



解説

電子レンジで新しいベリリウム精製技術

New Beryllium Refining Technology Using Microwave Heating

中野 優, 中道 勝¹⁾

NAKANO Suguru and NAKAMICHI Masaru

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構, ¹⁾株式会社 MiRESSO

(原稿受付: 2024年4月1日)

核融合炉における中性子増倍材料として、ベリリウムが候補材として挙げられている。しかしながらベリリウムは、精製手法に高温熱処理工程を多く含んでいるため、経済性や環境性に課題があった。当研究グループでは、それら課題を解決するために、マイクロ波を使用した新たな低温精製技術の開発に成功した。また本技術は、ベリリウム精製に限らず、高温熱処理を必要とする様々な鉱種に適用できる、革新的な技術であることを確認した。

Keywords:

neutron multiplier, beryllium, microwave heating, refining technology, carbon neutral

1. はじめに

核融合炉を持続的に運転するためには、核融合ブランケットにおける核融合燃料であるトリチウムの自己生産が非常に重要である。ブランケットにおいては、核融合反応で生じた核融合中性子を、トリチウム増殖材料のリチウムと核反応させることでトリチウムを生産するが、そのトリチウムの生産量、即ちトリチウム増殖比 (TBR) を向上させるためには、より多くの中性子によってブランケット内でリチウムと反応させる必要がある。そのため、中性子を増倍させる中性子増倍材料として、ベリリウム金属もしくはベリリウム金属間化合物 (ベリライド) が装荷される[1]。ベリリウムは、中性子増倍材料だけでなく、核融合炉を構成する多種多様な機器や部品に使用される。図1に、核融合炉におけるベリリウムやその合

金などの使用例を示す。特に、ベリリウム銅合金は、銅相当の電気と熱の伝導性を有しつつ、ステンレス鋼並みの機械的強度を有する高性能な銅合金の一つであり、機械的強度が必要とされる電子部品としてコネクタやスイッチングの部品材料として使用されている[2]。制御系の多い発電システムにおいては、ベリリウム銅合金などの高機能で信頼性の高い部材が多く使用される。

一方で、ベリリウム銅合金を除く、ベリリウム及びその化合物は、感作性などの健康障害が生じる可能性がある物質である。ベリリウム及びその化合物の吸引ばく露により、慢性ベリリウム障害 (CBD) として「ベリリウム肺」と呼ばれる重篤な肺の機能障害を引き起こす可能性がある[3]。日本国内においては労働安全衛生法とその関連法規である特定化学物質等障害予防規則において、

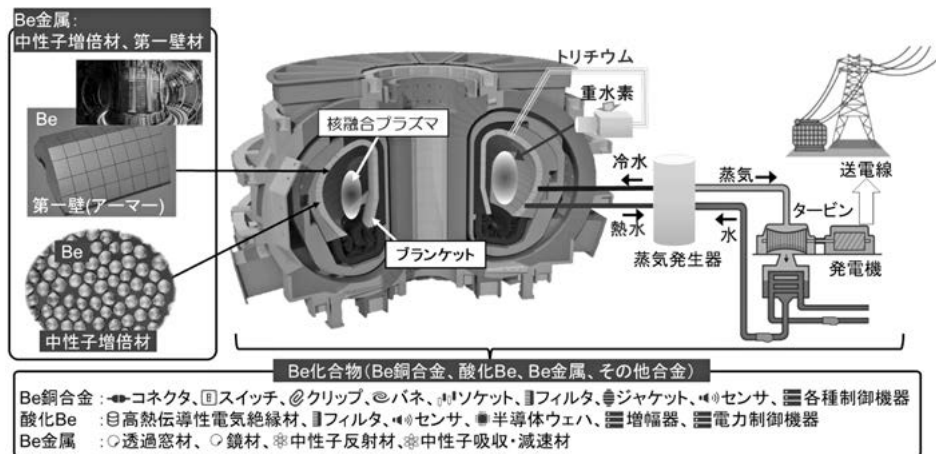


図1 核融合炉でのベリリウム及びその化合物の使用例。

National Institute for Quantum Science and Technology, AOMORI 039-3212, Japan

corresponding author's e-mail: nakano.suguru@qst.go.jp

ベリリウムを特定化学物質第一類に指定するとともに、特別管理物質に指定しており、ベリリウム及びその化合物を取り扱う場合には、密閉設備又は局所排気設備等の、粉塵ばく露防止設備が必要となる[4]。

量子科学技術研究開発機構(QST)では、中性子増倍材料であるベリリウムの製造技術及び特性評価試験を進めている。中性子増倍材料として有力な候補材であるベリリウムの純金属の使用においては、ベリリウムの原子数密度は高いものの、高温での水蒸気との反応性が高く、その反応で生成される水素による安全性に対するリスク、そして、中性子照射場における体積膨張(スウェリング)が大きいことから、構造物などの構成機器への影響などといった課題を抱えている。

一方でベリライドは、高温安定性が高く、スウェリングも小さい材料として、核融合炉の設計裕度を広げられる材料として、注目されている[1]。しかしながら、ベリライドは金属間化合物という形態上、従来では、合成や成形加工が非常に困難であった。QSTにおいてはベリライドの特性評価を行うと共に、その合成及び成形加工の技術開発にも着手し、簡便に合成・成形する基盤技術の確立に成功した。図2は、様々な設計要求に応じたブランケット内に装荷するためのベリリウム金属及びベリライドのブロック材及び微小球材の製造方法について示している。

前述の通り、核融合発電を運転維持するための十分なトリチウムを自己生産するためには多くのベリリウムが必要になる。発電実証を行う核融合原型炉においては、設計に依存するが、中性子増倍材料用のベリリウムのみで、1基あたり約350トン必要であるとされている[5]。一般的な多くの鉱種では、数百トン規模の需要は、大規模とは言い難い量であるが、ベリリウムにとっては非常に大量であり、調達には大きな課題を有している。それら課題としては、ベリリウムの価格が高く、世界におけるベリリウム総生産量が少ないという点である。当初よりベリリウム金属やその化合物の高コストは問題視されており、その問題は現在においても解決していない。ベリリウムは、貴金属を除く金属資源の中でも高単価で取り引きされており、年々その単価は増加する傾向を示している。加えてベリリウムの生産量は他のレアメタルと比較しても少ない。2023年における全世界でのベリリウムの総生産量は、330トンであり[6]、核融合原型炉1基あたりの必要量に満たない。核融合発電の実現には、ベリリウムの増産及び価格の適正化を図る必要がある。

このような、ベリリウムが高コストで生産量が少ない



図2 QSTで確立したベリリウム金属及びベリライドの合成及び成形加工技術。

背景には、ベリリウムの精製におけるコストが高く、増産しづらい現状がある。ベリリウムはベリリウムを含む鉱石から精製回収されるが、ベリリウム鉱石の一種であるベリル鉱石($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$)は、エメラルドやアクアマリンといった宝石の原石であり、結晶構造が安定で高い耐腐食性を持つ。ベリリウムの精製においては鉱石を酸で溶解させる工程を含んでいるが、難溶解性のベリル鉱石に対して酸溶解を実現させるために、非常に高温の熱処理が必要となる[7]。

図3は従来法におけるベリル鉱石からのベリリウム精製工程のフロー図である。図に示すように、結晶構造が安定なベリル鉱石を、2000℃近い温度で熔融しその後急冷を行うことで、結晶構造を崩しガラス化処理を行っている。このガラス化処理を行わないと、ベリル鉱石の酸溶解は実現しない。このようなプロセスにおいて、膨大なエネルギーが必要となり、その分精製コストが増加し、ベリリウムの価格の増加に繋がっている。また前述の通り、ベリリウムは特定化学物質第一類に指定されており、ベリリウム及びその化合物の製造には、粉塵などに対する防護対策が必要となる。従来のような高温熱処理工程においては、どうしても密閉系のシステムは組みづらく、そのための高度な設備が必要となり、容易に増産しづらい現状がある。

QSTでは、上記のような従来のベリリウム精製工程における、膨大なエネルギーを要する工程を含むこと、また高度な防護設備が必要であるという課題を解決するために、新たなベリリウム精製技術の開発を行ってきた。図4

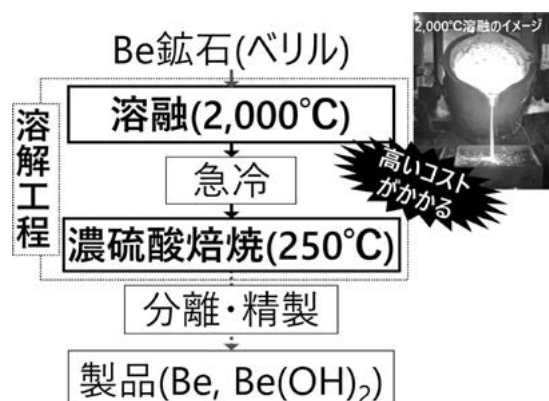


図3 従来法におけるベリルからのベリリウム精製工程。

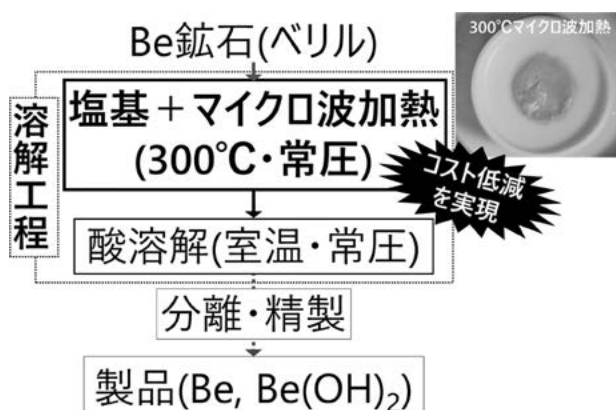


図4 QSTで新たに開発された低温精製技術。

は、QSTで新たに開発された低温精製技術である。当該低温精製技術により、塩基試薬とマイクロ波加熱を組み合わせることにより、従来2000℃の高温熱処理が必要であった工程を、300℃程度の低温処理に置き換えることに成功した。さらに酸溶解工程においても、従来では濃硫酸焙焼で250℃前後の加熱が必要であったところ、当該低温精製技術においては室温・常圧での処理により、難溶解性のベリル鉱石の溶液化に成功している。このような低温化を成し得た要因としては、塩基試薬とベリル鉱石との間で生じている化学反応が起因している。さらに、熱源としてマイクロ波加熱を組み合わせることで塩基試薬が効果的に活性化し、ベリル鉱石の分解が効率的に生じると考えられる。このように従来手法と比較して極端な低温化を実現することに成功し、消費エネルギーの大幅な低減や、防護設備の簡素化が図られる。このように、当該低温精製技術は、核融合炉のベリリウム調達における課題を一挙に解決できる技術であると、期待されている。

2. ベリリウム低温精製技術

QSTで新たに開発された低温精製技術の流れを図5に示す。まずベリル鉱石を粉碎し、塩基試薬と混合を行う。塩基試薬は水酸化ナトリウムを使用した。混合粉末に直接マイクロ波を照射することによりサンプルは加熱され、一部溶融状態となる。加熱後は、室温下で直接酸を添加することにより、難溶解性のベリル鉱石の全溶解が実現する。マイクロ波加熱時におけるサンプル温度は約300℃であり、マイクロ波のエネルギーを得て塩基試薬の水酸化ナトリウムが溶融状態となり活性化し、ベリル鉱石の分解に寄与する。水酸化ナトリウムとベリル鉱石の化学反応により、難溶解のベリル鉱石が酸に可溶の反応生成物となるため、低温処理のみでベリル鉱石の溶解が可能となる。ベリル鉱石の溶解工程において、包括的サステナビリティ評価を試行したところ、従来の2,000℃や

250℃の熱処理を含む溶解処理工程に対して、新たな低温精製技術における溶解工程では、コスト77%削減、CO₂排出量98%削減及びエネルギー消費99%削減といった、非常に高い優位性を確認することができた[8]。これらは、従来の外部加熱から、マイクロ波による内部加熱による高効率化、化石由来燃料からの電化エネルギー源、そして、化学処理による低温化がもたらす効果であるといえる。

本低温精製技術により得られたベリル鉱石溶解液には、ベリリウムの他にベリル鉱石の構成元素であるアルミニウムとケイ素が同時に溶け込んでいる。ベリリウムを精製するためには、不純物であるそれら元素を分離除去する必要がある。まずケイ素については、得られたベリル鉱石溶解液の還流加熱により分離が可能であることが分かっている。ベリル鉱石溶解液に対して、還流装置を用いて100℃近傍の沸騰状態での加熱処理を行うことにより、ケイ素はH₂SiO₄のケイ酸として析出される。その後ろ過分離を行うことにより、ほとんどのケイ素が除去された溶液を得ることができる。次にアルミニウムについて、ケイ素を除去した溶液に対して、NaHCO₃を加えることにより、水酸化アルミニウムとして沈殿し、除去することができる。しかしながらNaHCO₃を加えた直後はベリリウムも同時に沈殿物を生成してしまうため、数十時間静置する必要がある。静置することにより、アルミニウムは沈殿したまま、徐々にベリリウムのみが溶液中に再溶解する。その後ろ過分離をすることにより、ベリリウムのみが溶け込んだ溶液を得ることができる。またNaHCO₃を加えた後に加温することで、静置時間の短縮が可能となる。

図6は、ベリル鉱石溶解液から不純物元素であるケイ素及びアルミニウムを除去した後、加水分解処理を行い得られた粉末の画像及びXRD回折結果である。得られた粉末は単相の水酸化ベリリウムであることが分かった[9]。上記のように低温精製技術を基に、ベリリウム化合物の回収に成功したことは、現状のベリリウムの持つ課題解決に向けた大きな成果であると言える。

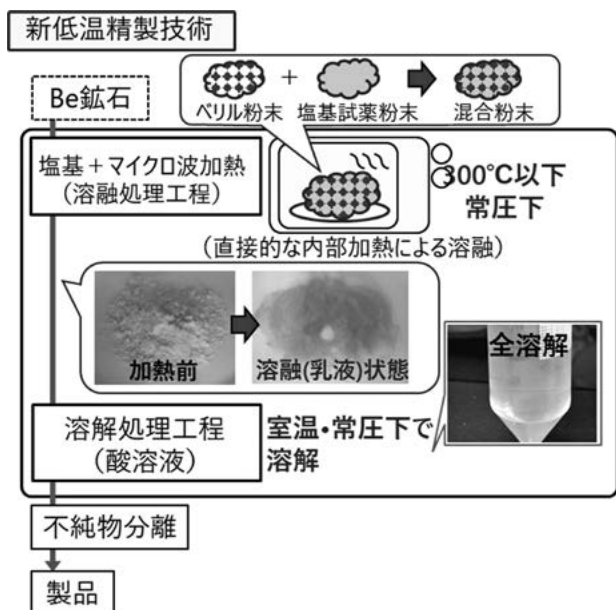


図5 低温精製技術における状態を示したフロー図。

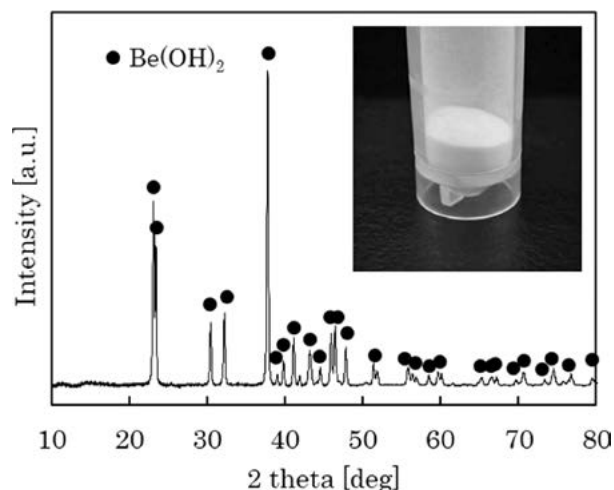


図6 回収粉末の画像及びそのXRD回折結果。

3. 技術の発展的展開

難溶解性のベリル鉱石を低温で溶解可能な本精製技術における一番の特徴は、化学反応とマイクロ波加熱の複合化である。ここで、混合前のベリル鉱石及び水酸化ナトリウムそれぞれに対し、マイクロ波を直接照射した際の加熱挙動について調べた。図7はそれぞれマイクロ波出力300 Wを固定して約10分間マイクロ波を照射した際の、各サンプルにおける温度履歴を表したものである。左図に示した通り、ベリル鉱石単体にマイクロ波を照射した場合、サンプルの温度は上昇せず、放射温度計の検出下限温度である50℃を推移する結果となった。照射後サンプルの実温度を測定したが、加熱はされておらず、室温状態のままであった。一方、右図に示す通り、水酸化ナトリウム単体にマイクロ波を照射した場合は、照射開始の約6分後、急激に温度上昇が見られ、その後4分ほどで250℃に到達した。これらの結果から、ベリル鉱石はマイクロ波を吸収しにくく、一方で、水酸化ナトリウムはマイクロ波を効率よく吸収し、発熱に寄与していることが明らかとなった。ここで本技術においては、マイクロ波は溶解対象物であるベリル鉱石を加熱しているのではなく、融剤である水酸化ナトリウムを発熱させ、間接的に混合体全体の温度を上げている。

これらの結果を基に、ベリル鉱石以外の難溶解性とされているLi鉱物であるスポジウム、Si鉱物である珪石及びZn鉱物である閃亜鉛鉱に対して、同様の300℃におけるマイクロ波加熱実験を行った。その結果を図8上部に示す。結果として、ベリル鉱石を含めたスポジウム、珪石及び閃亜鉛鉱の全ては、マイクロ波が吸収され難く、発熱は確認されなかった。一方で塩基試薬である水酸化カリウムは、水酸化ナトリウム同様にマイクロ波をよく吸収して、発熱することが確認された。同じく塩基試薬である炭酸ナトリウムについては、マイクロ波吸収性は低く、発熱は確認されなかった。上記の結果から、各鉱物に対して、融剤として水酸化ナトリウムを用いて低温精製技術を適用させたとこ、全ての鉱物に対し同様の加熱・溶解条件で、それぞれの鉱物を溶解させることを確認した(図8下部)。

その他精製工程において高熱処理を必要としている鉱

物に対する、本技術の適用性について、図9にまとめた。様々な鉱物の処理工程においては、ベリル鉱石同様に高温熱処理が多く含まれている。そこで、それぞれの鉱物に対し本技術を適用させたとこ、300℃以下の共通条件で高い溶解度を得られることを明らかにした。このように従来技術に対して、本低温精製技術は、省エネルギーの代替技術として、とても有望である。また鉱物処理のみならず、人工物に対しても有用な技術である。例として、人工セラミックス中の有用金属の回収を考えた時、熱的に安定で耐腐食性を持つセラミックスを分解処理するためには、高いエネルギーを用いた高温処理が必要となる。そこで本技術を適用することにより、低温処理での酸溶解が可能となり、有用金属が溶け込んだ溶液を得ることができ、容易な金属回収が可能となる。すなわちベリリウム精製技術を発端に開発された本技術は、一次資源の処理だけでなく、リサイクルの分野における処理過程の低温化プロセス確立においても、その優位性を引き出せる可能性を秘めている。国内における鉱物資源は限られているが、鉱物資源の海外からの輸入依存を緩和させるためには、こうした省エネルギーでのリサイクル技術の確立が必須であると言える。

溶解処理工程				
鉱物	Be:ベリル ケイ酸塩鉱物	Li:スポジウム ケイ酸塩鉱物	Si:珪石 酸塩鉱物	Zn:閃亜鉛鉱 硫化鉱物
マイクロ波 吸収特性	吸収しにくい			
塩基試薬 (融剤)	NaOH	KOH	Na ₂ CO ₃	
マイクロ波 吸収特性	吸収(溶解)			吸収しにくい

	Be:ベリル ケイ酸塩鉱物	Li:スポジウム ケイ酸塩鉱物	Si:珪石 酸塩鉱物	Zn:閃亜鉛鉱 硫化鉱物
溶解処理	NaOH			
MW条件	300℃・常圧			
溶解処理	HCl			
溶解条件	室温・常圧			
溶解度	>90%			

図8 それぞれの鉱物及び融材に対するマイクロ波加熱試験の結果と各鉱物の溶解試験結果。

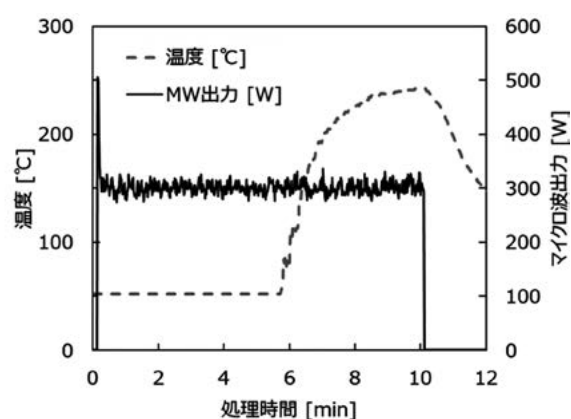
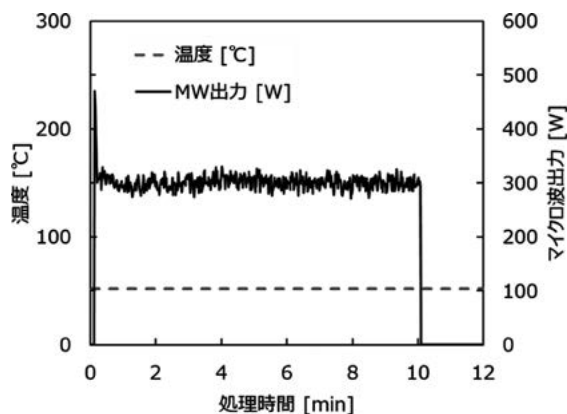


図7 ベリル鉱石及び水酸化ナトリウムそれぞれにマイクロ波を直接照射した際の加熱挙動(左図はベリル鉱石、右図は水酸化ナトリウムでの結果)。

高温熱処理が必要な鉱物	現在の処理温度	新しい処理温度	回収金属の使用用途例
ベリル (Be)	2,000℃(溶融)→急冷→250℃(焙焼)	300℃以下	Be銅合金、X線透過窓材、3Dプリンタ鏡材、構造材
スズジウム (Li)	1,150℃(か焼)→250℃(焙焼)		電池、陶器・ガラス添加剤、耐熱グリース
コバルトリッチクラスト (Co)	900℃(還元)→1,400℃(溶錬)		電池、硬質合金、メッキ、顔料
マンガン団塊 (Mn)	900℃(還元)→1,400℃(溶錬)		電池、磁性材、脱酸素材、添加剤
バステナイト (REE)	800℃(酸化焙焼)		磁石、LED、レーザー、超伝導体、電極、電解質
ボーキサイト (Al)	1,000℃(溶融)		構造材、電子機器、容器、包装
鉄鉱石 (Fe)	1,300℃(還元)		構造材、機器部材、容器
ルチル (Ti)	1,000℃(塩化)→850℃(還元)		触媒、耐熱材、耐食材
ジルコニウム (Zr)	1,200℃(塩化)→950℃(還元)		触媒、電子材料、ファインセラミックス
珪石 (Si)	1,500℃(還元)		半導体、電池部材、セラミックス、樹脂
閃亜鉛鉱 (Zn)	1,000℃(酸化)→1,300℃(還元)		メッキ、構造材、電池、防食材

図9 高熱処理を必要としている鉱物に対する本技術の適用性.

4. さいごに

核融合発電の実現は、決して遠い未来の話ではない。2023年には日本政府は国家戦略として、核融合原型炉開発を見据えた研究開発を加速する方針を打ち出した。この方針に基づき、産業界を巻き込みつつ、多面的なアプローチにより核融合エネルギーの早期実現化に向けた取り組みが既に始まっている。一例として、核融合炉に必要なベリリウムを安定的に確保するため、2023年5月に、核融合炉用ベリリウムの製造販売を目的に、新たなスタートアップ企業が設立された。株式会社MiRESSO（読み：ミレツソ、以下MiRESSO）は、QSTから認定を受けた核融合ベンチャー企業であり、QSTで開発された低温精製技術を用いて、ベリリウムを安価に大量に生産することを事業の柱に掲げている（図10）。MiRESSOでは、現在実験室スケールの本技術を、2027年までに実規模手前のパイロットスケールまで引き上げる計画である。また核融合原型炉の建設移行判断が行われる2030年以降ではベリリウムの増産体制に入り、核融合原型炉に必要な大量のベリリウムを安価に提供できるよう、現在実証開発を進めている（図11）。MiRESSOの他にも核融合を発端に立ち上がったベンチャー企業は多く存在する。核融合実現に向けては間違いなく前進をしており、近い将来、



株式会社MiRESSO（ミレツソ）

代表者

■ 中道 勝

設立

■ 2023年5月

事業概要

■ ベリリウム及びその化合物の製造、販売
■ 高温の熱利用製造プロセスの低温化に係るライセンス&コンサルテーション

MiRESSOとは

■ 文部科学省所管の8法人の一つである国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構(QST)発のベンチャー企業。
■ QSTでは核融合発電の早期実現に向けた研究開発を実施。
■ 当社はQST認定ベンチャー（核融合部門では初となる認定）として、核融合の社会実装を鉱物供給により進める会社である。
ホームページ： <https://miresso.co.jp/>

Copyright © 2024 MiRESSO Co.,Ltd. All Rights Reserved

図10 低温精製技術を基に設立したベンチャー企業.

核融合反応で得られた電力の恩恵を受けられるかもしれない。

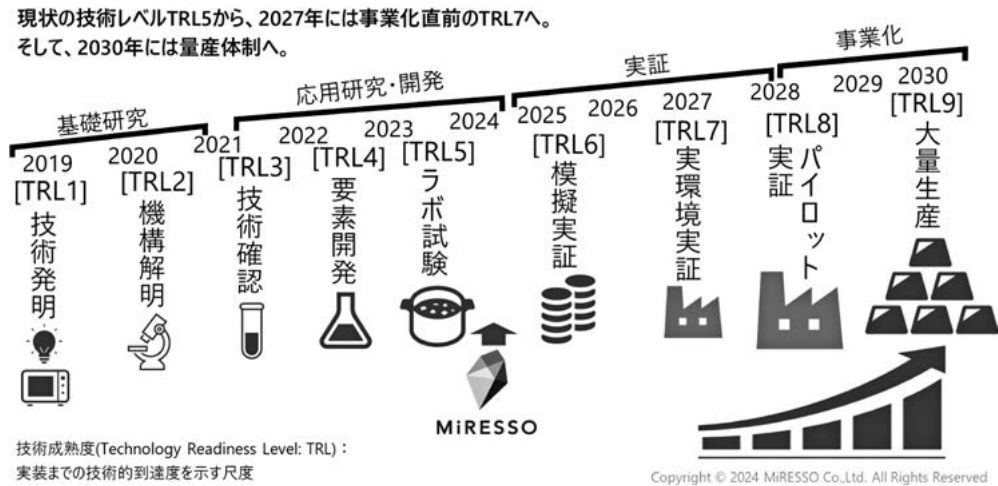


図11 MiRESSO 社におけるベリリウム製造開発マイルストーン.

参考文献

- [1] 寺井隆幸：金属 **86**, 42 (2016).
- [2] ベリリウム技術研究特別専門委員会編：ベリリウム利用への叡智（日本原子力学会, 1993）.
- [3] L.L. Snead and S.J. Zinkle, Use of Beryllium and Beryllium Oxide in Space Reactors, AIP Conference Proc. **746**, 768 (2005).
- [4] 柴山環樹 他：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 259 (2011).
- [5] Y. Someya *et al.*, IAEA-CN-286/TECH/2-1, 2021.
- [6] B.W. Jaskula, U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2024.
- [7] K.A. Walsh, Beryllium Chemistry and Processing, ASM International, 2009.
- [8] 中野 優 他：金属 **92**, 45 (2022).
- [9] S. Nakano *et al.*, Nucl. Mater. Energy. **30**, 101113 (2022).



なか の
中 野 優

量子科学技術研究開発機構 六ヶ所フュージョンエネルギー研究所 増殖機能材料開発グループ・技術員。2023年東北大学大学院博士後期課程修了。博士（工学）。核融合ブランケットの中性子増倍材料であるベリリウムの資源確保に関する研究に従事。根っからのインドアですが、子どもからの要望により週末は頑張って外出するようにしています。



なか みち まさる
中 道 勝

株式会社MiRESSO（ミレソ）代表取締役。東北大学大学院修了。博士（工学）。日本原子力研究所時代より、核融合炉機能材料の研究開発に従事。量子科学技術研究開発機構における研究成果を基に、鉱物資源の安定供給の観点から、核融合炉の早期実現に貢献すべく、スタートアップMiRESSOを起業。