

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02410

研究課題名(和文) シリカ直接電解還元と液体合金カソードを用いた高生産性太陽電池用シリコン製造法

研究課題名(英文) Highly productive production method for solar grade silicon using direct electrochemical reduction of silica and liquid alloy cathodes

研究代表者

野平 俊之(Nohira, Toshiyuki)

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

研究者番号：00303876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：高純度シリカから低エネルギー・低コスト・高生産性で太陽電池用シリコンを製造する方法を研究した。従来の炭素熱還元で代わる還元方法として溶融塩中における電解還元法を採用し、以下の成果を得た。(1)溶融塩化カルシウム中における液体Zn電極上でのシリカの電解還元のみカニズムを検討した。電気化学測定および試料分析を行った結果、Zn-Si合金が直接形成する電位領域およびZn-Ca合金を経由して間接的にZn-Si合金が形成する電位領域が存在することが分かった。(2)液体Zn-Si合金からのSi析出を検討した結果、金属不純物が効率的に除去できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶融塩化カルシウム中におけるシリカの電解還元については、新規な太陽電池用シリコン製造法への応用が期待されてきたが、従来の固体電極を用いる方法では「低生産性」および「不純物混入しやすい」という課題があった。本研究により、どちらの課題も解決できる可能性が示された。特に、液体Zn-Si合金からのSi析出における金属不純物除去を実証したことは重要である。本研究がさらに発展すれば、社会的にニーズの高い太陽電池用シリコンの新規製造法の確立が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We studied a low-energy, low-cost, and high-productivity method to produce silicon for solar cells from high-purity silica. The electrochemical reduction method in molten salt was adopted as an alternative to the conventional carbothermic reduction, and the following results were obtained. (1) The mechanism of electrochemical reduction of SiO₂ on liquid Zn electrode in molten CaCl₂ was investigated. As the results of electrochemical measurement and sample analysis, we found that there existed a potential region where Zn-Si alloy was formed directly and a potential region where Zn-Si alloy was formed indirectly via Zn-Ca alloy. (2) Si precipitation from liquid Zn-Si alloy was investigated, which revealed that metallic impurities could be efficiently removed.

研究分野：溶融塩電気化学

キーワード：太陽電池 溶融塩 電解還元 シリコン 液体合金カソード

1. 研究開始当初の背景

昨今の世界規模でのエネルギー・環境問題を考えた場合、化石エネルギーに代わり再生可能エネルギーを大幅導入する必要があることは論をまたない。中でも全世界のエネルギー需要に当て得るポテンシャルを有するのは、太陽光と風力と言われている。太陽電池の中でも結晶系 Si 太陽電池は、高変換効率・高耐久性といった特長から現在の全太陽電池生産量の 9 割以上を占めている。さらに、無害、豊富な資源量といった観点から、世界的超大量生産に対応可能な太陽電池材料の最有力候補である。一方、最大の課題は、原料となる太陽電池級 Si(SOG-Si、純度 6N-7N)の製造コストである。現行法では、シリカの炭素熱還元で得られる金属級 Si(99%)をシランガスへ変換し、蒸留精製した後に再び Si へ還元させており、エネルギー・製造コストが高く、生産性が低い。今後の大量需要に応えるためにはシリカ還元法から抜本的に見直す必要がある。

本申請者らは、高温熔融塩系における様々な電気化学的研究を行ってきた。そして、2000 年に「熔融塩中における固体シリカの直接電解還元」の研究に着手し、SiO₂に Mo 等の金属電極を接触させて「電子伝導体/SiO₂/熔融塩」の三相界面を確保する「SiO₂接触型電極」を新たに考案した。この新電極を用いて 850°Cの熔融 CaCl₂中において、高純度 SiO₂が完全に Si に還元されることを世界で初めて示した。この成果は、*Nature Materials* 誌に掲載され、国内・国外で高く評価されている(参考文献①)。その後も研究を継続し、還元メカニズムの解明、熱力学計算による考察、太陽電池用 Si 製造法の提案(参考文献②)などを行った。

2005 年からは、安価な高純度シリカ(連携企業が開発済)を使用し、セル構造や電極構造を工夫することで、B および P 不純物濃度が増加しないことなどを明らかにした。研究開発開始当初までに生成 Si 中の不純物濃度として B=0.6 ppm、P=0.39 ppm を達成している。また、プロセスの連続化およびスケールアップを目指した検討も行った。この過程では、電解還元 Si を浮遊帯溶解法で結晶化させて Si 結晶棒を得ることも成功している。

以上の一連の研究において、電解還元は確実に進行するものの、「生産性の向上」および「不純物混入に対する耐性の向上」という課題が明らかとなった。そこで、世界で 5000 万トン/年の大規模生産が行われているアルミの電解製錬法(ホール・エルー法)を参考にし、還元生成する Si を液体合金として回収することで、「高効率・高生産性」かつ「不純物混入に強い」プロセスが実現するのではないか、という独自の発想を得るに至った。そして、図 1 に示すような新プロセスを提案した(参考文献③)。まず、電解工程では、生成 Si を液体 Zn-Si 合金とすることで、反応速度が向上し、回収も容易となるため「高効率・高生産性」が実現できる。さらに、電解工程の対極から生成する炭素系不純物は、液体 Zn-Si 合金中への溶解度が極めて低いため、「不純物混入に強い」プロセスが実現できる。ここで、合金を形成する金属としては、上記のとおり、蒸留により簡単に分離できる Zn 選定した(本研究とは原理が全く異なるが、SiCl₄を Zn で還元して太陽電池用 Si を製造するプロセスが一部実用化されており、Sn-Zn 系からの Zn 分離が容易であることが実証されている)。金属級 Si を冶金的に精製する方法として、Al、Cu、Sn、Fe などを用いて液体合金とした後に Si を析出させる先行研究があるが、Zn は沸点が 907°Cと低いため実験操作が難しく、これまで報告例は無かった。しかし、申請者らは長年の熔融塩に関する知見と経験から、蒸気圧の高い液体 Zn-Si 合金であっても、上部を熔融 CaCl₂ でカバーすれば蒸発を抑制できるのではないかとこの独創的な着想を得た。実際に、基礎的な検討により、液体 Zn の蒸発が大幅に抑制されることを確認している(参考文献③)

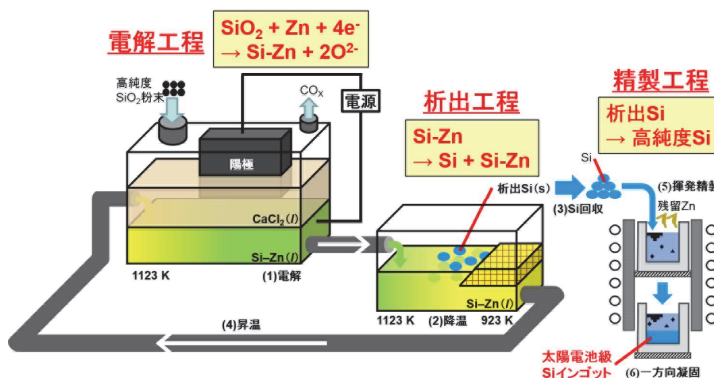


図 1 提案した新規太陽電池用 Si 製造法(参考文献③)。

2. 研究の目的

本研究では次の 2 つの研究を行うことを目的とした。

- (1) 熔融 CaCl₂ 中における液体合金カソード上での SiO₂ 電解還元のメカニズム解明と最適化
上記提案プロセスの最も重要なステップである電解工程の「メカニズム解明」と「実用化に向けた条件最適化を行う。
- (2) 液体合金からの Si 析出反応の基礎データ取得と最適化

電解工程に引き続き行われる「Si 析出工程」の最適化を行う。液体合金からの Si 析出時には、不純物が液体側に分配されるため、この工程で優れた精製効果が期待できる。しかし、Zn-Si 系の偏析係数の報告はこれまでないため、まず基礎データとして偏析係数を実測する。

3. 研究の方法

(1) 熔融 CaCl₂ 中における液体合金カソード上での SiO₂ 電解還元のみカニズム解明と最適化

実験目的によって、図 2 に示すような大・中・小の液体 Zn 電極を使い分ける。電極(a)は、すでに予備実験によって SiO₂ 電解還元が可能であることが示されていた。電極作製および実験途中の交換が容易なため、反応の電位依存性の検討など電気化学的挙動解析に用いる。一方、電極(a)は反応途中の粒状 SiO₂ の回収や反応界面の特定が困難という課題があった。そこで、反応界面の分析のため新たに電極(b)を作製した。この電極は、「熔融塩/液体 Zn/固体 SiO₂」三相界面の再現性に優れており、反応界面の特定も容易であるため、メカニズム解明に効果的である。電極(c)は、反応メカニズムがある程度解明された後に大容量での還元実験を行う場合に用いた。

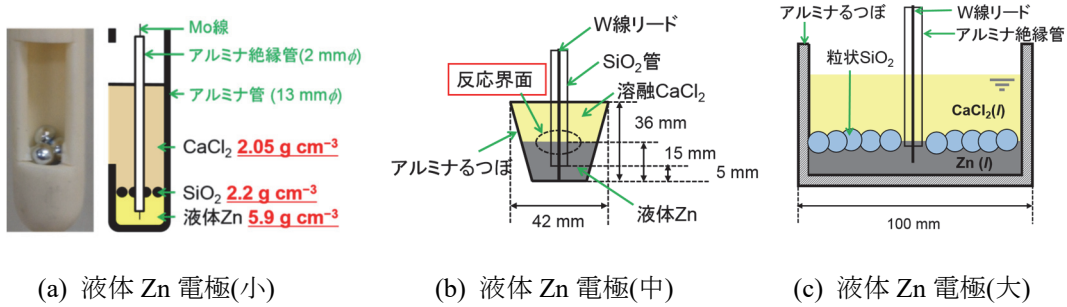


図 2 各種の液体 Zn 電極。

(2) 液体合金からの Si 析出反応の基礎データ取得と最適化

図 3 に示すような装置で液体 Zn-Si 合金を準備し、降温時の Si 析出挙動を検討した。グラファイトるつぼ中に高純度 Zn を装荷し、上部を熔融 CaCl₂ でカバーした。中央のカーボン管を使用して、金属級 Si (純度 99%、不純物濃度既知) を投下した。完全に液体合金化した後に、種々の降温パターンで Si を析出させた。実験後は、断面観察を行った後、Zn を酸溶解させ、得られた Si の形態・組成を SEM/EDX で、不純物量を ICP-AES で分析した。原料 Si、原料 Zn、生成 Si、および実験後の Zn 中における各種不純物元素濃度を分析することで、偏析係数等を算出した。また、Zn 中および Si 中の溶解度データの報告値がある元素については、理論計算により求められた推定値と比較した。

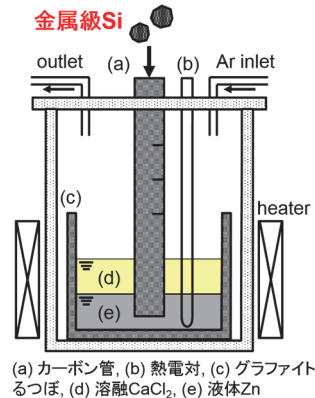


図 3 液体 Zn-Si 合金作製および Si 析出実験の装置図。

4. 研究成果

(1) 熔融 CaCl₂ 中における液体合金カソード上での SiO₂ 電解還元のみカニズム解明と最適化

図 4 は、SiO₂ 顆粒を添加した場合と添加しない場合の液体 Zn 電極(a)のサイクリックボルタモグラムである。SiO₂ 顆粒を添加していない場合の実線は、0.9 V (vs. Ca²⁺/Ca) から急激に電流が増加している。1123 K の全組成範囲で Ca と Zn は液相を形成するため、この電流は液体 Ca-Zn 合金の形成によるものと考えられる。0.9 V の電位は、ヘンリーの法則と 1073 K での Ca の活量係数 (2.15 × 10⁻³) から計算すると、Ca モル分率 1.6 × 10⁻⁶ の液体 Ca-Zn 合金に相当する。反応を確認するために、Zn 電極を用いて -1.06 A cm⁻² で 30 分間の定電流電解を行った。電解直後の開回路電位は 0.35 V であった。この試料を EDX で分析したところ、表層部の組成は 90 at%Zn-10 at%Ca であることが判明した。この値は、報告されている Ca の活量係数から算出された値とほぼ一致する。なお、0.90 V の定電位電解で得られた Zn 電極中の Ca 含有量は EDX の検出限界以下であり、これは定電流電解の場合に比べて通電電気量が少な

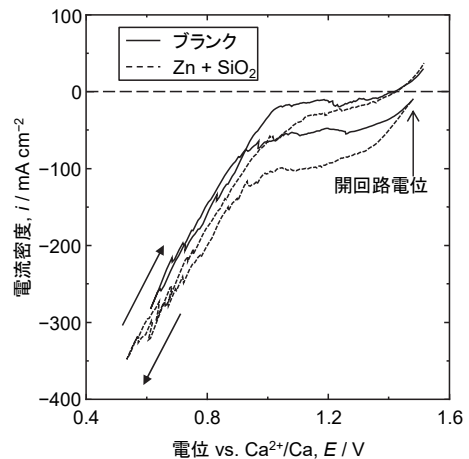


図 4 熔融 CaCl₂ 中での液体 Zn 電極のサイクリックボルタモグラム。温度：1123 K、走査速度：0.2 V s⁻¹。

かったことに起因すると考えられる。以上の結果から、0.9 V よりも卑な電位で観測された還元電流は、液体 Ca-Zn 合金の形成に起因するものと確認された。

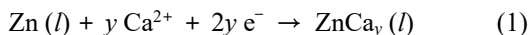
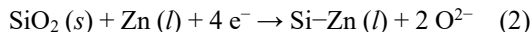


図 4 の破線は、SiO₂ 添加後の Zn 電極のボルタモグラムを示している。開回路電位は SiO₂ 添加前とほぼ同じであるが、卑な方向への電位走査中に 100 mA cm⁻² 程度の還元電流が観測されている。この電流の増加は、0.9~1.45 V の間に SiO₂ が還元されて液体の Si-Zn 合金が形成することを示唆している。



絶縁性固体である SiO₂ の直接電解還元を行うためには、電子を供給するための集電体が必要である。ここで液体 Zn 電極上での SiO₂ 還元開始電位(1.45 V)は、Mo 電極のような固体電極の場合(1.25 V)よりも貴である(参考文献④)。これは、Zn-Si 合金中の Si 活量が固体 Si よりも低いことに起因する。

ボルタンメトリーの結果をもとに、直径 0.1 mm の SiO₂ 顆粒を添加した液体 Zn 電極(a)を用い、0.90 V で 60 分間の定電位電解を行った。浴から取り出した後に、垂直方向の断面を観察した。図 5(a)および(b)は、をそれぞれ電解後の試料の断面写真と断面 SEM 像である。析出した粒子は、Zn 電極の上部にのみ観察された。図 5(c)に示す拡大 SEM 像では、Zn マトリックス中に 2~30 μm のサイズの Si 粒子が析出していることが確認された。EDX 分析によると、Si が 100 wt% で検出され、他の元素は検出限界以下であった。ここで、Si-Zn 系の二元状態図によると、液体 Zn 金属への Si の溶解度は 1123 K で 6.0 at% であり、室温では無視できるほど小さくなる。したがって、SiO₂ が電気化学的に還元されて液体の Si-Zn 合金が形成され(反応 2)、その冷却過程で Si 粒子が析出したと考えられる。析出した Si 粒子は、密度が低いために液相中で浮遊・凝集し、上部にのみ観察されたと思われる。

次に、16.2 g の SiO₂ 粒子を添加した電極(c)を用いて、0.60 V で定電位電解を 50 時間行った。図 6(a)は、塩酸溶液による Zn の溶解処理後に回収された Si 粒子の写真である。XRD 分析により、この粒子が結晶性の Si であることを確認した(図 6(b))。

(2) 液体合金からの Si 析出反応の基礎データ取得と最適化

図 3 で示した実験装置を用いて、Zn-Si 合金からの Si 析出実験を行った。図 7(a)は、得られた Zn インゴットの上面部の写真である。上部は、金属光沢のある部分と灰青色の部分から構成されている。写真からは見えないが、底部全体は金属光沢を有していた。図 7(b)は、Zn インゴットの断面 SEM 像である。上部には 100~1000 μm の粒子が多数含まれている。EDX 分析から、これらの粒子では Si のみが検出され、それ以外の部分では Zn のみが検出された。析出した粒子の多くはインゴットの上部に観察された。723 K での液体 Zn の密度(6.56 g cm⁻³)と固体 Si の密度(2.32 g cm⁻³)を考慮すると、Si 粒子は、析出過程で液体 Zn の上部に浮かんでいたと考えられる。図 7(c)は、Zn インゴットを酸で浸出した後に回収した Si 粒子の写真である。約 1 mm の大きさで、金属光沢がある。

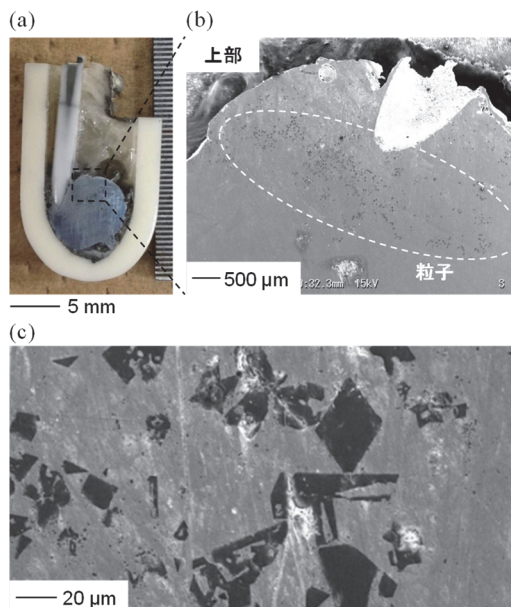


図 5 SiO₂ 顆粒を添加した液体 Zn 電極を 1123 K の熔融 CaCl₂ 中で 0.90 V、60 分間の定電位電解を行って得られた試料の(a)断面写真、(b)断面 SEM 像、(c)拡大断面 SEM 像。

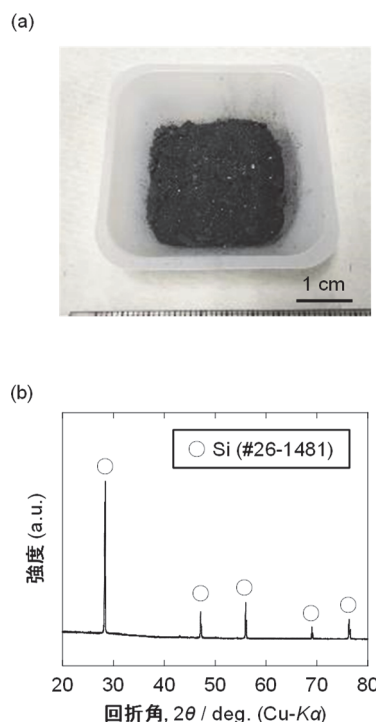


図 6 (a) Zn 電極の酸浸出後に得られた Si 粒子の写真と(b) XRD パターン. SiO₂ 粒子の電解還元は、1123 K の熔融 CaCl₂ 中で液体 Zn 電極(c)を用いて 0.6 V で 50 時間行った。

得られた Si 粒子に対する不純物分析では、C、Al、Ca、Fe について高い除去率が確認され、理論的に計算された分配係数とほぼ一致した。また、液体 Si から固体 Si を析出させる場合と比較して、B の高い除去率が確認された。また、出発原料である金属級 Si からは、理論計算の予測とは異なり、O が除去されていた。これは、金属級 Si に残留していた酸化物が、熔融 CaCl_2 に溶解したためと考えられる。このようにして得られた Si 粒子を、浮遊帯溶融法(FZ 法)を用いて結晶棒とし、ウェハー状に切断した。この Si ウェハーでは、金属不純物(Al、Ca、Fe、Ti、Zn)の合計含有量が 0.2 ppmw 以下であり、Al と Ca は太陽電池級 Si の許容値を満たしていた。また、Si ウェハーでは、P および O の濃度も低下していた。特に Zn の濃度は、析出した Si 粒子では 5900 ppmw であったが、0.01 ppmw 以下に減少していた。このように、FZ 法による Si の溶解・結晶化過程で Zn は完全に除去できることから、合金元素としての Zn の優位性が分かる。

(3) まとめ

本研究では、高純度シリカから低エネルギー・低コスト・高生産性で太陽電池用シリコンを製造する方法を開発するために、熔融 CaCl_2 中における液体 Zn 電極上での SiO_2 電解還元による液体 Zn-Si 合金の形成、および液体 Zn-Si 合金からの Si 析出反応について検討した。

その結果、 SiO_2 の電解還元により、Zn-Si 合金が直接形成する電位領域および Zn-Ca 合金を経由して間接的に Zn-Si 合金が形成する電位領域が存在することが分かった。

また、液体 Zn-Si 合金からの Si 析出を検討した結果、金属不純物が効率的に除去できることを確認した。析出した Si 粒子を原料として、FZ 法により Si 結晶棒を作製し分析した結果、いくつかの不純物元素について、太陽電池級 Si の基準濃度を下回ることを確認した。

<引用文献>

- ① T. Nohira, K. Yasuda and Y. Ito, *Nature materials*, **2**, 397 (2003).
- ② K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara and Y. H. Ogata, *Electrochimica Acta*, **53**, 106 (2007).
- ③ T. Nohira, A. Ido, T. Shima, X. Yang, K. Yasuda, R. Hagiwara, T. Homma, *ECS Transactions*, **75**, 17 (2016).
- ④ K. Yasuda, T. Nohira, and Y. Ito, *J. Phys. Chem. Solids*, **66**, 443 (2005).

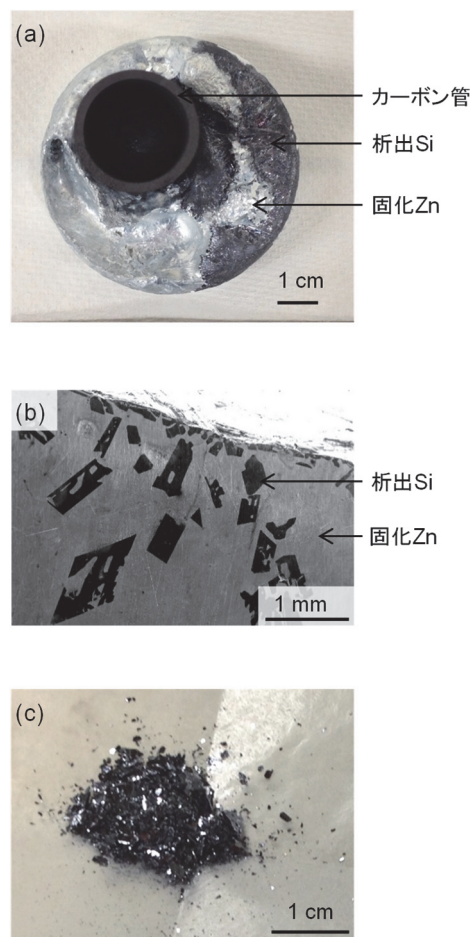


図7 熔融 CaCl_2 中での液体 Zn-Si 合金からの Si 析出実験後に得られた Zn インゴットの (a) 上面写真、(b)断面 SEM 像、(c)酸浸出後に回収された Si 粒子。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ma Yuanjia, Yamamoto Takayuki, Yasuda Kouji, Nohira Toshiyuki	4. 巻 168
2. 論文標題 Raman Analysis and Electrochemical Reduction of Silicate Ions in Molten NaCl-CaCl ₂	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 046515 ~ 046515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/1945-7111/abf4b2	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 -
1. 著者名 Ma Yuanjia, Yasuda Kouji, Ido Akifumi, Shimao Takeyuki, Zhong Ming, Hagiwara Rika, Nohira Toshiyuki	4. 巻 62
2. 論文標題 Silicon Refining by Solidification from Liquid Si-Zn Alloy and Floating Zone Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 403 ~ 411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.M-M2020872	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 -
1. 著者名 Ma Yuanjia, Yamamoto Takayuki, Yasuda Kouji, Nohira Toshiyuki	4. 巻 98
2. 論文標題 Dissolution Behavior of SiO ₂ and Electrochemical Reduction of Dissolved SiO ₂ in Molten Chlorides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 215 ~ 222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09810.0215ecst	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 Ma Yuanjia, Ido Akifumi, Yasuda Kouji, Hagiwara Rika, Homma Takayuki, Nohira Toshiyuki	4. 巻 166
2. 論文標題 Mechanism of Electrolytic Reduction of SiO ₂ at Liquid Zn Cathode in Molten CaCl ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 D162 ~ D167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2.1211904jes	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 Yasuda Kouji, Shimao Takeyuki, Hagiwara Rika, Homma Takayuki, Nohira Toshiyuki	4. 巻 164
2. 論文標題 Electrolytic Production of Silicon Using Liquid Zinc Alloy in Molten CaCl ₂	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 H5049 ~ H5056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2.0121708jes	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 -

1. 著者名 Zhong Ming, Yang Xiao, Yasuda Kouji, Homma Takayuki, Nohira Toshiyuki	4. 巻 49
2. 論文標題 Effect of Si Addition on the Electrochemical Reduction Rate of SiO ₂ Granules in Molten CaCl ₂	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions B	6. 最初と最後の頁 341 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11663-017-1132-4	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 ZHONG Ming, YASUDA Kouji, HOMMA Takayuki, NOHIRA Toshiyuki	4. 巻 86
2. 論文標題 Purity and Minority Carrier Lifetime in Silicon Produced by Direct Electrolytic Reduction of SiO ₂ in Molten CaCl ₂	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 77 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/electrochemistry.17-00087	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 Toshiyuki Nohira, Akifumi Ido, Takeyuki Shimao, Xiao Yang, Kouji Yasuda, Rika Hagiwara, Takayuki Homma	4. 巻 75
2. 論文標題 A New Electrolytic Production Process of Silicon Using Liquid Zn Alloy Cathode in Molten Salt	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 17-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/07515.0017ecst	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 Zhong Ming, Yang Xiao, Yasuda Kouji, Homma Takayuki, Nohira Toshiyuki	4. 巻 49
2. 論文標題 Effect of Si Addition on the Electrochemical Reduction Rate of SiO ₂ Granules in Molten CaCl ₂	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions B	6. 最初と最後の頁 341 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11663-017-1132-4	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 野平俊之
2. 発表標題 溶融塩およびイオン液体中における新規な電気化学反応とその応用
3. 学会等名 電気化学会第88回大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Nohira
2. 発表標題 Electrodeposition of Crystalline Silicon Films in Molten Salts for Photovoltaic Applications
3. 学会等名 The 11th International Symposium of Advanced Energy Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Ma, T. Yamamoto, K. Yasuda, T. Nohira
2. 発表標題 Dissolution Behavior of SiO ₂ and Electrochemical Reduction of Dissolved SiO ₂ in Molten Chlorides
3. 学会等名 PRIME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬元嘉, 山本貴之, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 熔融NaCl-CaCl ₂ -CaO中におけるSiO ₂ の溶解形態および電解還元
3. 学会等名 第52回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Nohira, K. Yasuda, Y. Norikawa, T. Kato, A. Kondo
2. 発表標題 Electrodeposition of Silicon from High Temperature Molten Salts
3. 学会等名 2nd Nucleation & Growth Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬元嘉, 原口隆太郎, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 熔融塩中における液体Si-Zn合金からの単結晶Si基板上へのSi結晶成長
3. 学会等名 第83回マテリアルズ・テラリング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yasuda, R. Haraguchi, Y. Ma, T. Nohira
2. 発表標題 Crystal Growth of Silicon from Liquid Si-Zn Alloy for the Production of Solar-Grade Silicon
3. 学会等名 The 10th International Symposium of Advanced Energy Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬元嘉, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 熔融NaCl-CaCl ₂ -CaO中における溶解SiO ₂ の電解還元
3. 学会等名 第51回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬元嘉, 山本貴之, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 熔融NaCl-CaCl ₂ -CaO中におけるSiO ₂ 溶解挙動とSi電析
3. 学会等名 電気化学会第87回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Yasuda, Y. Ma, A. Ido, T. Nohira
2. 発表標題 Production of High-purity Silicon Ingot Utilizing Volatile Metal Flux and Solidification Refining
3. 学会等名 10th KIFEE symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬元嘉, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 熔融塩中における液体Si-Zn合金からのSiの析出挙動と回収法に関する検討
3. 学会等名 第50回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬元嘉, 原口隆太郎, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 新規太陽電池級Si製造法を目的とした熔融塩化物中における液体Si - Zn合金からのSi析出
3. 学会等名 2018年度第3回関西電気化学研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬元嘉, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 熔融CaCl ₂ 中における液体Zn-Ca合金陰極を用いたSiO ₂ の電解還元
3. 学会等名 電気化学会第86回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬元嘉, 井戸彬文, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 熔融CaCl ₂ 中での液体Si-Zn合金からのSi析出時における降温速度の影響
3. 学会等名 第77回マテリアルズ・テラリング研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Nohira, K. Yasuda
2. 発表標題 A New Electrolytic Production Process of Solar Silicon Using Liquid Zn Alloy Cathode in Molten Salt
3. 学会等名 2017 International Forum on Liquid Salts for Energy Storage Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 安田幸司, 馬元嘉, 井戸彬文, 萩原理加, 本間敬之, 野平俊之
2. 発表標題 熔融CaCl ₂ 中における液体Zn陰極上でのSiO ₂ 電解還元反応
3. 学会等名 第41回電解技術討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Nohira, A. Ido, T. Shima, X. Yang, K. Yasuda, R. Hagiwara, T. Homma
2. 発表標題 A New Electrolytic Production Process of Silicon Using Liquid Zn Alloy Cathode in Molten Salt
3. 学会等名 PRIME 2016 (Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-state Science 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 安田幸司, 井戸彬文, 島尾武征, 楊肖, 野平俊之, 萩原理加, 本間敬之
2. 発表標題 熔融CaCl ₂ 中における液体Si-Zn合金の電解生成ならびに合金からのSi析出
3. 学会等名 第40回電解技術討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 馬元嘉, 井戸彬文, 安田幸司, 野平俊之
2. 発表標題 熔融CaCl ₂ -CaO中における液体Zn陰極上での溶解SiO ₂ の電解還元
3. 学会等名 第47回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 井戸彬文, 安田幸司, 野平俊之, 萩原理加, 本間敬之
2. 発表標題 熔融CaCl ₂ 中における液体Zn陰極上でのSiO ₂ 電解還元によるSi生成
3. 学会等名 第47回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2016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	安田 幸司 (Yasuda Kouji) (20533665)	京都大学・工学研究科・特定准教授 (14301)	

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
---------	---------