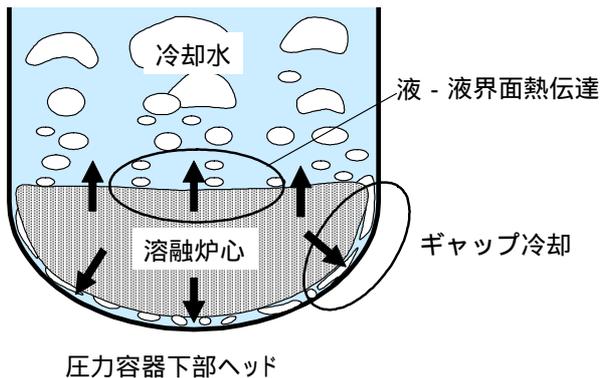


図3 軽水炉シビアアクシデント時の溶融炉心冷却のイメージ

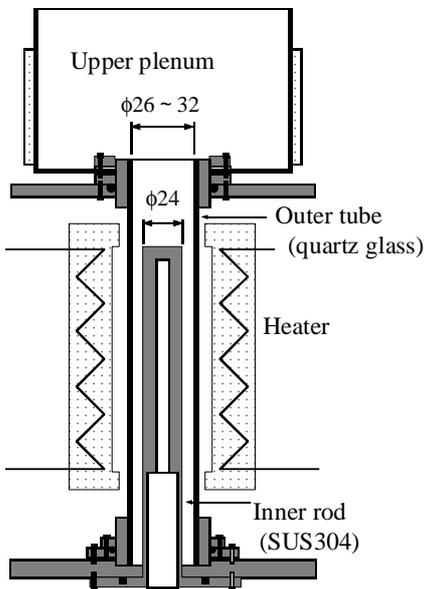


図4 ギャップ冷却試験部概略

当研究室では、原子力安全システム研究所との共同研究として、ギャップ冷却に関し、溶融炉心を模擬した高温の伝熱面に接する狭いギャップにおける沸騰熱伝達の実験的研究を実施した。図4に示す試験部を使い、初期に800℃まで加熱したロッドに注水し、その冷却過程におけるロッド表面の温度を、ロッド表面数箇所に取り付けられた熱電対により測定した。この実験

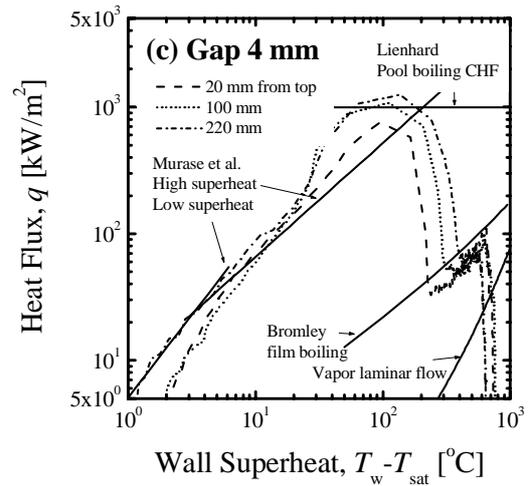


図5 ギャップ冷却における沸騰曲線の例

でギャップは1, 2, 4, 7mmの4種類であった。ギャップ4mmの試験部を用いた実験の結果得られた沸騰曲線の例を図5に示す。ここで、表面熱流束はロッド内の2次元熱伝導方程式を逆問題として解いて計算した。ギャップが4mmより大きい場合、図5に示すように、CHFはプール沸騰CHFに対するLienhardの式により、また、膜沸騰領域の沸騰曲線はBromleyの式により予測できる。一方、核沸騰領域では、沸騰気泡の動きが両側の壁により拘束されるため、高過熱度側で熱流束が抑えられる。これに対し、ギャップが1mmの試験部では、狭いギャップ内の対向流制限のため熱流束が制限され、CHFはプール沸騰CHFよりも低く、膜沸騰領域の沸騰曲線はBromleyの式による予測よりも低下し蒸気単相層流熱伝達に近づくという結果が得られた。

液液界面熱伝達に関しては、図6に示すような試験部を用いて、水中の溶融低融点合金（ウッズメタル、U-Alloy #78）表面における沸騰実験を行った。伝熱面は、直径60mmのニッケル円盤であり、その下にヒータがある。この伝熱面は、ベッセルに満たした溶融金属プールの中央に位置し、溶融金属面よりやや低い位置にある。このベッセルの上は水プールである。伝熱面の周りは円周状の溝がある。これは、ベッセル壁と溶融金属との間の接液部での沸騰を抑制するためである。壁面で沸騰が生じた場合、界面を激しく揺動させ、溶融金属の水中へのエントレインメントが起こることが報じられており、これを避けるためである。図7は固体壁及び液液界面における沸騰の様子を示す。図中、a)は固体壁の場合、b)は溶融金属と蒸留水、c)は固体壁の酸化物除去のために水溶性フラックスを蒸留水に混ぜた場合である。この実験では、定常加熱状態において各液相内の温度分布を測定し、それにより沸騰曲線を求めた。得られた結果は以下のようにまとめられる。

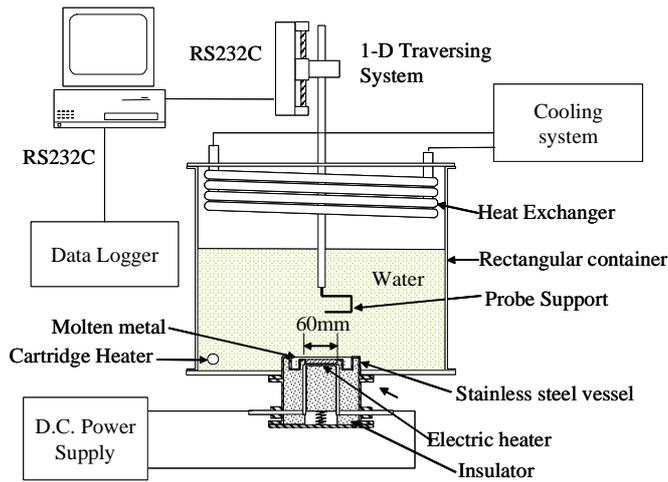
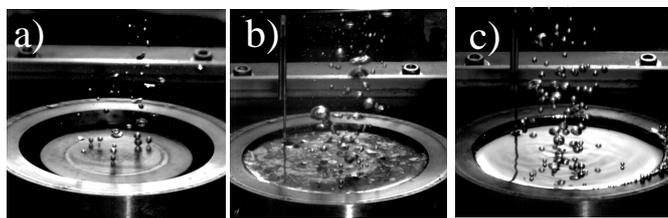
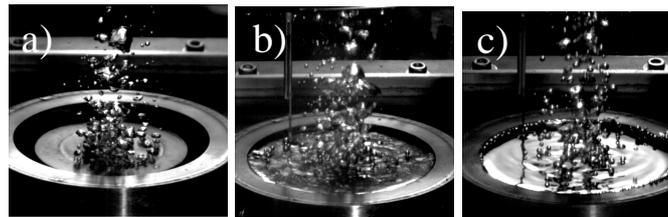


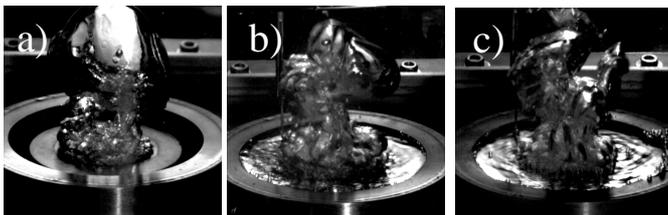
図6 液-液界面熱伝達試験部



1) Visualization of the boiling at  $q=40\text{kW/m}^2$



2) Visualization of the boiling at  $q=85\text{kW/m}^2$



3) Visualization of the boiling at  $q=700\text{kW/m}^2$

図7 固体壁及び液液界面における沸騰の様子

液液界面に酸化物が存在する場合、液液界面における沸騰曲線は固体壁の場合とほぼ一致する。液液界面は沸騰気泡の離脱によって揺動するが、固体壁の接液部の隙間に入り込んだ水が沸騰することにより引き起こされる激しい揺動や熔融金属の巻き込みは観察されなかった。フラックス水溶液の場合、固体壁と熔融金属液面の酸化膜除去の効果があるが、沸騰曲線には影響しない。フラックス水溶液の場合、液液界面は清浄であり、気泡核の役割を果たす酸化物が減少するので、沸騰熱伝達が劣化し、沸騰曲線が高過熱度側に移動

するものの、沸騰開始及び CHF の値は変化しなかった。

### (2) 高密度比気液二相流の特性

液体金属冷却型高速炉シビアアクシデント時に、熔融炉心が落下してプールを形成し、再臨界状態に至るおそれがあるとの指摘がある。これを阻止する物理現象の一つとして、熔融炉心プール内での沸騰による負のポイド反応度効果が考えられている。このポイド反応度効果は、沸騰状態における気泡の挙動と深く関わっている。当研究室では、旧核燃料サイクル開発機構の先行基礎工学に関する研究協力の一環として、熔融炉心プール内の気泡挙動に関する基礎的知見を得ることを目的に、熔融金属プール内の気泡挙動を中性子ラジオグラフィにより可視化し、気泡の形状・寸法、気泡速度、界面抵抗係数、液相速度分布、ポイド率分布、界面積濃度分布などの基礎的物理量を測定した。また、この結果をもとに SIMMER-III コードの改良がなされた。試験部は、幅 10cm、奥行き 2cm、深さ 53cm のアルミニウム合金製直方体容器であり、これに熔融鉛・ビスマス合金を満たし、底部のノズルから窒素ガスを吹き込んだ。図 8 には中性子ラジオグラフィにより撮影し、画像処理して得られた熔融金属・窒素ガス二相流内のポイド率及び P I V 法による液相・気相速度分布を示す。

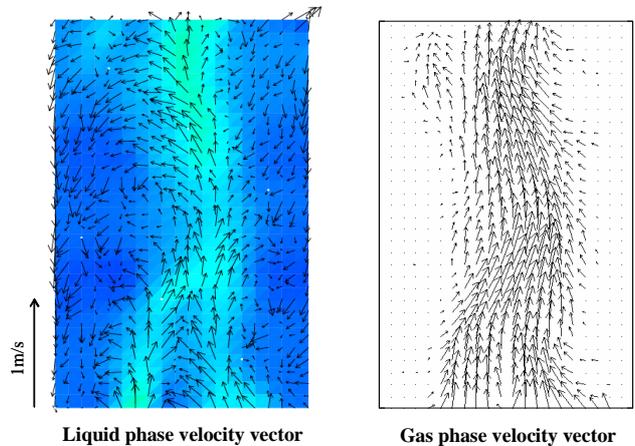


図8 熔融金属二相流の相分布及び速度分布

### (3) 液液直接接触沸騰熱伝達

次世代核エネルギーシステムで発生する高密度の熱流を効率よく利用する目的で、除熱能力に優れた液体金属冷却技術の開発がなされている。液体金属冷却型高速増殖炉を対象に研究が進められている直接接触式蒸気発生器は、高温の熔融金属中に水を直接噴射させ、液-液界面における核沸騰により熱輸送を行うため、熱交換能力が非常に高い。当研究室では、中性子ラジオグラフィ高速度撮像技術を応用することにより熔融金属中における直接接触沸騰熱伝達挙動を詳細に可視化観察し、液液界面における直接接触熱伝達について基礎的な知見を得る目的で実験的研究を実施した。実験では、上部を加熱し下部を冷却して温

度勾配をつけた溶融金属プール内に、低温部にあるノズルから水滴を注入し、上昇する過程で蒸発させ、これを中性子ラジオグラフィで可視化して、気泡の大きさや上昇速度を測定した。図9は溶融金属中を上昇中の液滴の蒸発の連続画像である。このような画像を解析して、気泡上昇速度、界面抵抗係数、界面熱伝達係数などを測定した。図10に単一気泡に対する界面抵抗係数の測定結果を示す。これより界面抵抗係数は、他の液体金属二相流の測定結果とほぼ一致し、球形気泡から変形気泡への遷移域の抵抗係数をもつことが分かる。このことは図9の画像とも一致している。

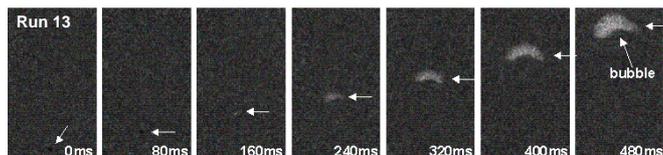


図9 中性子ラジオグラフィにより撮影した溶融金属中を上昇する水滴と蒸気泡の連続画像

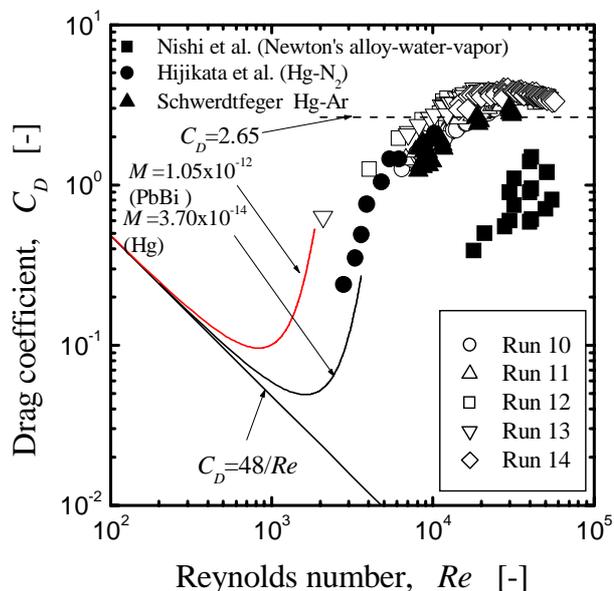


図10 溶融金属中を上昇する単一気泡の界面抵抗係数

#### (4) 放射線誘起表面活性による伝熱促進

酸化チタンなどの半導体材料に可視光以上の振動数の電磁波を照射すると、光触媒反応が起こり、これにより表面の濡れ性向上や除菌などの表面活性効果が現れる。ガンマ線でも同様の触媒反応を起こすことができ、これを放射線誘起表面活性 (RISA: Radiation Induced Surface Activation) と呼んでいる。当研究室では、東京海洋大学及び神戸製鋼所と共同で、経済産業省革新的実用原子力技術開発の一環として、軽水炉事故時の再冠水過程における伝熱性能に対して放射線誘起表面活性がどのような影響を及ぼすかを調べることを目的として実験的研究を進めている。試験部は、内径32mmの石英ガラス管内に直径24mm、長さ300mm

のSUS304鋼製のロッドを挿入したものである。実験では、空気雰囲気またはアルゴン雰囲気ですりロッドを600 程度まで加熱した後、加熱を停止し、試験部の下部または上部から注水し、ロッドをクエンチさせ、ロッドの冷却過程における温度変化を測定した。この実験をガンマ線照射前後に行い、ロッド表面の濡れ性の変化や、リウエット条件、沸騰曲線などに対する照射の影響を調べた。その結果、ロッド表面の濡れ性は、図11に示すように、ガンマ線照射の積算線量の増加とともに向上し、積算線量が360kGyを超えると超親水状態になる。その後、空气中に放置していると濡れ性は徐々に照射前の状態に戻る。ガンマ線照射により、図12に示すように、明らかにリウエットが早まることが確認された。また、SUS304ロッド表面にジルカロイ、チタンなどの被膜を蒸着した場合、SUS304のままの表面に比べてリウエット温度が上昇し、また、いずれの場合も、ガンマ線照射後、リウエット温度が上昇することが判明した。これらの実験から、明らかにガンマ線照射によって再冠水時の伝熱促進が起こっていることが確認できた。このRISA効果による伝熱促進のメカニズムについては、まだ完全には分かっていないところがあるが、実機への応用の観点から、RISA効果による伝熱促進を考慮していない現行の安全解析は、安全余裕を含む可能性がある。しかし、この点については、実機に近い条件での確認が必要であろう。

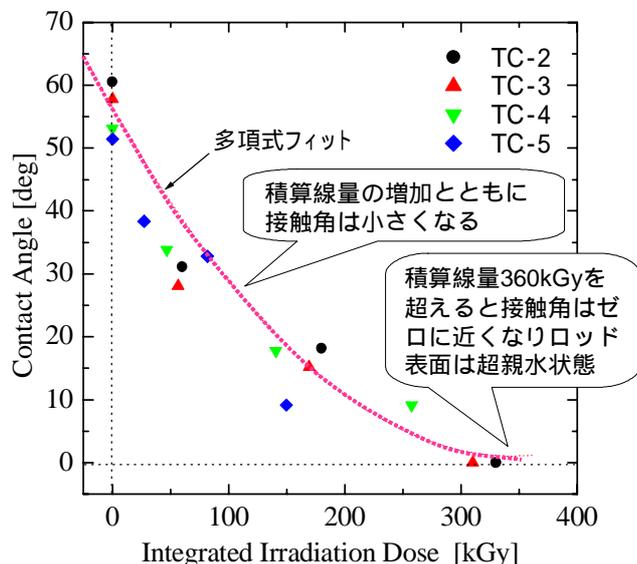


図11 ガンマ線照射による接触角の変化

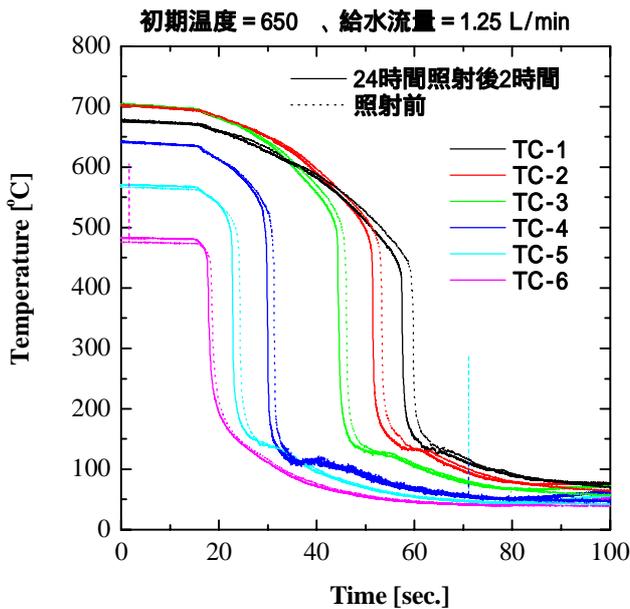


図 12 ガンマ線照射前後のクエンチ実験結果

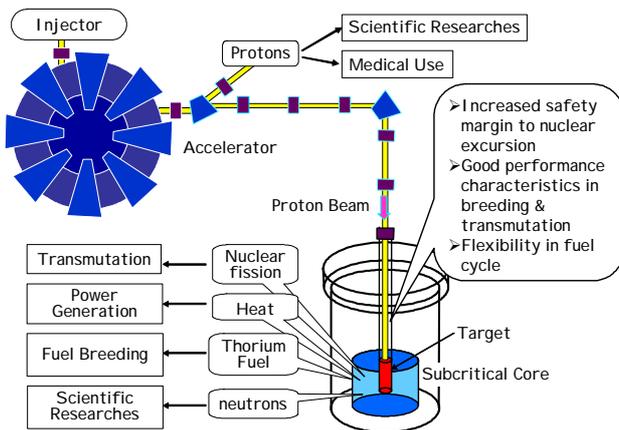


図 13 加速器駆動未臨界炉の概念

### (5) 加速器駆動型未臨界炉の熱水力設計

加速器駆動型未臨界炉の概念を図 13 に示す。加速器駆動未臨界炉のターゲット部の熱水力設計については、核破砕中性子源と共通の部分が多いため、固体ターゲットの熱水力設計に資する目的で実験データを取得し、これをもとに設計相関式を提案した。また、この結果をもとに、熱水力設計の立場から、核破砕中性子源の固体ターゲットにより実現可能なビーム出力の検討等を行った。

### 3. 気液二相流モデルの構成式

米国パーデュー大学との共同による界面積輸送方程式の研究やドリフトフラックスモデル相関式の研究、旧日本原子力研究所との共同による大口径管内気液二相流の特性研究、ミニチャンネル内の気液二相流の流動様式、圧力損失、ボイド率の構成式の開発等を行っている。大口径管内気液二相流特性研究では、先端

をエッチングして尖らせた光ファイバーを用いた多センサープローブを開発し、そのプローブを用いて内径 200mm の垂直長大管内の空気 - 水二相流のボイド率や界面積濃度等の測定を行った。

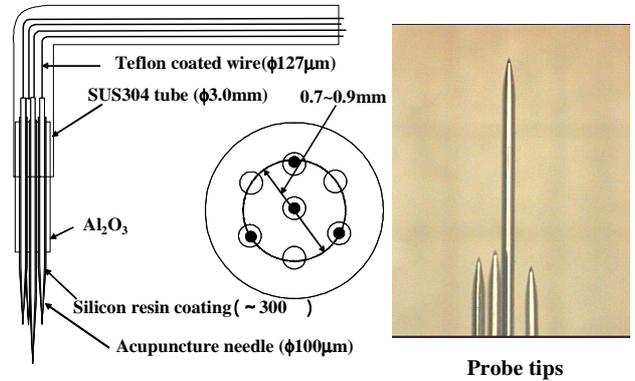


図 14 電気抵抗式 4 - センサープローブ

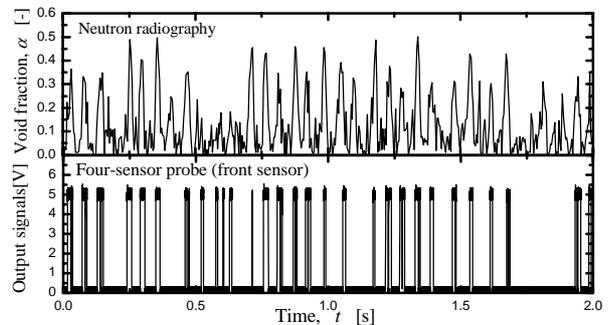


図 15 中性子ラジオグラフィにより得られたボイド率信号と 4 - センサープローブによる信号との比較

### 4. 中性子ラジオグラフィによる流体可視化・計測

これまで、中性子ラジオグラフィ高速度撮像法による流体可視化、そして画像処理による画像定量化・流体特性計測法の開発に成功した。現在、日本原子力研究開発機構 JRR-3M の共同利用により、高速度撮像技術による流体可視化・計測法の高度化及び液体金属二相流の特性に関する研究を進めている。また、東京大学弥生炉を利用して、工業利用に有利な透過力の強い高速中性子によるラジオグラフィの技術開発に関する研究も行った。さらに、平成 15 年度より、韓国原子力研究所の HANARO を利用した中性子ラジオグラフィ高速度撮像技術の高度化の研究を同研究所との共同研究として行っている。図 14 には、中性子ラジオグラフィによるボイド率測定と 4 - センサープローブによるボイド率測定とを比較・校正した実験で用いた 4 - センサープローブを示す。図 15 は、その結果得られた 4 - センサープローブからの信号と中性子ラジオグラフィで得られた画像を解析して得られたボイド率信号との比較である。

# 運営委員会報告

## 第 29 回 熱流動部会運営委員会 議事録

- (1) 日時：平成 19 年 1 月 23 日（火）16:00-19:00
- (2) 場所：三菱重工業 会議室
- (3) 出席者：前川部会長、三島副部会長、守田企画委員長、堀田研究委員長、田中国際委員長、山本広報委員長、中村広報副委員長、大川出版編集委員長、二ノ方海外担当役員、山口総務委員長、梅澤総務副委員長（梅澤記）
- (4) 配布資料：
  - 総務委員会資料（資料 1：議事次第、平成 18 年度役員、資料 2：平成 18 年度収支予算及び実績見込表、資料 3：部会費配布金算定表、資料 4：熱流動部会特別予算(案)、資料 5：熱流動部会実行委員会名簿）
  - 表彰委員会報告（資料 6）
  - 企画委員会資料（資料 7：企画委員会報告、資料 8：日本機械学会 2007 年度年次大会オーガナイズドセッション「原子炉システムおよびその要素技術」講演のお願い）
  - 研究委員会の活動報告（資料 9）
  - 国際委員会資料（資料 10：国際委員会活動報告、資料 11：第 5 回 NTHAS）
  - NURETH-13 及び NTHAS6 の準備について（資料 12）
  - 広報委員会活動報告（資料 13）
  - 出版編集委員会の活動概要（資料 14）

### 議事

1. 熱流動部会長挨拶（前川部会長）
  - 部会長より以下挨拶がなされた。
  - 昨年 10 月より急遽、佐藤前部会長から引き継いだ、幸い関係方々のご協力により韓国での NURETH5 は成功裏に終わらせることが出来た。今年は、FBR 熱流動・安全特別専門委員会が立ち上がろうとしている。また来年、再来年には NURETH6 および NURETH13 が控えており、部会の活性化と発展に貢献したい。
2. 総務委員会報告（山口総務委員長）
  - 2.1 熱流動部会予算
    - 資料 2～5 により 18 年度予算に関して説明がなされた。特記事項は以下のとおり。
    - ・資料 2 の記載に日韓サマースクール関連支出(12

万円)が反映されていない可能性があり要確認。  
・学会事務局から成合先生と二ノ方先生に NUTHOS 残金 60 万円について、熱流動部会が主体であるため処理を考えてほしいとの依頼あった。総務委員長から事務局に熱流動部会予算に組み入れてもらうことを確認。

### 2.2 部会等運営委員会の活動

総務委員長より、部会等運営委員会の活動状況について以下説明があった。

- ・学会発表のシステム変更に関して
  - 学会発表の申し込みが前回よりアプストのみで可能になり、発表申し込みがし易くなった。
  - プログラム編成委員会に関して編成委員の旅費(100 万円程度)の負担を軽減するため、Web 上で実行する方法が検討された。試行にあたり、各部会からリーダーを選出することになり、熱流動関係では 2 名を選出済み。
  - これに伴い、座長可能な方のリストを作成しておくこと等が必要になった。
- ・学生ポスターセッション応募が減少傾向にあり、前回は中止になった。このため、以下のような方策を採っている。
  - 各支部から 1 名ずつ発表者を推薦してもらう（計 8 名）。
  - 優秀ポスターの表彰、旅費の支給を行う。
- ・倫理規定に関して
  - 発表論文の共著者に名前を入れてもらえないとの苦情があり、倫理委員会での取扱いとなっている。実際、公募研究では、受注側の寄与があっても、当初の計画で研究者として名前が挙がっていない場合、発表者に名前を入れられないとのことであるが、契約の問題等あり対応は事実上困難である。
  - 機械学会においても倫理規定があり、対応が必要であるが、出すとしても精神条項のような形になるであろう。
- ・グローバル国内委員会が立ち上がり、各部会から委員を出す必要がある。

### 3. 表彰委員会報告（山口総務委員長）

表彰委員会活動状況につき、資料 6 により総務委員長より代理で説明がなされた。功績賞については推薦がなく、該当なしとのことである。表彰委員会の資料 6 の審議結果を受け、最終的に運営委員会で審議する必要があるとの説明があった。表彰制度に関して問題提起あり、以下議論がなされた。

- ・最近応募件数が少なくなっている。同じ顔ぶれになる傾向があり。表彰のあり方を再検討すべき時では。
- ・投稿論文から推薦する方法もあるが、業績賞はしっくり来ない。
- ・論文の点数をベースにすると、人を知らない場合推薦は難しい。
- ・論文賞からもれた優秀な論文に対して熱流動部会編集委員から推薦表彰する方法も考えられる。

#### 4. 企画委員会報告（守田企画委員長）

企画委員長より、資料7によりDrフォーラムの結果について説明がなされた。施設の使用料が安かったため参加費が安くなったが通知が直前になったため、今後、より前広に対応するようにしたいとの補足があった。今回は、秋の大会(九州大学)に合わせて、9/29～9/30で予定しているとの説明があった。

また、資料8により機械学会年次大会において「原子炉システムおよびその要素技術」と題したオーガナイズドセッションが開かれるとの紹介があった。

#### 5. 研究委員会報告（堀田研究委員長）

研究委員長より資料9により活動状況に関して説明がなされ、以下の議論があった。

- ・最近熱流動部会担当の専門委員会がない。片岡先生の委員会（「炉心・燃料・機器の合理的な熱流動評価・開発手法」調査専門委員会）も熱流動部会担当ではない。
- ・活動状況は担当部会から事務局に報告すること、また委員会からは広報委員会に議事録を送付することになっている。

各専門委員会の担当部会が現状あいまいになっているため、熱流動部会担当かどうか確認することとなった。

また、立ち上げを検討中の「高速炉熱流動・安全評価（仮称）」専門委員会の委員候補選定に関して質問があり、以下回答がなされた。

- ・メーリングリスト等で案内し、正規の委員、常時参加者を定めつつある。
- ・受託の場合は、受託側と主査とで分担いただける方を相談して選定する予定である。

次に、春の年会の熱流動部会企画セッションに関して以下説明、議論があった。

- ・次世代炉試験、スケーリング則という共通テーマの、高速炉、軽水自然循環炉に係るセッションである。
- ・2日目に90分間で行われる。
- ・企画セッションは、各部会にひとつの枠あり、熱流動部会ではトピックス的なものを選定し研究委員会から提案している。
- ・テーマをストックしておくのがよい。何回か先の

続編等、提案いただきたい。

#### 6. 国際委員会報告（田中国際委員長）

国際委員長より、資料10によりKNS(韓国)とのサマースクール及びNTHAS5の状況について説明がなされた。資料11に概要が纏められている。補足事項は以下のとおり。

- ・サマースクールは、若干学生の盛り上がりに欠けた感がある。講義というより講演会といった雰囲気であった。韓国側との調整があり準備不足の感。
- ・NTHAS5は前回より参加者数、発表件数ともに増加した。
- ・次回沖縄で開催されることが承認されている。
- ・NTHASについては、中国からも参加要請が来ている。

次に部会長より、今後の部会主催のNURETH及びNTHASの国際会議について資料12により説明がなされた。NURETHに関する主な補足及び議論は以下のとおり。

- ・NURETHは、次回日本の金沢でとの話になっている。
- ・3月ころには開催地について公募が出るので、これに対して応募する必要がある。内定すれば5月のAnnual会議で認められる。その時説明に出向く必要があり、予算が必要。開催市から700万円程度の援助が見込める。
- ・TPC(組織委員会)メンバーを30名程度集める必要がある。
- ・NURETHでは1年間程度かけてレビューして論文のクオリティを高める方針となっている。また、Nuclear Engineering Design等と契約して、発表案件を論文化する話がある。

NTHAS及びサマースクールに関する主な補足及び議論は以下のとおり。

- ・サマースクールについては、名前をジョイントスクールとして、教科書も作るスクールらしい形態にする。
- ・NTHAS6開催に関して、3月の総会で承認を得る予定である。
- ・NTHASとNUTHOSのジョイントの話はあるが、運営委員会で方針を出すべきである。NTHAS6には間に合わないの、NTHAS6までに韓国側と協議すればその次に実現することは可能。
- ・NUTHOSは、平均3年に一回のペースで84年以来開催されてきており、MIT研究者が中国に滞在していた折りに、北太平洋地域の会議として提案有り開催されたもので、プラントの運転・安全といったジャンルを含む点でNTHASとの棲み分けはある。

## 7. 広報委員会報告（山本広報委員長）

広報委員長より資料 13 により、部会ホームページの更新、ニュースレター発行状況、メーリングリストの活用状況について説明がなされ、以下のような意見があった。

- ・混相流学会の二相流データベースが出来ているがこれを周知し、また、改定されたら情報を流す等にメーリングリストを活用できないか。

部会のメーリングリスト活用に関して以下議論があり、結論として今後委員会委員のみメール発信を可能とするよう運用を改めることとなった。

- ・部会員に有益で、営利目的でない情報は流すべきであるが、誤って返信で全員に個人情報等が流れるリスクがある。（送信メールには返信できない旨を記入する）
- ・基本的には広報委員長のみであれば問題は解消されるが、実態として委員会メンバーに活用されている。（運営委員以外の部会員でメールを出す必要があれば、広報委員長に連絡する。このような運用の変更をホームページ等でお知らせする。）

## 8. 出版編集委員会報告（大川出版編集委員長）

出版編集委員会活動状況について資料 14 により説明がなされた。以下補足説明があった。

- ・出版編集委員長と副委員長は、それぞれ伝熱流動分野の学会論文誌編集委員の責任者と副責任者を兼ねることとなったため、それとの整合をとって任期を 2 年ずつとすることになった。但し、論文誌編集委員は 6/E までの任期なので、部会編集委員任期が終わっても 3 ヶ月間は継続の必要有り。
- ・H14、H15 年は、論文誌編集委員は 6 名であったが増員して現在に至っている。各経験年数の委員数が等しいのがよいが現在過渡期である。
- ・平成 18 年度の論文誌編集委員は、次の 6 月で 3 名退任の可能性もあり今後調整が必要。
- ・投稿論文について、熱流動と炉物理が多い状況である。

## 9. 安全工学シンポジウムについて

学術会議主催の安全工学シンポジウムにおける原子力学会の対応に関して以下説明、議論があった。

- ・多数の学会が共催しており、各学会の持ち回りで例年 7 月に開催されるシンポジウム対応を行っている。
- ・運営委員として、原子力学会からは熱流動部会副部会長が務めることになっている。
- ・原子力学会でセッションを企画するとの提案が出ているが、論文募集はないので、やるとしたらオーガナイズドセッションとなる。
- ・他学会にも通ずるような内容のもの、例えば、地震、PSA（内部事象、外部事象）リスク情報活用等のセッション提案が考えられる。発電部会との共同もありえるかもしれない。

以上の議論を踏まえ、企画案について副部会長、総務委員長、研究委員長で取りまとめることとなった。

## 10. その他

春の年会のスケジュールに関して以下説明あった。

- ・3/27：学会本体にかかる企画セッション
- ・3/28：熱流動部会総会（表彰含む）  
スケール則に係る企画セッション

## 11. H19 年度役員

平成 18 年度部会運営委員で任期満了の以下の委員について、資料 1、資料 5 を参考に後任候補について話し合いがあった。原則、大学 研究所 産業界の順で役員を交代しているとの説明あり。

総務委員長、副総務委員長、広報委員長、研究委員長、国際委員長、出版編集委員長

国際委員長に関しては、国際会議対応で負担が大きいことより、副委員長を設けることとなった。

以上

## 第5回「原子炉熱流動・安全などの研究・開発に関する日韓2国間会議」 2006年11月26日～11月29日（韓国済州島 Ramada Plaza Hotel）

NTHAS-5 : 5th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety

とりまとめ：前川勇(カワサキプラントシステムズ)、山口彰(大阪大学)、田中伸厚(茨城大学)

### 1.はじめに

2006年11月27日から30日に、韓国済州島のホテルにて第5回原子炉熱流動・安全などの研究・開発に関する日韓2国間会議(NTHAS-5: Nuclear Thermal Hydraulics and Safety 5)が開催された。Honorary, Plenary, Keynote講演を含めて107件の論文発表があった。参加者は、日本から52名、韓国から101名、その他、フランスなどから総勢156名の参加があり、熱い議論が交わされた。前回の北海道開催のNTHAS-4に比べ、講演数で22件の増加、参加者数で60名の増加となっており、この分野における研究・開発の盛り上がりが見て取れる。

以下に、日本側の座長等からの報告をとりまとめた、技術セッションの概要を報告する。また、最終日のクロージング・セッションでは、本会議の講演の中から、座長推薦および組織委員会の委員による厳正な審査の結果、優秀論文賞として、経済産業省の堺公明氏の「Proposal of Design Criteria for Gas Entrainment from Vortex Dimples Based on Computational Fluid Dynamics Method」と、KAERIのJin Ho Song氏の「The Material Effect on The Strength of Prototypic Steam Explosion」が選出された。次回のNTHAS-6にてその授賞式と受賞者の特別講演をお願いすることとなっている(なお、本会議中に、次回のNTHAS6は日本の沖縄にて11月に開催することが承認され、今後詳細を議論することとなっている)。また、受賞からもれた推薦論文(12編の予定)も、Heat Transfer Engineeringの特集号として論文掲載が予定されている。

### 2.技術セッションの概要

・セッション名 [ Honorary Session ]

・報告者：山口彰(大阪大学)

芹澤名誉教授の熱流動部会功績賞受賞と京都大学退官を記念し、特別講演が行われた。鉛直管上昇流においてマイクロバブルが存在するときの現象を実験、数値解析により解明した研究である。20mm直径の鉛直管内に約40 $\mu$ mのバブルを注入すると相間のドリフト速度は無視でき、バブルは変形しない固体のように振舞うこと、層流化に類似した現象が生じて著しく圧損が低減されることが示された。また、層流低層の渦がバブルによって壊されることがその理由であろうとメカニズムを推定している。現象解明研究が進展し、広く工学応用がなされることを期待する。

・セッション名 [ Plenary Session ]

・報告者：山口彰(大阪大学)

プレナリセッションでは日韓それぞれ2件ずつの講演が行われた。二ノ方教授は、経済産業省の公募研究による先進サブチャンネル解析コードの開発について講演した。サブチャンネルコードは古くて新しい話題であり、工学的実用性が高いことから現象のモデリング技術に多くのテーマがあり、またそれは検証研究としても拡がりがある。上出氏はJAEAの実用化戦略調査研究のフェーズ2の成果をレビューし、ナトリウム冷却MOX燃料炉と先進湿式再処理が主概念として選定されたこと、FACT計画という、高速炉サイクル実用化のためのプロジェクトが新規に開始することを述べ、注目された。

韓国からは、Park教授がサブクール沸騰時の相間熱伝達の測定について講演した。液相温度の測定と複数方向からの写真を画像処理する方法の両者を組み合わせることにより、バブルのつぶれを実測し、相間熱伝達を評価するもので、計測技術の高度化を思わせる内容である。Chung氏は一体型炉プロジェクトSMART開発のためKAERIで実施しているVISTA試験(システム特性、炉心流配など)の概要を述べた。大規模な試験であり、SMART炉開発への意気込みを示すものである。

・セッション名 [ Thermal Hydraulics Fundamentals & Thermal Hydraulic Aspects of Plant Operation ]

・報告者：阿部豊(筑波大学)

韓国2件、日本2件の合計4件の講演があった。日本側から、曲り管部のあるマイクロチャンネルにおける二相流について流動状況の観測ならびに圧力損失の測定を行った結果について報告された。また、流動腐食に関するプロジェクト研究の計画について、電気化学的な内容を含めた発表があり、今後の進展が期待される。韓国側からは、蒸気凝縮熱伝達に及ぼす非凝縮性ガスの影響を、従来の研究をレビューすることで検討した結果が報告されたが、個々の相関式に適用限界等に関する更なる検討が必要と思われた。また、動力用PWRのため数秒という極めて短い時間で、PWRを出力調整する方法についての発表が行われ、その可能性は示されたが、耐久性や信頼性については更に検討が必要と思われた。

・セッション名 [ Thermal Hydraulics Fundamentals ]

・報告者：功刀資彰（京都大学）

悪天候のため韓国2件がキャンセルとなり、韓国2件、日本1件の合計3件の講演があった。日本側から、高速炉ガス巻き込み現象に関連して、せん断流起因の表面渦によるガス巻き込み現象に関する実験的研究の報告があった。また、韓国側からは、HTGRに関連して熱伝達と物質伝達の相似性に関する感度解析についての報告、および、APR1400のLBLOCAの再冠水時のダウンカマー部での沸騰現象を2つのコード（RELAP,TRACE）を用いて解析し、実験値と比較した感度解析を通じて構成方程式の適用性検討についての講演があった。

韓国側からの相似性に関する検討は研究の意義自体が疑問であった。また、ダウンカマー沸騰解析ではその現象自体の発生の有無について議論が「沸騰」した。日本側のガス巻き込みに関する講演は、内容的には基礎的で面白いとのコメントが出されたが、基礎研究の成果を実機現象へどのように繋げるのかが課題であろう。

・セッション名 [ Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer ]

・報告者：越塚誠一（東京大学）

韓国4件、日本2件の発表があった。韓国側からは、CANDU炉のヘッダーの自由表面流れにおけるガス巻き込み解析、APR1400のIRWSTでの蒸気凝縮に伴う熱流動解析、CANDU炉のブローダウン後の燃料集合体の伝熱解析、KNSPのダウンカマーから下部プレナムにかけての詳細流動解析と圧損の予測について講演があった。日本側からは、2つのサブチャンネルが接続している場合に生じる振動流のLES解析、高速増殖炉のプールにおけるガス巻き込みのLES解析などについて講演があった。いずれも興味深い内容であり、質疑応答も活発だった。商用コードを用いた解析が4件あった。

・セッション名 [ Water Reactor Thermal Hydraulics and Safety ]

・報告者：村瀬道雄（原子力安全システム研究所）

韓国側から、CANDU-6のSBLOCAを起因とするシビアアクシデント解析に基づくSAマネージメント、CANDUのLBLOCA模擬実験における水平圧力管内ボイド率の実験解析、開発中の一体型小型炉SMART-Pを対象にした静的崩壊熱除去系の特性実験について3件の発表があった。日本側からは、設計中の1,356MWe低減速炉の過渡解析による限界熱出力余裕について1件の発表があった。発表ごとに対象と評価手法が異なったが、日韓の相互理解の促進に役立ったと思われる。

・セッション名 [ Water reactor thermal hydraulic and safety ]

・報告者：柴本泰照（日本原子力研究開発機構）

韓国から3件の講演があった。2件は、KEPCOが開発されたAPR1400に関する研究で、SNUFという小規模装置を用いたDVIライン破断実験に関してのシステム挙動に対する模擬性の検討を数値計算に基づいて行ったものと、高圧ステージで安全弁が作動した時の圧力波伝播をTRACEコードを用いて検証した講演であった。DVIラインはAPR1400の特徴で、KAERIやSNUを初め各所でも模擬実験が盛んに行われている。もう1件は、原子炉長期冷却時に課題とされているサブ閉塞問題と炉心ボイルオフ時のボロン析出問題をRELAP5/MOD 3.3で検討した講演があった。いずれの講演も数値計算を扱っており、システム挙動を従来型コードの計算結果で論じる点は平凡だったが、韓国の原子力業界の熱水力研究に関するアクティビティの高さを感じさせるものであった。

・セッション名 [ CHF and Post-CHF Heat Transfer ]

・報告者：小泉安郎（工学院大学）

韓国3件、日本1件の合計4件の講演があった。日本側からの1件はJAEAからの発表であり、稠密炉心での燃料棒湾曲のCHFへの影響に関する報告であった。湾曲が生じるとCHFは約10%減少することが確認されている。韓国からの内の1件では、軸方向出力分布のCHFへの影響補正が議論されている。2件目は、TMI事故時に圧力容器下部プレナム内で生じたと想定されるような、また、シビアアクシデント時に圧力容器の外部からの冷却時に想定されるような、傾斜狭間隙上辺発熱時のCHFについての報告であった。最後の1件では、3本の燃料棒からなるインパイルループのCHFを判定するための同様流路における電気加熱擬燃料棒を用いたCHF測定実験の結果が報告されている。韓国における活発な研究活動を垣間見ることができた。

・セッション名 [ Instrumentation and Measurement Technique ]

・報告者：上出 英樹（原子力機構）

韓国6件、日本3件の計7件の講演が予定され、この内、韓国側2件の発表が残念ながら天候不良に伴うフライトキャンセルにより中止となった。韓国側からは、水平管内の成層2相流の流量計測法、中性子ラジオグラフィをPIVに応用した液体金属（鉛ビスマス）中の流速場測定、グリッドスパーサーによる混合に着目した燃料ピン束内のレーザー流速計による流速場測定、原子炉計装の電子回路における異常時の特性評価手法に関する講演があった。日本側からは液体金属ジェット表面の波立ちに関する光学計測手法に関する講演があった。会場からは多くの質問が寄せられ、解

析能力の向上に対する実験検証への要求の高まりを反映して、新しい実験計測手法に対するニーズの強さを感じた。

- ・セッション名 [ Safety analysis and code development ]
- ・報告者：田中伸厚（茨城大学）

韓国4件、日本3件の合計7件の講演があった。日本側から、U字型蒸気発生器内の非凝縮ガス挙動解析、浅水波方程式を用いたLOCA時のデブリ挙動の三次元解析、SBLOCAと残留熱除去系喪失事故に対するRELAP5の有効性評価について講演があった。また、韓国側からは、制御棒落下時事故の三次元解析、Mixture Levelのトラッキング・モデルを用いた三次元完全陰解法の開発、韓国の原子力分野における安全解析コード開発の展望、APR1400の格納容器内燃料取替用水タンクの熱混合現象を対象としたPIRTの作成の講演があった。近年の計算機の性能向上や解析技術の発達を反映してか、RELAPなどを用いた従来型の安全解析よりも、詳細な熱流動・安全解析の話題の方が多かった。最後のPIRT作成に関する講演は、将来の安全評価方法を考える上で重要であると思われた。

- ・セッション名 [ Fusion Reactor Thermal Hydraulics & Safety, Fluid-Structure Interactions, and Supercritical Fluid Heat Transfer ]

- ・報告者：大島宏之（原子力機構）

本セッションでは、韓国側からの3件の講演がなされた。まず、韓国がITERでの実験を提案しているヘリウム冷却のリチウムブランケットについて、そのデザインの特徴（特にヘリウム冷却のためMHD流れの考慮が不要）が紹介されるとともに、複数の解析コードを

用いた設計成立性評価、安全評価結果が示された。次に、流れに対して垂直方向に設置された管群の流力振動挙動について、2つの異なる配列を用いた基礎実験の結果が示された。発生する揚力・抗力に対する流速およびボイド率依存性などが丁寧に計測されたが、結果の一般化にまでは至っていない。最後に、超臨界圧CO<sub>2</sub>の円管内熱伝達を求める実験を行い、過去の様々な相関式と比較することによりそれらの予測精度の評価を行った結果が示された。

- ・テクニカル・ツアーの概要
- ・報告者：前川勇（カワサキプラントシステムズ）

参加者は10名弱で28日午後、Cheju National Universityの応用放射線科学研究所を訪問した。本施設は国立大学で最初に作られたガンマ線照射施設で草花の新種増殖、農産物・海産物の保存性改良、新機能材料の開発などを大学、研究所や民間企業からの委託で照射を実施している。地下のガンマ線照射室（Co-60：1400Gy/h max）および農産物の照射によるやその他各種の照射実験棟をProf. B.J.Chungの案内で見学した。

（会議の際に撮影された多数の写真は、WEBページ、<http://home.kaeri.re.kr/nthas5>にて閲覧可能です。）



会議の様子

## KNS-AESJ Summer School 2006 に参加して

茨城大学大学院修士課程 中村信之, 大眉裕喜賢

2006年11月23日から25日までの3日間、韓国の釜山にあるKorea Maritime Universityにて、少し時期はずれの日韓共催サマースクールが開かれた。本サマースクールは日韓原子力学生・若手研究者交流事業の一環であり、熱流動・計算科学技術・原子力発電分野では初の試みである。学生・若手研究者は、日本から16名、韓国からは22名が参加し、講師を含めて総勢53名の参加者が集まった。

初日はレセプションと歓迎会が行われ、本格的な講演は2日目から行われた。2日目のオープニング・セッションでは、北海道大学の杉山教授とPOSTECHのM.H.Kim氏によるキーノート講義があった。杉山教授からは液体ナトリウムの熱伝達に関する講義、Kim氏はナノ流体における核沸騰と限界熱流束に関する講義が行われ、最先端の興味深い技術内容がわかりやすく解説された。その後、二日間にわたって、熱流動の実験技術、高度数値流体解析、工業への応用、次世代技術の4つのセッションが開かれた。各セッションでは、日韓各1名の講師による講義と日韓各2名の学生、研究者による口頭発表が行われた。

講義では、基礎的な実験技術や数値解析技術から、原子炉の安全性、超高温ガス炉における熱流動解析、スチームインジェクター内の熱流動解析や熱交換機器のマイクロチャネルに関する研究など、幅広い内容がわかりやすく説明され、参加者は皆興味深く聞き入っていた。

はじめは萎縮していた学生や若手研究者も徐々に場の雰囲気慣れ、質問する回数が増えていった。例えば、数値解析のテーマでは、粒子法であるMPS法を用いた様々な事象の解析についての講演が行われたが、その手法の応用性について、多くの質問が飛び交った。また、次世代の技術のテーマでは、可視化に関する研究について講演が行われ、数値解析結果の可視化や原子力関連の施設や装置のデザイン技術の応用について議論が行われた。

学生や若手研究者による口頭発表では、気泡流に関する実験や解析、沸騰現象の実験の研究発表がいくつかあり、その他にも幅広い研究の発表がなされた。質疑応答では、講師の方々から優しくも手厳しい質問に、学生や若手研究者が困惑してしまう場面もあり、ほろ苦くもよい経験となった。

どのセッションでも、熱意ある講演や発表が行われ、それに対する白熱した内容の濃い議論が行われた。学生や若手研究者にとっては、最先端の研究や技術に接する非常に貴重な経験となった。



Korea Maritime Universityの校舎



講義風景



バンケットの風景

2日目の夜にはバンケットが催され、食事をしながらの和やかな雰囲気の中、様々な意見の交流が行われた。その終了後も、食事会などで日韓の親睦を深めた学生グループもいたようである。

今回のセミナーでは、貴重な国際交流の機会を得る事ができ、大きな充実感を感じるとともに、個人的に

は専門分野だけでなく、語学をはじめとする、更なる勉強の必要性を痛感した。このような国境を越えた交流は、大学での研究や国内の学会参加では得られない貴重な体験であり、今後もこうした機会があれば積極的に参加していきたいと思った。



本サマースクールの参加者

---

## 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 >

今回は研究室紹介・運営委員会報告・日韓サマースクール実施報告のそれぞれが盛りだくさんの内容となりました。なんとか1年間、4号分を発行することができました。原稿を作成いただいた皆様にこの場を借りて改めてお礼申し上げます。

ニュースレターへの原稿は、随時受付を行っております。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：[a-naka@inss.co.jp](mailto:a-naka@inss.co.jp)

[yasushi3.yamamoto@toshiba.co.jp](mailto:yasushi3.yamamoto@toshiba.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。