

## 第 25 回 核燃料・夏期セミナー報告

報告者：高野 賢治、大久保 道子、後藤 寛 (MNF)

2010年8月5日(木)～8月7日(土)

(鹿児島県霧島市・霧島観光ホテル)

今回で 25 回目を迎えた「核燃料・夏期セミナー」は、79名の参加者（講演者 21名）を得て無事開催された。大学、研究機関及び産業界の様々な分野の講師の方々に、核燃料分野だけに留まらず、原子力に関する幅広く且つ専門的なご講演を頂いた。地元からの特別講演として鹿児島の又野氏（株式会社天元 社長）より、火山灰の紹介と自然の持つ力を生活に役立てる工夫について講演頂いた。若手によるポスターセッションは、夕食時と重なったため限られた時間ではあったが、活発な議論が行われた。セミナー最終日は、鹿児島県内の名所を巡り、鹿児島が初めてという方も多く好評であった。



セミナー参加者集合写真（霧島観光ホテルロビーにて）

【基調講演】座長：岩田 修一氏（東京大学）

(1) 核燃料と照射 石野 栞氏（東京大学名誉教授）

サイクロトロンによる実験や照射損傷に関する研究の豊富な経験を踏まえ、照射損傷研究の歴史と考察を通じて、現在取り残されている課題について述べられた。ガドリナイトの蓄積エネルギーの放出、Seitz-Koehlerによる照射損傷古典論の完成、ボイドスエリング、というような照射損傷研究の変遷があり、これより「照射によって励起状態となる電子がどのように緩和するかを調べること」の重要性を指摘された。併せて、「核」という言葉に囚われ過ぎずに燃料や材料の見方を変えて考えてみるべきである、との示唆があった。

(2) 21世紀原子力開発への視点 山脇 道夫氏（東京大学名誉教授）

原子力技術開発の現状を踏まえ、資源的な制約や取り扱いの側面から問題を取り上げつつ、将来の技術開発に対する考えが述べられた。再生可能エネルギー利用の促進が化石燃料消費の抑え込みに有効であり、原子力においても、ウラン地下資源の制約を考えると将来の再利用サイクルを考えたトリウム炉や高速炉は重要である、とのことであった。また、放射性廃棄物の問題は避けては通れない問題であり、核変換の技術の採用や、保管期間が過ぎた廃棄物の回収処理など、やるべきことがあるとの指摘があった。

(3) 高速増殖炉 MOX 燃料の製造と照射挙動 古屋 廣高氏（九州大学名誉教授）

マイクロ波による（MH法）による MOX 燃料の製造に関して、MOX 燃料原料粉末の特性や製造技術に関する研究開発について紹介された。FP ガスの放出、リム組織などの微細組織の機構を解明する研究などでも成果を出され、モンテカルロ法による最新のコードを使用した解析にも成功されている。また 3MeV 近くあるガンマ線より強い X 線の発生と検出方法の改良を行い、高性能な X 線 CT 装置を開発されているとのことであった。

(4) 核燃料研究：過去と将来 大井 昇氏（元 東芝）

バークレー国立研究所での超プルトニウム元素の分離技術や東芝時代の Pu238 試料の作成等、プルトニウムの研究に深く携わられており、IAEA 在職時に「核燃料サイクルシステム」のプロジェクトを立ち上げ、プルトニウムの国際的な指針の策定に貢献された内容について触れられた。今後国際的にウランの価格が上昇すれば、確実に MOX の経済的メリットが生まれ、更にセキュリティの面からもプルトニウムを貯蔵しておくより燃料として消費することが望ましい、とのことであった。



石野 栞氏



山脇 道夫氏



古屋 廣高氏



大井 昇氏



会場の様子

【研究開発トピックス（燃料・安全）】座長：緒方 恵造氏（JNES） 檜木 達也氏（京都大学）

(1) In-Reactor Fuel and Materials Research at the OECD Halden Reactor Project

Margaret McGrath 氏（Halden）

燃料の様々な照射挙動を確認する上で重要な役割を担う世界的な試験炉として、Halden 炉における各種測定装置、およびそれらを用いた測定事例が紹介された。Halden 炉は HBWR であるが、測定に応じて PWR 条件や BWR 条件を模擬できるループを有しているとのこと。照射下での燃料中心温度測定、燃料棒内圧測定、燃料寸法測定をはじめ、腐食電位測定 (ECP) や各種オンラインモニター装置について触れられ、Halden 炉が有する技術によって、MOX 燃料の詳細挙動解明など、今後の原子燃料や材料に関する安全への貢献が期待されるとのことであった。

(2) Fuel Safety Research at JAEA 更田 豊志氏（JAEA）

保安院事業として日本原子力研究開発機構（JAEA）により実施されている軽水炉の安全研究プログラム（ALPS）について紹介された。2002 年より、反応度事故（RIA）や冷却材喪失事故（LOCA）について特殊な試験設備（NSSR、RFEF）における試験結果を基に研究が行われている。第 1 期（ALPS-I）では、局所燃焼度約 80GWd/t までの商業炉照射燃料材各種を対象に試験が実施されており、RIA 時の PCMI 破損や温度効果、および MOX 燃料とウラン燃料との挙動比較、ならびに LOCA 時の被覆管酸化や熱衝撃抵抗に関する研究成果について説明があり、貴重な成果が得られていることが確認された。また、第 2 期（ALPA-II）の計画概要についても説明があった。

(3) Non-Parametric Analysis Scott Franz 氏（MNF）

ノンパラメトリックな方法による炉心設計と安全解析について紹介された。米国及び欧州では、電力会社がより長サイクルの運転や、より高い炉心出力ピーキング係数の適用を望んでいるという背景があり、今後の評価に対して一層の保守性の削減が要求される観点より、ここで紹介される手法の重要性が述べられた。具体的な解析手法の例として、冷却材喪失事故（LOCA）について紹介があった。

(4) Degradation mechanism in Zr-based alloys under

irradiation and hydrogenation 阿部 弘亨氏 (東北大学)

将来の軽水炉燃料に必要とされる高負荷に耐え得る燃料被覆管材料を考える上で、水素化物による材料脆化のメカニズムが重要との観点から、Zr 基合金における水素化物の成長や照射・水素化による材料脆化について、透過電子顕微鏡 (TEM) によるその場観測や第一原理計算によるシミュレーションを用いた研究について紹介された。加速器により水素イオンを Zr 基合金に高速で打ち出す事で水素化物を作り出し、TEM 等を用いて Zr-Nb 系合金の金属表面を観測し、水素化した組織の濃縮や欠損群の析出などの現象を確認できたとのことであった。

(5) Macroscopic to atomic scale understanding - Advanced Microscopy in Nuclear

Application Daniel Jädernäs 氏 (Studsvik)

スウェーデン Studsvik 社では軽水炉燃料の照射挙動を把握するために様々な測定技術の開発が行われているが、ここでは、走査型電子顕微鏡 (SEM) や透過電子顕微鏡 (TEM) 等の微細組織観測技術の応用に関する紹介があった。Zr 合金の第二相粒子 (SPP) の分析やナノインデンテーションによる Zr 合金の特性に関する研究、TEM による ZIRLO や Zry-2 における水素化加速の仕組みに関する観察、SEM/EPMA による MOX 燃料の Pu スポット分析が説明され、また、Ni 基合金の PWSCC に影響を及ぼす水素濃度との関連から、Ni 基合金の表面酸化物分析についても紹介があった。



Margaret McGrath 氏



更田 豊志氏



Scott Franz 氏



阿部 弘亨氏



Daniel Jädernäs 氏

【仏の原子力状況】座長：安部田 貞昭氏(三菱商事)

(1) Expected roles of nuclear energy in France's energy policy Pierre-Yves Cordier (フランス大使館)

フランス原子力事情の紹介があり、原子力大国であるフランスは、現在 58 基の PWR を保有し、それらの総出力は 63GWe にも上るとのこと。廃棄物について国家計画に基づいた地層処分及び中間貯蔵、分離変換技術などで対応しており、また、2020 年までの次世代炉の実用化に向けた研究開発やプルサーマル計画にも取り組んでいるとの説明があった。今後も原子力技術の発展に国を挙げて取り組み、安全性、信頼性、経済性等の面の更なる強化を目指すと共に、日本との関係もますます緊密となる事が予想される、とのことであった。

【技術トピックス (MOX 燃料実用化)】座長：橋爪 健一氏 (九州大学)

(1) MOX 燃料の計画 高橋 好作氏(九州電力)

九州電力によるプルサーマル計画の概要と電力各社のプルサーマル状況について紹介された。九州電力ではプルサーマル計画を進めるために、訪問説明や公開討論会 (NISA、九大等参加) などを通じ、理解活動を積極的に行ってきたことについて説明があった。現在は、九州電力におけるプルサーマルとして、玄海 3 号機での MOX 燃料利用が開始されているが、今後も安全を最優先とし、プルサーマルを着実に進めていくとのことであった。

(2) PWR MOX 燃料の設計と加工 小野 俊治氏 (MNF)

MNF が海外 MOX 燃料加工工場で製造する MOX 燃料の設計と加工、ご自身の欧州駐在を中心とした紹介があった。MOX 燃料集合体は高燃焼度ステップ 1 のウラン燃料 (48GWd/t) を基本とし、設計上の特徴として、ペレットおさえバネの寸法変更、照射中の FP ガス放出を考慮した初期 He 加圧量低下、溶接リペアを考慮した長尺上部端栓の使用、出力ピーキングを考慮した Pu 含有率の異なる燃料棒配置が挙げられた。MOX 燃料は海外で加工されることから、異常発生時に日本の規制当局が立入調査できるか、という問題点が指摘された。

(3) BWR MOX 燃料の設計と加工 加々美 弘明氏 (GNF)

GNF-J が海外 MOX 燃料加工工場で製造する MOX 燃料の設計と加工が紹介された。燃料仕様として、当面は Gd-MOX 燃料棒は使用せず、また加工が難しいことから MOX 燃料棒の軸方向富化度分布を一様としているとのことであった。また、燃料加工上の取り扱い性や耐 PCMI 性能の観点でペレット高さを最適化しているとの説明もあった。将来的には ABWR 向けフル MOX 運転が想定されている。



Pierre-Yves Cordier 氏



高橋 好作氏



小野 俊治氏



加々美 弘明氏

【技術トピックス（軽水炉、高速炉、新型炉、新技術）】座長：平井 睦氏（NFD）

(1) 多元系燃料の物性研究 黒崎 健氏（大阪大学）

高燃焼度燃料（ペレット）の物性を評価する上で、その影響因子を把握することが重要であり、燃料中に含まれる「相」をどのように評価するか、という視点で研究内容が紹介された。具体的には、燃料マトリックス相、酸化物析出相(灰色相)、酸化物析出相(JOG)、金属析出相に分類し、核分裂生成物による熱伝導率への影響、燃料中のアクチニド元素とFPの挙動について説明された。併せて、FEMによる物性評価について紹介され、SEM写真情報からの直接モデル構築によって、より細かく模擬する解析が期待されるとのことであった。

(2) 高速炉用 Am 含有酸化物燃料の特性 小山 真一氏（JAEA）

長寿命核種の核変換法として、マイナーアクチニド（MA）を燃料に混合させて高速炉燃料サイクルシステムに取り込む方法があるが、これに関連して、MAを含有する酸化物燃料の概要について述べられた。Amの生成と基本特性・核変換特性、高速中性子場でMA核変換を行うメリットが説明され、MAを含有するMOX燃料の製造に関する技術開発の結果と照射挙動が紹介された。MAのリサイクルにおいて、AmがPuから生成されるため高速炉やMOX利用の際に考慮すべきであること、CmやPFという分離困難な物質が含まれることを常に意識すること、が留意点として挙げられた。

(3) 先進材料の研究開発 檜木 達也氏（京都大学）

先進材料として原子力分野におけるセラミックス、特にSiCについて紹介があった。核融合炉やガス冷却高速炉といった次世代原子力システムに求められる材料特性として、低放射化性・高温特性があり、セラミックス材料を用いる研究が進められているとのこと。核融合炉構造材料、ガス冷却高速炉用燃料の炉心材料、軽水炉燃料や装置、に対してSiC材料の適用が考えられることから、耐照射特性に優れたSiC/SiC複合材料の開発が行われ、基本的な技術の確立と共に今後の進展が期待されているとの説明があった。

(4) 水炉燃料破損に関するIAEAレビュー 上村 勝一郎氏（JNES）

IAEA技術レポート「水炉燃料破損のレビュー」としてまとめられている、燃料破損の統計、原因、メカニズムを中心に燃料破損全般に関する説明があった。原子力主要各国におけるリーク燃料の年別本数とPWR、BWR燃料の比較について統計を見てみると、日本は、どちらにおいても世界で最も優秀な成績を残しており、特にPWR燃料のリーク数が少ないとの説明があった。ただ最近では、国内のPWR燃料のリークが徐々に増えている。日本の燃料破損率が少ない理由については、未だによく分かっておらず、海外も注目しているとのことであった。

(5) 出力急昇模擬試験技術の開発と適用例 坂本 寛氏（NFD）

国内BWRプラントで4～5サイクル照射された高燃焼度セグメント燃料による出力急昇試験で従来と異なるタイプの破損（外面割れ破損）が見られたことに対し、そのメカニズム解

明に必要な再現試験方法の開発が行われており、今回、開発方法と適用例について紹介があった。この外面割れ破損を模擬する試験方法の開発は、水素拡散試験とき裂進展試験の二面で進められており、試験方法を模擬試験に適用することで外面割れ破損の破損限界の明確化を目指し、燃料棒の健全性評価に役立てることができれば、ということであった。

(6) 高温ガス炉燃料の製造と照射 本田 真樹氏 (NFI)、沢 和弘氏 (JAEA)

講義前半は NFI の本田氏より、ガス冷却炉の特徴・種類・歴史・燃料仕様の比較について説明され、その後ビデオにて燃料コンパクト製造方法に関する紹介があり、NFI における製造工程の高度化について紹介された。後半は JAEA の沢氏より、高温ガス炉の燃料・材料の高度化研究として、HTTR 運転における燃料挙動、高温ガス炉燃料の照射実験、新型燃料の照射について紹介された。



黒崎 健氏



小山 真一氏



檜木 達也氏



上村 勝一郎氏



坂本 寛氏



本田 真樹氏



沢 和弘氏

【特別講演】座長：岩田 修一氏

「火山粒子：無用之用、用之美」 又野 佳洋子氏 (株式会社天元 社長)

鹿児島島の地形(霧島、桜島)・降灰とその環境の中で生活する住民の方々の様子について、写真を用いて紹介された。シラスは、吸水性・はっ水性に優れ、セメント・断熱屋根・ヘルメット・クレンザー・洗顔用品などに用いられており、シラスという地元の粉体資源を有効に活用するための工夫について説明された。

### 【ポスターセッション】

大学・企業の若手研究員によるポスター発表が開催された。夕食時と重なったが、限られた時間の中、多くの方に参加頂き、質疑応答が飛び交う活気のあるポスター発表であった。

- ・「ペロブスカイト  $\text{CaXO}_3$  (X=Ti, Zr, Hf) の熱機械特性」 大阪大学 大石 佑治氏
- ・「Zr 水素化物の各種物性に及ぼす Hf の影響評価」 大阪大学 木村 裕明氏
- ・「Mo-Ru-Ph-Pd 合金の相状態と物性」 大阪大学 菅原 徹氏
- ・「 $\text{SrUO}_4$  の熱物理的性質評価」 大阪大学 徳島 二之氏
- ・「トリチウムトレーサー技術を応用した室温付近における金属中の水素拡散係数及び透過係数の測定」 九州大学 池田 隆博氏
- ・「JT-60U プラズマ対向黒鉛壁への水素同位体蓄積」 九州大学 吉田 雅史氏
- ・「3次元アトムプローブによる Zr-Nb 合金のナノ組織観察」 東北大学 齋藤 健氏
- ・「マグネシウム含有ケイ酸塩を用いたイナートマトリックス用窒化ケイ素セラミックスの焼結と特性」 JAEA 白杵 俊之氏
- ・「地域と原子力との共生を目指したデータベース「ACALi」の概念設計」 三菱原子燃料 山本 哲大氏
- ・「超ウラン用磁化測定装置の開発と磁性及び超伝導」 三菱原子燃料 吉尾 俊亮氏





## 【懇親会】

懇親会は立食形式で行い、74名が参加した。初めに、京都大学の<sup>大石</sup>名誉教授よりご挨拶をいただき、その後、数名の講師や事務局等よりセミナーに参加した感想などを述べた。また、今回参加の Studsvik 社にご協力頂いてスウェーデンコーナーを設け、スウェーデンより持参のパン、チーズ、魚の缶詰、酒が懇親会で振舞われ、好評を博していた。



大石 純氏



スウェーデンコーナー



### 【見学会】

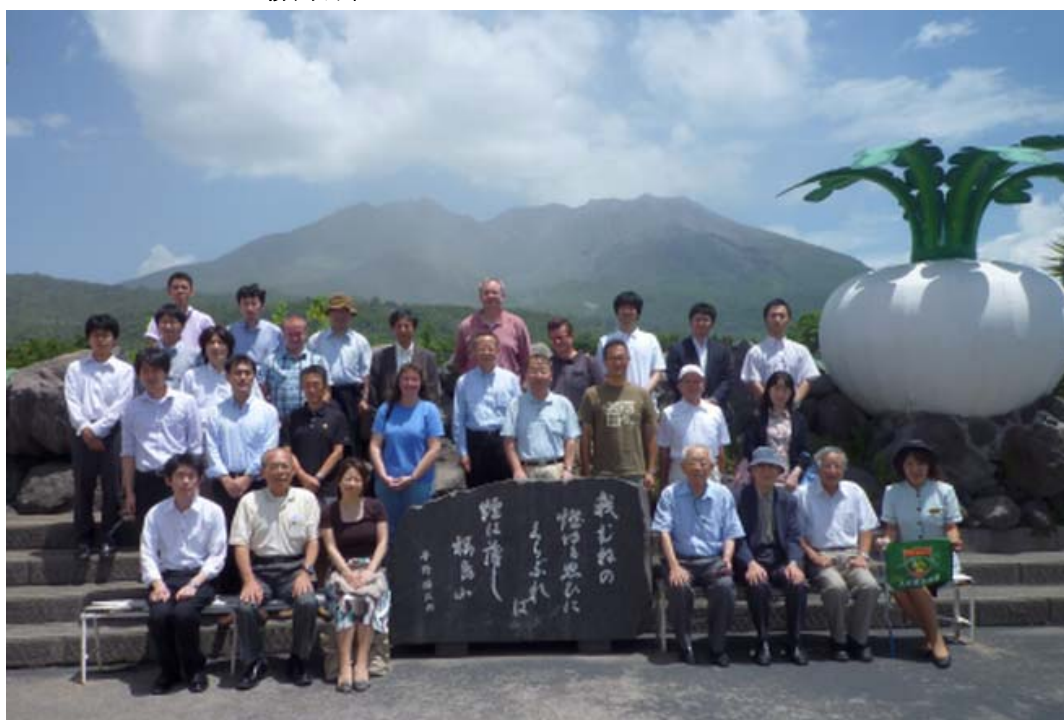
セミナー最終日の8月7日（土）は、霧島、桜島、鹿児島市内を見学した。バス、フェリーでの移動中、桜島の噴火に直面することができ、普段見ることのない大自然の光景に参加者からは驚嘆の声が上がっていた。



霧島神社



フェリーから見た桜島の噴火



桜島をバックに記念撮影

### 【謝辞】

今回のセミナー事務局は、三菱商事㈱、三菱原子燃料㈱が担当致しました。多々至らない点もあったと思いますが、講演者、参加者ならびに部会の方々のご協力で、無事成功を収めることができました。セミナー参加者及び関係の方々に、この場を借りて御礼申し上げます。