

Advanced Atomic Energy Research Section

J. Yagi, Associate Professor
 K. Mukai, Assistant Professor

1. Introduction

Main objective of our research section is to realize advanced energy systems for the sustainable development under global environmental constraints. We have shown a Zero-emission energy scenario based on fusion energy with biomass-based recycling system where biomass waste is converted into liquid fuel or hydrogen. And further we now propose an innovative Negative emission scenario. to isolate CO₂ in the atmosphere by a carbonization process. Our research section focuses on development of hydrogen isotopes fuel circulation system, breeding blankets, fusion material R&D, feasibility study for fusion-biomass hybrid power system, conversion of biomass waste, and fusion neutron generation/measurement. Followings are main research achievements in the fiscal year of 2022.

- Finding electronic descriptors for predicting defect formation properties in Be intermetallics.
- Development and successful operation of liquid lithium lead droplet system for efficient recovery of hydrogen isotope using a heat and mass-transfer loop.
- Development of diffusion pump using sodium vapor for the divertor exhaust in a fusion system.
- Electrochemical purification of Bi in Li-Pb eutectic using chloride molten salt

2. Electronic descriptors for Be intermetallics

The use of an electronic descriptor is a high-throughput approach for predicting the chemical reactivities of various materials that has the potential to significantly facilitate the material design of Be intermetallic neutron multipliers for nuclear fusion applications. Herein, we perform first-principles calculations on 42 existing binary Be intermetallics to find an effective electronic descriptor. We demonstrate that the occupied Be *p* band center relative to the Fermi level is a bulk descriptor, correlating with the Be vacancy formation energy; a positive and linear correlation with $R^2 = 0.85$ was observed for Be₁₂X (X: transition metal) as shown in Fig. 1. The upward shift in energy of the occupied Be *p* states with early or middle transition metals can reduce hydrogen solution energy, which could be attributed to the less filled anti-bonding state of interstitial hydrogen atom. It is confirmed

that the bulk descriptor is an experimentally measurable scale, having the strong linearity ($R^2 = 0.97$) with the calculated.

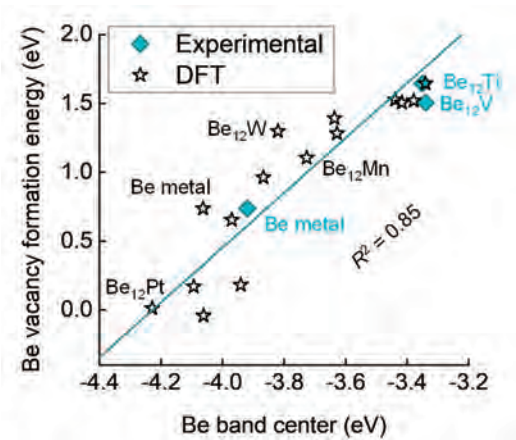


Fig. 1 Plots of vacancy formation energy in Be₁₂X with occupied Be *p* band center

3. Development of hydrogen isotope (deuterium) recovery from liquid lithium lead droplet system

Lead lithium eutectic alloy (Pb-17at%Li, Pb-Li) is a candidate liquid breeding material with low chemical reactivity and good tritium breeding ratio. Effective tritium recovery method from the liquid must be developed for the blanket system with minimal tritium

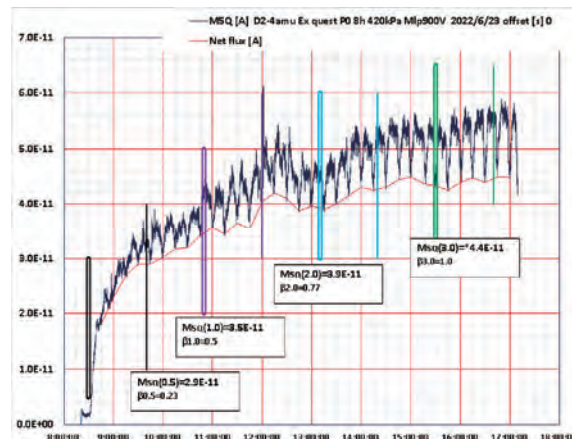


Fig. 2 The deuterium recovered from Pb-Li droplets while falling in a vacuum.

loss. The vacuum sieve tray (VST) method, tritium recovery from the liquid droplet surface falling in a vacuum, is a promising candidate developed in this section. This fiscal year, on a collaboration work with National Institute for Fusion Science (NIFS), the continuous operation campaign was performed. One of the recovery results is shown in Fig. 2. The deuterium dissolved in the Pb-Li loop system was successfully recovered at the VST test section.

4. Development of diffusion pump using sodium vapor for the divertor exhaust in a fusion system

Vacuum pump for the fusion system is quite important regardless of the confinement style, which must have high efficiency and resistance against tritium contamination and radiation. Additionally, it should work in strong magnetic field, without the release of high-Z element depending on the fusion system.

The diffusion pump which usually utilizes oil or mercury vapor to transfer the momentum, can be a candidate when the vapor source is replaced to the light alkali metal (such as Li or Na) which is free from radiation degradation. In this work, we tried to modify a commercial diffusion pump and the pumping speed is investigated. As the modification, the oil was replaced by sodium of the same volume, a voltage controller was added to the heater, and a cooling fan for

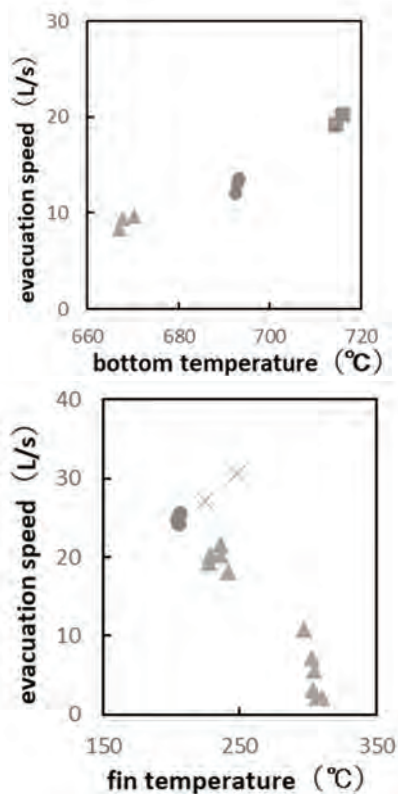


Fig. 3: Evacuation speed of Na vapor diffusion pump, changing the bottom boiler temperature (upside) and cooling fin temperature (downside)

the radiator-fin was replaced to a speed controllable one. Thermocouples to monitor the surface temperature of the pump were also attached.

Evacuation by Na vapor was obviously observed when the boiler temperature was close to or above 950 K. The heating of the boiler and the cooling of the radiator-fin showed a positive effect on the pumping speed (Fig. 3). So far, evacuation against He gas achieved 30L/s with Na vapor which is a bit slower than the one with oil vapor (~120 L/s) in the as received pumping system.

Considering these results and our past works on the purification of liquid metal, liquid alkali metal will be applicable for the vapor diffusion pump for fusion system.

5. Electrochemical purification of Bi in Li-Pb eutectic using chloride molten salt

Liquid lithium lead eutectic alloy (Li-Pb), a candidate of tritium breeding material in a fusion blanket, is easy to contain bismuth (Bi) as an initial impurity or transmutation product from lead (Pb). In neutron fields, Bi is transmuted to polonium (Po), a radioactive element. However, the extraction method for Bi has not yet been established.

In this research, an electrochemical method using chloride molten salt was employed to reduce Bi. This method has been suggested to have the potential to reduce several kinds of impurities. In this experiment, an electrochemical cell filled with chloride molten salt (LiCl 59.2 mol % - KCl 40.8 mol%) was prepared, and Li-Pb in an alumina crucible was placed in the chloride molten salt as the counter electrode. The working electrode was the liquid lead in a glass tube.

As a result of chrono-amperometry (CA) and ICP-MS analysis of the lead working electrode, transport of Bi into the lead electrode was confirmed when the potential of the electrode is around 1.5 V vs Li-Pb potential as shown in Fig. 4.

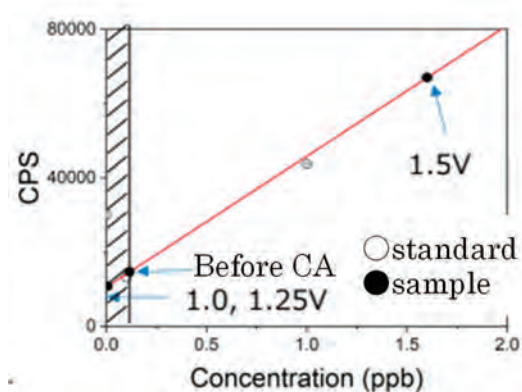


Fig. 4 Concentration of Bi in Pb electrode after chrono-amperometry (CA)

Collaboration Works

八木重郎, University of California San Diego (アメリカ), SiC/SiC 複合材料で製作した配管試験体を流動液体金属 (PbLi) に曝露し、その腐食特性を調べる

八木重郎, 核融合科学研究所一般共同研究, 液体金属ブランケットループに於けるトリチウム 移流特性に関する研究

八木重郎, 核融合科学研究所一般共同研究, 横断的研究のための COE 共同研究プラットフォーム・Oroshi-2 の利用検討会

八木重郎, 核融合科学研究所一般共同研究, 液体増殖材中の DT 中性子照射生成トリチウムの金属壁透過及び制御実験

八木重郎, 核融合科学研究所一般共同研究, 熔融塩循環システム凝固バルブの試作と機能実証

八木重郎, 核融合科学研究所一般共同研究, MHD 流動特性に基づく自己冷却液体ブランケット流路構造の基礎検討

八木重郎, 核融合科学研究所一般共同研究, ヘリカル炉液体ブランケット用機能性被覆の実用化に向けた製作技術開発

興野文人, 核融合科学研究所一般共同研究, 核融合エネルギーを使用した CO₂ ゼロ水素製造技術と再生エネルギー補完システムの研究

Financial Support

1. Grant-in-Aid for Scientific Research

八木重郎, 基盤研究(B), 高強度中性子環境における電気絶縁被覆機能材料の反跳原子による特性変化 (分担金)

向井啓祐, 若手研究, 核融合ブランケットの中性子輸送と燃料生産性の実験評価

向井啓祐, 基盤研究(B), リチウム6 同位体濃縮の為のハイブリッドカスケーディングシステムの開発 (分担金)

荻野靖之, 特別研究員奨励費, 核融合炉ブランケットの中性子輸送とトリチウム増殖現象の実験解析の研究

坂部俊郎, 特別研究員奨励費, 放電型核融合中性子源の実用化に向けた自己制御システムの構築に関する研究

2. Others

八木重郎, 量子科学技術研究開発機構, 液体リチウム流動ループ中での窒素トラップの健全性評価

八木重郎, 京都フュージョニアリング (株), 核融合炉内機器及び付属システムの開発研究

八木重郎, 京都フュージョニアリング (株) (O I 機構), 核融合炉内機器及び付属システムの研究開発

八木重郎, 京都フュージョニアリング (株), 原子力エネルギー変換装置の設計と解析

八木重郎, 京都フュージョニアリング (株), パイオマス熱分解技術に関わる技術検討

Publications

T. Sakabe, S. Kenjo, Y. Ogino, K. Mukai, M. Bakr, J. Yagi, S. Konishi, Effects of Metal Hydride Coatings at the Electrodes on Neutron Production Rate in a Discharge-Type Fusion Neutron Source, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 50, 11, 4500-4505, 2022

Y. Murata, J. Yagi, K. Mukai, S. Konishi, Solubility of Bi in Li-Pb Eutectic Alloy Between 508 and 623 K, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 50, 11, 4496-4499, 2022

K. Mukai, R. Kasada, J. Kim, M. Nakamichi, Electronic descriptors for vacancy formation and hydrogen solution in Be-rich intermetallics, *Acta Materialia*, 241, 118428, 2022

R. Pearson, C. Baus, S. Konishi, K. Mukai, A. D'Angiò, S. Takeda, Overview of Kyoto Fusionneering's SCYLLA ("Self-Cooled Yuryo Lithium-Lead Advanced") Blanket for Commercial Fusion Reactors, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 50, 11, 4406-4412, 2022

S. Yamaguchi, K. Mukai, J. Yagi, S. Konishi, Evaluation of Hydrogen Isotope Transport Performance Using Proton Conductors for Divertor Pumping System, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 50, 11, 4262-4266, 2022

M. Bakr, T. Sakabe, J.-P. Wulfkühler, K. Mukai, T. W. Smith, Y. Ogino, M. Tajmar, T. Scott, S. Konishi, Influence of electrodes' geometrical properties on the neutron production rate of a discharge fusion neutron source, *Physics of Plasmas*, 30, 32701, 2023

荒巻光利, 出射 浩, 鈴木陽香, 向井啓祐, 小林政弘, 井戸毅, プラズマ・核融合学会誌この1年 (2021 年版) Most Downloaded J. Plasma Fusion Res. Articles in 2021, *Journal of Plasma and Fusion Research*, 98, 5, 228-

232, 2022

興野文人, リチウム鉛液滴からの水素同位体の回収, *Journal of Plasma and Fusion Research*, 99, 2, 40-46, 2023

向井啓祐, 大村涼, 八木重郎, 笠田竜太, 軟 X 線発光分光法によるリチウム化合物と液体リチウム用窒素吸着材の化学状態の分析, *日本電子ニュース*, 54, 1, 10-14, 2022

Presentations

Y. Urano, Y. Kawai, K. Fushimi, K. Hata, S. Konishi, S. Kurosawa, K. Mukai, Y. Ogino, R. Orito, T. Sakabe, Quenching factor measurement in low-energy nuclear recoil of NaI(Tl) scintillator using monochromatic neutrons for dark matter search, 地下宇宙領域研究会 UGAP2022, 東京大学, 2022.6.13-15

八木重郎, 野本楓, 向井啓祐, 小西哲之, フッ化物溶融塩 FLiBe の純化過程における電気化学計測, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

向井啓祐, 笠田竜太, 金宰煥, 中道勝, 先進的中性子増倍材開発に向けたベリリウム金属間化合物の電子的記述子の探索, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

坂部俊郎, 向井啓祐, 八木重郎, 放電型核融合中性子源の電極表面における核融合反応の分析, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

田宮裕之, 向井啓祐, 高山定次, 八木重郎, 小西哲之, マイクロ波による木質バイオマスの熱分解及び水素生成, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

野本楓, 村田勇斗, 八木重郎, 向井啓祐, 小西哲之, 塩化物溶融塩を用いたリチウム鉛共晶合金中ビスマス不純物の液体鉛電極への電気化学的輸送, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

松尾拓海, 見城俊介, 向井啓祐, 八木重郎, 小西哲之, 燃料閉じ込め式放電型核融合中性子源における燃料供給・回収の応答速度の改善, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

武田秀太郎, リチャード・ピアソン, コリン・バウス, 向井啓祐, 世古圭, 長尾昂, 小西哲之, 核融合発電システム実証プラント UNITY 建設計画, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

Do Duy Khiem, 法月亮介, 藤原輝, 城田賢渡, 田中照也, 八木重郎, 片山一成, 近田拓未, 有機金属分解法によるステンレス管材への酸化ジルコニウム被覆の作製と特性評価, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

近田拓未, 赤星江莉加, 芦田真奈, 八木重郎, Schroer Carsten, 法月亮介, 三浦颯太, Do Duy Khiem, 向井啓祐, 田中照也, 機能性セラミックス被覆の流動リチウム鉛合金中腐食挙動, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

田中照也, 近田拓未, 佐藤文信, 八木重郎, 菱沼良光, 吉野正人, MHD 圧損低減用電気絶縁被覆へ入射する反跳金属原子の輸送計算, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, Online, 2022.7.7-8

T. Sakabe, Y. Ogino, K. Mukai, J. Yagi, Effect of the depth profile of deuterium in the electrode in the glow discharge-type fusion neutron source, The 13th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, 2022.9.5-7

K. Wakatabi, Y. Jimba, Y. Okuno, H. Yu, S. Kondo, K. Mukai, R. Kasada, Development of Interface Design for Improvement of High Temperature Oxidation Properties of High Melting Point Diborides, The 13th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, 2022.9.5-7

K. Sasaki, R. Tokuyoshi, K. Mukai, I. Takahashi, R. Kasada, Study of the surface modification layer of lithium-ion electrolyte for electro dialysis, The 13th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, 2022.9.5-7

J-H. Kim, T. Hwang, Y. Sugimoto, K. Mukai, K. Yabuuchi, S. Konishi, R. Kasada, M. Nakamichi, Experimental verification of hydrogen adsorption and desorption behavior for advanced neutron multipliers, The 13th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, 2022.9.5-7

I. Takahashi, E. Kaji, R. Yoneyama, T. Watanabe, K. Sasaki, K. Mukai, Analysis and Design of Electrode/Electrolyte Interface for All-Solid-State Battery, The 13th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, 2022.9.5-7

Y. Urano, Y. Kawai, K. Fushimi, K. Hata, S. Konishi, S. Kurosawa, K. Mukai, Y. Ogino, R. Orito, T. Sakabe, Measurement of scintillation response by fast neutron,

The 13th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, 2022.9.5-7

S. Takayama, K. Mukai, J. Yagi, Development of a method for compositing Li_2TiO_3 and nanocarbon by microwave irradiation, The 13th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, 2022.9.5-7

S. Basu, R. Akasegawa, Y. hui, K.S. Usher, H. Tamiya, J. Cravioto, H. Ohgaki, Examining the interdependency of Japan's 3Rs Material-Cycle Society with sustainability: Case study of Kyoto, The 13th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, 2022.9.5-7

浦野雄介, 川合洋平, 伏見賢一, 畑和実, 小西哲之, 黒澤俊介, 向井啓祐, 荻野靖之, 折戸玲子, 坂部俊郎, PICOLON 宇宙暗黒物質探索 : 単色中性子を用いた $\text{NaI}(\text{Tl})$ の消光因子測定 2, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学, 2022.9.6-8

小西哲之, 向井啓祐, 山口修平, 田渕将人, 八木重郎, プロトン導電体ポンプの水素同位体移送挙動, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 茨城大学日立キャンパス, 2022.9.7-9

向井啓祐, 荻野靖之, 松尾拓海, 坂部俊郎, 八木重郎, 小林真, 小川国大, 磯部光孝, 玉置真悟, 村田勲, DT 中性子照射下におけるブランケット模擬体系内の燃料生産性評価, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 茨城大学日立キャンパス, 2022.9.7-9

興野文人, 浜地志憲, 田中照也, 八木重郎, リチウム鉛ブランケットループに於けるトリチウム移流拡散, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 茨城大学日立キャンパス, 2022.9.7-9

坂部俊郎, 荻野靖之, 向井啓祐, 八木重郎, 放電型核融合中性子源における陰極上重水素分布が中性子発生率に及ぼす影響, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 茨城大学日立キャンパス, 2022.9.7-9

近田拓未, 赤星江莉加, 芦田真奈, 八木重郎, Schroer Carsten, 法月亮介, 三浦颯太, Do Duy Khiem, 向井啓祐, 田中照也, 機能性セラミックス被覆の流動リチウム鉛合金中腐食挙動, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 茨城大学日立キャンパス, 2022.9.7-9

見城俊介, 小柳津誠, 太田雅之, 権セロム, 落合謙太郎, 佐藤聡, A-FNS 設計と R&D の進捗 (3) A-FNS の Li ループにおける放射化堆積物の線量率評価, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 茨城大学日立キャンパス, 2022.9.7-9

K. Mukai, One-step fabrication of ceramic breeder pebbles using pulse laser, 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), Valamar Lacroma Hotel, Dubrovnik, Croatia, 2022.9.18-23

F. Okino, Y. Hamaji, T. Tanaka, J. Yagi, Tritium transport velocity on a LiPb blanket loop, 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), Valamar Lacroma Hotel, Dubrovnik, Croatia, 2022.9.18-23

Y. Ogino, M. I Kobayashi, K. Mukai, J. Yagi, S. Konishi, K. Ogawa, M. Isobe, Evaluation of gamma-ray dose distribution in toroidal direction of LHD vacuum vessel from radionuclides generated in deuterium plasma experiment, 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), Valamar Lacroma Hotel, Dubrovnik, Croatia, 2022.9.18-23

F. Onomoto, Y. Murata, J. Yagi, K. Mukai, S. Konishi, Electrochemical transport of Bi in Li-Pb eutectic alloy to liquid Pb electrode using chloride molten salt, 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), Valamar Lacroma Hotel, Dubrovnik, Croatia, 2022.9.18-23

T. Matsuo, S. Kenjo, K. Mukai, J. Yagi, S. Konishi, Gas composition change during operation of a compact discharge fusion neutron source with a closed deuterium supply system, 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), Valamar Lacroma Hotel, Dubrovnik, Croatia, 2022.9.18-23

C. Baus, S. Takeda, S. Ogawa, T. Sugiyama, Y. Matsunaga, Y. Kume, M. Tabuchi, T. Ino, A. D'Angio, R. Pearson, K. Mukai, K. Sakamoto, K. Seko, T. Nagao, S. Konishi, Unique Integrated Testing Facility (UNITY) for Fusion Power Generation, 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), Valamar Lacroma Hotel, Dubrovnik, Croatia, 2022.9.18-23

向井啓祐, 笠田竜太, 金宰煥, 中道勝, Be 金属間化合物の電子構造解析と化学特性を予測する電子的記述子の探索, 日本金属学会 2022 年秋期 (第 171 回) 講演大会, 福岡工業大学, 2022.9.20-23

T. Sakabe, Y. Ogino, K. Mukai, J. Yagi, Development of the continuous cooling system for the cathode in the glow discharge type fusion neutron source, 13th International Conference on Tritium Science and Technology (Tritium 2022), Radisson Blu Hotel, Bucharest, Romania, 2022.10.16-21

R. Ito, F. Nomoto, Y. Ogino, K. Mukai, J. Yagi, Isotope enrichment effects of lithium between liquid metal and chloride molten salt, 13th International Conference on Tritium Science and Technology (Tritium 2022),

Radisson Blu Hotel, Bucharest, Romania, 2022.10.16-21

向井啓祐, 荻野靖之, 松尾拓海, 坂部俊, 八木重郎, 小林真, 小川国大, 磯部光孝, 玉置真悟, 村田勲, 単結晶 CVD ダイヤモンド検出器を用いたブランケット模擬体系内の高速中性子束と燃料生産性の評価, 第 39 回プラズマ・核融合学会 年会, 富山国際会議場, 2022.11.22-25

荒谷舜, 野本楓, 伊藤諒, 向井啓祐, 八木重郎, 塩化物熔融塩 Li 系の窒素不純物の電気化学測定とガス分析, 第 39 回プラズマ・核融合学会年会, 富山国際会議場, 2022.11.22-25

伊藤諒, 野本楓, 荒谷舜, 向井啓祐, 八木重郎, 液体金属と塩化物熔融塩間におけるリチウム 6 同位体の平衡分配, 第 39 回プラズマ・核融合学会 年会, 富山国際会議場, 2022.11.22-25

見城俊介, 横山須美, 落合謙太郎, 佐藤聡, 核融合中性子源 A-FNS サイトの実環境データを組み込んだトリチウム実効線量評価コードの開発, 第 39 回プラズマ・核融合学会 年会, 富山国際会議場, 2022.11.22-25

松永祥尚, 山口修平, 久米祥文, 田渕将人, Colin Bausl, 向井啓祐, 武田秀太郎, 八木重郎, 小西哲之, プロトン導電体ポンプによる水素同位体移送, 第 39 回プラズマ・核融合学会 年会, 富山国際会議場, 2022.11.22-25

興野文人, Vacuum Sieve Tray 方式による Li-Pb ループ中水素同位体回収技術の研究, NIFS 研究会 横断的研究のための COE 共同研究プラットフォーム・Oroshhi-2 の利用検討会, 核融合科学研究所, 2023.2.22

野本楓, 電気化学的手法による液体ブランケット材料の純化, NIFS 研究会 横断的研究のための COE 共同研究プラットフォーム・Oroshhi-2 の利用検討会, 核融合科学研究所, 2023.2.22

伊藤諒, 液体金属と塩化物熔融塩間におけるリチウム-6 同位体の平衡分配, NIFS 研究会 横断的研究のための COE 共同研究プラットフォーム・Oroshhi-2 の利用検討会, 核融合科学研究所, 2023.2.22

興野文人, 浜地志憲, 田中照也, 八木重郎, リチウム鉛液滴からのトリチウム連続回収能率, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 東京大学駒場キャンパス, 2023.3.13-15

伊藤諒, 野本楓, 荒谷舜, 向井啓祐, 八木重郎, 液体金属と 3 元系塩化物熔融塩間におけるリチウム-6 同位体の平衡分配, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 東京大学駒場キャンパス, 2023.3.13-15

片岡浩輔, 田宮裕之, 向井啓祐, 八木重郎, マイクロ波焼結により製作したプロトン導電体セルの物性評価, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 東京大学駒場キャンパス, 2023.3.13-15