

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01071

研究課題名（和文）核融合原型炉における使用済機器からの省エネ金属リサイクル技術の創成

研究課題名（英文）Development of energy-saving metal recycling technology from spent equipment in fusion DEMO reactors

研究代表者

金 宰煥 (Kim, Jaehwan)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所研究所 ブランケット研究開発部・上席研究員

研究者番号：80613611

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、化学処理とマイクロ波加熱の複合化することによる低温Be精製技術に基づき、核融合炉原型炉における主要金属のリサイクル技術に応用し、核融合炉原型炉の設計・材料開発に適した使用済み金属材料のリサイクル技術の創成することを目的とする。化学溶液種類、マイクロ波加熱条件、外部加熱などが各々の材料溶解度に与える影響を検証し、溶解促進メカニズムを明らかにする。そして、溶解した溶液からの様々の金属の分離・抽出・析出機構を明らかにする。また、分離・抽出・析出法に応用した不純物の除去技術を検討し、放射性廃棄物の低減できるリサイクル技術の創成を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、核融合炉のブランケットに膨大な量が装荷されるチタン酸リチウム（ Li_2TiO_3 ）とベリライド（ Be_{12}Ti ）のリサイクル技術の創成を目指し、化学反応とマイクロ波加熱処理により、各々の材料における溶解メカニズムを解明し、高効率で回収可能であることを明らかにしたところが技術的意義である。また、非常に高価な原料に対し、約4年毎の交換時期であっても、多くの量が残ることから、リサイクル技術開発が不可欠であり、且つコストの適切化を図り、貴重な資源循環に期待できるところが社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop a recycling technology for spent metal materials suitable for the design and material development of fusion DEMO reactors, based on the low-temperature Be refining technology by combining chemical treatment and microwave heating, and applying it to the recycling technology of major functional metals in fusion DEMO reactors. The effects of chemical solution type, microwave heating conditions, and external heating on the solubility of each material were examined, and the dissolution promotion mechanism was clarified. The separation, extraction, and precipitation mechanisms of various metals from the dissolved solutions were also clarified. In addition, we examined the removal technology of impurities applied to the separation, extraction, and deposition methods, and aim to create a recycling technology that can reduce the amount of radioactive waste.

研究分野：核融合炉、増殖機能材料

キーワード：増殖機能材料 核融合炉 リサイクル マイクロ波加熱 チタン酸リチウム ベリライド

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、化学処理とマイクロ波加熱の複合化処理を用いた核融合原型炉で使用される金属材料の新たなリサイクル技術の創成を目的とする。核融合原型炉では、大量のレアメタルが使用されるが、そのリサイクルについては未検討である。殆どの金属資源を輸入に頼っている日本においては、有限鉱物資源の有効活用・資源循環は重要課題である。量研機構で新たに開発した技術は、経済性と安全性を飛躍的に向上させた難溶解性鉱石からの金属精製技術であり、当該技術を核融合原型炉からの有用金属リサイクル技術へと発展応用させることにより、資源の有効活用、そして、核融合原型炉の維持費低減を図ることが可能となる。また、同時に放射化物の分離除去を行うことにより、放射性廃棄物低減にも貢献することができる。このように本研究では、安全且つクリーンなエネルギー源としての核融合炉の早期実現に向けた一連のリサイクル技術の創成を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、新たに開発した、化学処理とマイクロ波加熱の複合化処理を用いた新たなリサイクル技術は、経済性と安全性を飛躍的に向上させた金属精製技術であり、当該技術を核融合原型炉からの有用金属リサイクル技術へと発展応用させることにより、資源の有効活用、そして、核融合原型炉の維持費低減を図ることが可能となる。また、同時に放射化物の分離除去を行うことにより、放射性廃棄物低減にも貢献することができる。本研究課題では、安全且つクリーンなエネルギー源としての核融合炉の早期実現に向けた一連のリサイクル技術の創成を目指した。

3. 研究の方法

核融合炉における増殖機能材料であるチタン酸リチウム (Li_2TiO_3) とベリライド (Be_{12}Ti) の溶解・回収技術開発を行った。チタン酸リチウムにおいては、始発原料を Li_2TiO_3 微小球とし、溶解条件の最適化研究の一環として、マイクロ波加熱温度依存性 (50、60、70、80)、時間依存性 (0、15、30、60、120 分) そして、塩酸濃度依存性 (0.2、0.35、0.5、0.65 mol/l) を調査した。それと並行し、リサイクル技術の創成のため、6 mol/l 塩酸溶液にサンプルを入れ、200 で1時間のマイクロ波加熱を行った後、沈殿分離を行い、固体として TiO_2 を分離した。その後、 LiCl 溶液を Li_2CO_3 に炭酸化させるために、重曹 (NaHCO_3) を添加し、攪拌、蒸発、洗浄、ろ過を2回繰り返すことによって、 Li_2TiO_3 から原料である Li_2CO_3 を回収した。

また、ベリライド (Be_{12}Ti) においては、化学処理とマイクロ波加熱の複合化処理にて、全溶解条件及び Be と Ti が分離できるような溶解条件を洗い出すため、0、0.5、1、1.5、2、3、5 M の酸濃度と、加熱温度 (60、70、80、100) と時間 (15、30、45、60、120 分) について調査した。更に、化学処理とマイクロ波加熱の複合化処理の優位性を検証するために、同様な温度・時間条件での外部加熱を用い、溶解試験における比較研究を実施した。

4. 研究成果

チタン酸リチウム微小球を始発原料とし、各々の条件での熔融反応における、反応速度を分析した結果、表面化学反応式 ($1 - (1 - f)^{1/3}$) に直線的に比例関係を示すことが分かった。表面化学反応における見掛け上活性化エネルギーを求めた結果、52.78 kJ/mol の値を示すことから、この反応速度は化学反応 (40kJ/mol 以上) であることを明らかにした。

次のステップとして、 Li_2TiO_3 微小球のリサイクル技術の創成のため、図 1 に示すプロセスの確立に成功した。具体的には、全溶解のため、6M 酸溶液で、200 で 1 時間のマイクロ波加熱処理を行うことによって、全溶解できることが分かった。その全溶解溶液から、沈殿分離を行い、固体として TiO_2 を分離した。その後、 LiCl 溶液を Li_2CO_3 に炭酸化するために、重曹 (NaHCO_3) を添加し、攪拌、蒸発、洗浄、ろ過を 2 回繰り返すことによって、 Li_2CO_3 を回収することに成功した。また、回収した Li_2CO_3 は、X 線回折分析を行った結果、不純物がなく、単相であることが分かった。更に、 Li 回収率を計算した結果、86% の回収率を得ることにできたことから、既往研究で得られた手法よりも、高回収率・高効率・高経済性であることを明確にした。

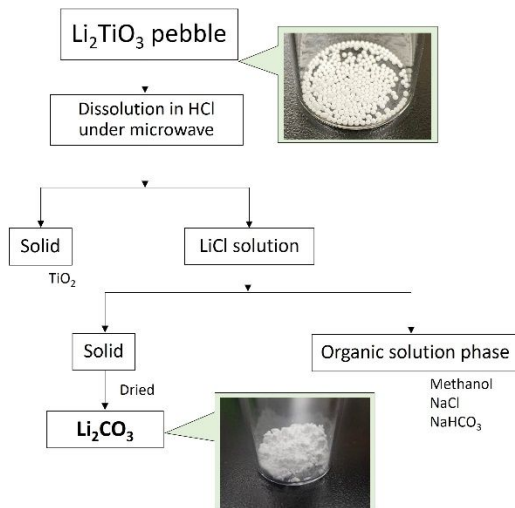


図 1、 Li_2TiO_3 微小球からの Li リサイクル法の概要

次に、ベリライド (Be_{12}Ti) のリサイクル技術においては、 Li リサイクル技術と同様に塩酸溶液とマイクロ波加熱を利用した。 Be と Ti が分離できる溶解条件の検討を行った結果、 Be は 1 mol/l で全溶解する一方、 Ti は、殆ど溶解できず、沈殿分離できることを明らかにした。そして、沈殿分離を促進するための過酸化水素 (H_2O_2) の添加試験では、添加量が増えることによって Be 溶解度が低下する結果が得られたことから、沈殿分離における促進効果はないことを確認した。 U の不純物については、ケロシンと Tri-n-octylphosphine Oxide (TOPO) を用いた溶媒抽出によって、初期導入量 50ppmU から 0.1ppmU 以下に除去可能であることを明らかにした。

それに並行し、このマイクロ波加熱の優位性を示すための、外部加熱試験での比較研究を実施した結果、同条件 (塩酸濃度、温度、時間) での外部加熱でもマイクロ波加熱試験での Be 溶解度と同程度の Be 溶解度が得られ、ベリライド (Be_{12}Ti) の溶解度におけるマイクロ波加熱の優位性は見受けられなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suguru Nakano, Jae-Hwan Kim, Taehyun Hwang, Ryuta Kasada, Masaru Nakamichi	4. 巻 30
2. 論文標題 Dissolution and recovery of beryllium from beryl using a novel wet process with microwave heating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 110113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nme.2022.101113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jae-Hwan Kim, Yoshiaki Akatsu, Taehyun Hwang, Yutaka Sugimoto, Suguru Nakano and Masaru Nakamichi	4. 巻 60
2. 論文標題 Reaction kinetics of lithium extraction and a recycling process for lithium meta-titanate pebbles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 394-400
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2022.2113163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jae-Hwan KIM, Taehyun Hwang, Yutaka Sugimoto, Suguru Nakano, Yoshiaki Akatsu, Masaru Nakamichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Overview of R&D activities on Neutron Multipliers in QST	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceeding of The 15th International Workshop on Beryllium Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jae-Hwan Kim, Taehyun Hwang, Masaru Nakamichi	4. 巻 14
2. 論文標題 A joining process between beryllium and reduced activation ferritic-martensitic steel by plasma sintering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 6348
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma14216348	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Jae-Hwan Kim, Taehyun Hwang, Suguru Nakano, Yoshiaki Akatsu, Masaru Nakamichi
2. 発表標題 An innovative recycling process of breeding functional materials for fusion application
3. 学会等名 32th Symposium of Fusion Technogloy (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jae-Hwan Kim, Taehyun Hwang, Suguru Nakano, Yoshiaki Akatsu, Masaru Nakamichi
2. 発表標題 Compatibility of tritium breeders and neutron multipliers as a mixture-packing concept of pebble bed blanket for JA DEMO fusion reactor
3. 学会等名 32th Symposium of Fusion Technogloy (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suguru Nakano, Jae-Hwan Kim, TaeHyun Hwang, Yutaka Sugimoto, Ryuta Kasada, Masaru Nakamichi
2. 発表標題 Evaluation of dissolution reaction behavior of hard-to-dissolve beryllium ore by microwave heating
3. 学会等名 32th Symposium of Fusion Technogloy (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金 宰煥, 赤津 孔明, 黄 泰現, 中野 優, 杉本 有隆, 中道 勝
2. 発表標題 核融合原型炉における使用済機器からの省エネ金属リサイクル技術の創成
3. 学会等名 2022年原子力学会秋の大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金 宰煥, 黄 泰現, 中野 優, 杉本 有隆, 赤津 孔明, 中道 勝
2. 発表標題 マイクロ波加熱と化学処理を用いた革新的精製技術による核融合炉用増殖機能材料のリサイクル技術
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jae-Hwan KIM, Taehyun Hwang, Yutaka Sugimoto, Suguru Nakano, Yoshiaki Akatsu, Masaru Nakamichi
2. 発表標題 Overview of R&D activities on Neutron Multipliers in QST
3. 学会等名 The 15th International Workshop on Beryllium Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jae-Hwan KIM, Yoshiaki Akatsu, Taehyun Hwang, Yutaka Sugimoto, Suguru Nakano, Masaru Nakamichi
2. 発表標題 Current R&Ds on recycling technologies of breeding functional materials for fusion reactors
3. 学会等名 International Congress on Advanced Materials Sciences and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤津 孔明, 金宰煥, 中野 優, 黄 泰現, 中道 勝
2. 発表標題 増殖機能材料リサイクル技術への適用検討
3. 学会等名 日本原子力学会2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金宰煥、黄 泰現、赤津 孔明、中野 優、中道 勝
2. 発表標題 ベリリウムと構造材の異材接合特性及びリサイクル技術の検討
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中道 勝 (Nakamichi Masaru) (60343927)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所研究所 ブランケット研究開発部・グループリーダー (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------