

# 核 燃 料

2014 年 12 月発行

No.50-1 (通巻)

## 目 次

### I. 企画セッション

原子力学会 2014 年秋の大会 核燃料部会企画セッション  
「シビアアクシデント及び福島第一原発の廃炉に関する燃料関連基礎研究」  
..... 平井(NFD)、逢坂(JAEA) 1

### II. 国際会議紹介

(1) 国際会議 2014 Water Reactor Fuel Performance Meeting(WRFPM2014) 報告  
..... 安部田(JANSI)、尾形(電中研)、倉田(JAEA)、  
佐藤(東北大)、手島(MNF)、永瀬(JAEA)、平井(NFD) 4

(2) 第二回アジア核燃料国際会議(ANFC2014) 報告  
..... 松永(NFD)、大石(大阪大)、西(JAEA)、佐藤(JAEA)、  
古田(MNF)、李(東北大)、紀室(東北大)、逢坂(JAEA) 14

### III. 夏期セミナー報告

第28回核燃料・夏期セミナー開催報告 .....三原(JAEA) 21

IV. 編集後記 ..... 29



## I. 企画セッション

### 原子力学会 2014 年秋の大会 核燃料部会企画セッション

#### 「シビアアクシデント及び福島第一原発の廃炉に関する燃料関連基礎研究」

平成 26 年 10 月 31 日

日本核燃料開発 平井 睦

日本原子力開発機構 逢坂 正彦

福島第一原子力発電所（1F）の廃炉作業を円滑に進めるに当たり、世界初の困難な作業が想定されており、チャレンジングな研究開発を継続的に進める必要がある。また、更なる原子力安全対策向上に向けて、シビアアクシデント時に生じる現象を深く理解し、対策に結び付けることが求められている。このような状況を受けて実施されている燃料関係の基礎研究として、熔融燃料・デブリ性状評価及びソースタームに関する基礎研究の現状が紹介された。

個別の講演に先立ち、各講演内容のシビアアクシデント研究や 1F 廃止措置に係る研究における位置づけや相関が座長である日本核燃料開発平井氏より説明され、それらを踏まえた上での議論を期待する旨の要望がなされた。

第一件目の講演では、原子力機構の倉田氏より、経産省事業「シビアアクシデント時の燃料破損・熔融過程解析手法の高度化」において進められている制御棒の熔融挙動に関する実験的及び解析的検討の成果、並びに燃料棒熔融に関する熱力学データの問題点と整備計画が報告された。本プロジェクトは原子力分野に限らず産業界、大学の知識を活用・連携し、原子炉等安全対策の高度化につながる国産物性データベースの提供、燃料熔融に関する要素過程解析モデルの提供、事故対策効果検証装置の開発を目指している。本講演では、昨年度実施した事故時における制御棒の崩落挙動に関する試験において、反応が表面まで達するまでに時間遅れが生じること、大きな発熱を伴うジルカロイの液相化が見られること、崩落に際し、液相と固相に分離することなど、これまでに得られていない知見が数多く得られていることが紹介された。また、現在使用されている平衡状態図が、仮想的なものであることから、準安定状態図の評価を行い、現行モデルの改良を試みていることが紹介された。

第二件目では、東北大学の佐藤教授より、燃料デブリの



一件目の講演をする倉田氏



二件目の講演をする佐藤教授

二件目の講演をする佐藤教授

第三件目では、原子力機構逢坂氏より、シビアアクシデント (SA) 時のソースターム及び核分裂生成物 (FP) の放出及び移行評価の高度化に向けた FP 化学に関する基礎研究について、主に研究計画の紹介がなされた。FP の化学形は SA 時の放出・移行挙動のほぼすべてに影響を与えるが、化学形を直接評価した研究はこれまでにほぼ皆無であり、SA 下炉内での複雑多元条件においては FP 化学形の直接測定が重要であり、炉内各所においてそのような FP 化学形と反応に関するデータベースを構築することを最終目標とした研究を開始したことが報告された。とりわけ、欧州で実施されたソースターム評価のための総合試験ガス状ヨウ素割合増大が FP 化学に与える影響定のための技術開発を温質量分析装置をベース化学形直接測定技術にえられる元素の検出に側面が強く、様々な技国内外の大学や研究機られた。

第四件目では、大阪大盤戦略研究イニシアテ実施している「表面・界面発性核分裂生成物の挙報告された。揮発性の高い Cs と I の化学形態評価にあたり、熱力学的に予想し得ない状態となる可能性がある熔融燃料表面あるいは異相界面を経路として放出される際の表面・界面効果を考慮した化学形評価手法構築を目指し、2 面角法による物質表面エネルギー評価基

相関係と放射性核種の溶出挙動に関し、多くの大学と連携し実施されている科研費研究の成果として、1F で発生した放射性廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基礎研究の成果が報告された。ここでは、様々な U/Zr 比の  $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$  擬二元系酸化物について、雰囲気異なる加熱条件下で加熱による相変化を調べ、温度、雰囲気による相の違いを明らかにするとともに、 $(\text{U,Zr})\text{O}_2$  試料に中性子照射を行い、試料からの海水中/真水中への FP 及び TRU 各種の溶出挙動について調べ、FP 核種に比べ U、Pu、MA の溶出は少ないこと、溶出速度は雰囲気に依存していることなどが紹介された。

第三件目では、原子力機構逢坂氏より、シビアアクシデント (SA) 時のソースターム及び核分裂生成物 (FP) の放出及び移行評価の高度化に向けた FP 化学に関する基礎



三件目の講演をする逢坂氏

PHEBUS-FPT3 でも見られた等、BWR 制御棒材である  $\text{B}_4\text{C}$  に着目して各種の FP 化学形測定実施中であり、示差熱天秤-高スとした燃料からの放出直後のについては CsI から乖離したと考成功した。本研究は基礎基盤的術・手法開発が必要なことから、関の協力が望まれることが述べ

学黒崎准教授が、原子力基礎基ィブとして平成 24 年度から実効果を考慮した熔融燃料中の揮動評価」についての研究成果が



四件目の講演をする黒崎准教授

礎実験、表面・界面効果を考慮した熱力学計算手法開発を実施している。これまでに、Cs の化学形として考えられる CsI の熱化学データを実験的に評価して熱力学データベースとして整備し、低温 ( $\sim 1.9\text{K}$ ) から高温 ( $\sim 1,000\text{K}$ ) までの物性を精度よく評価することができたこと、また核燃料模擬物質セリアの表面エネルギーを測定し、CsI 接触有無によりエネルギー変化が生じないことが報告された。まとめとして、最終目標としての工学的技術開発においても、本研究のように異分野での最新技術を原子力の基礎研究分野から取り込むことが目標達成のために重要である旨の提言がなされた。

会場からは、各々の講演に対して、多くの技術的な質問と議論があった。加えて、今後の研究の方向性等についての議論もなされた。

最後に、今回の講演内容は事故時における炉心崩壊挙動や FP 挙動を知る上で互いに密接に関連する項目であり、相互の成果を反映しながら効果的に研究が進められることが期待される。また、まだまだやるべきことが多いことから、優先順位を明確にした上で、いろいろな機関が協力し合い、活用できるところは活用して、研究スピードを加速することと、それにより日本全体の技術力のベースを高めていくことが重要であり、更にはそれらの成果を実用的なものに作り上げ、さらにはより良いものに育てていくことが重要である。

以上

## Ⅱ. 国際会議紹介

国際会議 2014 Water Reactor Fuel Performance Meeting (WRFPM2014) 報告

報告者 (50 音順) : 安部田貞昭 (JANSI)、尾形孝成 (電中研)、倉田正輝 (JAEA)、佐藤修彰 (東北大)、手島英行 (MNF)、永瀬文久 (JAEA)、平井睦 (NFD)

### 1. 会議の概要

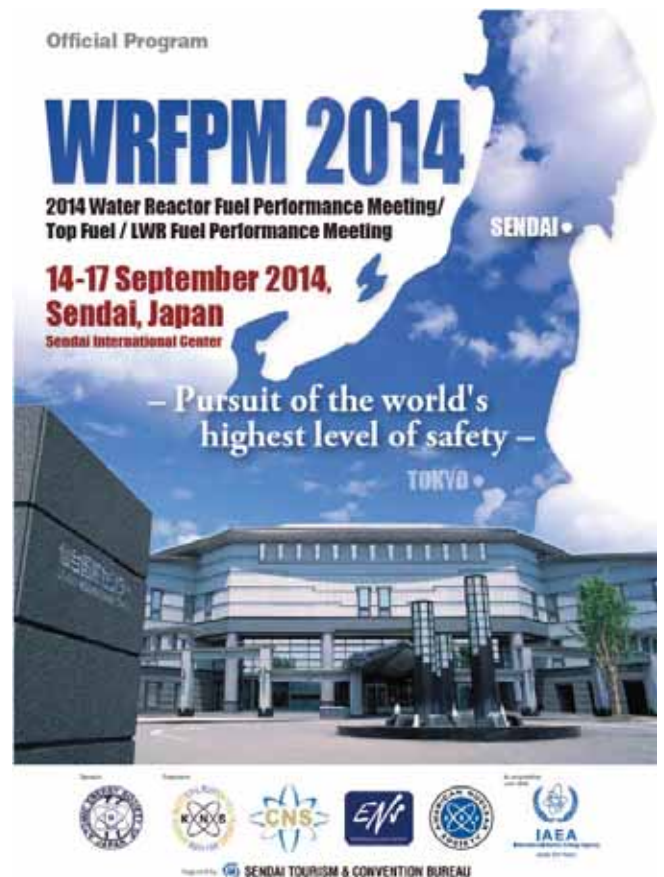
軽水炉燃料に関する国際会議「2014 Water Reactor Fuel Performance Meeting」(WRFPM2014)は、アジア(日韓中)、欧州(ENS)、米国(ANS)の各原子力学会の共催により各地域持ち回りで毎年開かれている。今回は日本原子力学会の主催で、仙台市の仙台国際センターにおいて2014年9月14日(日)から17日(水)の日程で開催された。各国の研究機関、電力、メーカー、大学、規制当局から236名(内、日本から120名)が参加し、プレナリー講演8件、口頭発表85件、ポスター発表36件と盛況であった。核燃料部会は、組織委員会を立ち上げるとともに、多くの部会員が実行委員やプログラム委員として会議の運営を担った。

会議の冒頭、石橋組織委員長から、「2011年以降も原子力発電の重要性は変わることはない。今回の会議では福島第一原子力発電所の廃止措置の状況など重要な講演もあり、200名以上の参加が予定されている。実りある議論を望む。」との挨拶があった。続いて、ENSから、来年スイスのチューリッヒで開催予定のTop Fuel 2015国際会議の紹介があった。

以下、プレナリーセッションとパラレルセッション(口頭発表)の概要を報告する。

### 2. プレナリーセッション

会議初日のプレナリーセッションでは、次の8件の講演があった。



オフィシャルプログラムの表紙



オープニングの様子

EPRI の R. Yang 氏は、原子力は CO<sub>2</sub> 排出削減と大気汚染防止の点でクリーンかつ安価なエネルギー源として重要であるとし、EPRI による福島第一原子力発電所（以下、1F）事故の原因分析の結果として、炉心損傷に対する備え、格納容器の健全性確保、環境放出低減による事故影響の緩和、訓練などが重要であると述べた。

東大の関村教授は、学会事故調に基づく 1F 事故の教訓、統合的なリスクインフォームド決定プロセス（IRIDM）に基づく継続的安全性向上の重要性などを説明した。さらに、1F 事故以前に作成した燃料高度化技術戦略ロードマップを紹介した上で、今後の研究戦略の方向性として、レジリエントな原子力技術のための安全研究ロードマップの考え方を紹介した。

東電福島第一廃炉推進カンパニーの鈴木バイスプレジデントによる 1F 廃炉に向けた活動に関する講演では、1F1～4 号機の現況として、1F サイト内の汚染状況と線量分布、廃炉作業の進捗状況などが説明された。この中で、建屋内の調査・観察、汚染水処理・貯蔵、固体廃棄物貯蔵などの現状が示された。最後に、事故に際して避難された方々への謝意と、廃炉に向けて精一杯努力して行くとの決意が述べられた。

国際廃炉研究開発機構（IRID）の劔田理事長の講演では、IRID の組織と構成、他機関との連携、1F 廃止措置に関する研究開発の状況が説明された。研究開発の例として、ミューオンによるデブリ検知など炉内状況把握のための技術開発、模擬デブリによる燃料デブリの硬さ等の特性予測、格納容器を冠水させない場合も含めた燃料デブリ回収方法の検討などの状況が紹介され、参加者の興味を引いた。

原子力規制委員会の更田委員は、1F 事故の教訓に対応した新規制基準における対策として、構造・システム・機器の破損防止、共通要因故障防止対策、炉心損傷防止、シビアアクシデントの影響緩和、緊急時に対する備え、継続的安全性向上、確率論的リスク評価（PRA）、1F の事故後の規制の 8 項目を挙げて説明した。

EdF の N. Waeckel 氏による「欧州における原子力と燃料の見通し」と題する講演では、EdF の単位発電量あたりの CO<sub>2</sub> 排出量は最低であり、EdF の原子力発電は欧州における CO<sub>2</sub> 排出量抑制に大きく寄与していることなどが述べられた。また、仏国における原子力の将来の見通しとして、軽水炉における MOX 利用、2050 年以降の高速炉商用化と ASTRID 計画などが紹介された。

GNF-A の R. Stachowski 氏は、「米国における BWR 燃料の見通し」と題して、これまでの 50 年間の BWR 燃料集合体の設計改良の経緯と信頼性向上の実績を紹介した上で、今後の開発の方向性として、チャンネル曲りの抑制などによる信頼性向上、燃料サイクルコストの低減な



プレナリーセッションの様子

ど、長期的な課題として材料開発や事故耐性燃料などに言及した。

IAEA の V. Inozemtsev 氏は、1F 事故の評価や原因分析などを記述する Fukushima Report の概要と準備状況、1F 事故を受けて承認された原子力安全行動計画 (NSAP) の概要と、これに基づく 1F 廃炉ロードマップのピアレビュー等の活動状況を報告した。さらに、NSAP の研究開発を支援する燃料に関する研究プロジェクトの状況も紹介した。

### 3. パラレルセッション

パラレルセッションは、次の 6 つのトラックから成る。

特別セッション： シビアアクシデントにおける炉心溶融と移行

トラック 1： 燃料のふるまい、信頼性、使用実績

トラック 2： 核燃料技術の進展と革新

トラック 3： 過渡時および事故時関連の課題

トラック 4： 燃料サイクル、中間貯蔵、輸送

トラック 5： 科学と基盤技術

#### (1) 特別セッション

特別セッションでは、会議初日にシビアアクシデント一般に関わる報告 7 件（招待講演 2 件を含む）、2 日目に福島事故の評価に直接関わる報告 5 件があった。

招待講演の 1 件目では、欧州で進められているシビアアクシデントに関する SARNET プロジェクトの現状を IRSN の G. Repetto 氏が紹介した。招待講演の 2 件目では、韓国 KAERI の H. Y. Kim 氏が、韓国におけるシビアアクシデント対策研究について報告した。これという決定的な対策は存在しないが、溶融コリウムの挙動解明試験や事故耐性燃料の研究開発等が進められており、それらの大きなモチベーションは、韓国の商用原子炉の 30 km 圏内に 300 万人が暮らしており、何らかの対策が求められる社会情勢であること、また、将来的には、原子力技術を輸出する際に必要と考えられること、等であるとのことであった。

招待講演に引き続き、欧州 ITU から、溶融コリウムの特性研究及び溶融炉心-コンクリート相互作用 (MCCI) を含むデブリ特性研究の成果が紹介された。1F 事故でも懸念されている MCCI に関しては、溶融燃料との反応によりコンクリートリッチ層とウラン-ジルコニウムリッチ層に分離することなどが紹介された。IRSN から、シビアアクシデントの際に想定されるデブリ再冠水の模擬試験の現状と今後の計画が紹介された。2015 年から 2016 年にかけて、ホウ酸水や塩化物混入水の試験にも取り組む予定であるとのことであった。ついで、JAEA より 3 件の発表が行われた。経産省事業で進めている制御棒ブレードの崩落試験に関する発表では、制御棒ブレードの崩落過程で軸方向に相分離が起き、粘性の低い成分が下部に移行することなどの新たな知見が報告された。ホウ素共存状態での揮発性 FP の化学状態に関する熱力学的な解析結果の報告では、ホウ素が気相に存在すると Cs や Sr がよ

り蒸発しやすくなる傾向などが示された。続いて、セシウムの蒸発化学形に与えるホウ素混入ガスの影響に関する最新の試験データの報告があり、ホウ素と反応することでCsの安定化学形が変化し、より低い温度で凝縮する傾向が示された。

2日目のセッションでは、IAEより、SAMPSONコードを用いた1Fの解析に関する最新の成果が2件連続で発表され、まず、BWRの燃料破損過程の解析精度を向上させるために新たに組み込んだ制御棒ブレード崩落解析手法が紹介された。この新たな手法を用いて行われた1F1号機の解析結果の報告では、破損燃料の炉心支持板近傍への一時的な滞留がモデル化できるようになったことが示された。JAEAから、デブリ取出しに向けたデブリ特性評価研究の現状が紹介された。破損燃料の一部に酸化があまり進まない成分が残る場合、ステンレス鋼やジルコニウムからなる金属間化合物相やこれらとホウ素の化合物等が形成される可能性があること等が報告された。デブリ再冠水時の臨界評価と制御方法に関する検討結果に関する東芝の報告では、中性子吸収材の効果の評価、未臨界度の計測方法の検討、仮に臨界事故が起こった際のFP放出評価等の進捗状況が紹介された。同じく東芝から、1Fの共用プールに保管されている燃料集合体の水質変化による腐食への影響評価について報告され、保管が長期間にわたる場合、低温腐食の評価が必要であるとのことであった。

## (2) トラック1

トラック1は3つのセッションに分かれ、合計12件の口頭発表があった。

ロシアSRC RF TRINITIからは、VVERにおいて燃料破損（リーク）が発生した後の水素吸収量増を評価し、破損燃料棒を集合体から引き抜く際の機械的な限界荷重を評価した結果が紹介された。2次水素化を防ぐために、燃料リーク後の運転条件などの検討結果も示された。続いてORNLからは、High Flux Isotope Reactor (HFIR)に設置されたThermosyphon Test Loopについて紹介があった。本ループは汚染が広がり易いHFIR炉に汚染物が流れ込まない設計となっており、これにより様々な燃料や材料の照射試験が実施可能となる。ハルデンプロジェクトから、ガンマ線トモグラフィ技術を用いて燃料棒内のFission Productガス（FPガス）放出を非破壊で測定する手法とその妥当性確認としてPIEとの比較を行った結果について発表があった。ブラジルIPEN/CNEN-SPからは、ステンレス製被覆管をPWRに適用した場合の燃料挙動についてFRACPONおよびTRANSURANUSコードを用いて評価した結果について発表があった。

SCIPプログラムの第3回モデリングワークショップの成果について発表があり、遅い出力上昇率の場合に見られるPCI（ペレットと被覆管の相互作用）の緩和効果について、10個の計算コードにより評価、比較した結果が示された。このPCI緩和効果は、単純に機械的な観点からでは説明できず、酸化膜形成、ヒーリング（回復）、SCCを引き起こす化学物質の影響を考慮する必要があるとされている。中部電力からは、浜岡5号機に海水を注入した後の燃料健全性について評価した結果が発表された。使用済み燃料ピットでの燃料の外観検査、酸化膜厚測定、CRUD（水垢）分析を実施した結果、燃料に異常が見られなかつ



たこと等が報告された。台湾の Institute of Nuclear Energy Research からは、台湾の BWR-6 に HWC (Hydrogen Water Chemistry) を 2006 年以降導入しており、HWC の影響について外観観察および酸化膜厚測定を行い確認している。その結果として、HWC により悪影響が見られないことが確認された。AREVA から、照射中の出力履歴の効果を取り入れて被覆管の水素吸収量を予測するモデルを開発し、PIE 結果との比較により妥当性を確認した結果が発表された。モデルでは燃料寿命の遅い時期に低出力/低蒸気条件で水素吸収が大きくなることも取り込んでいる。もう一つの AREVA の発表では、ATRIUM11 に導入されている異物対策についての説明があり、燃料取り出し等の際に集合体上部から落ちてくる異物への対策等について説明があった。

スウェーデン Vattenfall 電力から、Ringhals2 号機で見られた隣接燃料棒に接触した燃料棒曲がりに関する PIE 結果について発表があった。燃料棒が接触している部分では、出力は非接触部よりも低くなっているものの、接触により被覆管の表面温度が高く、結果として大幅に腐食量が多くなっていることが示された。三菱原子燃料からは、フレットイングによる燃料漏えい（リーク）に対する対策について発表があった。励振力の測定結果を比較することにより、種々の対策を採用した ZDP-1 燃料の耐フレットイング性能の向上を確認した結果が示された。Electrabel 電力からは、ベルギーにおいて原子力以外の発電からの発電バランスを取るために原子力発電所の出力を変動させる運転の検討結果について発表があった。機器の変更なく 1 サイクル当たり 30 回の出力変動運転が可能との評価結果が紹介された。

### (3) トラック 2

トラック 2 では、改良燃料や新しい概念の燃料に関して、ペレット関係 6 件、被覆管関係 5 件、事故耐性燃料関係 11 件の合計 22 件の口頭発表があった。

ペレット関係では、まず、中国 CJNF からは、アルミナシリケート添加による大粒径化およびアルミナシリケート添加ペレットの再焼結時寸法変化等に及ぼす種々の製造パラメータの影響について報告された。NFD からは、耐 PCI 性能向上を目指した Al-Si-O 添加燃料の再処理性、耐食性評価に関する照射後試験結果が報告された。KAERI からは、高熱伝導化を狙った  $UO_2$  ベースのカーボンネットワーク材の有効性の評価と、 $UO_2$  の代わりに  $ZrO_2$  を用いた実験結果について報告された。JNFL からは、MIMAS 法での MOX 燃料製造技術開発の一環として実施した MH-MOX 粉末へのウラン粉末及びスクラップ粉末添加の影響評価結果について報告された。中国 SNERDI からは、PWR におけるトリウム燃料の照射挙動解析結果と、解析結果に基づくトリウム燃料設計の最適条件について報告された。ノルウェー Thor Energy からは、Th-MOX 燃料開発のための模擬材として Pu の代わりに Ce を用いた Ce-MOX 燃料の粉末混合や焼結などペレット製造について報告された。

被覆管関係では、各機関の被覆管開発状況が紹介された。スウェーデン WH からは、WH/NFI における PWR/BWR 燃料被覆管の照射実績や照射後試験結果など開発状況が紹介された。

三菱原子燃料からは、オールジャパンで開発している PWR 用被覆管である J-Alloy の高燃焼度における照射挙動をオンサイトで評価した結果が報告された。これに引き続き、NFI から、J-Alloy の一種について高温クリープ及び高温バースト試験を実施し被覆管の高温特性評価及び LOCA 時の適用可能性を評価した結果が紹介された。中国 SNERDI からは、耐食性改善を目指した新型 Zr 合金の炉外腐食挙動について紹介された。米国 ORNL からは、B-DBA 時の安全裕度を向上させるために米国で開発が進められている種々の新型被覆管の高温水蒸気反応に関するレビューと性能比較について報告された。

事故耐性燃料 ATF 関係では、ORNL の L.L. Snead 氏の招待講演があったのち、米国 INL、米国 WH、京大、東芝、米国 EPRI、米国 GE-GRC、米国 LANL から各 1 件ずつ、KAERI から 3 件の報告があり、各機関の事故耐性燃料に関する取り組みが報告された。Snead 氏からは、米国で進められている事故耐性燃料のうち、FeCrAl 被覆管の開発状況とその特性について紹介された。INL からは、LWR においてステンレス製被覆管を使用する際の材料強度と反応度低下抑制を両立する燃料仕様の評価結果と指標について紹介された。WH からは、WH における  $U_3Si_2$ 、UN などの核燃料物質と SiC/SiC 被覆管、Coated ジルカロイ被覆管に関する事故耐性燃料開発の取り組みについて紹介された。京大からは、SiC 被覆管に関する開発状況について報告があり、CVD-SiC と LPS-SiC の特性比較が紹介された。東芝からは、LPS-SiC の製造方法や焼結助剤濃度が高温水蒸気反応挙動に及ぼす影響や曲げ強度などに関する試験結果が報告された。EPRI からは、Mo-Alloy を用いた Sever-LOCA に対する事故耐性被覆管の開発状況と今後の開発計画について紹介され、中性子経済の悪化防止については薄肉化により、高温での揮発防止のためにはコーティングにより対応するなど、考えられる懸念点に対する対策を含めて報告された。GE-GRC からは、種々のコーティング剤で外表面をコーティングした Mo-Alloy を用いた Sever-LOCA に対する事故耐性燃料の高温特性評価結果について紹介し、コーティング Mo-Alloy の有効性について報告された。LANL からは、LWR においてステンレス系被覆管を使用する際の材料強度と反応度低下抑制を両立させる燃料仕様に関する評価結果について紹介された。KAERI からは 3 件の報告があり、1 件目は DBA 条件下での広い炉物理パラメータ範囲において MARS コードを用いて FeCrAl-FCM 燃料の安全裕度について評価した結果に関するもの、2 件目は 3D レーザーを用いて高温酸化抑制用被覆管表面 Cr コーティング技術を開発し、高温腐食試験により協同を評価した結果に関するもの、3 件目は、TRISO 粒子燃料を事故耐性燃料ペレットとして LWR に適用した場合の被覆層の照射損傷評価に関する報告であった。

#### (4) トラック 3

トラック 3 では、冷却材喪失事故 (LOCA) 時のペレット挙動に関し 4 件、反応度事故 (RIA) 時挙動及び RIA 試験に関し 4 件、過渡時のペレット-被覆管相互作用 (PCI) 等に関し 3 件、被覆管の高温酸化に関し 5 件の発表があった。

LOCA 時に被覆管が膨れ、破裂する際に、高燃焼度燃料ペレットが破砕し、軸方向に移動

し、さらには破裂開口から放出される可能性があることから、LOCA 時のペレット挙動解明は安全評価上重要な課題である。EPRI は、ペレット加熱試験等の結果を参考に、ペレットが粉体化する境界条件を燃焼度と温度について決定し、ハルデン炉やスタズビックでの試験結果との比較から検証した。同じく EPRI からの報告では、照射済燃料棒から切り出した短尺試料を使った加熱試験を実施し、ペレットの破砕には被覆管による拘束の解放が必要であること、燃焼度及び温度に関して境界条件があること、燃焼度に関する境界条件は照射中の出力履歴の影響を受ける可能性があることが示された。米国原子力規制委員会の報告では、ハルデン炉試験等の結果を参考に、商用炉炉心に対する LOCA 解析を実施し燃料棒から放出される燃料ペレットの量、その炉心分布、放出のタイミング等を評価した結果が示され、ペレット放出に関する境界条件等についての仮定に依存し結果が大きく変わることから本テーマに関する研究を進める必要があるとした。JAEA からは、燃料棒からのペレット片放出の評価において重要な被覆管の破裂挙動について、従来研究における大きなばらつきを低減させるために行っている実験の成果が発表され、膨れ量や破裂開口の大きさがジルカロイの相変態だけでなく酸化量にも依存すること等が示された。

JAEA から、高燃焼度燃料を対象とした RIA 模擬試験、LOCA 模擬試験、LOCA 後の長期冷却性に関連する酸化被覆管の曲げ試験、FEMAXI や RANNS といった燃料挙動解析コードの開発における進捗と最近の成果について報告された。同じく JAEA から、RIA 時の被覆管破損挙動を評価するために行っている多軸応力負荷 EDC 試験の結果が報告され、多軸性の効果を含む被覆管破損基準評価式の案が提示された。NSRR 等で行われた RIA 模擬試験の解析に関する仏・放射線防護原子力安全研究所 (IRSN) の発表では、過渡沸騰に及ぼす冷却条件の影響が評価され、照射済燃料において膜沸騰の発生が遅れることが指摘された。JAEA から、より信頼性の高い手法を用いた RIA 模擬試験における燃料エンタルピの再評価について報告され、燃料破損しきい値、膜沸騰時刻、被覆管変形、FP ガス放出量のエンタルピ依存性においてより明確な相関が得られたとした。

マンドレル試験法を用いて PCI 模擬試験を行うとともに、有限要素法を用いて被覆管中の応力とひずみを評価したスウェーデン・スタズビック社の発表では、局所応力は模擬ペレットと被覆管の摩擦に依存し照射の有無に強く影響されること、ペレットの割れを模擬した領域において応力とひずみが特に大きくなったことが報告された。欧州では自然エネルギーを含めたエネルギーミックスが進み、原子力発電所においても負荷追従等の柔軟な運転が求められている。仏・AREVA から、ランプ試験の結果と COPERNICS コードを基にした熱機械的アプローチを使って、PWR における PCI リスクを評価する運転出力管理手法の開発について報告された。OECD ハルデン計画では、燃料の性能及び安全性の向上のためのデータ取得を目的として、様々な燃料照射試験を行っている。ハルデン計画で行われているペレットからギャップへの FP ガス放出、燃料棒内圧が冷却材圧力を超えたときに起こるリフトオフ現象、出力急昇時の燃料挙動に及ぼす高燃焼度化の影響、LOCA 時の高燃焼度燃料ペレット挙動、ドライアウトが高燃焼度燃料の健全性に及ぼす影響に関する試験の成果について

て発表があった。

NFD から、高温で酸化させたジルカロイ-2 被覆管における深さ方向の酸素及び水素濃度プロファイルを測定した結果が紹介され、温度及び時間条件によっては水素吸収に対する酸化膜の保護性が失われ、被覆管中に水素が吸収されることを示した。JAEA は、空気が混入するシビアアクシデントを想定し、窒素が混在する雰囲気での被覆管酸化挙動について調べた結果を報告し、均一な酸化膜下に形成される局所的な酸化物核が全体酸化量の増大とともに成長すること、酸化物核の成長と評価された活性化エネルギーの変化が対応すること、窒素混入雰囲気下での酸化加速が酸化物核の形成、成長、連結と関連があることを明らかにした。ハンガリー科学アカデミーからは、2 種類の VVER 用被覆管について水蒸気/空気混合雰囲気での酸化挙動について調べた結果が紹介され、水蒸気中に比べて空気混入時には酸化速度が増大すること、水素ガス混入の影響は見られないこと、酸化速度、ブレイクアウェイ酸化条件、酸化後の耐破損特性において従来の E110 よりスポンジ Zr から製作した E110G の性能が高いことが示された。仏・EDF 研究開発の報告では、シビアアクシデント解析コード MAAP4 に対して、KIT で行われた試験の結果を基に空気雰囲気での被覆管酸化モデルを導入し、QUENCH 試験に対する検証解析を行った結果が示された。空気混入が再冠水時の水素発生量を増大させる等の試験結果を再現できたとのことであった。ZIRLO 及び改良 ZIRLO のブレイクアウェイ酸化挙動に関する米国 WH 社の報告では、ブレイクアウェイ酸化は昇温速度等にも依存し、現実的な小破断 LOCA 条件においては 2 つの被覆管合金でブレイクアウェイ酸化が起こる時間範囲は 5400s を超えることが示された。

#### (5) トラック 4

スペイン ENUSA、台湾の清華大学、東北大学、スイス PSI、韓国の東国大学から燃料サイクルおよびバックエンドに関する 7 件の講演があった。

ENUSA からは、LOCA 時や使用済燃料の乾式貯蔵への応用に関連した圧縮試験における燃料被覆管の周方向の構造健全性に関する報告が 1 件と、仮想輸送事故における使用済燃料被覆管の構造健全性に関する報告が 1 件あった。清華大学からは、高雄原子力発電所の乾式貯蔵システムについて、TRACE/FRAPCON/FRAPTRAN といった解析ソフトを用いた健全性評価の結果について報告があった。東北大学からは、原子炉事故時に発生した燃料デブリの処理について、二硫化炭素を用いたウランおよびジルコニウム酸化物の硫化挙動を明らかにし、硫化プロセスの適用可能性を示唆した。PSI からはジルコニウム被覆管中の水素化物の再生成について実験およびモデル解析結果との整合性について報告があった。東国大学からは水素添加したジルコニウム合金チューブの冷却時における水素化物再生成について 2 件の報告があり、加熱および冷却の効果があることを指摘した。

#### (6) トラック 5

トラック 5 は、被覆管、照射後試験技術、モデリングの 3 つに大別される。

被覆管に関するセッションでは次の 5 件が報告された。GE-GRC、EPRI、イリノイ工科大による BWR のスペーサ近くの被覆管など異種金属間の近傍に見られる「シャドーコロージョン」の原因に関する研究では、2.5~300KeV の X 線照射によりジルカロイ-2 とスペーサ材の間の電位差が増大し、腐食が加速すること、UV 照射下で過酸化水素が存在するとジルカロイ-2 の酸化膜の電気伝導度が増大して、腐食が加速することが示された。新日鐵住金による研究では、NDA とジルカロイ-4 の酸化膜の PWR 冷却水条件における交流インピーダンスの測定結果から、酸化膜の内側の tetragonal  $ZrO_2$  相では外側の monoclinic  $ZrO_2$  相に比べて酸素イオン、水素イオンおよび電子の易動度が小さいと推定した。日立による研究では、Zr-1.5wt.%Sn-0.3wt.%X (X=Fe or Cr) 合金、ジルカロイ-2 およびジルカロイ-4 合金の 571 K 腐食試験における水素吸収量が Zr-1.5Sn-0.3Ni 合金に比べて小さくなる原因について、酸化膜の TEM 観察と MD シミュレーションによって検討し、酸化膜中の Fe あるいは Cr の酸化物形成により水素吸収が抑制されるとした。IAEA 主催の研究プロジェクトにおいては、ジルカロイ-4 被覆管の遅れ水素化割れ (DHC) の応力拡大係数のしきい値  $K_{IH}$  として 250°C で  $\sim 5.4 \pm 1.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  との値が得られ、この値は、欠陥が大きくなければ使用済燃料の貯蔵中は DHC は起きそうにないことを示すものとした。電中研から、ジルカロイ-2 の  $Zr^{4+}$  イオン照射後と中性子照射後との微細組織の比較について報告された。照射欠陥蓄積による c 成分転位の形成と  $Zr(Fe, Cr)_2$  析出物の溶解は中性子照射材と類似しており、セルフイオン照射が中性子照射の模擬となり得る可能性を示すものであった。

照射後試験技術に関するセッションでは、次の 4 件の発表があった。PSI から、スイス放射光施設 (SLS) で得られる高強度マイクロ X 線を用いて照射  $UO_2$  燃料の XRF (蛍光 X 線) 分析および XAFS (X 線吸収微細構造解析) を行った結果が報告され、代表的な FP ガスの一つであるクリプトンの存在位置と密度が明らかにされた。Kr は Xe と一緒に存在し、その密度は  $\sim 20 \text{ nm}^{-3}$  と報告された。続いて PSI から発表された SLS の高強度マイクロ X 線を用いた照射  $UO_2$  燃料の XRD (X 線回折) 測定では、転位密度が求められた。回折スポットに発生するストリーキングから評価した結果、58~85 MWd/kgU で  $2.7 \times 10^{14} \sim 4.1 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$  の転位密度を得ている。ただし、この転位密度は他の微細組織観察から得られている密度と較べて 1 桁小さく、今後の更なる評価が必要とのことであった。CEA から、MOX および高燃焼度  $UO_2$  燃料のパンクチャー試験の結果と、核種生成量評価コード JEF-2.2 および JEFF-3.1 による計算値との比較が示され、JEFF-3.1 より JEF-2.2 の方が実験で得られた値と近い評価値であることが示された。東北大から、被覆管に一樣の周方向ひずみを与えることで PCMI 破損を模擬するために行われた従来の EDC (Expansion due to Compression) 試験装置の改良について報告された。改良型では短い(数 mm)の被覆管の内部に Cu や Al の内部ペレットを通し応力を負荷することで、炉内での周方向と軸方向のひずみを良く再現することができるようになった。

モデリングに関するセッションでは次の 4 件が報告された。CEA から、機構論的 FP ガスモデル CARACAS を燃料挙動解析コード ALCYONE、GALILEO、CYRANO3 の各々に導入した結果

が報告され、今後は、RIA や LOCA 時等過渡時の燃料ペレット細粒化モデルなど更なる開発が必要とした。EdF から、挙動解析コード CYRAN03 への FP ガス挙動モデル CARACAS の導入によりペレット中心部だけでなく高燃焼度領域における粒内及び粒界ガスバブルの挙動の再現性が向上したことが報告された。米国 NRC の燃料挙動解析コードの新しいバージョンである FRAPCON-3.5 と FRAPTRAN-1.5 について PNNL から報告があった。定常時用コード FRAPCON では、燃料ペレットのガススエリング、一次クリープモデル、リロケーションモデル等が改良され、過渡時用コード FRAPTRAN では、被覆管の高温における冷却水との反応、バルーニング、被覆管の腐食と水素吸収、破損などのモデルが改良された。INL からは、照射初期の燃料ペレットの割れをモデル化するために拡張有限要素法 (XFEM) と個別要素法 (DEM) の 2 つの方法を試みた結果が報告された。これらの方法は、従来のペレットの構造解析モデルとの整合性や割れの再現性の観点から一長一短あるが、いずれも今後のモデル開発の基礎となる。



ミーティングディナーでの  
湊部会長のあいさつ

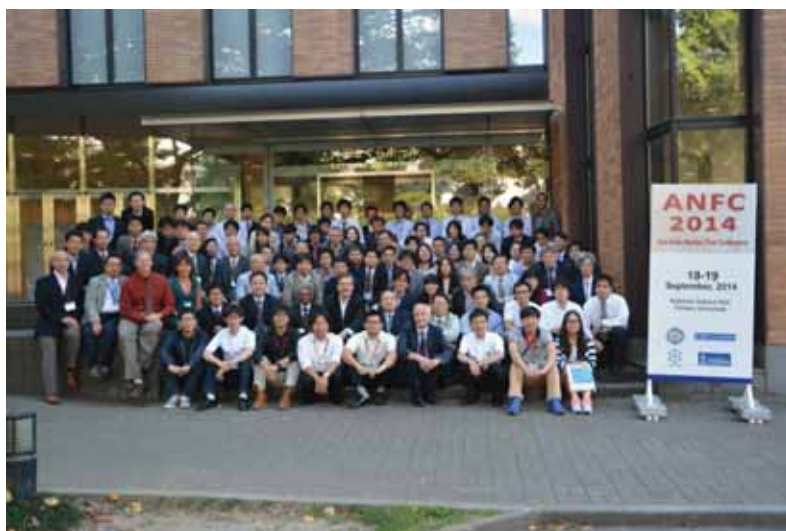
以上

## 第二回アジア核燃料国際会議（ANFC2014）報告

報告者：松永（NFD）、大石（大阪大学）、西（JAEA）、佐藤（JAEA）、古田（MNF）、  
李（東北大学）、紀室（東北大学）、逢坂（JAEA）

平成 26 年 9 月 18 日～19 日、核燃料部会主催、東北大学金属材料研究所・同国際共同センター・東北大学多元研の共催により、東北大学さくらホールにおいて第二回アジア核燃料国際会議（Asian Nuclear Fuel Conference, ANFC2014）が開催された。ANFC は、日中韓の合意に基づき、アカデミックなアジェンダの下、日中韓等アジアを中心とした国々からの研究者・技術者が集い、ベテラン及び若手の間での議論や対話を含めて国際的なフォーラムを形成するためのベースとなることを目的として、3 年毎に日中韓持ち回り開催されるものである。尚、第一回 ANFC は平成 23 年 3 月に大阪大学で開催された。

総勢 100 名の参加（うち一般 72 名・学生 28 名）を得て、計 71 件（招待講演 9 件、口頭発表 21 件、ポスター発表 41 件）の研究発表及び討論が行われた。参加者は、日本 64 名、韓国 18 名、中国 4 名、台湾 2 名、インド 1 名、米国 4 名、フランス 2 名、ドイツ 1 名、スイス 1 名、ロシア 1 名、スウェーデン 1 名、ノルウェー 1 名であった。第一回 ANFC では見られなかった中国及びインドからの参加者、及び韓国からの学生を含めた多くの参加者については、前日まで仙台にて開催されていた WRFPM との引き続きの開催、東北大学研究室での従前よりの日韓交流、日印原子力学会間での協定締結を契機としたインドからの招聘推進の結果であると考えられる。さらに、ANFC2014 では、会議ペーパーを学会欧文論文誌特集号として発行することとしており、これも会議を盛況にした要因として重要な役割を果たしたと思われる。



会場建物を背景にした集合写真

研究発表は、オーラル発表については福島関連、燃料材料基礎、ジルコニウム合金、FBR 及び革新燃料材料の各セッションに分かれ、いずれのセッションにおいても多くの質問と活発な議論がなされた。各セッションは招待講演 1～2 名及び口頭発表数件からなり、招待講演については日本 2 名、韓国 2 名、中国・ドイツ・フランス・米国・インド各 1 名であり、各国の原子力情勢、最新の燃料材料研究や安全研究の成果紹介等がなされた。ポスターセッションにおいては、すべてのテーマを含む多くの研究発表がなされた。

参加者アンケート調査の結果からは、会議内容及び運営について、全般的に良好との評価を得た。また、オーラルセッション進行状況に応じてポスターセッションとバンケットを同時開催と

した結果、ポスターセッションにおいてリラックスした雰囲気の中で時間をかけて議論することができた。その反面、時間的制約により議論が十分にできなかったとの意見もあり、バンケット参加者数見積りの適性化と合わせて今後の検討課題である。また会議への参加動機について大半の回答者が「会議テーマ」を挙げたことは、ANFC 会議アジェンダの意義が完全に定着したことの一つの証左であると考えられる。その他、会議ペーパーの論文化や適切な参加料についても一定割合の参加動機となったことが伺えた。日中韓にて合意がなされた ANFC の WRFPM との連続開催に関して、WRFPM 参加者への ANFC 開催事前アナウンスなどを行ったが、結果的に ANFC 全参加者 100 人中 32 人が WRFPM への参加者であった。このことから、連続開催による参加者増加へのある程度の効果は得られたものと思われ、今後はより効果的かつ具体的な連携のあり方を検討していくべきであろう。

本 ANFC2014 においては、インドを含めたアジア諸国からのみならず、欧米からも多数の参加者を得て盛会となった。また韓国からの多くの学生参加等もあり、当初予定を大幅に超える参加者を得て、アカデミックなアジェンダの下、日中韓等アジアを中心とした国々からの研究者・技術者間、ベテラン及び若手間での議論や対話による核燃料・材料に関する国際的なフォーラム形成のベースとなるという目的を達成したと考えられる。尚、次回は 2017 年に韓国をホストとして WRFPM と連携して開催される予定である。

以下にセッションごとの詳細報告を記す。

#### 【オープニングセッション】

ANFC2014 プログラム委員長である大阪大学の山中教授より、開会の辞が述べられた。まず、各国からの参加者並びに招待講演者への謝辞と、この会議を通して原子炉燃料材料の研究者の国際交流と協力が推進されることへの期待が述べられた。さらに、3 年前の福島の原子炉事故に触れ、依然として困難な状況であるが、我々は原子力工学について夢と理想を持ち続ける必要があり、若い人達には特にそのようにあって欲しいとのメッセージが伝えられた。最後に、この会議が有益なものとなるよう期待の言葉で締めくくられた。



大阪大学山中教授による開会挨拶

引き続き、主催者である核燃料部会を代表して、湊部会長より開会挨拶が述べられた。福島原発事故により、現状日本においてはこれまでに行われてきた軽水炉、新型炉、核燃料サイクルに関する研究開発が停滞しているが、アジア諸国については原子力技術開発が活発に行われており、特に若い研究者へこれまで培った技術を引き継いでいくことが大切であること、本 ANFC 会議は幅広いトピックスを取り扱って学生や若手に研究発表の機会を与えることにより様々な層での議論を促進する意図があり、盛会を祈念することが述べられた。

#### 【Fukushima Related-1】

このセッションでは、招待発表 1 件及び福島事故関連の口頭発表 3 件がなされた。韓国 UNIST



の Dong-Seong Sohn 教授から、“Gas release and rod internal pressure of BN added UO<sub>2</sub> Fuel”として、可燃性毒物として Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の代わりに BN を使用した場合の UO<sub>2</sub> 燃料からのガス放出挙動についての報告がなされた。東北大学桐島准教授からは、“Leaching of Actinide Elements from Simulated Fuel Debris to Seawater”として、模擬デブリを海水に浸漬した時のアクチノイド元素の浸出挙動について報告がなされた。東京大学鈴木准教授からは、“Thermodynamic calculation on possible chemical forms of released fission products from failed fuel rod in the severe accident conditions”において、シビアアクシデント時に破損した燃料棒から放出される可能性のある化学種について、多くの化学種を考慮した熱力学平衡計算の結果が報告された。PSI の Claude Degueudre 氏からは“The asset of advanced spectroscopy techniques to complete post irradiation examination of nuclear fuels”というタイトルにて、燃料の照射後試験のための最新の分光技術について報告がなされた。すべての発表に対して会場より複数の質問がなされ、活発な質疑応答がなされた。

### 【Fukushima Related-2】

先のセッションに引き続き、福島事故に関するセッションとして、招待講演 1 件と口頭発表 3 件があった。ITU の David Bottomley 氏から、“Investigations of the melting behaviour of the U-Zr-Fe-O system”と題する招待講演がなされ、U-Zr-Fe-O の FeO の組成を変化させた際の熔融挙動について報告がなされた。容器の影響を排除するため試料の一部をレーザーで加熱熔融する手法を用いている。京大の Moonhee Lee 氏からは、“Development of SiC materials for light water reactor application”として、軽水炉燃料被覆管用 SiC の焼結時に添加する助剤の影響についての報告がなされた。京大の近藤准教授からは、“Irradiation stability of the SiC fibers at high dose”として、Si イオンを照射した SiC の安定性についての報告がなされた。JAEA 森本氏からは、“The influence of Pu and Zr on the melting temperatures of the U-Pu-Zr-O system”においてサーマルアレスト法で測定した模擬燃料デブリ U-Pu-Zr-O の融点に及ぼす Zr と Pu の影響についての研究結果が報告された。すべての報告に対して会場から質問・コメントがあり、活発な議論がなされた。

### 【Fundamentals】

燃料・材料基礎研究に関する本セッションでは、招待講演 1 件及び口頭発表 4 件の発表があった。CNPRI/CGNPC の Min Xiao 氏からは“Practice and Prospect of Advanced Fuel Management and Fuel Technology Application in PWR in China”と題して、中国における原子力発電の動向として高燃焼度化、炉の大型化などの力強い推進の様子が招待講演として報告された。大阪大学黒崎准教授から“Effect of hafnium on the high-temperature stability of zirconium hydrides”として、高純度 Zr の代替材料としての Zr-Hf 合金における基礎物性に関する研究成果が報告された。韓国 KAIST の Jong-II Yun 氏から“Spectroscopic properties of lanthanide elements in molten LiCl-KCl eutectic”として、熔融塩を用いたランタニド元素分離を行う時に必要な LiCl-KCl 系の熱力学データの拡充に関する研究が報告された。同様に熔融塩に関する話として、JAEA 佐藤氏から“Chlorination of UO<sub>2</sub> and (U, Zr)O<sub>2</sub> solid solution using MoCl<sub>5</sub>”として、デブリの熔融塩を用いた処理における塩素よりリスクが低い MoCl<sub>5</sub>を用いた方法の適用性に関する実験室スケールの試験研究結果が報告された。本セッション最後の発表として、JAEA 徳

永氏から”Self-radiation effects on the electronic ground state of  $\text{AmO}_2$  studied by  $^{17}\text{O}$ -NMR”として、 $^{17}\text{O}$  を用いた  $\text{Am}$  の磁氣的性質を調べる研究についての報告がなされた。多くの質問・コメントが寄せられ、大変活発な議論がなされた。

### 【Zr Alloys-1】

Zr 合金に係る最初のセッションでは、招待講演 2 件及び口頭発表 2 件が行われた。ORNL の Lance Snead 氏から、”Fully Ceramic Microencapsulated and an Enhanced Accident Tolerant LWR Fuel”として、高温ガス炉用に開発されている SiC 被覆燃料をジルコニウム管に装填し、軽水炉へ適用するコンセプトに関する研究が報告された。SiC 被覆燃料の場合、出力密度が低く、燃料が比較的低温に保たれることが利点として挙げられていた。また、SiC と Zr との共存性も良好であるとの報告があった。次に、

NFD の坂本氏からは、Zr-Nb 合金における表面酸化膜中の Nb 化学状態に関する XANES 測定結果が報告された。重慶大学の QingHui Zeng 氏からは”Compression Deformation Behavior of Zr - 1Sn - 0.3Nb Alloy with Different Initial Orientations at  $700^\circ\text{C}$ ”として高温におけるリング圧縮試験と試験前後の EBSD 評価による高温でのすべり系の同定結果が報告された。



ORNL Snead 氏による招待講演

在日インド大使館の Chadaram Sivaji 氏からは、インドにおける原子力発電のため様々な取り組みが紹介された。人材育成や技術開発を活発に行っており、特に高速増殖原型炉 PFBR を 2023 年までに運転開始する計画の紹介や、2004 年のスマトラ沖地震でのマドラス原発の津波被害を踏まえた対策事例の紹介があった。インドとの技術交流は未だ多くなく、今回の ANFC を契機として今後関係を発展させていきたいという参事官からのメッセージであった。他のセッションと同様、すべての講演・発表に対して多くの質問・コメントが寄せられ、大変活発な議論がなされた。

### 【Zr Alloys-2】

引き続き Zr 合金に関する本セッションにおいては、招待講演 1 件及び口頭発表 3 件の報告がなされた。東北大学阿部教授から”Development of Advanced Expansion Due to Compression(AEDC) Test Method for Safety Evaluation of Degraded Nuclear Fuel Cladding Materials”として、被覆管の健全性評価のための新たな技術の紹介とその有効性の検証に関する招待講演がなされた。中国 SNDREI の Zen Qifeng 氏の発表”The investigation on new zirconium alloys with good corrosion properties”においては、耐食性に優れた Zr 合金の開発における第一段階として組成・熱処理をパラメータとしたインゴットに対する腐食試験についての報告がなされた。東北大学 Hui Long Yang 氏からは、”Effect of Mo on microstructural evolution and mechanical properties in Zr-Nb alloys as nuclear fuel cladding material”として、被覆管候補材料である Zr-Nb 合金への添加剤 Mo の効果がメカニズムに関する考察とともに報告された。以上

3件は、従来の Zry を対象とした研究のみならず、アーク溶融法を用いた新たな組成の合金開発や新規の健全性評価手法開発に関するものであり、新たな研究分野の開拓が期待される。AREVA の Ioan Arimescu 氏から “Towards understanding beneficial effects of slow power ramps” として炉心における出力上昇においてスローランプが有効であることが報告された。多くの聴講者の下、活発な議論がなされた。



東北大学阿部教授による招待講演

### 【FBR and Innovative-1】

このセッションでは、先進炉開発における燃料・シビアアクシデント・材料に関する計 4 件（招待講演 2 件及び口頭発表 2 件）の報告がなされた。CEA の Patrick Dumaz 氏より “CEA R&D related to the fuel behavior under severe accidents” として、フランスにおける新型炉開発に伴うシビアアクシデントマネジメントに必要な試験研究の進捗や計画に係る招待講演があった。ソースタームに関して VERDON-5 としてボロン注入下での試験を計画していること、コリウムの挙動に関する新知見などの最新の情報が報告された。JAEA の 塚氏から “Effect of impurity on sintering and dissolution behavior of simulated molybdenum cermet fuels” として、先進高速炉燃料としての Mo サーメット燃料について、回収 Mo の再使用を前提とした湿式再処理時の溶解性に関する実験結果が報告された。中国 Chongqing Univ. の Peng Dou 教授からは “Aberration-corrected TEM&STEM Characterization of Nano precipitates in Al-alloyed high-Cr ODS steels for Generation IV Nuclear Fission Reactors” として、製造上のパラメータのコントロールが難しい酸化物分散強化型鋼に関する新組成鋼の開発とその性能評価結果が報告された。最後に、韓国 Kyunghee Univ. の Kwangheon Park 教授による招待講演として “Mechanistic Modeling of  $UO_2$  Oxidation in the Dry Storage Condition” と題して、照射済燃料の長期保管における  $UO_2$  の酸化挙動に関する研究が報告された。多岐にわたるテーマであったが多くの聴講者から質問・コメントが寄せられ、活発な議論がなされた。

### 【FBR and Innovative-2】

前セッションに引き続き、FBR 及び革新燃料・材料に関して招待講演 1 件及び口頭発表 4 件の発表がなされた。東北大学佐藤教授から “Pyrochemical Study of Uranium and Zirconium Oxides for Fuel Debris Treatment” として、東北大多元研における燃料デブリの取り扱いの基礎検討についての研究が招待講演として報告された。フッ化物、塩化物、硫化物を用いた高温化学プロセスの有効性について述べられ、特に硫化プロセスに焦点を当てた研究報告がなされた。JAEA の田中氏から “Thermophysical



東北大学佐藤教授による招待講演

properties of americium-containing barium plutonates”として、高速炉燃料挙動評価において考慮すべき MOX 燃料中に生成されることが予想される Ba/Sr 及び Pu/Am からなるペロブスカイト化合物の熱伝導についての報告がなされた。Ba(Pu,Am)O<sub>2</sub> の熱伝導率は BaPuO<sub>2</sub> のと比べて大きな差は無く、当該化合物の熱伝導率に与える Am 添加の影響は大きく無いことが報告された。NFD の松永氏から “An investigation of formation behavior of sodium-uranate” として、高速炉のシビアアクシデント (SA) 時に生成すると想定されるナトリウムと酸化ウランの化合物の生成過程に関する報告がなされた。反応時間の増加や試料の表面/体積の比率の増加に伴い UO<sub>2</sub> 中の Na<sub>4</sub>UO<sub>4</sub> の生成率が多くなる等の基礎データが得られた。KAIST の Jun-Yeop Lee 氏から “Study on the formation of Me-UO<sub>2</sub>-CO<sub>3</sub> complexes (Me=Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>)” として、UV 吸収分光法や X 線吸収分光法を用いた 3 元系のウラン錯体の形成についての基礎研究について、東工大 Hwang Dongki 氏から “Studies on Solubility of Lanthanoid(III) Complexes with Fluorinated β-diketones in Supercritical Carbon Dioxide” として、福島第一原子力発電所事故から放出された放射性固体廃棄物の汚染除去に係る基礎研究についての発表がなされた。多岐にわたるテーマについて、特に海外の研究者から多くの質問・コメントがあり、活発な議論がなされた。

### 【Poster & Banquet】

ポスターセッションは 18 日夕刻にバンケットと同時に開催された。東北大阿部教授より開会挨拶があり、東北大学、金属材料研究所、多元物質科学研究所の紹介、および東北地区の東日本大震災からの復興の状況について説明がなされた。また福島第一原子力発電所事故に関連して核燃料材料に関する継続的かつ活発な研究への期待と共に、アジア地域のネットワークの強化に向けて ANFC ならびに本懇親会を有効に活用したい旨が述べられた。

続いて中国の Xiao Min 氏より、ANFC の経緯・意義、中国における原子力の状況、ANFC 参加者とプログラム概要が述べられた後、ANFC の成功と参加者の実りある議論を祈念して乾杯がなされ、ポスター&バンケットセッションが開始された。



バンケットの様子

暫時の飲食の後、多くの参加者がポスター会場に移動し、各ブースにおいて活発な議論が交わされた。以下に一部の発表概要を示す。

Pu 利用・MA 消滅の推進のため必要な基礎研究として、九州大学の松本氏から “Oxygen potential measurement of (Pu<sub>0.928</sub>Am<sub>0.072</sub>)O<sub>2-x</sub> at high temperatures” が報告された。試料作製において酸素ポテンシャル制御が難しいことなど、テクニカルな面での苦勞が伺えた。JAEA の伊藤氏からは “Development of remote sensing technique using radiation-resistant optical fibers to survey in-vessel for fuel debris” として 1F 炉内デブリの遠隔分析を目的としたファイバースコープ+LIBS による分析手法についての技術開発状況が報告された。台湾の研究者より、

台湾では導入されていない燃料外観検査へのファイバースコープ適用に関して耐放射線性等の議論が交わされた。JAEA 柴田氏から” Chemical interaction between granular B<sub>4</sub>C and 304L type stainless steel materials used in BWR of Japan”として日本のBWR実機で採用されている制御棒材料である顆粒状 B<sub>4</sub>C と SUS304L との化学的相互作用に関する報告がなされ、見かけの反応速度、及び制御棒の熔融進展挙動等の基礎的知見が得られている。



ポスターセッションの様子

ポスターセッション及びバンケット閉会挨拶として、東北大三村教授より、参加者への感謝と盛況な会議への祈念が述べられ、セッションを終了した。

### 【閉会】

東北大学佐藤教授より閉会挨拶が述べられた。まず、会議サマリーとして多くの国から多数の参加者を得て成功裏に終了したことが述べられ、さらに会議開催場所である東北大学にける金研および多元研の設立経緯と核燃料・材料研究の展開、今後の ANFC の役割について述べられた。

最後に韓国 UNIST の Sohn 教授より、次回 ANFC は 2017 年に韓国で開催されることがアナウンスされ、会議が終了した。

### 【Young Scientist Session】

学生及び若手間での交流により親交を深めることを目的として、計 30 人（韓国 8 人、日本 19 人、中国 3 人）が参加し、東北地方における伝統的な芋煮やバーベキューを行った。福島第一原子力発電所事故以降の各国における原子力事業の立ち位置、原子力に携わる若手研究者として今後必要とされるもの等、様々な意見が交わされ、盛会となった。他国の若手研究者と交流できる機会は限られていることから、親交を深める目的において非常に有意義なセッションとなった。これは、特に形式に拘らずに対話することにより相互理解が深まったためと思われる。次回へのサジェスションとして、参加者全体でのディスカッションの機会を設けることでより充実したセッションとすることが挙げられる。

以上

### Ⅲ. 夏期セミナー報告

#### 第28回核燃料・夏期セミナー開催報告

報告者：核燃料・夏期セミナー事務局 ((独)日本原子力研究開発機構 三原 武)

開催日：2014年7月10日(木)～7月12日(土)

開催場所：“ヤマハリゾート つま恋” (静岡県掛川市)

第28回核燃料・夏期セミナーは、静岡県掛川市の“ヤマハリゾートつま恋” (以下、つま恋)にて7月10日(木)～7月12日(土)の日程で開催され、部会員29名を含む計57名の方に参加いただいた。

7月10日及び11日には燃料及び燃料挙動に関する基礎や学会賞・部会賞受賞記念講演の他、原子力発電所における燃料取扱い、燃料挙動解析技術開発の現状、炉心燃料分科会の活動、等、核燃料分野にて現在までに実施されてきた内容から今後着目すべき内容にわたって様々な分野の講師の方に講演いただくとともに活発な議論が行われた。続く12日には中部電力浜岡原子力発電所の見学会が実施され、現在整備が進められている安全性向上に関わる重要な設備等を見学しつつ質疑応答を行った。



セミナー参加の皆様 (セミナー会場 つま恋ロビー前にて)

#### 【開催場所】

つま恋は、掛川駅近郊の広大な緑の敷地内で多くの種類のスポーツ・レクリエーションが楽しめるリゾート施設である。その中心となるスポーツマンズクラブの建物(SMC)には、結婚式場、レストラン、室内プール、コンベンションホール等の設備があり、また、SMCの周囲には温泉施設、各種イベントが開催可能な屋外ステージ等がある。

本セミナーは、つま恋の一角にあるSMC内の会議室で開催された。つま恋にてセミナーを開催する企業等は多いとのことで、SMCでは他のセミナーの参加者が多数見受けられた。

### 【燃料及び燃料挙動に関する基礎】

本セッションでは、核燃料に関する基礎として、軽水炉用被覆管、ペレット及び高速炉燃料に関する現状の課題、最近の研究開発動向について講演いただいた。

被覆管(PWR)については、炉内における被覆管の役割、製造及び照射挙動、研究開発状況等について、**MNF** 北川氏に講演いただいた。これまでの照射試験等により得られた被覆管の腐食特性、水素吸収特性、集合組織及び機械特性のデータ、等、重要な知見を分かりやすく解説していただくとともに、腐食量及び水素吸収の低減を目的とした改良被覆管に関する最新知見を紹介いただいた。ペレットについては、その製造並びに照射に伴う組織及び特性変化について、**NFD** 平井氏に解説いただいた。特に、ペレットの製造時微細組織及び照射に伴うその変化は燃料棒全体の照射挙動に大きく影響するため、その制御によって通常時及び事故時の燃料の安全性を向上させることが可能であることが紹介された。また、燃料の安全性向上には、燃料材料の開発とともにその照射挙動評価に係る技術向上が不可欠であることが示された。高速炉燃料挙動については、高速炉用 **MOX** 燃料の概要及び照射挙動について、**JAEA** 前田氏に講演いただいた。高速実験炉“常陽”を用いた照射試験結果ならびに高速炉燃料の事故時挙動に関する実験結果を詳しく解説いただくとともに、廃棄物減容を目的とした **MA** 含有燃料の照射挙動の解析評価について紹介いただいた。



北川氏(MNF)



平井氏(NFD)



前田氏(JAEA)

### 【原子力発電所における燃料取扱い】

本セッションでは、原子力発電所における燃料取扱いに関し、**BWR** 及び **PWR** の炉型別に解説いただいた。

**BWR** における新燃料の受入及び検査、原子炉施設内での燃料移動、炉心への燃料装荷手順、定期検査時の燃料集合体検査、燃料漏えい時の対応並びに使用済燃料の取扱いについて、東京電力巻上氏に講演いただいた。また、福島第一原子力発電所事故を踏まえた使用済燃料プールの安全対策並びに福島第一原子力発電所における燃料取扱いについても紹介いただいた。

**PWR** における新燃料の受入から使用済燃料としての搬出にわたる内容に関し、関西電力

福原氏に講演いただいた。受入れた新燃料の移動及び保管、炉心への燃料装荷手順と使用機器について細かく解説いただいた。また、使用済燃料ピットの重大事故対策並びに福島第一原子力発電所事故を踏まえた PWR での安全対策についても紹介いただいた。

原子力発電所における燃料取扱いに関する知識を得る機会が極めて限られていることから、本セミナーにて両者を比較できる形で講義していただいたことは、参加者にとって非常に有益であったと思われる。



巻上氏(東京電力)



福原氏(関西電力)

#### 【特別講演 1：核燃料に関する研究を振り返って】

本セッションは、これまで長年にわたって核燃料分野における研究に関わってこられた方から、ご自身が経験した苦労話等を紹介いただく場として企画した。

東京大学木下氏に、1970 年代前半から約 40 年にわたって核燃料に関する研究開発に携わってきた経験について講演いただいた。これまで、発電炉での燃料破損に係る研究、燃料ふるまい解析コード(FEMAXI-III)の開発、高燃焼度リムプロジェクト(HBRP)等の国際共同研究プロジェクト、高燃焼度燃料で観察される微細組織変化(リム組織形成)に関する新クロスオーバー研究、等に携わり、肌で感じてきた日本の原子燃料の技術向上の様子とともに、燃料の高燃焼度化に係る課題にどのように取り組んだかについて述べていただいた。合わせて、国際プロジェクトの運営における苦労等についても紹介していただいた。参加者にとっては、今後核燃料分野において研究を進めるにあたり参考になる内容ではなかったかと思われる。



木下氏(東京大学)

#### 【ポスターセッション】

ポスターセッションでは、以下の 3 タイトルのポスター発表があり、約 1 時間半にわたって活発な議論が行われた。当初、ポスターセッション終了後に投票により優秀賞を決め



ることとしていたが、票数に大きな差がなかったことから、発表者全員に優秀賞が贈られた。

- ・ Development of Mo-modified Zr-Nb Alloys as Nuclear Fuel Cladding Materials (東北大学 楊氏)
- ・ 改良型 EDC 試験の有限要素解析 (東北大学 木下氏)
- ・ SiC コーティング被覆管材料の LOCA 時挙動 (東京大学 臼井氏)



楊氏(東北大学)

木下氏(右。東北大学)

臼井氏(東京大学)

#### 【懇親会】

懇親会は 51 名の方に参加いただいた。会の途中でポスター発表の授賞式が行われ、湊部会長より賞状が優秀賞受賞者の楊氏、木下氏(ともに東北大学)、臼井氏(東京大学)に手渡された。最後に、長年核燃料研究分野で活躍されてきた東京大学の石野名誉教授よりごあいさつをいただき、盛況のうちに閉会した。

#### 【燃料挙動の解析技術開発の現状】

本セッションでは、燃料挙動の解析技術に関する研究開発等について講演いただいた。

JAEA 鈴木氏より、通常時及び異常過渡時の燃料ふるまい解析コード FEMAXI(最新版が FEMAXI-7)、事故時の燃料ふるまい解析コード RANNS 及び LOCA 時集合体ふるまい解析

コード FRETA-B について、その特徴および計算プロセスに関する詳細な解説をいただいた。FEMAXI-7 については、前バージョンからの改良点及び同コードを使った解析結果の例とともに、今後改良を加える上での課題について説明があった。RANNS については、反応度事故模擬試験時の燃料ふるまいの解析結果と実験結果との比較が示され、燃料破損に影響を及ぼす因子について説明があった。FRETA-B については、解析結果と実験値との比較が示された。最後に、今後の燃料ふるまい解析コードの課題と展望が述べられた。

JAEA 辻本氏より、分離変換技術及びその意義、核変換システムの目的及び概念、加速器駆動核変換システムの研究開発計画に関する講演をいただいた。高レベル廃棄物処分において長期リスクの低減、処分場の実効処分容量の増大、放射性廃棄物の一部資源化の観点で有利と考えられている“分離変換”に必要な核変換システムの研究開発実施状況について説明があった。合わせて、分離変換技術に関しては、将来の原子力利用のあり方全体の中で現実的な議論が必要であること、その議論において研究者及び技術者が果たすべき役割が示された。



鈴木氏(JAEA)



辻本氏(JAEA)

【受賞記念講演：平成 25 年度 核燃料部会部会賞奨励賞受賞記念講演】

核燃料部会部会賞受賞者の JAEA 高野氏より、“マイナーアクチノイド(MA)含有燃料の調製と基礎特性に関する研究成果概要”と題する講演をいただいた。MA 含有窒化物燃料ペレットの作製、その物理・化学的挙動及び熱物性の測定結果について説明があった。ペレット作製に係る基本技術及び条件の確立、ペレット取扱時に問題となり得る物理・化学的挙動の把握、ペレットの組成と熱物性値との関係評価についてまとめられており、今後の準工学規模へのスケールアップに向けた取組みと成果が期待される内容であった。



高野氏 (JAEA)

【受賞記念講演：平成 25 年度 原子力学会賞技術賞受賞記念講演】

平成 25 年度原子力学会賞受賞タイトルのうち、核燃料分野に関連する内容として、JAEA 本岡氏より“福島第一原発使用済み燃料プールへのヒドラジン注入効果と燃料集合体の長期健全性に関わる課題”（技術賞）と題する講演をいただいた。福島第一原子力発電所事故後、使用済み燃料プールに海水が注入されたが、この海水によるプールライニング等の腐食が懸念されていた。溶存酸素量の異なる純水及び人工海水を対象にγ線照射下での実験を実施することにより、この腐食を抑制するために行われたヒドラジン注入が脱酸素の面で有効に働いていることが述べられた。本研究の成果は、使用済み燃料プール内の材料の腐食抑制策として活用されているということであった。



本岡氏(JAEA)

【特別講演 2：大阪大学における原子力研究の歴史】

本セミナーにおける新しい試みとして、国内の大学におけるこれまでの原子力研究の歴史を振り返る講演を企画した。今回は、大阪大学黒崎先生に、大阪大学の原子力工学教室及び核燃料研究の歴史、また現在の核燃料研究について講演いただいた。大阪大学は、昭和 31 年から原子力に関する研究の準備を開始し、昭和 32 年に原子力工学教室が創設され、その後多くの講座の設置、吹田への移転及び再編を経て現在の原子力工学教室に至っていることが事細かに解説された。これらの変遷は他大学出身の方にとっては新鮮であったと思われ、大阪大学の核燃料研究がどのような変遷をたどってきたかの説明は非常に興味深かった。また、核燃料及び炉材料に関する現在の代表的な研究内容についても紹介いただいた。



黒崎先生 (大阪大学)

【特別講演 2：炉心燃料分科会の活動 ～科学的知見に基づいた規制の体系化～】

核燃料部会炉心分科会での活動状況について、東北大学阿部先生に紹介いただいた。この分科会では、炉心燃料の安全基準の整理及び展開並びにその基準に対する評価方法の体系的整理を行っており、その現状について説明があった。また、海外における基準類及び新知見との相違点の抽出及びそれらへの対応、福島第一原子力発電所事故を踏まえた燃料安全取組みの強化について説明があった。最後に、今後の予定として、炉心燃料分



阿部先生 (東北大学)

科会の検討結果が報告書としてまとめられ発刊されること、検討結果は優先度の高い重要な事項から燃料安全基準の具体的な標準策定に反映していくことが述べられた。

#### 【特別セッション】

本セッションでは、海外のトピックスと地元の話題に関して講演いただいた。

海外のトピックスとして、ハルデン原子炉計画(HRP)の Wiesenack 氏に、ハルデン炉にて実施された炉内 LOCA 試験の結果並びに HRP の Hammlab にて行われているマンマシンインターフェースに係る研究について講演いただいた。ハルデン原子炉計画では世界で唯一炉内での LOCA 模擬試験を実施しており、その際に取得された燃料挙動に係るオンラインデータ並びにペレットのフラグメンテーション及びディスパースル現象に関するデータは極めて貴重である。試験後に行われた PIE 結果とともに LOCA 時の燃料挙動について詳しく解説いただいた。

地元の話題として、掛川市役所の永谷氏に、世界農業遺産に登録されている静岡の“茶草場農法”について講演いただいた。世界農業遺産とは何か、から始まり、茶草場農法の概要、その効果、現状と今後の課題について丁寧に解説いただいた。茶草場を維持することが、茶園の保湿力維持、雑草の抑制、化学肥料の緩衝をもたらす”良いお茶“を生み出すベースとなるのみならず、生物の多様性をも守っているとの話は興味深かった。最後に、茶草場農法が抱える課題とこれに対する今後の取組みについて説明があった。茶草場農法は、農業生産のための努力が生物多様性の保全と両立しているという世界的にも希少な事例なため、この農法を維持していくことが重要であり、今後この取組みを広げていくことであった。



Wiesenack 氏(HRP)



永谷氏(掛川市役所)

#### 【見学会】

最終日の 7 月 12 日(土)には、中部電力株式会社浜岡原子力発電所の見学会を実施し、33 名の方に参加いただいた。

見学会の開始にあたり、浜岡原子力発電所の概要、安全性向上に向けた取組み、新規

制基準への対応に向けた取り組みについて、中部電力の方から説明いただいた。その後 2 班に分かれ、バス、徒歩にて発電所内外を見学した。原子力館では、防波壁や原子炉施設の模型等を利用して、原子力施設の安全対策について分かりやすく説明いただいた。原子力発電所の敷地内では、建設が進む防波壁、取水槽、海水ポンプ、原子炉建屋の大物搬出入口扉、フィルターベント設置場所、5号機のギャラリー(オペフロ及び中央制御室)、ガスタービン発電機、緊急時対策所、等の施設及び設備を見学した。また、浜岡原子力発電所には、過去に経験した事故やトラブルから学んだ教訓及びノウハウを風化させることなく次の世代に伝承していくための“失敗に学ぶ回廊”とよばれる部屋があり、過去の事故及びトラブルの概要を示すパネル、実際にトラブルの原因となった部品等の実物または模型が展示されている。原子力工学に携わる者の興味を引く内容ばかりであったが、見学時間が押ししてしまったために、残念ながら十分に見回ることができなかった。見学会の最後には質疑応答の時間が設けられ、活発な議論が行われた。全体の見学時間として 2 時間半程度を予定していたが、この時間内では収まらないほどの盛り沢山の内容であった。



見学会に参加いただいた皆様 (中部電力株式会社浜岡原子力館前にて)

#### 【謝辞】

今回のセミナー事務局は、大阪大学および(独)日本原子力研究開発機構が担当いたしました。ご多忙中にもかかわらず講師を快くお引き受けいただいた先生方、座長の皆様、ならびに見学会におきまして御支援、御助力をいただきました中部電力(株)及び浜岡原子力発電所のスタッフの皆様にご心から感謝申し上げます。また、本セミナーの開催、運営にあたりご協力いただいた多くの方々に改めてお礼を申し上げます。

以上

#### IV. 編集後記

核燃料部会報第50-1号（夏版）を会員の皆様にお届けいたします。

執筆者の方々には、部会報への投稿を快くお引き受け下さり、お忙しい中ご執筆頂きまして、ありがとうございました。私にとってこのような機関報の発行業務に携わるのは初めてで、至らない点が多々あったかと思いますが、運営小委の方々をはじめ多数の方々のご協力により無事発行することができました。この場をお借りして皆様にお礼申し上げます。

さて、今回の部会報は、9月に仙台で開催し、世界各国の多数の研究機関等から参加のあったWRFPM2014、ANFC2014の2つの国際会議を中心に、原子力学会秋の大会の企画セッション、夏期セミナーといった2014年度上期の核燃料部会の取り組みを掲載させて頂きました。現在の原子力に関する研究状況等、数多くのホットな情報が含まれています。是非とも、お読みいただければと思います。

次回の部会報につきましては、来年5月頃の発行を予定しております。部会報担当者としてより一層の内容充実を図りたいと考えておりますので、会員の皆様からのご意見やご投稿などがございましたら、ご連絡を頂ければ幸甚に存じます。今後とも皆様のご協力をお願い致します。

2014年度部会報担当

(株) ジルコプロダクツ 岩元 哲也

メールアドレス：iwamoto@zpc.co.jp

電話番号：083-246-1272