

大学院教育支援機構（DoGS）海外渡航助成金 報告書

Outcome report

計画名 Plan	核融合発電の実用化に向けたリチウム6同位体濃縮技術の確立
氏名 Name	伊藤 諒
研究科・専攻・学年 Graduate school/Division/Year level	エネルギー科学研究科・エネルギー変換科学専攻・博士後期課程2年
渡航国 Country	アメリカ合衆国（ハワイ州、ニューヨーク州）、ドイツ
渡航日程 Travel schedule	2024年10月5日～2024年10月19日

渡航計画の概要 Outline of the travel plan

本海外渡航は、10月6日～11日の間、アメリカ合衆国ハワイ州にて開催された**電気化学および固体化学に関する環太平洋会議（PRiME 2024）への参加**、アメリカ合衆国ニューヨ

月	10														
日付	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
渡航の流れ	出国	国際学会PRiMEへの参加						移動（休日）	BNL訪問	移動	KIT訪問 打ち合わせ		帰国		
学会と訪問先の説明	電気化学および固体化学に関する環太平洋会議（PRiME2024） ・電気化学分野で世界最大 ・溶融塩電気化学部門で発表						ブルックヘブン国立研究所（BNL） ・1947年設立、NY州 ・衝突型加速器部門へ			カールスルーエ工科大学（KIT） ・ドイツ最古の工科大学 ・物理学研究所を訪問 ・核融合炉工学分野の主要研究拠点					

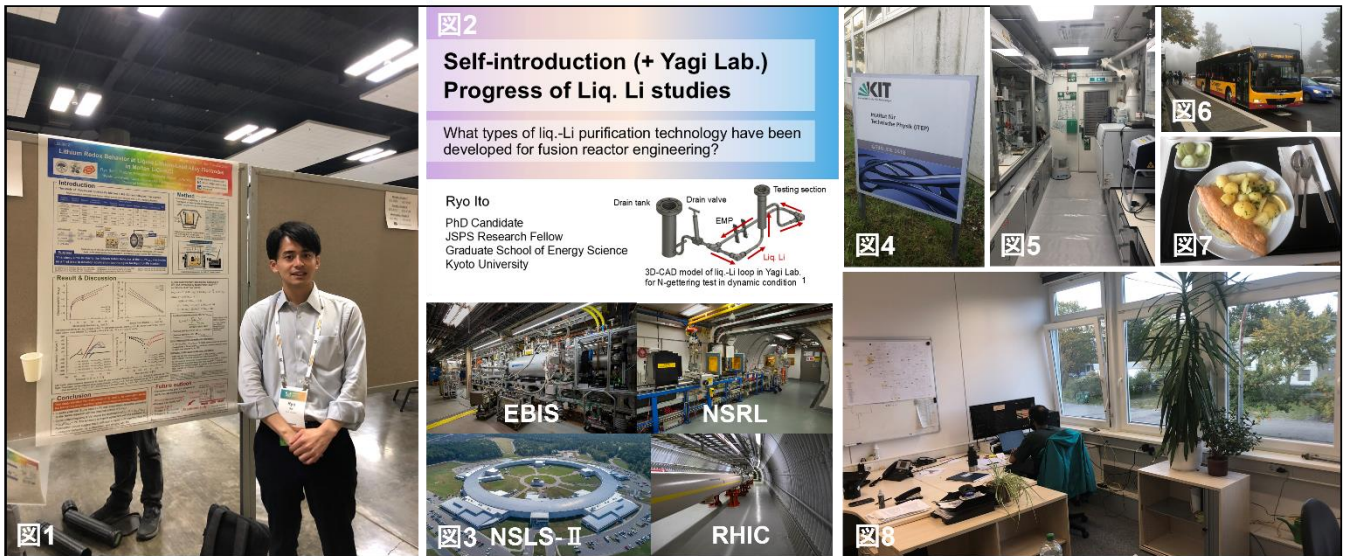
ーク州に位置し、エネルギー省傘下の研究所の一つである**ブルックヘブン国立研究所（BNL）への訪問**、ドイツ・バーデン＝ヴュルテンベルク州に位置し、ドイツ最古の工科大学である**カールスルーエ工科大学（KIT）への訪問**、以上3点を主題として実施された（表1）。PRiME 2024では、博士課程において実施している溶融塩電解質と液体リチウム鉛（LiPb）電極を用いたリチウム6同位体（⁶Li）濃縮技術の研究開発について、現地にてポスター発表を行い、溶融塩電気化学専門家との意見交換を実施すること、BNL訪問では、⁶Li濃縮の副産物である⁷Liを活用した加速器型中性子源のイオン源開発について、開発中の装置を見学し、現地研究者と意見交換を行うこと、KIT訪問では、水溶液電解質と液体リチウムアマルガム（LiHg）電極を用いた⁶Li濃縮技術（ICOMAX process^[1]）の研究開発について、現地にて実験施設見学を行い、プロジェクト参画に向けた打ち合わせを行うことをそれぞれの目的とした。

成果 Outcome

PRiME 2024では、10月7日（月）にHawaii Convention Center 1階の展示ホールにて、2時間のポスター発表を実施した（図1）。本渡航計画申請時に定めた到達目標の通り、計10名以上の聴講者と意見交換を行うことに成功した。発表テーマ「溶融塩 LiCl-KCl 中の液体 LiPb 電極におけるリチウム酸化還元挙動^[2]」について、⁶Li濃縮技術開発の重要な指針となるLi酸化還元電位や、Li酸化還元反応における律速段階の特定手法に関して、世界各国の研究者と有意義な議論を行った。特に、同じ溶融塩材料を使用している産業技術総合研究所の大石主任研究員と片所主任研究員からは、液体LiPb電極の取り扱い方法や応用先の⁶Li濃縮技術について多数の質問をいただき、親交を深めた。もう一つの到達目標であった他研究発表の聴講については、20件の数値目標は達成し得なかったものの、カリフォルニア大学バークレー校のRaluca O. Scarlat准教授らの研究（主な発表テーマ「溶融塩 FLiBe を電解質に用いた Ag/AgF 参照極の評価^[3]」）に興味を持った。核融合炉液体ブランケット材に溶融塩 FLiBe を用いる場合、一定の⁶Li濃縮度（e.g. 35%^[4]）が要求される一方、具体的な濃縮方法は未だ明確になっていない。溶融塩電気化学技術の活用により FLiBE への連続的な⁶Li濃縮が期待でき、新たな研究開発テーマを見出すことに成功した。

BNL 訪問では、10月14日（月）に岡村研究員らの研究グループを訪ねた。Li イオン源を含む加速器型中性子源を見学した後、総勢5名の研究者に対して液体Liの純化研究に関するプレゼンテーションを実施した（図2）。対象のLiイオン源にて生成するLiプラズマは、 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ による中性子発生に寄与しない ${}^6\text{Li}$ イオンと軽元素不純物（N, O）イオンを、それぞれ9.2%と6.3%含む^[5]。 ${}^6\text{Li}$ 濃縮の副生利用（i.e. ${}^7\text{Li}$ 割合100%）と軽元素不純物除去（i.e. N, Oの完全除去）の適用により、RFQ線形加速器に導かれる ${}^7\text{Li}^{3+}$ の割合が、53.8%から63.7%にまで増加することを明らかにした。また、坂部研究員の厚意により、BNL内の研究施設見学（レーザーイオン源LION、電子ビームイオン源EBIS、イオン照射試験に利用されるTandem Van de Graff型加速器、NASA管轄の宇宙放射線研究所NSRL、放射光施設NSLS-II、衝突型加速器RHIC）を行った（図3）。Liイオン源開発に留まらない ${}^6\text{Li}$ 濃縮の副生利用が期待され、今後の検討課題である。

KIT 訪問では、10月17-18日の2日間、北キャンパス内にある物理工学研究所（図4）を訪ねた。アメリカ本土からドイツへの移動の際にフライトの遅延と欠便、手荷物の紛失に見舞われたため、元来の訪問期間より1日減少せざるを得なくなった。滞在初日は、T. Giegerich 博士らの研究グループ、総勢7名に対して、溶融塩と液体金属を用いた ${}^6\text{Li}$ 濃縮研究に関するプレゼンテーションを実施した。400°Cを超える高温実験体系のセットアップや、誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）を用いた ${}^6\text{Li}$ 濃縮度の評価手法など質問が相次いだ。さらに、 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ により生成する燃料トリチウムの抽出手法や液体ブランケット材LiPbの合成手法など、核融合炉の実機運転をも想定した、白熱した議論が展開された。滞在2日目には、ICOMAX processの研究開発に欠かせない水銀取り扱い施設を見学した（図5）。本施設には局所排気装置が取り付けられており、大気中の水銀濃度は専用モニターにより常時監視されている。T. Giegerich 博士やC. Tantos 博士らと議論した結果、次回滞在予定（2025年4月中旬-6月中旬の2か月間）と研究活動内容（LiOH水溶液と液体LiHg間の ${}^6\text{Li}$ 分離係数の実測）が決定し、本渡航計画申請時の到達目標が達成された。また、本訪問では、次回の短期滞在及び2026.4以降の長期滞在看据え、KIT提供サービス及び学内施設の有効利用、ドイツ国内及びカールスルーエ市内の公共交通機関の活用を試みた。朝夕の通学時には南北キャンパスを結ぶ無料シャトルバスを利用し（図6）、昼食はT. Giegerich 博士らとともに学内のカフェテリアに赴いた（図7）。公共交通機関については、ドイツ全土を結ぶドイツ鉄道（DB）の超特急列車（ICE）や長距離バス（IC-bus）、カールスルーエ市街地と郊外を結ぶカールスルーエ運輸協会（KVV）のトラムトレイン（Karlsruhe Stadtbahn; 郊外鉄道と路面電車が直通運転を行う方式。1992年に世界で初めて導入され、Karlsruhe model と呼称される^[6]。）を利用した。報告者は2週間以上の海外滞在経験がないため、本訪問以前は、次回以降のカールスルーエ滞在において如何なる成果を挙げられるかが不透明であった。僅か2日間の滞在ではあったが、KIT学内施設やカールスルーエ市内の公共交通機関の利便性を実感し、研究成果の創出に欠かせない快適な日常生活を送れることを見出した。割り当てられた学生居室（図8）においては、2名の博士課程学生と交流した。短い期間ではあったものの、コーヒープレイクを楽しんだりハイキングの約束をとりつけたりと親睦を深め、次回の滞在がより待ち遠しいものとなった。他方、英語の聞き取りにおいて多少の難があったことは否めず、自身の発言が消極的になる部分もあった。公用語であるドイツ語の理解を含め、周到な事前準備が必要不可欠と認識を改めた。



本渡航計画の関連写真

- PRiME 2024 図1: ポスター発表の様子
 BNL訪問 図2: プレゼンテーション資料の表紙、図3: 見学した装置群 (引用元: [Flicker, Brookhaven National Laboratory](https://www.flickr.com/photos/brookhaven-national-laboratory/))
 KIT訪問 図4: 物理工学研究所を示す看板、図5: 水銀取り扱い設備、図6: 南北キャンパスを繋ぐシャトルバス
 図7: カフェテリアにて頂いた昼食、図8: 滞在した学生居室

今後の展望 Prospects for the future

今後の展望を表 2 に示す。PRiME 2024 の参加により、熔融塩 LiCl-KCl 中の液体 LiPb 電極におけるリチウム酸化還元反応の律速段階の調査に見出した。本会議での発表

成果を基に、 $400\text{--}500^\circ\text{C}$ での開回路電位 (OCP) や電気化学インピーダンス (EI)、クロノポテンシオグラム (CP) など電気化学測定データの拡充を試みる。とりまとめた研究成果は、2024 年度内に査読付き英語学術誌 (Journal of The Electrochemical Society) に投稿予定である。

KIT 訪問により、次回滞在予定は 2025 年 4 月中旬–6 月中旬の 2 か月間と決定された。また、その際には水銀取り扱い設備を活用し、 LiOH 水溶液と液体 LiHg 間の ^6Li 分離係数の実測に取り組む予定である。本訪問で見出した KIT 学内施設とカールスルーエ市内外の公共交通サービスを有効利用し、僅か 2 か月間の滞在にして、核融合炉工学分野の国際会議 (e.g. SOFT 2026) におけるポスター発表相当の研究成果創出を目指す。さらに、ICOMAX process 開発の前任者 J. Schwenzer 博士より、 ^6Li 濃縮の実機プラントを想定した数値解析ファイルを受領済みである。長期渡航以前に改良を重ねることにより、2026 年 4 月以降、博士研究員として研究活動のスタートダッシュを切ることが可能となる。

BNL 訪問により、加速器型中性子源用の Li イオン源について、 ^6Li 濃縮の副生利用と Li 中軽元素不純物の除去が、RFQ 線形加速器に導かれる $^7\text{Li}^{3+}$ の割合増加に効果的であることを明らかにした。現地の坂部研究員とは良好な関係を築いており、日本帰国後にも継続して情報交換を行っている。2028 年 4 月以降の現地研究活動の本格開始を見据え、 Li イオン源開発に留まらない Li 同位体の新規活用法の開拓を進める。

末筆ながら、本海外渡航をご支援いただいた京都大学大学院教育支援機構 (DoGS) の皆様に心より感謝申し上げます。

		表2 今後の展望				
年		2024	2025	2026	2027	2028
研究活動		液体 LiPb 電極の Li 酸化還元特性	熔融塩電解質と液体 LiPb 電極を用いた ^6Li 濃縮	水溶液電解質と液体 LiHg 電極を用いた ^6Li 濃縮		濃縮 ^7Li によるイオン源開発
キャリア形成		1. ~2026.3 京都大学 (日本)	博士後期課程 (日本) ・革新的 ^6Li 濃縮技術の開発 ・PRiME参加による研究活動の加速 & 学術誌JESへの投稿	博士号 取得	2. 2026.4 ~2028.3 カールスルーエ工科大学 (ドイツ)	3. 2028.4 ~2030.3 ブルックヘブン国立研究所 (米国)

参考文献 References

- [1] Giegerich, T. et al. Development of a viable route for lithium-6 supply of DEMO and future fusion power plants. *Fusion Eng. Des.* 149, 111339 (2019).
- [2] Ito, R. et al. Lithium redox behavior at liquid lithium-lead alloy electrodes in molten LiCl–KCl. *PRiME 2024*. L02-3812, October 6–11 (2024).
- [3] Pickarski, R. T. et al. Evaluation of an Ag/AgF reference electrode for electrochemical measurements of molten $2\text{LiF}\text{-BeF}_2$. *PRiME 2024*. L02-3788, October 6–11 (2024).
- [4] Tanaka, T. et al. Tritium self-sufficiency and neutron shielding performance of self-cooled liquid blanket system for helical reactor. *Fusion Sci. Technol.* 47, 530–534 (2005).
- [5] Okamura, M. et al. Demonstration of an intense lithium beam for forward-directed pulsed neutron generation. *Sci. Rep.* 12, (2022).
- [6] Schneider, R. Light rail transit system of Karlsruhe. *WIT Trans. Built Environ.* (2024).