

## 国内ワークショップ『先端 ICT 適用による原子力安全の高度化』の報告

【共催】 京都大学エネルギー理工学研究所

ゼロエミッションエネルギー研究拠点研究会 (Ze 研究会)

特定非営利事業活動法人シンビオ社会研究会

【日時】 令和 2 (2020) 年 12 月 15 日 (火) 午前 11 時～午後 4 時 30 分 (受付開始 10 時 45 分)

【場所】 京都大学宇治キャンパス おうばくプラザ セミナー室

京都大学宇治おうばくプラザ 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

【参加者数】 36 名 (会場 20 名、WEB 参加 16 名)

### ＝＝＝＝＝プログラム＝＝＝＝＝

○開会の辞

森下 和功氏 (京大エネ理工・Ze 研究会) 11 時 00 分～11 時 10 分

吉川 榮和氏 (シンビオ社会研究会) 11 時 10 分～11 時 20 分

○講演 1 司会：藤井有蔵氏 (シンビオ社会研究会) 1 時 20 分～12 時 00 分

演題 中央制御盤のデジタル化更新について

講師 石原 和大 氏 (関西電力 (株))

~~~~~昼食(12 時～13 時)~~~~~

○講演 2 司会：石井 裕剛氏 (京大エネ科) 13 時 00 分～14 時 00 分

演題 廃止措置への仮想化技術の応用

—ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点 (スマデコ) における取組—

講師 古澤 彰憲 氏 (日本原子力研究開発機構)

~~~~~休憩 (14 時～14 時 15 分)~~~~~

○講演 3 司会：森下 和功氏 (京大エネ理工研) 14 時 15 分～15 時 15 分

演題 核融合研究における原子レベルでのプラズマと材料の振る舞い

講師 中村 浩章 氏 (核融合科学研究所)

~~~~~休憩 15 時 15 分～15 時 30 分~~~~~

○講演 4 司会：森下 和功氏 (京大エネ理工研) 15 時 30 分～16 時 30 分

演題 核融合炉設計および核融合炉材料開発の最近の動向 (インターネットによる講演)

◆講演 4 A: 核融合炉設計および核融合炉材料開発の最近の動向 (前半)

講師 日渡 良爾 氏 (量子科学技術研究開発機構)

◆講演 4 B: 核融合炉設計および核融合炉材料開発の最近の動向 (後半)

講師 渡辺 淑之 氏 (量子科学技術研究開発機構)

○閉会の辞 森下 和功氏 (京大エネ理工・Ze 研究会) 16 時 30 分～16 時 35 分

## ===ま と め===

### ○開会の辞

森下 和功氏（京大エネ理工・Ze研究会）より、今回の国内ワークショップは、京大エネルギー理工研 Ze 研究会とシンビオ社会研究会の共催に加えるに、同氏の関係する核融合エネルギーフォーラムのメンバーに声掛けしてプログラムに協力していただいたこともあり、コロナの時期もあり、黄檗プラザでの会場参加と Web 参加によるハイブリッドな開催となった経由の説明があった。

次いで、吉川 榮和氏（シンビオ社会研究会）より、本国内ワークショップは、本来は 11 月に岡山市で開催の国際会議 STSS/ISOFIC/ISSNP2020 での国際特別セッションとして開催を企画していたが、同国際会議がコロナ蔓延で来年 11 月中旬に延期されたため、本来の国際特別セッションの趣旨である「先端 ICT 適用による原子力安全の高度化」はそのままにして原子力の範囲を核分裂炉のみでなく核融合炉に拡大してプログラムを変更して国内ワークショップとして京大宇治キャンパスの黄檗プラザ開催することになった。WEB 開催を併用した本ワークショップ開催の準備と実施を全面的に運営いただくエネ理工研森下先生およびその研究室の皆さんに感謝するとの経緯説明があった。



開会の辞での森下氏による WEB 参加者への説明風景

### ○講演 1： 中央制御盤のデジタル化更新について

石原 和太 氏（関西電力株式会社 原子力事業本部 保全計画 G）



石原 和太 氏の講演風景（左は司会の藤井氏）

石原 和太 氏の使用 PPT は[こちら](#)

## 【講演要旨】

プラント40年超運転に向けた安全性向上対策工事として中央制御盤のデジタル化更新（美浜3号、高浜1、2号）を中心に、以下の事項が紹介された。

- ・美浜3号、高浜1、2号の中央制御室・盤面設備を、第1世代から第4世代に更新（中央盤：アナログ計器及びハードスイッチ⇒CRT画面によるオペレーション、保護系：アナログ⇒デジタル、制御系：アナログ⇒デジタル）。
- ・原子力発電所以外では例えば化学プラントのように貯槽の温度・圧力・水位等の状態監視に無線通信を活用しているが、原子力発電所では通信傍受や電磁ノイズを考慮して無線ではなくハードワイヤを用いている。
- ・更新の目的は、①保守性向上（指示計器等の生産中止）、②運転性向上（運転員の負担軽減、ヒューマンエラーによる誤操作低減）である。
- ・警報装置は重要度及び優先度に応じた警報表示（赤：警報、黄：注意警報、緑：ステータス情報）により運転性を向上。更新により約6割の確認内容を削減している。
- ・運転支援システムの目的は運転員の心理的負荷の高い操作の負担軽減であり、運転員を支援する情報を大型表示装置もしくは運転コンソールにて表示、または音声により告知する。
- ・福島第一原子力発電所事故後、高浜1、2号は、新規制基準適合にかかる許認可に加え、60年までの運転期間延長の認可を取得。新規制基準適合にかかる安全性向上対策工事として、中央制御盤取替工事に加え、格納容器上部遮へい設置工事、海水取水設備移設工事等を実施している。
- ・中央制御盤取替工事の作業内容は①既設中央制御盤の撤去、②新設中央制御盤の設置、③ケーブルの敷設・接続であり、工事の状況を写真で紹介。工事期間中は、仮設の監視装置によりプラント監視を行う。

## 【質疑応答】

Q1：シビアアクシデント時の操作盤・筐体は伊方発電所等も同様の設備があるのか。

A1：新規制基準要求であることから伊方発電所等も同様と考える。

Q2：以前はアナログのリレーシーケンスであったものをデジタルの大型スクリーンのものに取り替えたということか。

A2：スライド2のとおり、中央盤はハード計器であったものをCRTオペレーションのものに取り替えた。

Q3：アナログからデジタルにする際に、ラスムッセンモデルという形のヒューマンインターフェースは考慮されているか。ラスムッセンモデルは人が操作するときに、スキルベース、ルールベース、ナレッジベースの3段階があり、その人のレベルに応じた表示をするものである。

A3：（ラスムッセンモデルについては不明であるが、）運転員の負担軽減とともにヒューマンエラー低減を図っている。

Q4：大型スクリーンにはインジケータだけでなく、現場の動画（ビデオ）も表示できるのか。

A4：スライド9にお示しした大型表示装置の可変表示部に、PC等を接続する形で動画等を表示することが可能である。

Q5：中央制御室では何人でプラント監視、操作しているのか。

A5：当直の1班は7～10人程度である。5班体制で、3直交代で24時間365日対応している。

Q6：福島第一原子力発電所の事故のような時の対応の体制は。

A6：中央制御室の運転員とは別にSA対策要員を確保している。

Q7：シナリオのない訓練があると聞いたことがあるが、どのような訓練か。

A7：訓練にはシナリオ開示型とシナリオ非開示型の2種類がある。シナリオ非開示型は、訓練参加者にシナリオを知らせずに訓練を行うものである。

Q8：中央盤をデジタル化することでSA時の対応は楽になるのか。

A8：事故対応時も運転員の負担は従来に比べて減る。

Q9：福島第一原子力発電所事故では水位計が壊れるなどした。今回の取替でそういったことにも対応可能になるのか。

A9：SA 監視操作盤があるので対応可能である。また、それ用のバッテリーもある。

## ○講演 2： 廃止措置への仮想化技術の応用

—ふくいスマートデコミッション技術実証拠点（スマデコ）における取り組み—

古澤 彰憲 氏 （日本原子力研究開発機構）



古澤 彰憲 氏の講演風景（右は司会の石井氏）

古澤 彰憲 氏の使用 PPT は [こちら](#)

### 【講演要旨】

主に福島県敦賀市にあるふくいスマートデコミッション技術実証拠点（以下、スマデコ）での活動について以下のような紹介があった。

スマデコは近年の廃止措置の需要の高まりを受けて整備された拠点で、廃止措置解体技術検証フィールド、レーザー加工高度化フィールド、廃止措置モックアップ試験フィールドの3つのフィールドで構成されており、大学・企業等の外部利用者も有償で利用可能な供用施設である。本施設では「スマートデコミッション」を「安全かつ経済的に合理的な廃止措置」とし、その実現のために仮想現実技術、レーザー技術、実証用モックアップの3つの技術を核として活動している。中でも特に解体技術検証フィールドでは、ふげん内部やスマデコ利用者のニーズを踏まえた点群データの取得・整理と、仮想化技術をはじめとした点群データの応用法の検討等に取り組んでいる。各種現場作業の事前検討を仮想空間内で行うことにより、解体作業時の作業員の被ばく量を低減することを可能にしている。今後もふげんの点群データの取得と整理を継続して行うとのことである。また、これらのデータを用いて、これまで解体作業に参入したことがない地元企業を対象に解体作業の現場を仮想体験して頂くことで、廃止措置事業参入の障壁を下げることなども試みられている。なお、スマデコは初回無償となるトライアルユース制度を利用して仮想現実感技術を用いてふげん内部に仮想的に没入する体験をすることが可能である。さらに、スマデコでは、技術課題解決促進事業として、地元企業の有望技術の検証なども行われており、例えば、床に配管などの障害がある廃止措置現場を自在に移動できる多足型ロボットを開発・検証することなども行われている。

### 【質疑応答】

Q1：廃止措置現場を歩行できるロボットについて、過酷な環境で使うためには耐久性も問題になると思う。今回のロボットでは耐久性などは問題にならないのか？

A1：今回のロボットではそれほど過酷な環境で使用することは想定していないので、現時点では問題になって

いない。

Q2：MRシステムは複数人で同時に体験できるのか？

A2：可能であるが、そのためにはHMDを複数台準備する必要がある。

Q3：レーザースキャナを用いて現場を点群化しているとのことだが、現役のプラントであればそれほど頻繁に現場の形状が変わることはないと思うが、ふげんの様に解体が進んでいる環境では、データを最新に保つために頻繁に計測する必要があるのではないかと？その際、計測の負担は問題にならないのか？

A4：現在のレーザースキャナは重量が大きく、計測時の負担がある。また、機器の設置場所によっては、機器の裏側を計測する必要があるが、狭隘部はハンディ型のレーザー計測器の採用も検討中である。

Q5：廃炉処分は福井県内で6000億の市場規模と説明されたが、年間当たりの額か？またその根拠は？また、MRシステムの市場規模と導入効果はどうか？

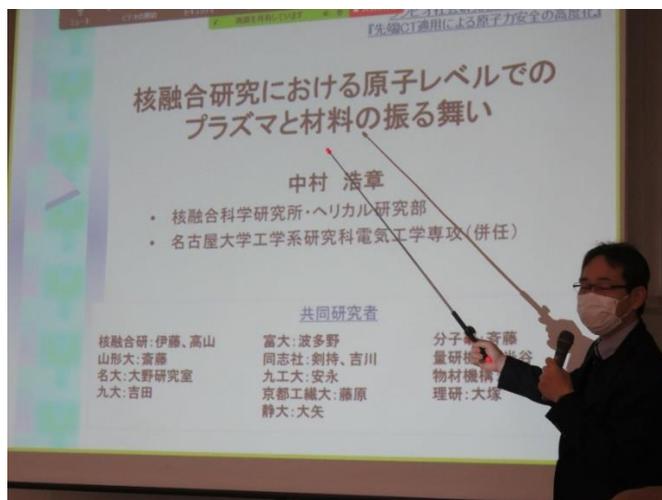
A5：福井県内で6000億円としたのは、平成28年11月時点で廃止措置申請中の美浜1,2号機、原電1号機の廃止措置は2017年度から開始すると想定、その他の原子力発電所は、運開後40年を経過した時点で廃止措置に移行すると想定、廃止措置に必要な期間を30年と想定し、県内全ての商用原子炉（13基）を廃炉にするのに完了するまでの試算額である。この値は、原子力発電所の廃止措置を巡る会計制度の課題と論点（平成25年6月資源エネルギー庁）で述べられている、原子力発電所の廃止措置の費用（p.7）の下限値を用いた。一般論としてMRシステムの市場規模ということであれば、VR/AR/まで含めた国内外XR市場の市場規模は、2025年には1兆円以上との新聞報道がある。

MRシステムを導入することで生まれる効果の算定は難しいが、

- a) 放射線管理区域に入域する必要がないことで被ばく量の低減が図れる。利用者数×被ばく線量の積で表すマンシーベルトで定量化可能と考えている。
- b) 放射線管理区域に入場するための手続きの煩雑さにより、工事見積りのための下見等が難しい状況にある。このため、すでに実績ある企業が有利な状況にあり、新規企業参入の障壁となっている。仮想空間で、工事見積りが可能となれば、健全な競争となる。定量的な算定は難しいが、地域の活性化に重要と考えている。今後のMRを含めた仮想化技術の発展と装置の低廉化が進む中で、スマデコ施設にて蓄積・実証した技術やノウハウは原子力プラントや廃止措置に限らず広く社会に展開・応用可能と考える。

### ○講演3： 融合研究における原子レベルでのプラズマと材料の振る舞い

中村 浩章 氏（核融合科学研究所）



中村 浩章 氏の講演風景

中村 浩章 氏の使用PPTは[こちら](#)

## 【講演要旨】

プラズマと核融合炉壁の相互作用に関する理論シミュレーションの研究紹介がなされた。核融合炉内では、燃料であるプラズマが真空容器内において、磁場のケージに閉じ込められ、真空中に浮いた状態を作っている。しかし、一部のプラズマは意図的にダイバータ板に接触させられ、その場所で、不要となった核融合反応生成物の排気を行っている。この接触部分はかなりの高温になるため、過酷な熱負荷に耐えられない材料からは、溶融等の現象によって種々の不純物が生成され、それがプラズマ中に混入、プラズマ性能を劣化させることが懸念されている。そこで、中村氏らは、プラズマの性能向上や耐熱負荷材料の開発の指針を得るために、理論の立場から、プラズマとダイバータ材料の相互作用の研究を行っている。

まず、ダイバータ候補材料である炭素材とプラズマ粒子との相互作用の研究紹介がなされた。炭素材としては、炭素原子が2次元結晶を構成し、それらが層をなしているグラフェンを対象にした。高エネルギー水素プラズマ（イオン）とグラフェンの相互作用により、種々の炭化水素不純物が形成するが、それらがどのくらいどのように生成するかを調べるために、分子動力学シミュレーションを行った。炭素と水素の原子間ポテンシャルとして、Brennerのボンドオーダーポテンシャルを用いたところ、グラフェンシートに対し、水素が吸着、反射、透過などの反応を示すことなどがわかった。また、それらの同位体効果に関する知見を得ることができた。さらに、グラフェンの層の並びに対し水素の入射方向を種々変更したところ、結晶の端の部分から構造がくずれていくことなどを見出した。これらはHOPGを使った名古屋大学チームによる照射実験の事実と整合する。エッジ構造の違いで生成物が異なること、例えば、Armchair型だとC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、Zig-Zag型だとH<sub>2</sub>、Flat型だと鎖状炭素(-C-C-C-)がそれぞれ形成されることなども明らかになった。以上は、単結晶グラフェンの結果であるが、次にこの成果を踏まえ、多結晶グラフェンを対象にしたシミュレーション研究を試みた。しかし、分子動力学法のみではすべてを模擬することはできないので、二体衝突近似法BCAと分子動力学法MDのハイブリッド法を開発を行った。

ダイバータ候補材料は、歴史的に、炭素材からタングステン材料に移っている。これは、タングステンは高融点金属なので高熱負荷に強いと期待されること、また、炭素は水素と共有結合するため、ダイバータ材として炭素を使うと、多くの水素（核融合炉燃料）がダイバータに吸収されてしまうことが懸念されるからである。こうした背景を踏まえ、中村氏らの研究も、タングステンと水素イオンの相互作用研究に移行していった。

タングステンの照射効果で特徴的なのは、ヘリウム（核融合反応生成物であるとともに、中性子照射による材料内核反応の生成物でもある）の照射により、Heバブルとよばれるナノ構造が材料内に形成すること、Fuzz構造とよばれる繊毛のようなナノ構造が材料表面に形成されることである。Fuzzは容易に材料から脱離し、プラズマに混入し、不純物になることが懸念されている。そこで、このような構造がどのようなプロセスによって形成されていくかを理論の立場から調べることにした。同じ希ガス原子であるArやNeではFuzz構造は形成されない。HeだけがなぜFuzzを形成するのかも大変興味深い。

中村氏らは、Fuzz構造を形成するためには、侵入、拡散と捕獲凝集、Heバブルの成長、Fuzzナノ構造形成の4つのプロセスが重要であることに着目し、これらを計算機シミュレーションにより調べることにした。ただし、これらの現象は、時間スケールにも、空間スケールにも、エネルギースケールも大きく異なるため、二体衝突近似法BCA、量子計算DFT、分子動力学法MD、モンテカルロ法KMCなどの複数のシミュレーション技法を駆使することにした。その結果、Heのみが100オングストローム程度の材料深部に侵入しうること、Heは材料内で凝集しバブルを形成しやすいこと、また、これらの現象の結果、照射表面にFuzzらしき構造が形成されていくこと、さらには、連続的な追照射の効果により、実験で観察されるFuzz構造の形成がなされていくプロセスを再現することに成功した。

このような原子レベルのシミュレーション研究は、核融合のプラズマ材料相互作用の研究にとどまらない。中村氏らはトリチウム壊変効果によるDNA損傷の研究にも着手している。生体内のDNAに取り込まれた（通常のHと置換した）トリチウムは、12年の半減期でベータ崩壊する。その結果、ベータ線による損傷や、トリチ

ウムの壊変によるヘリウム3により、DNAが損傷を受けることが懸念されている。そこで、DNA内のHをHeに置換した分子動力学シミュレーションを実施したところ、チミンとアデニンの間の水素結合やシトシンとグアニンの間の水素結合が切れ、DNA鎖が崩れていく様子が明らかになった。本研究はFuzz構造形成の研究とともに、今後も継続して行っていく。

#### 【質疑応答】

Q1: グラファイトについては以前、電池の分野で研究対象にしたことがあった。その経験を踏まえると、HOPGがグラファイトのような単結晶構造でないように見え、さらに、水素を照射すると結晶粒界から壊れているような印象がある。

A1: 今回のシミュレーションでは結晶端から壊れることが見えた。結晶粒界を直接シミュレートしていないので、今後の課題として検討したい。

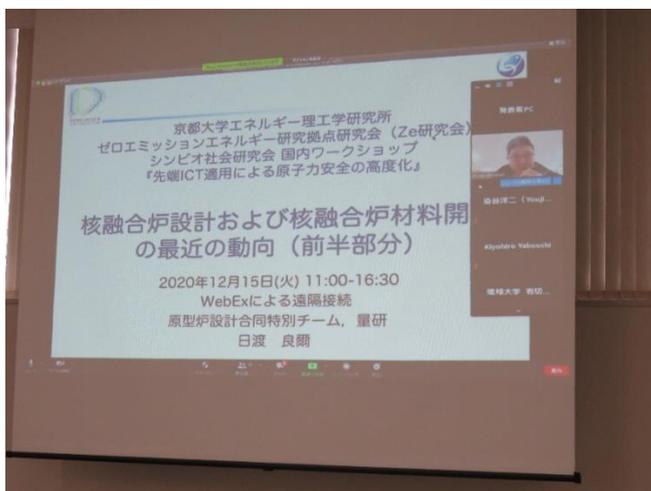
Q2: 燃料電池の電極として炭素が用いられており、その炭素にリチウムが入り込む。この現象を扱うため、今回のシミュレーションで扱われている水素をリチウムに替えると別の研究として展望が開けるのではないか。

A2: 電極のシミュレーションは、名工大グループが某自動車メーカーと共同研究をされており大変魅力的なテーマである。今回のシミュレーションを用いるためには、リチウムを扱える適切な原子間ポテンシャル関数が開発されているかどうかの問題があるので、現状では容易に水素をリチウムに置き換えることはできないが、今後検討していきたい。

### ○講演4: 核融合炉設計および核融合炉材料開発の最近の動向 (インターネットによる講演)

#### ◆講演4A: 核融合炉設計および核融合炉材料開発の最近の動向(前半)

日渡 良爾 氏 (量子科学技術研究開発機構)



日渡 良爾 氏の WEB 講演風景

日渡 良爾 氏の使用 PPT は [こちら](#)

#### 【講演要旨】

国際協力にもとづく核融合炉設計の最近の動向に関する紹介があった。現在フランスに建設中の国際熱核融合実験炉 ITER、その後を見据えての原型炉の設計、核融合研究に関わる ICT 利用、さらに、核融合安全にかかわる話がなされた。

核融合炉は 2050 年ごろに導入し、その後、2100 年ごろには、日本のエネルギー輸入量削減に貢献するよう実用化を進めたい。これはエネルギーセキュリティへの貢献にもなる。実際、我国では、核融合エネルギーの開発

はパリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略(2019年、閣議決定)や、また、革新的環境イノベーション戦略(2020年、内閣府)にも位置付けられている。

トカマク方式(炉心で重水素およびトリチウムプラズマを磁場によって閉じ込める)を採用する実験炉 ITER については、2020年に建設組み立て(ITERの組立工程のアニメーションをVIDEOで紹介)を開始し、2025年に運転を開始(いわゆる、ファーストプラズマの点火)する予定である。ITERのミッションは、50万kW熱出力の長時間燃焼を行うとともに、炉工学技術の実証である。また、核融合エネルギーへのICT技術の適用例として、ITER機構とNTTの包括連携協定が交わされ、NTTの種々の技術(超高速、超低遅延ネットワーク接続、データストレージ、コンピューティング、グローバルネットワークインフラを含む未来の情報通信技術)をITERに適用することが試みられている。ネットワークから端末まで、すべてにフォトニクスベースの技術を導入し(オールフォトニクス・ネットワーク)、実世界とデジタル世界の掛け合わせによる未来予測等を実現(デジタルツインコンピューティング)、さらには、あらゆるものを光でつないで制御させる(コグニティブ・ファウンデーション)ための構想であり、IOWN構想と呼ばれている。これが実現すると、ITERから制御室までを50GB/sで結ぶこと、シミュレーション技術とITER技術をつなぐこと、ITERサイトのデータセンタと世界を結んでデータ共有を行うことが可能になる。一方、量子科学技術研究開発機構(QST)とNTTの間にも、今年度新たに連携協力協定を締結した。これは、QSTの核融合情報科学の構築に向け、理論シミュレーションのスパコンの設置、日本においてもITERのデータベースを使って実験解析できるようITER遠隔実験センター(REC)の設置、RECおよびスパコンをつないで核融合ビッグデータを作り、核融合情報に関する拠点化を目指す狙いがある。

ここまで紹介したITERの運転性能の評価をベースに、2035年頃には、発電のための原型炉 DEMO を実際に作るかどうかを判断し、その後、2050年ごろには稼働させたいと考えている。数十万kWを超える安定した電力を作り出し、さらに、稼働率および燃料の自己充足性の確認することが原型炉のミッションになる。このような原型炉を開発するために、まず、オールジャパンの体制づくりが必要になる。そのために、2015年3月文科省に核融合科学技術委員会を設置し、ロードマップの策定、技術基盤構築のための体制の整備、原型炉設計合同特別チーム活動(産学合同の設計チーム)を組織するなどして、国の直接関与がある原型炉設計体制が構築されている。

原型炉研究開発のロードマップでは、2020年と2025年に中間評価チェック&レビューを行い、2035年に原型炉を構築するかの移行判断を行う。そのために、2020年までに、概念設計の基本設計を実施し、その後2025年までに概念設計の実施、2035年までに工学設計を行うことになっている。これを実現するために、基本概念では、信頼性の高い技術(既存技術、R&D飛躍の小さい技術)を適用すること、2020年以降に建設コストを含めた最適化を実施することにした。原型炉では、電気出力500MWe程度(発電端)、水冷却(水冷却15.5MPa、290~325℃)を想定している(原型炉の概念構築について、アニメーションを紹介)。

核融合炉の安全性については、仮想事故評価に基づくトリチウム閉じ込め方策の研究活動が進行中である。発表中では、まず冷却系配管が破断し、その後、炉心の反応は無事に停止されるものの、トリチウムの混ざった冷却水が外部へ漏洩する想定事故の研究例が説明された。軽水炉等での事故解析の実績のあるMELCOREなどで解析し、トリチウムの漏洩挙動を評価している。評価の結果、IAEA緊急退避不要条件(早期被ばく << 100mSv)は、十分に満足されることが確認された。事故後、圧力抑制プールで圧力を下げ、トリチウムの漏洩を抑えることが重要である。一方、廃棄物処理に関わる安全については、交換したブランケットを処理後に地中埋設し、その際、放射性同位元素が環境中でどのように拡散するかを調べるのが重要になる。評価の結果、拡散量はさほど小さくなく、廃棄物を浅地中埋設することの可能性があると確認されているとの報告があった。

### 【質疑応答】

Q1: 設計中の原型炉はどこに建設されようとしているのか。

A1: 原型炉の立地場所は正式には決まっていないものの、すでに青森県が誘致に乗り出している。

Q2: 核融合炉では多くのトリチウムが必要とされるが、現在福島には、原発事故の影響でたくさんのタンク内に

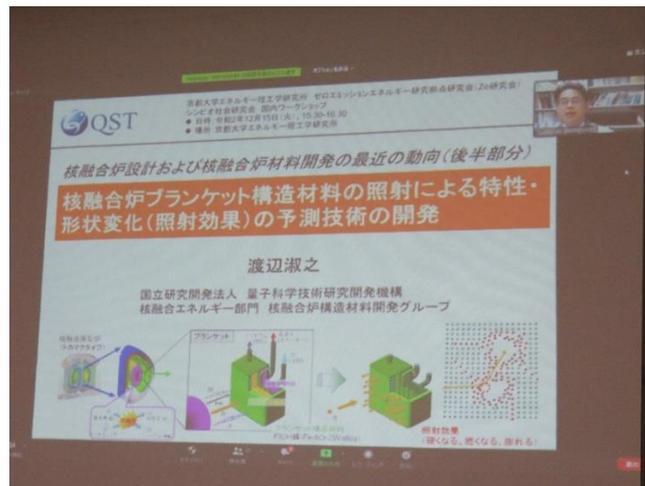
トリチウム水が保管されている。これを核融合炉の燃料に使うことはできないのか？

A2: 福島原発のトリチウム水については、この濃度はとても薄く、すべてのタンクのトリチウムを集めても、高々グラムオーダー程度にしかならない。一方、核融合ではキログラムオーダーのトリチウムが必要になる。福島の薄いトリチウムを濃縮して使おうということにはなっていない、また、半減期 12 年のトリチウムは数十年後の核融合炉には適用できない、

C: 核融合炉燃料の観点では、福島のトリチウムはとても少ない量である。その程度の量に大騒ぎしているのが現実ですね。

## ◆講演 4 B: 核融合炉設計および核融合炉材料開発の最近の動向 (後半)

渡辺 淑之 氏 (量子科学技術研究開発機構)



渡辺 淑之 氏の Web 講演風景

渡辺 淑之 氏の使用 PPT は [こちら](#)

### 【講演要旨】

国際協力にもとづく核融合炉材料開発の最近の動向、特に、核融合炉ブランケット構造材料における中性子照射劣化の予測技術の開発状況に関する紹介があった。ブランケット構造材料は中性子照射環境に曝され、劣化する。しかし、実際の核融合炉環境がないので、計算機シミュレーションを利用した材料開発が行われている。

まず、中性子照射によりブランケット構造材料 (Fe-8Cr-2W 合金) 内で起きる現象の説明があった。核融合反応により生成される中性子の運動エネルギーは非常に高く (14MeV)、この中性子が固体結晶に入射されると、材料内の原子が格子位置からはじき出され、原子空孔や格子間原子などの点欠陥が高密度に形成される。また材料内では核変換反応も起こり、ヘリウム He (不純物) が形成されることもある。これらの点欠陥が拡散・集合化することで、格子間原子集合体や空孔集合体、空孔・ヘリウム集合体などが形成される。こうした欠陥集合体の形成は、材料のマイクロ構造に変化をもたらすことになり、その材料の特性は、一般に劣化 (硬くなる、脆くなる、膨れる) する。こうした環境で使われる材料を開発する際には、耐照射特性を調べておく必要があるが、現時点では核融合炉照射環境は存在しないので、原子炉 (核分裂炉) やイオン加速器などの代替照射施設で試験される。これらの代替照射場の照射能力 (ここで、照射能力とは、点欠陥の生成速度  $dpa/s$  とヘリウム生成速度  $appmHe/s$  で表される) は、一般に核融合のそれとは桁違いに異なる。そこで、核融合炉材料の開発にあたっては、この照射能力の違いを補正した上で、材料照射特性を理解する必要がある。

次に、材料照射プロセスに関する説明があった。照射プロセスには、欠陥生成、欠陥集合体形成、マイクロ構造変化、特性変化、寿命評価のステージがある。これらを理解するには、種々の実験手法や計算機シミュレーション手法を適宜組み合わせる必要がある。これをマルチスケールモデリングと呼んでいる。核融合炉研究開発

に関する日欧の共同研究プロジェクトにおいては、4つの評価コード：(1) ミクロ組織ベースの照射場依存性相関評価、(2) スエリング評価、(3) 強度特性評価、(4) 材料健全性評価 の開発を進めている。以下に、解析事例の一部を紹介する。

最初の解析事例は、照射スエリング(体積膨張)の予測モデルの高度化に関するものである。このタスクでは、主に、反応速度論解析(平均場動的挙動シミュレーション)を行っている。照射材料では、空孔集合体や空孔・ヘリウム集合体の形成により、材料のマクロなサイズは大きくなる(スエリング現象)。これを反応速度論で調べるのであるが、従来の照射スエリングモデルにおいては、欠陥集合体の核生成について、臨界核サイズを経験的に決定していた。すなわち、ある特定の実験結果に合うよう臨界サイズを人為的に決めていたのであるが、このモデルだと、実験条件が変わって、臨界核サイズが変わった途端、この前提が破綻することになる。そこで我々は、分子動力学計算によって欠陥結合エネルギーを評価し、欠陥集合体の熱的安定性の指標を系統的に調べた。これをマクロモデルにフィットするように調整することで、あらゆる照射実験条件にも適用可能な核生成モデルを開発した。この新しいモデルをもとに、2700個の反応速度式を連立し、照射下材料のスエリング現象を予測したところ、実験結果を適切に再現できるようになった。さらに、照射能力の違いによりスエリング量がどれくらい変わるかを調べることができるようになった。

次に、2番目の解析事例として、ブランケット構造材料 F82H 鋼中の析出物 Cr23C6(材料強度強化のために意図的に導入されている炭化物)における水素捕獲挙動の解析結果を紹介する。以前より、実験的評価からは、この析出物が水素の有効なトラッピングサイトになっている可能性が指摘されていた。Cr23C6のような粒界近傍の析出物に水素同位体が大量に捕獲されると、粒界脆化やトリチウム吸蔵量の増加が懸念されているため、同析出物中の水素同位体の吸増量を定量的に予測する必要がある。そこで我々は、第一原理電子状態計算を行い、水素の導入による結晶の内部エネルギー変化を調査した。その結果、やはり、Fe 母相よりは析出物 Cr23C6 に水素が安定に捕獲されていることが示された。この時、水素原子は炭素原子ではなくクロム原子の周辺に偏在していた。この水素捕獲メカニズムを調べるために、水素原子の構造に対してマリケン電子密度解析を適用したところ、水素原子は負の電荷に帯電しており、正に帯電したクロム原子の周辺に位置することで系のエネルギーが大きく低下する、即ち水素原子が同析出物中に強く捕獲されることを明らかにした。

最後に、講演のまとめが読み上げられた。代替照射を有効活用するために、メカニズムの理解に基づいたモデル化研究や材料挙動予測技術が重要であること、照射プロセスはマルチスケール現象であり、その理解には多様な実験や計算機シミュレーション技術の組み合わせが必要であること、ボイドの核生成現象をモデル化し、ボイドスエリングの照射場依存性を明瞭にしたこと、さらに、鉄鋼材料中の析出物による水素の捕獲メカニズムを調べた。今後は、他の重要な物理素過程を取り込んでモデルの精度を向上させるとともに、上層スケールの解析手法への繰り込みを行うことで、核融合中性子照射効果の影響を踏まえた材料のスエリング評価、構造健全性評価の技術開発への貢献を目指す。

### 【質疑応答】

Q1：核融合炉ブランケットはどれくらいの期間使えるのか。

A1：照射量の指標でいくと、今の核融合炉ブランケット構造材料は 20dpa くらいまでは使えると予想している。これは1年分の照射に相当する。1年経過したら交換することになる。コストとも関係するので、交換に要する時間はできるだけ短い方がよい。

Q2：高エネルギー中性子の材料に対する透過力は高いと思うが、中性子には電荷がないので、突き抜けてしまうのではないかと？

A2：ブランケットは厚みが 1.5m~2m 程度ある。この間に、高エネルギー中性子といえども標的原子と衝突してエネルギーが減衰する。また、ブランケットの後方にはシールド材が配置されているので、中性子が真空容器外に透過することはないよう設計されている。

Q3：トカマク型の開発を考えているようであるが、他の炉型はもはや開発されないのか。

A3：我々QST（量研機構）ではトカマク型の開発に注力しており、国際熱核融合実験炉(ITER)もトカマク型である。一方で、ヘリカル型の開発を行っている機関（核融合科学研究所）もある。



会場での質疑風景

## ●閉会の辞

森下 和功氏（京大エネ理工・Ze研究会）より、会場参加とWeb参加によるハイブリッドな遠隔ワークショップは初めての経験だったが、研究室スタッフと参加の皆さんの協力で滞りなく実施できたことは収穫だった。今年は核分裂に核融合を加えた原子力を対象にしたテーマで国内ワークショップを行ったが、来年は原子力に再生可能エネルギー等も加えた国内ワークショップとなるようにシンビオ社会研究会の吉川会長と相談して企画したいので、本日参加の皆様には是非協力くださいとの期待の言葉でワークショップを閉められた。