

平成29年度 共同利用成果報告書

目次

1. 大型設備の経過報告
 - 1.1. 原子炉（弥生）経過報告
 - 1.2. ライナック経過報告
 - 1.3. 重照射（HIT）経過報告
 - 1.4. ブランケット経過報告
2. 共同利用成果報告（F, L, H, Y 各シリーズ）
 - 2.1. 弥生オフパイル（Fシリーズ）：計8テーマ（別表）
 - 2.2. ライナック（Lシリーズ）：計7テーマ（別表）
 - 2.1. 重照射（Hシリーズ）：計14テーマ（別表）
 - 2.1. 弥生研究会（Yシリーズ）：計7テーマ（別表）
3. 平成29年度専攻内行事一覧
4. 各種委員会名簿
5. 平成29年度弥生施設共同利用実験・題目別実験担当者名簿
6. 平成29年度 UTNS レポート一覧

大型設備の経過報告『原子炉（弥生）経過報告』

1. H29 年度の現状について

- H27 年末に発生した HOT 排水配管からの漏洩事象を機に、長期的な設備維持の観点から、新しい排水配管を放射性同位元素等の使用施設 (RI 施設) の設備として敷設するべく申請し承認を得た (第 1-2 四半期)。先ず、屋内外の既設排水配管撤去作業を行うにあたり、一時管理区域を適宜設定し、作業要領書を作成した上で、既設配管の撤去を実施した (第 3 四半期)。続いて、新規に希釈槽入口までの配管について敷設工事を実施し、使用前に敷設配管から漏水のないことを確認して運用を開始した (第 4 四半期)。なお、敷設がなされるまでは、新たに廃水を生じさせるような廃止措置計画関連作業を控えるとともに、管理区域で発生する手洗い等の排水も含め、配管を使用しての排水禁止措置を継続した。撤去した配管はドラム缶に封入し、その一部は既に外部搬出し (第 4 四半期)、残りのドラム缶についても、次年度早々に処理委託する予定である。
- 前述した新規排水配管敷設に絡み、核燃料物質使用変更承認申請書の承認を前年度に受けた上で、シャワー室及び汚染検査室の改装を行った (第 2 四半期)。
- H28 年 11 月に、燃料を水中切断する作業場所階下の地下部屋において、床面の水漏れ事象が発見され、床面と壁面との接合ラインにおけるコンクリート劣化が主原因であるとした。これに対処すべく、高い防水工法を取り入れることで、床及び壁の補修作業を実施した (第 1-2 四半期)。
- H29.6.6 に発生した「日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターにおける核燃料物質の飛散に伴う作業員の汚染事故」に関して、東大専攻内でも事故時対応の水平展開を実施した。汚染除去の観点から、クリーンブースを購入し、組み立て訓練及び除染訓練を行うとともに、全面マスクを追加購入した (第 3-4 四半期)。また、「身体汚染が発生した場合の措置に関するガイドライン」案 (内規) を作成した。
- H29 年第 1 四半期の原子炉施設保安検査において、検査項目の一つである「施設定期自主検査等の実施状況」で不備の指摘があり、原子力規制委員会より保安規定違反 (監視) と判断された (第 1 四半期)。具体的には、「炉心集合体駆動設備の駆動装置の分解検査」は、廃止措置に入る H24 年時の保安規定変更時から同規定別表の検査頻度注釈が誤って削除されたために、保安規定上、他の検査頻度 (年 1 回) と同様に点検を実施しなければならない記載となっていた。本年 1 か年点検時に、メーカーによるサイクロ減速機の分解検査を実施し (元々の注釈では 5 年毎に実施)、異常のないことを確認した (第 2 四半期)。更に、今後の分解検査頻度を 10 年毎に実施するように修正し、保安規定の変更を行った (第 3 四半期)。
- H28 年第 1 四半期にワイア放電加工機洗浄水を蒸留したが、その際に発生した濃縮液の回収と蒸留水の希釈槽への内運搬作業を実施した (第 4 四半期)。これらの作業は、燃料小片化切断に向けて作業環境を整えるためであった。
- 上述した原子炉棟実験準備室を經由して蒸留水の内運搬作業を行っていた際、同室の大扉が完全には閉まらない事象が発生した (H30.1.30)。ビニールシートで目張りし、楔で固定した他、PP 上の措置を施した。修理依頼業者との打合せにより、閉まらない状態が長期化することが予想されたため、地元をはじめ規制庁にも情報提供した (第 4 四半期)。また、HEU-A 2/4 体目の小片化切断を再開する予定であったが、大扉が完全には閉まらない不具合の状況においては、修復を優先すべく、切断作業を延期した。
- HEU-A 以外の HEU-B 及び HEU-C については、H29 年度期間中においても、引続き炉心にてクーリングしており、IAEA による保障措置も含めて炉心の健全性を担保している。

2. スケジュール

- 表 1 は、承認を受けた廃止措置計画書にある「弥生炉廃止措置計画の全体工程」を改定した版 (H29.見直し) であり、報告該当期間を赤字で記した。前出のホット排水配管敷設工事、非常

用発電機の煙道改修工事、地下2階室の床壁防水工事、シャワー室等の改装工事、大扉の閉じ不具合及び炉棟外壁防水工事など高経年化対応が優先され、HEU-Aの小片化作業に着手できず、当初予定していた輸送は延期となった。

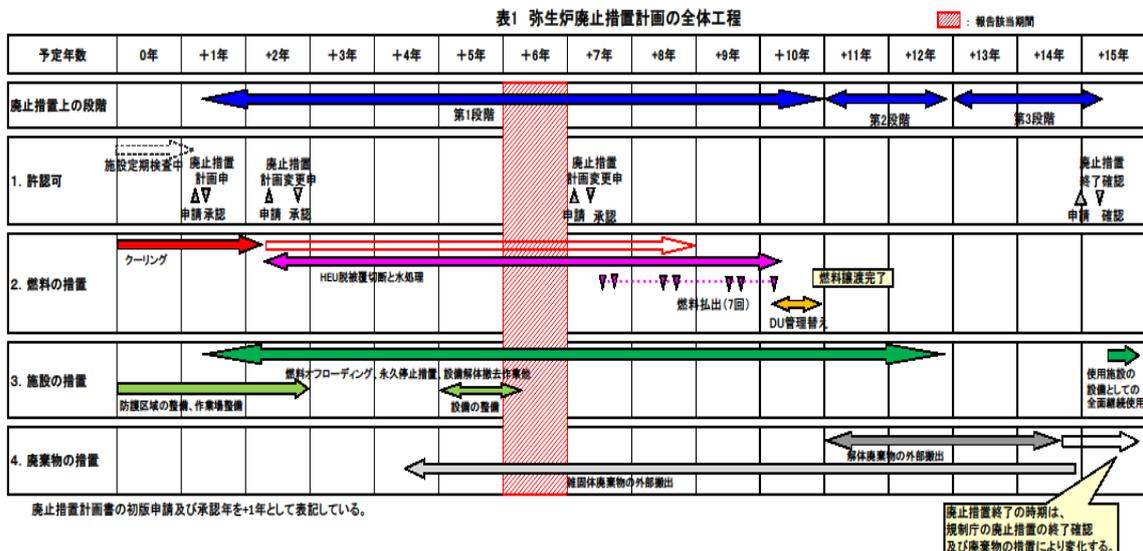
- ここ数年、施設及び設備の高経年化が目立ち、廃止措置計画に大幅な遅れを生じていることから、燃料切断処理工程の見直しだけでなく、使用済燃料の処分の方法自体について、検討し始めたところである。

3. 設備改善等

- 非常用発電機に係る排煙管を改修した（H29/5月）。
- 切断作業場の階下部屋での水漏れに関し、床及び壁の補修をした（H29/5月～9月）。
 - アンカー工事
 - 床・壁の防水塗装
 - 遮蔽体移設及び再設置
 - 金庫移設及び再設置
- 廃棄物保管庫に関し整備した（H29/7月～10月）。
 - シャッターの修理
 - 石綿不含材による屋根の張替
- 研究棟変電室から敷設された高圧ケーブルを更新した（H30.2～次年度4月）。
- 原子炉棟外壁防水工事を段階的に実施する（H30.2～次年度）。
 - 西側外壁の防水補修
 - 他面外壁防水補修の見積もり

4. 廃止措置計画に伴う申請関連

- 廃止措置実施状況報告書(H28年第4四半期) H29.4.24
- (放射性同位元素の使用変更承認申請 H29.5.15)
- (NR廃棄物内規策定 H29.7.7)
- 廃止措置実施状況報告書(H29年第1四半期) H29.7.24
- 原子炉施設保安規定変更(申請) H29.9.1
- 原子炉施設保安規定変更(一部補正申請) H29.10.18
- 廃止措置実施状況報告書(H29年第2四半期) H29.10.20
- 原子力安全協定に基づく様式11安全管理規定関係報告書 H30.1.4
- 廃止措置実施状況報告書(H29年第3四半期) H30.1.26
- 原子力事業者防災業務計画の提出(原災法) H30.2.1



大型設備の経過報告

ブランケット棟

ブランケット管理部 長谷川秀一、三津谷有貴、中野真奈美

1. ブランケット棟の概要

ブランケット棟は3台の放射線発生装置と1台の엑스線発生装置（ともに電子ライナック）、非密封RI（トリチウム）の使用施設である。また、大型流動槽や材料試験装置などを有しており、さまざまな実験に使用されている。

2. 各室の研究進捗状況（実験設備の更新を中心に）

医療用小型ライナック室では、29F-05, 06のテーマと関係して4つのX-band電子ライナックの開発と利用の研究が進んでいる。おもに**950 keV**と**3.95 MeV**の可搬型電子ライナックが利用されている。3.95 MeVの可搬型電子ライナックでは、特に屋外使用に対応するために加速器筐体の更新が行われ、また、周波数自動安定化のためのメンテナンスが行われ、出力調整・制御が容易になった。平成29年度は主にこれら加速器を用いた大型建造物の非破壊検査試験の実証実験に取り組んだ。これらのX線源とフラットパネル型X線検出器を用いて、コンクリート中の鉄筋の撮像能力の定量化の研究を行った。また、950 keVの엑스線装置は、屋外の実際の橋梁現場に持ち出して試験が行われた。実験室内では、福島第一原子力発電所の廃炉に向けて、燃料デブリをその場で分析するための技術として二色X線CTによる元素分析の研究をおこない、本X線源を用いて異なるエネルギー帯でのX線画像の生成を実証した。

レーザープラズマビーム源室では、放射線検出器の読出し技術の開発やX線・中性子検出器の開発を行った。Dynamic Time-over-Threshold法に基づいた二次元イメージングのための読出しシステムを開発し、X線でのイメージングや、J-PARCでの中性子イメージングなどに用いて、その性能の実証試験を行った。

超電導工学実験室では、29F-03のテーマと関係して、シビアアクシデントに関する研究が実施されている。1つ目は、極限荷重に対する原子炉建造物の破損メカニズム解明と破局的破壊防止策に関する研究である。2つ目は、福島原子力発電所1号機のサプレッションチャンバーを模擬したトーラス形状（1/20スケール）を用いて温度成層化現象を作り出し、その挙動を評価している。3つ目は、制御棒材料のB₄Cとステンレスを加熱して共晶溶解させ溶融物の移行挙動を可視化する実験である。また、4つ目は、高温ガス炉の構造材であるグラファイトの輻射伝熱および酸化に関する研究である。

重イオン加速器室では29H-04~10,12~13に関する材料調整、微細加工、顕微鏡観察などを実施した。使用された装置は、走査電子顕微鏡（S3400, Hitachi）、集束イオンビーム加工装置（FB2100, Hitachi）、クロスセクションポリリッシャ（JEOL）、Gentle Mill（Hitachi）、超微小硬さ試験機（Shimadzu）、腐食試験装置（東伸工業およびAkico）、引っ張り試験装置（Shimadzu）、透過電子顕微鏡（JEM-2100, JEOL）などである。

3. 実験環境・サポート環境の整備

トリチウム実験室では、老朽化対策として室内の RI 配管の地上化は終了している。今後は排風機系統の老朽化に伴い、排風機モーターのオーバーホールおよび排気系統の補修を実施する予定である。

汎用実験室では新しく、化学系の実験室の整備を進めている。実験室の清掃と不要物撤去を実施した。そしてドラフトチャンバーを新しく設置し、化学準備室からも既存のドラフトを移設した。また、流し台等の水道系の整備を行った。

機械室・電気室等でも、適宜空調用設備消耗品や受電設備の更新を進めている。

大型設備の経過報告『ライナック経過報告』

ライナック管理部 上坂充, 山下真一, 上田徹, 橋本英子, 安見厚志

概要

平成 28 年 5 月に生じた 18L のフォトカソード（光陰極）用ファイバーレーザーの冷却系のトラブル以降、大きなトラブルはなく順調に共同利用に供することができている。ただし、加速器回り以外にもインフラの経年劣化が（潜在的なものも含め）目につくようになってきているため、極力先回りして対策の準備に務めている。4 月下旬には例年通り、ライナック運転資格取得講習会を実施した。保守も定期的にも実施した。

ライナック利用運転

以下の 8 テーマを受け付けた。

課題 No.	課題名	代表者（所属）
29L-01	水溶液の放射線効果の研究	工藤 久明（東京大）
29L-02	パルス&プローブ法を用いる超高速反応の研究	上坂 充（東京大）
29L-03	不定比金属組成を制御した銅酸化物超伝導体のピンニング特性に及ぼす電子線照射効果	寺井 隆幸（東京大）
29L-04	高温・超臨界溶媒の放射線化学	室屋 裕佐（大阪大）
29L-05	フォトカソード RF 電子銃の高性能化	上坂 充（東京大）
29L-06	高速応答シンチレータの開発と性能評価	越水 正典（東北大）

18L の状況

平成 24 年度末に納品され、平成 25 年度に据え付け調整を行ってきたフェムト秒ファイバーレーザーが本格稼働し、着々と成果が出ている。液体試料だけでなく、シンチレータなど固体試料への照射ならびに過渡吸収測定でも放射線誘起現象解明の有効な研究ツールとなりつつある。平成 28 年 5 月に発生したフォトカソード（光陰極）励起用レーザーの冷却水漏れ以降、大きなトラブルは発生していない。ただし、加速管へのマイクロ波導入部分（セラミックス製 RF 隔壁）には軽微なリークが生じ始めたと考えられ、平成 30 年 8 月の保守期間に交換作業を実施予定である。上記の“軽微なリーク”が原因と思われるイオンポンプの劣化も見られ、特に先端部（ビーム取り出し口）のイオンポンプは素子交換を実施した。また、経年劣化で使えなくなっていたビーム調整用の真空駆動系（ファラデーカップを操作）を一つ更新した。

35L の状況

平成 27 年 6 月下旬の真空漏れ以降、大きなトラブルは発生していない。平成 29 年 9 月上旬の実習の際、照射ポートをストレート方向と 45 度方向との間で切り替えるための偏向マグネットの電源が突如故障したものの、予備品との交換により事なきを得た。

その他

35L でシングルパルス（半値幅 13 ps 程度）を出す際に使用する SHB（Sub-Harmonic Bunchier）の電源の状態が芳しくなく、来年度以降に更新を予定している。インフラの更新など高経年化対策についても検討を始めた。その一環として、ライナック棟の階段に手摺を設置し（9 月）、老朽化した非常扉の補修も行った（10 月）。非常灯を含むライナック棟の電球の LED 化を進めている。また、雨水侵入や雨漏りの予防のための外壁塗装も検討している。

大型設備の経過報告『重照射（HIT）経過報告』

重照射研究管理部 阿部弘亨、叶野翔、楊 会龍、尾亦孝男、小菌雅美

- 抄録 -

平成 29 年度は、1.7 MV タンデトロンの共同利用を実施し、計 10 件の共同利用にマシンタイムを提供した。また、バン・デ・グラーフの使用再開に向けた各種調整作業を実施した。

1. HIT の概要

HIT は 2 台のメガボルト級イオン加速器を有する照射施設であり、原子炉や宇宙環境等の過酷環境下で使用される材料の劣化評価等に活用されてきており、はじき出し損傷と核変換による水素あるいはヘリウムの蓄積を同時に模擬できる二重照射ビームラインを有した施設である。

東日本大震災で 2 台の加速器はどちらも大きな被害を被ったが、平成 25 年度末までに 1.7 MV タンデトロンの原子力国際専攻より移設し、放射線発生装置の変更申請を行い、共同利用を再開した。被害がやや軽微であった 3.75 MV バン・デ・グラーフについては、管理部において補修、修繕を行い、再開を目指しているが、機器の経年劣化が顕在化していることもあり、未だ共同利用の再開には至っていない。

2. タンデトロン運転・保守状況

平成 29 年度は 1.7MV タンデトロンを利用した共同利用テーマは 10 件であり、そのうち、軽水炉材料に関する課題 4 件、核融合炉材料の評価に関するものが 4 件、半導体材料の研究が 1 件、原子炉・ビーム実習として 1 件の共同利用テーマに対しビームタイムを供給した。平成 29 年度のタンデトロン加速器の運転時間等については表 1 にまとめて示す。今年度は 3 種類のイオンビームを提供し、40 日間の共同利用運転を行った。また、照射時間は計 172 時間であり、ユーザーが希望するマシンタイムを概ね配算することが出来た。ただし、種々の機器の老朽化が確認されており、特に、停電からの機器の再立上げ時に真空計や制御基板が故障するトラブルに見舞われ、共同利用の運営に影響を与えることが多くなっている。現状では、多くの箇所に老朽化した機器を使用していることから、今後も引き続き同様の対応を図る必要があると考えられ、計画的な老朽化対策が必要と考えている。

3. バン・デ・グラーフ保守状況

平成 29 年度の共同利用テーマにおいて、3.75MV バン・デ・グラーフ加速器を利用した 3 件の応募を採択したが、現状では、加速器が運転可能な状態になっておらず、ビームタイムを供給することが出来なかった。地震による直接的な損傷については逐次、修理を進め、複数箇所の損傷部の交換ないし修理を行った。なお、平成 29 年度に実施した専門家による加速器の現場調査を実施した結果では、RF イオン源に過電流が発生する原因については加速管の絶縁ならびに微小リークが原因との指摘を受けており、また、絶縁ベルトの劣化が著しいことから、加速器の再立上げに向け、これらの補修、修理が必要であることが確認された。

4. 建屋・サポート系の保守状況

当施設は供用開始から 30 年を迎えており、空調設備、外壁、冷却水、圧縮空気等のサポート系の老朽化が確認されてきており、これら機器の定期的、計画的な修繕を進めている。なお、平成 29 年度は液体放射性物質の貯留槽の改修工事ならびに、管理区域（陽電子消滅実験室）の空調工事を実施した。また、加速器やビームラインマグネット等に使用している実験建屋の冷却水循環装置、冷暖房の温度制御に使用している冷却塔において機器の故障や性能低下が確認されており、引き続き、これら機器の修繕を進める必要がある。

表 1 平成 29 年度 タンデトロン加速器の運用状況

ターゲット	負イオン電流量 / μA	イオン種	加速電圧/MV	入射イオン電流量/nA	照射時間/h
FeO	0.05 ~ 0.2	Fe^{2+}	1.0 - 0.36	17 ~ 90	145
FeO	0.1 ~ 0.2	$\text{O}^{2+} \sim \text{O}^{5+}$	1.0 - 0.5	60 ~ 5	8
WO_3	0.3 ~ 0.6	W^{2+}	1.0 - 0.3	20 ~ 70	27
					180

平成29年度共同利用テーマ一覧(Yシリーズ)

採番	研究会名称(開催回数)	主催者	申請者	場所時期及び開催場所	要望額(千円)	
					旅費	印刷費
29Y-01	研究炉等の運転・管理及び改良に関する研究会(33)	山口 彰	工藤 久明	平成30年3月の1日 東海キャンパス	20	0
29Y-02	原子力専攻施設共同利用成果報告会(8)	山口 彰	大野雅史	平成29年8月頃(予定) 本郷キャンパス	20	0
29Y-03	量子ビーム技術開発・応用研究会(5)	上坂 充	上坂 充	平成30年3月 東海キャンパス	20	0
29Y-04	炉心溶融解析研究会(2)	近藤雅裕	近藤雅裕	未定 未定	20	0
29Y-05	原子・分子の分光分析技術とその応用(2)	長谷川秀一	長谷川秀一	平成29年10月(仮) 東海村	20	0
29Y-06	粉体・混相流の数値シミュレーションに関するシンポジウム(1)	酒井 幹夫	酒井 幹夫	平成29年12月 構造計画研究所内会議室	20	0
29Y-07	界面での放射線効果(1)	山下真一	山下真一	平成29年12月(予定) 東海村または本郷	20	0

平成29年度のYシリーズは7テーマ。本年度から新規テーマは2件(斜体で示す)

本研究は，昨年度までに引き続き原子炉運転の容易化や異常時・事故時の安全性を向上させるため，原子炉出力変動吸収機構の解明に主眼を置いたものである．今年度は，[研究①] 減圧事故等の冷却材循環喪失時における炉内気体の熱流動特性，[研究②] 制御棒挿入時の制御棒と燃料集合体（軽水炉）や制御棒黒鉛ブロック（HTTR）との空隙に生じる対流特性，[研究③] 熱負荷変動吸収特性向上のための融解速度促進研究などに焦点を当てた．

キーワード：原子炉熱流動，伝熱，相変化，自然対流，非線形問題

1. 研究①：減圧事故等の冷却材循環喪失時における炉内気体の熱流動特性

[研究①：背景] 超高温ガス炉の原子炉設計を行う際に想定事象の一つである一次冷却系主配管破断時の空気浸入事象においては原子炉内の高温高压のヘリウムガスが格納容器内に破断口から噴出し，原子炉内外の圧力が均圧した後，多成分気体の分子拡散と局所的な自然対流及び原子炉内を一巡する混合気体の自然循環流，あるいは不安定密度成層下での密度置換流など，密度の異なる気体の複雑な混合現象が生じる．今後の超高温ガス炉の安全設計に関して，これらの現象が重畳する場合の空気浸入過程を明らかにしておくことは安全裕度を確定する上でも重要である．

[研究①：結果と考察] JAEA が所有する高温工学試験研究炉（HTTR）に代表されるような原子炉の下部に一次冷却系配管が位置する場合に配管が破断すると，一般的には破断口上部の炉内には密度の小さい気体が，破断口下部には密度の大きい空気とヘリウムの混合気体が存在するため，炉内外が均圧後，直ちに混合気体が浸入する可能性は低い．この場合，炉内の流路構成は逆 U 字型流路となるが，単純な流路の場合，高温側が並列流路の場合，局所的に自然対流が発生している場合については，実験及び数値解析を行い，黒鉛が酸化する場合についても同様に考察してきた．これらは全て，配管の破断位置が原子炉下部を想定した場合であり，HTTR を参考に検討してきたものである．これまでに行った実験結果について，高温側流路の加熱壁平均温度を横軸に，配管破断後の経過時間を横軸にとり，配管破断後に流路下部から密度の大きい成分気体の自然循環流が発生するまでの時間を Fig. 1 に示す．加熱流路の高さが約 1m 以下の場合でも加熱流路側に局所的な自然循環流や自然対流が発生している場合には自然循環流の発生時刻は短くなっている．加熱流路に黒鉛を用いて実際に酸化反応を生じさせた実験結果では，発生する一酸化炭素や二酸化炭素は自然循環流の発生時刻に大きな影響を与えないことも分かった．

2. 制御棒挿入時の制御棒と燃料集合体（軽水炉）や制御棒黒鉛ブロック

(HTTR) との空隙に生じる対流特性

[研究②：背景] 制御棒の挿入は設計仕様上数秒以内に完了し，挿入後には側壁が加熱された鉛直スロット内流れが近似的に実現される．鉛直スロット内では高温壁に沿って上昇，低温壁に沿って下降する 3 次関数状の速度分布を持つ主流が側壁の温度差によらず常に存在する．この熱伝導状態は，浮力効果と粘性散逸の比を特徴づける Grashof 数 Gr が臨界値を超えると，流体の Prandtl 数 Pr に応じてせん断力に駆動された定常モード，もしくは浮力に駆動された伝播波対に対して不安定になることが知られている．平成 27 年度の線形解析と同様に，制御棒が燃料集合体，もしくは制御棒黒鉛ブロックに挿入される過渡的状況を想定し，制御棒周りの流れ場を局所的に平面 Couette 流と見なすことにする．平面 Couette 流の重畳によって，前述の定常モードと伝播波モードに加えて Couette 流由来の定常モード S^0 が $Pr > 2.4$ において発生することを平成 27 年度に明らかにした．今回はこの S^0

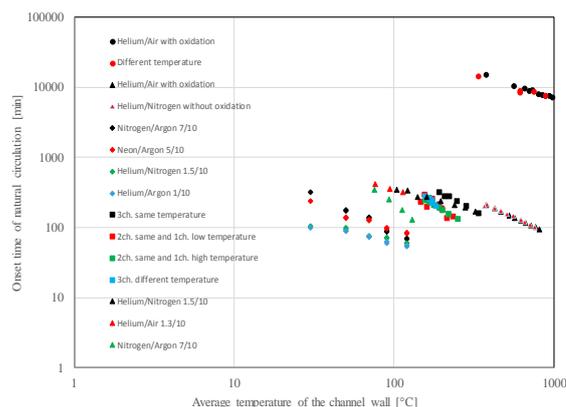


Fig.1 Onset time of natural circulation in reverse U-shaped vertical channels

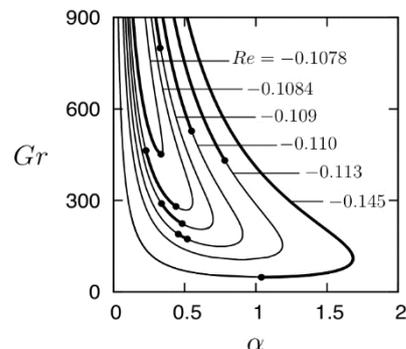


Fig.2 Nonlinear degeneracy along the neutral curves for $Pr=7$

の分岐特性に焦点を当てた弱非線形解析を行った。

【研究②：結果と考察】 弱非線形解析に先立ち、Couette 流由来の定常モード S^0 が浮力によって駆動されたものであることをエネルギー収支の数値的評価によって明らかにした。中立曲線に沿った S^0 の分岐特性を調べるために弱非線形理論を適用し、導出した振幅方程式に含まれる係数値から、線形不安定領域側に解が分岐する超臨界分岐か、線形安定領域に向けて分岐する亜臨界分岐かを吟味した。Figure.2 にその結果を示す。平面 Couette 流を重畳しない場合にすでに存在していた定常モードと伝播波モードは、平面 Couette 流の有無にかかわらず分岐が超臨界であることが今回明確に確認された。一方、平面 Couette 流由来の定常モード S^0 は、Fig.2 に太線で示す中立曲線に沿って分岐は超臨界であるが、細線にそって亜臨界であることが明らかになった。亜臨界分岐下では、初期攪乱の振幅がしきい値を超えた場合、中立曲線外側の線形安定領域においても乱流への遷移が可能であるため、伝熱特性の観点からはより好ましいと考えることができる。

3. 熱負荷変動吸収特性向上のための融解速度促進研究

【研究③：背景】 固液相変化潜熱を利用して流体の温度変動を低減化することを考える。そのためには、相変化物質(PCM)を高熱伝導率の金属多孔質中に含浸させ、実効熱伝導率を向上させると有効である。この方法で凝固時の伝熱特性は大きく向上するが、融解時には、金属多孔体により液体 PCM の自然対流が抑制されるため、伝熱が劣化することもあり得る。そこで、多孔質物質の存在が融解時の伝熱特性に及ぼす影響を解析により調べた。下面加熱・上面冷却の水平伝熱面間に金属円柱棒を鉛直に均一に配置し、中に PCM を含浸させた複合多孔体を考え、自然対流発生臨界レイリー数および自然対流発生後の伝熱特性を調べた。

【研究③：結果と考察】 xy 座標を下側伝熱面に、 z 座標を鉛直上向きにとる。本複合多孔体の浸透度、実効熱伝導率、および実効熱拡散率は xy 方向と z 方向で異なる。PCM と金属円柱棒の熱伝導率比を

$\sigma = \lambda_f / \lambda_c$ (f, c はそれぞれ PCM および金属円柱を表す)、熱拡散率比を $\gamma = (\kappa_x)_{ef} / (\kappa_z)_{ef}$ 、ダルシー数を $Da = K/h^2$ (K : xy 方向浸透度, h : 流路幅) とする。Figure 3 に融解時の伝熱特性比 q_{ef}/q_f とレイリー数 Ra_f の関係を示す。 q_{ef} は複合多孔体における熱流束、 q_f は PCM だけの場合の熱流束であり、 Ra_f は熱拡散率として流体の値を用いた時のレイリー数である。すなわち、上下面間温度差が等しい場合、PCM のみの場合も複合多孔体の場合も同じレイリー数と定義する。 $q_{ef}/q_f \geq 1$ は複合多孔体の方が PCM のみの場合より伝熱特性が高いことを意味する。図で白抜き記号は $\gamma = 0.1$ の場合、黒い記号は $\gamma = 1$ の場合の結果である。図から以下のことが示される。 $\gamma = 0.1$ の場合 ($\sigma \ll 1$)、融解時に自然対流が抑制されても伝熱促進効果は PCM だけの場合よりも大きくなる。一方、PCM と金属円柱棒の熱伝導率が近い場合 (図で $\gamma = 1$)、熱伝達は抑制され、ダルシー数が小さい場合には、自然対流が発生しても PCM だけの場合の方が高い伝熱特性を示す。これらから、多孔体+PCM の複合多孔体の融解時の伝熱特性は、 σ, γ, Da 数に依存することがわかる。また、伝熱特性を向上させるには、金属円柱の熱伝導率を大きくすること、ダルシー数がある程度大きくすることが必要である。

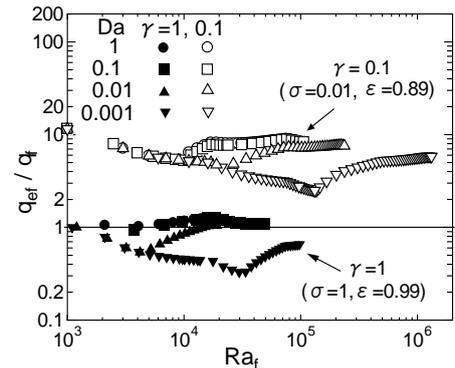


Fig.3 Plot of q_{ef}/q_f against Ra_f at $\gamma = 1$ and $\gamma = 0.1$ with Da as a parameter

4. まとめと謝辞

「原子炉出力変動吸収機構の開発研究」は茨城大学の故岡本芳三教授の主導により始められ、以来 30 年以上の長きに亘って継続された大変に歴史の長い研究でした。しかしながら、研究会を構成する研究者の移動や退職などに伴いまして従前どおりの実施が困難となり、やむなく平成 29 年度を最後に新規計画を断念した次第でございます。東京大学大学院工学系研究科原子力専攻の関係各位にはこれまで数々のお世話を賜り、厚く御礼申し上げます。原子力工学分野の益々のご発展を願って我々の計測機と計算機を停止させていただきます。

成果リスト

- [1] T. Takeda, "Experiment and numerical analysis of mixing process of two component gases in vertical fluid layer," *Proc. of the 25th Int. Conf. on Nucl. Eng.*, May 14-18, (2017), Shanghai, China, ICONE25-67750.
- [2] T. Shiga, T. Takeda, and Y. Tanaka, "Study on air ingress process during a depressurization accident of GHTR300," *Proc. of the 17th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, Sept. 3-8, (2017), Xi'an, China.
- [3] K. Fujimura and S. Tsunoda, "Hopf/steady-state mode interaction in a vertical slot – Effect of 1:4 resonance," *Phys. Fluids* **29**, 084103 (2017)
- [4] S. Tsunoda and K. Fujimura, "Effect of plane Couette flow on natural convection in a vertical slot with side-wall heating," *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 014402 (2018)

低線量放射線の生体に対するリスク評価や放射線化学研究などにおいて必須とされる 1MeV 程度の高エネルギーマイクロビーム源の開発を行っている。電子ビームあるいはそれによる軟 X 線ビーム発生に対してはレーザー駆動誘電体加速器で、イオンビーム発生にはインパルス加速器を用いる。今年度は、レーザーに対する要請の軽減のために光エネルギー蓄積型加速の研究を行うと共にイオン加速のためのイオン源、加速構造及びスイッチの要素技術研究を行った。

キーワード：誘電体加速器，インパルス加速，オンチップ加速器．ファイバーレーザー，放射線生物学研究

1. 研究の目的と意義

放射線生物学研究への応用を目指して、サブミクロンサイズのビームを発生可能なオンチップ加速器を開発する。それによって光学顕微鏡下で生きた細胞を観察しながら細胞核の狙った位置に照射可能になる。将来的にはオンチップ X 線レーザーや癌治療器に発展可能である。

2. 本年度の研究内容

2.1 レーザー駆動誘電体加速

これまで提案されたレーザー駆動誘電体加速の研究は高エネルギー電子加速を目指したものが多く、励起には高強度サブピコ秒レーザーパルスを想定している。放射線生物学研究への応用に当たっては 0.5MeV から 1MeV のエネルギーで十分である。また励起レーザーを小型にする必要がある。ファイバー伝送が可能な 10ps 級のレーザーパルスで十分大きな加速勾配を発生する方法として、光共振器の応用が考えられる。よく知られた光共振器としてフーブリーペロー共振器 (FP) があり、一対の高反射率の反射面で構成される。例えば、 $Q=10000$ の共振器を使うと $10^8\text{W}/\text{cm}^2$ の照射強度の光を $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ まで、即ち電界強度で 100 倍蓄積することができる。問題は高反射率構造と電子加速可能な電界構造の両立をいかにして図るかである。

我々は、二つの構造に関して数シミュレーションを行い、それらの可能性を示した。

[レーザー波長以下の回折格子構造]は図 1 のように FP 共振器を対向する波長以下の格子間隔を持つバイナリーブレード回折格子で構成される [1-4, 7]。レーザー（平面波）はどちらかの回折格子から垂直に照射する。回折格子が適当な値を持つ場合はこう反射率の鏡として作用し

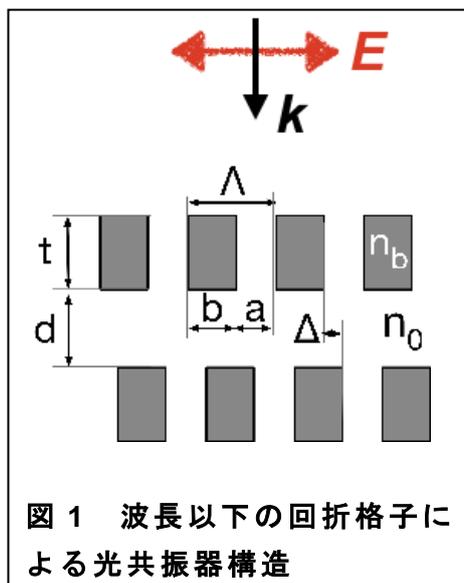


図 1 波長以下の回折格子による光共振器構造

共振器を形成する．ゼロ次の回折は一樣なので加速には寄与しないが，1次以上の回折光によって電子を加速できる．ただしゼロ次以外の回折光は伝播できないエバネッセント光であり，図2に示すように格子の極近傍(波長の1/4以下)でしか効果がない．

[多層膜ブラッグ格子構造]は誘電体多層膜で作ったFP共振器の外部にバイナリーブレイズ回折格子を置いた形である[5, 6, 8, 9]．回折格子出口の変調された電界分布のFP共振器までの像転送にはタルボ効果を応用するために，格子間隔はレーザー波長以下にできないので，非相対論的電子の加速には空間分布の高調波成分を応用せねばならない．多層膜ブラッグ格子構造では，FP共振器に面した側に回折格子を刻むと，フレネル数が0.1と小さな値になり回折損失が大きくて光を蓄積することができない．FDTDコードを使ったシミュレーションでは原理的に可能であることは示すことができたが，まだ最適条件には至っていない．

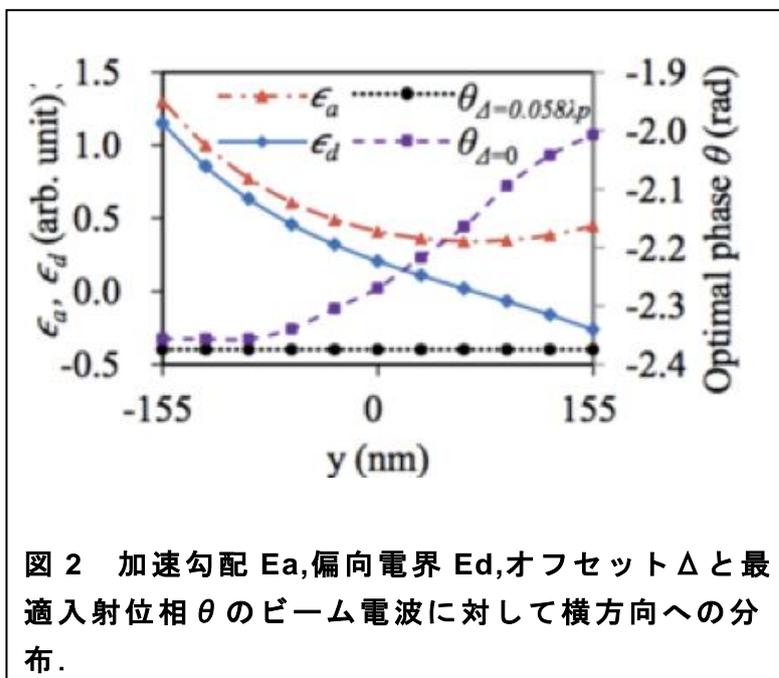


図2 加速勾配 E_a , 偏向電界 E_d , オフセット Δ と最適入射位相 θ のビーム電波に対して横方向への分布．

2.2 インパルス加速

主要要素である，イオン源，高速スイッチ，加速管の作製とその動作テストを行った[9, 13]．レーザー波長とパルス幅，エネルギーは，それぞれ 1060nm, 20ns, 120mJ で標的に炭素板を使用してレーザーイオン源の特性評価を行った．イオン電流の測定からは，イオン加速後にガラスキャピラリーに 1000 個程度の 6 価の炭素イオンを入射可能であると見積もられた．加速部分への高電圧

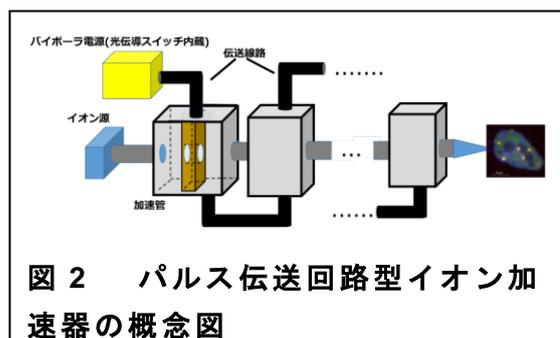


図2 パルス伝送回路型イオン加速器の概念図

印加は，昨年まで検討した誘電体ブルームライン構造は絶縁耐力と実装に問題があることから，金属製パルス伝送線路を使うこととして，伝送回路及び加速管の設計と数値シミュレーションを行い，イオン加速に適用可能であることを示した．図2は多段加速とする場合の加速器の概念図であり，図3はパルス伝送回路と加速管の全体図と断面図である．この場合に必要とされる高速高電圧スイッチには，耐電圧，立上り時間などの電氣的特性に優れた光伝導スイッチが最適であると考えられる．光伝導スイッチには，電子移動度に優れた GaAs を用いた．また半導体基板と金属電極の接続には，接触抵抗が低いオーミック接合を採用した．

光伝導スイッチと電流路の長いテスト用回路を用いて耐電圧，オン抵抗，立上り時間およ

び立ち下り時間の測定を行った。レーザー波長とパルス幅、エネルギーは、それぞれ 1060nm, 20ns, 40mJ-80mJ である。パルス幅はレーザーパワーが大きい方が短く、80mJ では約 90ns である。耐電圧は目標値を越すことができた。立ち上がり時間は接続回路の時定数によって左右され、立ち下り時間は半導体内部での電子などの消滅時間が影響することが明らかになった。

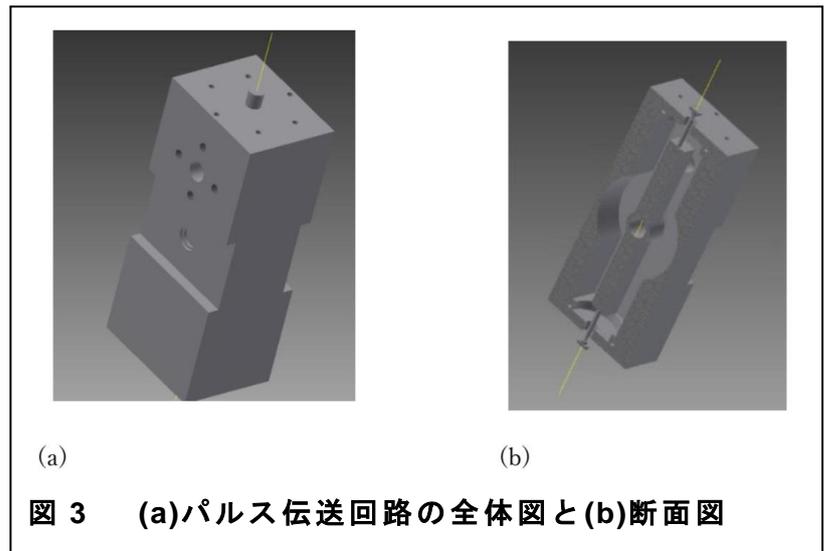


図 3 (a)パルス伝送回路の全体図と(b)断面図

3. まとめ

まだ課題はあるものの、電子加速、イオン加速共に実証器設計のための指針が得られつつある。今後は、加速実証実験と誘電体周囲での光路の設計を行い、卓上型電子マイクロビーム発生装置の設計を行う。

成果リスト

- [1] Z. Chen, et al., HEADS2017(Yokohama), (2017).
- [2] Z. Chen, et al., Rev. Laser Eng. **45**, 97-101 (2017).
- [3] K. Koyama, et al., Proc. of IPAC2017, 3272-3275 (2017).
- [4] Z. Chen, et al., AIP Conf. Proc. **1812**, 060005 (2017).
- [5] 小山和義, 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2017 (吹田市) (2017)
- [6] 小山和義, 他, 第 14 回加速器学会年会プロシーディングス, 1310-1312 (2017).
- [7] 陳 昭福, 他, 第 14 回加速器学会年会プロシーディングス, 677-679 (2017).
- [8] K. Koyama, et al., Proc. of LINAC2016, 873-875 (2017).
- [9] K. Koyama, AFAD2018(大田広域市,韓国) (2018).
- [10] Z. Chen, et al., Appl. Phys. Lett., **112**, 034102 (2018).
- [11] 小山和義, 他, 日本物理学会第 73 回年次大会(野田市) (2018).
- [12] 小山和義, 平成 29 年度弥生研究会 (2018).
- [13] 池田直樹, 東京大学大学院, 修士論文 (2018).

29F-05

Xバンド加速器の応用研究

上坂充¹, 三津谷有貴¹, 土橋克広¹, 橋本英子¹, 高橋浩之¹,
山下真一¹, 竹内大智¹, Jean-Michel Bereder¹, 福岡潤哉¹, 小沢 亅生¹,
渡辺賢一², 山本昌志³, 草野譲一³, 藤原健⁴,
石田雅博⁵, 大島義信⁵, 吉田英二⁵

1: 東京大・院工, 2: 名古屋大・工, 3: 株式会社アキュセラ, 4: 産総研, 5: 土木研究所
社会・産業インフラの非破壊検査技術及び、健全性診断技術開発を目的として、可搬型 X バンドライナック X 線源を屋外へ持ち出し、実橋梁での非破壊検査実証試験を実施した結果について報告する。

キーワード：量子ビーム産業利用、保全技術、加速器要素技術開発、小型量子ビーム発生技術、地震防災

1. はじめに

定期点検等のための社会・産業インフラ健全性診断は、安全で安心な社会を実現するために不可欠である。現在の社会・産業インフラ点検は、目視による調査、X線などを用いた非破壊検査が行われている。しかし、現在の技術では非破壊による正確な点検技術は確立されておらず、従来のX線源であるX線管による透過画像撮影では物体の中身を詳しく見ることが出来なかった。X線管からの低エネルギーX線がタレット物質の中で減弱しすぎてイメージを作るほど十分なX線がディテクターに届かないのが原因である。そのため、可搬型 X バンドライナック X 線源を屋外へ持ち出し、様々な社会・産業インフラの透視構造健全性検査を推進している。今年度は北海道での実橋梁を対象とした非破壊検査実証試験を実施した。

2. 実橋梁の非破壊検査試験

北海道にある共用を終了した実橋梁に対し、950keV X線源による非破壊検査実証試験を行った。図1に示すように橋梁点検車のステージに950keV X線発生装置を設置し、橋梁T桁のウェブ部分及びフランジ部分を透視した。X線検出器として、フラットパネル検出器(FPD)及びイメージングプレートを用いた。X線発生装置の制御機器や電源は全て電源車に積載しており、作業者は橋から離れた道路上に停めた車の中でX線発生装置の運転及びFPDの操作撮像などを行った(図2)

図3に、イメージングプレートで撮像したT桁フランジ部分の透視画像を示す。この画像では、内部のPC鋼材の劣化やPCスリーブ内のグラウト未充填等の欠陥は確認できない。

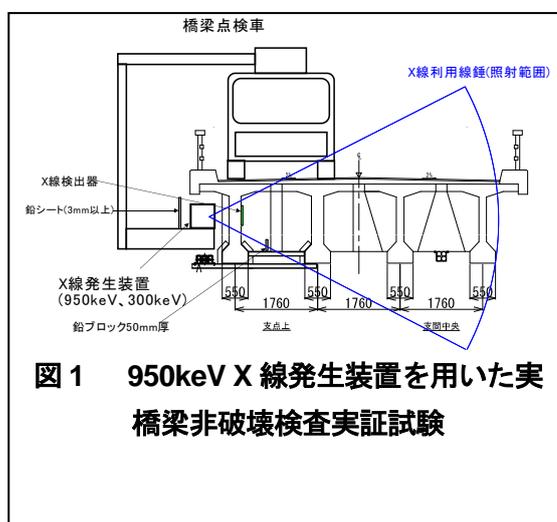


図1 950keV X線発生装置を用いた実橋梁非破壊検査実証試験



図2 実橋撮像試験

この橋梁は、後日載荷試験が行われ、分解撤去された。

3. 実橋梁切り出しサンプルの検査

上記実橋梁のうち、目視により傷みが激しい部分について、分解撤去された T 桁を切り出し、原子力専攻内の実験室にて、3.95MeV X 線発生装置を用いて内部の状況を調査した。屋外では、X 線発生装置と X 線検出器の配置に制限があり試験時間も十分でないため、特定の部分の詳細な検査は現状では容易ではない。そのため切り出したサンプルについてより詳細な検査が可能な屋内の実験室で検査を行うこととした。屋内では、より X 線エネルギーの高い 3.95MeV X 線発生装置を用いることが出来る。これにより、被検査体のより肉厚の部分の透視が容易になる。

図 4 に切り出した T 桁フランジ部分サンプルの透視画像を示す。図 3 の結果と合わせ、外見に損傷があっても内部までは損傷していない可能性が示唆されている。

これらのことにより、外見と内部の損傷は必ずしも一致しない可能性があると思われる。

4. X 線発生装置のコンクリート部材への適用範囲の定量的評価

950keV X 線発生装置及び 3.95MeV X 線発生装置が肉厚の部材に対し従来の X 線管(最大 300keV)よりも有効であることは直感的に理解できるが、定量的にどの程度の肉厚まで適用可能であるかについては、議論の余地がある。そこで、密度を調整したコンクリートサンプルを作成し、そのコンクリートサンプルの肉厚に対し、コンクリートサンプル内の鉄筋等の構造物がどの程度判定可能かの比較を、実験室内にて行った。FPD を用いた場合では、950keV X 線発生装置でコンクリート厚さ 350mm まで、3.95MeV X 線発生装置の場合では 740mm 程度まで適用可能であることが示された^[1]。

5. まとめ

X バンド電子ライナックベースの高エネルギー可搬型 X 線発生装置を用い、屋内や屋外での非破壊検査試験を行い、非破壊検査の適用範囲などの同装置の利用可能性を検証した。

今後は、3.95MeV X 線源を用いて屋外の実橋梁の非破壊検査を行うなど、これまで行われなかった試験を行う予定である。一方で、橋梁などへの CT などの適用の検討や、より高性能の X 線イメージング装置の検討も進め、社会・産業インフラへの適用範囲の拡大の可能性を探る。

成果リスト^{※1}

- [1] 竹内大智 他, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 74, No. 1, 66-79 (2018).
- [2] M. Uesaka, Y. Mitsuya, et al., "On-Site Non-Destructive Inspection of Bridges Using the 950 keV X-Band Electron Linac X-ray Source", Journal of Disaster Research, Vol.12 No.3 (2017) pp. 578-584
- [3] 竹内 大智, 他, "コンクリート橋検査における可搬型高エネルギー X 線源の透過 X 線撮像能力の定量化", 土木学会論文集 E2 Vol.74, No.1, (2018) pp66-79

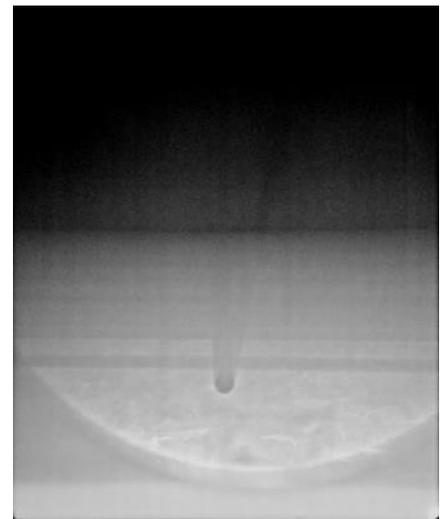


図 3 950keV X 線発生装置での
実橋梁透視画像



図 4 3.95MeV X 線発生装置での
実橋梁切り出しサンプル透視画像

東京大学では、電子線ライナックを用いた、小型・可搬型・短パルス中性子源の設計開発を進めている。本研究では、3.95-MeV 加速器 X 線源とベリリウムターゲットを用いた小型中性子源による、中性子共鳴吸収分析における燃料デブリ中の核種測定のための基礎検討を行った。また、それに供する中性子検出器や測定系の開発を行った。

キーワード : 加速器、X-Band、中性子源、中性子共鳴吸収分析、核物質測定

1. 研究目的

我々の研究グループでは、福島第一原子力発電所の廃炉について、廃炉加速化研究プロジェクトを実施している。このプロジェクトでは、炉内からサンプリングされてきたデブリ小片をその場で分析し、地層分析などに使われる地球統計学的手法を用いて、元のデブリ塊の物理・化学性状（放射能、微細構造、化学組成、U・Pu 含有率、燃焼度など）の分布を得る手法を提案することを目的としている。デブリ塊の性状が分かれば、取り出し作業効率化（デブリの硬さ判別）、作業被曝低減、計量管理等に資することができる。本報告では、小型・可搬型の加速器 X 線源を用いた中性子源の検討を行い、可搬型中性子源として福島現場において燃料デブリ分析を行う手法について、基礎的な検討を行った結果を示す。また、それに供する中性子検出器の開発を行った結果を示す。

2. 小型・可搬型中性子源によるその場燃料デブリ分析

図1に小型・可搬型中性子源を用いた、福島第一発電所の現場での燃料デブリ分析のイメージを示す。小型・可搬型の加速器 X 線源を現場に設置する。取り出しロボットによってサンプリングされてきたデブリ小片に対して、まず X 線 CT による元素分析を行う。また、X 線源にベリリウムターゲットを組み合わせ中性子源として実現し、これを中性子共鳴吸収分析に供する。これによって X 線と中性子を用いて両方の側面からデブリ小片の詳細な解析を行うことができる。図1にイメージを示す。また、中性子源のターゲット周りや短距離 TOF システムの設計の様子、およびモンテカルロ・シミュレーションによって計算した中性子共鳴吸収分析のスペクトルを図2に示す。この結果より、5 m 以内の短距離 TOF によって核物質関連の核種弁別ができる見通しがあった。

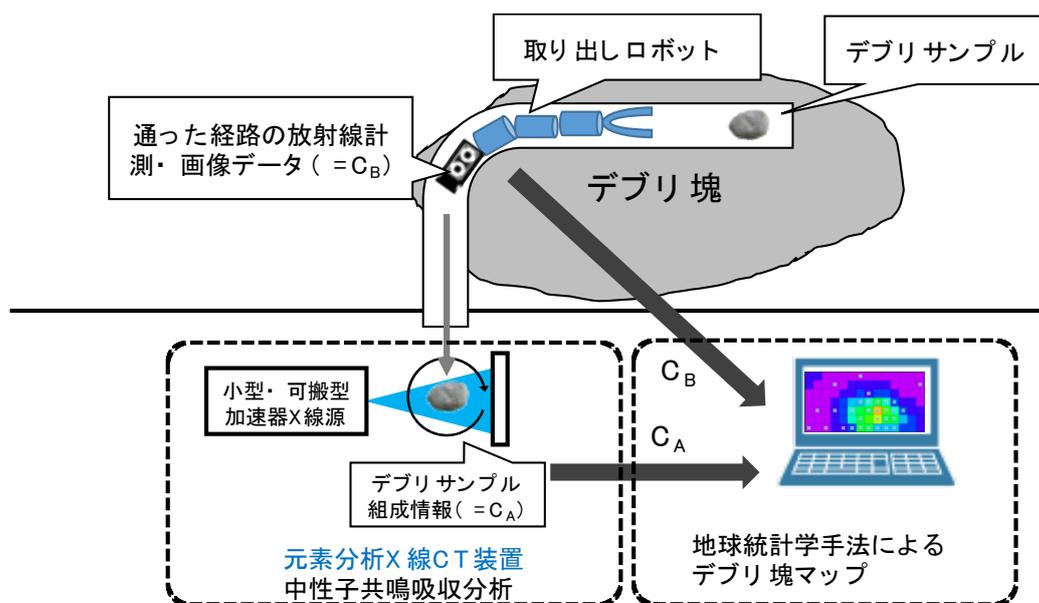


図1. その場での燃料デブリ分析のイメージ

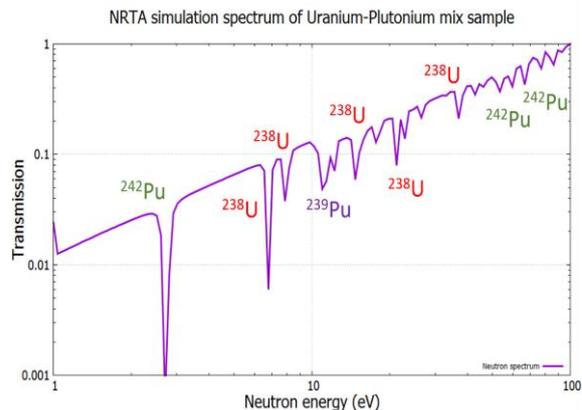
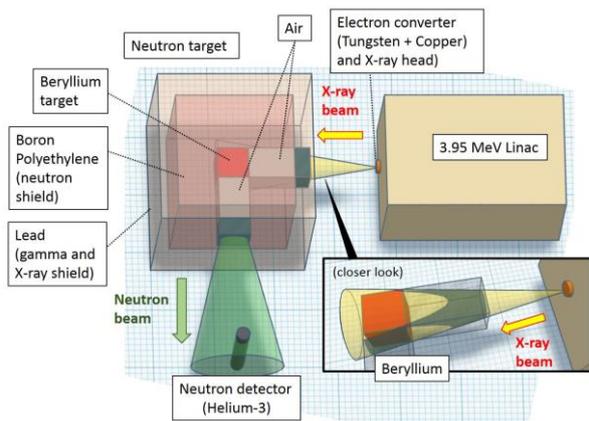


図 2. 中性子源ターゲットおよび短距離 TOF システムの設計 (左)。および、モンテカルロコードによって計算した短距離 TOF での核種分析シミュレーション (右)

3. 中性子検出器の開発

本小型中性子源では通常的大型中性子源に比較して中性子発生数が低く、検出器には高い検出効率が求められる。また、今回のように加速器 X 線源ベースの中性子源を短距離 TOF で用いるケースでは、発生する X 線・ガンマ線光子に対しての検出器の感度を抑制することが重要となる。そこで今回は、リチウムを含む固体シンチレータで、かつラバー内にその粒子を拡散させたタイプのシンチレータを検出器として用いることを検討した。シンチレータは Eu:LiCAF であり、これを光電子増倍管と組み合わせて中性子検出器とした。Eu:LiCAF は 46mm φ のものを用いた。ラバータイプとすることで、X 線・ガンマ線バースト由来の高速電子による発光を抑制し、中性子由来の荷電粒子による発光を相対的に高めている。そのため X 線・ガンマ線感度を低く抑えることができる。図 3 にシンチレータの写真や測定の設定アップ、チェックソースを用いて測定したスペクトルを示す。このようにして、中性子検出器の開発を行うことができた。



図 3. Eu:LiCAF(左)、光電子増倍管を用いた中性子検出器による Cf-252 のスペクトル測定の様子(中)、および測定されたスペクトル(右)

4. 結論

本研究では、燃料デブリ分析のための小型・可搬型中性子源に関して、中性子ターゲットおよび短距離 TOF システムの基礎検討を行った。また、核種分析に供するための中性子検出器を新たに作成し、その基礎特性を評価した。今後は、実機試験による燃料デブリ模擬物質の共鳴吸収分析を行うことが望まれる。

成果リスト

[1] Yudhitya Kusumawati, et al., "Feasibility Study Experiment of On-Site Nuclear Material Analysis in Fukushima Fuel Debris by Portable Neutron/X-ray Source", AESJ 2018, March, 2018

同位体選択性の高いストロンチウム (Sr) 原子の共鳴イオン化スキームの開発を目的として、波長 689.4 nm 及び 688.0 nm の遷移に使用する干渉フィルター型外部共振器半導体レーザーを製作した。また、波長 689.4 nm–688.0 nm–487.6 nm の 3 段共鳴励起による Sr 安定同位体の共鳴イオン化スペクトルを観測した。

キーワード：共鳴イオン化, ストロンチウム, レーザー, 干渉フィルター, 同位体選択性, 質量分析

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故により放出された主な放射性核種の一つである ^{90}Sr (半減期 28.7 年) はカルシウム (Ca) と同じアルカリ土類金属元素であり、摂取に伴う骨組織等の長期内部被ばくが懸念されている。長半減期の純 β 崩壊核種であるため放射線計測による迅速分析は困難であり、一般的な質量分析法では同重体のジルコニウム 90 (^{90}Zr) 及び多量に含まれる Sr 安定同位体からの高い分離能力を得ることは容易ではない。

本研究では、線幅の狭い半導体レーザーを用いて ^{90}Sr 原子を選択的に共鳴イオン化し、イオントラップにて $^{90}\text{Sr}^+$ イオンを捕獲・結晶化する手法を考案し、分析装置の開発を行っている。本手法は高い元素・同位体選択性を有するとともに、単一同位体イオンの可視化による高感度な分析が可能となるため、Sr 安定同位体が多量に含まれる海産物試料等をターゲットとした ^{90}Sr の迅速分析への適用を検討している。

2. 干渉フィルター型外部共振器半導体レーザーの製作

共鳴イオン化に使用するレーザーとして、後述の波長 689.4 nm 及び 688.0 nm に対応した干渉フィルター型外部共振器半導体レーザーを設計・製作した。図 1 に概念図を示す。レーザーダイオードからの光をレンズ 1 で平行光にし、半値幅 0.3 nm の干渉フィルターの入射角を調整することで透過光に対して粗く波長選択を行う。この透過光をレンズ 2 で部分反射ミラー (反射率 20%) の表面付近に集光させる。部分反射ミラーの反射光をレーザーダイオードにフィードバックすることにより、単一モード発振されたレーザー光が得られる。部分反射ミラーに取り付けられたピエゾ素子の印加電圧により共振器長を変えることで、発振波長の微調整を行う。部分反射ミラーの透過光をレンズ 3 で平行光にし、Sr の分光分析に使用する。

干渉フィルター型外部共振器半導体レーザーは、分光分析の分野で幅広く使用されている回折格子を用いた Littrow 型外部共振器半導体レーザーと比較して、角度ずれに対する安定性が高い特徴を持つ。これは、図 1 に示したキャッツアイ構造に起因し、角度方向のアライメントが容易であることを意味する。一方で、並進方向すなわちレンズ 2 による集光点の並進位置を 0.1 mm オーダーの精度で調整する必要があり、レンズ 2 の M9×P0.5 mm 外ネジを用いて回転角を調整することで並進位置の最適化を行っている。

レーザーダイオードとしてソーラボ社製 HL6750MG を使用し、干渉フィルターとして入射角 6° 程度で透過光のピーク波長が 689.4 nm 近辺となるよう設計されたオプトクエスト社製の特注品を使用した。干渉フィルターの入射角、レーザーダイオード電流及びピエゾ素子の印加電圧を微調整し、波長計 WS-7 を用いて波長 689.4 nm のシングルモード発振されたレーザー光が得られていることを確認した。

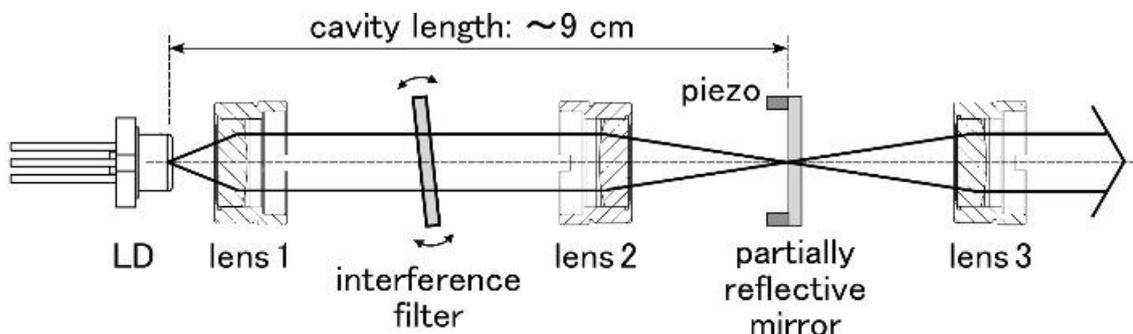


図 1 干渉フィルター型外部共振器半導体レーザーの概念図

3. 共鳴イオン化スペクトルの観測

Sr 原子の代表的な共鳴イオン化スキームを図 2 に示す。本研究では、1 段目に自然幅が約 7.5 kHz と狭い波長 689.4 nm の遷移を利用することで、同位体選択性の高い共鳴イオン化スキームの構築を目指している。製作した干渉フィルター型外部共振器半導体レーザー 2 台の波長を 689.4 nm 及び 688.0 nm に微調整し、別途制作した波長 487.6 nm の Littrow 型外部共振器半導体レーザーと合わせて計 3 本のレーザーにより図 2 のスキーム(iv): 689.4 nm – 688.0 nm – 487.6 nm の 3 段共鳴励起による Sr 安定同位体の共鳴イオン化スペクトルを観測した。

1 段目 (波長 689.4 nm) 及び 2 段目 (波長 688.0 nm) のレーザー周波数各々を共鳴周波数 ± 250 MHz の範囲でスキャンして得られたスペクトルを比較した結果、1 段目のスペクトルは主に自然幅に起因するローレンツ成分が小さいことから、高い同位体選択性が期待される遷移であると考えられる。

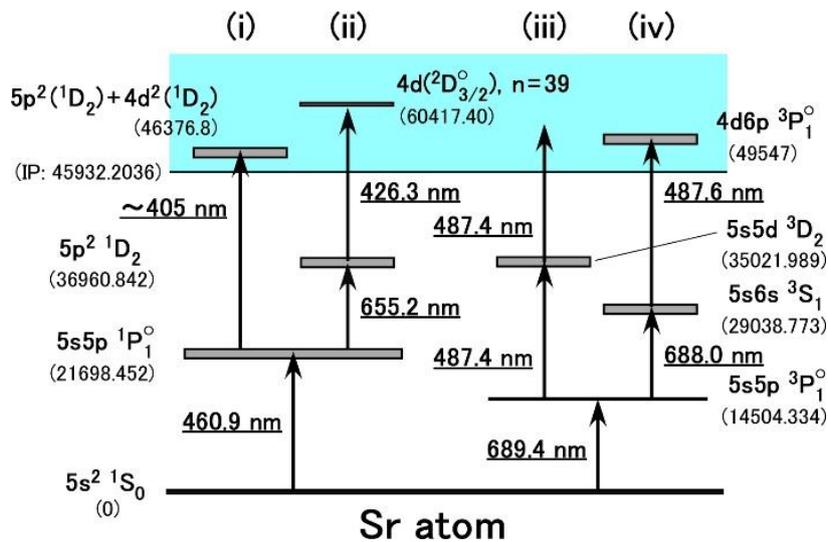


図 2 Sr 原子の代表的な共鳴イオン化スキーム

4. まとめと今後の予定

同位体選択性の高い Sr 原子の共鳴イオン化スキームの構築を目的として、波長 689.4 nm 及び 688.0 nm の干渉フィルター型外部共振器半導体レーザーを設計・製作し、シングルモード発振を確認した。波長 487.6 nm の Littrow 型外部共振器半導体レーザーと合わせて計 3 本のレーザーにより、689.4 nm – 688.0 nm – 487.6 nm の 3 段共鳴励起による Sr 安定同位体の共鳴イオン化スペクトルを観測した。1 段目の周波数スペクトルはローレンツ成分が小さく、同位体選択性の高い共鳴イオン化スキームの構築に適していると考えられる。今後は、2 段目及び 3 段目の遷移について同位体選択性及び遷移効率の観点から適したスキームを探索し、⁹⁰Sr の分析に適した共鳴イオン化スキームの構築を目指す。

成果リスト

- [1] Kyunghun Jung et al., Physical Review A **96**, 043424 (2017).
- [2] Donguk Cheon 他, 日本原子力学会 2017 年秋の大会, 口頭発表 (2017).
- [3] Yoshihiro Iwata et al., 2nd International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISR2018), 口頭発表 (2018).
- [4] Donguk Cheon et al., 2nd International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISR2018), ポスター発表 (2018).
- [5] 岩田圭弘 他, 日本原子力学会 2018 年春の年会, 口頭発表 (2018).
- [6] Donguk Cheon 他, 日本原子力学会 2018 年春の年会, 口頭発表 (2018).

29F-08

腐食特性を向上させた Zr 基、Fe 基合金の開発

研究代表者 阿部 弘亨¹

共著者氏名 叶野 翔¹、楊 会龍¹、段 振剛²、John McGrady¹

所属研究機関名 1 東京大学、2 東北大学

被膜付き燃料被覆管は事故耐性ならびに次世代燃料被覆管の候補材料である。本研究では、ジルカロイ-2 に対し溶射法によりアルミナならびにジルコニア被覆した燃料被覆管を作製し、当該材料の腐食挙動について微細組織学的な観点から評価を行った。

キーワード： 燃料被覆管、ジルカロイ、被膜、耐食性

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故を受け、安全裕度の高い燃料被覆管の開発が求められる。現行の BWR 燃料被覆管はジルカロイ-2 (Zry-2) が使用されているが、ジルコニウム (Zr) が高温環境に晒されることでサーマルフィードバック効果により水素放出がされ、それに伴って発生する PCMI により、燃料の破損、熔融が生じる。これを受け、世界的に被覆管の事故耐性の向上が大きな課題となり、改良 SUS、SiC 複合材料、Mo 合金等の検討が進められている。しかし、これらの先進材料では、実用化に数十年オーダーの期間が必要とされ、当面は Zr 系の被覆管を継続利用し、材料や水質管理の高度化と合わせ、事故に対する安全裕度を向上させる必要が求められる。

これまでに本研究グループでは、現行の燃料被覆管に対し炉内に存在する物質を主成分とした皮膜を施工し、実用化に必要な機能を有する皮膜の施工技術、管理技術として確立することを目的とした研究取組を実施してきている。ここで使用する被膜は、中性子経済に影響が小さく、使用済燃料の取扱いが容易となるような元素で構成され、さらに、炉内環境において被膜物質が供給されることが望ましいと考えており、これにより、通常運転時には影響を及ぼさず、かつ事故時には被覆管の安全裕度を稼ぐ機能を有した比較的早期に実機導入可能な技術開発を目指している。

これらより、本研究では、溶射法により Zry-2 上にアルミナ (Al₂O₃) もしくはジルコニア (ZrO₂) 被覆した被膜付き燃料被覆管を作製し、当該材料をオートクレーブ内で腐食試験し、この腐食挙動について微細組織学的な観点からの評価を行い、当該材料の実炉への実装可能性について検討を行った。

2. 実験方法

供試材として環状形状の Zry-2 を使用し、これらに対し、溶射法によって試料表面に Al₂O₃ ならびに、ZrO₂ を被膜した。なお、被膜厚さは $\approx 100 \mu\text{m}$ とした。腐食試験は

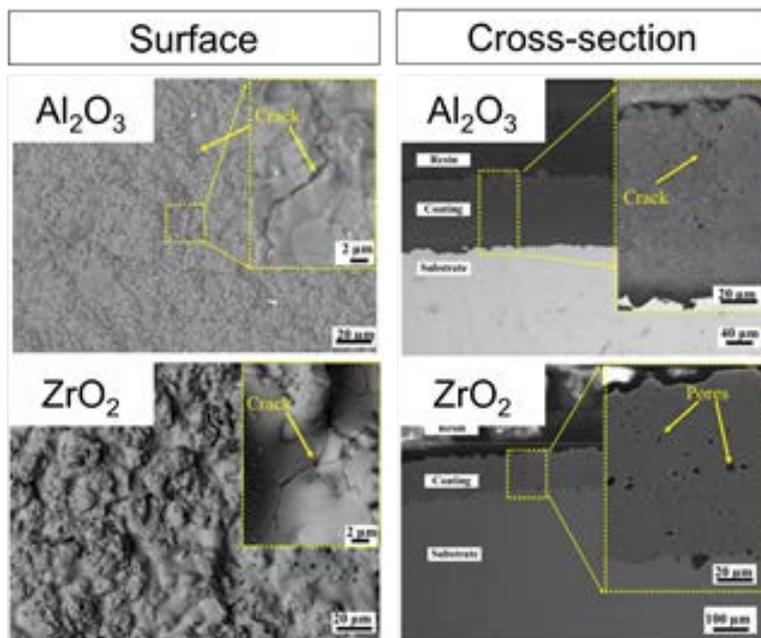


図 1 Al₂O₃、ZrO₂ 被膜施工材の腐食試験前の被膜表面と縦断面組織写真。

633 K、19.2 MPaにおいて、最大 21 日間の腐食試験を実施した。

3. 結果

図 1 に腐食試験前の試料の微細組織写真を示す。腐食試験前の溶射まま材において、被膜表面部における微小クラックと、被膜内部において細孔組織が確認された。これらは、被膜施工時の熔融粒子の収縮および凝固によって生じたものと考えられる。また、図 2 に腐食前後における Al_2O_3 被覆材の XRD 結果を示す。 Al_2O_3 被膜では $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ を主成分とした被膜組織であるが、腐食により、その一部が含水反応を生じ、 $\gamma\text{-AlO(OH)}$ に変化する様子が確認された。一方で、 ZrO_2 被覆では、腐食処理により被膜の剥離が生じ、これは、正方晶 ZrO_2 から単斜晶 ZrO_2 への相変態に起因した格子膨張率の変化によるものと考えられる。これらより、本研究で作製した Al_2O_3 、 ZrO_2 被膜では、被覆が Zry-2 母相への電解質の拡散を妨害し得なかったことから、腐食特性の顕著な改善は確認されなかった。

4. まとめ

被膜施工した燃料被覆管材料の腐食特性について微細組織学的な評価を行った。その結果、母相の腐食特性を改善するためには、溶射時のスプレーパラメータや、施工後の応力緩和プロセス、適切な被膜厚さのさらなる最適化が必要であることが明らかになった。

成果リスト

- [1] Oxidation and electrochemical behaviors of Al_2O_3 and ZrO_2 coatings on Zircaloy-2 cladding by thermal spraying, Zhengang Duan, Huilong Yang, Sho Kano, Kenta Murakami, Yuhki Satoh, Yoichi Takeda, Hiroaki Abe, Surface & Coatings Technology 334 (2018) 319–327.
- [2] 自己修復性保護皮膜つきジルコニウム合金の開発, 段 振剛、楊 会龍、叶野 翔、申 晶潔、趙 子寿、McGrady John、阿部 弘亨, 日本原子力学会 2018 年春の年会.

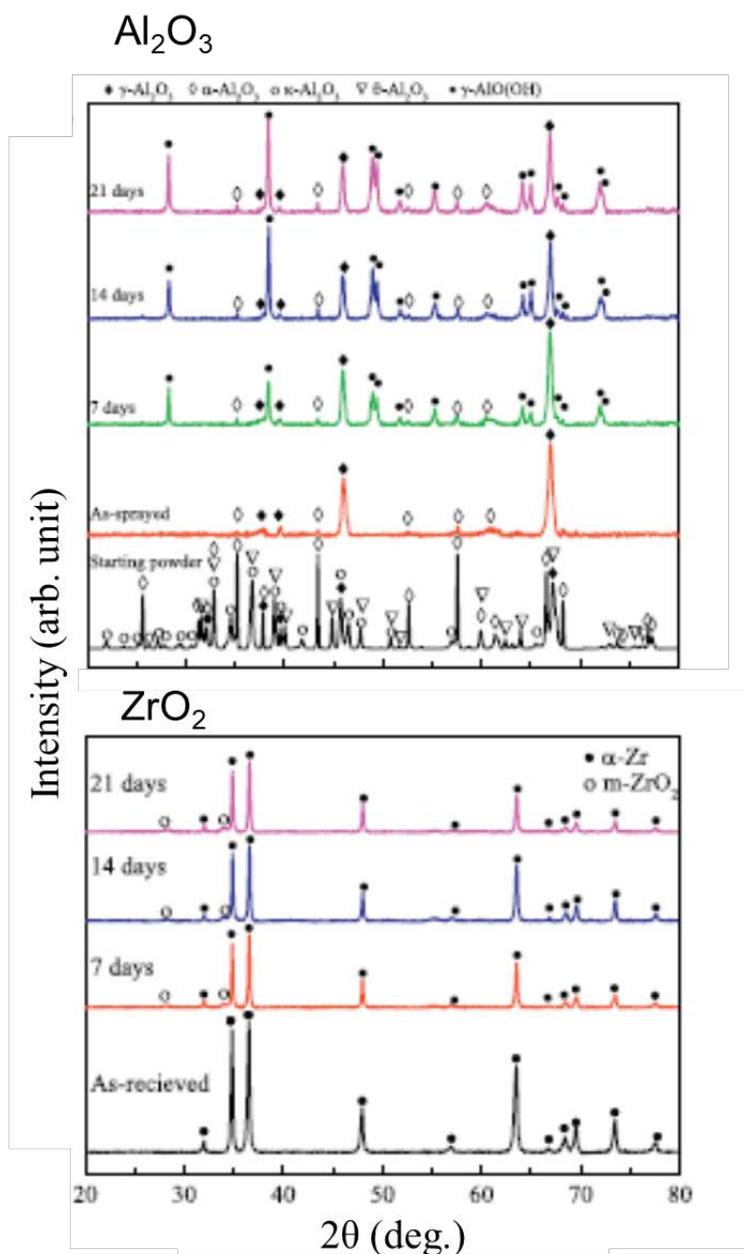


図 2 腐食試験前後の Al_2O_3 、 ZrO_2 材の XRD 分析結果

平成29年度共同利用テーマ一覧(Lシリーズ)

採番	テーマ名	研究テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29L-01	水溶液の放射線効果の研究	工藤 久明	山下 真一	山下 真一
29L-02	パルス&プローブ法を用いる超高速反応の研究	上坂 充	室屋 裕佐	山下 真一
29L-03	不定比金属組成を制御した高温超伝導体のピンニング特性に及ぼす電子線照射効果	寺井 隆幸	下山 淳一	村上 健太
29L-04	高温・超臨界溶媒の放射線化学	室屋 裕佐	室屋 裕佐	山下 真一
29L-05	フォトカソード RF 電子銃の高性能化	上坂 充	上坂 充	上坂 充
29L-06	高速応答シンチレータの開発と性能評価	越水正典	越水正典	山下 真一
29S-01	フェムト秒ライナックのためのマシンスタディ	上坂 充	上坂 充	上坂 充

平成29年度のLシリーズ7テーマ(Sシリーズ 1テーマ含む)。

山下真一¹, YU Hao¹, 室屋裕佐², 中川清子³, 工藤久明¹,
端邦樹⁴, 中西郁夫⁵, WENG Hanqing⁶, LIN Mingzhang⁶, 上田徹¹

1: 東京大・院・工, 2: 大阪大・産研, 3: 都立産技研,

4: 原子力機構・安研セ, 5: 量研機構・放医研, 6: 中国科技大

LINAC からの 10 ns の短パルスを用い、瞬間的に放射線分解を起こさせ、その後の時間挙動を直接追跡することで様々な水溶液中での放射線分解過程を時間分解で観測した。放射線防護剤として期待されるフラボノイド、福島での原発事故の処理でも重要となってくる海水成分、などの放射線化学反応について研究を進めている。

キーワード: パルスラジオリシス, DNA 損傷, ハロン, レアアース, 海水

1. 放射線による DNA 損傷誘発メカニズムの研究 [1-5]

放射線防護やがん治療などの観点から、放射線による DNA 損傷誘発の初期過程を明らかにすることに対する需要は高い。放射線による生物影響は直接作用と間接作用に分けて理解されている。前者は放射線のエネルギーを DNA などの生体分子が直接吸収して励起やイオン化などが起こるもので、後者は放射線のエネルギーを生体中の水が吸収して分解し、これによって生じた水分解活性種（主に OH ラジカル）が DNA などの生体分子へ損傷を与えるものと分類されている。ビタミン C やフラボノイドなどの抗酸化物質は OH ラジカルを捕捉することで放射線防護機能を有すると説明されてきた。しかし、これらの物質の添加濃度は非常に低く、反応速度論的にラジカル捕捉は放射線防護機能を説明するのに不十分である。そこで、一度できたばかりの DNA 損傷が DNA 変異として安定化するまでの間にゆっくりと抗酸化物質が損傷を除去する化学回復の重要性が指摘されている。これまでに脳梗塞時の活性酸素除去薬剤であるラジカットやフラボノイド類に対して化学回復の直接観察を行ってきている。このほか、酸化性の OH ラジカルではなく、還元性の電子（溶媒和前電子）による DNA 損傷についてもピコ秒パルスラジオリシスを併用して研究を進めている。

2. レアメタル回収における放射線利用の検討 [6]

中国科学技術大学 (USTC) の林銘章教授らとの共同研究では、レニウム (Re), ロジウム (Rh), ルテニウム (Ru), 白金 (Pt) などのレアメタルをその希薄水溶液から回収する技術開発に携わっている。

長期にわたって β 崩壊が続くテクネチウム-99 (^{99}Tc) は使用済み燃料中での収量も高く、水への溶解度が高いため、不測の事態の際には環境への移行も起こりやすいと懸念されている。レニウム (Re) は非放射性であり、 ^{99}Tc と化学特性がよく似ている。イソプロパノールを添加した水溶液中でのガンマ線照射により Re(VII) を還元、金属 (Re) および酸化物 (ReO_2 , ReO_3) のナノ微粒子として沈殿を得られることが示されている。この際、放射線分解生成物のうちの還元性ラジカルが、非常に速い反応で Re(VII) を還元しており、パルスラジオリシス法により直接その様子を観測した。これにより、過渡生成物である Re(VI) と OH^- が錯形成しており、その錯体構造は OH^- 濃度によって異なること、さらにこの違いが Re(VII) の還元にも影響を与えていることが分かった。

3. ハロゲン化物のアルコール溶液中での放射線分解 [7]

水溶液中のハロゲン化物イオン ($\text{X}^- = \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{I}^-$) は放射線照射で生成する $\cdot\text{OH}$ と反応後、プロトンとの中和によるハロゲン原子生成などを経て、ハロゲン分子アニオン (X_2^-) が生成される。しかし、アルコール溶液中でのハロゲン化物イオンの反応についての研究例は非常に少ない。これは、ほとんどのハロゲン化金属のアルコールに対する溶解度が低いことによるものと考えられる。一方、有機ハロゲン化合物を溶解したアルコール溶液を放射線照射すると、ハロゲン化物イオンが連鎖的に解離することが分かっている。そこで、1,2-ジブロモテトラフルオロエタン (ハロン 2402) を溶解した 2-プロパノールの放射線照射で生成した臭化物イオンから臭素分子アニオンの生成をパルスラジオリシス・時間分解吸光法で観測し、水溶液中での臭素分子アニオン生成の反応機構との違いを検討した。結果、ハロン 2402 含有 2-プロパノール溶液の放射線照射において、ハロンから解離した Br^- から Br_2^- が生成することがわかった。高濃度塩水溶液と同様、溶媒のカチオンによる Br^- の中和が開始反応と考えられた。この成果は原著論文として投稿準備段階にある。

4. 海水の放射線分解メカニズムの解明 [8]

使用済み核燃料の最終処分や福島原発事故で発生した汚染水処理では、水の放射線分解における Cl^- の影響を考慮する必要がある [E. Bjergbakke, et al., *Radiochim. Acta* **48**, 73-77 (1989) / M. Kelm and E. Bohnert, FZKA 6977 (2004) / J. Nakano et al., *J. Nucl. Sci. Tech.* **51**, 997-986 (2014)]. 図 3 に示すように水中での Cl^- の放射線化学反応は大まかには理解されている [G. G. Jayson, et al., *J. Am. Chem. Soc. Faraday Trans. I* **69**, 1597-1607 (1973) / X. Y. Yu, et al., *J. Phys. Chem. A* **107**, 1313-1324 (2003)]. これらの中間活性種のうち ClOH^- と Cl_2^- はモル吸光係数が高く、実験的に観測可能である。しかし、これらの中間活性種の観測結果は、報告されている反応セットを用いたシミュレーションで必ずしも十分説明しきれない。特に海水と同等の高い Cl^- 濃度になってくると、 Cl^- の関与する反応が速くなり、100 ns 以内のスパー過程にも変化が現れる（スパーとは、放射線のエネルギーが付与される局所領域のことで、水の場合には数から十 nm 程度の領域となる）。結果、スパー過程の後に均一となった際のプライマリ収量も変わり、これが長期の放射線効果予測には大きな影響を与え得る。そこで Cl^- 水溶液の放射線分解で生じる中間活性種のスパー内での挙動をパルスラジオリシス法で観測し、モデル計算で再現することを試みている。現在までに、中間活性種の主要な減衰反応である $\text{Cl}_2^- + \text{Cl}_2^- \rightarrow \text{Cl}_3^- + \text{Cl}^-$ の速度定数を精度よく再評価したほか、報告のない $\text{ClOH}^- + \text{ClOH}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ や $\text{ClOH}^- + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}_2$ などの反応を仮定しなければ実験結果を説明できないことも分かってきている。なお、この成果は国内外で講演を依頼されている。

成果リスト（抜粋）

- [1] 招待講演：S. Yamashita, “Pulse radiolysis study for radiation-induced sequential and early events: As a basis for nuclear engineering and radiation therapy”, the Workshop on Coherent Light Source and Sciences 2017 (CLSS-2017), Hefei, Anhui, China, November 8-10, 2017.
- [2] F. Wang, P. Archirel, Y. Muroya, S. Yamashita, P. Pernot, C. Yin, A. K. El Omar, U. Schmidhammer, J.-M. Teulera, M. Mostafavi, “Solvation State of Electron Determining the Nature of the Product of its Reaction with a Solute: Dissociative Electron Attachment Mechanism of Pre-hydrated Electron Reaction”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **19** (34) 23068-23077 (2017).
- [3] YU Hao, 山下真一, 上坂充, “抗酸化剤 MG-Rutin の放射線防護効果：パルスラジオリシス法によるラジカル捕捉と化学回復の観測”, *放射線化学* **105**, 57-60, 2018.
- [4] 端邦樹, LIN Mingzhang, 横谷明德, 藤井健太郎, 山下真一, 室屋裕佐, 勝村庸介, “抗酸化物質エダラボンによる活性酸素除去及び DNA 酸化損傷の化学的修復”, *放射線化学* **103**, 29-34, 2017.
- [5] 東京大学大学院工学系研究科修士論文：H. Yu, “フラボノイドの放射線防護における糖鎖の影響の研究”, 2017.
- [6] Y. Shang, J. Xiao, H. Weng, F. Li, S. Cheng, S. Yamashita, Y. Muroya, M. Lin, “Efficient Recovery of Re(VII) by Radiation-induced Reduction from Aqueous Solution”, *Chemical Engineering Journal* **341** (1), 317-326 (2018).
- [7] S. Nakagawa, S. Yamashita, Y. Katsumura, “Radiation-induced Debromination of 1,2-dibromotetrafluoroethane (Halon2402) in Alcohols Followed by Br_2^- Formation. - A Pulse Radiolysis Study - (tentative)”, *Radiation Physics and Chemistry*, **in preparation**.
- [8] 招待講演：S. Yamashita, K. Hata, Y. Muroya, K. Iwamatsu, Y. Katsumura, “Sequential Radiation Chemical Reactions in Aqueous Solution of Halide Ions”, the 30th Miller Conference on Radiation Chemistry, Sicily, Italy, Oct. 7-11, 2017.

パルス&プローブ法を用いる超高速反応の研究

29L-02

上坂充¹、工藤久明¹、山下真一¹、上田徹¹、
室屋裕佐²、仮屋深央²、山田徹平²、勝村庸介³
1：東大院工、2：阪大産研、3：アイソトープ協会

高温水の放射線誘起反応はこれまでナノ秒・マイクロ秒以降の化学過程（スパー形成後の化学反応）は精力的に調べられてきたが、より高速な物理化学過程（スパー形成過程）の議論はほとんどなされていない。物理化学過程の代表的な現象として溶媒のイオン化から生成する電子の溶媒和過程が挙げられ、ピコ秒パルスラジオリシス法を用いて高温水中の電子溶媒和過程を調べた。

キーワード： 高温ピコ秒パルスラジオリシス、高温水、物理化学過程、電子溶媒和過程

1. はじめに

炉心の化学環境（腐食電位）を把握する上で、冷却水のラジオリシスの理解は重要である。水の放射線分解に伴う水素発生は古くから知られ、主に水和電子（ e_{aq}^- ）に由来するとされてきたが、近年、水和前の電子（前駆体）も支配的に寄与することが指摘された^{1,2}。イオン化から溶媒和までを含めた電子の振る舞いを、室温および高温下でも把握することが重要であるが、水中の電子溶媒和過程は極めて速く（ <1 ピコ秒）、実験的に直接観測することは容易ではない。これまで溶媒和の比較的遅いアルコールを用いて電子溶媒和過程を調べ、直接観測のみならず電子捕捉剤を用いた間接的な手法（捕捉法）も有効であることが分かった³。そこで今回、これを水に適用して室温～高温水中の電子溶媒和過程を調べた。

2. 実験

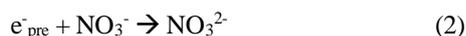
電子線ライナック（照射ビーム源）およびフェムト秒レーザー（分析光源）を用いたピコ秒パルスプローブ実験を行った。高温高压セルで試料を高温高压に保持し、ピコ秒～ナノ秒領域において、可視～近赤外領域の過渡吸収をマルチチャンネル（2048 ch）にて計測した。

3. 結果と考察

NaNO_3 水溶液を用いてピコ秒パルスプローブを行い、水和電子（ e_{aq}^- ）の時間挙動を測定した結果を図1に示す（室温）。 NaNO_3 濃度が増加するほど、水和電子のピコ秒領域の減衰が速くなることから、水和電子は硝酸イオンとの反応を引き起こしている。



さらに、 NaNO_3 濃度が高いほど、水和電子の初期生成量も減少していることから、 NO_3^- は e_{aq}^- に加えてその前駆体（ e_{pre}^- ）も捕捉することが分かる。



e_{aq}^- の生存確率（捕捉反応を逃れる確率）を図2に示す。生存確率を37%（ $=1/e$ ）に低下させる捕捉剤濃度（ C_{37} ）を評価した結果、室温では0.32 Mであった。同様の捕捉剤濃度依存性を高温条件下でも行った結果を図2に合わせて示す。65 °Cでは0.35 M、100 °Cでは0.42 Mと、高温ほど増加した。

これまで溶媒にアルコール（1-プロパノール）を用いて C_{37} を評価した。電子捕捉剤にアセトンを用い

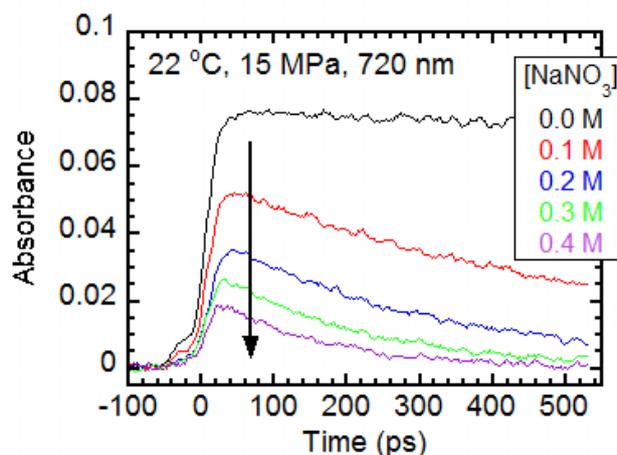


Fig. 1. Time behaviors of the hydrated electron (e_{aq}^-) in NaNO_3 aqueous solution at room temperature measured by picosecond pulse-probe.

た場合では、 C_{37} は室温で $C_{37} = 0.19$ M、 100°C で $C_{37} = 0.29$ M であった³⁾。水も1-プロパノールも温度依存性は共通であり、 C_{37} は高温ほど高くなる。

電子前駆体に対し、捕捉剤による捕捉反応と、捕捉剤からの逃散すなわち電子溶媒和(以下の反応(3))は競争反応の関係にある。



実験結果より、高温ほど反応(2)より反応(3)の割合が大きくなることから、捕捉から逃れて溶媒和に至りやすい、即ち電子の溶媒和は高温ほど高速化するものと考えられる。捕捉剤が緩和過程のどの段階で効率的な捕捉を行っているかは現段階では不明である。 C_{37} は、水やメタノール~プロパノールといった比較的分子量低かつ溶媒和の速い溶媒については報告がなされているが、溶媒和の遅い溶媒については報告例は極めて少ない。今後、直鎖の長いアルコールも対象に C_{37} を評価することでこれを明らかにしていきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) J. A. LaVerne et al., *J. Phys. Chem. A*, **104**, 9820 (2000).
- 2) M. Sterniczuk et al., *J. Phys. Chem. A*, **120**, 200 (2016).
- 3) 室屋裕佐、吉田哲郎ら、日本原子力学会 2016 年秋の大会、3C05

成果リスト (抜粋)

- [1] Y. Muroya, S. Yamashita, P. Lertnaisat, S. Sanguanmith, J. Meesungnoen, J.-P. Jay-Gerin and Y. Katsumura, "Rate constant for the $\text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2$ reaction at elevated temperatures measured by pulse radiolysis", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19** (2017) 30834-30841.
- [2] Furong Wang, Pierre Archirel, Yusa Muroya Shinichi Yamashita, Pascal Pernot, Chengying Yin, Abdel Karim El Omar, Uli Schmidhammer, Jean-Marie Teuler and Mehran Mostafavi, "Effect of the solvation state of electron in dissociative electron attachment reaction in aqueous solutions", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19** (2018) 23068-23077.
- [3] Zhong Fang, Xuewu Cao, Lili Tong, Yusa Muroya, Giles Whitaker, Mojtaba Momeni, Mingzhang Lin, "An improved method for modelling coolant radiolysis in ITER", *Fusion Eng. Des.*, **127** (2018) 91-98.
- [4] 室屋裕佐, "最新放射線化学 (基礎編) 5 水と水溶液の放射線化学", *RADIOISOTOPES*, **66** (2018) 425-435.
- [5] Yusa Muroya, Wataru Kanamori, Shinichi Yamashita, Yosuke Katsumura, Takahiro Kozawa, "Ps and ns pulse radiolysis study on electron solvation and spur reaction processes in polar liquids at high temperature and high pressure condition", 30th Miller Conference on Radiation Chemistry, Oct. 2017, Italy.

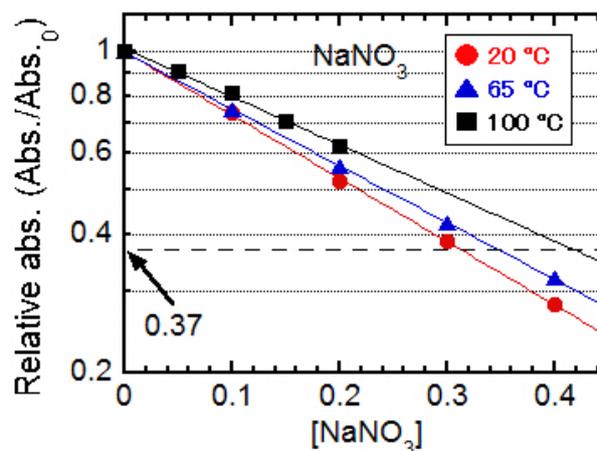


Fig. 2. Escape probabilities of precursor to the hydrated electron from scavenger (NO_3^-) at elevated temperature.

不定比金属組成を制御した高温超電導体の ピンニング特性に及ぼす電子線照射効果

寺井隆幸*、武田泰明*、西森哲太郎**、佐藤巧望**、元木貴則**、下山淳一**

東京大学大学院工学系研究科*、青山学院大学理工学部**

表題の研究課題のもと、平成 29 年度も化学組成を精密に制御した様々な高温超伝導体について電子線照射によるピンニングセンター導入の効果調べる研究を継続し、超伝導体の系による照射前後の臨界電流特性の変化の違いや照射効果の化学組成依存性を系統的に調べた。超伝導体母相の精密な組成制御の指針が確立できつつあり、29 年度は特に Gd123 溶融凝固バルクにおいて進展があった。

キーワード： 高温超伝導体、銅酸化物、電子線照射、ピンニング、不定比金属組成

1. はじめに

超伝導体結晶内の磁場中での臨界電流特性は磁束ピンニング力の強化によって大きく向上させることができる。ピンニング力はピンニングセンターとなる欠陥や析出物の形状、大きさ、分布と超伝導体母相の凝縮エネルギーの大きさに依存する。我々は後者の増大を不定比金属組成の整数比組成への制御によって試みており、電子線照射により点欠陥状の強力なピンニングセンターを導入し、その前後の超伝導特性、特に臨界電流特性の変化を調べることにより、不定比金属組成制御の指針の確立と、到達可能な臨界電流特性を見極めることを目指している。平成 29 年度の研究では、前年度までの研究を継続し強力超伝導磁石としての応用が期待されている Gd123($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$)系溶融凝固バルクおよび Nd123 単結晶の金属組成を系統的に制御した試料の臨界電流特性に対する電子線照射効果を調べた。

2. 実験方法

Gd123 溶融凝固バルクは、Gd123 と Gd211 のモル比が 7:3 の標準組成に対し仕込組成が Ba 過剰組成となるよう作製した混合粉末 $\text{Gd}_{1.3}\text{Ba}_{1.7+x}\text{Cu}_{2.4}\text{O}_y$ ($x = 0-0.3$)を円盤状にプレス成型し、Nd123 単結晶を種結晶として部分溶融状態からの徐冷によって Ba 仕込組成が異なる Gd123 溶融凝固バルクを育成した。シングルドメインに成長した試料を照射に適したサイズの薄片に切り出し、酸素アニールによるキャリア濃度を調節した。金属組成比が異なる Nd123 単結晶は仕込組成比で Ba/Cu = 0.67, 0.60 となる 2 種類のフラックス粉末から BaZrO₃ 坩堝を用いた自己フラックス法により育成した。Ba/Cu = 0.67 のほうが Nd123 単結晶中での Ba サイトへの Nd 固溶量がやや小さい。得られた 2 種類の金属組成比の Nd123 単結晶試料に対して酸素アニールによるキャリアドープを行った後、電子線照射を複数回行うことで試料への欠陥(磁束ピンニングセンター)の導入、追加を行った。両系の照射前および照射量が異なる試料の臨界電流密度 J_c を SQUID 磁束計により評価した。 J_c は磁化ヒステリシスの幅から拡張 Bean モデルを用いて算出し、照射量は単位面積を通過した電子の量として電流値と照射時間から見積もった。

3. 結果と考察

Fig. 1 に Ba 過剰 Gd123 溶融凝固バルクの電子線照射前後の J_c の磁場依存性を示した。白抜きシンボルは照射前を塗りつぶしシンボルは照射後を表す。なお、電子線照射後(照射量は $x = 0.1$ のみ $6.3 \times 10^{17} \text{ e/cm}^2$ 、その他の試料は $5.8 \times 10^{17} \text{ e/cm}^2$)の試料では照射前と同様のシャープな超伝導転移を維持し、 $x = 0.1$ のみ T_c が 0.5 K 程度低下し、他の試料では T_c の大幅な低下は見られなかった。電子線照射によって 60 K, 77 K とともに低磁場領域での J_c が劇的に向上し、ピンニング力密度 F_p はすべての試料で 77 K では 2 T 付近で極大になった。Fig. 2 に 77 K, 2 T における電子線照射前後の F_p の差 ΔF_p と Ba 過剰量 x の関係を示す。Ba 過剰量 x に対する系統的な ΔF_p の変化は見られなかったが、同試料の異なる領域から切り出した薄片試料から算出した直方晶性と F_p には相関がみられ、RE/Ba 固溶量が最も少ないとされる直方晶性が最も大きいひし形シンボルで示した $x = 0.2$ の試料でピンニング力が最も増大した。つまり、RE/Ba 固溶量の少ない試料ほど電子線照射によるピンニング特性の改善が顕著であると考えられる。

Fig. 3, Fig. 4 にそれぞれ Ba/Cu = 0.67, Ba/Cu = 0.60 の仕込組成から育成した Nd123 単結晶試料の 77 K における J_c の磁場依存性を示す。いずれの試料についても電子線照射を行うごとに低磁場領域での J_c が向上した。また、2 度目以降の電子線照射による J_c の向上が 1 度目の照射の際の J_c の向上より小さくなっていることがわかる。しか

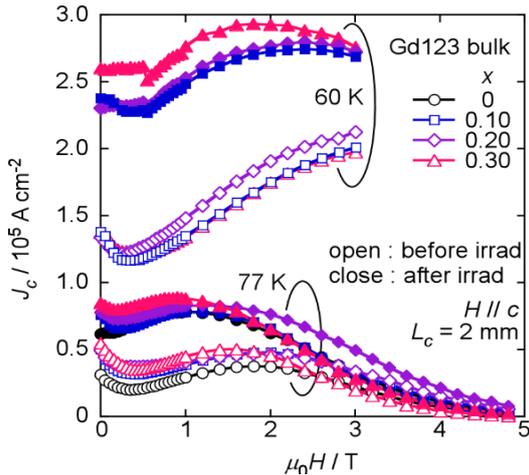


Fig. 1 Ba 過剰 Gd123 溶融凝固バルクの電子線照射前後の J_c の磁場依存性。

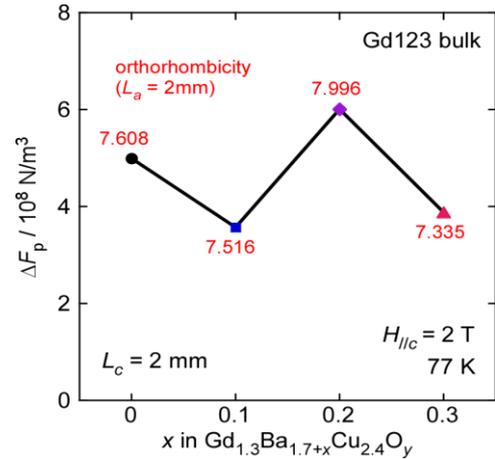


Fig. 2 Ba 過剰 Gd123 溶融凝固バルクの電子線照射による 77 K, 2 T 下での F_p の変化。

し、Ba/Cu=0.67 から育成した結晶のほうが、 J_c は明らかに上昇し続けており、この結果は、Ba/Cu=0.67 のフラックスから育成した結晶のほうが、Ba/Cu=0.60 のフラックスから育成した結晶よりも、超伝導凝縮エネルギーが大きいことを示唆する。また、複数回の照射による J_c 向上が小さくなる傾向は平成 28 年度までの研究で報告してきた RE123 溶融凝固バルクの場合と同じであり、RE123 結晶も共通の性質といえる。複数回照射試料では欠陥の密度が高まり、ピン止め力を向上させる効果と、超伝導母相を劣化させる効果がともに現れた結果を見ることができ、今後、さらに照射を行うことにより照射欠陥が飽和し J_c が低下する可能性が考えられる。

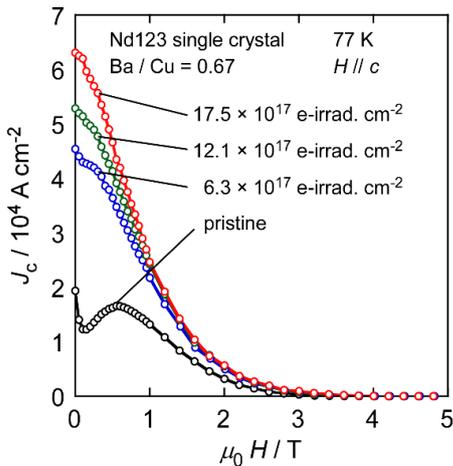


Fig. 3 Ba/Cu = 0.67 の Nd123 単結晶試料の 77 K における J_c の磁場依存性

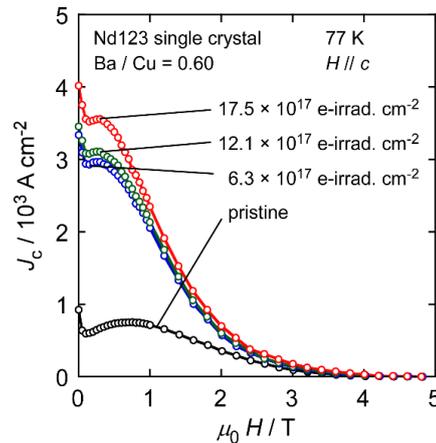


Fig. 4 Ba/Cu = 0.60 の Nd123 単結晶試料の 77 K における J_c の磁場依存性

今後の予定

新たな金属組成比が異なる Gd123 溶融凝固バルク試料、Nd123 単結晶試料を作製し、金属組成比制御と電子線照射効果の関係をさらにも明らかにしていく。30 年度には希土類元素を混合した単結晶の照射試料に加える。また、今回までに電子線照射を行った試料に対し、追加照射を行い照射欠陥導入効果の変化について継続して調べる。

成果リスト

- [1] J. Shimoyama, "Chemical approaches to enhance performance of RE123 bulks", The 10th International Workshop on Processing and Application of Superconducting (RE)BCO Large Grain Magnets (PASREG2017), Tokyo (Invited Talk, December 2017).
- [2] T. Sato, S. Matsumaru, T. Motoki and J. Shimoyama, "Densification of Dy123 melt-solidified bulks by pre-annealing", The 10th International Workshop on Processing and Application of Superconducting (RE)BCO Large Grain Magnets (PASREG2017), Tokyo (Poster, December 2017).

高温ナノ秒パルスラジオリシスおよびスパー拡散モデルシミュレーションを用いて、水素注入の効果を阻害する反応である水素原子-水分子反応 ($\text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{OH}$) について、室温から 350 °C にわたる反応速度定数を実験的に評価した。亜臨界領域 (270~350 °C) では従来の評価に比べて一桁大きい値が得られた。

キーワード： 高温ナノ秒パルスラジオリシス、水素注入、水素原子 - 水分子反応、スパー拡散モデル計算

1. はじめに

軽水炉冷却水の放射線分解生成物は構造材料の応力腐食割れ発生や進展加速に関わることが知られ、高温放射線誘起素過程の理解と整理が重要である。構造材料の腐食抑制に有効な水化学手法として、冷却水への水素注入が知られ、BWRやPWRで広く用いられてきた。放射線環境下において過酸化水素や酸素といった酸化性化学種の著しい抑制効果が発現するが、その反応機構に関わる化学種 (HやOH等) の知見は必ずしも確立していない。H原子-水分子反応 ($\text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{OH}$) は、水素-OH反応の逆反応であり、水素注入の効果を阻害するため水化学的には好ましくない反応である。



この反応性は室温においては著しく低く ($k \ll 1 \text{ (M}^{-1}\text{s}^{-1})$) ほぼ無視できるが、活性化エネルギーが高く ($E_a \sim 100 \text{ kJ/mol}$)、軽水炉条件である300 °C近傍では水素注入効果に影響を与えうるうことが指摘されている。この反応はこれまで実験的に観測された例は無く、理論的 (熱力学的) な考察^{2,5)}や、水素原子の類似の化学種としてミュオンを代用した実験⁶⁾から議論が進められてきたが、300 °Cの反応速度定数の報告値は $10^3 \sim 10^4$ の範囲で大きく異なっており、未だ見解の一致を見ていない。そこで今回、高温パルスラジオリシス実験およびスパーモデル計算により、室温~亜臨界条件にわたる反応性を調べた¹⁾。

2. 研究手法

まず最適な実験条件を探索するため、線量率効果を考慮した純水のスパー拡散反応モデル計算を行った (300 °C、pH3、 $k_1 = 2.1 \times 10^4 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$)。結果を図1に示す。酸性条件下では、水和電子がプロトンと速やかに反応し、数ns以内に水素原子を生成する。



その後、反応(1)が起こるが、その時間挙動は照射パルスの線量によって異なる。低線量条件 (<10 Gy) ではμs領域にOHの遅延生成が見られ、これが反応(1)を反映している。しかし高線量ほど他のラジカル反応 ($\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$ 、 $\text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ など) も競合するため、観測困難となる。したがって本実験では低線量が必須である。次に、反応(1)に関わる化学種はいずれも光吸収が弱いいため直接観測は困難である。

そこで捕捉剤として (I⁻) を用い、OHを選択的に捕捉し、I₂に変換することで間接的に観測した ($\epsilon_{740\text{nm}} = 2300 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$)。得られた時間挙動をスパー拡散モデル計算と比較することで反応速度定数を評価した。

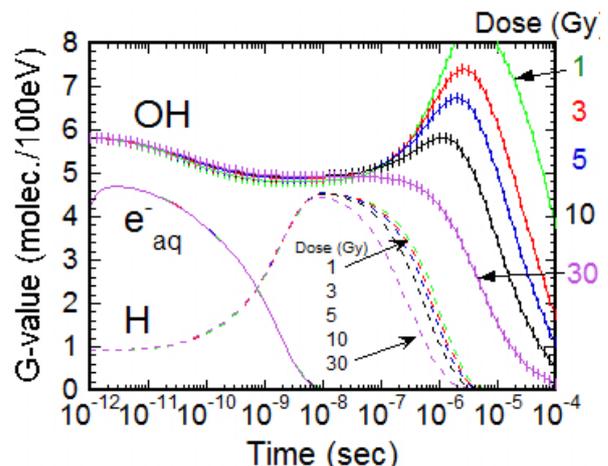


Fig. 1. Dose dependent time behaviors of OH, H, and e_{aq}^- in pure H_2O at 300 °C (pH3), calculated by the sour diffusion model simulation.

3. 結果と議論

試料に10 mM NaI / 1 mM HClO₄ (pH3) / Ar脱気を用いてパルスラジオリシスを行った。ここで溶媒は、極力不純物が少ないことが望ましいため、オルガノ(株)より提供いただいた超々純水を用いた。線量を5.5 Gyおよび2.9 Gyにて、室温～亜臨界状態においてI₂⁻を測定した。低温側 (<250 °C) では遅延生成は見られず、I₂⁻同士の再結合反応による減衰のみが見られた。しかし270 °Cを超えると徐々に遅延生成が現れた。310 °Cの結果を図2に示す。低温では見られない遅延立ち上がりが見事に観測された。1段階目の立ち上がりは初期のOHで、2段階目の遅延立ち上がりが反応(1)を反映していると考えられる。線量率依存性を考慮したスパー拡散モデル計算も行い比較すると、 $k_1 = 4.5 \times 10^4$ の時に両者が良く一致した。従来の報告値 ($k_1 \sim 2 \times 10^3$)^{2,4)}を与えた場合の結果も合わせて示すが、これは2段階生成を全く再現できない。その他の亜臨界領域の温度 (270 ~ 350 °C) についても同様の評価を行い、アレニウスプロットした結果を図3に示す。これまで300 °C近傍の k_1 については主に熱力学的な議論から 10^3 から 10^4 まで意見が様々であったが²⁻⁶⁾、Buxton^{3,5)}やGhandi⁶⁾らをサポートする結果が得られた。この値を用いて定常照射下シミュレーションにより水素濃度 (DH) と過酸化水素濃度[H₂O₂]の関係を見積もると、[H₂O₂] < 10⁻⁷ (mol/L)を達成するためにはDH > 17 cc/kg (>0.53 mM)である必要性が示唆された。

References

- 1) Y. Muroya et al., Phys. Chem. Chem. Phys., 19 (2017) 30834.
- 2) A. J. Elliot, D. M. Bartels et al, Report AECL report, 153-127160-450-001 (2009).
- 3) D. Swiatla-Wojcik, G. V. Buxton, Radiat. Phys. Chem., 74 (2005) 210.
- 4) D. M. Bartels, Radiat. Phys. Chem., 78 (2009) 191.
- 5) D. Swiatla-Wojcik, G. V. Buxton, Radiat. Phys. Chem., 79 (2010) 52.
- 6) C.D. Alcorn et al., Chem. Phys., 435 (2014) 29.

成果リスト (抜粋)

- [1] Y. Muroya, S. Yamashita, P. Lertnaisat, S. Sanguanmith, J. Meesungnoen, J.-P. Jay-Gerin and Y. Katsumura, "Rate constant for the H + H₂O → OH + H₂ reaction at elevated temperatures measured by pulse radiolysis", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19** (2017) 30834-30841.
- [2] Furong Wang, Pierre Archirel, Yusa Muroya Shinichi Yamashita, Pascal Pernot, Chengying Yin, Abdel Karim El Omar, Uli Schmidhammer, Jean-Marie Teuler and Mehran Mostafavi, "Effect of the solvation state of electron in dissociative electron attachment reaction in aqueous solutions", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19** (2018) 23068-23077.
- [3] Zhong Fang, Xuewu Cao, Lili Tong, Yusa Muroya, Giles Whitaker, Mojtaba Momeni, Mingzhang Lin, "An improved method for modelling coolant radiolysis in ITER", *Fusion Eng. Des.*, **127** (2018) 91-98.
- [4] 室屋裕佐, "最新放射線化学 (基礎編) 5 水と水溶液の放射線化学", *RADIOISOTOPES*, **66** (2018) 425-435.
- [5] Yusa Muroya, Wataru Kanamori, Shinichi Yamashita, Yosuke Katsumura, Takahiro Kozawa, "Ps and ns pulse radiolysis study on electron solvation and spur reaction processes in polar liquids at high temperature and high pressure condition", 30th Miller Conference on Radiation Chemistry, Oct. 2017, Italy.

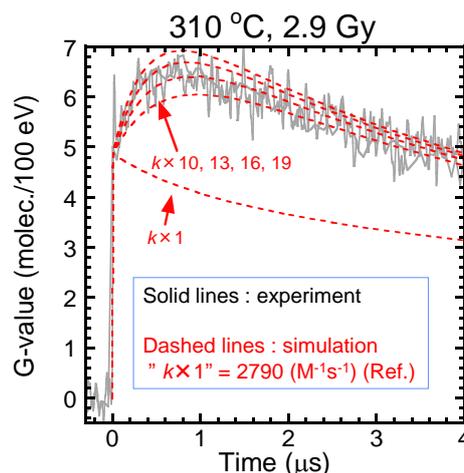


Fig. 2. Time dependent G-value of I₂⁻ at 310 °C, 2.9 Gy. Solid line represents experimental result, and dashed lines represent simulation results obtained with different k_1 .

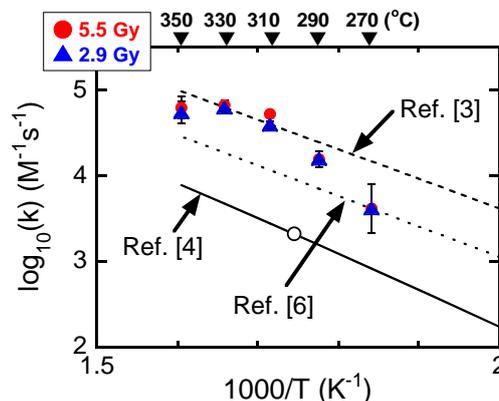


Fig. 3. Arrhenius plot of the evaluated k_1 in subcritical regime.

自己賦活型シンチレータである $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ を対象とし、パルスラジオリシス法により過渡吸収分光を行った。ピコ秒領域において、自己束縛状態からの高速な消光が生じていることが明らかとなった。

キーワード：シンチレータ，自己賦活型，BGO，過渡吸収，自己束縛

1. 本文

【はじめに】シンチレータとは発光型の放射線計測素子である。より高性能な材料の実現を目指して、今日でも、新規の材料探索が精力的に進められている。新規材料（あるいは既存材料の改良版）の開発においては、シンチレーション過程に関わるキーパラメータが考慮された上での材料設計が行われることもあるが、その場合においても、その系におけるシンチレーション（あるいは電子正孔対）の過程の全貌が解明されているには程遠いのが現状である。そのような現状を鑑み、我々のグループでは、パルスラジオリシス法を用い、過渡吸収による電子正孔対のダイナミクス観測を通じた、シンチレーション過程の全貌の解明を進めている。

今年度には、実用に供されることの多い無機シンチレータを対象とした。無機シンチレータは、シンチレーションの生じる箇所に依拠して、大きく二つに分類される。一つは発光中心タイプのシンチレータであり、これらは絶縁体のホストと微量に添加された発光中心として機能する元素から構成されている。もう一つは、自己賦活型のシンチレータである。自己賦活型というのは、発光中心としての微量元素を賦活することなく、効率よく発光が得られるということである。その多くの場合、自己束縛励起子による発光が、シンチレーションの起源として提案されている。発光中心タイプの場合には、シンチレーションの減衰時定数は、発光中心となるイオンでの光学遷移の特徴に依存するため、ほとんどの場合、数十 ns 以上となる。一方で、自己賦活型の場合には、シンチレーションの減衰時定数は、自己束縛励起子の蛍光寿命（<放射寿命）となるために、数十 ns 以下となることもある。しかしながら、自己賦活型のシンチレータの場合でのシンチレーション過程については、それほど詳しい光学的解析がなされていない。中でも、自己束縛の有無という、いわゆる「静的な」解析はなされているものの、消光過程を含む動的過程は未解明である。この過程の解明を進め、自己束縛過程と、その競合する消光過程とを解析することにより、材料設計に資する知見を得ることが、本研究の目的である。

本研究では、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) を対象とした。BGO は、その高い密度のため、 γ 線用のシンチレータとして利用されている。その発光に関しては、自己束縛正孔の関与が提示されているものの、励起状態の無放射緩和の際のダイナミクスについては検討の余地が多い。本研究では、緩和過程の詳細を、ピコ秒からナノ秒領域でのダイナミクスを論じることを目的とし、過渡吸収分光にて解析した。

【実験方法】パルス電子線照射後の時間の関数として、パルスラジオリシス法により、過渡吸収を測定した。ピコ秒領域の測定では、東京大学原子力専攻の電子線ライナックを用い、35 MeV のパルス電子線

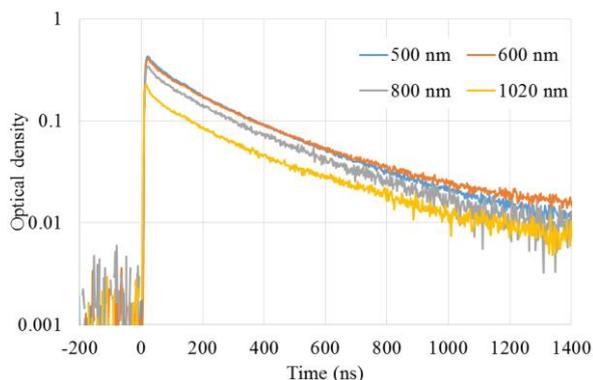


図1 ナノ秒領域での過渡吸収時間プロファイル

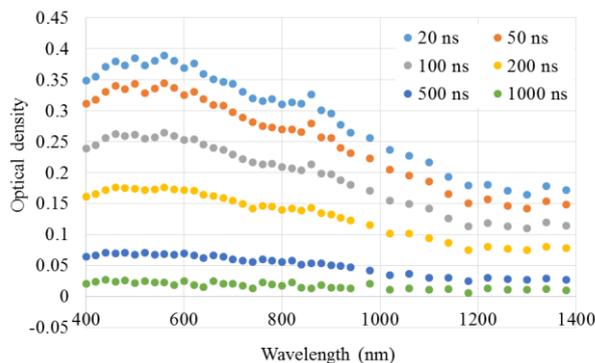


図2 ナノ秒領域での過渡吸収スペクトル

照射後に、遅延時間を変化させて白色光パルスを入射し、時間ごとの吸収スペクトルを観測した。一方、ナノ秒領域の測定では、大阪大学産業科学研究所の電子線ライナックを用いた。電子線パルスとほぼ同時にフラッシュランプからのパルス光を照射し、モノクロメータにて単色化した後、フォトダイオードにて透過光強度の時間プロファイルを取得した。電子線パルスの照射の有無での透過光強度の時間プロファイルから、過渡吸収時間プロファイルを得た。複数の波長でこの測定を行うことにより、過渡吸収スペクトルを得た。

【結果と考察】図1および図2に、ナノ秒での過渡吸収時間プロファイルと過渡吸収スペクトルをそれぞれ示す。ナノ秒領域の過渡吸収の減衰挙動は、シンチレーションの減衰挙動とほぼ一致していた。また、図2からも明らかのように、幅広い波長領域で、過渡吸収の減衰挙動は同様であった。そのため、観測されたスペクトルは単一の励起状態（おそらく自己束縛励起子）に対応するものであり、発光（および消光）により、シンチレーションと同様の速度で減衰すると推察される。

図3および図4に、ピコ秒領域での過渡吸収時間プロファイルと過渡吸収スペクトルをそれぞれ示す。ピコ秒領域においても、形状という点において、ナノ秒領域と同様の過渡吸収スペクトルが観測された。一方で、図4から明確に読み取れるように、時間原点付近で過渡吸収の急速な減少が見られた。これに対応する立ち上がりのシンチレーションがないため、これは消光に帰属される。これらのことから、BGOにおいては、シンチレーションに関わる励起状態の形成初期に、非常に高速な消光が生じることが明らかとなった。

【まとめと今後の予定】自己賦活型シンチレータであるBi4Ge3O12を対象とし、パルスラジオリシス法により過渡吸収分光を行った。ピコ秒領域において、自己束縛状態からの高速な消光が生じていることが明らかとなった。この消光が、材料科学上の工夫（組成や構造）により防ぐことのできるものであるのか、材料合成や、場合によっては計算科学的手法により明らかにしていきたい。

成果リスト

[1] Masanori Koshimizu, Keiichiro Saeki, Yutaka Fujimoto, Go Okada, Takayuki Yanagida, Shinichi Yamashita, Keisuke Asai, "A three-state model for describing the temperature variation of the scintillation properties of Cs2HfCl6", Jpn. J. Appl. Phys., 57 (2018) 032401.

[2] Masanori Koshimizu, Shinichi Yamashita, Yusa Muroya, Hiroki Yamamoto, Takayuki Yanagida, Yutaka Fujimoto, Keisuke Asai, "Transient absorption spectroscopy of scintillators", Pacrim12, 平成29年5月21~26日, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA (招待講演)。

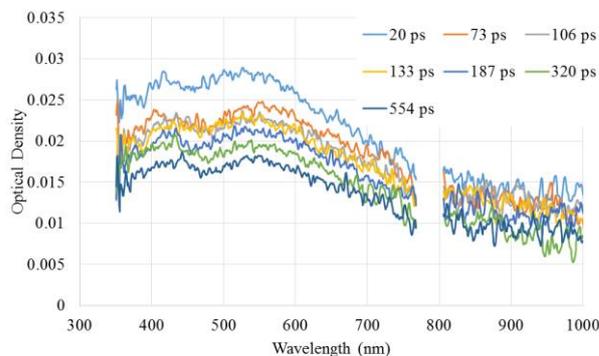


図3 ピコ秒領域での過渡吸収時間プロファイル

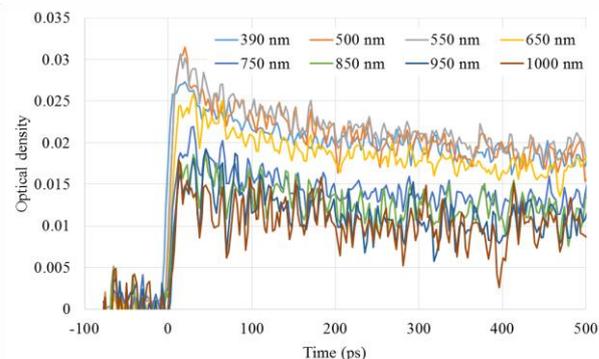


図4 ピコ秒領域での過渡吸収スペクトル

マイナーアクチノイド分離プロセスでの利用が見込まれるアミド系抽出剤の放射線分解過程をパルスラジオリシス法により観測した。ナノ秒からマイクロ秒領域にかけて存在する過渡種が抽出剤の直接イオン化のみでなく、溶媒抽出時に希釈剤として用いられるドデカンイオン化によっても間接的に生成することを明らかにした。

キーワード: マイナーアクチノイド, 分離変換技術開発, 溶媒抽出, アミド系抽出剤, パルスラジオリシス

1. はじめに

高レベル放射性廃液に含まれる放射性元素のうち、半減期が長く、かつ毒性の高いマイナーアクチノイド(MA)を分離するために、MAと選択的に錯形成する抽出剤の開発が世界的に進められている。最たる課題は、MAと化学的な性質が近いレアアース(RE)との分離であり、原子力機構では図1に示すように、MA分離プロセスをMA・RE一括回収プロセス及びMA/RE相互分離プロセスの2つのプロセスに分け、それぞれのプロセスに適した抽出剤の開発を進めてきた。その結果、テトラオクチルジグリコールアミド(TODGA)やヘキサオクチルニトリロトリアセトアミド(HONTA)が、それぞれの目的に応じた優れた分離性能を有する抽出剤として見出されてきた(Y. Sasaki et al., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **44**, 405 (2007), Y. Sasaki et al., *Chem. Lett.*, **42**, 91 (2013))。

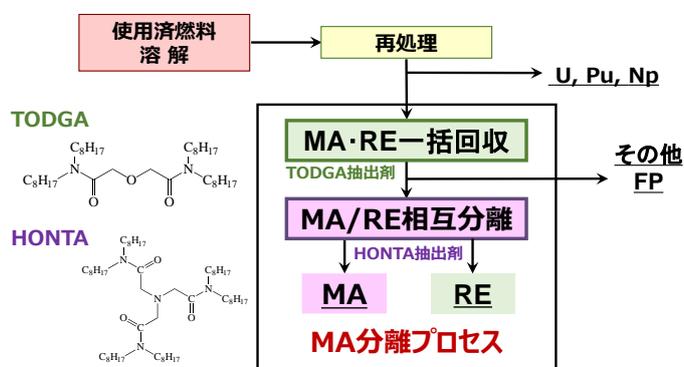


図1 MA分離プロセスの概要及びMA抽出剤

一方、溶媒抽出法に基づいた分離プロセスにおいて、抽出剤をドデカン等で希釈した有機溶媒は、MAや核分裂生成物(FP)から放出される放射線にさらされることになる。そのため、抽出剤には抽出性能と並んで、耐放射線性能が要求される。しかしながらこれまでに、抽出剤に対して放射線照射した際、抽出剤が分解することで抽出性能が劣化すること及び分解生成物の影響により有機溶媒や水のどちらにも溶解しない第三相を形成することが報告されている(J. Ravi et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **299**, 879 (2014))。放射線により抽出性能が劣化すること及び第三相を形成することは、溶媒抽出法の最大の利点である連続処理を困難にし、実用化に向けた大きな障壁となる。そこで本研究では、抽出剤が放射線分解に至るダイナミクス及びメカニズムを明らかにすることを目的に、放射線照射後ナノ秒からマイクロ秒における抽出剤の挙動をパルスラジオリシス法により調べた。

2. 実験

パルスラジオリシス実験では、東京大学大学院が有する線形加速器から供給される35 MeV電子線(パルス幅: 20 ns)を線源として、キセノンフラッシュランプを分析光源として用いた。測定試料として、無希釈のTODGAとHONTA (neat TODGA, neat HONTA), 及びそれらをそれぞれドデカンで希釈したものをを用いた。全ての試料はアルゴンガスを用いて脱気した。

3. 結果と考察

neat TODGA及びneat HONTAに対して電子線照射した際の過渡吸収スペクトルを図2に示す。それぞれのアミド系抽出剤において370及び400 nmにピークを持つ吸収帯が観測された。須郷らによるTODGAを対象とした先行研究(Y. Sugo et al., *Radiat. Phys. Chem.*, **76**, 794 (2007))においても、100 ns以内の時間領域で同様のスペクトルが観測されており、またカチオン生成溶媒であるジクロロメタン中で吸収が増加し、アニオン生成溶媒であるテトラヒドロフラン中では減少することから、この吸収帯はTODGAのラジカルカチオンであることを示唆している。一方、本実験で得られた過渡吸収スペクトルを特異値分解し、成分分析を行ったところ、TODGA及びHONTAのいずれにおいても、マイクロ秒領域まで存在する長寿命過渡種と100ナノ秒程度の寿命を持つ別の短寿命過渡種の2成分が存在することがわかった。

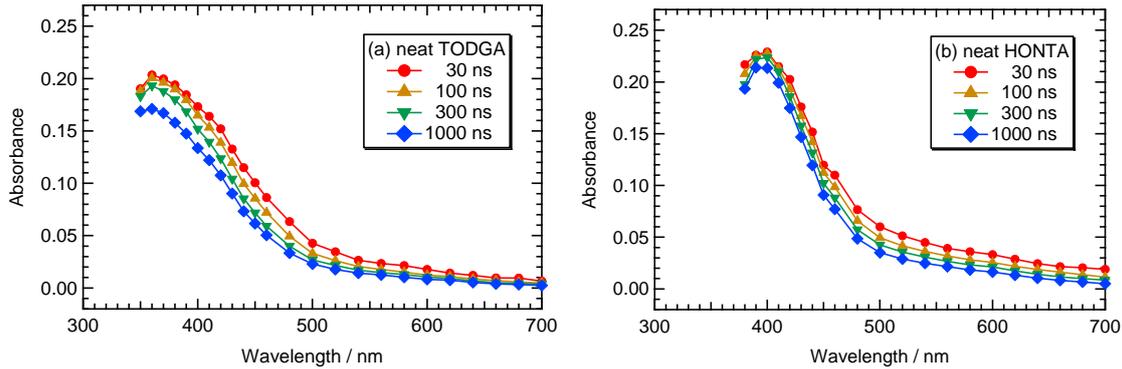


図2 (a) neat TODGA 及び (b) neat HONTA の過渡吸収スペクトル

マイクロ秒領域で観測した長寿命過渡種が、アミド系抽出剤のラジカルカチオンと電子のジェミネート再結合反応の生成物である可能性が考えられる。TODGA 及び HONTA の比誘電率(ϵ_r)を測定したところ、それぞれ 7.0 及び 6.7 であり、クーロンポテンシャルの観点から、再結合することは十分考えられる。そこで、このジェミネート再結合を検討するため、比誘電率がさらに低いドデカン($\epsilon_r = 2.0$)で HONTA を希釈した系において、電子捕捉剤である四塩化炭素 (CCl_4) を添加し、過渡吸収スペクトルへの影響を調べた。図 3 に、100 mM HONTA-ドデカン溶液及び 100 mM HONTA-100 mM CCl_4 -ドデカン溶液の 1 μs 後の吸収スペクトルを示す。四塩化炭素添加の有無によらず、neat HONTA で観測された長寿命過渡種と同一の吸収帯が観測された。さらに、この吸収帯の吸光度は CCl_4 の添加によって増加した。このことから、長寿命過渡種はジェミネート再結合による生成物ではないと考えられる。しかしながら観測された長寿命過渡種の同定には至らなかった。今後引き続き検討を続けていく。

図 4 にドデカン溶液中での TODGA の電子数割合に対する長寿命過渡種の吸収ピーク付近における吸光度変化を示す。電子数の割合に対する長寿命過渡種の吸光度は、線形的に増加せず、上に凸の曲線を示した。これは TODGA の直接イオン化から長寿命過渡種が生成したのみでなく、ドデカンのイオン化からの反応によっても同一の過渡種が生成したことを示唆している。MA 分離プロセスで用いるアミド系抽出剤のドデカン中での濃度はおよそ 100 mM 程度で、図 4 の電子数割合では 7.5 % であり、直接イオン化の寄与は 29 % と推定できる。このことから、実際のプロセスにおける抽出剤の分解にはドデカンのイオン化に起因する間接効果が主要であることを明らかにした。

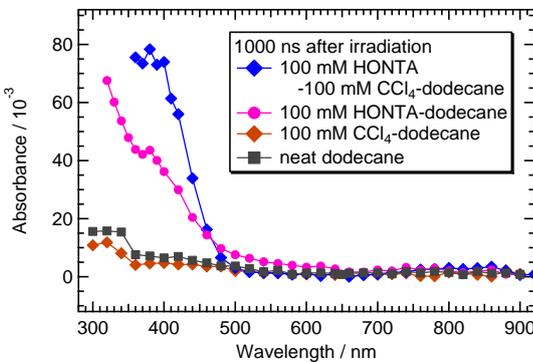


図3 照射後 1 μs 後の HONTA- CCl_4 -ドデカン溶液中の吸収スペクトル

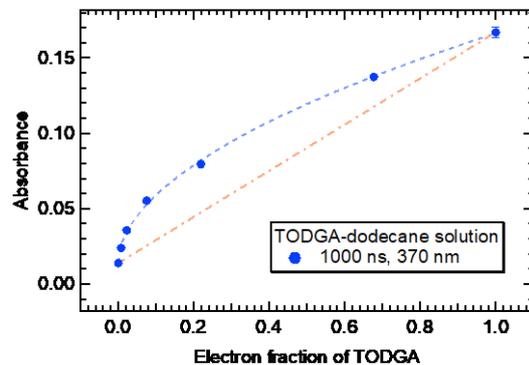


図4 TODGA-ドデカン溶液中の TODGA 電子数割合に対する長寿命過渡種の吸光度変化

4. まとめと今後の課題

アミド系抽出剤のパルスラジオリシス実験において、ナノ秒の寿命を持つラジカルカチオン及びマイクロ秒の寿命を持つ過渡種の 2 つの成分を観測した。そのうち、長寿命過渡種については同定には至っていないが、ラジカルカチオンと電子のジェミネート再結合によるプロダクトではないことを示唆する結果を得た。またこの過渡種は、アミド系抽出剤の直接イオン化によって生成するのみでなく、希釈剤であるドデカンのイオン化由来の反応によっても生成することがわかった。今後、長寿命過渡種の同定を試み、アミド系抽出剤の放射線分解経路に関する検討を進めていく。

成果リスト

なし

平成29年度共同利用テーマ一覧(Hシリーズ)

採番	テーマ名	研究テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-01	Bepi Colombo 水星探査機搭載用宇宙塵測定器の較正実験	小林 政則	小林 政則	神野 智史
29H-02	陽電子ビームを用いた照射下欠陥挙動のその場観察	土田 秀次	土田 秀次	神野 智史
<i>29H-03</i>	<i>火星衛星探査機MMX搭載用火星ダスト観測装置および超小型衛星搭載用流星ダスト観測装置の較正実験</i>	<i>小林 政則</i>	<i>小林 政則</i>	<i>神野 智史</i>
<i>29H-04</i>	<i>格子欠陥をプローブとしたその場観察と組み合わせ照射による照射欠陥の顕在化技術</i>	<i>関村 直人</i>	<i>村上 健太</i>	<i>村上 健太</i>
29H-05	原子力新材料及びモデル合金のイオン照射劣化試験	村上 健太	村上 健太	村上 健太
29H-06	低放射化フェライト鋼の照射下相安定性に関する研究	濱口 大	濱口 大	叶野 翔
29H-07	タングステンにおける欠陥による水素捕捉挙動に関する研究	関村 直人	小田 卓司	村上 健太
29H-08	Study on Physical Characteristic Changes of Neutron Damaged Tungsten for Fusion Plasma Facing Material	関村 直人	陳 東鉞	村上 健太
29H-09	先進原子炉構造材の照射効果	阿部 弘亨	YANG Huilong	叶野 翔
29H-10	原子炉構造材料の照射劣化機構の研究	藤井 克彦	藤井 克彦	叶野 翔
<i>29H-11</i>	<i>リアルタイム型トムソンパラボラ検出器の校正実験</i>	<i>神野 智史</i>	<i>神野 智史</i>	<i>神野 智史</i>
<i>29H-12</i>	<i>セラミックス被覆中の水素同位体透過挙動に他する重イオン照射効果</i>	<i>寺井 隆幸</i>	<i>近田 拓未</i>	<i>叶野 翔</i>
<i>29H-13</i>	<i>核融合材料の照射効果</i>	<i>阿部 弘亨</i>	<i>叶野 翔</i>	<i>叶野 翔</i>
29S-02	イオンビーム実習	叶野 翔	叶野 翔	叶野 翔

平成29年度のHシリーズは 14テーマ(Sシリーズ 1テーマ含む)。本年度から新規テーマは5件(斜体で示す)

**Probing Irradiation Defects by Using In-situ Observation and
Combined Irradiation Techniques**

関村 直人 村上 健太 陳 東鉞 阿部 弘亨 叶野 翔 楊 会龍

東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻

The growth and shrinkage of defect clusters, which reflect the diffusion of point defects, were investigated by in-situ transmission microscopy and combined irradiation techniques. The suppression of growing clusters on the lifetime of their neighboring black dots was observed in 400°C irradiation.

Keyword: Irradiation damage, in-situ TEM, defect clusters

1. Introduction

The microstructural evolution of materials under irradiation is a complicated process. Quite many models have been built up in recent years to try to predict microstructural evolution at various scales. However, comparable experimental data are desired to guide directions for the future improvements on modeling. Compared to neutron irradiation, it is much easier to tune the irradiation parameters in ion irradiation. This advantage of ion irradiation allows the design of combined irradiation. By using the state-of-art techniques of in-situ transmission electron microscopy (TEM), which is available at High-Fluence Irradiation Facility, the University of Tokyo (HIT), the evolution process of defect clusters can be observed during irradiation with high temporal resolution. In this work, the techniques of in-situ irradiation and combined irradiation was explored. The growth and shrinkage of defect clusters, which reflect the diffusion of point defects, were investigated.

2. Experimental method

To improve the quality of the specimen, quite extensive work was done through trial and error. In order to avoid large inner stress in the TEM specimen, focused ion beam (FIB) technique was selected for sample preparation. The FIB machine available at Tokai-campus is Hitachi FB-2100, which provides high-accuracy and high-speed fabrication.

First, a small specimen of roughly $10 \times 5 \times 2 \mu\text{m}$ was lifted out of a bulk alloy by FIB, and then was welded onto the edge of a $\Phi 3\text{mm}$ TEM semi-disk made of tungsten. The small specimen was then thinned to several hundreds of nanometers by FIB. Since FIB induces extra irradiation damage onto the surface of the specimen, the specimen needs to be gentle milled or electro-chemical polished to remove the damage layer. The final thickness of the prepared TEM specimen is usually 100~160nm, and the observable area under TEM with clear contrast is larger than $3 \times 1 \mu\text{m}$ in minimum. Before in-situ irradiation, the condition of the specimen was confirmed under TEM. And to reduce the gas released from the specimen during irradiation, the specimen was preserved in TEM chamber overnight before irradiation.

The TEM used for in-situ irradiation is JEOL JEM-2000FX. The intersection angle was 30° between the 2MeV Fe ion beam for irradiation and the 200keV electron beam for observation, which is a small value compared to the other in-situ facilities in the world. A Faraday cup was inserted into the TEM specimen chamber before and after irradiation, in order to detect the current of Fe ion beam at the exact position of TEM specimen. During irradiation, the beam profile of Fe ion was monitored by four Faraday cups at four corners near the specimen. The temperature control during irradiation was satisfying, because no vibration or drifting of the TEM specimen was observed except at the beginning of the irradiation. This was caused by beam heating, and is an acceptable phenomenon. Since the inner stress of the specimen was small and the temperature control was good, the TEM specimen well maintained its position and orientation during irradiation. Thank to this, it is much easier to obtain TEM images with high resolution and high quality.

3. Results and discussions

High purity 316L stainless steel model alloy (Fe-16.9Cr-13.0Ni-2.29Mo-1.00Mn-0Si) was irradiated to 0.2dpa at 300°C and 400°C separately, as shown in Fig. 1. The evolution of defect clusters was clearly observed by in-situ TEM under $g=\langle 111 \rangle$. Foil thickness was estimated by thickness fringes under different g vectors. The depth distribution of defect clusters along foil thickness direction was determined by stereo-imaging after irradiation. The thickness of surface denuded zone at each side of the TEM foil was roughly ~30nm for 400°C and ~20nm for 300°C. However, the surface denuded zone was not completely free of defect clusters.

Large loops co-existed with tiny black dots at 400°C, whereas at 300°C the defect clusters were all in the form of black dots. The nucleation rates and annihilation rates at different doses were recorded as irradiation proceeded. Immediately after the rapid nucleation at 400°C, the number density of defect clusters decreased. This was attributed to the growth of some defect clusters, which suppressed the lifetime of tiny black dots neighboring them. Since the growth of defect clusters was not distinct at 300°C, such phenomenon was not observed. Combined irradiation was performed first at 290°C to 0.8dpa, and was then followed by in-situ irradiation at 450°C. A fraction of black dots grew in size at the higher temperature, and caused the disappearance of their neighboring black dots.

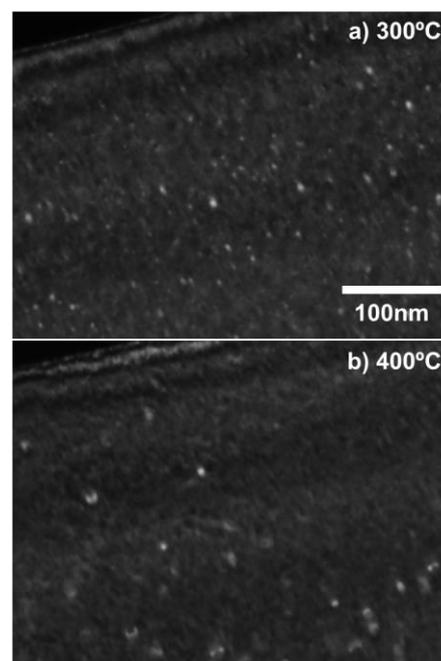


Fig. 1 Dark field image of stainless steel irradiated to 0.2dpa

4. Conclusions

In-situ irradiation and combined irradiation were successfully performed with high reliability using the HIT facility. High resolution TEM images were captured, and the evolution process of each defect cluster was tracked. The depth distribution profile along foil thickness direction was analyzed by stereo-imaging after irradiation, which allows the investigation of surface sink effects. Immediately after the rapid nucleation at 400°C, the number density of defect clusters decreased. This was attributed to the suppression of growing clusters on the lifetime of their neighboring black dots.

Achievement list

- [1] L. Chen, K. Nishida, K. Murakami, *et al.*, J Nucl Mater, **498** (2018).
- [2] D.Y. Chen, K. Murakami, K. Dohi, *et al.*, J Nucl Mater, **494** (2017).
- [3] D. Y. Chen, K. Murakami, H. Abe, *et al.*, Acta Materialia, under review.
- [4] D. Y. Chen, K. Murakami, L. Chen, *et al.*, Computer Simulation of Radiation Effects in Solids (COSIRES), 2018, Shanghai.
- [5] L. Chen, K. Nishida, K. Murakami, *et al.*, Computer Simulation of Radiation Effects in Solids (COSIRES), 2018, Shanghai.
- [6] K. Murakami, D. Y. Chen, L. Chen, *et al.*, Annual Meeting of Atomic Energy Society of Japan, 2018, Osaka.
- [7] D. Y. Chen, K. Murakami, H. Abe, N. Sekimura, Annual Meeting of The Japan Institute of Metals and Materials, 2018, Chiba.
- [8] L. Chen, K. Nishida, K. Dohi, *et al.*, 20th meeting of the International Group on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (IGRDM20), 2017, Spain.

低放射化フェライト鋼では、 $M_{23}C_6$ やMXに代表される析出物が機械的特性に大きく影響すると考えられている。その為、析出物の照射下における挙動、即ちその安定性の評価が照射による特性変化の予測において重要なポイントとなる。本研究では、イオン照射を用いた析出物を含む照射下での相安定性評価を目的とする。

キーワード： 低放射化フェライト鋼、イオン照射、析出物、照射下相安定性

1. はじめに

核融合原型炉の早期実現に要求されるブランケット構造材料開発のゴールは、照射特性に優れた材料の開発及びその材料を用いた信頼性の高い構造体の製作見通しである。F82H鋼やEurofer97鋼に代表される低放射化フェライト鋼は現在、使用温度や耐スエリング特性等の観点からブランケット構造材料の第一候補材となっているが、日本では日欧の合意に基づく幅広いアプローチ（BA）活動を通じて、更なる照射特性の向上を目指した改良鋼の開発が進められている。従って、今後はブランケットの設計活動に合せてこれら改良鋼の照射下特性評価が必須となっている。

低放射化フェライト鋼は、旧オーステナイト粒界やブロック境界等に含まれる $M_{23}C_6$ や主に母相中に生成するMX微小析出物が長時間強度特性に大きな影響を及ぼす可能性が指摘されており、F82H鋼の中性子照射による照射硬化の一因に、これら析出物の挙動が関わっていると考えられる。そこで本研究では、F82H鋼の標準材であるIEA材や、TaやN等の添加量が多くMX系析出物の析出形態がIEA材と異なるBA12材改良鋼を用いて、東京大学重照射研究設備（HIT）でのイオン照射試験による析出物の照射下安定性の評価を行った。

2. 実験方法

本研究では、HITのタンデム加速器を用いてFeイオン照射を行い、内部組織観察による析出物の相安定性評価を行った。材料は、量研機構より提供したF82H-IEA材と、改良鋼であるF82H-BA12材を用いた。イオン照射試験では一度の照射で出来るだけ多くの試料を照射する事を目的として幅1mm以下、長さ5mm、高さ2mm以下の短冊状試料を使用し、析出物の安定性評価はTEM内部組織観察により行った。

3. 結果と考察

本研究では主に、F82H-BA12材に対し1073Kにおいて1時間の焼鈍処理を施したものを試料として使用した。当該鋼の特徴としては、IEA材に比べTa濃度が高く、MX析出物による高温強度特性ないしは組織安定性の改善を意図して溶製されたものである。しかし、BA12材の受入れまま材では高密度の転位組織が存在し、析出物/母相界面での点欠陥の流れの評価が難しい事より、追加熱処理を施すことで転位密度を低減したものを試験対象材とした。照射試験はこの対象材に対し2.8MeVの Fe^{2+} を用いて、300°Cにおいて10dpaまで行った。図1にSRIMを用いた照射欠陥分布の計算結果を示す。Feの弾き出し閾エネルギーは40eVとして照射量を算出した。これより、本照射条件におけるDPAの最大値は試料表面から1.2 μm の位置にあることが分かる。また、鉄イオンの注入量のピークは1.4 μm 近傍にあり、最大で0.04at.%の組成変化が生じることも明らかとなった。照射後はTEMによる内部組織観察用の薄膜短冊状試料を、FIBを用いて照射試料表面よりリフトアウトし作成した。図2に10dpa照射材の断面TEM写真を示す。SRIM計算結果のピーク部付近において平均サイズ2-3nm程度の欠陥クラスタまたは転位ループが確認された。図3に同試料における照射領域の明視野像

(BF) と暗視野像 (DF) を示す。結晶粒界上には 100 nm 程度の粗大な析出物が形成しており、これらは $M_{23}C_6$ 析出物であると考えられるが、結晶粒内に見られる 20–30 nm 程度の微細析出物は MX 析出物であると考えられる。また、暗視野像は図中の電子線回折像の破線で囲んだ回折点から結像したものであるが、これらの析出物は高いコントラストが得られている事より、当該照射条件において結晶構造を維持していることが明らかとなった。しかし、以前の研究では 300°C において 6.4 MeV の Fe イオン照射した F82H-IEA 材において $M_{23}C_6$ の非晶質化が確認されている事より [1]、析出物の非晶質化現象に入射粒子のエネルギーが影響していると考え、SRIM を用いて 2.8 MeV と 6.4 MeV の Fe イオン照射時のイオン化エネルギーの深さ依存性を評価した。その結果、両条件共にイオン化エネルギーは試料表面で最も高く、試料内部に行くほど低下し、最終的にイオン飛程近傍でゼロとなる事が明らかとなった。更に、先行研究における $M_{23}C_6$ の非晶質化は全照射領域で観察されている事より、本試験条件においても $M_{23}C_6$ の非晶質化に必要なエネルギーは付与されていると考えられる。従って、 $M_{23}C_6$ の非晶質化の発現の有無については、本研究で実施した追加熱処理に依存している可能性があり、今後熱処理条件も含め再検証する予定である。

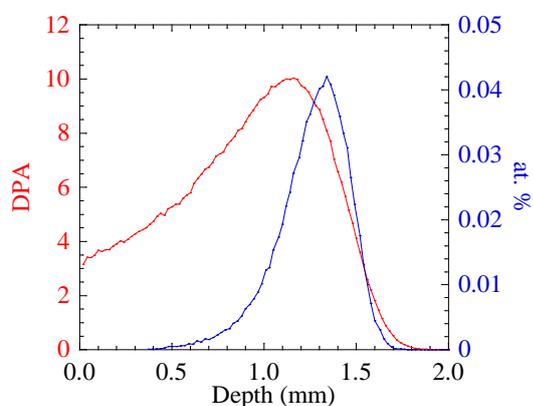


図 1. SRIM を用いた照射欠陥分布の計算結果。

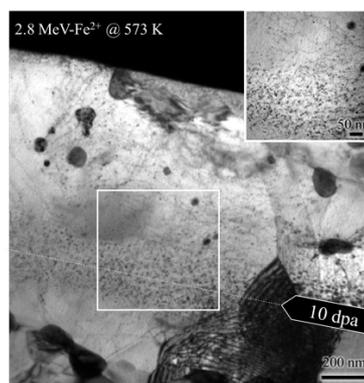


図 2. 10dpa 照射材の断面 TEM 写真。

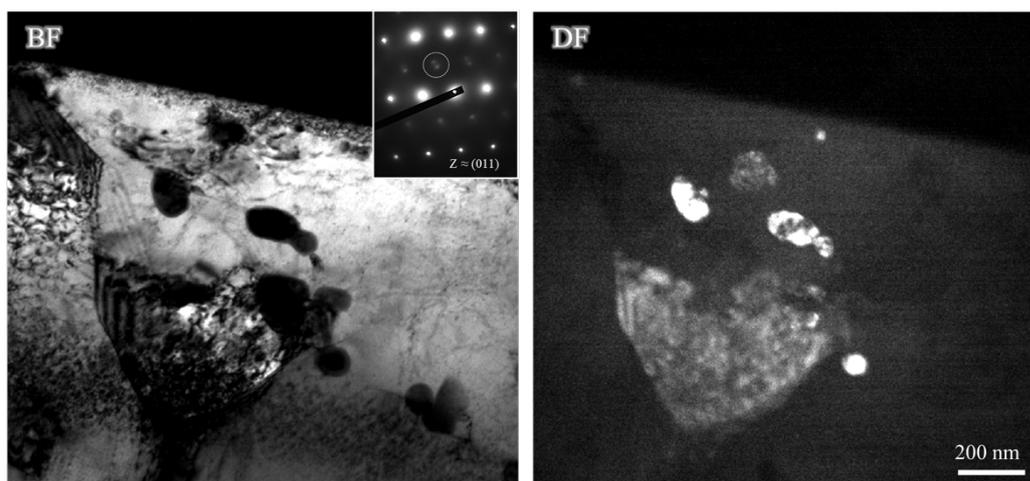


図 3. 照射領域で観察された析出物の明視野像 (BF) 及び暗視野像 (DF)。暗視野像は図中の制限視野回折像の破線で囲んだ回折点より結像した。

[1] H. Tanigawa, et.al., J. Nucl. Mater., 367-370 (2007) 132-136

Abstract

Enhancement of retention in tungsten due to 2.8 MeV W^{2+} ion-induced cascade damage with deuterium agglomeration was investigated by using HIT (High fluence Irradiation facility, university of Tokyo) and SNU-TDS (Thermal Desorption Spectroscopy) in Seoul National University. Undamaged tungsten showed intrinsic retention property dominated by vacancy and dislocation trapping and the tungsten damaged by W^{2+} ions has the difference of TDS spectrum due to the defect clustering formation which increases the deuterium retention. It may increase the fuel retention with operation due to the self-ion (W ion) damage on tungsten.

キーワード : Tungsten, Retention, Defect, TDS, Plasma-wall interaction

1. Introduction

Tritium retention which has safety limit in tungsten during ITER operation draws attention because the material damage causes the retention increase with operation. In this study, we tried to reveal that the self-ion damage in tungsten increases the amount of retention [1] by experimental studies to figure out the mechanism of it. The cascade damage affects the retention and it can expect long-term retention to determine the design rule or operation scenario regarding to the safety limit. In a real situation, most of cascade damage on PFM (Plasma Facing Materials) would be expected by the self-ion (sputtered W atom) and the defect clustering is generated from the agglomeration of defect due to deuterium gas concentration. Thus, in here, the self-ion induced damages on tungsten is simulated by using the heavy ion of W^{2+} in HIT and then relatively low energy deuterium irradiated and retention property was examined by using SNU-TDS. This collaboration work expects to reveal the cascade damage and deuterium gas concentration effect on the retention.

2. Methods

Tungsten ion irradiation to tungsten was carried out by using HIT and the deuterium ion irradiation and the retention property analysis were done by using SNU-ECR (Electron Cyclotron Resonance) and SNU-TDS (Thermal Desorption Spectroscopy) in Seoul National University. Before the experiment was done, SRIM simulation was used to calculate damage depth profiles, obtaining the damage depth profiles for 2.8 MeV W^{2+} ion irradiation which is HIT irradiation condition. The damage in dpa level is estimated as 0.7 dpa from the W ion current data measured with Faraday cups. Then the specimen is introduced to SNU-ECR. The SNU-ECR system is the source of deuterium plasma using ECR at an ion energy of 100 eV/ D_2^+ and ion flux of 2.8×10^{21} D_2^+ /m²s. The SNU-TDS system in the Plasma Application Laboratory of Seoul National University consists of a linear heating furnace (varying capability 0.1 - 1 K/s), a high vacuum chamber ($\sim 10^{-7}$ Torr), a quartz tube to minimize the outgassing effect, and a residual gas analyzer (RGA: XT300, Extorr). The TDS heating rate (β) is 1 K/s, so the Readhead approximation was adapted based on our previous work [2], which is relevant to the Kissinger equation, in the analysis of the desorption energy from the TDS spectra. The approximation provides a low error rate of < 1.5% when $10^8 < \nu/\beta < 10^{13}$ K⁻¹, where ν is the Debye frequency and the desorption property was analyzed by using the approximation. The expected TDS peak temperature from this model is summarized in Table 1.

$$\Delta E_{des} = RT_p \left[\ln \left(\frac{\nu_1 T_p}{\beta} \right) - 3.64 \right] \quad (1)$$

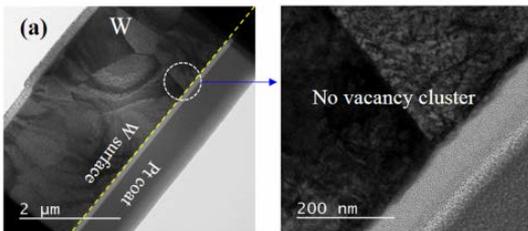
Table 1. Theoretical and literature value of expected TDS peak temperature for each defect trapping.

E_{des} [eV]	E_s [eV]	T_p (Error range) [K]
0.75-0.95	0.35-55 (dislocation)	350-550 K, Literature
1.83	1.43 (vacancy)	616 (566-666), Theory
2.34	1.94 (cluster, cavity)	796 (746-846), Theory

3. Results and Discussion

(Concrete results such as quantitative number and figure is easily explained in the paper which is at list of achievement 2.) The TDS spectra was obtained with temperature for the different damage species from 0 dpa and 0.7 dpa which compared to the theoretically expected peak temperature for each defect type. From the 0 dpa, undamaged tungsten showed typical spectrum which had an intrinsic dislocation-induced trapping peak and oversaturation-induced vacancy trapping peak. In comparison, 0.7 dpa-damaged tungsten had new peak which means new trapping source in tungsten. From the results of TEM and SIMS, we could expect it as defect cluster and also from the TDS results. It could be estimated that defect cluster was generated from the deuterium concentration-induced defect agglomeration. Also, total amount of retention increased for 0.7 dpa-damaged tungsten as several times than undamaged tungsten.

Self ion irradiated PCW (v)



Both-ions irradiated PCW (v): Self ion (W²⁺) + D ion (D₂⁺)

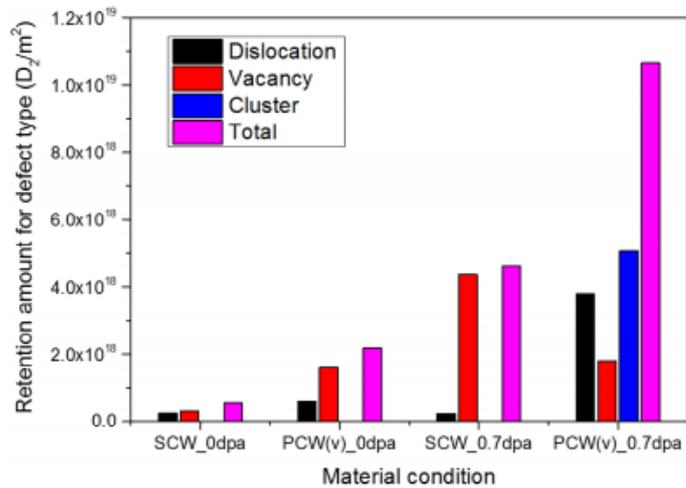
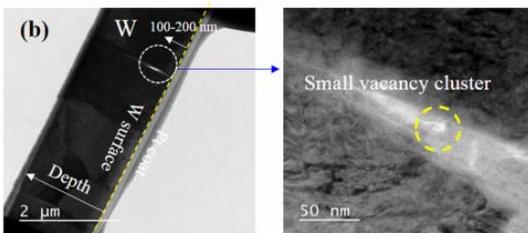


Figure 1. (left) Low magnification TEM images of PCW (v): (a) PCW (v)_W, and (b) PCW (v)_W + D. (right) The total amount of retention for undamaged SCW, undamaged PCW (v), PCW (v)_W + D and SCW_W + D. Each bar indicates the quantitative contribution of the defect types approximated by the peak area after TDS peak deconvolution.

4. Summary and future works

In poly-tungsten, the enhancement in retention with both cascade damage and deuterium plasma irradiation was investigated experimentally. The irradiated deuterium agglomerated to the immobile defect loop generated by W²⁺ ion irradiation and the defect clustering generated from the agglomeration. The low energy of deuterium could enhance the retention in the condition of pre-irradiated high energy of W ion. For HIT experiment in 2017, investigation of the thermal effect in the generation of defect clustering in the presence of cascade damage.

Reference

[1] O.V. Ogorodnikova et al., Journal of Nuclear Materials 415 (2011) S661–S666
 [2] Y. Jin et al., J. Korean Phys. Soc. 69.4 (2016) 518-524

List of achievement

- 1) Younggil Jin et al., Development of Hydrogen Retention Model based on Plasma-Material Interaction Analysis, KSTAR Conference, Feb. 2018
- 2) Younggil Jin et al., Enhancement of Deuterium Retention in Damaged Tungsten by Plasma-induced Defect Clustering, Nuclear Fusion 57.12, (2017): 126042.

29H-09

先進原子炉構造材の照射効果

研究代表者 阿部 弘亨

共著者氏名 楊 会龍、叶野 翔、John McGrady

所属研究機関名 東京大学大学院 原子力専攻

次世代軽水炉燃料被覆管材料 (Zr-Nb 合金) におけるイオン照射誘起硬化効果の結晶方位依存性を評価した。

キーワード： 燃料被覆管; Zr-Nb 合金; イオン照射; 照射硬化

1. はじめに

燃料被覆管は実機環境に高温、中性子照射等の極限環境下で使用され、中性子照射によって高密度の照射欠陥が形成されることによって、照射硬化/照射脆化を生じる。これまでに本研究グループは、高エネルギーイオン照射により 3.1dpa 程度した Zr-1.8Nb 合金において >100 MPa の降伏強度の増加を確認し、さらに、この微細組織学的評価から、機械特性変化と関連付けた機構解明を進めている。また、当該材料は照射成長を抑制するため、製管加工時にピルガー圧延を施工し、異方性を有した微細組織特徴を有しており、これに依存した機械特性を示す。しかし、この結晶異方性と照射硬化との関係について十分に理解されておらず、本研究では、Zr-Nb 系合金に対して高温イオン照射を実施し、照射硬化の結晶組織異方性について評価を行った。

2. 実験方法

アーク熔解により Zr-0.2Nb (wt.%) の二元合金を作製し、その後、冷間圧延と焼鈍処理を行い、再結晶材料を準備した。また、試料は $\phi 3\text{mm}$ ディスク状に機械加工し、加工組織を除去するため電解研磨を実施し、鏡面組織を得た。照射試験は東京大学重照射管理施設の 1.7 MV タンデトロン加速器を用い、3MeV-Zr²⁺を 573 K で照射し、0.1、0.2 dpa の損傷を導入した。照射試験後、押し込み深さ一定 ($d=150\text{ nm}$) 条件においてナノ硬度試験機を実施し、照射硬化量を評価した。その後、硬さ試験領域の電子後方散乱回折 (EBSD) を実施し、各硬さ試験データと結晶面情報を相関付けて整理した。

3. 結果

図1に未照射材の EBSD 結果を示す。イメージクオリティー像 (IQ) より、ナノ硬度試験によって生じた圧痕組織が確認され、逆曲点図 (IPF) からは、各結晶粒の面方位が識別される。また、図2には未照射材における硬さ

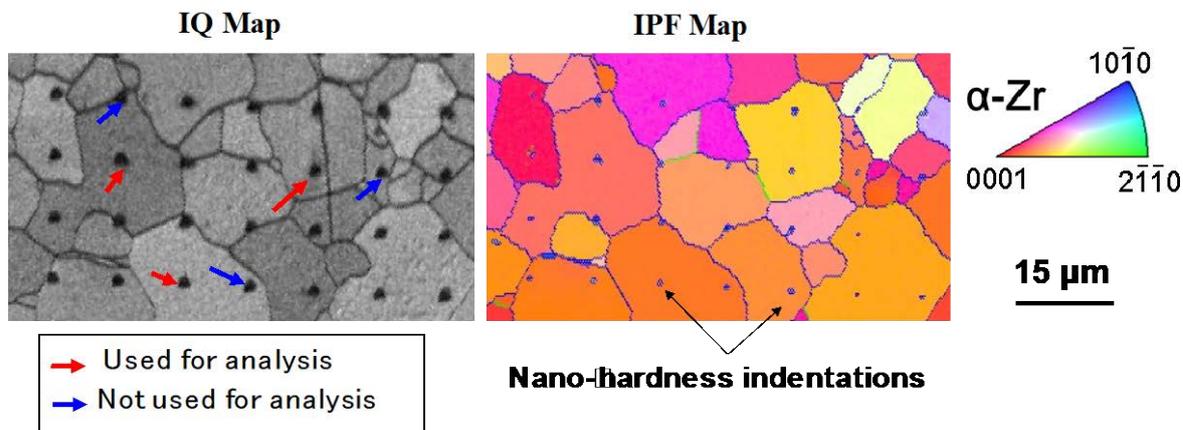


図1 未照射材の EBSD 測定結果

のバラつきと結晶組織との関係をまとめて示す。これより、結晶粒界部での硬さは結晶粒内のものよりも高い値を示した。また、[0001]方向からナノ硬度試験結果に比べ、 $[10\bar{1}0]$ および $[11\bar{2}0]$ 方位からの硬度が低く、試験方位が[0001]から $[10\bar{1}0]$ および $[11\bar{2}0]$ に変化することで、ナノ硬度が連続的に低下することが分かった。これらより、当該試験方法を適応することによって、ナノ硬度の結晶方位依存性を評価出来ることが分かった。

未照射試料の平均硬さは 2.36 ± 0.42 GPaであり、0.1 および 0.2-dpa 照射材の硬さはそれぞれ 3.19 ± 0.42 および 3.20 ± 0.45 GPaであった。さらに、照射材においても未照射材で確認されたナノ硬度の結晶方位依存性が確認され、また、照射硬化量は[0001]方向からのナノ硬度試験で最も小さく、一方で、[0001]方向から約 55° 傾いた方向からの試験の際に最も大きな照射硬化を示すことが分かった。

4. まとめと今後の予定

Zr-Nb 系合金における照射硬化の結晶方位依存性を評価するため、高温でイオンを行い、その後、ナノ硬度試験と EBSD を駆使した評価を実施した。その結果、照射の有無に関わらずナノ硬度の結晶方位依存性を確認し、また、結晶方位が[0001]から $[10\bar{1}0]$ および $[11\bar{2}0]$ に変化することで、硬さが徐々に低下することが分かった。さらに、照射硬化量は[0001]周辺で最も小さく、[0001]から 55° 傾いた方向からの試験の際に最も大きな照射硬化を示すことを明らかにした。今後は、高照射量領域における硬さの結晶方位依存性の評価を進め、機構論的な解釈を進める計画としている。

成果リスト

[1] H.L. Yang, S. Kano, J.J. Shen, Z.S. Zhao, J. McGrady, D.Y. Chen, H. Abe. Orientation dependence of ion irradiation-induced hardening in Zr alloys. 2018 年春の学会、日本金属学会、千葉工業大学。

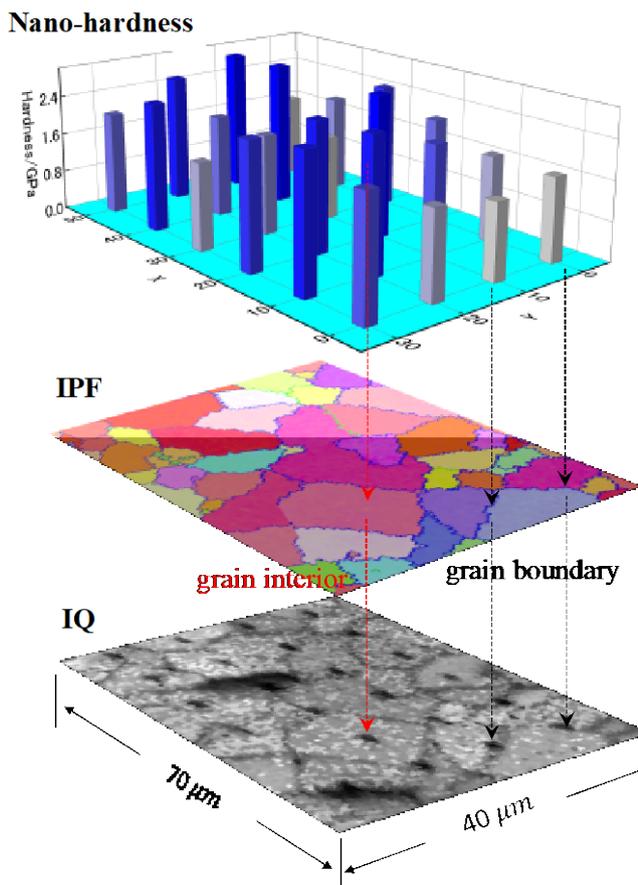


図2 未照射材における結晶方位と硬さ関係

レーザー加速イオンの高精度計測という観点から、イオン種、価数、エネルギーを弁別して評価することは、加速メカニズムの解明やイオンビームの品質向上に貢献する。それらのデータをリアルタイムで計測できるトムソンパラボラ検出器の校正データ取得を目的として、重照射研究設備内のタンデトロン加速器を使用した。

キーワード： トムソンパラボラ検出器、レーザー駆動イオン加速、固体飛跡検出器、CR-39

1. はじめに

高強度レーザーを用いたイオン加速は、従来型加速器に取って代わる未来の加速器として注目を集めており、レーザー装置の発展とともに発生するイオンのエネルギーも増加している。一般的にはイオンにのみに感度があるCR-39が使用されるが、実験条件毎にエッチングや計数処理をオフラインで行わなければならない、解析に時間がかかるため、イオン加速研究の進展の妨げとなっていた。そこで、我々は、実験条件を次々と変えてイオン加速の最適条件を迅速に探索できるように、イオン検出部に蛍光板付きMCPを用いて、オンラインでイオン種とエネルギースペ

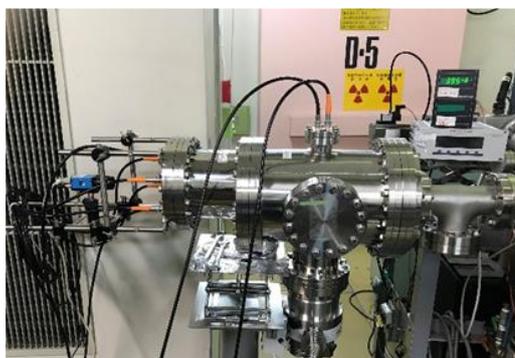


図1 リアルタイム型トムソンパラボラ

クトルを取得可能なトムソンパラボラスペクトロメータを開発した。本研究では、さらなる高精度化を行うため、重照射研究設備内のタンデトロン加速器を用いて、校正データ取得を目的とした実験を行った。

2. 方法

リアルタイム型トムソンパラボラ検出器は、磁場と電場によりイオンを質量電荷比およびエネルギーで弁別し、蛍光板付MCPにより2次元画像化し、CCDカメラでデジタルデータとして記録することができる。タンデトロンにより、イオン種とエネルギーを制御することで、校正データを得る。また、固体飛跡検出器CR-39をMCPの代わりに設置することにより、校正結果のダブルチェックをおこなう。リアルタイム型トムソンパラボラ検出器は、量研機構関西研から持ち込み、東京大学重照射研究設備（HIT）のタンデトロン加速器BL5の下流に接続して実験を行った。持ち込み機器としては、トムソンパラボラ、真空チャンバー、蛍光板付MCP、CCDカメラ、真空排気装置、高電圧電源などである。また、比較として、神戸大学タンデム加速器5SDH2の直進ポートにてイオンを弁別せずに分析を行った。イオンを照射したCR-39に対するエッチング処理および顕微鏡観察は、量研機構関西研にて行った。

3. 結果と考察

HITのタンデム加速器のターミナル電圧1.0 MVにおいて酸素イオンを加速し、1, 2, 3, 4 価の酸素イオンそれぞれについて、トムソンパラボラの電極にかかる電圧を変化させながら蛍光板上に映る画像を取得した（図2）。電圧変化に対して追従して変化することから、観測されている画像はイオンであることが確かめられた。全ての画像において、低エネルギー側に尾を引いた幅の太い像となり、価数とエネルギーの弁別は困難であった。この原因

として、トムソンパラボラのアライメントを確認する方法がなかったことから、アライメントがずれていた可能性が考えられる。エネルギーの広がり、イオンが電極などで反射してエネルギーを失ったことにより生じたと考えられる。

そこで、神戸大学所有のタンデム加速器 5SDH2 を用いて同様の実験を行った。5SDH2 を用いた実験では酸素と陽子線について分析を行った。酸素に関してはターミナル電圧 1.0 MV と 1.5 MV において計測を行い、価数ごとに異なる軌跡を描いていることが蛍光板上で確認できた。また、陽子線はターミナル電圧 0.5, 1.0, 1.5 MV において計測を行った。蛍光板上には理論的に求められる位置に照射エネルギーの軌跡が確認できた。

次に照射体系を維持したまま検出器を CR-39 に交換し、ターミナル電圧 1.5 MV において陽子線の照射を

行った。量研機構関西研にて KOH 溶液によるエッチング処理と高速顕微鏡によるエッチピット観察を行った結果、エッチピット密度の高い領域が確認された。エッチピットの半径はイオンの入射エネルギーに依存するため、過去に行われた陽子線エッチピットの校正データからエッチピット半径を比較したところ、密度の高い領域における陽子線の入射エネルギーは 2~3 MeV 付近であることが分かった。これは加速器の照射エネルギーにおおよそ等しい。また、蛍光板付 MCP で得られた結果と比較したところ、2~3 MeV 付近では陽子線の入射位置についてほぼ一致していることが確認できた。しかし、図 3 に見られるエッチピットの軌跡において、低エネルギー側になるにつれ、理論的に見積られるエネルギーとのずれが大きくなり、0.5 MeV 以上の差異が見られる箇所もあった。この原因として、エッチピットから陽子線の照射エネルギーを導出した際に用いた陽子線エッチピットの校正データが不十分であった点や、磁石の漏れ磁場が考慮されていなかったことが挙げられる。

図 2 O^{q+} (q=1~4)イオンの各偏向電圧に対する検出画像

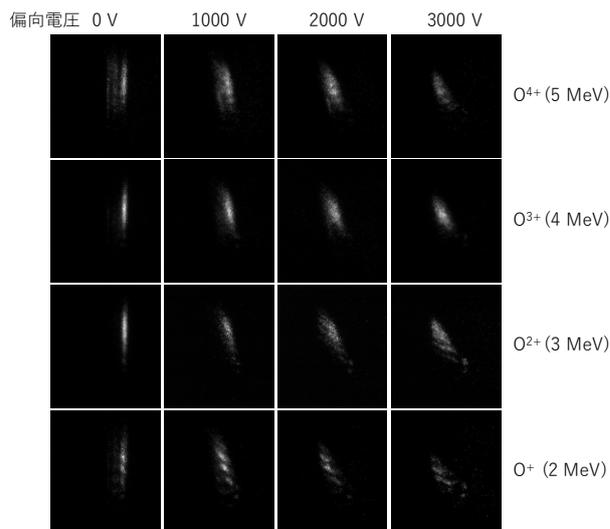


図 2 O^{q+} (q=1~4)イオンの各偏向電圧に対する検出画像

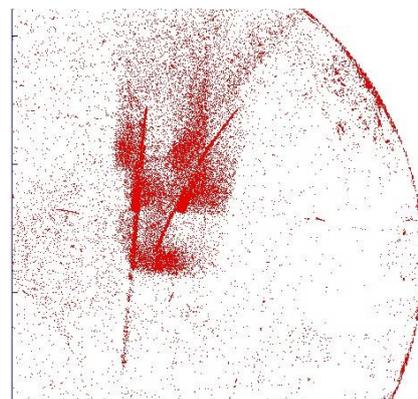


図 3 陽子線のエッチピット

4. まとめと今後の予定

今回行った校正実験では、トムソンパラボラ検出器に入射したイオンは磁場と電場によりおおよそ理論的に求められる位置に偏向されていることが確認できた。東京大学 HIT と神戸大学 5SDH2 で行った実験の大きな違いは、HIT ではイオンを弁別して、単色のエネルギーのイオン検出を狙ったのに対して、5SDH2 ではタンデム加速器から飛来する粒子を弁別せず、中性粒子を含めて検出したことにある。今回の結果を受けて、装置のアライメントをより容易に行う方法が必要であることを実感した。今後は低エネルギー側に対しては、精度を高めるために磁場シミュレーションを行い、引き続き加速器を用いた校正実験により高精度化をはかり、高エネルギー側に対しては、より測定範囲を広げる改良を行う予定でいる。

セラミックス被覆中の水素同位体透過挙動に関する 重イオン照射効果

寺井隆幸¹、叶野翔¹、近田拓未²、藤田光¹、堀越清良²、望月惇平²、松永萌暉²

¹ 東京大学大学院工学系研究科、² 静岡大学大学院総合科学技術研究科

核融合炉におけるトリチウム透過低減被覆として研究が進められている酸化イットリウム被覆に対して、タンデム加速器で鉄イオン照射を行った。照射後の顕微鏡観察から、損傷量に伴いアモルファス層やボイドの生成など、顕著な微細構造変化が認められた。

キーワード： トリチウム、透過、被覆、セラミックス、照射

1. 緒言

次世代エネルギー源として研究が進められている D-T 核融合炉では、燃料として重水素および放射性同位体であるトリチウムを用いる。これらの水素同位体は、高温下において金属中を著しく速く拡散することが知られており、構造材料からの透過漏洩による周辺環境の汚染や燃料効率の低下が懸念されている。そこで構造材料に水素同位体透過を抑制するための被覆を施すことが検討され、これまでに研究代表者らは酸化エルビウム (Er_2O_3)、酸化イットリウム (Y_2O_3)、酸化ジルコニウム (ZrO_2) 等のセラミックス被覆が優れた水素同位体透過低減性能を有することを示し、また被覆中の詳細な水素同位体透過機構を明らかにしてきた。近年では、被覆に対する照射効果の研究が開始され、重イオン照射による被覆の微細構造や重水素透過挙動の変化が調べられている。しかし、先行研究で被覆に導入された損傷密度は最大 1 dpa 程度であり、実機で想定されるより大きな損傷密度での照射効果の解明は必要不可欠である。そこで本研究では、比較的良好な放射化特性を有する Y_2O_3 被覆試料に対して、中性子照射による損傷を模擬するため東京大学重照射設備 HIT を利用した鉄イオン照射試験を実施し、その後の微細構造分析を通して、セラミックス被覆に対する照射効果を解明することを目的とする。

2. 実験方法

低放射化フェライト/マルテンサイト鋼 F82H 平板 ($25 \times 25 \times 0.5 \text{ mm}^3$) 上に、マグネトロンスパッタリング法にて膜厚 650 nm 程度の Y_2O_3 被覆を非加熱状態で蒸着した。その後、被覆の粒成長及び結晶化を促進するために、高真空下 ($< 10^{-5} \text{ Pa}$) で 600°C 、24 時間の熱処理を実施した。この被覆試料に対して、1.0 MeV の Fe^{2+} を室温および 500°C の温度条件で損傷密度が最大 20 dpa となるまで照射した。損傷密度の計算には SRIM コードを用いた。照射後の被覆試料に対して、透過型電子顕微鏡 (TEM) による微細構造分析を実施した。

3. 結果と考察

図 1 に SRIM コードで計算した Y_2O_3 被覆中の損傷密度の深さ分布を示す。1.0 MeV の鉄イオン照射では 500 nm 付近の層が最も大きな損傷を受けることが分かった。次に図 2 に非照射および室温下で各損傷密度まで照射した Y_2O_3 被覆試料の断面 TEM 像を示す。照射前は被覆全体が均質な結晶構造を有し

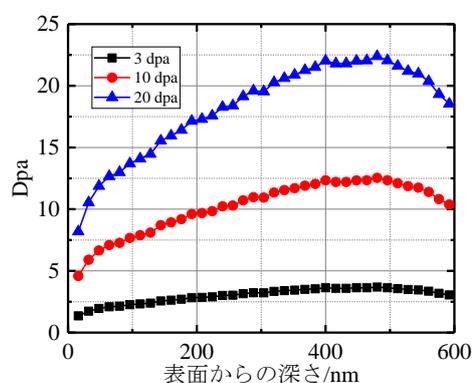


図 1 Y_2O_3 被覆における損傷密度深さ分布

ており、深さによる結晶構造の差はみられなかった。しかし照射後の微細構造分析から、全ての照射試料で被覆と基板の界面付近に厚さ 100 nm 程度のアモルファス層が形成していることが明らかとなった。損傷密度が 3 dpa となるまで照射した試料では、アモルファス層以外の領域に多数のボイドが観察された。10 dpa まで照射した試料ではアモルファス層の上に結晶粒が緻密に存在する層が確認され、この層中ではほとんどボイドが確認されなかった。一方で、表面付近では比較的大きなボイドが多数確認された。20 dpa まで照射した試料においても、同様の結晶構造が観察された。表面付近の層は損傷の導入速度が小さく、照射欠陥の回復速度を下回るため、照射による有意な構造変化が見られなかったと考えられる。一方、被覆-基板界面付近は損傷の導入速度が大きく、回復速度を上回るため、アモルファス層が形成されたと考えられる。

中間層については、損傷速度と回復速度が拮抗しており、結晶粒は比較的小さい領域であるとみられる。そのため、損傷密度の増大に伴って被覆に対するエネルギー付与が増加し、照射誘起粒成長が進行したと考えられる。粒成長によって結晶粒径が増大、さらに層が緻密化し、ボイド等の照射欠陥は表面付近の層やアモルファス層に移動もしくは消失したと考えられる。以上の結果から、室温下での重イオン照射による被覆の構造変化は損傷密度に依存することが示唆された。

次に、室温および 500 °C で損傷密度が 10 dpa となるまで照射した被覆試料の断面 TEM 像を図 3 に示す。室温で照射した試料に比べ、500 °C で照射した試料はボイドの数が少なく、またアモルファス層の形成は確認されなかった。さらに被覆全体で結晶粒の成長が進行していることから、高温下での照射中に欠陥回復や粒成長および結晶化が促進されることが示された。

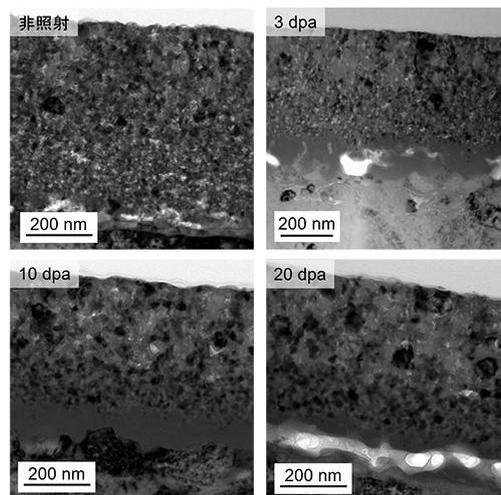


図 2 非照射および室温下で鉄イオン照射した Y_2O_3 被覆試料の断面 TEM 像

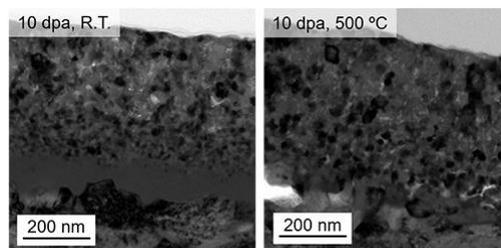


図 3 室温および 500 °C で 10 dpa まで照射した Y_2O_3 被覆試料の断面 TEM 像

成果リスト

- [1] T. Chikada et al., “Deuterium permeation behavior and its iron-ion irradiation effect in yttrium oxide coating deposited by magnetron sputtering”, 18th International Conference on Fusion Reactor Materials, invited presentation, Aomori, Japan (2017).
- [2] T. Chikada, “Potential of smart coating for advanced energy systems”, 2017 Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition, keynote lecture, Cancun, Mexico (2017).

29H-13

核融合炉材料の照射効果

研究代表者 阿部 弘亨

共著者氏名 叶野 翔、楊 会龍、John McGrady

所属研究機関名 東京大学大学院 原子力専攻

核融合炉構造材料（F82H 鋼）中における $M_{23}C_6$ 析出物の高温イオン照射下における相安定性を評価した。

キーワード： 核融合; 低放射化フェライト鋼; イオン照射;

1. はじめに

F82H 鋼は核融合炉構造材料の候補材料である。当該材料は $M_{23}C_6$ と MX の 2 種類の析出物による組織制御によって析出強化ならびに耐クリープ特性の改善が図られている。しかし、近年の研究結果では、時効影響が見え難い温度領域での照射により、析出物が不安定化し、消失ないし非晶質化する現象が報告されている。そこで、これまでに本研究グループでは、電子線照射下における MX 析出物の相安定性について、構成元素のはじき出し現象と格子欠陥の拡散モデルに基づいた不安定化機構を提案した。また、 $M_{23}C_6$ 析出物については照射温度に応じて不安定化挙動が大きくことなることを明らかにした。これらの評価では、フレンケル対による損傷モードであったが、実炉環境下ではカスケード損傷により微細組織や機械特性の変化が生じるため、当該条件下での析出物の不安定化挙動についても評価を進める必要がある。これらより、本研究では、イオン加速器を用いて F82H 鋼にカスケード損傷を導入し、当該条件下におけるの微細析出物の相安定性について評価を行った。

2. 実験方法

供試材として F82H-BA12 鋼を使用した。当該材料を 1073K において 1 時間の焼鈍処理を施し、これらをイオン照射に供した。照射試験は東京大学所有の 1.7 MV タンデトロン加速器を使用し、2.8MeV- Fe^{2+} を 573 K において 10 dpa まで照射した。照射による微細組織発達を評価するため、FIB を用いた TEM 試料のリフトアウト、薄片化を行い、その後、FIB による加工層を除去するために低エネルギーイオンスパッタリングを行った。

3. 結果

図 1 に 10 dpa 照射材の縦断面 TEM 観察結果を示す。なお、イオン飛程部（図中に破線で示した）付近の拡大図を写真の右肩部に示した。イオン飛程部では、平均サイズは 2–3 nm 程度の欠陥クラスターならびに転位ループが確認された。また、同試料の照射領域中の微細析出物の明視野像と暗視野像を図 2 に示す。なお、明視野像の右肩部に観察領域からの電子線回折図形を示しており、暗視野像は電子線回折図形中の破線箇所から結像した。これらより、明視野像において結晶粒界上に 100

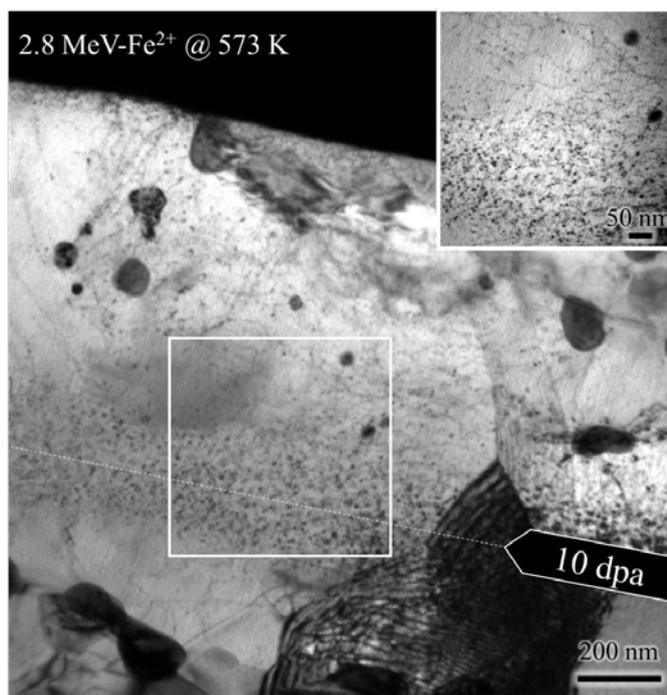


図 1 照射材の TEM 観察結果

nm 程度の粗大な $M_{23}C_6$ が確認され、一方で、結晶粒内に 20–30 nm 程度の微細な MX が確認された。また、暗視野像では、これらの析出物の形成箇所を高コントラスト域が確認された。これより、当該照射条件下において析出物は結晶構造を維持していることが分かった。先行研究結果より、573 K において 6.4 MeV- Fe^{3+} イオン照射材において、照射領域中に存在する $M_{23}C_6$ の非晶質化がすることが報告されている。析出物のアモルファス化に起因する照射影響としては、損傷速度や照射量、イオンエネルギー等が考えられ、先行研究では、損傷速度について記載がなく、その影響度を評価できないものの、本研究の損傷速度に対し、1.0-0.2 倍程度で、損傷速度については概ね同程度と考えられる。また、照射量ならびにイオンエネルギーについては、本照射条件においても析出物アモルファス化が生じ得る条件であることから、本研究において $M_{23}C_6$ の非晶質化が発現しなかった要因としては、本試験で実施した追加熱処理により、 $M_{23}C_6$ ならびに母相組織の化学組成が変化し、これにより、照射下において析出物の安定性が増加したと推測される。

4. まとめ

F82H 鋼中における微細析出物の高温カスケード損傷下における相安定性を評価するため、イオン加速器を用いた照射実験を行った。照射領域中で 2-3 nm 程度の転位ループ組織が確認された。また、照射領域中に存在する微細析出物は結晶構造を有しており、先行研究で報告された析出物のアモルファス化現象は確認されなかった。

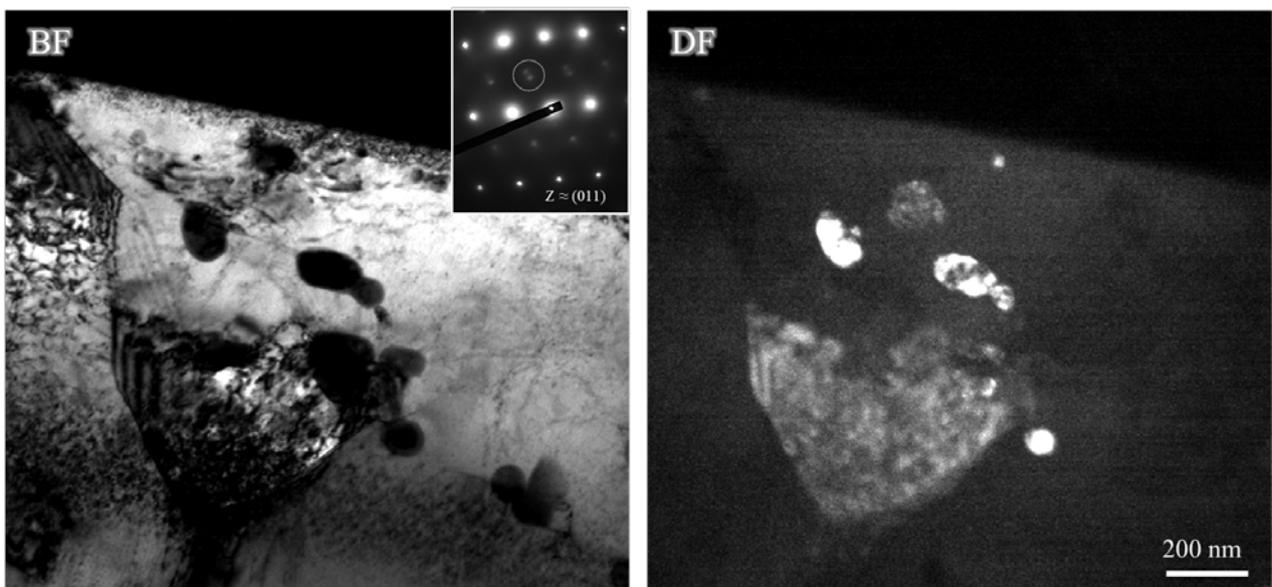


図 2 照射領域中の微細析出物の明視野像と暗視野像

成果リスト

[1] Instability of MX and $M_{23}C_6$ type precipitates in F82H steels under iron ion irradiation at 673 K, Sho Kano, Huilong Yang, Jingjie Shen, Zishou Zhao, John McGrady, Dai Hamaguchi, Mamami Ando, Hiroyasu Tanigawa and Hiroaki Abe, Journal of nuclear and energy , (under review)

平成29年度共同利用テーマ一覧(Fシリーズ)

採番	テーマ名	研究テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-01	レーザー誘起反応と物質改質	工藤 久明	山下 真一	山下 真一
29F-02	原子炉出力変動吸収機構の開発研究	稲垣 照美	椎名 保顕	上坂 充
29F-03	V&Vのための精度保証実験データベース	岡本 孝司	岡本 孝司	近藤 雅裕
29F-04	レーザープラズママルチビーム研究	上坂 充	小山 和義	上坂 充
29F-05	Xバンド加速器の応用研究	上坂 充	上坂 充	上坂 充
29F-06	電子ライナック駆動小型中性子源の開発と利用	上坂 充	上坂 充	上坂 充
29F-07	レーザー・AMSを用いた核物質分光分析システムの検討	長谷川 秀一	岩田 圭弘	長谷川 秀一
29F-08	腐食特性を向上させたZr基、Fe基合金の開発	阿部 弘亨	Yang Huilong	叶野 翔

平成29年度のFシリーズは8テーマ。

29Y-01

研究炉等の運転・管理及び改良に関する研究会 (33)

代表者：山口 彰、共著者：工藤久明、吉廻智江

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻原子炉本部

試験研究用等原子炉の運転・管理及び改良等についての、大学、JAEA、メーカー等の各炉での経験、試み他について、当事者相互間で情報交換、意見交換を行い、炉の活性化、効率化、機能改善、安全性の向上に資する。(技術職員の研修会的性格を含む。)

キーワード： 研究炉、運転、管理、改良、廃止措置、新規制基準

1. 目的

試験研究用等原子炉の運転・管理及び改良等についての、大学、原子力機構 (JAEA; 原科研、大洗センター)、メーカー (東芝、日立の訓練炉) 等の各炉での経験、試み他について、当事者相互間で情報交換、意見交換を行い、炉の活性化、効率化、機能改善、安全性の向上に資することを目的とする。(技術職員の研修会的性格を含む。)

なお、本研究会は、原子力専攻専門職学位課程の教員の質的向上を図るための活動 (FD (Faculty Development) 活動) の一環として、原子炉施設の現場における原子炉の運転に関する最新の知見を修得するための研修とも位置付けている。

2. 概要

- (1) 日時：平成 30 年 3 月 5 日 (月) 9:00~16:35
- (2) 場所：東京大学大学院工学系研究科原子力専攻研修室
(茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22)
- (3) プログラム (○印は口頭発表者、発表 15 分 (特別講演発表 30 分)、質疑 5 分)
開会の辞 (東大炉) 山口 彰 9:00-9:05
【座長：工藤久明 (東大炉)】
 1. 武蔵工大炉の廃止措置の現状 (武蔵工大炉) ○内山孝文 9:05-9:25
 2. 都市大原研の今後の利用計画 (武蔵工大炉) ○羽倉尚人 9:25-9:45
 3. 【特別講演】 UTR-KINKI の平成 25 年改訂規制基準への適合確認 (近大炉) ○芳原新也、杉山亘、左近敦士、橋本憲吾、山西弘城、伊藤哲夫 9:45-10:20
(コーヒーブレイク)
【座長：中島 健 (京大炉)】
 4. 近畿大学原子力研究所の品質保証計画書の改定 10:35-10:55
(近大炉) ○芳原新也、杉山亘、左近敦士、橋本憲吾、山西弘城、伊藤哲夫
 5. 立教炉の廃止措置の進捗状況について (立教炉) ○丹沢富雄、加藤睦、鈴木正男、寺澤隆史、 10:55-11:15
 6. 東大・工・原子力国際専攻共同施設核燃使用施設廃止に向けてのプロセスについて (一報) (東大) ○飯塚裕幸、滝 剣朗 11:15-11:35
 7. 研究棟 RI 排水管その他 改修工事について (東大炉) ○澤幡 浩之 11:35-12:05
(昼 食)
【座長：山口彰 (東大炉)】
 8. 【特別講演】 京都大学研究炉の現状と課題 (京大炉) ○中島 健 13:00-13:35
 9. 京都大学研究用原子炉(KUR)及び臨界実験装置(KUCA)における設工認の品質管理 (京大炉) ○張 俊 13:35-13:55
 10. JRR-3 プロセス制御計算機の更新 (JAEA 原科研) ○井坂浩二、諏訪昌幸、木村和也、石崎勝彦 13:55-14:15
【座長：芳原新也 (近大炉)】
 11. HTTR における太陽電池パネル用球状シリコン半導体の製造量評価 (JAEA 大洗) ○石井俊晃 14:15-14:35

1 2. HTTR における熱耐力を向上した広領域中性子検出器の開発 (JAEA 大洗) ○小澤太教	14 : 35—14 : 55
1 3. JMTR 廃止措置計画の策定状況 (JAEA 大洗) ○大塚 薫、花川裕規 (コーヒーブレイク) 【座長：羽倉尚人 (武蔵工大炉)】	14 : 55—15 : 15
1 4. 「常陽」原子炉容器内構造物の放射化量とガンマ線量率分布の測定評価 (JAEA 大洗) ○山本崇裕、前田茂貴、伊藤主税	15 : 30—15 : 50
1 5. 「常陽」定期的な評価 (第 2 回) 長期保全計画とその実施状況 (I) (JAEA 大洗) ○菊池祐樹、飛田茂治、鈴木寿章、川原啓孝	15 : 50—16 : 10
1 6. 配管熱変位測定装置及び 1 次主ポンプ現象記録装置等による早期異常検知 (JAEA 大洗) ○曾澤健二、鎌田英久、会田剛、大川敏克、井関 淳 閉会の辞 (東大炉) 工藤久明	16 : 10—16 : 30 16 : 30—16 : 35

3. まとめ

武蔵工大炉 (東京都市大)、立教大炉では、廃止措置の確実な進捗が見られ、跡地利用の具体的計画が進んでいる。原子炉施設の跡地利用計画は本専攻にとっても参考となる。

東大環境安全本部 (東京・本郷) からは、核燃料物質使用施設の廃止に向けた課題・計画等が示された。

本専攻 (東海村) からは、2015 年 12 月に発生した排水配管の水漏れの件に関し、水張り試験、撤去工事、復旧工事、メンテナンスしやすい敷設工法などが発表された (図 1)。50 年近い経年劣化と震災の影響 (余震を含む) による不具合の発生が頻発しており、原子炉施設の廃止措置に関する実質的作業は中断している。

一方で、京都大学、近畿大学からは、研究炉再稼働 (新規規制基準への適合) の明るい動きのニュースもあり、特別講演として位置付けた。再稼働に至るまでの幾多の労苦がしのばれた。

さらに、昨今重要となっている品質管理・品質保証活動について、取り組み例が複数紹介された。本専攻にとってもよいモデルとなると思われる。

原子力機構からは、プロセス制御の更新、中性子検出器の開発、早期異常検知などの保守管理的な試みに加え、長期保全計画の策定・実施、さらには廃止措置計画がある一方で、商業的利用評価もある多様な報告があった。

研究炉周りに携わる多くの人々が、技術情報の共有はもとより、それを超えて団結してモノ申せるような場へと発展することを期待する (図 2)。

なお、原子力専攻専門職学位課程の教員の質的向上を図るための活動 (FD (Faculty Development) 活動、原子炉施設の現場における原子炉の運転に関する最新の知見を修得するための研修) の一環としては、3 名の専任教員が参加した。本専攻の原子炉本部技術職員は「原子炉管理実習」の担当をしており、その内容向上への反映が期待される。

成果リスト

[1] 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻原子炉本部, 平成 29 年度弥生研究会「研究炉等の運転・管理及び改良に関する研究会」発表要旨集, UTNL-R 0496 (2018).



図 1 排水配管からの水漏れを発表する技術職員



図 2 開会の辞を述べる原子炉本部長

29Y-02

弥生研究会 ～原子力専攻施設共同利用成果報告会～

大野 雅史

東大・院工・原子力専攻

弥生研究会 ～原子力専攻施設共同利用成果報告会～ を開催し、原子力専攻の保有する HIT、LINAC など加速器施設等の共同利用によって得られた特徴ある研究成果について利用者をはじめとする関係の方々に発表していただき、議論を深めた。

キーワード：原子力専攻、共同利用、施設利用、成果報告、情報発信

1. 概要

東京大学・原子力専攻(東海村)では、共同研究の成果報告の場として、平成 20 年度より、弥生研究会・原子力専攻施設共同利用成果報告会を実施している。本年は、昨年同様に先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会及び原子力機構施設利用一般共同研究成果報告会と合わせて開催する形をとって、研究者間の交流を図るとともに研究成果の外部発信を行っている。

このうち原子力専攻施設共同利用成果報告会では、東海村の共同利用施設であるオフパイル及びブランケット(共同利用 F シリーズ)、電子加速器ライナック(共同利用 L シリーズ)、重照射研究施設(共同利用 H シリーズ)における前年度(平成 28 年度)の研究テーマの中から、特徴ある成果を挙げているテーマを選び、ポスターによる研究成果の発表を行った。

2. 内容

弥生研究会・原子力専攻施設共同利用成果報告会を、第 12 回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会および原子力機構施設利用一般共同研究成果報告会と併催として、平成 29 年 8 月 8, 9 日(ポスター発表は 8 月 9 日)に量子研究機構高崎研究所にて開催した。平成 28 年度に共同利用として実施された F、L、及び H シリーズ(F:9 テーマ、L: 8 テーマ、H: 14 テーマ)の中から、各管理部職員が専攻内幹事らとともに協議の上、特徴ある成果をあげているテーマを選考し、合計 8 テーマに関してポスター発表を行っていただいた。ポスター発表テーマのリストを 3 に示す。

当日は、併催する他の成果報告会と合わせて、延べ 80 名を超える参加者があり、弥生研究会・原子力専攻施設共同利用成果報告会を実施したポスター発表会場にも数多くの参加者が訪れ、闊達な議論が繰り広げられた。成果報告会を併催することによって、異なるスキームにおける共同利用で活躍する近い分野の研究者の間で情報が発信・共有されるとともに、新たな共同利用や分野間連携のきっかけとなれば幸いである。

なお、末筆ながら、当報告会を開催するにあたり、連携重点研究討論会及び原子力機構施設利用一般共同研究ご関係者及び弥生研究会・原子力専攻施設共同利用ご関係者の皆様に多大なご協力とご支援を頂きましたことに対して改めて御礼申し上げます。

3. プログラム

No.	発表題目	発表者	所属
1	Experimental and Numerical Study on the Transient Oxidation of Nuclear Graphite under Air Ingress Conditions	Wu Yang	東京大学
2	光伝導スイッチを用いた卓上イオン加速システムの研究	池田 直樹	東京大学
3	可搬型高エネルギーX線源による橋梁内部構造3次元可視化と健全性評価	小沢 孝生	東京大学
4	レーザー・AMSを用いた核物質分光分析システムの検討	岩田 佳弘	東京大学
5	Development of Zr and Fe-based alloy with improved corrosion resistivity - Autoclave corrosion assessment on the feasibility of oxide coatings on Zirconium alloy -	Z. Duan	東北大学
6	糖転移フラボノイド MG-Rutin の放射線防護:ラジカル捕捉と化学回復	山下 真一	東京大学
7	Irradiation effect of advanced nuclear materials - Dependence of irradiation-induced hardening on the Nb content in self-ion irradiated Zr-Nb -	Huilong Yang	東京大学
8	高エネルギーX線CT用フォトンカウンティングシステムの開発	大島 佑介	東京大学

以上.

29Y-03

量子ビーム技術開発・応用研究会

神野智史、上坂充

東大院工

レーザー駆動電子加速、レーザー駆動イオン加速、THz 加速など従来の加速器に替わる小型加速器の技術開発及びそれらの応用に関して、当該研究室周辺の最新成果の把握と、情報交換を目的として、表記の弥生研究会を開催した。

キーワード： レーザー駆動電子加速、レーザー駆動イオン加速、THz 加速、パルスラジオリシス、実験室宇宙物理

開催日時および場所

平成 30 年 3 月 16 日（金）13:00 - 17:00

東京大学弥生講堂セイホクギャラリー

開催日時および場所

13:00 - 13:10 開会の挨拶

13:10 - 13:35 細貝知直（阪大）：レーザー駆動電子加速器の実現を目指して

13:35 - 14:00 神門正城（QST）：レーザー電子加速のためのビーム計測器の開発

14:00 - 14:25 吉田光宏（KEK）：THz 加速について

14:25 - 14:50 室屋裕佐（阪大）：電子ビーム誘起高速反応研究とパルスラジオリシス装置開発

14:50 - 15:00 休憩

15:00 - 15:25 佐野智一（阪大）：超高速変形の XFEL によるその場計測：超高速電子線回折への期待

15:25 - 15:50 福田祐仁（QST）：水素クラスターを用いた multi-MeV 高純度プロトン加速

15:50 - 16:15 蔵満康浩（阪大）：レーザーを用いた宇宙線起源の実験的研究

16:15 - 16:50 小山和義（KEK/東大）：（特別講演）レーザー粒子加速への期待と課題

16:50 - 17:00 閉会の挨拶

まとめ

レーザー駆動電子加速器を用いた安定なマイクロビームが実現され、次のステージを見据えた XFEL 源への展開（阪大・細貝）やビーム診断の開発（QST・神門）についての講演が行われた。続いて、新しい着想に基づいた誘電体を用いた THz 加速（KEK・吉田）など、次世代の加速器の登場が垣間見える講演が行われた。加速器利用については、パルスラジオリシス（阪大・室屋）や XFEL などを用いたその場観察（阪大・佐野）についての講演が行われた。電子だけでなく、質量の大きなイオンについて、レーザー駆動加速の現状と重粒子線医療応用（QST・福田）についての講演が行われた。また、その加速メカニズムと関連して高エネルギー宇宙線の起源の探索（阪大・蔵満）といった話題にも広がった。最後に、特別講演として小山先生に、これまでのレーザー粒子加速の歴史と現在取り組んでいる研究、今後のレーザー加速に対する期待と課題についてご講演頂いた。以上のように、普段なかなか交流のない、レーザー加速開発を行っている研究者と、加速器を利用している側の研究者が会うことにより、小型・高エネルギー・超短パルスといった特徴を持つビームとその場観察のテクニックを組み合わせることで見える超高速現象について情報交換が行われ、今後、新たな分野の創生につながるものと期待できる。

29Y-05

弥生研究会～原子・分子の分光分析技術とその応用(2)～

長谷川秀一

東京大学

原子・分子および原子核に関する分光分析の基礎科学と、それらの制御および応用に関する研究会を、広い分野から専門家をお招きし、原子力学会 2018 年春の年会（大阪大学）において「レーザーの特長を利用した研究開発」との題目において総合講演・報告 4 として開催した。

キーワード： レーザー、化学反応、インフラ健全性検査、遠隔分光分析

1. 概要

日時：2018 年 3 月 28 日 13：00～14：30

場所：大阪大学吹田キャンパス H 会場（U2 棟 U2-213）

プログラムとその概要

13:00

趣旨説明 長谷川 秀一

本研究会の趣旨説明があった。すなわち、1960 年のレーザーの発明以来、レーザー自身の進展と同様、その利用分野も飛躍的な広がりを見せている。原子力分野においてもその利用は進んでいるが、学会内での利用者相互での議論や情報交換をさらに促すために、レーザーをキーワードとしたセッションを企画した。

13:00～13:30

レーザーによる金属イオンの価数変化（大阪市立大）中島 信昭 先生

重元素のリサイクルに向けて、光照射により溶媒中の金属イオンの酸化還元反応を誘起することにより、その選択的な沈殿分離の可能性について Eu 元素を例にして紹介があった。UV (308nm) 1 光子による還元反応 ($\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$) での沈殿、2 光子 (394.1 nm) による沈殿、フェムト秒レーザー (800 nm) によるフィラメンテーションによる白濁などの現象を例示した。さらに Au を例に金属微粒子の生成を紹介した。

13:30～14:00

レーザーによるコンクリート欠陥の遠隔・高速検出技術の開発（量研関西研）長谷川 登 先生

内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) において進められているインフラメンテナンスに関わる新技術の開発として、コンクリート内部の検査にパルスレーザー照射による打撃と干渉を利用したレーザー振動計測を組み合わせた手法の開発について紹介があった。50Hz での検査で 54 か所を約 1 秒で、深さ 10 mm の位置にある模擬欠陥の検知に成功している。今後、実際のトンネル内での試験を計画している。

14:00～14:30

レーザーを利用した廃炉のための遠隔分光分析（原子力機構）若井田 育夫 先生

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉において、炉内から熔融燃料デブリなどの取り出しに向けて、その状態や組成などを調査することが重要である。そこで、遠隔その場分析技術のレーザー誘起プラズマ発光分光法 (LIBS) に着目して研究を進めていることが紹介された。具体的には、耐放射線ファイバーの特性評価、ロングパルスレーザーの活用、マイクロ波印加による信号増強、マイクロチップレーザー利用などの成果が示された。

2. まとめ

今回の研究会では、レーザーの化学反応への利用、インフラ健全性検査への利用、遠隔分光分析への利用という立場でレーザーを利用されている先生方に講演をしていただいた。2018年春の年会総合講演・報告4としてセッションを開催させていただき、普段レーザーを利用していないような方々にも、参加いただくことができ、活発な討論が行われた。今後、引き続き本討論会を開催していくことで、レーザー利用の高度化を進めるためのプラットフォームとなることが期待される。



ご講演をいただいた先生方（左から、中島先生、長谷川先生、若井田先生）

謝辞

今回ご講演をご快諾いただいた中島先生、長谷川先生、若井田先生に感謝いたします。また、本セッションを原子力学会2018年春の年会で開催するにあたって多くの方にご協力いただき改めて御礼申し上げます。

参考文献

日本原子力学会 2018年春の年会プログラム

企画セッション | 総合講演・報告 | 総合講演・報告4 東京大学弥生研究会

レーザーの特長を利用した研究開発

座長：長谷川 秀一（東大）

2018年3月28日(水) 13:00 ~ 14:30 H会場 (U2棟 U2-213)

3H_PL01 趣旨説明 *長谷川 秀一 1 (1. 東大)

3H_PL02 レーザーによる金属イオンの価数変化 *中島 信昭 1 (1. 大阪市立大)

3H_PL03 レーザーによるコンクリート欠陥の遠隔・高速検出技術の開発 *長谷川 登 1 (1. QST)

3H_PL04 レーザーを利用した廃炉のための遠隔分光分析 *若井田 育夫 1 (1. JAEA)

29Y-06

第1回粉体シミュレーション技術利用シンポジウム

研究代表者：酒井 幹夫

所属研究機関名：東京大学大学院工学系研究科

第1回粉体シミュレーション技術利用シンポジウムにおいて弥生研究会を共催したので、研究会について報告する。粉体シミュレーション技術利用シンポジウムでは、粉体・混相流シミュレーションに関するソフトウェア技術および検証・物性取得のための実験に関する技術の紹介がなされた。その中で、共催の本研究会では世界的に著名な研究者を講師として招き、世界標準手法の紹介および最先端研究の紹介を行った。

キーワード：微粒子、粉体、数値シミュレーション、可視化

1. 目的

粉体シミュレーション技術利用シンポジウムは、粉体シミュレーション技術の産業応用を促進させることを目的としており、粉体シミュレーションの最先端科学技術に携わる研究者および開発者を産学から幅広く招いて研究成果や課題について議論する。

2. 講演趣旨

主催：粉体シミュレーション技術利用分科会、共催：東京大学弥生研究会、協賛：日本混相流学会の下、「第1回粉体シミュレーション技術利用シンポジウム」が、2017年12月14日（木）に東京大学生産技術研究所コンベンションホールにて行われた。その中で、共催の弥生研究会では世界的に著名な研究者を講師として招き、世界標準手法の紹介および最先端研究の紹介（合計3件）を行った。

3. 講演内容（混相流セッション）

本シンポジウムにおいて、弥生研究会の対象は粉体シミュレーションの最先端科学技術に関する研究成果発表であった。該当する発表のタイトルおよび講演者は以下の通りである。固気混相流の世界標準手法の DEM-CFD 法を開発した辻裕・大阪大学名誉教授から「Scientific or engineering research with originality does not need much money but needs much time to think」というタイトルの講演がなされた。辻裕先生の研究成果の紹介およびオリジナリティの高い研究成果を残すための研究姿勢について示された。モナッシュ大学の Zongyan Zhou 講師から「CFD-DEM applications to flow and heat transfer in particle-fluid systems」というタイトルの講演がなされ、固体-流体連成問題における熱伝導問題の最新知見が示された。モナッシュ大学の Shibo Kuang 博士から「Modelling and application of hydrocyclones」というタイトルの講演がなされ、サイクロン体系における混相流シミュレーションの最新知見が示された。



辻裕先生



Zongyan Zhou 講師



Shibo Kuang 博士

以 上

本研究会では、安全目標とは何かについての検討に始まり、安全目標の姿はどうあるべきか、安全目標を誰がどのように活用すべきか、さらに安全目標と社会との関係のあり方を検討した。安全目標についての包括的な考察と議論を展開し、その結果を報告書にとりまとめた。今年度に、学会との共催によりシンポジウムを開催予定である。

キーワード：安全目標、How Safe Is Safe Enough?、リスク管理、ALARP、統合的意思決定、社会との対話

1. はじめに

わが国の安全目標に関する公的な検討は、2001年、原子力安全委員会に安全目標専門部会が設置されたことに端を発する。その検討内容は2003年に「中間とりまとめ」として公表されたが、原子力安全委員会決定とはされず、リスク管理の意思決定で具体的に活用されるには至らなかった。「中間とりまとめ」に向けた深い議論は、多くの原子力関係者にも、また社会にも十分に伝わらないまま、2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故に至った。2014年には原子力規制委員会が「安全目標を定めた」とされ、上記「中間とりまとめ」を実質的に追認するとともに、同委員会が今後も継続的に議論することが謳われた。しかし、事故を経てもなお、「なぜ安全目標が重要なのか」が広く共有されているとは言い難く、原子力安全における最も重要且つ根源的な問いである“*How safe is safe enough?*”についての考察を深めるための議論が巻き起こる状況にもなっていない。

こうした現状に一石を投じることを目的として、本研究会を設置した。研究会における議論は、UTNLレポートとしてとりまとめた[1]。本報告書では、そもそも安全目標とは何かについての検討に始まり（第2章）、安全目標の姿はどうあるべきか（第3章）、誰がどのように活用すべきか（第4章）、さらに社会との関係のあり方も含め（第5章）、安全目標についての包括的な考察と議論を展開する。

2. 安全目標のありかたと使いかた

本論文で導いた結論を端的に表現すれば、「不足でも過剰でもなく『適切な安全の姿』を保ち続けることが、“*How safe is safe enough?*”への回答である」、と言える。安全確保の努力が不足している「不適切な安全の姿」が許されない一方で、「安全対策をやればやるほど良い」という立場を深慮なくとることもまた、「滑稽な安全の姿」に陥る可能性がある。安全性向上を目指して様々な対策を実施しても、あるところからは不確かさが大きくなりすぎたり、却って逆効果になったりすることが懸念されるが、こうした領域において無闇に多くの資源を投じることを、本論文では「滑稽な安全の姿」として批判的に論じた。最低限満たすべきリスクの水準を確実に満足した上で、「滑稽な安全の姿」に陥らないように、ALARP (As Low As Reasonably Practicable) の原則に従って適切なリスク管理がなされている状態こそ「適切な安全の姿」であり、この構造そのものが、本論文の提唱する安全目標である。

上記の考え方を踏まえて安全目標を実践に活用していくためには、IAEAも示すように安全目標を階層構造として捉え、「適切な安全の姿」を最上位の定性的目標と位置付けた上で、具体的なリスク管理活動において参照するための“*Surrogate*”（代替目標）を適切に設定することが求められる。安全目標と言えばCDF（炉心損傷頻度）やCFF（格納容器機能喪失頻度）がすぐ念頭に置かれがちであるが、それらは上位目標から導かれる *Surrogate* に過ぎず、望ましい安全の姿についての本質的な思考によって基礎づけられていなければならない。本論文で提示した「適切な安全の姿」を上位目標として念頭に置くならば、安全目標がリスク評価値によってプラントの合否を判定する基準ではなく、また将来に向けた安全性向上活動を不要とする閾値でもないことは、自ずと導かれるはずであ

る。

原子力安全に一義的責任を負うのは原子力事業者であり、その活動が十分かを違う立場から確認する営みが安全規制であると捉えれば、事業者は「当該事業のリスク管理者」であり、規制者は「社会のリスク管理者」であると言える。適切なリスク管理の実施には、これらリスク管理者の組織内で、またリスク管理者間において、リスク情報とリスク認識とを共有することが不可欠であり、安全目標はそのコミュニケーションにおける共通言語として活用されることが期待される。その際、リスク管理者が安全目標及びリスク評価の活用方針を明示し、指針・標準類を整備するとともに、リスク評価の不完全さを前にして逡巡せず、活用の実績を積み重ねながら、リスク評価に伴う不確かさの扱い方などを深化させていくことが求められる。

原子力のリスク管理は、一見すると科学的・技術的基盤のみに立脚して実施すべきと考えられるかもしれないが、本論文では、安全目標は原子力のリスク管理に係る「社会との約束事」であり、その設定・活用においては社会との相互作用が不可欠と主張する。“No undue risk” (USNRC) や “freedom from risk which is not tolerable” (ISO/IEC) の定義に見られるように、そもそも「安全」という概念自体にある種の価値判断が含まれており、安全目標とはその価値判断をめぐる関係主体が議論を尽くした上で、「我々にとっての『安全』とは何か」を定義することに他ならないからである。リスク管理者には、「科学」が提供する示唆と、社会が示す様々な「価値」との間でもがき苦しみながら、公衆の関心事を目標策定過程に取り入れる努力が欠かせない。また、安全目標（及びそれに類する枠組み）の活用が先行している米英の事例を見ると、両国とも、莫大なハザードを内包する原子力のリスクを管理していく上での様々な不確かさや人知の限界に対応するための「知恵」として、安全目標とリスク管理の枠組みを案出してきたものと解される。

3. まとめ

福島原子力事故を経験した我々の社会が「引き受けてもよいであろう」と考えるリスクの様態・程度について改めて問い直すことは、今後の原子力利用に当たり不可欠である。リスクの様態・程度を正面から議論しようとするならば、安全目標に関して考察を深める努力は避けて通れないはずである。本論文で示す「適切な安全の姿」としての安全目標が、福島原子力事故を踏まえた、我が国なりの「知恵」の創出につながることを望みたい。

成果リスト

[1] 山口 彰、竹内 純子、菅原 慎悦、「安全目標」再考、－なぜ安全目標を必要とするのか?－、UTNL-R-497、弥生研究会 安全目標に関する研究会。

平成 29 年度専攻内行事一覧等

年月日	行 事 内 容 等
H29. 4. 3	原子力専攻（専門職大学院）入学式
H29. 5. 26	原子力安全管理委員会
H29. 6. 12	運営諮問会議
H29. 7. 7	危機対策管理委員会
	原子力安全管理委員会
H29. 8. 8-9	第 12 回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会および原子力機構.量研 施設利用共同研究,弥生研究会成果報告会
H29. 8. 19	第 14 回連携重点研究運営委員会
H29. 9. 22	第 12 回共同利用研究計画委員会
H29. 11. 16	第 11 回共同利用運営委員会
H29. 10. 6	消防訓練の実施
H30. 1. 26	核物質防護訓練の実施
H30. 2. 8	第 36 回一般共同研究専門委員会
H30. 2. 19	第 13 回共同利用研究計画委員会
H30. 2. 23	放射線汚染事故の対応訓練の実施
H30. 3. 1	第 12 回共同利用運営委員会
H30. 3. 5	第 91 回原子力機構施設利用共同研究委員会
H30. 3. 9	危機対策管理委員会
H30. 3. 19	防災訓練の実施
H30. 3. 22	原子力専攻（専門職大学院）学位記授与式

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻
共同利用運営委員会委員名簿

平成30年3月1日現在

区分	所属機関	職名	氏名	名称	委嘱期間
3-1	東大(院・工)原子力専攻	専攻長	山口 彰	委員	28.4.1～
〃	〃 〃	教授	上坂 充	〃	25.4.1～
〃	〃 〃	〃	岡本 孝司	〃	28.4.1～
〃	〃 〃	〃	阿部 弘亨	〃	27.10.1～
〃	〃 〃	〃	長谷川 秀一	〃	27.4.1～
3-2	東大(院・工)総合研究機構	〃	寺井 隆幸	委員長	29.4.28～31.3.31
〃	〃(院・工)原子力国際専攻	〃	関村 直人	委員	29.4.28～31.3.31
3-3	名大(院・工)量子工学専攻	〃	井口 哲夫	〃	29.5.9～31.3.31
〃	京都大学原子炉実験所	〃	川端 祐司	〃	29.5.17～31.3.31
〃	東北大・金属材料研究所	〃	永井 康介	〃	29.4.28～31.3.31
〃	富山高等専門学校	学校長	賞雅 寛而	〃	29.9.25～31.3.31
〃	日本原子力研究開発機構	理事	三浦 幸俊	〃	29.4.28～31.3.31
3-4	東大(院・農) アイソトープ農学教育研究施設	准教授	田野井慶太郎	〃	29.8.22～31.3.31
〃	東大(院・医)疾患生命工学センター	講師	細谷 紀子	〃	29.8.22～31.3.31
〃	高エネルギー加速器研究機構	施設長	山口 誠哉	〃	29.4.28～30.3.31
8	東大(工・情)事務部	総務課長	下大田 真一	幹事	26.4.1～
〃	東大・(院・工)原子力専攻	准教授	大野 雅史	〃	27.10.1～
9	〃 〃	主査	依田 正明	事務	29.4.1～

共同利用研究計画委員会委員名簿

平成30年2月19日現在

氏名	職名	機関名	委嘱期間
加美山 隆	准教授	北海道大学(院・工)量子理工学部門	29.4.1~31.3.31
松山 成男	教授	東北大学(院・工)量子エネルギー工学専攻	28.4.1~30.3.31
関東 康祐	教授	茨城大学工学部機械工学科	28.9.21~30.3.31
河原 林順	教授	東京都市大学(工)原子力安全工学科	29.4.28~31.3.31
瓜谷 章	教授	名古屋大学(院・工)総合エネルギー工学専攻	29.9.1~31.3.31
渡辺 幸信	教授	九州大学(院・工)先端エネルギー理工学専攻	29.9.6~31.3.31
齊藤 泰司	教授	京都大学原子炉実験所	29.4.28~31.3.31
濱 広幸	教授	東北大学電子光理学研究センター	29.6.1~31.3.31
佐々木 晶	教授	大阪大学(院・理)宇宙地球科学専攻	29.4.1~31.3.31
羽島 良一	グループリーダー	量子科学技術研究開発機構	29.4.28~31.3.31
小林 仁	研究員	高エネルギー加速器研究機構	29.4.28~30.3.31
鈴木 良一	首席研究員	産業技術総合研究所	29.4.1~31.3.31
浅井 圭介	教授	東北大学(院・工)応用化学専攻	29.4.28~31.3.31
鷲尾 方一	教授	早稲田大学理工学術院総合研究所	29.4.28~31.3.31
村上 健太	准教授	長岡技術大学(院・工)原子力システム安全工学専攻	29.4.1~31.3.31
寺井 隆幸	教授	東京大学(院・工)総合研究機構	29.4.28~31.3.31
関村 直人	教授	東京大学(院・工)原子力国際専攻	29.4.28~31.3.31
上坂 充	教授	東京大学(院・工)原子力専攻	27.4.1~
岡本 孝司	教授	〃	27.4.1~
山口 彰	教授	〃	27.1.1~
阿部 弘亨	教授	〃	27.10.1~
長谷川 秀一	教授	〃	27.4.1~
工藤 久明	准教授	〃	27.4.1~
出町 和之	准教授	〃	27.4.1~
斉藤 拓巳	准教授	〃	27.9.1~
大野 雅史	准教授	〃	27.6.1~
山下 真一	准教授	〃	28.7.1~
近藤 雅裕	講師	〃	27.4.1~
安見 厚志	助手	〃	27.4.1~
吉廻 智江	助教	〃	28.4.1~
神野 智史	助教	〃	28.4.1~1
岩田 圭弘	助教	〃	28.1.1~
叶野 翔	助教	〃	29.4.1~
三津谷 有貴	助教	〃	29.11.1~
依田 正明	総務係長	〃	29.4.1~

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-1	レーザー誘起反応と物質改質	工藤久明	山下 真一	山下 真一
	実験担当者			
中国科学技術大	林 銘章 (教授)			
大阪大・産研	室屋 裕佐 (准教授)			
原子力機構・安研C	端 邦樹 (研究員)			
原子力機構・原子力基礎工	熊谷 友多 (研究員)			
量研機構・高崎研	佐伯 誠一 (研究員)			
東大・院工・原子力国際	于 嵩 (D1)			
東大・院工・原子力	工藤 久明 (准教授)		山下 真一 (助教)	

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-2	原子炉出力変動吸収機構の開発研究	稲垣 照美	椎名 保顕	上坂 充
	実験担当者			
茨城大学工学部	稲垣 照美(教授)			
愛知工科大学	椎名 保顕(教授)			
鳥取大学工学部	藤村 薫(教授)			
山梨大学工学部	武田 哲明(教授)			
湘南工科大学工学部	文沢 元雄(教授)			
	菱田 誠			
日本原子力研究開発機構	久保 真治(研究主幹)			
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)			

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-3	V&Vのための精度保証実験データベース	岡本 孝司	岡本 孝司	近藤雅裕
	実験担当者			
茨城大学	Li Yanrong(助教)			
韓国釜山国立大学	Kim KyunChun(教授)			
米国アリゾナ大学	Liu Maolong(研究員)			
産総研	染矢 聡(研究員)			
JAEA	Chai Penghui (特定課題研究員)			
東大・院工・原子力国際	Erkan Nejdet(特任准教授)	Jo Byeongnam(助教)	Zhou Qian(D3)	
	Wang Laishun(D3)	Wu Yang(D3)	Gong Haigung(D3)	
	Erdal Ozdemir(D2)	結城 喬(D2)	間所 寛(D2)	
	植田 翔多(D1)	Zhang, Yao(D1)	Wang, Kai(D1)	
	酒井 泰地(M1)	上野 成生(M1)	郭 栄治(M1)	
	幸務 貴之(M1)	藤川 圭吾(B4)	山田 知樹(B4)	
	東大・院工・原子力	岡本 孝司(教授)	近藤 雅裕(講師)	佐川 渉(特任研究員)

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-4	レーザープラズママルチビーム研究	上坂 充	小山 和義	上坂 充
	実験担当者			
高エネ研	吉田 光宏(准教授)			
東大・院工・原子力国際	Chen Zhaofu(D2)	池田 直樹(M2)		
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	小山 和義(学術支援専門職員)		
	上田 徹(学術支援職員)			

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-5	Xバンド加速器の応用研究	上坂 充	上坂 充	上坂 充
	実験担当者			
名古屋大・院工	渡辺 賢一(准教授)			
秋田高専	坂本 文人(助教)			
土木研究所	石田 雅博(上席研究員)	大島 義信(主任研究員)	吉田 英二(研究員)	
産総研	藤原 健(研究員)			
アキュセラ	草野 譲一(研究員)	山本 昌志(研究員)		
東大・院工・原子力国際	高橋 浩之(教授)	竹内 大智(M2)	Jean-Michel Bereder(M2)	
	福岡 潤哉(M2)	小沢 壱生(M1)		
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	山下 真一(助教)	三津谷 有貴(特任助教)	
	橋本 英子(技術職員)	土橋 克広(学術支援専門職員)		

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-6	電子ライナック駆動小型中性子源の開発と利用	上坂 充	上坂 充	上坂 充
	実験担当者			
土木研究所	石田 雅博(上席研究員)	大島 義信(主任研究員)		
産総研	藤原 健(研究員)			
アキュセラ	草野 譲一(研究員)			
東大・院工・原子力国際	高橋 浩之(教授)	Yudhitya Kusumawati(D2)	竹内 大智(M2)	
	Jean-Michel Bereder(M2)	福岡 潤哉(M2)	小沢 壱生(M1)	
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	三津谷 有貴(特任助教)		
	土橋 克広(学術支援専門職員)			

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-7	レーザー・AMS を用いた 核物質分光分析システムの検討	長谷川 秀一	岩田 圭弘	長谷川 秀一
	実験担当者			
原子力機構	若井田育夫(研究員) 鄭 京勲(研究員)	宮部 昌文(研究員)	富田 純平(研究員)	
産総研	藤原 健(研究員)			
東大・博物館	松崎 浩之(教授)			
東大・院工・原子力国際	山元 祐太(大学院生) Stephen Wells(大学院生)	千 俣煜(大学院生) 落合 皓貴(大学院生)	石川 大裕(大学院生)	
東大・院工・原子力	上坂 充(教授) 岩田 圭弘(助教)	長谷川 秀一(教授)	斉藤 拓巳(准教授)	

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29F-8	腐食特性を向上させた Zr 基、Fe 基合金の開発	阿部 弘亨	叶野 翔	叶野 翔
	実験担当者			
東北大・工	Duan Zhengang(D2) 大熊 一平(M2)	鈴江 瞭平(M2) 西村 憲治(M2)	小林 明博(M2)	
東大・工・原子力国際	叶野 翔(特任助教) Marlenson Adam Chritser(大学院特別聴講学生) Wang Guangchen(外国人研究生)	Oh Sun-ryung(D1)	木本 雅也(M2)	
東大・工・原子力	阿部 弘亨(教授) Shen Jingjie(学術支援専門職員) John McGrady(学術支援専門職員)	Yang, Huilong(特任研究員) Zhao zishou(学術支援専門職員)		

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29L-1	水溶液の放射線効果の研究	工藤 久明	山下 真一	山下 真一
	実験担当者			
大阪大・産研	古澤 孝弘(教授)	室屋 裕佐(准教授)		
東北大・院・工	越水 正典(准教授)			
中国科学技術大	林 銘章(教授)			
原子力機構・安全研究 C	端 邦樹(研究員)			
原子力機構・原子力基礎工	熊谷 友多(研究員)			
量研機構・高崎研	佐伯 誠一(研究員)			
都立産技研	中川 清子(主任研究員)			
量研機構・放医研	中西 郁夫(主任研究員)			
東大・院工・原子力国際	于 嵩(D1)			
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	工藤 久明(准教授)	山下 真一(助教)	
	上田 徹(学術支援職員)	橋本 英子(技術職員)		

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29L-2	パルス&プローブ法を用いる 超高速反応の研究	上坂 充	室屋 裕佐	上坂 充
	実験担当者			
大阪大・産研	古澤 孝弘(教授)	室屋 裕佐(准教授)		
東北大・院工	越水 正典(准教授)			
中国科学技術大	林 銘章(教授)			
原子力機構・安全研究 C	端 邦樹(研究員)			
東大・院工・原子力国際	于 嵩(D1)			
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	山下 真一(助教)	上田 徹(学術支援職員)	
	橋本 英子(技術職員)			

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29L-3	不定比金属組成を制御した高温超伝導体の ピンニング特性に及ぼす電子線照射効果	寺井 隆幸	下山 淳一	村上 健太
	実験担当者			
青山学院大・理工	下山 淳一(教授) 西森 哲太郎(M1)	元木 貴則(助手)	佐藤 巧望(M2)	
東大・院工・総合研究機構	寺井 隆幸(教授)			
東大・院工・応用化学専	武田 泰明(D1)			
東大・院工・原子力国際	東 拓真(D3) 井上 慎一(M1)	垣谷 健太(M2)	青木 祐介(M2)	
東大・院工・原子力	村上 健太(助教)			

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29L-4	高温・超臨界溶媒の放射線化学	室屋 裕佐	室屋 裕佐	山下 真一
	実験担当者			
大阪大・産研	古澤 孝弘(教授)	室屋 裕佐(准教授)		
中国科学技術大	林 銘章(教授)			
原子力機構・安全研究 C	端 邦樹(研究員)			
東大・院工・原子力国際	于 嵩(D1)			
東大・院工・原子力	上坂 充(教授) 橋本 英子(技術職員)	山下 真一(助教)	上田 徹(学術支援職員)	

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29L-5	フォトカソード RF 電子銃の高性能化	上坂 充	上坂 充	上坂 充
	実験担当者			
大阪大・産研	古澤 孝弘(教授)	室屋 裕佐(准教授)		
大阪大・院・工	細貝 知直(特任准教授)			
秋田高専・電気情報工学科	坂本 文人(助教)			
高エネルギー加速器研究機構	吉田 光宏(准教授)			
東大・院工・原子力	上坂 充(教授) 橋本 英子(技術職員)	山下 真一(助教)	上田 徹(学術支援職員)	
		小山 和義(特任研究員)		

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実 験 課 題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29L-6	高速応答シンチレータの開発と性能評価	越水 正典	越水 正典	山下 真一
	実 験 担 当 者			
東北大・院工・応用化学	越水 正典(准教授)	藤本 裕(助教)	樋山 史幸(M2)	
東大・院工・原子力	山下 真一(助教)			

受付実験番号	実 験 課 題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
28S-1	フェムト秒ライナックのためのマシンスタディ	上坂 充	上坂 充	上坂 充
	実 験 担 当 者			
大阪大・産研	古澤 孝弘(教授)	室屋 裕佐(准教授)		
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	山下 真一(助教)	上田 徹(学術支援職員)	
	橋本 英子(技術職員)			

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-1	Bepi Colombo 水星探査機搭載用 宇宙塵測定器の較正実験	小林 正規	小林 正規	神野 智史
	実験担当者			
獨協医大	野上 謙一(名誉教授)			
東京海洋大学	大橋 英雄(名誉教授)			
阪大・院理	佐々木 晶(教授)			
阪大・産研	柴田 裕実(特任研究員)			
大阪市大・院工	武智 誠次(講師)			
千葉工大・惑星探査研究センター	小林 正規(上席研究員)	奥平 修(上席研究員)		
早大・理工総研	藤井 雅之(研究員)			
宇宙研	矢野 創(助教)	長谷川 直(開発員)	平井 隆之(研究員)	
東大・院工・原子力	神野 智史(助教)			

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-2	陽電子ビームを用いた照射下欠陥挙動の その場観察	土田 秀次	土田 秀次	神野 智史
	実験担当者			
京都大学	土田 秀次(准教授)	上田 大介(M2)		
東大・院工・原子力	神野 智史(助教)			

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-3	火星衛星探査機 MMX 搭載用火星ダスト観測 装置および超小型衛星搭載用流星ダスト観 測装置の較正実験	小林 正規	小林 正規	神野 智史
	実験担当者			
阪大・院理	佐々木 晶(教授)			
大阪市大・院工	武智 誠次(講師)			
早大・理工総研	藤井 雅之(研究員)			
千葉工大・惑星探査研究センター	小林 正規(上席研究員)	奥平 修(上席研究員)		
東大・院工・原子力	神野 智史(助教)			

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-4	格子欠陥をプローブとしたその場観察と組合せ照射による照射欠陥の顕在化技術	関村 直人	村上 健太	村上 健太
	実験担当者			
カルフォルニア大学 サンタバーバラ校 山本 琢也(Professional Research Engineer) 東大・院工・原子力国際 関村 直人(教授) 糸井 達哉(准教授) 叶野 翔(特任助教) 陳 東鉞(特任研究員) 陳 良(D3) 青木 萌(M2) 牧野 健太(M2) 東大・院工・原子力 阿部 弘亨(教授) 村上 健太(助教)				

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-5	原子力新材料及びモデル合金のイオン照射劣化試験	村上 健太	村上 健太	村上 健太
	実験担当者			
日立製作所・日立研究所 王 昀(主任研究員) 石寄 貴大(研究員) SCK・CEN Niels Cautaerts(PhD Researcher) 東大・工・原子力国際 関村 直人(教授) 糸井 達哉(准教授) 叶野 翔(特任助教) 陳 東鉞(特任研究員) 陳 良(D3) 青木 萌(M2) 牧野 健太(M2) 東大・工・原子力 阿部 弘亨(教授) 村上 健太(助教)				

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-6	低放射化フェライト鋼の照射下相安定性に関する研究	濱口 大	濱口 大	叶野 翔
	実験担当者			
量子機構 濱口 大(主幹研究員) 谷川 博康(グループリーダー) 安堂 正己(主幹研究員) 渡辺 淑之(主幹研究員) 小沢 和己(主任研究員) 黒滝 宏紀(任期付職員) 東大・工・原子力国際 叶野 翔(特任助教) 東大・院工・原子力 阿部 弘亨(教授) 尾亦 孝男(技術専門職員)				

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-7	タングステンにおける欠陥による水素捕捉挙動に関する研究	関村 直人	小田 卓司	村上 健太
	実験担当者			
Seoul National University	小田 卓司(Assistant Professor)	Ryu Jin-Ho(大学院生)		
	Gil Junhyoung(大学院生)	Han Jeonghwan(大学院生)		
静岡大学	大矢 恭久(准教授)	周 啓来(学術研究員)	東 奎介(大学院生)	
	戸苺 陽大(大学院生)			
東大・院工・原子力国際	関村 直人(教授)	陳 東鉞(特任研究員)		
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	村上 健太(助教)	Yang Huilong(特任研究員)	

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-8	Study on the heavy ion induced defect and surface microstructural changes of tungsten	関村 直人	陳 東鉞	村上 健太
	実験担当者			
Seoul Nationnal University	Gon-Ho Kim(Prof.)	Younggil Jin(Graduate student)		
	Jae-Min Song(Graduate student)	Ki-Baek Roh(Graduate student)		
東大・院工・原子力国際	関村 直人(教授)	陳 東鉞(特任研究員)		
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	村上 健太(助教)	Yang Huilong(特任研究員)	

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-9	先進原子炉構造材の照射効果	阿部 弘亨	YANG Huilong	叶野 翔
	実験担当者			
東北大・工	Duan Zhengang(D2)	鈴江 瞭平(M2)	小林 明博(M2)	
	大熊 一平(M2)	西村 憲治(M2)		
東大・院工・原子力国際	叶野 翔(特任研究員)	Oh Sun-ryung(D1)	木本 雅也(M2)	
	Marlenson Adam Chritser(大学院特別聴講学生)	Wang Guangchen(外国人研究生)		
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	尾亦 孝男(技術専門職員)		
	YANG Huilong(特任研究員)	SHEN Jingjie(学術支援専門職員)		
	Zhao zishou(学術支援専門職員)	John McGrady(学術支援専門職員)		

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-10	原子炉構造材料の照射劣化機構の研究	藤井 克彦	藤井 克彦	叶野 翔
	実験担当者			
(株)原子力安全システム研究所	藤井 克彦(主任研究員)	福村 卓也(主任研究員)		
	三浦 照光(副主任研究員)			
東大・院工・原子力国際	叶野 翔(特任助教)			
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	村上 健太(助教)	尾亦 孝男(技術専門職員)	

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-11	リアルタイム型トムソンパラボライオン検出器の校正実験	神野 智史	神野 智史	神野 智史
	実験担当者			
神戸大・海事	金崎 真聡(助教)	宇野 雅貴(M2)		
量研機構・関西研	福田 祐二(上席研究員)			
東大・院工・原子力	神野 智史(助教)	尾亦 孝男(技術専門職員)		

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-12	セラミックス被覆中の水素同位体透過挙動に対する重イオン照射効果	寺井 隆幸	近田 拓未	叶野 翔
	実験担当者			
静岡大・大学院理学領域	近田 拓未(講師)			
静岡大・総合	堀越 清良(M2)	望月 惇平(M2)	松永 萌暉(M1)	
東大・工・原子力国際	寺井 隆幸(教授)	叶野 翔(特任助教)	藤田 光(M1)	

平成 29 年度 弥生施設利用実験一覧表

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29H-13	核融合炉材料の照射効果	阿部 弘亨	叶野 翔	叶野 翔
	実験担当者			
岡山大・自然科学研究	中田 隼矢(助教)			
東北大・工	Duan Zhengang(D2)	鈴江 瞭平(M2)	小林 明博(M2)	
	大熊 一平(M2)	西村 憲治(M2)		
量子機構	濱口 大(グループリーダー)	谷川 博康(研究員)	安堂 正己(研究員)	
東大・院工・原子力国際	叶野 翔(特任助教)	Oh Sun-ryung(D1)	木本 雅也(M2)	
	Marlenson Adam Chritser (大学院特別聴講学生)			
	Wang Guangchen(外国人研究生)			
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	尾亦 孝男(技術専門職員)		
	YANG Huilong(特任研究員)	SHEN Jingjie(学術支援専門職員)		
	Zhao zishou(学術支援専門職員)	John McGrady(学術支援専門職員)		

受付実験番号	実験課題	テーマ代表者	実験参加代表者	専攻内幹事
29S-2	イオンビーム実習：イオンビーム照射による 原子力材料の照射損傷実験	叶野 翔	叶野 翔	叶野 翔
	実験担当者			
東大・工・原子力国際	叶野 翔(特任助教)	陳 東鉞(特任研究員)		
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	尾亦 孝男(技術専門職員)		
	YANG Huilong(特任研究員)	SHEN Jingjie(学術支援専門職員)		
	Zhao zishou(学術支援専門職員)			

29年度 UTNL レポートリスト

No.	著者名	標題
R-495	共同利用管理室	平成 28 年度 共同利用成果報告書
R-496	工藤 久明	平成 29 年度弥生研究会「研究炉等の運転・管理及び改良に関する研究会」発表要旨集
R-497	山口 彰	弥生研究会「安全目標に関する研究会」報告書