

平成31年度（令和元年度）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
1.2.	ブランケット経過報告	3
1.3.	ライナック経過報告	5
1.4.	重照射（HIT）経過報告	7
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6テーマ（別表）	8
2.2.	ライナック（L シリーズ）：計8テーマ（別表）	16
2.3.	重照射（H シリーズ）：計13テーマ（別表）	28
2.4.	弥生研究会（Y シリーズ）：計6テーマ（別表）	44
3.	平成31年度専攻内行事一覧	50
4.	各種委員会名簿	51
5.	平成31年度弥生施設共同利用実験・題目別実験担当者名簿	52
6.	平成31年度 UTNS レポート一覧	66

大型設備の経過報告『原子炉（弥生）経過報告』

1. H31(R1)年度の現状について

- ・ 前年度までに、施設及び設備の高経年化により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に加え、使用済燃料の処分の方法についても検討を重ね、廃止措置に移行した当初の「弥生」の高濃縮ウラン燃料を日本原子力研究開発機構に譲渡し処理する予定を、設備等の高経年化対策の観点から、H30年度に、弥生の燃料を米国返還する方針に転換し、原子炉設置変更の承認を得ていた（H30.12.6）。
- ・ 前年度中（H31.3.28）に変更承認申請を行った廃止措置計画については、面談および公開審査会合を経て、R1.7.17 補正後、R1.9.25 に承認を受けた。
- ・ 保安規定変更についても、R1.6.13 に変更承認申請し、面談および公開審査会合を経て、R1.7.17 補正後、R1.9.25 に承認を受けた。
- ・ これにより、第3 四半期（R1.10-）に炉心から B 燃料体を取り出し、切断・脱被覆した。米国に返還することにより、H24 年当初の廃止措置計画における切断計画よりも、おおぶりの切断となった。
- ・ また、第4 四半期（R2.1-）に炉心から C 燃料体を取り出し、切断・脱被覆した。C 燃料体は A, B 燃料体に比べ複雑な構造をしているが、無事に切断・脱被覆できた。
- ・ これらにより、炉心にあった中核燃料体（HEU）については、すべて取り出され、事業所外運搬までの一時保管用の缶に入れられ専攻内に保管されている。
- ・ このことにより、炉心にある制御棒等の DU（劣化ウラン）の検認、FC（フィッションチェンバー）の検認などが今後の懸案事項となっている。
- ・ また、切断の際に生じた汚染水については、B 燃料体切断の際の汚染水については、R1.10-12 に大型蒸留、R2.3 に中型蒸留および小型蒸留を行って粉体化し、防護区域にて保管している。C 燃料体切断の際の汚染水については、R2.2 に大型蒸留を行って、濃縮水を防護区域にて保管している。R2.6 に中型蒸留、R2.10-に小型蒸留を行って、R2.12 内に粉体化する予定である。
- ・ 廃止措置にかかる活動に加えて、R2.4.1 に改正原子炉等規制法が施行された。これに伴い、いわゆる新検査制度体制となり、国が行っていた検査等が事業者検査となる。日常検査としてフリーアクセスが可能となるため、その対応を行った。
- ・ また、R2.4.1 に、品質管理基準規則が制定・施行された。これに伴い、品質保証計画指針（品質保証マニュアル）の制定がなされた。また、品質方針、品質目標の準備を行った。
- ・ R1.9.9 に発生した、日本原子力研究開発機構大洗研究所 JMTR（材料試験炉）二次冷却系統の冷却塔倒壊について、専攻内でも同様の構造物に対する水平展開を実施し、問題のないことを確認した。

2. スケジュール等

- ・ H30.8.7 に日米政府間で合意された SOI（Statement of Intent）に基づき、2022（R3）年3 月末までに米国へ燃料返還（米国着）すべく、譲渡先である米国エネルギー省（DOE）とは、スケジュールの他に技術的事項についても緊密な連絡を図っている。
- ・ また、国内の他の原子炉設置者や運搬を委託しようとする者、警備業者とも緊密な連絡を図っている。
- ・ より厳しい核物質防護上の措置を講じた輸送となることから、日本の規制当局（原子力規制庁、国土交通省、警察庁等）ばかりでなく、文部科学省・外務省はじめ多くのステークホルダーとの協力体制の構築を図るため、丁寧な進捗状況の説明に努めているところである。

3. 検査点検・設備改善等

- 定期自主検査・保守点検（3 か月点検） H31. 4
- 吸収式冷温水機用油流量計更新 R1. 5
- 研究棟空調設備温度指示調節計更新 R1. 5
- 研究棟負圧制御区域用温度・湿度各記録計更新 R1. 5
- 原子炉実験室および実験準備室の天井クレーンの定期自主検査（1 か年点検） R1. 4
- 熱源設備冷却水ポンプのグランドパッキン更新 R1. 5
- 制御室監視盤用 UPS（無停電電源装置）取替 R1. 6
- 核燃料物質輸送容器定期自主検査 R1. 6
- 施設定期自主検査（3, 6 か月および 1 か年点検） R1. 7-9
- 炉心集合体駆動設備・固定装置の排気バルブ交換 R1. 7
- 原子炉棟暗渠天井部防水工事 R1. 7
- 原子炉実験準備室パーソナル扉表示部修理 R1. 7
- 原子炉実験準備室大扉パッキン交換 R1. 7
- 核計装設備・テストジェネレータ点検校正 R1. 7
- エリアモニタ、レムカウンタ用 UPS 電源交換 R1. 8
- 炉制御室空調用エアコン温調サーモ交換 R1. 9
- モニタリングポスト線源校正、警報吹鳴試験、記録計校正、直流入力変換器校正、ループテスト、トリップテスト R1. 9
- ばい煙測定 R1. 9、R2. 3
- 原子炉棟屋上避雷針更新・機器設置 R1. 9
- ゲルマニウム検出器検出部修理 R1. 11
- 定期自主検査・保守点検（3 か月点検） R1. 12
- 冷温水発生機圧力計交換 R2. 1
- HOT 実験室空調機モータ更新 R2. 1
- 定期自主検査・保守点検（3、6 か月点検） R2. 1
- モニタリングポスト線源校正、警報吹鳴試験 R2. 2
- モニタリングチャンネル線源校正 R2. 2
- ガンマ線モニタ、速中性子モニタ、熱中性子モニタ点検校正 R2. 2
- 実験準備室天井クレーンガード部に天蓋取り付け R2. 3
- コンタマット新規購入 R2. 3

4. 廃止措置計画に伴う申請及び報告書等関連

- 核燃料輸送物設計承認申請書 H31. 4. 16.
- 核燃料輸送物設計承認申請書（補正） R 1. 10. 31.
- 核燃料輸送物設計承認申請書（補正） R 2. 1. 27
- 廃止措置実施状況報告書（H30 年第 4 四半期） H31. 4. 24
- 廃止措置実施状況報告書（H31 年第 1 四半期） R 1. 7. 26
- 廃止措置実施状況報告書（R1 年第 2 四半期） R 1. 10. 28
- 廃止措置実施状況報告書（R1 年第 3 四半期） R 2. 1. 28
- 原子炉施設保安規定変更承認申請書 R 1. 6. 13
- 原子炉施設保安規定変更承認申請書（補正） R 1. 7. 17
- 廃止措置計画変更承認申請書（補正） R 1. 7. 17
- 廃止措置計画書（変更）に関する報告書について R 1. 7. 17
- 廃止措置計画に関する報告書 R 1. 9. 30

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、岩田圭弘、井上薫、梶川絵理

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、31F-03, 04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X線源を用いた大型構造物の非破壊検査試験の実証実験に取り組んでいる。実橋梁での非破壊検査の実用化のために、950 keVと3.95 MeV X線源の可搬性の向上の検討が続いている。実験室内では、福島第一原発の核燃料デブリ分析への応用を目指して、燃料デブリ収納缶を想定した厚肉ステンレス容器を用意し、容器内の模擬デブリサンプルのCT画像取得の実証試験を行った。

レーザープラズマビーム源室では、上記の非破壊検査のための橋梁切り出しサンプルの保管およびオフライン調査を行っている。また、レーザー駆動マイクロイオンビーム源の実証試験のためのps-YAGレーザー装置の設置準備を進めている。

超電導工学実験室では、様々な外部資金により、実験が継続されている。具体的には、微粒子挙動評価実験装置(UTARTS)や凝縮基礎実験装置が活用されている。また、原子力規制委員会の人材育成事業で、高温バックリング実験装置が活用されている。

重イオン加速器室では、Fシリーズ(31F-06)ならびにHシリーズ(31H-01, 03, 06, 10, 13)の研究テーマとして、材料の腐食試験、ならびに、イオン照射試料の微細組織や機械特性評価に関する研究を実施している。ここで使用された装置は、走査電子顕微鏡（日立社製, S3400）、集束イオンビーム加工装置（日立社製, FB-2100）、低エネルギーArイオンスパッタリング（Linda社製, Gentle Mill IV5）、超微小硬さ試験機（島津社製, DUH-211S）、腐食試験装置（Akico社製）、引張り試験装置（島津社製, Autograph AG-Xplus）、透過電子顕微鏡（日本電子社製, JEM-2100）等である。得られた種々の研究成果は、学会発表ならびに科学論文誌にて報告している。

汎用実験室では、化学系の実験室の整備と運用を進めている。令和元年度は、実験環境の改善のため、新たに排風機を設置すると共に、消耗品等の拡充を図った。

3. 実験環境・サポート環境の整備

トリチウム実験室では、実験装置、備品等の解体、ドラム缶収納の作業を行い、トリチウム実験室の整備を実施した。実験室の床張り替えと空調設備工事を検討している。

機械室・電気室等では、適宜空調用設備や受電設備の保守・管理を進めている。

その他建屋については、屋上の冷却塔の撤去と雨漏り対策を実施した。

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, 橋本英子, 安見厚志

概要

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。しかし、加速器コンポーネントだけでなく建屋や電気設備等のインフラにも経年劣化が目についてきている。共同利用に支障をきたさぬよう、極力先回りして対策するよう心掛けている。

ライナック利用運転

今年度は以下の 9 テーマを受け付けた。

課題 No.	課題名	代表者 (所属)
31L-01	水溶液の放射線効果の研究	山下 真一 (東京大)
31L-02	パルス&プローブ法を用いる超高速反応の研究	室屋 裕佐 (東京大)
31L-03	不定比金属組成を精密に制御した超伝導体のピンニング特性に及ぼす電子線照射効果	下山 淳一 (青学大)
31L-04	高温・超臨界溶媒の放射線化学	室屋 裕佐 (大阪大)
31L-05	フォトカソード RF 電子銃の高性能化	上坂 充 (東京大)
31L-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)
31L-07	MA 分離抽出剤の放射線分解メカニズムの研究	樋川 智洋 (JAEA)
31L-08	放射線誘起活性種の時間分解ラマン分光	山下 真一 (東京大)
31S-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 (東京大)

18L の状況

通常、真空度 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa で運転するところを、数年前から不明の原因により 10^{-5} Pa に低下した状態で止むを得ず運転していた。細部にわたりリークチェックを行った結果、高周波窓 (RF 窓) であるという結論に至ったため、これを交換した結果、上流の電子銃付近の真空度は 10^{-7} Pa, 下流も 10^{-6} Pa に向上した。この良好な真空度は今年度も維持できており、安定したビームが提供できている。

35L の状況

18L と同様に RF 窓 (加速管への高周波導入用セラミクス製窓) の劣化に伴う真空度低下が数年前より見られており、順次交換を進めている。

マグネットの電源故障 (平成 29 年に偏向マグネット, 平成 31 年にステアリングマグネット) があり、いずれもハードとしての機能は損なわれておらず、問題のあった電源を交換した。他に三つのステアリングマグネットも電源が不安定になっていたため交換した。

マスターオシレータの周波数が設定値より高くなる傾向にあり、調査を続けている。

シングルパルス (半値幅 13 ps 程度) モードでビームが安定しなくなっており、SHB (Sub-Harmonic Buncher) に原因があると考えられ、来年度更新する予定である。

その他

クライストロン及びマグネットの冷却に用いている冷却系システムを更新した。RF 導波管のサーキュレータの水冷管劣化にともなう水漏れがあったため、類似品も含めて更新した。動作不調が生じた遮蔽扉はキースイッチの更新で復調した。放射線モニタも

老朽化が懸念され、更新を検討している。ブレーカ類の点検を進め、不良部品の交換を進めている。

建屋の老朽化（雨漏りや亀裂等）に対し、大学本部と協力しながら対策を検討している。

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、小藺雅美

- 抄録 -

平成 31 年度は 15 件（年度内の共同利用計画を含む）の共同研究テーマに対し、Fe、W、Si、O イオンビームを供給した。これまでのビーム供給時間は 24 週であった。

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 タンデトロンを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. 加速器、研究設備の保守状況

1.7MV タンデトロン加速器

平成 31 年度は加速器トラブルもなく、予定通りの共同利用を実施した。ただし、加速器の老朽化に伴う、真空計、ゲートバルブ、制御基板等の故障が散見されてきており、故障箇所を逐次、交換、修理しながら共同利用を行っている。

平成 31 年度は 15 件（年度内の共同利用計画を含む）の共同研究テーマに対し、Fe、W、Si、O イオンビームを供給した。これまでのビーム供給時間は 24 週であった。

3.75MV バン・デ・グラーフ加速器

震災ならびに機器の経年劣化によって生じた絶縁ベルトの損傷が著しく、再稼働に向けて大きな修繕が必要である。そのため、平成 31 年度の共同利用では、マシンタイムの配算は実施しなかった。

研究設備全体

建屋空調や実験用冷却水等の建屋インフラに当たる機器については、使用から 20 年強を迎え、修繕が必要である。現在、共同利用が順調に進んでいる 1.7MV タンデトロン加速器に関わるインフラ設備を優先し、その更新を進めている。

レーザープラズママルチビーム研究

研究代表者氏名：上坂充(東大院工)

共著者氏名：上田徹,尾関政文,近藤勇佑,楊健(東大院工), 小山和義(高エネ研),坂本文人(秋田高専),黄衍介,Kuan-Yan-Huang, Tze-chih Liu (国立精華大学)

卓上マイクロイオン加速システムのメインのコンポーネントのイオン源、光伝導スイッチの開発を行い、さらにその DNA 放射線損傷動的解析への適用のための、既存加速器でのマイクロビーム細胞照射実験を実施した。結果、将来有望視されている内用 α 線がん治療をにらんで、 α 線による DNA 損傷トラックの実測に成功した。

キーワード: 卓上マイクロイオンビーム源、ガラスキャピラリー、放射線誘起 DNA 損傷修復、DNA 損傷修復時間分解分析、GFP-XRCC1、 γ H2AX、Ac225 α 線がん治療

1. 研究成果

卓上マイクロイオン加速システムのメインのコンポーネントのイオン源、光伝導スイッチの開発を行い加速のための試験を行った。レーザー強度を上げるためレーザー増幅器を増強し 1J 近い出力が得られるようになった。これを利用してイオン源についても 6 価の炭素イオンでもさらに大電流が得られるようになった。また光伝導スイッチについては GaAs では耐久性に問題があったため、協力関係にある中国 SICCAS から供給された SiC の

光伝導スイッチの試験を行い、耐電圧に関しては 20kV 以上で安定に動作する事が確認でき、これによって高い加速電圧でイオンが加速可能となった（図 1 参照）。

マイクロイオンビーム源の改良については、当初光伝導スイッチを用いた加速スキームを想定していたが、加速部には同軸構造を有するスネーク型resonant ring構造を採用することを検討し、1周構造の同軸加速構造の基礎検討を行った。これにより、多段加速スキームをさらにコンパクトにするシステム設計ができた。

α線内用療法を念頭におき、既存の理化学研究所のペトロロン加速器とガラスキャピラリー（出口内径：10μm，フタ厚：7.5μm.）によるHe²⁺イオンマイクロビーム（4.5 MeV）照射にて、RPE細胞のDNA損傷修復可視化実験を行った。照射時の細胞の乾燥影響を防ぐために、ペリスタルティックポンプを用いて培養液をサンプルに滴下しながら

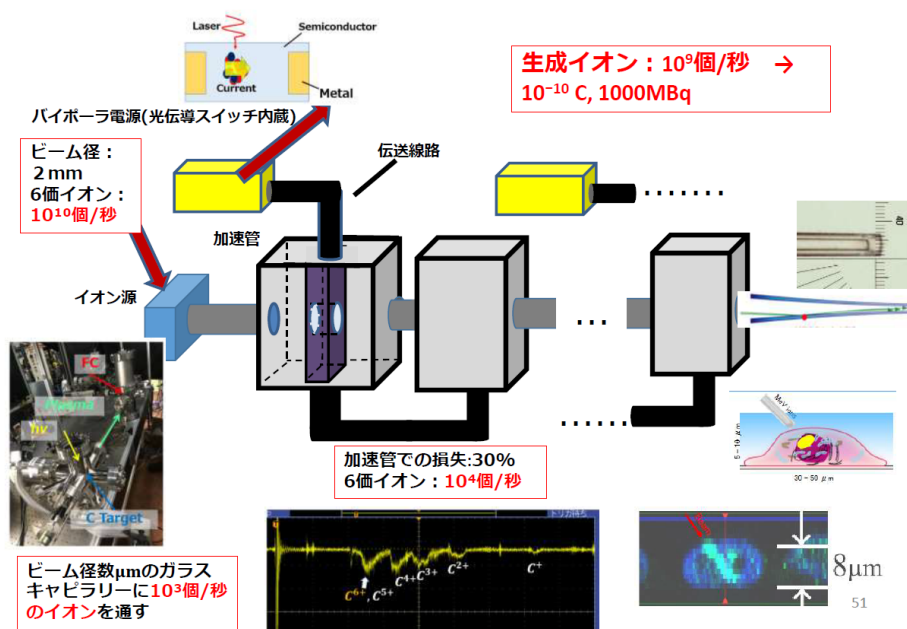


図1. 卓上レーザー光伝導体スイッチマイクロイオンビーム加速システムの開発概要

ら照射できるようなセットアップを組み立てた。このセットアップで、ペレットロン加速器を用いたガラスキャピラリーマイクロビーム照射法により、自然損傷が比較的少ないRPE細胞で線状イオントラックの可視化実験を行なった。ガラスキャピラリーの出射口を細胞に押し付けるようにして照射を行い、蛍光免疫染色によりヒットポイントを可視化することに成功した。

成果リスト

- 【1】 神野智史、金崎真聡、松井隆太郎、岸本泰明、小田啓二、山内知也、上坂 充、桐山博光、福田祐仁、「マイクロメートルスケール水素クラスター発生装置の開発と multi-MeV 高純度陽子線の高繰り返し発生」、プラズマ・核融合学会誌、Vol.95、No.10、pp.483-489、2019 (JINNO Satoshi, KANASAKI Masato, MATSUI Ryutaro, KISHIMOTO Yasuaki, ODA Keiji, UESAKA Mitsuru, KIRIYAMA Hiromitsu and FUKUDA Yuji, “Development of Micron-Scale Hydrogen Cluster Generation System and High Repetitive Generation of Multi-MeV, Proton Beams”, The Journal of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Vol.95, No.10, pp.483-489, 2019)
- 【2】 Mitsuru Uesaka, “Updated Applications of Advanced Compact Accelerators”, Proceedings of 2019 North American Particle Accelerator Conference (NAPAC), WEPLM23, 2019
- 【3】 「小型電子加速器応用」、第1回応用超伝導加速器コンソーシアムセミナー、令和元年12月5日
- 【4】 “Advanced Compact Linacs for Radiation Medicine and On-site Nondestructive Inspection” Accelerator on a Chip 2019, Hamamatsu, Japan, September 13 2019
- 【5】 “S-band linac for $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}/^{225}\text{Ac}$ production / X-band linacs X-ray & neutron sources for bridge inspection and nuclear fuel debris analysis / Laser dielectric accelerators for radiation biology”, Seminar at SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA, USA, August 20, 2019
- 【6】 Yuji FUKUDA, Masato KANASAKI, Satoshi JINNO, Keita SAKAMOTO, Takafumi ASAI, Kazuki SHIMIZU, Alexander S. PIROZHKOV, Akito SAGISAKA, Koichi OGURA, Yasuhiro MIYASAKA, Kotaro KONDO, Ryutaro MATSUI, Kunihiro MORISHIMA, Satoshi KODAIRA, Keiji ODA, Tomoya YAMAUCHI, Mitsuru UESAKA, Kiminori KONDO, Tetsuya KAWACHI, Masaki KANDO, Hiromitsu KIRIYAMA, Yasuaki KISHIMOTO, "Generation of Quasimonoeenergetic Proton Bunch via Interaction of Micron-Scale Hydrogen Cluster Targets with PW-Class Laser Pulses", 11th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications (IFSA2019), Osaka, 2019/9
- 【7】 Mitsuru Uesaka, “Updated Applications of Advanced Compact Accelerators”, 2019 North American Particle Accelerator Conference (NAPAC2019), Lansing, Michigan, USA, September 1-6, 2019,
- 【8】 酒井雅哉、池田時浩、柴田淳史、泉 雅子、竹本健人、上坂 充、「 α 線治療のためのHeイオンマイクロビームDNA照射分析の基礎研究」、日本原子力学会2020年春の年会、福島県福島市、2020/3/16
- 【9】 竹本健人、柴田敦史、秋光信佳、酒井雅哉、上坂 充、「細胞への放射線照射による遺伝子発現変動解析」、日本原子力学会2020年春の年会、福島県福島市、2020/3/16
- 【10】 酒井雅哉、池田時浩、柴田淳史、竹本健人、上坂 充、「 α 線治療のためのHeイオンマイクロビームDNA照射分析の基礎研究」、日本原子力学会2019年の秋の大会、富山県、2019/9/12
- 【11】 酒井雅哉、池田時浩、柴田淳史、竹本 健人、上坂 充、「 α 線治療のためのHeイオンビームDNA照射分析の基礎研究」、第16回日本加速器学会年会、2019/8/2
- 【12】 橋本英子、山下真一、上田 徹、安見厚志、土橋克広、三津谷有貴、草野譲一、田辺英二、上坂 充、「東大ライナック・レーザー施設報告 2019」、第16回日本加速器学会年会、2019/7/31-8/1(ポスター)

31F-03

X バンド加速器の応用研究

上坂 充¹、楊 健¹、土橋 克広¹、高橋 浩之¹、

藤原 健²、草野 穰一³

1: 東京大学、2: 産業技術総合研究所、3: (株)アキュセラ

可搬型 950keV/3.95MeV X 線・中性子線源により、東京電力福島第 1 発電所の燃料デブリの、その場での U 量の分析を行えるシステムの研究開発を行った。X 線 CT によって、模擬デブリの成分分析に成功した。将来は、U 量有無を判定して、使用済み燃料・放射線廃棄物に仕分けでき、保管費の大幅節約に貢献する。

キーワード： 可搬型 950keV/3.95MeV X 線・中性子線源、福島燃料デブリその場分析、U 量有無の仕分けと保管

1. 研究成果

経済産業省・東京電力ホールディングスが 2019 年 12 月に更新した福島第一原子力発電所（以下、1F）の廃炉ロードマップでは、2021 年より燃料デブリの試験的取り出しが開始され、その後、段階的に取り出し規模を拡大していくことが計画されている。取出した燃料デブリは、ユニット缶（直径約 200mm、SUS メッシュ）に収納のうえ、ステンレス製の収納缶に収納保管される計画である。燃料デブリの保管にあたっては、大規模な敷地が必要視されていることから、燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けのための技術開発が廃炉作業の重要成功因子であると考えられる。1,2,3 号炉に合計 1,800t ある燃料デブリを、原子炉建屋内のその場で、迅速に U の量が判定できて、U を含む核廃棄物と、含まない放射性廃棄物とに仕分けでき、それぞれ収納缶格納施設と、保管施設に別々に保管できれば、そこでの費用は数百億円の節約になると考えられる。

当グループは文科省日英英知廃炉加速化プログラム「可搬型加速器 X 線源・中性子源によるその場燃料デブリ元素分析および地球統計学手法を用いた迅速な燃料デブリ性状分布の推定手法の開発」で 2021 年からの現場適用を目指して、2 色 X 線 CT・中性子共鳴透過分析システムを開発し、200mm 直径 SUS 製収納缶（ユニット缶模擬体）に燃料デブリが封入されることを想定し、模擬燃料デブリで、成分分析・U 濃度推定を原理実証してきた。重要な成果は以下である（図 1 参照）。



図1. 日英英知事業(2017-2020)の成果

- 950keV/3.95MeV 2 色 X 線 CT により実機収納缶中の模擬燃料デブリの 3 次元 CT を 10 分で行い、混合部以外の成分判定に成功した。
- 3.95MeV 中性子源による 2.5mTOF(Time Of Flight)中性子共鳴透過分析（Nuclear Resonance Transmission Analysis;NRTA）で W(U 模擬)・In(Pu 模擬)の吸収測定を実証。最小サイズは 20mmx20mm1mm で 2 時間

掛かった。

以上の成果をもとに、現場適用性の視点で東京電力ホールディングス株式会社福島第一廃炉推進カンパニー（以下、東電担当部署）と実用化に向けた議論を密に行っている、段階的に規模を拡大する燃料デブリの取り出しに備え、上記ユニット缶入り燃料デブリを取り出した場所、または収納缶への収納場所で、迅速に臨界管理が必要かどうかの U 濃度基準値※以上か未滿を判定する仕分け装置システムを実現する。装置は可搬型 950keV/3.95MeV X 線・中性子源（950keV:50kgx3 箱）、および 2 色 X 線 CT（空間分解能 0.5mm）ステージ、1mTOF(高速)中性子共鳴透過分析(Neutron Resonance Transmission Analysis; NRTA)装置(1 時間)、解析コンピュータよりなる。図 2 にそのスキームを示す。

装置は可搬型 950keV/3.95MeV X 線・中性子源（950keV:50kgx3 箱）、および 2 色 X 線 CT（空間分解能 0.5mm）ステージ、1mTOF(高速)中性子共鳴透過分析(Neutron Resonance Transmission Analysis; NRTA)装置(1 時間)、解析コンピュータよりなる。

図 2 にそのスキームを示す。

950keV/3.95MeV システムの放射線安全管理は、それぞれ電離放射線障害防止規則・放射線障害防止法に準じて行う。950keV X 線源の場合、電子エネルギーが 1MeV 未滿のため、電離放射線障害防止規則に準じて、いかなる場所でも使用可能である。一方、3.95MeV X 線/中性子源は放射線障害防止法では橋梁検査に限り、屋外使用が可能である。1F 敷地内は大部分が管理対象区域であるものの使用するためには原子力規制庁による規制緩和が必要である。このレギュラトリサイエンス(Regulatory Science)も本研究の重要テーマである。その全体スキームを図 3 に示す。

成果リスト

- [1] Mitsuru Uesaka, Issei Ozawa, Yudhitya.Kusumawati, Yuki Mitsuya, Tomooki Shiba, “On-site Quantitative Nuclear Fuel Debris Analysis by Portable 950 keV / 3.95 MeV X-ray / Neutron Sources in Fukushima”, Modern Environmental Science and Engineering, MESE20190922-1, 2020
- [2] Mitsuru Uesaka, “Updated Applications of Advanced Compact Accelerators”, Proceedings of 2019 North American Particle Accelerator Conference, WEPLM23, 2019

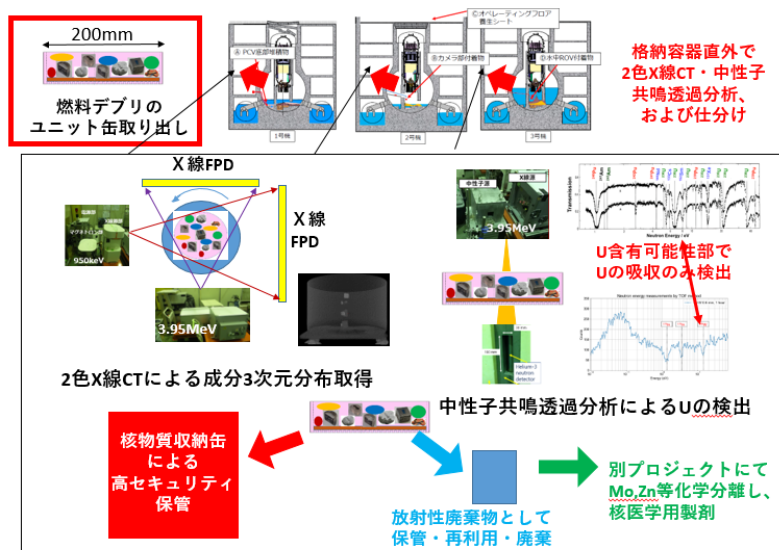


図 2. 2024年からの本格取り出し時U有無仕分け

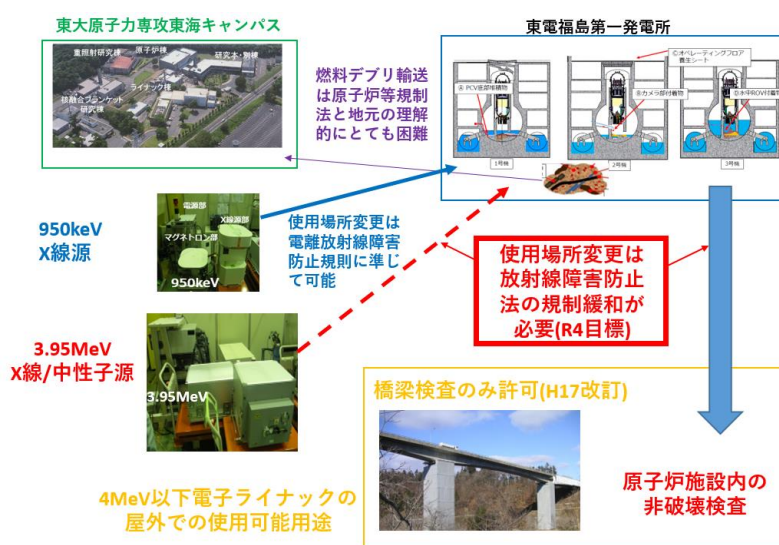


図 3. 可搬型3.95MeV X線源/中性子源の1F,2,3号炉建屋内使用のためのレギュラトリサイエンス

海洋試料中のストロンチウム 90 分析として、自動電離準位を用いた同位体選択的共鳴イオン化手法の開発を行っている。3 本の半導体レーザーを用いた波長 460.9 nm–655.2 nm–426.3 nm の 3 段励起スキームにおいて、イオン加速電場による自動電離準位の DC シュタルクシフトを観測し、分析に与える影響について考察した。

キーワード： 共鳴イオン化, ストロンチウム, レーザー, 自動電離準位, シュタルクシフト

1. はじめに

ストロンチウム 90 (^{90}Sr , 半減期 28.8 年) は、東京電力福島第一原子力発電所の事故で環境中に放出された長半減期の純 β 崩壊核種であり、カルシウムと同族であるため体内摂取に伴う内部被ばくの問題が指摘されている。従来の放射線計測法では娘核種のイットリウム 90 (^{90}Y , 半減期 64.1 時間) との放射平衡に数週間程度の時間が必要であるため迅速分析は困難であり、一般的な質量分析法ではジルコニウム 90 (^{90}Zr) の同重体干渉のほか Sr 安定同位体濃度の高い海洋試料では主要な安定同位体 ^{88}Sr 由来のスペクトル干渉が問題となる。

本研究では、高い元素・同位体選択性を持つ ^{90}Sr 原子の共鳴イオン化と、イオントラップによる $^{90}\text{Sr}^+$ 単一イオンの捕獲・結晶化を組み合わせた分析装置の開発を行っており、海洋試料等をターゲットとした ^{90}Sr の迅速分析への適用性を評価している。

2. 自動電離準位を用いた 3 段励起共鳴イオン化スキーム

Sr 原子の共鳴イオン化の中で、レーザー 3 本により自動電離準位 (Sr^+ イオンの $4d\ ^2D_{3/2}$ 準位に収束する Rydberg 系列で有効主量子数 $n_{\text{eff}} \sim 39$) に遷移させるスキーム:(A) 460.9 nm–655.2 nm–426.3 nm 及び(B) 689.4 nm–487.4 nm–393.8 nm が有効である (図 1)。2 通りのスキームを比較すると(A)は高い遷移効率、(B)は高い同位体選択性が期待されるため、試料中の ^{90}Sr 濃度及び同位体存在度に応じて測定に使用するスキームを選択する。使用するレーザーは外部共振器半導体レーザー (ECDL) であり、波長 689.4 nm については吸収幅が狭いため周波数安定性の高い干渉フィルター型 ECDL を使用し、他波長についてはシンプルな構造である Littrow 型 ECDL を使用する。

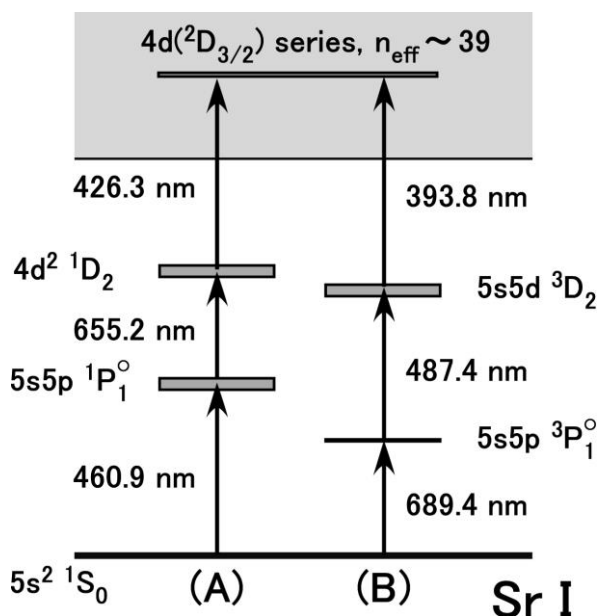


図 1 自動電離準位を用いた Sr 原子の共鳴イオン化スキーム

3. DC シュタルクシフトの観測

共鳴イオン化で遷移させる自動電離準位は有効主量子数 n_{eff} が大きいと、外部電場の影響を受けやすく結果としてエネルギーレベルがシフト (DC シュタルクシフト) する。3 段目の周波数スペクトル幅が広くなり同位体選択性の低下につながるため、分析の際は電場がほぼゼロの領域で共鳴イオン化する必要がある。一方で、生成した Sr^+ イオンは電場で加速されて MCP 検出器で検出される。そのため、 Sr^+ イオンの加速にはメッシュ及び円孔の 2 枚の電極を使用し、中心付近の局所的に電場がほぼゼロの領域にレーザー 3 本を集光照射して Sr 原子を共鳴イオン化するように電極電圧を調整した。

メッシュ電極の印加電圧を 45 V に固定し、検出器側である円孔電極の印加電圧を変えて図 1(A) のスキームによる ^{88}Sr 共鳴イオン化への影響を調べた。円孔電極の印加電圧 29–56 V の範囲で測定した 3 段目 (波長 426.3 nm) 周波数スペクトルを図 2 に示す。印加電圧約 50 V の条件がイオン化領域の電場ゼロに相当し、幅が狭くピーク信号量の高いスペクトルが得られた。印加電圧を下げて電場を大きくするにつれてピーク周波数は低い側にシフトし、幅が広くピーク信号量が低下する傾向が観測された。自動電離準位を用いた同位体選択的共鳴イオン化では同位体シフトと呼ばれる共鳴周波数の違いを利用して特定の同位体を識別するため、スペクトル幅が狭くなるよう電極の印加電圧を調整することが重要となる。

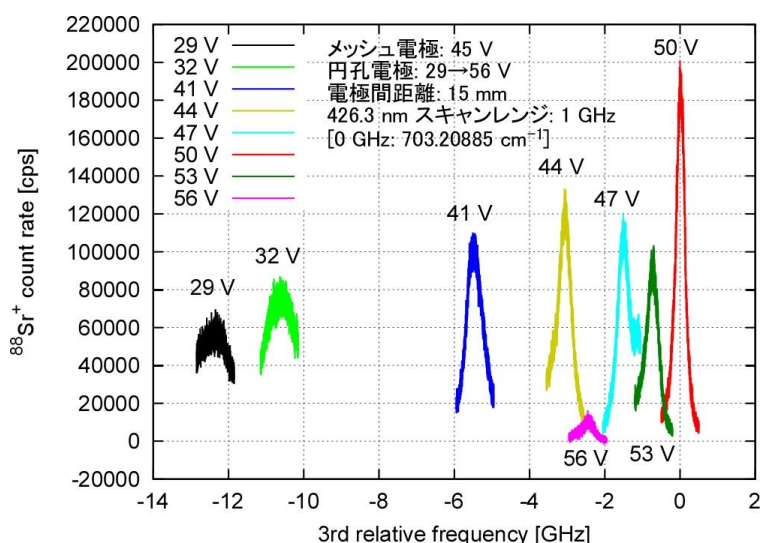


図 2 円孔電極の印加電圧 29–56 V における波長 426.3 nm 周波数スペクトル

4. まとめと今後の予定

波長 460.9 nm–655.2 nm–426.3 nm の 3 段階 Sr 共鳴イオン化スキームにおいて、イオン化領域の電場が 3 段階 (波長 426.3 nm) 周波数スペクトルに与える影響を調べた。今後は、スペクトル幅が狭くなるよう Sr^+ イオン加速用電極の印加電圧を調整し、 ^{90}Sr 光学的同位体選択性の評価及び実試料分析を予定している。

成果リスト

- [1] Yoshihiro Iwata et al., International Conference Merger of the Poznan Meeting on Lasers and Trapping Devices in Atomic Nuclei Research and the International Conference on Laser Probing (PLATAN2019), 口頭発表 (2019).
- [2] Donguk Cheon et al., International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research (FDR2019), 口頭発表 (2019).
- [3] Yoshihiro Iwata et al., Review of Scientific Instruments 90 (2019) 123002 (8 pages).
- [4] Yoshihiro Iwata et al., Hyperfine Interactions 241 (2020) 29 (8 pages).
- [5] 岩田圭弘 他, 日本原子力学会 2020 年春の年会, 口頭発表 (2020) [新型コロナウイルス感染の影響で開催中止].

To develop the higher performance nuclear fuel cladding materials for nuclear fission reactors, the effects of the doping of Nb into Zr on the degradation behaviors by irradiation were investigated in this study, mainly from the viewpoints of mechanical property change and microstructure evolution. The hardening-microstructure correlation was further discussed with the application of the appropriate hardening model.

Keyword: nuclear fuel cladding, advanced structural component material; degradation; hardening; Zr-based alloys

1. Introduction

Zirconium (Zr) alloys are extensively utilized in the core of nuclear fission reactors, such as nuclear fuel claddings, because of their low neutron absorption cross-section, excellent corrosion resistance, and satisfied mechanical properties. With the recent demands of high burn-up and extension of fuel-cycle operation in nuclear reactors, advanced materials with a higher performance have been continuously required. For the last decades, Nb-bearing nuclear fuel cladding materials have been developed to exhibit a superior performance to the conventional Zircaloy alloys. In our previous studies, we have pointed out that the addition of Nb into Zr can restrain the recrystallization process, reduce the grain size, and increase the number density of Nb-rich precipitates. Such microstructural change brought by Nb addition is presumed to influence the in-pile performance of Zr based alloys, for example the degradation behavior by irradiation, which has not been clarified yet. Achieving these insights is considered of great necessity to a better understanding of the environment degradation behaviors of nuclear fuel claddings and the high performance materials development for future application. Therefore, in this study, the effects of the doping of Nb in Zr based alloys on the degradation behaviors by irradiation were investigated from the viewpoints of mechanical property change and microstructure evolution.

2. Experimental methods

Two types of dilute Zr-Nb alloys were utilized in this study, i.e., solute-type Zr_{0.2}Nb with solute Nb atoms and precipitate-type Zr₂Nb with both solute and excessive Nb atoms. These alloys were prepared by arc-melting method, followed with the repeated cold-working and thermal treatments, to achieve a recrystallized microstructure. Specimens were then prepared and subjected to ion irradiation at 573 K within a fluctuation of ± 5 K, and the irradiation dose achieved here was ~ 0.1 dpa. After irradiation, nano-indentation tests were firstly performed to evaluate the mechanical property change by irradiation, and secondly microstructure was characterized by electron backscatter diffraction (EBSD) and transmission electron microscopy (TEM).

3. Results and discussion

EBSD-IPF maps and TEM observation showed the well-equiaxed grains and low density of dislocation in both alloys, revealing the completion of recrystallization. No obvious secondary phase particle was observed in Zr_{0.2}Nb alloy, whereas a high density of β -Nb precipitates was confirmed in Zr₂Nb alloy. The average size and number density of β -Nb precipitates

were 33 nm and $3.3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, respectively. Prior to irradiation, the hardness of Zr2Nb was much greater than that of Zr0.2Nb, which is ascribed to three factors: solid solution hardening from solute Nb atoms, grain boundary hardening, and precipitation hardening from β -Nb particles. With the presence of irradiation, significant hardening was confirmed for both alloys. The increase in hardness for Zr0.2Nb and Zr2Nb was respectively ~ 0.87 and ~ 0.96 GPa, corresponding to a hardening ratio of 37.2% and 33.4%, revealing that the hardening effects are comparable within these two specimens. Based on TEM characterization, it is found numerous loops were formed due to irradiation. The average size of these loops was respectively determined as 5.4 ± 2.6 and 5.8 ± 2.7 nm for Zr0.2Nb-0.1dpa and Zr2Nb-0.1dpa, indicating that the size of the loops is not greatly influenced by the doping of Nb. From the detailed TEM observation made at the adjacent to a grain boundary or grain boundary, where a depleted zone with a less amount of irradiation loops could be seen. It suggests that the doping of Nb into Zr is expected to enhance the irradiation resistance by mitigating the point defect formation. No obvious difference in loop size or number density and irradiation-induced hardening is presumed to be correlated with the accelerated irradiation using high flux ion irradiation rather than the neutron irradiation with a much lower dose rate. With the application of dispersed barrier hardening model, it is further revealed that the loops were mainly responsible for the hardening in Zr0.2Nb alloy, whereas in the case of Zr2Nb alloy, another minor hardening from irradiation-induced Nb-rich nano-cluster has to be taken into account, in addition to the irradiation loops.

4. Summary

In this study, the degradation behaviors by ion irradiation in dilute Zr-Nb alloys were investigated by the joint analysis of nano-indentation, electron backscatter diffraction, and transmission electron microscopy. Obvious hardening by irradiation was confirmed in both Zr0.2Nb and Zr2Nb alloys, despite that the increase in hardness was comparable with each other. TEM characterization suggests that doping of Nb into Zr is capable to enhance the irradiation resistance by mitigating the point defect formation due to the improved sink strength. The insights here are useful for a better understanding of the environment degradation behaviors of nuclear fuel claddings and for the advanced materials development for future applications.

Achievement list

- [1] H.L. Yang, S. Kano, J. McGrady, Y. Matsukawa, D.Y. Chen, K. Murakami, H. Abe, *Scripta Materialia* **162**, 209-213 (2019).
- [2] H.L. Yang, S. Kano, J.J. Shen, J. McGrady, Y.F. Li, D.Y. Chen, K. Murakami, H. Abe, *Journal of Nuclear Materials* **531**, 152016 (2020).
- [3] 楊 会龍、叶野 翔、ジョン マックグレディ、陳 東鉞、申 晶潔、村上 健太、阿部 弘亨、12Cr-ODS フェライト鋼におけるイオン照射による異方硬化挙動、日本金属学会 2020 年春期大会.

1. 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻
2. 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻原子力国際専攻

本研究では、福島県内で採取された、比較的セシウム の 滞在時間が長い土壌や河川等の堆積物を対象に、原試料あるいは抽出試料中の放射性セシウム濃度の測定を行い、放射性セシウム の 化学形や交換性を評価することで、その移動度や生物学的利用能を調べた。

キーワード： 放射性セシウム、DGT デバイス、福島、移動度、生物学的利用能

1. 本文

研究の目的

東京電力福島第一原子力発電所事故によって、原発周囲の広範囲が放射性セシウム (^{137}Cs) によって汚染された。その後の除染活動により、居住地では除染が進んでいるものの、山林の大部分は手つかずの状態である。長期的な放射性セシウムによる汚染状態の変化を理解し、近隣住民の被ばく低減につなげるためには、放射性セシウム の 環境動態の理解が必要である。本研究では、環境の中でも、比較的セシウム の 滞在時間が長い土壌や河川等の堆積物を対象に、原試料あるいは抽出試料中の放射性セシウム濃度の測定を行い、放射性セシウム の 化学形や交換性を評価することで、その移動度や生物学的利用能を調べることを目的としている。

実験方法

本研究では、福島県内で土壌試料や河川、溜池、河口の堆積物試料などの環境試料を採取する。また、それらの原位置で、セシウム に対して特異的な吸着剤を含む樹脂を備えた DGT (diffusive gradient in thin films) デバイスと呼ばれるパッシブサンプラーに、直接、交換可能なセシウム を直接トラップさせる。これらの試料中の ^{137}Cs 濃度を Ge 半導体検出器を用いて評価する。また、汎用準備室にて、採取した土壌や堆積物試料に対する逐次抽出実験を行い、抽出液中の ^{137}Cs 濃度を上述の Ge 半導体検出器を用いて評価する。これらの結果から、放射性セシウム の 全濃度や交換可能成分の濃度、異なる化学形にあるセシウム の 濃度を調べ、移動度や生物学的利用能の理解に繋げる。

DGT デバイスは、環境中の微量金属イオンの置換活性成分をその場測定するために、1992 年に W. Davison らによって開発されたサンプリング装置である¹ (図 1)。DGT デバイスは、吸着ゲル、拡散ゲルと呼ばれる 2 枚のアクリルアミド製のハイドロゲル膜を重ね、その上にメンブレンフィルターを設置し、ポリエチレン製のホルダーで挟み込んだ構造を持つ。吸着ゲルには、測定対象元素に合わせた吸着剤が担持されており、環境中の金属イオンはホルダー開口部から、メンブレンフィルター、拡散ゲルを通過し、吸着ゲル内の吸着剤によってデバイス内部に固定される。本研究では、吸着ゲルとして、セシウム に対する選択性の高いフェロシアン化銅 (CFCN) をポリアクリルアミドゲルに担持させたものを用いた。DGT デバイスは、適用環境に応じて、半径 1.0 cm の円形状の開口部を持つ水環境用 (図 1 左) と、2.0×14.0 cm² の長形状の開口部を持つ土壌環境用 (図 1 右) の 2 つが存在する。

2019 年度は、特に、本郷キャンパスの実験室で作成した水環境用 DGT デバイス (図 1 左) を、日本原子力研究開発機構の協力の下、福島県内の河川 4 地点の原位置に設置し、一定期間後で、回収した。設置期間は、2019 年 8 月 28 日から 9 月 2 日までの 5 日間であり、設置箇所は請戸川の大柿ダム上流域 (UKER-19)、下流域 (UKER-18)、高瀬川下流域 (TAKR-3)、熊川河口域 (KUMR-2) に設置した。使用した DGT デバイスは、吸着ゲル (直径 24.5 mm、膜厚 0.5 mm)、拡散ゲル (直径 24.5 mm、膜厚 0.5 mm)、ポアサイズ 0.45 μm のメンブレンフィルター (A045A025, ADVANTEC) をこの順に重ねて組み上げ、イオン交換水中に保管したまま設置場所まで運搬した。回収後、メンブレンフィルター表面の付着物をイオン交換水で洗い流し、イオン交換水中に保管して実験室に運び、Ge 半導体検出器 (GMX-type, ORTEC 社) を用いて吸着ゲルに取り込まれた ^{137}Cs の放射能を測定した。設置期間中に 30 mm 弱の降雨があり、河川の水位が上昇したことが確認された。また、各設置場所で河川水試料を採取し、試料に含

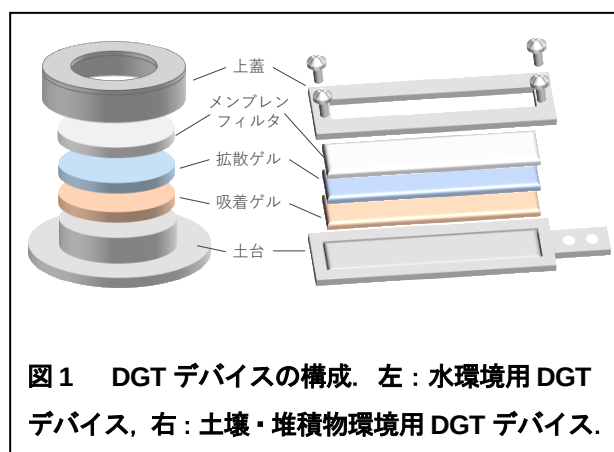


図1 DGT デバイスの構成。左：水環境用 DGT デバイス、右：土壌・堆積物環境用 DGT デバイス。

れる溶存態 ^{137}Cs 濃度、懸濁態 ^{137}Cs を測定した。樹脂にトラップされた交換可能な ^{137}Cs の濃度を Ge 半導体検出器を用いて評価した。また、合わせて、同地点で回収した土壌試料、河川水中の ^{137}Cs 濃度を決定し、DGT デバイスの測定から得られる置換活性成分との比較を行った。

結果と考察

水環境用 DGT デバイスの河川への適用結果 C_{DGT} と河川水試料に含まれる懸濁態 ^{137}Cs 濃度 C_{solid} を表 1 に示した。河川水試料に含まれる溶存態 ^{137}Cs 濃度は Ge 半導体検出器を用いた放射能測定で検出限界以下であった。比較のために、2017 年の夏季における請戸川、高瀬川の溶存態、懸濁態 ^{137}Cs 濃度 $C_{\text{dis}}^{\text{ref}}$ [Bq/L], $C_{\text{solid}}^{\text{ref}}$ [Bq/g] のモニタリング結果を併記した²⁾。表 3 から、 C_{dis} と比較して C_{DGT} の値が、TAKR-3 の場合で約 11 倍、UKER-18、19 の場合で約 4 倍となっており、河川水中の ^{137}Cs 置換活性成分の濃度が溶存態 ^{137}Cs 濃度よりも大きいことが明らかになった。懸濁物質中の鉱物成分に吸着している ^{137}Cs が液相中に脱離し、DGT デバイスに取り込まれたために C_{DGT} が大きな値を示したと考えられる。

図 2 に懸濁態 ^{137}Cs 濃度と、 ^{137}Cs 置換活性成分のうち鉱物からの脱離によるフラクションの濃度 C_{disorble} の関係を示した。ここで C_{disorble} については、表 4 の 2017 年モニタリング結果から河川水中における ^{137}Cs の分配係数が 100 g/L 程度であるから、 C_{solid} にこれに乗じることで DGT デバイス設置時における溶存態 ^{137}Cs 濃度を推定し、 C_{DGT} から除することで評価した。UKER-18 を除いて懸濁態 ^{137}Cs 濃度と C_{disorble} の間に直線関係が存在し、このことから鉱物に吸着した ^{137}Cs のうち一定のフラクションが置換活性であることが示唆された。UKER-18 で C_{disorble} が小さくなったのは、DGT デバイスの設置箇所の河床堆積物が粘土質であり、河川水中に再浮遊した ^{137}Cs を高濃度に保持する粘土鉱物が採取した水試料に含まれていたためだと考えられる。

結論

Cs 用 DGT デバイスを作成し、水環境条件下で機能することを確認した。また、河川水への適用結果から、河川水への DGT デバイスの適用結果から、懸濁物質の鉱物成分に吸着した ^{137}Cs の一部が置換活性であることを明らかにした。このことは、河川水中に存在する ^{137}Cs のうち、生物が利用可能なフラクションが過小評価されてきた可能性を示唆している。

参考文献

1. W. Davison, H. Zhang, *Nature*, **367**, 545 (1994).
2. F. Nagao et al., JAEA-Research 2019-002 (2018).

成果リスト

- [1] 福岡将史, 東京大学大学院, 修士論文 (2020).
- [2] 福岡将史, 斎藤拓巳, 藤原健壮, 飯島和毅, 「DGT による Cs-137 の交換可能画分サンプリング(2) DGT デバイスの福島環境への適用結果」, 日本原子力学会 2019 年秋の大会, 富山大学, 2019.9.
- [3] 福岡将史, 斎藤拓巳, 田野井慶太郎, 小林奈通, 藤原健壮, 寺島元基, 「DGT による ^{137}Cs 交換可能画分サンプリング(3) DGT デバイスの福島森林土壌への適用結果」, 日本原子力学会 2020 年春の年会, 福島大学, 2020.3.

表 1 2019 年 8 月に河川水に適用した DGT デバイスの評価結果と 2017 年の夏季における溶存態、懸濁態 ^{137}Cs 濃度のモニタリング結果.

設置地点	C_{DGT} [Bq/L]	C_{solid} [Bq/g]	$C_{\text{dis}}^{\text{ref}}$ [Bq/L]	$C_{\text{solid}}^{\text{ref}}$ [Bq/g]
KUMR-2	0.23 ± 0.05	5 ± 1	-	-
TAKR-3	0.45 ± 0.07	9 ± 3	0.04	4
UKER-18	0.89 ± 0.12	77 ± 8	0.2	20
UKER-19	0.77 ± 0.11	23 ± 6	0.2	20

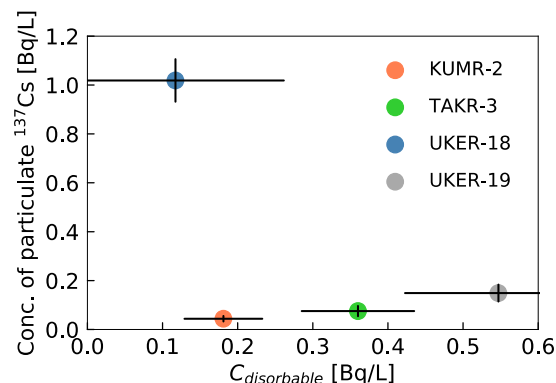


図 2 河川水試料に含まれる懸濁態 ^{137}Cs 濃度 [Bq/L] と、 ^{137}Cs 置換活性成分のうち鉱物からの脱離によるフラクションの濃度 C_{disorble} [Bq/L] の関係.

山下真一¹, 室屋裕佐², 翁汉钦^{1,3}, 林銘章³, 于嵩¹, MCGRADY John^{1,4}

1: 東京大・院・工, 2: 大阪大・産研, 3: 中国科技大, 4: 原子力機構・基礎工

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し、その後の時間挙動を直接追跡している（パルスラジオリシス法）。放射線によって誘発される DNA 損傷の初期過程、放射線を利用した高分子材料の機能化、有害物質の分解、リソグラフィ基礎過程、など様々な水溶液系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： 放射線効果, パルスラジオリシス法, ラジカル, 過渡吸収, 時間分解測定

1. はじめに

水は人類の生活環境においてもっともありふれた物質の一つであり生体主成分でもある。放射線の生体影響のメカニズム解明だけでなく、様々な分野での放射線利用を高度化するためにも、放射線場における水の分解や水溶液中での化学反応は重要である。LINAC からの短パルス電子ビームを用いることで、放射線により誘発される現象を時間分解で観測することができる（パルスラジオリシス法）。本課題では、光吸収の時間変化から水溶液試料中での化学反応を追跡している。

2. パルスラジオリシス法

本課題で用いているパルスラジオリシス実験体系の模式図を図 1 に示す。

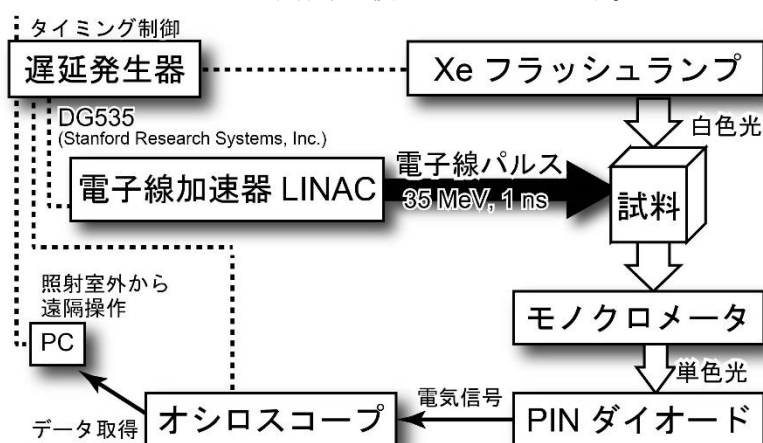


図1 ナノ秒パルスラジオリシス実験体系

加速エネルギー 35 MeV, 直径 5 mm, パルス半値幅 1-10 ns の電子ビームを用いている。パルスあたりの吸収線量は最大 100 Gy 程度であり、必要に応じて Cu や Pb 等の減弱板を用いて減少させている。遅延発生器 DG535/DG645 (Stanford Research Systems) を用い、電子線パルスと分析光のタイミングを揃え（同期制御）、照射にともなう透過光強度の変化を観測している。機器の遠隔操作ならびにデータ処理には LabVIEW (National Instruments) を用いている。

フラッシュランプ LII-SA3H/SAX-100H/SA-200F/LB-5 (Nissin Electronics) で白色光を発生させ、レンズによりサンプル中の電子線照射野で集光させ、これをレンズで平行光に戻し、分光器の手前で再度レンズにより集光させている。図に示す通り適宜ミラーも用いている。分光器手前には迷光を除去するためのバンドパスフィルタを適宜入れ、分光器 SPG-120S (Shimadzu) により任意の波長 (260-1100 nm) のみを取り出し、これを PIN フォトダイオード S1722-02Silicon (Hamamatsu) で電気信号に変換し、広帯域電圧アンプ DHPVA-200 (Femto) により信号増幅し、デジタルオシロスコープ DPO 7104 (Tektronix) でデータ取得し、PC に取り込んでいる。

光強度の変化から吸光度を求めた。電子線パルス照射していないときの光強度が I_0 、電子線パルス照射したときの光強度が I のとき、吸光度は $Absorbance = \log_{10}(I/I_0)$ となる。吸光度の時間変化から、化学反応の時定数や反応速度定数が評価できる。また、時間各波長で取得した吸光度の時間変化（過渡吸収）を任意の時間（電子線パルスからの経過時間）で切り出すことにより、その時間における過渡吸収スペクトルが得られ、この形状から生成

物の種類や化学反応についての議論が行える。さらに、ランバート＝ベールの法則 $Absorbance = \epsilon Cl$ (ϵ と C はそれぞれ光吸収の原因となる溶質のモル吸光係数と濃度、 l は光路長) から、定量的な議論も行える。

3. 結果と考察

3. 1 DNA 損傷 [1-2]

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 $\cdot OH$) 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性物質は $\cdot OH$ 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性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 $\cdot OH$ 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。

3. 2 金属酸化物微粒子の影響

構造材を構成する金属酸化物は接触する水に微粒子が溶出していく。この金属酸化物微粒子の存在により、水の放射線分解過程が変わる。金属酸化物と水分解ラジカルの反応、界面での電荷移動、吸着水の分解、などの観点から金属酸化物微粒子の影響を調べている。水素発生量が金属の種類によって大きく影響を受けることなどが分かっている。

3. 3 リソグラフィ [3-4]

半導体製造に用いられるレジスト材料を開発するにあたって、解像度、線幅粗さ (LWR)、感度のトレードオフは最も深刻な問題である。金属酸化物ナノ粒子レジストはこのトレードオフを克服できると期待されているものの、重要になる増感過程のメカニズムはまだよく分かっていない。そこで、パルスラジオリシス法により、リガンド (配位子) の放射線誘起反応を調べている。リガンド候補のカルボン酸 (メタクリル酸メチル、チグリン酸、アングリカ酸、 α -トルイル酸、 p -トルイル酸) について、水中での水和電子との反応やドデカン中でのドデカンラジカルカチオンとの反応など、速度定数やスペクトル形状の観点から調べており、リガンドの分子構造がイオン性の活性種との反応挙動に大きな影響を与えることなどが示されている。

3. 4 高分子材料の機能化 [5-6]

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。

成果リスト

- [1] Y. Hao and S. Yamashita, *Free Radical Res.* **53**, 1005 (2019).
- [2] J. Ma, et al., *Nature Commun.* **10**, 102 (2019).
- [3] T. Yamada, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 036503 (2019).
- [4] T. Yamada, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 096504 (2019).
- [5] Y. Wang, et al., *J. Photochem. Photobiol. A* **380**, 111823 (2019).
- [6] H. Weng, et al., *Polym. Chem.* **10**, 1508 (2019).

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*、岡村行泰**、小塩剛史**、元木貴則**、

叶野 翔*、上田 徹*、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、令和元年度も継続して化学組成を精密に制御した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を調べる研究に取り組み、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。超伝導体の精密な組成制御の指針が確立できつつあり、今年度は希土類混合により Ba サイトへの RE の固溶の程度を制御した RE123 単結晶についての傾向を新たに把握した。

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で、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。令和元年度の研究では、前年度までの研究を継続し Eu123 単結晶の臨界電流特性に対する電子線照射効果を調べたほか、比較的 RE/Ba 固溶の起こりにくい Dy123 単結晶、及び Eu:Dy=1:1 で混合した原料から育成した(Eu,Dy)123 単結晶についても電子線照射を行い、欠陥導入による臨界電流特性改善効果の RE 組成依存性を調べた。

2. 実験方法

(Eu,Dy)123 単結晶は Ba/Cu=0.67, Eu/(Eu+Dy)=0, 0.5, 1 のフラックスから BaZrO₃ 坩堝を用いた自己フラックス法により大気中で育成した。得られた(Eu,Dy)123 単結晶に対して酸素アニールによるキャリアドーピングを行った後、電子線照射を複数回行い試料への欠陥(磁束ピンニングセンター)の導入を行った。これら単結晶について、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。なお、Eu123 単結晶と Dy123 単結晶に対しては 3 回、(Eu,Dy)123 単結晶に対しては 2 回電子線照射を行っており、それぞれの総照射量は 1.6×10^{18} e/cm² および 1.1×10^{18} e/cm² である。

3. 結果と考察

Fig. 1 に電子線照射を行った単結晶試料の 77 K, 40 K における J_c の磁場依存性を示す。図中の#1 は電子線照射を 1 回($\sim 5.5 \times 10^{17}$ e/cm²)施した試料であることを意味する。なお、照射後の各試料の T_c は照射前と比較して 0.8 K ほど低下したものの、鋭い超伝導転移を維持した。いずれの試料においても 2 回目の電子線照射までは 77 K, 40 K 共に全磁場域で J_c が改善しており、とくに 3 T 以下の低磁場域において顕著であった。対して 3 回目の電子線照射においては、Eu123 単結晶では低磁場域のみで J_c が向上、Dy123 単結晶では 77 K 全磁場域で J_c の低下が観測された。これは磁束ピンニングセンターとしてはたらく欠陥が照射により導入されたものの、昨年度報告した Nd123 単結晶における過照射現象と同様に、欠陥密度の増加に伴い単結晶全体の超伝導凝縮エネルギーの低下を引き起こしたことを示唆する。照射による J_c の変化の程度を試料ごとに比較すると、Eu123 単結晶での改善が最も顕著で、77 K, 1 T における J_c は約 30 倍にまで上昇した。これは他の RE123 単結晶に比べ著しく大きな増加率であり、本研究で育成した Eu123 単結晶の超伝導凝縮エネルギー密度が高い、すなわち Ba サイトへの Eu 固溶の濃度が低いことによるものと考えている。また(Eu,Dy)123 単結晶試料に着目すると、照射前の J_c は 40 K, 77 K 共に Eu123 単結晶と同程度であった一方で、照射後では Eu123 単結晶と比べ低い特性に留まった。この要因として Eu, Dy の不均一分布などによる超伝導凝縮エネルギーが低下したある程度大きな領域の発生が考えられるが、詳細は不明である。

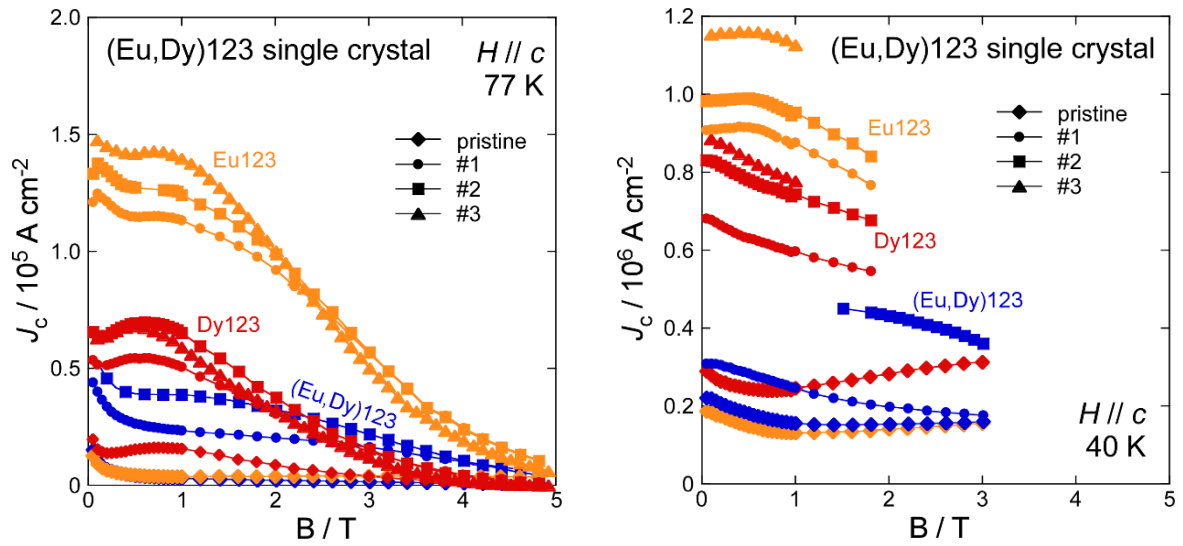


Fig. 1 繰り返し電子線照射を行った(Eu,Dy)123 単結晶試料の J_c の磁場依存性の変化
(左)77 K, (右)40 K

今後の予定

令和2年度も (Eu,Dy)123 単結晶試料への照射を継続するとともに、金属組成比が異なる Gd123 溶融凝固バルク試料、Y123 溶融凝固バルク試料に対しても電子線照射を行う。また、電子線照射によって生成する欠陥が観察できることが明らかになったことから、欠陥密度とピンニング力の関係も調べていく。また、Eu,Dy を混合した単結晶試料については透過型電子顕微鏡による微細組織の観察や、元素分布の解析を行う。

Ce 添加ケイ酸塩系シンチレータについて、パルスラジオリシスにより、ピコ秒領域での過渡吸収分光を行った。シンチレーションの立ち上がりとは異なる速度での吸光度の減衰が観測され、非常に高速な消光であると帰属した。

キーワード：シンチレータ, エネルギー移動, 過渡吸収, 消光, パルスラジオリシス

1. 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。

本研究では、これら二種類のシンチレータのうちの前者について、特に Ce を添加したケイ酸塩結晶におけるエネルギー移動過程を解析した。これらのシンチレータは、その高い密度と発光量、および比較的速い減衰のため、γ線用のシンチレータとして幅広く利用されている。本研究では、特に Gd_2SiO_5 (GSO):Ce を対象とし、ピコ秒領域におけるエネルギー移動過程を解析すべく、ピコ秒でのパルスラジオリシス測定を行った。

2. 方法

異なる濃度で Ce の添加された GSO 単結晶を試料として用いた。なお、Ce 添加結晶は 5 mm 厚、無添加結晶は 1.7 mm 厚であった。空气中、室温において、東京大学原子力専攻の電子線形加速器を用い、パルス電子線を照射し、同時に吸収分光を行った。なお、東京大学ではピコ秒領域の測定を行い、ナノ秒領域の過渡吸収については、大阪大学産業科学研究所の測定系を用いた。

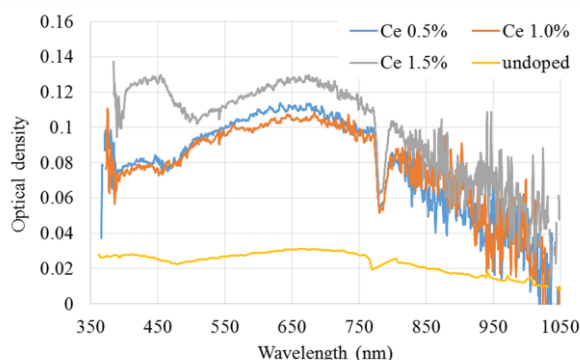


図1 異なる Ce 添加濃度の GSO のピコ秒領域における過渡吸収スペクトル

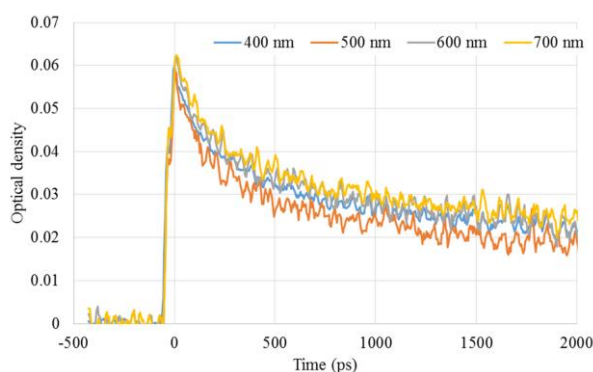


図2 無添加 GSO 結晶のピコ秒領域における過渡吸収時間プロファイル

3. 結果と考察

図1に異なるCe濃度のGSO結晶の、ピコ秒領域での過渡吸収スペクトルを示す。450 nm 付近のバンドについては、この波長領域にシンチレーションが観測されることもあり、S/N の低い波長領域で観測された吸収帯であるため、ここでの議論では触れないこととする。全体として、Ce 添加濃度に拘らず、スペクトル形状が非常に類似している。図2に、無添加GSO結晶のピコ秒領域における過渡吸収時間プロファイルを示す。この結晶からのシンチレーションは非常に弱く、この時間領域での過渡吸収の減少は、シンチレーションにつながらない励起状態数の減少に起因し、即ち消光によるものと推察される。図3に、Ce 添加濃度 0.5 mol% のGSO のピコ秒領域における過渡吸収時間プロファイルを示す。この結晶において、シンチレーションの立ち上がりは10 ns 程度と非常に遅い。本研究で観測されたピコ秒領域における吸光度の急速な減少について、その一部はCe へのエネルギー移動に起因するものであると推察されるが、大半は、シンチレーションに寄与しないため、消光であると帰属される。図4に、700 nm での、異なるCe 添加濃度のGSO 結晶での過渡吸収時間プロファイルを示す。シンチレーションの立ち上がりは、Ce 添加結晶においては、Ce 濃度が高いほど速い。このことは、高いCe 濃度でのCe へのより速いエネルギー移動を示す。一方で、観測された過渡吸収時間プロファイルにおいては、添加濃度の影響はほぼ見られなかった。このことは、ピコ秒領域での急速な消光が、GSO のホストで生じていることを示すものである。

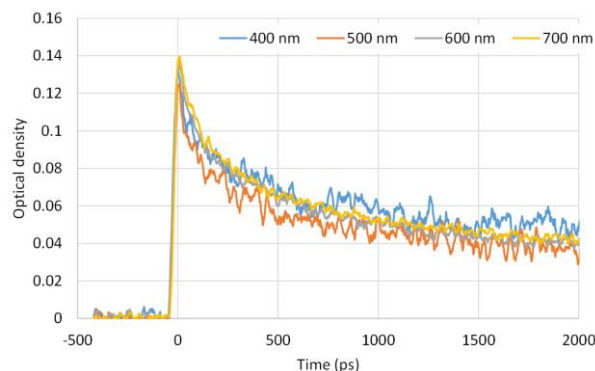


図3 Ce 添加濃度 0.5 mol% のGSO のピコ秒領域における過渡吸収時間プロファイル

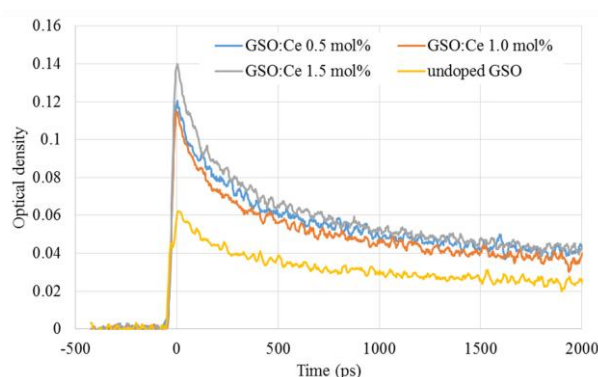


図4 異なるCe 添加濃度のGSO 結晶の700 nmでの過渡吸収時間プロファイル

成果リスト

- [1] 【招待講演】 M. Koshimizu, Y. Muroya, S. Yamashita, H. Yamamoto, T. Yanagida, Y. Fujimoto, K. Asai, "Analysis of the energy transfer processes in orthosilicate scintillators using transient absorption spectroscopy", The 2nd Global Forum on Advanced Materials and Technologies for Sustainable Development (GFMAT-2), 令和元年 7 月 21~26 日, Toronto Marriott Downtown at CF Eaton Centre Hotel, Toronto, Canada.
- [2] 【招待講演】 M. Koshimizu, Y. Muroya, S. Yamashita, H. Yamamoto, T. Yanagida, Y. Fujimoto, K. Asai, "Fast quenching in scintillators observed by transient absorption spectroscopy", 44rd International Conference & Exposition on Advanced Ceramics & Composites, 令和 2 年 1 月 26 日~31 日, Hilton Daytona Beach Oceanfront Resort, Daytona, US.

マイナーアクチノイド(MA)の分離プロセスで利用が見込まれるジグリコールアミド抽出剤について, ドデカン及びオクタノール溶液中における放射線分解過程をパルスラジオリシスにより調べた。ドデカン単一溶媒中と, ドデカン/アルコール混合溶媒中とでは, 抽出剤の放射線分解反応機構は異なることを示唆した。

キーワード: マイナーアクチノイド, 放射性核種分離, 溶媒抽出, TODGA, パルスラジオリシス。

1. 背景

原子力機構では, 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, かつ放射性毒性の高い MA を分離する溶媒抽出プロセスの開発を進めている。これまでに, MA と選択的に錯形成することにより廃液中から除去可能なジグリコールアミド抽出剤やニトリロトリアセトアミド抽出剤を開発し, その抽出性能について調べてきた(Y. Sasaki, et al., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **44**, 405 (2007), Y. Sasaki, et al., *Chem. Lett.*, **42**, 91 (2013))。一方, 分離プロセスにおいては, これらの抽出剤は MA や核分裂生成物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, 抽出剤に対して放射線を照射した際, 抽出剤が分解することで抽出性能が劣化することがこれまでのガンマラジオリシス実験などの結果からわかっている(Y. Sugo, et al., *Radiat. Phys. Chem.*, **76**, 794 (2007))。本研究は, 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としている。溶媒抽出法に基づいた分離プロセスでは, 抽出剤はドデカンにより希釈して使用されるが, 相分離及び沈殿物抑制の観点から体積分率で数十パーセントの高級アルコールが添加されることがある(Y. Ban, et al., *Solv. Extr. Ion Exch.*, **37**, 27 (2019))。そこで昨年度は, テトラオクチルジグリコールアミド(TODGA, 図 1)を対象に, 抽出剤の放射線分解過程に対するアルコール添加の影響についてパルスラジオリシス法を用いて調べた。

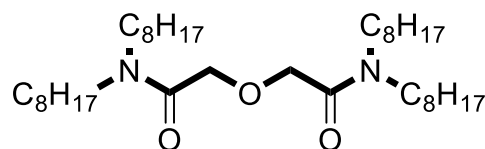


図 1 TODGA の構造

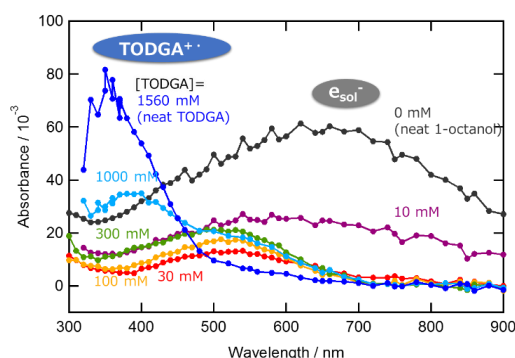
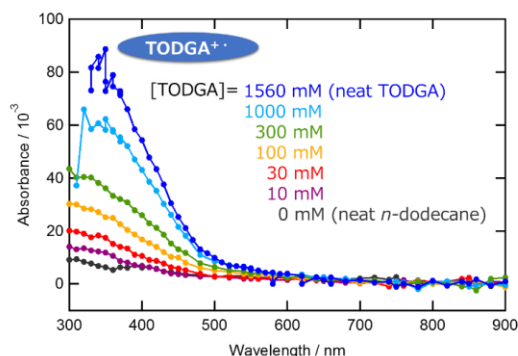


図 2 放射線照射 1 マイクロ秒後の TODGA/ドデカン(上)及び TODGA/オクタノール(下)溶液中の吸収スペクトル

2. 実験

未希釈の TODGA 及び TODGA をドデカン(*n*-dodecane), オクタノール(1-octanol)もしくはそれらの混合溶媒で希釈した溶液を調製し, アルゴンガスで脱気したものを, 試料として用いた。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, 電子線と同期したキセノンフラッシュランプを分析光源として用いた。

3. 結果と考察

ドデカン及びオクタノール中における TODGA の, 放射線照射 1 μ s 後の吸収スペクトルを図 2 に示す。無希釈の TODGA 中やドデカン溶媒中では, 図 2 (上)に示す通り, 400 nm 以下の波長域に吸収帯が観測された。Sugo らにより, この吸収帯は TODGA⁺によるものであると考察されており, さらに

TODGA への直接的な放射線エネルギー付与による電離で生成する他に、ドデカンへの放射線エネルギー付与により生成するラジカルカチオンと中性の TODGA との反応による間接効果によっても TODGA⁺が生成することが示唆されている(Y. Sugo, et al., *Radiat. Phys. Chem.*, **76**, 794 (2007)). 本観測においても、TODGA⁺の吸収強度は溶液中の TODGA の電子数密度に比例せず、間接効果による生成を支持する結果が得られた。一方、図 2 (下)に示す通り、オクタノール中では TODGA⁺による吸収はドデカン中と比べて小さくなり、他に 700 nm と 520 nm 付近に吸収帯が現れた。700 nm の吸収帯はオクタノールの溶媒和電子(e_{sol})によるものとして知られている(F. Y. Jou, et al., *J. Phys. Chem.*, **88**, 3900 (1984))が、520 nm の吸収帯についてはこれまでに報告された例のない未知の吸収帯である。この 520 nm の吸収帯はオクタノールと TODGA が共存する場合においてのみ観測されており、つまりオクタノール中での TODGA の放射線分解は、ドデカン中で観測された TODGA⁺を経由する分解とは異なることを示唆している。

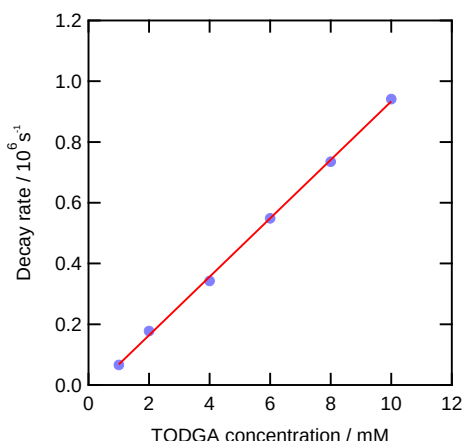


図3 TODGA の添加に伴うオクタノール中の溶媒和電子の減衰速度変化

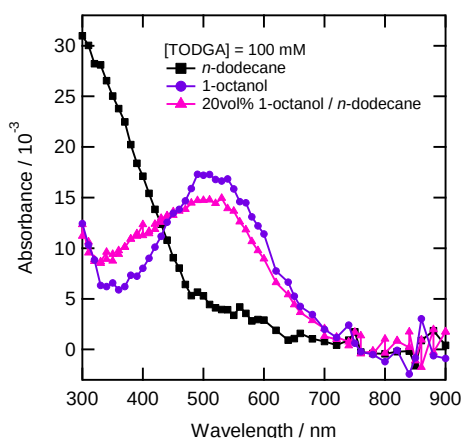


図4 放射線照射1マイクロ秒後のドデカン、オクタノール及びその混合溶媒中での吸収スペクトル

成果リスト

- [1] Y. Kumagai, T. Toigawa, S. Yamashita, T. Matsumura, “Radiolytic degradation of an extractant for actinides; HONTA a comparative study of direct and indirect radiolysis processes”, Miller Conference 2019 (2019).
- [2] 村山琳, 樋川智洋, 熊谷友多, 山下真一, 松村達郎, ”ドデカン/オクタノール混合溶媒中におけるジグリコールアミド抽出剤の放射線分解メカニズムの研究”, 日本原子力学会第15回再処理・リサイクル部会セミナー (2019)

オクタノール中での TODGA の分解経路をさらに調べるため、e_{sol}による TODGA の還元反応を検討した。TODGA のオクタノールへの添加に伴う e_{sol}の減衰速度変化を図 3 に示す。TODGA 添加量と e_{sol}の減衰速度変化から、TODGA と e_{sol}の反応速度定数(k_s)は $9.6 \times 10^7 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ と見積もられた。既報(C. A. Zarzana, et al., *Solv. Extr. Ion Exch.*, **33**, 431 (2015))のドデカンのラジカルカチオンと TODGA の反応速度定数($9.7 \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$)と比較すると2桁低い値ではあるが、ドデカン中でのラジカルカチオンや電子の寿命がおおよそ百ピコ秒程度(T. Kondoh, et al., *Radiat. Phys. Chem.*, **80**, 286 (2011))であるのに対して、オクタノール中の e_{sol}の寿命が数マイクロ秒程度であることを考慮すると、オクタノール中で生成する e_{sol}によって TODGA は有意な量が還元されると考えられる。

20vol%のオクタノールが添加された TODGA/ドデカン溶液のパルスラジオリシス実験結果を図 4 に示す。ドデカン中にオクタノールを添加した場合、TODGA⁺による吸収は弱くなり、520 nm 付近に吸収帯を持つ TODGA/オクタノール溶液中でのスペクトルと類似したスペクトルが得られた。つまり実際の溶媒抽出プロセスでみられるようなドデカンにアルコールが添加された溶媒系では、ドデカン単一溶媒系で考えられている TODGA の酸化反応ではなく、e_{sol}による TODGA の還元反応によって分解反応が進行する可能性が示された。

4. まとめと今後の課題

MA 分離プロセスで希釈剤として用いられるオクタノール/ドデカン混合溶媒中での TODGA の放射線分解過程をパルスラジオリシス実験により調べた。アルコールの存在によって、TODGA の分解過程は、これまで考えられてきた TODGA⁺を経由するドデカン単一溶媒中での分解過程とは異なることを示唆した。今後さらに検討を進めるとともに、ガンマ線照射実験などで報告されている多様な分解生成物が生じる分解機構の解明を試みる。

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し、その後の時間挙動を直接追跡している（パルスラジオリシス法）。水溶液系の放射線化学反応についてこれまで吸収分光を用いて研究を進めてきたが、透明度の低い試料には適用できず、より複雑な系での測定を見据え、ラマン分光を導入し始めている。

キーワード：放射線効果、パルスラジオリシス法、ラジカル、共鳴ラマン分光、時間分解測定

1. はじめに

放射線効果の研究は、放射能や放射線の発見後、すぐに始まった。特に初期過程の研究ではパルスラジオリシス法が広く普及し、大きな成果を挙げた。パルスラジオリシス法では、化学変化を紫外可視域の吸収分光により検出することがほとんどである。歴史的にはチェレンコフ光を分析光に用いたことが起源だが、測定系を構築しやすいことも広く普及した理由である。しかし、吸収分光は元々透明な試料でないと測定が行えない。また、多くの過渡生成物は似たような波長域に吸収帯を持ち、個々の時間挙動を分離することが困難なケースも多い。そこで、電子励起ではなく振動励起あるいは回転励起に対応した振動分光に着目している。振動分光としては赤外域の吸収分光とラマン分光が候補となる。しかし、赤外域に強い光源や感度の高い検出器が乏しい。そこでラマン分光をパルスラジオリシス体系に導入し、従来の紫外可視吸収分光とは異なる観点で放射線誘起化学反応を追跡できるように体系を改良している。ラマン分光は信号が微弱だが、電子励起による光吸収がある波長の光に対しては共鳴が起こって信号が大幅に改善される。そこで本課題ではこの共鳴を利用している。

2. 方法

図 1 に時間共鳴ラマン分光体系を示す。

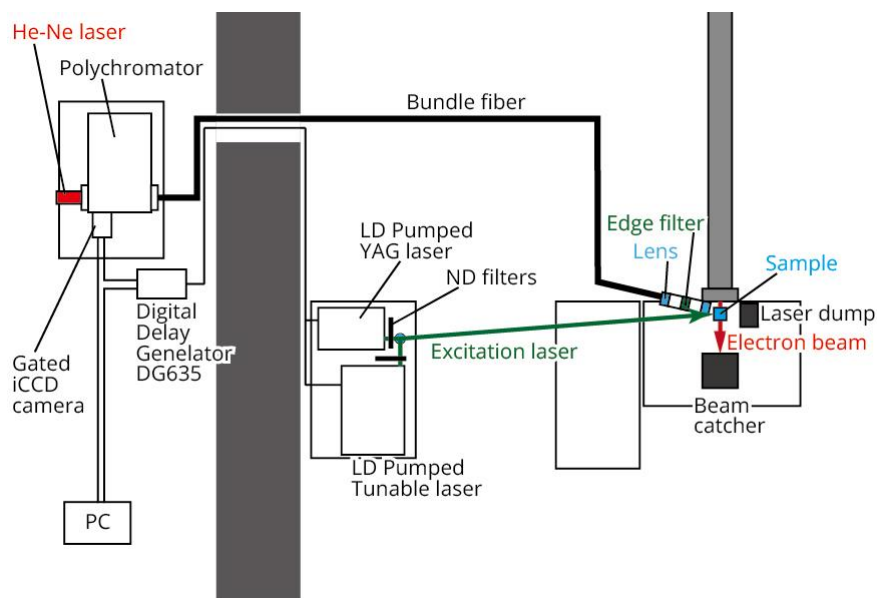


図 1 時間共鳴ラマン分光体系

電子線加速器の先端にサンプルを設置し、電子線パルスを照射し、タイミングを合わせて励起レーザーもあて、散乱した光を検出する。励起レーザーには安定性と強度に優れた LD 励起固体レーザー Quantas Q1-1064-Q1D-SH (Quantum Light Instruments) の二倍高調波 (532 nm, ~16 mJ/pulse, <10 Hz) を用いている。ラマン散乱の信号は微弱なため、放射線ノイズや電磁ノイズを避けるために検出系は隣の測定室に設置し、光ファイバー（バンドルファイバー）で伝送している。励起レーザーと同じ波長が散乱されるレイリー散乱の成分は強すぎるた

め、エッジフィルタにより 532 nm 以下の波長を除去している。ラマン散乱のうち、長波長側に波長が変化するストークス散乱した成分を観測している。散乱光の検出にはツェルニターナ型イメージング分光器 SR-500I-B1 (Andor Technology) とゲート付き CCD カメラ DH340T-18F-A3 (Andor Technology) を用いている。電子線パルス、励起レーザーパルス、検出器の同期には遅延発生器 DG645 (Stanford Research System) を用いている。

3. 結果と考察

検出系の動作を確認するため、まずは液体シンチレーターを用い、放射線照射にともなう発光を検出した。2,5-diphenyloxazole (DPO) を *N,N*-dimethylformamide (DMF) に溶解したサンプルを用い、電子線パルス照射直後の発光スペクトルを観察した (図 2)。CCD カメラのゲート幅は最小の 5 ns とした。分光器が 1 回の測定でカバーできる波長範囲が最大 200 nm 程度であるため、短波長側と長波長側で二回に分けて測定した。5 ns のデータでは 450-510 nm で短波長側と長波長側での測定結果が若干異なっているが、これは電子線パルスと検出器が動作するタイミングにどうしてもジッタが生じてしまうことが原因である。現在、同期回路を設計して改善を予定している。

次に、チオシアン酸ナトリウム KSCN 水溶液 (N_2O 飽和) を試料とし、ラマン分光を試みた。水の放射線分解で生じた OH ラジカルは、KSCN 水溶液中では $\text{OH} + \text{SCN}^- \rightarrow \text{SCNOH}^-$, $\text{SCNOH}^- + \text{SCN}^- \rightarrow (\text{SCN})_2^- + \text{OH}^-$ と反応し、比較的安定な中間活性種 $(\text{SCN})_2^-$ ができる。この中間活性種は S-S 結合の振動に対応したピークが 220, 440, 660 cm^{-1} に存在することが報告されている。電子線パルス照射から 100 ns 後のラマンスペクトルを図 3 に示す。報告とほぼ同じ波数にピークがあり、装置のパフォーマンスが正常であることが確認できた。

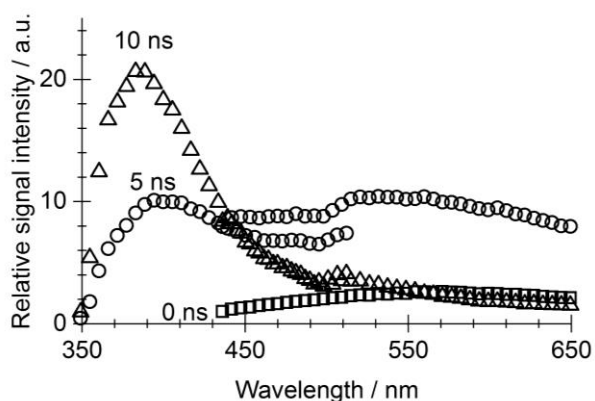


図2 DMF に溶解した DPO の電子線照射にともなう発光スペクトル

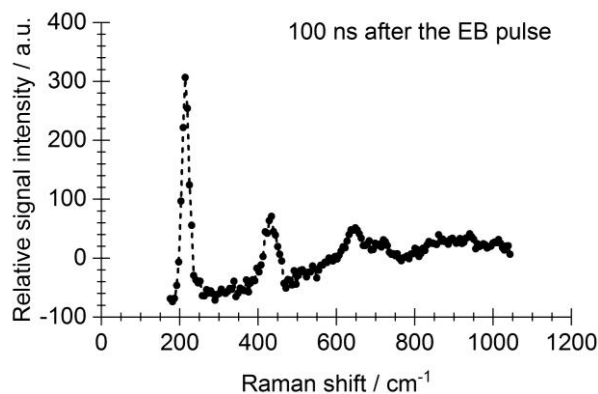


図3 KSCN 水溶液の電子線照射で観測された時間分解共鳴ラマンスペクトル

4. まとめと今後の予定

今後は装置構成機器の同期精度の向上や波長可変レーザーの導入を予定している。また、測定の自動化や効率化のために LabVIEW を用いたプログラミングも進めていく。

成果リスト

- [1] S. Yamashita, et al., 8th Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry, Takasaki, Japan (2020).
- [2] 岩崎遼登, 東京大学工学部システム創成学科, 卒業論文 (2020).
- [3] 山下真一, YU Hao, 藤井健太郎, 横谷明德, “放射線による DNA 損傷形成における微量抗酸化薬剤の添加効果”, 大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設研究会, 茨木, 2019.10.11.
- [4] 山下真一, “最近の研究の紹介: 海水のラジオリシスから界面を含む系への展開を目指して”, 日本原子力学会水化学部会定例研究会, 茨木, 2019.7.9.

Developing method to analyze the behaviors of point defects influenced by dose rate

関村 直人¹ 陳 東鉞¹ 村上 健太² 陳 良² 阿部 弘亨¹

1. 東京大学, 2. 長岡技術科学大学

Abstract: Method was developed to study flux effects by combined irradiation. As a first step, alloys were irradiated at 400 °C, and then subsequently irradiated at 300 °C with low dose rate. Loops and black dots were successfully compared at the same location before and after the subsequent irradiation.

Keyword: combined irradiation; stainless steel; foil irradiation

1. Introduction

The effects of irradiation dose rate are tightly connected with the behaviors of point defects, which is almost impossible to be observed directly by experimental tools available. In our previous work, with the powerful tool of in-situ TEM (transmission electron microscopy) linked with HIT accelerator, we successfully discussed the behavior of point defects by observing the growth of dislocation loops during irradiation. Such methodology could also be utilized to discuss the effects of dose rate, however, there are some limitations currently. To be precise, the complexity of in-situ experiments is limiting the range of irradiation temperature, dose and dose rate applicable in in-situ experiments.

We plan to further extend the capacity of HIT facility and in-situ experiments by applying the combined irradiation concept. Combined irradiation is the combination of pre-irradiation and subsequent irradiation. The pre-irradiation is usually performed on bulk specimens, and desired density and size of loops are created in bulk specimens by tuning irradiation parameter. Then, foil specimens are picked up from pre-irradiated bulks for subsequent irradiation. Subsequent irradiation is usually performed in in-situ TEM chamber, with limitations in irradiation parameters. In this work, we plan to not only perform subsequent irradiation in in-situ TEM chamber, but also in bulk irradiation chamber to achieve wider range of irradiation temperature, dose and dose rate. We first created interstitial-type loops (i-loops) in stainless steels by pre-irradiation, and then used these i-loops as indicators of point defect behavior in the subsequent irradiation with different dose rate.

2. Experimental

Two model alloys of 316L stainless steel was used in this work, namely Low Si alloy (Fe-16.9Cr-13.0Ni-2.29Mo-1.00Mn-0Si) and Base Si alloy (Fe-17.3Cr-13.2Ni-2.36Mo-0.88Mn-0.42Si). The major difference between the two alloys was the Si content.

The pre-irradiation was performed by irradiating 3 MeV Fe²⁺ ions on bulk specimen at 400 °C to 0.7 dpa. Irradiation dose was calculated by SRIM-2013, and the calculated dose was an average value from 0nm depth to damage peak. Cross-section TEM foil specimen was prepared by focused ion beam (FIB) followed by electro-chemical polishing. The TEM foil was observed under TEM to confirm the irradiation defects formed in the pre-irradiation.

The subsequent irradiation was performed by installing the observed TEM foil into the specimen chamber for irradiation again. The irradiation ion was 1 MeV Fe²⁺, temperature was 300 °C and dose was 0.2 dpa. As a starting point to study the flux effects, the foil specimens were irradiated at the low dose rate of 2×10^{-5} dpa/s. After the subsequent irradiation, the foil specimen was observed by TEM again.

3. Results and Discussion

Method was developed to prepare foil specimens thin enough for TEM observation, but also thick enough that the foils will not break during the subsequent irradiation. And we found that when the thin area is small in size, then the durability of the foil specimen will be much enhanced. Fig.1 shows results of TEM observation before subsequent irradiation and after subsequent irradiation. It was found that the foil specimen successfully survived the subsequent irradiation. Oxidization of foil surface was inevitable, but it was still possible to distinguish the irradiation defects. Foil cracking or curving was not observed. As shown in Fig. 1, it was easy to compare the irradiation defects in the same location before and after the subsequent irradiation.

Before the subsequent irradiation, the loops were larger in size in Low Si alloy than that in Base Si alloy. This is consistent with our previous results. The loop growth during the subsequent irradiation was observable, but not much distinct. Since the subsequent irradiation was performed at 300 °C, the new irradiation defects formed in the subsequent irradiation were all in the form of black dots. Although the number density of loops was higher in Base Si alloy (Fig. 1 (c)) than that in Low Si alloy (Fig. 1 (a)), the number density of those newly-formed black dots were much higher in Low Si alloy (Fig. 1 (b)) than that in Base Si alloy (Fig. 1 (d)). It indicates the effects of Si were different under the two temperatures. The newly-formed black dots were not uniformly distributed, indicating their formation was influenced by the pre-existing loops.

4. Conclusions

Method was developed to study flux effects by combined irradiation. As a first step, Low Si and Base Si alloy were irradiated at 400 °C to 0.7 dpa, and then subsequently irradiated at 300 °C to 0.2 dpa with the low dose rate of 2×10^{-5} dpa/s. The comparison at the same location before and after the subsequent irradiation was proved to be successful. The newly-formed black dots in the subsequent irradiation were not uniformly distributed, and their number density were much higher in Low Si alloy than that in Base Si alloy. Further study of high flux irradiation is being performed, and will be compared with the results here to discuss flux effects.

5. Achievement list

- [1] D. Y. Chen, K. Murakami, K. Dohi, K. Nishida, Z. C. Li, N. Sekimura, Journal of Nuclear Materials, 2020, vol. 529: pp.151942
- [2] D. Y. Chen, K. Murakami, L. Chen, Z. C. Li, N. Sekimura, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2020, vol. 478: pp.182-186.
- [3] D. Y. Chen, K. Murakami, L. Chen, H. Abe, N. Sekimura, Annual Meeting of Atomic Energy Society of Japan, 2020, Fukushima, Japan: Oral presentation.

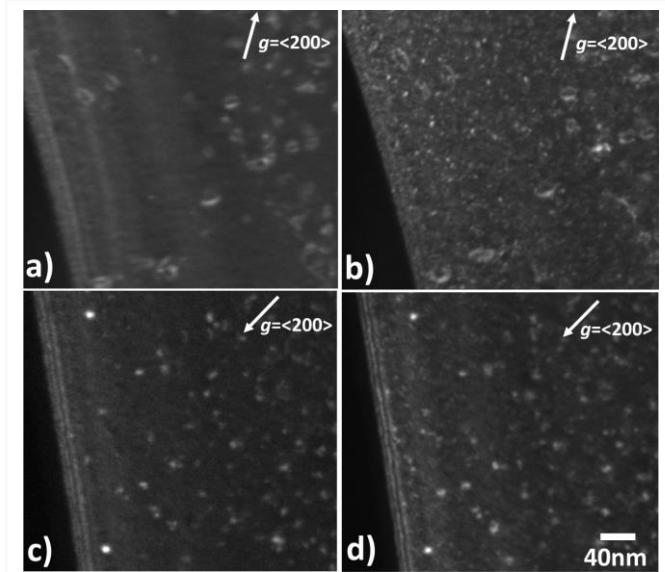


Fig. 1 TEM dark field images of (a), (b) Low Si alloy and (c), (d) Base Si alloy. (a) and (c) was observed before subsequent irradiation; (b) and (d) was after subsequent irradiation.

Small Modular Reactor の炉内構造材料への利用が検討されているハイエントロピー材料に対し、イオン照射を実施し、その照射耐性を評価した。その結果、受入材に対し、歪取り焼鈍ならびに再結晶化処理を施すことで、特有の照射レスポンスを示すことを明らかにした。

キーワード: ハイエントロピー合金、イオン照射、超微小硬さ

1. 緒言

ハイエントロピー合金 (HEA) は他成分元素を当分に固溶させることによって、材料中に多量の格子ひずみを導入することによって、優れた高温特性や照射特性を有する材料系である。特に、高温特性については、他成分元素が一つの結晶格子内に配置することで、Sluggish な拡散挙動を示すことが分かっている。このことから、材料交換を行わない Small Modular Reactor (SMR) のような炉系への HEA の適応が検討されている。これらより、本共同利用では、先進原子炉構造材料である HEA 材料の照射特性を理解することを研究目的とし、HIT 加速器を用いて 573 K における Fe イオン照射を行い、照射後の超微小硬さ試験によって材料の耐照射特性を評価した。

2. 実験方法

本研究で使用した試料は積層造形技術 (3D プリンティング) によって作製した HEA である。ここでは、Ni と Co、Fe、Cr、Ti の粉末比をそれぞれ、3:3:2:2:1 に調整し、これらの原料粉末を真空ガスアトマイズ法で混合し、その後、レーザー粉末積層造形法によって $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ のキュービック状に HEA を造形した。なお、当該試料の詳細な作製方法については参考文献を参照されたい[1]。なお、本研究では、当該試料を受入材とし、この受入材に対して歪取り焼鈍 (SR) として 1333 K x 7.2 ks、ならびに、再結晶化焼鈍 (RX) として 1393 K x 10.8 ks の熱処理を施し、これら試料における耐照射特性を評価することとした。照射実験は 2.8 MeV の Fe イオンを 573 K の真空中で実施した。照射温度は、試料ステージに固定されてある熱電対によって計測し、照射温度を $573 \pm 5 \text{ K}$ で制御した。照射量はイオンビームの飛程部において 1、5、10 dpa とした。照射後の試料は超微小硬さ試験を実施し、照射による機械特性の変化を評価した。ここで、超微小硬さは Oliver-Pharr 法によって評価し、各試料で 120 回の試験を行い、平均値、標準誤差によってデータ整理を行った。

3. 結果と考察

照射前の微細組織観察より、全試料で FCC 構造の X 線回折プロファイルが確認され、これら試料の格子定数は 0.3612 nm と見積もられた。また、全試料で集合組織を呈している様子が確認されており、受入材と SR 材では (200)、RX 材では (220) に配向した微細組織を有していることが分かった。また、SEM 観察結果では、受入材、ならびに、SR 材では柱状晶の母相組織を有していたのに対し、RX 材では球形に近い母相組織を呈しており、1393 K の熱処理によって再結晶化が生じたことが分かる。また、各試料の SEM-EDS 分析結果からは、受入材ならびに SR 材において、ニードルもしくはロッド状の低コントラスト箇所から Ti ならびに Ni 濃化が確認されたが、RX 材では、元素偏析は確認されなかった。なお、RX 材の TEM 観察では、母相組織全域に渡って、 $\sim 20 \text{ nm}$ の球状析出物が分散析出している様子が確認され、この SAED 解析より、これらの析出物は母相と Cube-on-Cube の関係 ((001)Matrix // (001)PPT, [001]Matrix // [001]PPT) を有した析出物であることが分かった。

照射前後の超微小硬さ試験結果より、受入材では、1 dpa の照射によって~0.7 GPa 程度の照射硬化を示した。その後、照射量の増加に伴い硬化し、10 dpa 照射時の硬化量は~1.6 GPa と見積もられた。一方で、RX 材では、1 dpa の照射によって~0.4 GPa の硬化を示したが、その後は照射量に依存しなかった。これら 2 材種については照射によって硬化する傾向を示したが、SR 材では、照射量の増加に伴い軟化する傾向を示した。インコネル 713 材料では、Ni を主成分とする L12 型の γ' 析出物がナノ分散することで機械強度を向上させているが、これらの析出物は照射下において不安定化し、Chemical-Disordering やサイズ減少を生じ、析出物の不安定化に由来した照射軟化を示すことが知られている [2]。SR 材における微細析出物の形成挙動については未だ明らかになっていないものの、おそらく、SR 熱処理中に形成した微細析出物が照射下によって不安定化し、照射軟化を示したと推測される。なお、RX 材については、直径 20 nm 程度の整合析出物が母相中に分散析出しているのが、これらの界面が照射欠陥のシンクサイトとして機能することで、受入材に比べ優れた照射耐性を発揮したと考えられるが、この析出物自身の照射下における安定性については未だ不明確である。このことから、追加調査を実施し、RX 材の照射挙動を確認すると共に、SMR への HEA の適応性検討へと評価を発展させる計画としている。

4. 結言

SMR の炉内構造物等への HEA 材料の適応を検討し、レーザー粉末積層造形法によって作製した HEA(受入材)ならびに、それらの SR、RX 材料の照射耐性をイオン加速器照射によって評価した。その結果、573 K で Fe イオン照射した受入材では、10 dpa 照射によって、1 GPa 超の照射硬化を示したのに対し、RX 材では、0.4 GPa 程度の照射硬化を示した。さらに、SR 材については、照射に伴い軟化する傾向を示すことが分かった。今後は照射材の TEM 観察を通し、照射欠陥組織の発達挙動や微細析出物の相安定性評価を通し、HEA 材料の SMR への適応性を検討する。

参考文献

- [1] Tadashi Fujieda, Hiroshi Shiratori, Kosuke Kuwabara, Mamoru Hirota, Takahiko Kato, Kenta Yamanaka, Yuichiro Koizumi, Akihiko Chiba, Seiichi Watanabe, Mater. Letters, 189 (2017) 148-151.
- [2] B.H Sencer, G.M Bond, F.A Garner, M.L Hamilton, B.M Oliver, L.E Thomas, S.A Maloy, W.F Sommer, M.R James, P.D Ferguson, J. Nucl. Mater., 283-287 (2000) 324-328.

成果リスト

なし

セラミックス被覆中の水素同位体透過挙動に対する
重イオン照射効果近田 拓未¹、叶野 翔²、中村 和貴¹、木村 圭佑¹、赤星 江莉加¹、遠藤 理帆¹、
中澤 章太¹¹静岡大学総合科学技術研究科、²東京大学大学院工学系研究科

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、鉄イオン照射およびヘリウム注入を行ったところ、微細構造および水素同位体透過挙動が変化することが確認された。

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

核融合炉ブランケットにおけるトリチウムの炉外への漏洩は、燃料効率や周辺環境の汚染の観点から、厳しい制御が要求される。トリチウムの透過を低減するために、配管等の構造材料表面にトリチウム低透過性の被覆を施す技術が開発され、これまでセラミックス被覆における水素同位体透過挙動の解明に加え、トリチウム増殖材との共存性が調査されている。また、近年では核融合炉で想定される高線量の放射線による影響を評価するために、被覆に対する放射線照射効果の研究が進められている。当研究グループでは、セラミックス材料の中でも放射化の小さい酸化イットリウム (Y_2O_3) 被覆に対し、炉内における中性子照射損傷を模擬するために重イオン照射を行い、被覆の微細構造や水素同位体透過挙動に対する照射影響を解明した。一方、炉内では中性子による損傷のみならず、核反応によって生成するヘリウム原子核が被覆に対して影響を及ぼす可能性があるため、照射損傷の導入に加え、ヘリウム原子核の被覆内滞留を併せた複合的な影響の調査が必要である。そこで本研究では、ヘリウム照射影響を調査するために、マグネトロンスパッタリング法により作製した Y_2O_3 被覆試料に対して、鉄イオン-ヘリウムイオン同時照射試験を実施した。照射後試料に対して微細構造分析や重水素透過試験を行い、 Y_2O_3 被覆における重イオン及びヘリウムイオン同時照射影響について調査した。

2. 方法

低放射化フェライト鋼 F82H (Fe-8Cr-2W , 25 mm²×0.5 mm) 基板に、非反応性マグネトロンスパッタリング法を用いて膜厚約 600 nm の Y_2O_3 被覆を作製した。蒸着後に不純物除去と被覆の粒成長および結晶化の促進のために、高真空下 (<10⁻⁵ Pa) で 600 °C、24 時間の熱処理を施したものを被覆試料とした。次に、照射シミュレーションコード SRIM-2013 を用いて損傷量を計算し、鉄イオンを 0.5 dpa の損傷密度になるまで、またヘリウムイオンを被覆内の原子密度が 1500 appm となるまで照射試験を行った。試験後の試料に対して集束イオンビームを用いた試料加工を施し、透過型顕微鏡 (TEM) による微細構造分析を行った。また、被覆内の水素同位体透過挙動を調べるために、導入圧力 10~80 kPa、試験温度 300~550 °C の条件で重水素透過試験を行った。

3. 結果と考察

図 1 に非照射および Fe 単独照射、Fe/He 同時照射試料の断面 TEM 像を示す。鉄イオン単独照射を行った試料では、被覆作製直後に確認されていた結晶質の層の他に、ボイドをほとんど含まない微結晶層およびアモルファス構造と見られる新たな層が形成された。Fe/He 同時照射試料においても、同様の層構造が確認された。図 2 に各試料の結晶層の拡大像を示す。単独照射試料に存在するボイドと比較して、同時照射試料のものは多数の微少な空孔を内包していることが確認された。この微少な空孔は結晶層全体に存在し、特に表面付近に多く観察された。単独照射ではボイドやアモルファス層のような重イオン照射に伴う欠陥が生成したのに対し、同時照射では鉄イオン照射

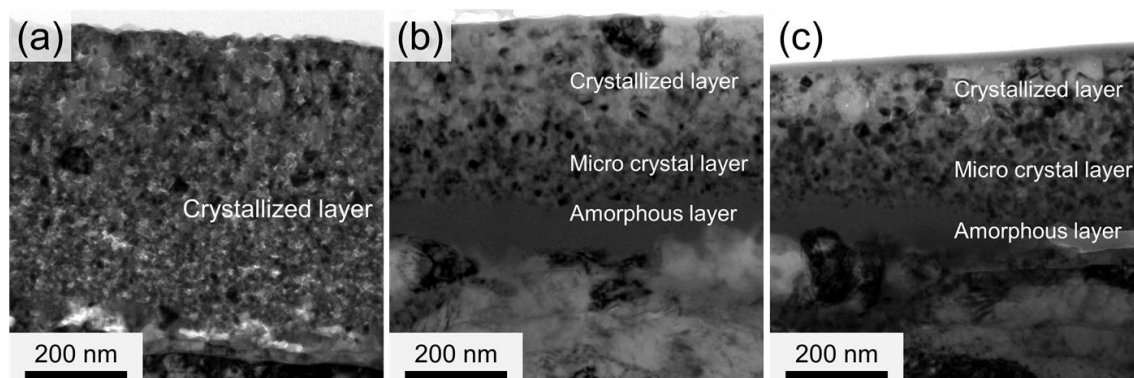


図1 (a) 非照射および (b) Fe 単独照射、(c) Fe/He 同時照射試料における被覆の断面 TEM 像

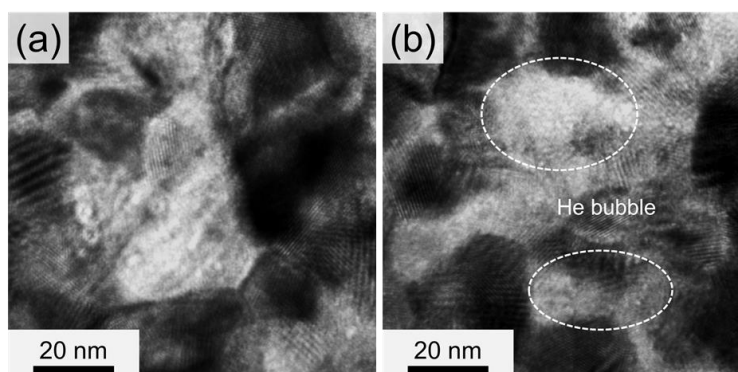


図2 (a) Fe 単独照射、(b) Fe/He 同時照射試料における被覆の結晶層の拡大 TEM 像

によって導入されたボイドと、注入された He イオンが結合して He バブルを形成したと考えられる。図3に非照射および各照射試料に対する重水素透過試験の結果を示す。300 °C および 400 °C の試験では、透過フラックスの各試料間の有意な差は確認されず、また温度上昇に伴ってフラックスも上昇していることから、被覆内部の構造が変化していないと考えられる。450 °C の試験では非照射試料のフラックスが低下し、 Y_2O_3 被覆の結晶粒成長および新たな結晶核生成によるものだと考えられる。500 °C では Fe 単独照射試料の、550 °C では Fe/He 同時照射試料のフラックスの大幅な減少が確認された。非照射試料よりも高温でフラックスの大幅な減少が確認されたことから、低温では Fe イオン照射によって生成した照射欠陥が被覆の構造変化を阻害し、高温では照射欠陥が回復することによって透過フラックスが減少したと考えられる。同時照射試料ではボイドと He バブルが結合し、安定して被覆内に残存できるようになったために、欠陥回復により高い温度が必要になったと考えられる。

以上の結果から、Fe/He 同時照射を行うことでボイドと He バブルが結合して被覆内に安定して存在し、被覆の構造変化を阻害することで水素同位体透過挙動に影響を及ぼすことが確認された。

成果リスト

- [1] K. Nakamura, et al., *Journal of Nuclear Materials* **537**, 152244 (7pp) (2020).
- [2] 中村和貴, 静岡大学大学院, 修士論文 (2020).

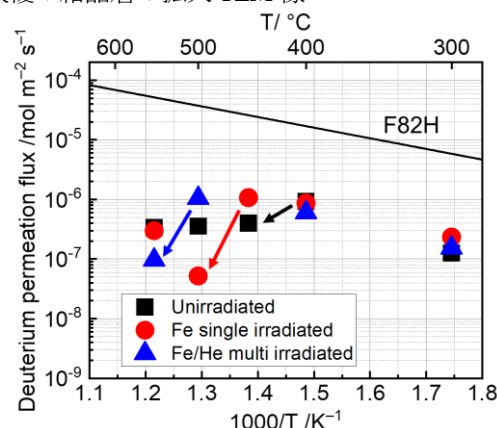


図3 非照射および各条件で照射した Y_2O_3 被覆試料の透過フラックスの温度依存性

核融合炉構造材料 (F82H 鋼) に対し、673 K 以下の高温下における Fe イオン照射を行い、 $M_{23}C_6$ の照射誘起非晶質化挙動を評価した。

キーワード: 核融合; 低放射化フェライト鋼; イオン照射

1. 緒言

F82H 鋼は核融合炉構造材料の候補材料であり、 $M_{23}C_6$ 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、さらに、 $M_{23}C_6$ 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ことから、カスケード損傷下における析出物の不安定化挙動を明らかにすること必要がある。これらより、本研究では、F82H 鋼に対して、イオン加速器を用いてカスケード損傷を導入し、種々の微細析出物の相安定性を機構論的に明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

供試材として F82H 鋼 (F82H-BA12 鋼) とそのモデル鋼 (F8) を使用した。ここで、F8 鋼は単純な 3 元系試料であって、C、Cr 濃度は F82H 鋼と同様に調整されている。また、当該鋼の熱処理条件は 1523 K において 86.4 ks (24hr) の溶体化処理後、1023 K において 3.6 ks (1 hr) の焼鈍処理を実施し、母相中に $M_{23}C_6$ を分散析出させた。これらの試料をイオン照射に供した。照射試験は 673 K 以下の温度域において Fe イオンを最大 50 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、ならびに薄片化を行い、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。微細組織観察は、日本電子社製の JEM-2100 ならびに JEM-2100F を使用した。ここでは、明視野 (BF)、暗視野 (DF)、制限視野電子線回折 (SAED)、STEM-EDS マッピングを実施し、析出物の相安定性を評価した。

3. 結果と考察

598 K において 20 dpa 照射した F82H の TEM 写真を図 1 に示す。ここでは、BF 像において、析出物周辺に母相と析出物との中間コントラスト領域が確認された。また、この DF 像観察により、析出物の中心部は結晶性の $M_{23}C_6$ であって、中間コントラスト域は非晶質相であることが分かった。このように、 $M_{23}C_6$ の RIA では、特徴的なコア/シェル構造の析出物特徴を呈することが分かった。また、623 K において、20 dpa 照射した F82H と F8 の TEM 観察結果より、F82H では、析出物と母相界面部 (析出物の周辺部) に中間コントラスト域が存在し、この DF 像観察から、中間コントラスト域が非晶質相であることが分かった。一方で、F8 鋼では、析出物は概ね均一なコントラストを有しており、析出物の非晶質化、ならびに、SAED 上へのハローリングの出現は確認されなかった。これらより、当該照射条件において、 $M_{23}C_6$ の非晶質化は F82H のみで生じることが分かった。これは、F82H の $M_{23}C_6$ では、微量の W が固溶しているのに対し、F8 では、Fe と Cr から成る析出物組成である。そのため、

当該結果は析出物の照射下相安定性が組成に依存することを示唆している。なお、第一原理計算結果によれば (J. Xie et.al., Acta Mater., (2006))、 Cr_{23}C_6 への W ないし Mo の固溶量の増加に伴い、系の凝集エネルギーが低下すると予測されている。よって、平衡計算に基づく F82H の M_{23}C_6 の相安定性は F8 よりも高いと言える。そのため、RIA が析出物の孤立系内での反応と仮定することが出来るのであれば、照射による動的影響が M_{23}C_6 の RIA 挙動を制御していると考察される。

これらより、 M_{23}C_6 の種々照射条件 (照射温度、照射量) 下における RIA の発現条件を整理した。ここでの非晶質化の定義としては、照射パラメタとして照射温度と照射量に設定し、SAED 上へのハローリングの出現、ならびに、ハローリングからの DF 像観察によって、 M_{23}C_6 の非晶質化が確認された照射条件とした。その結果、低温照射下においては、RIA は ~ 1 dpa 程度からも確認されており、照射温度の上昇に伴い、臨界照射量が増加し、RIA の臨界温度 (T_c) は ~ 623 K と推定され、融点温度 (T_m) で規格化した T_c は $\sim 0.29T_m$ と見積もられた。従前知見では、 M_{23}C_6 の臨界温度が 573 K と見積もられていたことから、それよりも ~ 50 K 程度高い温度域においても、 M_{23}C_6 の RIA が発現すること明らかになった。

4. 結言

RIA に対する照射温度や損傷量影響を系統的に評価するため、F82H と F8 に対し、イオン照射を実施した。その結果、照射下における F82H の M_{23}C_6 の RIA の T_c は ~ 623 K と見積もられ、RIA の微細組織変化として、析出物と母相界面を起点とした非晶質化が生じることを明らかとした。また、 623 K 照射では、F82H 中の M_{23}C_6 で RIA が確認されたのに対し、F8 では、結晶性を維持しており、RIA は確認されなかった。当該結果は RIA の発現に対して析出物の化学組成が影響することを示唆している。

成果リスト

- [1] Sho Kano, Huilong Yang, John McGrady, Dai Hamaguchi, Masami Ando, Hiroyasu Tanigawa, Hiroaki Abe, J. Nucl. Mater., 533 (2020) 152088.

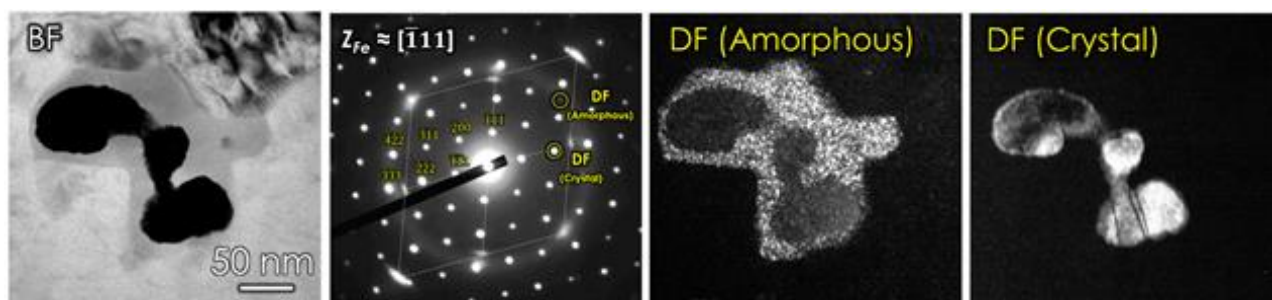


図1 598 Kにて20 dpa照射したF82H鋼のBF、DF、SAED像。2種類のDF像は、SAED上で確認されたハローリングならびに電子線回折斑点位置よりそれぞれ結像した。

ハイエントロピー合金の照射特性を調べるため、室温で 60Fe-12Cr-10Mn-15Cu-3Mo 合金における鉄イオン照射を行った。照射後に、低速用電子ビームを用いて、焼鈍による 60Fe-12Cr-10Mn-15Cu-3Mo 合金の欠陥回復を調べ、照射によって形成された原子空孔は 573K 殆ど回復した。

キーワード： ハイエントロピー合金、照射、欠陥、陽電子消滅分光法。

1. 目的

最近、ハイエントロピー合金 (HEA) または多成分合金は、高強度、優れた延性と靱性、耐熱性及び耐食性を示すことから、金属材料の新しいカテゴリとして大きな注目を集めている。従って、HEA または多成分合金は先進的な原子力材料の候補として挙げられてきた。HEA または多成分合金の耐照射についての研究が多く行われてきた。例えば、HEA の CoCrFeMnNi は 523~923K の広い温度範囲で優れた耐照射性を示した。しかし、Ni と Co の中性子捕獲断面積が高く、放射化された Ni と Co の半減期も長いので、CoCrFeMnNi は原子力材料として使えない。従って、低放射化元素を含む HEA または多成分合金の開発が必要である。最近、われわれは Co と Ni を含まない 2 相構造の Fe ベースの多成分合金 60Fe-12Cr-10Mn-15Cu-3Mo を開発した。この合金の結晶構造は体心立方 (BCC、~85%) と面心立方 (FCC、~15%) であった。合金強度を高めるため、少量の高放射化元素 Mo を添加した。本研究では、高エネルギーの鉄イオンを用いて、照射した 60Fe-12Cr-10Mn-15Cu-3Mo 合金の構造安定性及び欠陥の熱安定性を調べた。

2. 実験方法

高純度 (>99.9%) の Fe、Cr、Mn、Cu、Mo を使って、60Fe-12Cr-10Mn-15Cu-3Mo (at.%、公称組成) 合金を作った。合金のインゴット (30g) は、アーク溶解機により Ar 雰囲気下で作られた。合金の均一性を向上するために、5 回溶解した。厚み 0.2mm の 10mmx10mm の正方形試験片をインゴットから切り出し、鏡面まで研磨した。機械研磨中に導入した欠陥を消去するため、真空中に合金の構造安定性と力学特性が変わらない 773K で 1 時間焼鈍した。透過型電子顕微鏡を用いて、合金の組織を観察した。焼鈍温度が低いので、機械研磨中に導入された欠陥の消去が完全にはできないが、転位密度が低くなった。転位以外に丸い銅析出物も観察された。正方形試料に対して 2.5MeV の鉄イオンにより 5×10^{18} ions/m² まで照射を行った。損傷ピークは表面から約 700nm で、ピークの損傷量は約 0.6dpa であった。通常の線源法の陽電子消滅分光法で表面近傍の欠陥の測定が難しいが、エネルギーが可変の低速陽電子ビームならイオン照射による損傷の測定ができる。本研究では、2.5MeV の鉄イオンによる損傷範囲を測定するために、16keV の陽電子ビームを使った。イオン照射によって形成された欠陥の回復を調べるため、イオン照射した試料を 373K から 773K まで 100K の間隔で 1 時間の焼鈍を行った。陽電子分光法の同時計数ドップラー広がり測定法により鉄イオン照射前、照射後及び焼鈍中の照射によって形成された欠陥の回復を調べた。

3. 実験結果と考察

図 1 に未照射試料 (a) または純鉄 (b) に対するイオン照射直後と 373K から 773K までの焼鈍試料の CDB 比率曲線を示す。図 1 (a) の低運動量領域 ($P_L < 4 \times 10^{-3} m_0 c$, m_0 : 静止時の電子質量; c : 光速) においては、照射直後及び 373K と 473K で焼鈍した試料の値は 1 より高いことからイオン照射によって原子空孔が形成されたことが分かった。373K で 1 時間焼鈍するとその値はやや減少したが、その後の 473K で焼鈍してもほとんど変化しなかった。

一方、573K で1時間焼鈍すると、低運動領域の値は1に近づいて、イオン照射によって形成された原子空孔がほぼ回復した。また、773K まで焼鈍してもこの合金の構造が安定していることが分かった。イオン照射による原子空孔の形成及び573K での焼鈍による原子空孔の回復が図1 (b) においても示される。また、図1 (b) に純鉄に対して、 $25 \times 10^{-3} m_0 c$ の高運動量領域に Cu 析出物と思われるピークが現れる。473K から573K まで焼鈍中に Cu ピークの増加は顕著であった。FeCu 合金においては、照射によって Cu 析出物が形成されること及びそれによる原子空孔消滅のことが報告されてきた。これは、Cu の表面エネルギーが Fe より低いため、Cu 原子が原子空孔集合体の表面に優先的に析出し、原子空孔が徐々に収縮したと考えられる。

4. まとめ

鉄ベースの多成分合金 60Fe-12Cr-10Mn-15Cu-3Mo に対して、室温で 2.5MeV の鉄イオンを用いて、 $5 \times 10^{18} \text{ ions/m}^2$ まで照射を行った。損傷ピークの損傷量は約 0.6dpa であった。低速陽電子ビームの同時計数ドップラー広がり測定法を用いて、照射によって形成された欠陥及び焼鈍中に欠陥の回復を調べた。室温で、イオン照射によって、原子空孔が形成された。その原子空孔が573K で回復した。この回復は Cu 原子が空孔に入り込むことによるものであった。

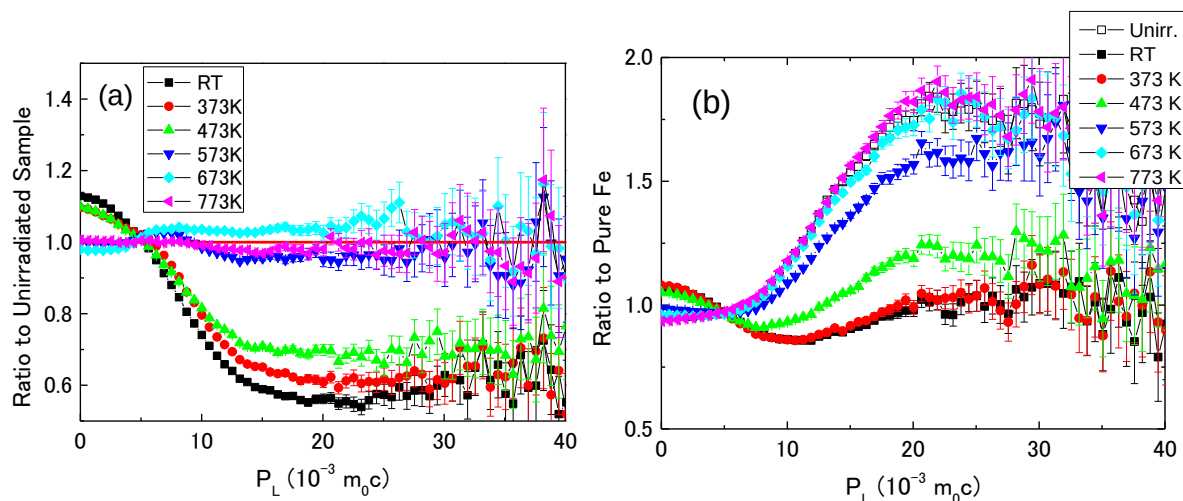


図1 未照射試料 (60Fe-12Cr-10Mn-15Cu-3Mo) (a)と純 Fe (b) に対するイオン照射後及び焼鈍中の CDB 比率曲線。比較のため、図1 (b) に未照射試料の比率曲線も示す。

成果リスト

なし。

Ion irradiation experiments were performed by 2.8 MeV Fe²⁺ ion at room temperature (RT) and 300 °C at High-Fluence Irradiation Facility (HIT), the University of Tokyo. A high irradiation dose of 100 dpa was applied to investigate the irradiation hardening behavior and microstructural evolutions of SIMP and RAFM-ODS steels. The irradiation hardening was assumed to be derived from the high density of dislocation loops induced by irradiation.

Keyword : ion irradiation; ferritic/martensitic steel; oxide dispersion strengthened steel; nano-indentation

1. Introduction

The service conditions in advanced nuclear system, such as high temperature and strong neutron irradiation, propose a great challenge for structure materials. Reduced activation ferritic/martensitic (RAFM) steels and oxide dispersion strengthened (ODS) steels are the most promising candidate structural materials for developing advanced nuclear system. In order to evaluate the applicability of materials, irradiation experiments are essential. Compared to neutron irradiation, ion irradiation is more controllable and safer to study the irradiation response of materials. An advanced RAFM steel named as SIMP steel and a 9Cr RAFM-ODS steel are developed in Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences (IMR, CAS) for the advanced nuclear system such as accelerator driven subcritical (ADS) system. SIMP steel exhibited a good high temperature performance below about 600 °C, while the RAFM-ODS steel has the promising creep strength at higher temperature and higher potential for irradiation resistance. In this study, the effects of ion irradiation on these two steels were primarily investigated to clarify the different irradiation hardening behavior and microstructure evolution.

2. Experimental methods

The chemical compositions of SIMP and RAFM-ODS steels are shown in Tab. 1. SIMP steel was melted in 5-ton vacuum induction furnace and followed by hot-forging and hot-rolling into the plates. While RAFM-ODS steel was fabricated by powder metallurgical method with a series of procedures include mechanical alloying, hot isostatic pressing, hot forging and hot rolling.

Tab. 1 Chemical compositions of SIMP and RAFM-ODS steels (wt%)

Steels	C	Cr	W	Mn	Si	Ta	V	S	P	Ti	Y ₂ O ₃	Fe
SIMP	0.20	10.54	1.26	0.45	1.22	0.15	0.20	0.003	0.003	-	-	Bal.
RAFM-ODS	0.14	8.91	1.40	0.41	-	0.05	0.19	-	-	0.26	0.35	Bal.

The specimens with the size of 1.5 mm (width) × 10 mm (length) × 0.2 mm (thickness) were irradiated by 2.8 MeV Fe²⁺ ion at room temperature (RT) and 573 K at High-Fluence Irradiation Facility (HIT), the University of Tokyo. The irradiation dose was from 0.3 to about 100 dpa with an damage rate of about 9.0×10^{-4} and a flux of 8.0×10^{11} ions/cm²/s.

After irradiation, the hardening behavior were measured by a nanoindenter. The indentation depth was 150 nm, holding for 5s. Each sample was measured by 120 points and then the average value and error bar were obtained. The samples were prepared by FIB (Hitachi FB-2100), which provides high-accuracy and high-speed fabrication, and followed by gentle milling to remove the extra damage layer in the surface induced by FIB. The microstructural evolutions were examined using a transmission electron microscope (TEM, JEOL-2010).

3. Results and discussion

Nano-indentation is used to study the irradiation hardening behavior of the materials before and after irradiation, as shown in Fig. 1. The calculated damage peak by SRIM simulation appeared at about 800 nm in depth. The total damage depth was less than about 1.5 μm. Thus, the depth of indenter could reflect the hardening behavior of the material at the point where the irradiation damage was greatest^[1].

As presented in Fig. 2, it was found that there was an increase of nanohardness after irradiating at 300 °C. After

irradiating to 0.3 dpa, both the nanohardness of SIMP and RAFM-ODS steels increased rapidly. With the increase of the irradiation dose, the increase in nanohardness became slowly. After irradiating to 100 dpa, the total increase in nanohardness was about 1.1 GPa and 0.9 GPa for SIMP steel and ODS steel, respectively.

The increase in nanohardness was mainly affected by the irradiated microstructure^[2]. With the increase of the irradiation dose, the vacancies were activated, which led to the increase of the number density of dislocation loops in the irradiated zone. The increase in nanohardness reflected the irradiation hardening behavior of the materials with the largest number density of dislocation loops. RAFM-ODS steel had a better tolerance of irradiation hardening than SIMP steel. It was mainly due to the high density of nano-phases in ODS steel matrix, which prevented the growth and proliferation of dislocation loops.

4. Summary

Ion irradiation experiments were successfully performed with high reliability using the HIT facility. A high irradiation dose of 100 dpa was applied to evaluate the irradiation response of SIMP and RAFM-ODS steels. The irradiation hardening behavior were investigated. Two steels showed different irradiation hardening after irradiating 100 dpa. A high density of dislocation loops in SIMP steel was observed after irradiating to 100 dpa. The better tolerance of irradiation hardening of RAFM-ODS steel was derived from the nano-oxides with high density in matrix. Further investigation on microstructural evolutions are in progress.

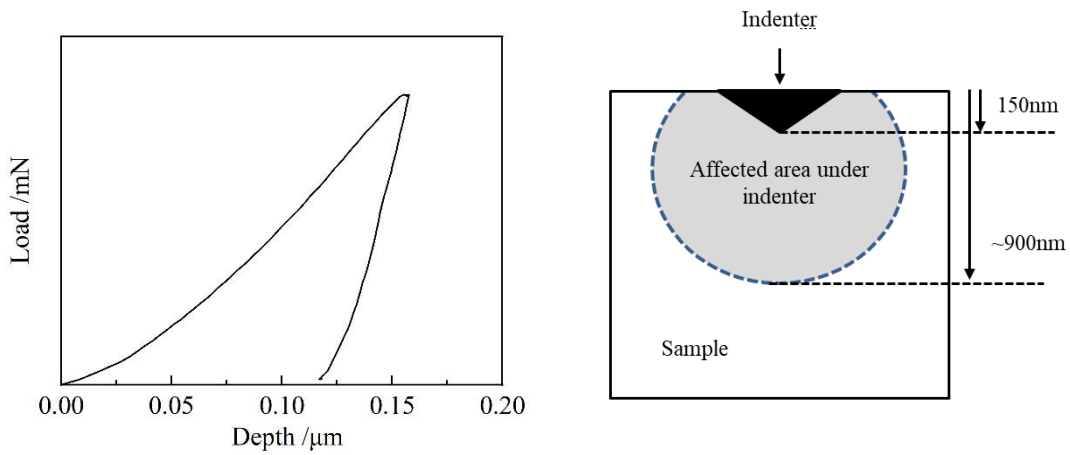


Fig. 1 Schematic diagram of nano-indentation

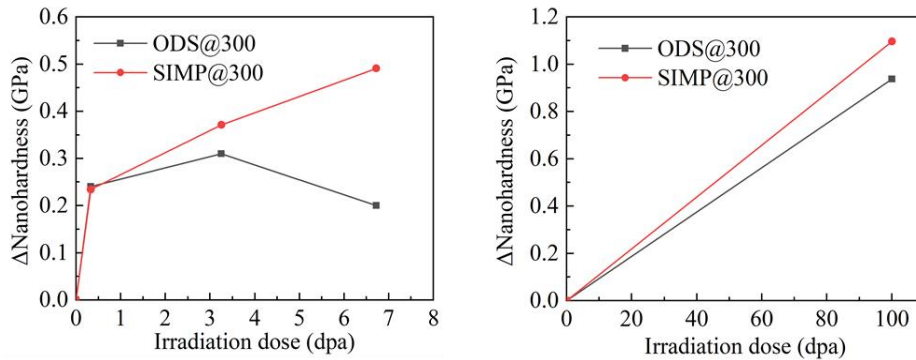


Fig. 2 The dependence of hardness change on irradiation dose for SIMP and RAFM-ODS steels irradiated at 300 °C

Reference:

- [1] S. Pecko, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 415 (2018) 1-8.
- [2] K. Vogel, et al., Nuclear Materials and Energy, 24 (2020) 100759.

Achievement List:

- 1) J.R. Zhang, doctoral thesis, (2020).

Abstract: Loop evolution and the effects of solute elements on loops is an important issue in the ageing of reactor pressure vessel (RPV) steels. In this work, method was developed to observe loop growth in RPV steels with in-situ transmission electron microscope (TEM), and two types of loop growth behavior was discovered.

Keyword: Irradiation embrittlement; Dislocation loops; In-situ; Reactor pressure vessel

1. Introduction

Irradiation on RPV steels produces dislocation loops and solute clusters. Although solute clusters have been studied extensively, our knowledge on the evolution of dislocation loops is still limited. Especially, loop migration and interaction under irradiation needs further research. In recent years, one-dimensional (1D) migration behavior of dislocation loops has been reported for pure metals including pure Fe under electron irradiation, ion irradiation and annealing after electron irradiation. The loops can be regarded as crowdion bundles and are capable of migrating along the direction of their Burgers vectors. However, these studies did not focus on the effect of 1D migration in loop growth.

In Tokai-campus, our accelerator-TEM linked facility can enable in-situ TEM observations of loop evolution under heavy ion irradiation. In this work, we developed methods to in-situ observe the growth and migration behavior of dislocation loops under ion irradiation. As a first step, the model alloy of Fe-0.6Ni was studied, because 0.6 wt.% is a typical value of Ni concentration in Japanese RPV steels, and a simple model alloy is expected to increase the loop size of the material under irradiation. The Fe-0.6Ni bulk alloy was pre-irradiated to produce visible dislocation loops. And then, subsequent in-situ irradiation was performed, during which loop growth and possible 1D migration can be observed and analyzed.

2. Experimental

The Fe-0.6Ni bulk alloy was solution-annealed at 1050 °C for 2 h, followed by water quenching. Pre-irradiation of the bulk specimen was performed with 3 MeV Fe-ions at 400 °C to a dose of 1.0 dpa to produce large size of loops. The damage peak calculated by SRIM-2008 appeared at a depth of 800 nm and the calculated dose was an average from 0 to 800 nm.

TEM foil specimens were fabricated focused ion beam (FIB) method. The foil specimens were picked up from grains close to close to <110> orientation, and then pre-thinned by FIB to a thickness of approximately ~200 nm. Then, flash electrochemical polishing was applied to remove FIB damage. The electrochemical polishing process is rather difficult, and the polishing parameters depend on the condition of the pre-thinned specimen. In this work, the electrolyte solution was 2% perchloric acid and 98% methanol. Polishing temperature was around -60 °C, and voltage was set to be 20V. The polishing time was 0.4 s.

The subsequent in-situ irradiation was performed at 400° C using 1 MeV Fe-ions. The intersection angle between the ion beam and the TEM electron beam is 30 °. The irradiation dose was 0.3dpa, and the dose rate was 9×10^{-5} dpa/s. TEM observation voltage was 200kV. The TEM electron beam was almost parallel to <110> zone axis. Two-beam bright field image was recorded under the reflection type $g = \langle 110 \rangle$.

3. Results

Fig. 1 shows TEM images taken at the start of in situ irradiation and at 0.3 dpa of in situ irradiation. The distance between the image area and the foil top was ~ 800 nm. In Fig. 1 (b), in-situ irradiation of 0.3 dpa significantly broadened the loop size distribution to a diameter range of 3–83 nm (123 loops were measured). The loop density in Fig. 1 (b) was $3.9 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, similar to that in Fig. 1 (a).

Two types of loop growth behavior can be observed. One type was almost linear growth with irradiation dose, and the other was abrupt growth with rapid size increase. The first type is similar to the constant speed growth of interstitial loops by absorbing freely migrating point defects. To understand the second type of growth, five typical events denoted as a-e were analyzed in detail. Events b-e had a common feature. One or more loops were observed to be located approximately 10–50 nm away from the grown loops prior to their abrupt growth, and then disappeared after the abrupt growth. The position of the disappeared loop relative to the grown loop can permit a path along the $\langle 111 \rangle$ crystallographic direction. These data suggest that loop may migrate one-dimensionally along $\langle 111 \rangle$ and then the abrupt growth of loops was a result of absorbing the surrounding loops.

4. Conclusions

In this study, method was developed to in-situ observe loop evolution in Fe-0.6Ni model alloy. Highly-visible loops was successfully generated by the pre-irradiation at 400 °C, which helped us to focus on loop growth and migration behavior in the subsequent in-situ irradiation.

In the subsequent in situ irradiation, two types of loop growth behavior were observed. One type was almost linear growth with irradiation dose, and the other was abrupt growth with rapid size increase. The abrupt growth can significantly broaden the loop size distribution, and it was found that the abrupt growth could result from the process in which nanometre-sized loop might migrate one-dimensionally and the large loop could absorb the small loop. Other composition of model alloys and their corresponding solute effects will be studied in the future.

5. Achievement list

- [1] L. Chen, K. Murakami, D. Y. Chen, H. Abe, Z. C. Li, N. Sekimura, Scripta Mater 187 (2020) 453–457.
- [2] L. Chen, K. Murakami, D. Y. Chen, H. Abe, Z. C. Li, N. Sekimura, Annual Meeting of Atomic Energy Society of Japan, 2020, Fukushima, Japan: Oral presentation.

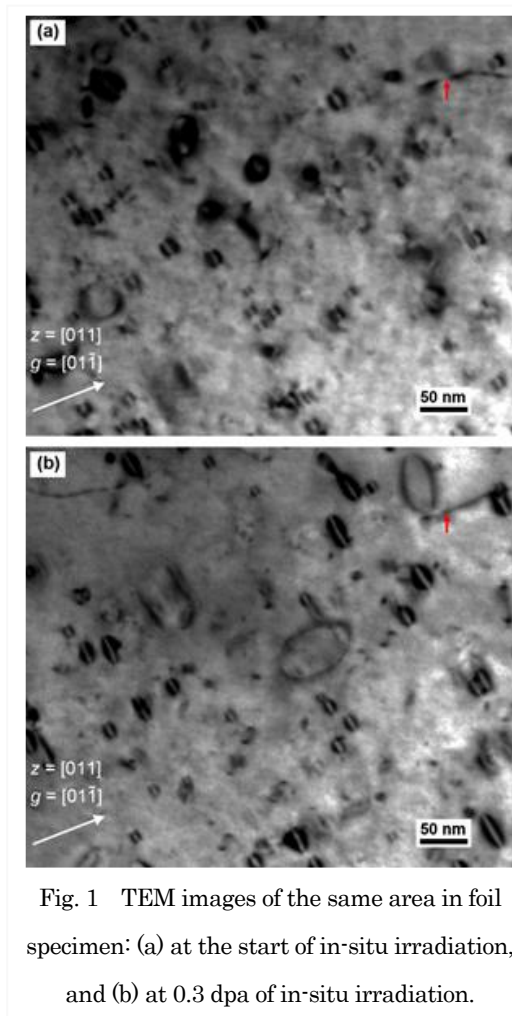


Fig. 1 TEM images of the same area in foil specimen: (a) at the start of in-situ irradiation, and (b) at 0.3 dpa of in-situ irradiation.

核融合ブランケット供用中に高温高压水にさらされることによって低放射化フェライト鋼の表面に形成される酸化皮膜の照射下安定性について検討するため、あらかじめ高温高压水中で酸化皮膜を形成させた低放射化フェライト鋼に対して重イオン照射を行い、酸化皮膜の組織変化について検討した。

キーワード： 低放射化フェライト鋼、高温高压水中腐食、酸化皮膜、イオン照射

1. はじめに

日本は水冷却固体増殖方式を ITER-テストブランケットモジュール(TBM)ならびに、原型炉において主案としている。冷却材として水を利用することから実機供用中には構造材料である低放射化フェライト鋼 F82H の表面には酸化皮膜が形成され、その酸化皮膜による防食の効果も期待されている。一方で、特に原型炉においては中性子照射環境にさらされることから、F82H 母材の耐食性の低下、F82H 上酸化皮膜の防食機能の低下、水の放射線分解といった観点で腐食特性への照射の影響に関する検討を進めている。本研究では流動高温高压水中で F82H の表面に形成される酸化皮膜を対象に東京大学重照射研究設備 (HIT) でのイオン照射試験により酸化皮膜への照射影響について評価を行った。

2. 実験方法

供試材は低放射化フェライト鋼F82H-BA12である。イオン照射試験を実施する前に流動高温高压水中で腐食試験を実施した。流動腐食試験は外径275 mm、内径130mm、厚さ3 mmのドーナツ状の円盤試験片を用いて、温度270°C、圧力6.3 MPaの高温高压水中で実施した。ブランケット条件を模擬するため試験片端部の周速度は5 m/sとなる回転速度で試験を実施した。溶存酸素濃度は5 ppb以下、溶存水素濃度は3.5ppmと加圧水型原子炉一次冷却水相当の濃度とした。試験時間は100時間である。試験後に円盤試験片の端部から15 mm × 15 mm × 3 mmの照射試験片を切り出した。試験片の表面は片面のみ鏡面研磨し酸化皮膜を取り除き、照射試験はHITのタンデム加速器を用いてFeイオンの照射を実施した。照射温度は300°Cにて照射量は鉄換算で最大20 dpaまでの試験を実施した。照射試験後には照射部と非照射部の表面からFIBで内部組織観察用の薄膜試料を作製しTEM観察を行った。

3. 結果

図1に流動腐食試験後で照射試験前の試験片断面のEPMA分析結果を示す。試験片の表面に厚さ1.5 mm程度の鉄とクロムの酸化物が形成されていた。過去の研究[1]ではDO20ppbでの高温高压水中腐食試験において、静水腐食試験では外層にFe₃O₄の粒子状の酸化物、内層にFeCr₂O₄の酸化物が形成され、一方流動腐食試験片においては静水腐食試験片で見られた外層酸化物はなく、FeCr₂O₄単相となっていた。本試験の結果もFeCr₂O₄単相であったことから、DO20ppb以下の溶存酸素濃度や水素添加の流動腐食への影響は小さいことが示唆された。

図2に透過電子顕微鏡による微細組織観察結果とイオン注入シミュレーションコードSRIMによる純鉄及びFeCr₂O₄のそれぞれ均一相を想定した場合の照射損傷分布を同時に示す。同図ではF82H母材部と酸化皮膜の界面、照射試験片の酸化皮膜中で照射による構造変化が見られた部位との境界について実線で示している。FeCr₂O₄の均一相のSRIM計算結果では、損傷のピークがF82H母材部見られると予想されたが、微細組織観察からは実際の照射影響部と必ずしも一致せず、照射による組織変化のほとんどが純鉄の損傷領域に位置することが明らかとなった。

これは、酸化皮膜の密度が FeCr_2O_4 単相よりも高いために実際の損傷深さが照射表面側に位置した と考えられる。本結果より、これまで酸化皮膜は FeCr_2O_4 の単相と考えてきたが、実際に生成した酸化皮膜はF82Hと FeCr_2O_4 の混合相であることが示唆され、今後の照射試験を含む酸化皮膜の評価においてF82Hと FeCr_2O_4 の混合相に着目して検討する必要性が明らかになった。今後は酸化皮膜の照射後組織の詳細について明らかにするとともに、本試験片を用いて電気化学的手法等による腐食特性の評価を実施し、腐食特性への具体的な照射影響について検討を進める予定である。

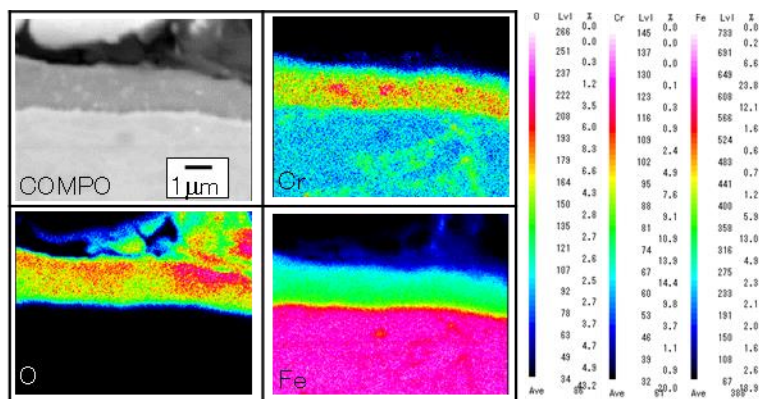


図 1 流動高温高压水中腐食試験後に形成された酸化皮膜の EPMA 分析結果

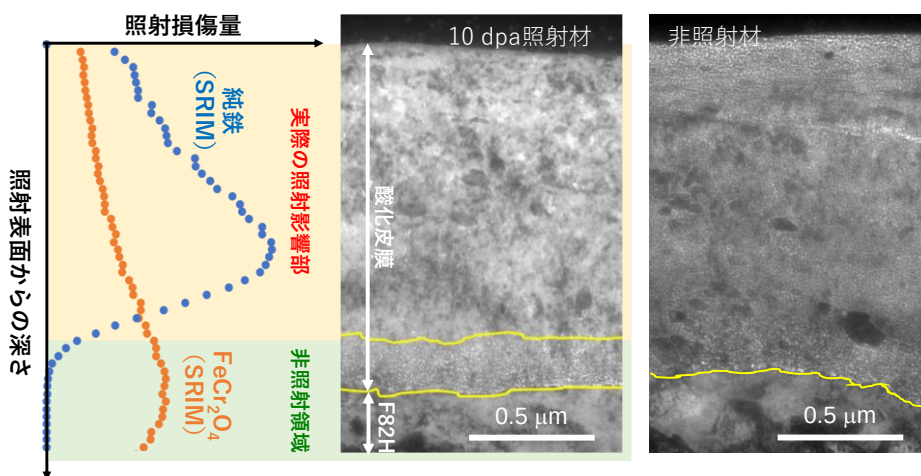


図 1 高温高压水腐食試験により形成した酸化皮膜のイオン照射 (10dpa@300°C) 前後での微細組織と SRIM 計算結果の比較

[1] M. Nakajima et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES, 11, 2015

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 30 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 14 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日本原子力研究開発機構・量子科学技術研究開発機構施設利用一般共同研究成果報告会と併催として、令和元年 8 月 9、10 日（ポスター発表は 8 月 10 日）に東京大学本郷キャンパス山上会館にて開催した。平成 30 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：6 テーマ、L：8 テーマ、H：13 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 7 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は次節に示す。

当日は、併催する他の成果報告会と合わせて、二日間でのべ 94 名の参加者があり、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	レーザーを用いた核物質分光分析システムの検討	岩田 圭弘	東京大
2	電子リニアックを用いた $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の分散型製造法	張 宰雄	東京大
3	糖転移フラボノイド αG -ルチンの放射線防護効果の研究	于 暁	東京大
4	H_2 Production in Water under γ -Radiation with Metal Oxide Nanoparticles	McGrady, John	東京大
5	高速炉におけるナトリウム-水反応に関する粒子法シミュレーションの開発	Li, JIAZHI	東京大
6	核融合炉材材料の照射効果	叶野 翔	東京大
7	先進原子炉構造材料の照射効果	楊 会龍	東京大

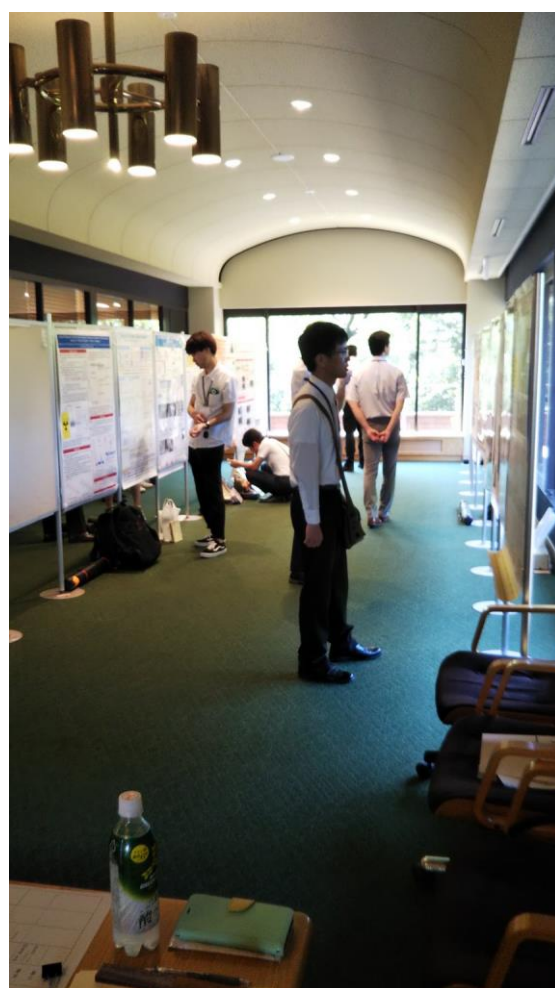
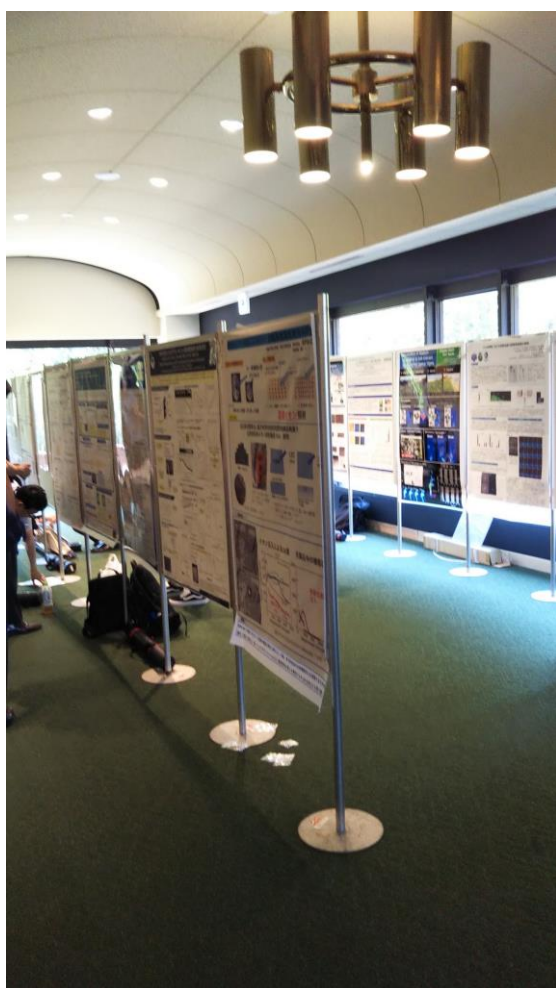


写真 当日のポスター発表会の様子

ガン治療用加速器開発、ポストゲノム時代の生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、医療診断、マイクロリソグラフィ、原子力状態監視応用、核物質定量管理への利用を画期的に飛躍させる軟 X 線から硬 X 線領域の小型高輝度 X 線発生装置、更に近年では小型の陽子やイオンマイクロビーム発生装置において、加速器の技術開発は必要不可欠である。放射線や加速器のみならず、今回は日本原子力学会核燃料・RI 施設役割・提言検討委員会と連動して、核物資の核医学や廃炉研究への応用のネットワーク作りに焦点をしぼり、研究会を開催した。

キーワード： 加速器利用,中性子, X 線, γ 線, 電子線, 高周波加速, レーザー加速, 核物質, 核医学, 廃炉

開催日時および場所

令和 2 年 3 月 19 日（木）9:00 - 12:00

東京大学原子力専攻会議室（茨城県東海村）を中心にリモート

参加者

上坂充(東京大学)、佐藤修彰(東北大学)、斎藤拓巳(東京大学)、鈴木達也(長岡技科大学)、宇埜正美(福井大学)、中島健(京都大学)、檜山敏明(九州大学)、牟田浩明(大阪大学)、松村達郎 (JAEA)、前田茂貴 (JAEA)

内容

1)各機関現状紹介

資料を用いて各大学における核燃料あるいはRIを用いた試験・研究について、また各施設における現状と規制対応などが紹介された。特に福井大学においては試験研究炉の新設に向けた取り組みが紹介された。

2) ネットワーク化に向けた総合討論

ネットワーク化に向けた取り組みのための話題提供として、JAEA大洗におけるRI製造技術、 α 放射体を用いたアイソトープ治療への取り組みが紹介された。また小型加速器によるRI製造のためのターゲットとして、放射性廃棄物から ^{100}Mo あるいは ^{226}Ra を抽出して用いるアイデアが紹介された。

3) その他

研究ネットワーク化に向けては、核物質・RIを用いた新しい核医学、福島廃炉に関連する研究を中心に、今後も議論を続けるとともに、参加者を広く募っていくこととなった。

以上

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 2019 年秋の大会および 2020 年春の年会において「レーザーの特長を利用した研究開発Ⅳ」「同Ⅴ」の題目において各々総合講演として、3 名、2 名の講師に講演していただくことで開催した。ただし 2020 年春の年会については、新型コロナウイルス感染拡大のため、開催中止となった（発表は成立）。

キーワード： レーザー、福島廃炉、廃止措置、切断、LIBS

「レーザーの特長を利用した研究開発Ⅳ」[1]

1. 概要

弥生研究会「原子・分子の分光分析技術とその応用」の一環として、日本原子力学会 2019 年秋の大会にて企画セッション「レーザーの特長を利用した研究開発Ⅳ」を開催した。

開催日時：2019 年 9 月 11 日（水）13:00-14:30

開催場所：富山大学五福キャンパス N 会場（共通教育棟 3F A32）

座長：長谷川秀一（東京大学）

2. 報告内容

はじめに座長から、日本原子力学会におけるレーザー分野の重要性について説明があり、続いて、以下の 3 講演が行われた。

(1) kW 級 CW レーザーを用いた表面クリーニング技術の開発と除染適用の試み

講演者：藤田 和久（光産業創成大学院大）

CW レーザー光の照射位置を高速スキャンすることではつるレーザークリーニング技術の開発に取り組んでいる。そのインフラ構造物の維持・管理、廃止措置における除染技術への応用の現状について紹介があった。10kW レーザーを用いて、ステンレス鋼 10 μ m を除去する場合、1m²あたり 15 分程度と評価している。

(2) 過酷環境下での遠隔レーザー分析技術

講演者：大場 弘則（QST）

福島第一原子力発電所の廃炉に向けて、レーザー誘起プラズマ発光分光（LIBS）技術の応用を検討している。特に、光ファイバー先端にマイクロチップレーザーを搭載したものの可能性を追求している。放射線耐久性などについて、具体的な検討状況を紹介した。

(3) レーザー法による原子炉厚板鋼材切断技術の開発

講演者：田村 浩司（QST）

廃止措置では圧力容器など 10cm を超える暑さの鋼材を切断することが必要となるが、レーザーを用いた切断技術の適用を試みた。通常、熔融金属によりきれいに切断できない場合もあるが、アシストガスを用いて熔融物を吹き飛ばすことで切断に成功した。これを用いたシステム構築を紹介した。

「レーザーの特長を利用した研究開発Ⅴ」[2]

1. 概要

弥生研究会「原子・分子の分光分析技術とその応用」の一環として、日本原子力学会 2020 年春の年会にて企画セッション「レーザーの特長を利用した研究開発 V」が企画した。開催は中止となったが、発表は成立した。

開催日時：2020 年 3 月 16 日（月）13:00-14:30（開催中止）

開催場所：福島大学 N 会場（共通講義棟 S 棟 3F S-32）

座長：長谷川秀一（東京大学）

2. 報告内容

以下の 2 講演が予定されていた。発表は成立している。

(1) レーザー誘起超音波によるコンクリート構造物の健全性評価

講演者：山田 知典（JAEA）

コンクリート構造物の熱劣化を評価するため、レーザー診断技術の開発を行っている。対象物にパルスレーザーを照射し超音波を発生させ、伝搬する縦波を CW レーザーによりドップラー効果を利用して測定する。その結果、熱曝露時間に応じて伝搬時間が異なることを確認した。

(2) 超小型パルスレーザーの開発とインフラ予防保全への展開

講演者：佐野 雄二(自然科学研究機構)

手のひらサイズで電池駆動が可能なパルスレーザーの開発と、その利用例として、レーザーピーニング加工について紹介した。航空機用アルミニウム合金などに実施した結果、その効果が見られた。今後はインフラメンテナンスへの展開を考えている。

謝辞

今回ご講演をご快諾いただいた藤田先生、大場先生、田村先生、山田先生、佐野先生に感謝いたします。また、本セッションを原子力学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。

備考

レーザーの特長を利用した研究開発 IV については、原子力学会誌 Vol.62, No.5 (2020) にて特集で取り上げられた。

参考文献

[1] 日本原子力学会 2019 年秋の大会プログラム, 企画セッション | 総合講演・報告 | 総合講演・報告 1 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 IV」

[2] 日本原子力学会 2020 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 V」

[3] 藤田和久,他, 「kW 級 CW レーザーを用いた表面クリーニング技術の開発と除染適用の試み」, 日本原子力学会誌, Vol.62, No.5, 13-16, 2020

[4] 大場弘則, 若井田郁夫, 平等拓範, 「過酷環境下での遠隔レーザー分析技術」, 日本原子力学会誌, Vol.62, No.5, 17-21, 2020

[5] 田村浩司, 遠山伸一, 「レーザー法による原子炉厚板鋼材切断技術の開発」, 日本原子力学会誌, Vol.62, No.5, 22-25, 2020

長く継続して来た弥生研究会～放射線効果の解明と応用～では主に均一な系の放射線効果に注目して放射線誘起現象の解明とその産業・医学利用に貢献する成果を取り上げてきた。これを発展させ、不均一な系すなわち界面を含む系での放射線効果を含んだ形にアップデートした。今年度は3月中旬に東京での開催を予定していたが、新型コロナウイルス感染症の流行を受け急きょ中止とした。来年度以降は感染症の収束を見つつ、オンラインでの開催も検討する。

キーワード：放射線効果，界面，ラジカル，電荷移動，エネルギー移動，表面改質，生物影響，原子力

1. 概要

主に均一な系の放射線効果に注目して放射線誘起現象の解明とその産業・医学利用に貢献する成果を取り上げ、長く継続して来た弥生研究会～放射線効果の解明と応用～を発展させ、不均一な系すなわち界面を含む系での放射線効果を含んだ形にアップデートした。物質として界面を含む系を意識しているものの、均一系から複雑系まで様々な対象への放射線効果の解明と応用に関する議論を行う枠組みとなっている。

今年度は日本放射線化学会の先端放射線化学シンポジウム（SARAC2019）との共催として3月中旬に東京（本学本郷キャンパス）での開催を予定していた。ただ、残念なことに3月頃から徐々に深刻化した新型コロナウイルス感染症の流行を受け急きょ中止となった。来年度以降は感染症の収束を見つつ、オンラインでの開催も検討する。

2019年度専攻内行事一
覧等

年月日	行 事 内 容 等
2019.4.1	原子力専攻（専門職大学院）入学式
2019.6.7	原子力安全管理委員会
2019.7.18	運営諮問会議
2019.8.8-9	第14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・量研機構施設利用共同研究,弥生研究会成果報告会
2019.8.9	第16回連携重点研究運営委員会
2019.9.27	危機対策管理委員会
2019.9.27	原子力安全管理委員
2019.10.18	防災訓練の実施
2019.11.15	防災訓練の実施
2019.11.29	防災訓練の実施
2019.12.6	核物質防護訓練の実施
2019.12.20	総合防災訓練の実施
2020.1.14	第38回一般共同研究専門委員会
2020.2.19	原災法防災訓練
2020.2.26	消防訓練の実施
2020.2.28	第93回原子力機構施設利用共同研究委員会
2020.3.4	平成31年度 共同利用運営委員会
2020.3.23	原子力専攻（専門職大学院）学位記授与式（中止）
2020.3.27	原子力安全管理委員会、危機対策管理委員会

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 (R2.3.4 現在)

区分	氏 名	所属機	職名	名称	委嘱期間
3.3(1)	長谷川 秀一	東大（院・工）原子力専攻	専攻長	委員	30.4.1～
〃	山 口 彰	〃 〃	教授	〃	30.4.1～
〃	上 坂 充	〃 〃	〃	〃	25.4.1～
〃	岡本 孝司	〃 〃	〃	〃	28.4.1～
〃	阿部 弘亨	〃 〃	〃	〃	27.10.1～
3.3(2)	寺井 隆幸	〃 総 合 研 究 機 構	〃	委員長	31.4.1～R2.3.31
〃	石川 顕一	〃 原 子 力 国 際 専 攻	〃	委員	31.4.1～R3.3.31
3.3(3)	瓜 谷 章	名大（院・工）総合エネルギー工学専攻	〃	〃	R1.5.17～R3.3.31
〃	齊藤 泰司	京都大学複合原子力科学研究所	〃	〃	R1.5.27～R3.3.31
〃	浅井 圭介	東北大（院・工）応用化学専攻	〃	〃	31.4.26～R3.3.31
〃	松山 成男	東北大（院・工）量子エネルギー工学専攻	〃	〃	R1.5.24～R3.3.31
〃	鷲尾 方一	早大・理工学術院総合研究所	〃	〃	31.4.1～R3.3.31
〃	関東 康祐	茨城大（院・工）機械システム工学専攻	〃	〃	R1.8.23～R3.3.31
〃	河原林 順	東京都市大（工）原子力安全工学科	〃	〃	31.4.1～R3.3.31
〃	佐々木 晶	阪大（院・理）宇宙地球科学専攻	〃	〃	R1.5.10～R3.3.31
〃	渡辺 幸信	九大（院・工）先端エネルギー理工学専攻	〃	〃	31.4.1～R3.3.31
〃	加美山 隆	北大（院・工）量子理工学部門	〃	〃	31.4.26～R3.3.31
〃	村上 健太	長岡技術大（院・工）原子力システム安全工学専攻	准教授	〃	31.4.1～R3.3.31
3.3(4)	三浦 幸俊	日本原子力研究開発機構	理事	〃	31.4.1～R3.3.31
〃	羽島 良一	量子科学技術研究開発機構	グループ プリー	〃	31.4.1～R3.3.31
〃	鈴木 良一	産業技術総合研究所	首席研	〃	R1.6.1～R3.3.31
〃	山口 誠哉	高エネルギー加速器研究機構	施設長	〃	31.4.26～R3.3.31
〃	田野井 慶太郎	東大（院・農）アイソトープ農学教育研究施設	教授	〃	R1.7.1～R3.3.31
〃	細谷 紀子	〃（院・医）疾患生命工学センター	准教授	〃	R1.5.15～R3.3.31
8	平野 裕士	〃（工・情）事務部	総務課長	幹事	30.4.1～
〃	山下 真一	〃（院・工）原子力専攻	准教授	〃	30.4.1～
9	家田 芳之	〃 〃	副課長	事務	30.7.1～

<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規程より抜粋>

第3条 3 委員は、専攻長が委嘱した次の各号に掲げるものとする。

(1) 専攻教授 (2) 東京大学大学院工学系研究科教授

(3) 他大学の原子力研究関連教員 (4) その他の学識経験者第8条 委員会に、幹事若干名を置く。

2 幹事は、東京大学大学院工学系・情報理工学系研究科等の教職員のうちから専攻長が委嘱する。第9条 委員会及び専門員会の庶務は、専攻事務室が取り扱う。

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
31F-1	V&Vのための精度保証実験データベース構築	岡本 孝司	岡本 孝司	岡本 孝司
	実 験 担 当 者			
韓国 Ajou 大学	Jo Byeongnam (准教授)			
産総研	染矢 聡(研究員)	近藤 雅裕(研究員)		
JAEA	Chai Penghui (特定課題研究員)			
東大・院工・原子力国際	Erdal Ozdemir(学術支援専門職員)		結城 喬(D3)	
	Zhang Yao(D3)	Wang Kai(D3)	張 星永(D3)	
	Rizaal Muhammad(D3)	Li Chung-Yen(D2)	Liang Hui(D2)	
	Wang Shixian(D1)	黒澤 克則(M2)	川嶋 晃仁(M2)	
	上杉 鉦太郎(M2)			
東大・院工・原子力	岡本 孝司(教授)	鈴木 俊一 (特任教授)		
	Erkan Nejdet(特任准教授)	Zhou Qian(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
31F-2	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			
国立清華大	黄 衍介(教授)	Kuan-Yan Huang(博士研究員)		
	Tze-Chih Liu(M1)			
KEK	小山 和義(研究員)			
秋田高専	坂本 文人(講師)			
東大・院工・原子力国際	尾関 政文(M1)	近藤 勇佑(M1)	楊 健(M1)	
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	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
31F-3	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(講師)			
土木研究所	石田 雅博(上席研究員)	大島 義信(主任研究員)		
	廣江 亜希子(研究員)			
産総研	藤原 健(研究員)			
シャープ株式会社	三好 寿顕(研究員)			
アキュセラ	草野 譲一(研究員)	山本 昌志 (研究員)	伊藤 卓(研究員)	
東大・院工・総合研究機構	高橋 浩之(教授)			
東大・院工・マテリアル工学専攻	松浦 宏行(准教授)			
東大・院工・機械工学専攻	中尾 政之(教授)			
東大・院工・原子力国際	島添 健次(特任講師)	Yudhitya Kusumawati(D3)		
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	山下 真一(准教授)	三津谷 有貴(助教)	
	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
31F-4	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・総合研究機構	高橋 浩之(教授)			
東大・院工・原子力国際	Yudhitya Kusumawati(D3)			
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	三津谷 有貴(助教)		
	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
31F-5	レーザー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)	宮部 昌文(研究員)	富田 純平(研究員)	
	永岡 美佳(研究員)	松原 菜摘(研究員)	山田 知典(研究員)	
	伊藤 主税(研究員)			
産総研	藤原 健(研究員)			
レーザー総研	大道 博行(研究員)			
東大・博物館	松崎 浩之(教授)			
東大・院工・原子力国際	石川 大裕(D3)	Stephen Wells(D2)		
	松原 史枝(M2)			
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	長谷川 秀一(教授)	斉藤 拓巳(准教授)	
	岩田 圭弘(助教)	千 徠焔(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
31F-6	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			
東大・工・原子力国際	Oh Sun-Ryung(D3)	Neil Nikolova(M2)	Wang Guangchen(M2)	
	Tang Qi(M2)	Luo Xiaotong(M2)	石村 崇(M2)	
	島田 敬士(M2)	Zhang Jingbo(M1)	Yi Han(研究生)	
	Cheng Chen(研究生)			
東大・工・原子力	阿部 弘亨(教授)	叶野 翔(助教)	Yang Huilong(特任助教)	
	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
31F-7	土壌中での放射性核種の動態評価	斉藤 拓巳	斉藤 拓巳	斉藤 拓巳
	実 験 担 当 者			
東大・工・原子力国際	福岡 将史(M2)	角木 啓太(M1)		
東大・工・原子力専攻	斉藤 拓巳(准教授)	Qian Zhou(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
31H-1	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	CHEN Dongyue	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
福井大・国際原子力		山本 琢也(客員教授)		
長岡技術科学大・原子力システム安全		村上 健太(准教授)		
東大・院工・原子力国際		関村 直人(教授)		
		CHEN Dongyue (特任講師) 陳 良(特任研究員)		
東大・院工・原子力		阿部 弘亨(教授) 叶野 翔(助教)		
		楊 会龍(特任助教) 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
31H－2	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				
量研機構	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)	中島 基樹(主任研究員)	黒滝 宏紀(任期付職員)		
東大・院工・原子力	叶野 翔(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
31H-3	先進原子炉構造材の照射効果	叶野 翔	叶野 翔	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
日立製作所	石 嵯 貴大			
東大・院工・原子力国際	Oh Sun-Ryung(D3)	Neil Nikolova(M2)	Wang Guangchen(M2)	
	Tang Qi(M2)	Luo Xiaotong(M2)	石村 崇(M2)	
	島田 敬士(M2)	Zhang Jingbo(M1)	Yi Han(研究生)	
	Cheng Chen(研究生)			
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	叶野 翔(助教)	YANG Huilong(特任助教)	
	尾亦 孝男(技術専門職員)	Mc Grady, John Patrick(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
31H-4	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(主席研究員)	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	叶野 翔(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
31H-5	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	近田 拓未	近田 拓未	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
静岡大・学術院理学領域	近田 拓未(講師)			
静岡大・総合	木村 圭佑(M2)	中村 和貴(M2)	赤星 江莉加(M1)	
	遠藤 理帆(M1)	中澤 章太(M1)		
東大・工・原子力	叶野 翔(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
31H-6	核融合炉材料の照射効果	叶野 翔	叶野 翔	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
東大・院工・原子力国際	Oh Sun-Ryung(D3)	Neil Nikolova(M2)	Tang Qi(M2)	
	Wang Guangchen(M2)	Luo Xiaotong(M2)	石村 崇(M2)	
	島田 敬士(M2)	Zhang Jingbo(M1)	Yi Han(研究生)	
	Cheng Chen(研究生)			
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	叶野 翔(助教)	YANG Huilong(特任助教)	
	尾亦 孝男(技術専門職員)	Mc Grady, John Patrick(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
31H-7	核融合炉材料における照射欠陥の発達過程	徐 虬	徐 虬	神野 智史
	実 験 担 当 者			
京都大・複合研	徐 虬(准教授)			
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
31H-8	Irradiation effects in advanced martensitic steels for nuclear fusion blanket	阿部 弘亨	阿部 弘亨	楊 会龍
	実 験 担 当 者			
中国科学院金属研究所	Li Yangfen(教授)	Quanqiang SHI(助教)		
	Jiarong ZHANG(D3)	Quangquan WANG(M2)		
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	叶野 翔(助教)		
	楊 会龍(特任助教)	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
31H-9	イオン照射を用いた照射劣化モデル化研究	村上 健太	村上 健太	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
福井大・国際原子力	山本 琢也(客員教授)			
長岡技術科学大・原子力	鈴木 雅秀(特任教授)	村上 健太(准教授)		
	Do Thi Mai Dung(助教)	I Wayan Ngarayana(M2)		
	Nguyen Ba Vu Chinh(M2)	亀井 渉(M2)		
	陳 心潤(M2)			
長岡技術科学大・エネルギー環境	Luu Vu Nhut(D2)	Phongsakorn Prak Tom(D2)		
名古屋大学・都市環境学	丸山 一平(教授)			
日本原子力研究開発機構	高見澤 悠(研究員)	河 侑成(特任研究員)		
東大・院工・原子力国際	CHEN Dongyue(特任講師)	陳 良(特任研究員)		
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	叶野 翔(助教)		
	尾亦 孝男(技術専門職員)	楊 会龍(特任助教)		

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
31H-10	The effects solute elements on the evolution of dislocation loops under heavy ion irradiation	関村 直人	関村 直人	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
長岡技術科学大・原子力システム安全	村上 健太(准教授)			
電中研・材料科学研	土肥 謙次(主任研究員)	西田 憲二(主任研究員)		
	野本 明義(主任研究員)			
日立製作所	王 昀(主任研究員)			
東大・院工・原子力国際	関村 直人(教授)	糸井 達哉(准教授)		
	CHEN Dongyue(特任講師)	陳 良(特任研究員)		
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	叶野 翔(助教)		
	楊 会龍(特任助教)			

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
31H-11	核融合炉テストブランケット材料における照射効果	叶野 翔	叶野 翔	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
Seoul National University	Gon-Ho Kim(教授)	小田 卓司(准教授)	Ki-Baek Roh(D3)	
	Jae-Min Song(D2)	Lee Hyunseok(M2)	Lee Donggyu(M2)	
東大・院工・原子力	叶野 翔(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
31H-12	レーザー駆動プロトンを用いた材料照射の予備実験	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)			
QST・関西	福田 祐仁(上席研究員)			
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
31H-13	大強度陽子加速器標的環境に耐えうる新材料の照射損傷の基礎研究	石田 卓	石田 卓	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
Fermi National Accelerator Lab.	Patrick G.Hurh(Senior Principal Engineer)			
	Kavin Ammigan(Senior Engineer)			
KEK 素粒子原子核研究所	石田 卓(研究機関講師)			
KEK 物質構造科学研究所	牧村俊助(技師)			
JAEA J-PARC センター	若井栄一(研究主幹)			
東大・院工・原子力	阿部 弘亨(教授)	叶野 翔(助教)		
	楊 会龍(特任助教)			

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
31H－14	低放射化フェライト鋼酸化皮膜の照射影響に関する研究	中島 基樹	中島 基樹	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
量子科学技術研究開発機構	中島 基樹(主任研究員)	谷川 博康(グループリーダー)		
	安堂 正己(主幹研究員)	濱口 大(主幹研究員)		
	黒滝 宏紀 (任期付職員)			
	東大・院工・原子力	叶野 翔(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
31S-02	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・院工・原子力 阿部 弘亨(教授) 叶野 翔(助教) 尾亦 孝男(技術専門職員) YANG Huilong(特任助教)				

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
31L-1	水溶液の放射線効果の研究	山下 真一	山下 真一	山下 真一
	実 験 担 当 者			
大阪大・産研	室屋 裕佐(准教授)			
京都大・工	馬 駿(博士研究員)			
中国科学技術大学	WENG HANQIN(博士研究員)			
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)	樋川 智洋(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)			
東大・院工・原子力国際	于 嵩(D3)	永井 菜月(M2)		
東大・院工・原子力	工藤 久明(准教授)	山下 真一(准教授)	上田 徹(学術支援職員)	
	橋本 英子(技術専門職員)	Mc Grady,John Patrick(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
31L-2	パルス&プローブ法を用いる 超高速反応の研究	室屋 裕佐	室屋 裕佐	山下 真一
	実 験 担 当 者			
大阪大・産研	室屋 裕佐(准教授)			
東北大・院工	越水 正典(准教授)			
京都大・工	馬 駿(博士研究員)			
中国科学技術大	WENG HANQIN(博士研究員)			
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)	樋川 智洋(研究員)		
東大・院工・原子力国際	于 嵩(D3)	永井 菜月(M2)		
東大・院工・原子力	上坂 充(教授)	工藤 久明(准教授)	山下 真一(准教授)	
	上田 徹(学術支援職員)	橋本 英子(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
31L-3	不定比金属組成を精密に制御した超伝導体のピンニング特性に及ぼす電子線照射効果	下山 淳一	下山 淳一	叶野 翔
	実 験 担 当 者			
青山学院大・理工				
下山 淳一(教授)				
元木 貴則(助教)				
岡村 行泰(M2)				
小塩 剛史(M1)				
東大・院工・総合研究機構				
寺井 隆幸(教授)				
東大・院工・応用化学				
武田 泰明(D3)				
東大・院工・原子力				
叶野 翔(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
31 L - 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	室屋 裕佐(准教授)			
京都大・工	馬 駿(博士研究員)			
中国科学技術大	WENG HANQIN(博士研究員)			
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)	樋川 智洋(研究員)		
東大・院工・原子力国際	于 嵩(D3)	永井 菜月(M2)		
東大・院工・原子力	工藤 久明(准教授)	山下 真一(准教授)	上田 徹(学術支援職員)	
	橋本 英子(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
31L-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	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(講師)			
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) 山下 真一(准教授) 上田 徹(学術支援職員)			
	橋本 英子(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
31L-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	越水 正典(准教授)	藤本 裕(助教)	加賀美 佳(M2)	
	川本 弘樹(M2)	高橋 佳亮(M2)		
東大・院工・原子力	工藤 久明(准教授)	山下 真一(准教授)	上田 徹(学術支援職員)	
	橋本 英子(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
31L-7	MA 分離抽出剤の放射線分解メカニズムの研究	樋川 智洋	樋川 智洋	山下 真一
	実 験 担 当 者			
大阪大・産研 室屋 裕佐(准教授)				
日本原子力研究開発機構 樋川 智洋(研究員) 熊谷 友多(研究員)				
東大・院工・原子力 工藤 久明(准教授) 山下 真一(准教授) 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
31L-8	放射線誘起活性種の時間分解ラマン分光	山下 真一	山下 真一	山下 真一
	実 験 担 当 者			
大阪大・産研	室屋 裕佐(准教授)			
京都大・工	馬 駿(博士研究員)			
中国科学技術大	WENG HANQIN(博士研究員)			
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	樋川 智洋(研究員)	熊谷 友多(研究員)		
東大・院工・原子力国際	于 嵩(D3)	永井 菜月(M2)		
東大・院工・原子力	工藤 久明(准教授)	山下 真一(准教授)	上田 徹(学術支援職員)	
	橋本 英子(技術専門職員)	Mc Grady,John Patrick(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
31S-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 室屋 裕佐(准教授)				
東大・院工・原子力 上坂 充(教授) 山下 真一 (准教授) 上田 徹(学術支援職員)				
橋本 英子(技術専門職員)				

31 年度 UTNL レポートリスト

No	著者名	標題
R-500	共同利用管理室	平成 30 年度 共同利用成果報告書