

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23246131

研究課題名(和文) 太陽電池用シリコン製造法のイノベーション

研究課題名(英文) Innovation in Production Method of Solar Silicon

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) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：溶融塩として主にCaCl<sub>2</sub>(850℃)を使用し、シリカ電解還元による低リン・低ホウ素シリコン製造法の開発を行った。高純度化検討については、得られたシリコン中の不純物濃度をICP-MSおよびGD-MIにより分析した。その結果、ホウ素については0.5 ppm以下、リンについては0.4 ppm以下を達成した。連続化プロセスの検討として、カソードに液体Zn-Si系を用いる検討を行った。SEM/EDX分析により、シリカからシリコンへの還元を確認した。さらに、液体Zn-Si合金からのSi回収についても初期検討を行い、結晶性Siの回収に成功した。

研究成果の概要(英文)：We developed the new production process of silicon with low concentrations of boron and phosphorous by the electrochemical reduction of silica in molten CaCl<sub>2</sub> at 1123 K. The lowest impurity level of the obtained silicon was confirmed to be B < 0.5 ppm and P < 0.4 ppm by ICP-MS and GD-MS. Aiming at the development of a continuous production method, we investigated the electrochemical reduction of silica on a liquid zinc cathode in molten CaCl<sub>2</sub> at 1123 K. By SEM/EDX analysis, silica powder was confirmed to be reduced to silicon. Moreover, we succeeded in the recovery of silicon from the liquid Zn-Si alloy.

研究分野：電気化学、溶融塩

キーワード：太陽電池用シリコン シリカ 溶融塩電解 低リン 低ホウ素 連続プロセス

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 50年後さらには100年後を見据えてエネルギー・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応え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。特に太陽電池技術は今後益々重要となる。太陽電池の中でも結晶系(単結晶・多結晶)シリコン太陽電池は、高変換効率・高耐久性といった特長から、本研究開始当時の全太陽電池生産量の8割以上を占めていた。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。

(2) 一方、最大の課題は、原料となる太陽電池級シリコン(SOG-Si、純度 6N-7N)の製造コストであった。現行法では、シリカの炭素熱還元で得られる金属級シリコン(99%)をシランガスへ変換し、蒸留精製した後に再びシリコンへ還元させており、エネルギーコストおよび製造コストが高い。従って、今後の大量需要に応えるためにはシリカの還元方法から抜本的に見直す「太陽電池用シリコン製造法のイノベーション」が必要である。

(3) 本研究代表者は、高温溶融塩系における電気化学的研究を行っている過程で、固体中から様々な元素を選択的に除去可能であることに気付いた。そして、 $\text{SiO}_2$ にMo等の金属電極を接触させて「電子伝導体/ $\text{SiO}_2$ /溶融塩」の三相界面を確保する「 $\text{SiO}_2$ 接触型電極」を新たに考案し、この新電極を用いて850の溶融 $\text{CaCl}_2$ 中において、高純度 $\text{SiO}_2$ (石英板、 $15 \times 5 \times 1 \text{ mm}$ )がほぼ完全にSiに還元されることを世界で初めて示した[ ]。この研究過程では、生成するシリコンが柱状で直径数ミクロンから数十ミクロンの双晶であること[ ]、電解還元によりリンおよびホウ素不純物濃度が増加しないことなどを明らかにした。また、ピーカースケールではあるものの、電解還元シリコンを加熱融解させることによりインゴット化することにも成功している[ ]。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、上記のような研究実績がある溶融 $\text{CaCl}_2$ 中における固体シリカ直接電解還元法について、「高純度化」および「プロセスの連続化」の観点から研究を進展させることを目的とした。

(2) 高純度化については、高純度シリカとシリコンの混合粉末をペレット状に成型した後に電解還元する方法において、ペレットの準備方法、溶融塩の高純度化、装置材料の最適化、電解条件の最適化等を行う。これにより、生成シリコン中の不純物濃度として、 $B < 0.1 \text{ ppm}$ 、 $P < 0.2 \text{ ppm}$ を目標とする。この純

度が達成されると、一度の一方性凝固精製により他の金属不純物は除去可能であり、太陽電池用シリコンが製造できる。

(3) プロセスの連続化については、シリコンは電解操作温度では固体であるが、ペレット成分やサイズの検討、カソード材料の変更、電解セル形状や電解方式の工夫により生成シリコンをスラリーもしくは液体合金として連続的に取り出す方法を開発する。

## 3. 研究の方法

(1) 従来の電解方式および電解セル(内径約10 cm、溶融塩量300 ml、 $\text{SiO}_2$ 量数g)でのさらなる高純度化を追求した。溶融塩には $\text{CaCl}_2$ を用いた。安価に精製された高純度シリカ( $B < 0.05 \text{ ppm}$ 、 $P < 0.05 \text{ ppm}$ )とシリコンの混合粉末をペレット状に成型した後に電解還元する方法において、ペレットの準備方法(成型法、焼結法等)、溶融塩の高純度化(再結晶、予備電解、Ca添加等)、装置材料の最適化、電解条件の最適化等を行った。また、電解還元サンプルの洗浄法についても、塩酸洗浄、フッ酸洗浄、イオン交換水洗浄など種々の方法を検討した。得られたシリコンの不純物濃度は、おもにICP-MSで分析した。全元素微量分析を行いたい場合は、GD-MSにより分析した。また、不純物混入メカニズムを考察するために、反応途中のサンプルも準備し分析した。ここでは適宜、XPS、SEM/EDX等も併用した。

(2) プロセスの連続化の検討として、まず、800-1000においてシリコンとスラリーもしくは液体合金を形成する物質を選定し、実際に市販の高純度シリコンと混合して溶融塩中に浸漬させ、反応性や流動性を確認した。その後、溶融塩や添加物質の分離・除去操作を行い、得られたシリコンの純度を上記と同様にICP-MSおよびGD-MSで分析した。なお、分離・除去操作においては、水洗(酸、アルカリ、純水)だけでなく、浮遊帯溶融炉でシリコン融点(1410)以上に昇温しての溶融凝固も検討した。これらの結果に基づき、ペレット成分やサイズの検討、カソード材料の選定、電解セル形状や電解方式の工夫により、実際に連続的に取り出す方式を検討した。さらにこの物質を用いた電解セルを設計・自作し、電解還元実験を行った。

## 4. 研究成果

(1) 不純物混入のない電解方法と後処理方法の開発を目的とした検討を行った。まず、ペレット形状を種々検討した結果、ペレットを粉碎した場合でも電解還元が進行することを見出し、不純物混入源となり得るペレット作成工程自体を省略可能であることが分かった。また、電解還元後の試料の洗浄法として塩酸処理が有効であることを確認した。さらに、電解還元後のサンプルの洗浄法として

塩酸処理に加えてフッ酸処理が有効であることを明らかとした。洗浄後に得られたシリコンの収率に関する検討から、電解還元時の還元率を高くすると収率が向上することも分かった。本研究期間中に得られたシリコンについて、GD-MS 分析による最も少ない不純物量は、 $B=0.47$  ppm、 $P=0.39$  ppm であった。これらは、目標値である  $B<0.1$  ppm、 $P<0.2$  ppm には届かなかったが、今後の研究開発により達成できる可能性を示す値である。

(2) 高純度シリカの電解還元プロセスについて、これまでに粒状シリカの粒径によって還元速度が変化することが分かっていたが、その反応メカニズムについては不明な点も多かった。この点を解析するため、小型黒鉛ルツボの内壁をアルミナ管で遮断し底面のみ露出させた構造の電極を準備し、その内部に粒径 0.10-0.25 mm および 1-2 mm のシリカを充填して 850 の溶融  $CaCl_2$  中において電解還元を行った(図 1)。

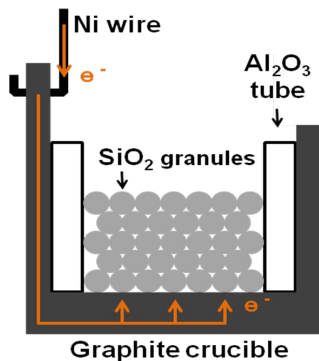


図 1. 電解還元メカニズム解析用の小型ルツボ電極の構造。

電解後のルツボの断面観察の結果(図 2)、ルツボ底面近傍の粒子から遠方の粒子へ還元が順に進行する様子が観察され、粒子表面の還元は速く、粒子内部への還元は遅いことが明らかとなった。

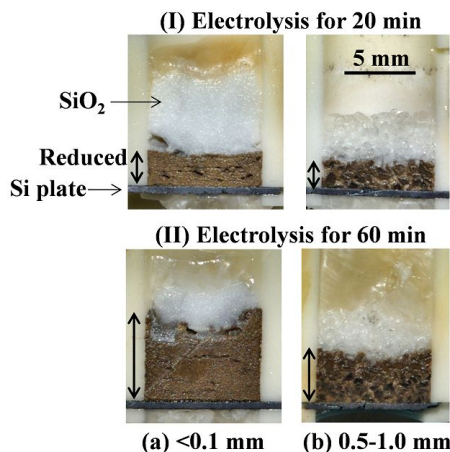


図 2. 小型ルツボ電極による電解還元後のサンプル断面 .粒径:(a) <0.1 mm、(b) 0.5-1.0 mm .電解時間:(I) 20 分、(II) 60 分 .

(3) プロセスの高純度化を目的として、高純度シリコンルツボを使用した電解還元法も開発した。さらに、電解還元で得られたシリコン粒を原料として、浮遊帯溶融法により結晶 Si 棒の形成にも成功した(図 3)。

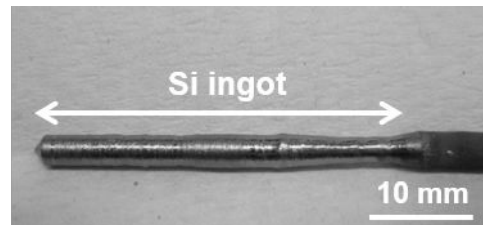


図 3. 電解還元で得られたシリコン粉末を用いて浮遊帯溶融法により作製されたシリコンインゴット .

(4) 図 4 にラボスケールでの連続電解プロセス用の電解セルを示す。作用極に Pt リード線と接続した Si りつぼ(外径 100×内径 90×高さ 150 mm)を用いた。上部からるつぼ内に粉末状  $SiO_2$  を投入した後、作用極を 0.6 V vs.  $Ca^{2+}/Ca$  で 30 時間の定電位電解を行った。電解後、底部に留まった生成 Si を、溶融  $CaCl_2$  と共にセル底部から吸い上げで抜き取った。原料投入 電解還元 生成物回収 原料投入のように連続して操作を行った。

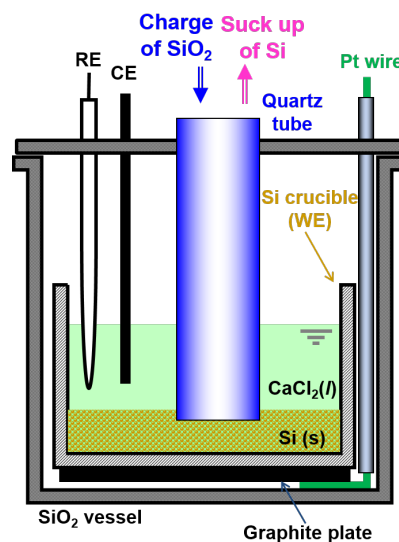


図 4. ラボスケールでの連続電解プロセス実験装置 .

図 5 (a) に、ラボスケールでの連続電解実験後のシリコンルツボ底部の写真を示す。茶褐色のシリコンが底部にスラッジのように貯まっていることが確認された。図 5 (b) に、底部から吸い上げたシリコンを示す。洗浄後に粉末 XRD を行った結果、結晶性シリコンであることが明らかとなった。これらの結果より、溶融電電解によるシリコンの連続生産の可能性を実証することができた。

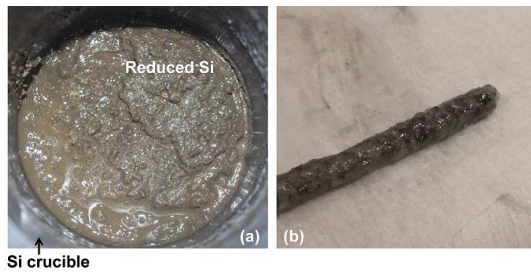


図 5. 連続電解実験後の写真。(a) 大部分の溶融塩を除去後にルツボ上部から見た様子。(b) 溶融塩とともに吸い上げられた粉末シリコン。

(5) これまで検討してきた方法では、セル底部の陰極で生成する Si が粉末状であるため、電解セルからの効率的な回収が課題となる。また、CaCl<sub>2</sub> との分離に水や酸による溶解処理が必要という課題もある。そこで、溶融塩からの分離回収等を効果的に行う手法として、底部陰極に Si-Zn 液体合金を用いる電解プロセスを考案した[ ]。本プロセスの概念図を図 6 に示す。

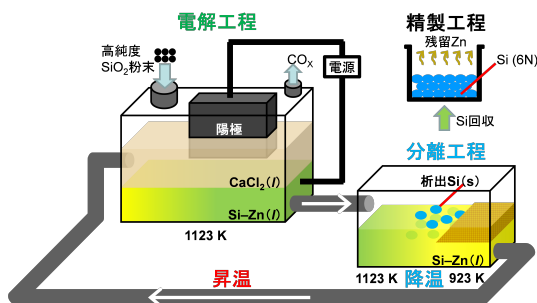


図 6. 溶融 CaCl<sub>2</sub> と液体 Si-Zn 合金カソードを用いた新規な太陽電池級シリコン製造プロセスの概念図。

プロセスは、(1)SiO<sub>2</sub> から Si-Zn 液体合金を生成する電解工程、(2)降温により Si-Zn 液体合金から Si の一部を析出させて回収する分離工程、(3)一方向凝固や残留 Zn の揮発除去を行う精製工程、から構成される。分離工程後に Si 濃度の下がった Si-Zn 液体合金は、電解工程の陰極として再び使用される。本研究では、本プロセスの要素技術として、固体 Si と液体 Zn との合金化速度、液体 Zn 電極上での SiO<sub>2</sub> の電解還元、ならびに Si-Zn 液体合金からの Si の析出について検討を行った。

(6) 1123 K に保持した液体 Zn 中へ、単結晶 Si 板(約 6 mm×35 mm、厚さ 5 mm)を 2 秒～60 秒浸漬し、浸漬後の Si 板厚みを測定することで Si と Zn の合金化速度を求めた。図 7 に、Si 板片面あたりにおける厚みの減少値の浸漬時間依存性を示す。浸漬時間に比例して厚みが減少しており、合金化速度は 4.45 μm/s であった。同様の実験を液体合金中の Si 濃度を変化させて行ったところ、図 8 に示すように、合金化速度は Si 濃度に対して直線的に小さくなり、外挿から求められる合金化速度

口となる濃度は Si-Zn 系状態図[ ]の液相線組成(6.0 mol%)とほぼ等しくなった。

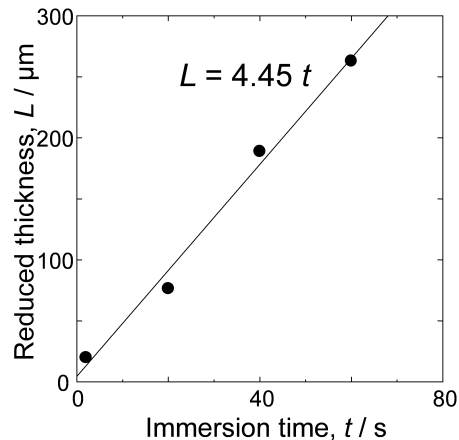


図 7. 1123 K の液体 Zn へ Si 板を浸漬させた際の Si 板片面あたりの板厚減少値の浸漬時間依存性。

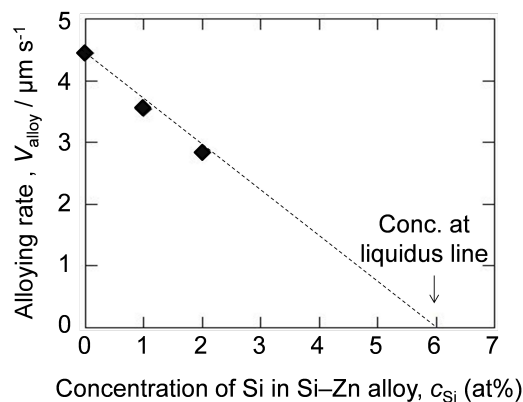


図 8. 1123 K において Si 板が Zn と合金化する速度の液体 Si-Zn 合金中 Si 濃度依存性。

これらの結果から、固体 Si と液体 Zn との合金化反応は、液相中における Si もしくは Zn の拡散が律速過程であると考えられる。筆者らのこれまでの研究により、SiO<sub>2</sub> 電解の初期 300 秒間における Si 生成速度は、SiO<sub>2</sub> の表面方向で 2.1 μm/s[ ]、内部方向で 0.27 μm/s[ ] であることが分かっている。Si と Zn との合金化速度はこれらの値より大きく、SiO<sub>2</sub> を Zn 上で電解した場合に、Si と Zn との合金化反応が律速となることはないと考えられる。

(7) Zn 電極を用いたサイクリックボルタムメトリーの結果をもとに、Zn に対して 5.6 at% 相当の SiO<sub>2</sub> 粉末をアルミナ保護管上部から投入し、液体 Zn 上部に SiO<sub>2</sub> が接触した状態として、0.9 V(vs. Ca<sup>2+</sup>/Ca)において 5.5 時間の定電位電解を行った。電解後に急冷した Zn 電極の、断面写真と断面 SEM 像を図 9 に示す。粒径 1 μm 程度の微細な粒子が、Zn マトリックス中に析出しているのが確認された。粒子を EDX で分析したところ、代表的な粒子の組成は 57Si-31Zn-6O-4Cl-2Ca(at%)であった。Si-Zn 系状態図[ ]によると、1123 K

では液体 Zn 中への Si の溶解度は 6.0 at% であるが、常温では Zn と Si にはほとんど溶解度がない。そのため、液体 Zn の上部において SiO<sub>2</sub> の電解還元が起こり、液体 Zn 中に溶解した Si 成分が、冷却時に相分離したものと考えられる。

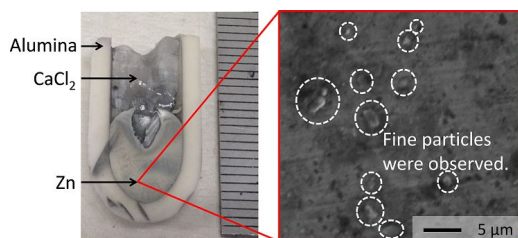


図 9. 1123 K の熔融 CaCl<sub>2</sub> 中において Zn カソード上で SiO<sub>2</sub> 粉末を電解還元した後の電極の様子。左図：断面写真。右図：SEM 像。

(8) 上述の結果を踏まえ、実際に液体 Si-Zn 合金から固体 Si を析出させた。まず、アルミナるつぼ内で事前に真空乾燥させた CaCl<sub>2</sub> を 1123 K の Ar 雰囲気下で熔融させた。次に、カーボン管を浴に挿入し、そこから Zn、金属級 Si (純度 2N) の順に投入して液体 4.5at% Si-Zn 合金を生成させた。その後、1123 K から 20 時間かけて 723 K まで炉冷し、そこで 5 時間保持した後、さらに 20 時間かけて室温まで炉冷することで、Zn マトリックス中に固体 Si 粒が析出した合金塊を得た。続いて合金塊を切断し、一部について断面 SEM 観察および EDX 分析を行った。図 10 にその合金塊の断面写真および SEM 像を示す。この結果より、Zn マトリックス中に Si 結晶が析出していることが分かった。

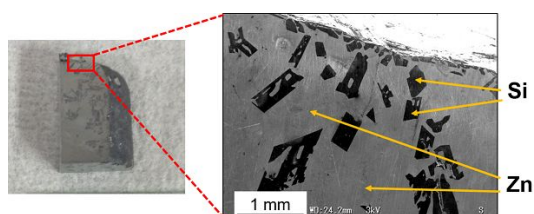


図 10. 液体 Si-Zn 合金からの析出により生成したシリコン結晶の SEM 像。

次に、硝酸で Zn を溶解させて析出 Si を回収した。析出 Si は超純水で洗浄した後、GD-MS による不純物濃度分析を行った。B、P、O、C、Al、Ca、Fe、Ti および Zn の各元素について、投入した金属級 Si および実験で得られた析出 Si 中の不純物濃度を比較した。その結果、特に金属元素について不純物が効果的に除去されることが分かった。

#### <引用文献>

T. Nohira, K. Yasuda and Y. Ito, Pinpoint and bulk electrochemical reduction of insulating silicon dioxide to silicon, *Nature Materials*, Vol. 2, pp. 397-401 (2003).  
K. Yasuda, T. Nohira, K. Amezawa, Y. H.

Ogata and Y. Ito, Mechanism of Direct Electrolytic Reduction of Solid SiO<sub>2</sub> to Si in Molten CaCl<sub>2</sub>, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 152, No. 4, pp. D69-D74 (2005).

K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara and Y. H. Ogata, Direct electrolytic reduction of solid SiO<sub>2</sub> in molten CaCl<sub>2</sub> for the production of solar grade silicon, *Electrochimica Acta*, Vol. 53, pp. 106-110 (2007).

安田幸司, 野平俊之, 萩原理加, 本間敬之, 第 45 回溶融塩化学討論会要旨集, p.49-50 (2013).

R.W. Olesinski and G. J. Abbaschian, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, Vol. 6, pp. 6 (1985).

K. Yasuda, T. Nohira, K. Takahashi, R. Hagiwara and Y. H. Ogata, *J. Electrochem. Soc.*, **152**, D232 (2005).

K. Yasuda, T. Nohira and Y. Ito, *J. Phys. Chem. Solids*, **66**, 443, (2005).

#### 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 8 件)

X. Yang, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara, T. Homma, Cathodic potential dependence of electrochemical reduction of SiO<sub>2</sub> granules in molten CaCl<sub>2</sub>, *Metallurgical and Materials Transactions E*, 査読有, published online (2016).

DOI: 10.1007/s40553-016-0081-1

X. Yang, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara, T. Homma, The Role of Granule Size on the Kinetics of Electrochemical Reduction of SiO<sub>2</sub> Granules in Molten CaCl<sub>2</sub>, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 査読有, Vol. 47, No. 1, pp. 788-797 (2016).

DOI: 10.1007/s11663-015-0456-1

X. Yang, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara, T. Homma, Kinetic Characteristics of Electrochemical Reduction of SiO<sub>2</sub> Granules in Molten CaCl<sub>2</sub>, *J. Electrochem. Soc.*, 査読有, Vol. 161, No. 7, pp. D3116-D3119 (2014).

DOI:10.1149/2.017407jes

X. Yang, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara, T. Homma, Reaction Behavior of Stratified SiO<sub>2</sub> Granules during Electrochemical Reduction in Molten CaCl<sub>2</sub>, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 査読有, Vol. 45B, pp.1337-1344 (2014).

DOI:10.1007/s11663-014-0056-5

T. Toba, K. Yasuda, T. Nohira, X. Yang, R. Hagiwara, K. Ichitsubo, K. Masuda and T. Homma, Electrolytic Reduction of SiO<sub>2</sub> Granules in Molten CaCl<sub>2</sub>, *Electrochemistry*, 査読有, Vol. 81, No. 7, pp. 559-565 (2013).

DOI:10.5796/electrochemistry.81.559

T. Toba, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara, K. Ichitsubo, K. Masuda and T. Homma, Fundamental Study on Reduction Rate for

Electrolytic Reduction of SiO<sub>2</sub> Powder in Molten CaCl<sub>2</sub>, ECS Transactions, 査読無, 50(11), 119-126 (2012).

DOI:10.1149/05011.0119ecst

野平俊之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中におけるシリカの電解還元、Electrochemistry, 査読無、79 巻、2011、893-897.

野平俊之、溶融塩中におけるシリカからシリコンへ直接電解還元、溶融塩および高温化学、査読無、54 巻、2011、95-103.

[学会発表](計 28 件)

安田幸司、島尾武征、楊肖、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、本間敬之、液体 Zn との合金化反応を利用した溶融 CaCl<sub>2</sub> 中における SiO<sub>2</sub> 電解還元プロセスの開発、第 38 回電解技術討論会、埼玉大学、2014 年 11 月 13-14 日

楊肖、安田幸司、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、本間敬之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中における粉末状 SiO<sub>2</sub> 電解還元の反応機構と速度解析、第 38 回電解技術討論会、埼玉大学、2014 年 11 月 13-14 日

楊肖、安田幸司、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、本間敬之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中における粉末状 SiO<sub>2</sub> 電解還元の反応機構と反応速度論的解析、資源・素材学会平成 26 年度秋季大会、熊本大学、2014 年 9 月 15-17 日

楊肖、安田幸司、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、本間敬之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中での粉末状 SiO<sub>2</sub> の直接電解還元、電気化学会第 81 回大会、関西大学、2014 年 3 月 29-31 日

Xiao Yang, Kouji Yasuda, Toshiyuki Nohira, Rika Hagiwara, Koki Ichitsubo, Kenta Masuda, Takayuki Homma, Direct Electrochemical Reduction of SiO<sub>2</sub> Granules in Molten CaCl<sub>2</sub>, 7th KIFEE International Symposium on Environment, Energy and Materials, Kambaikan, Doshisha University, Kyoto, Japan March 16-19, 2014.

野平俊之、溶融塩電解によるシリコン製造、電解科学技術委員会第 92 回委員会、電気化学会会議室、東京、2014 年 2 月 4 日

安田幸司、野平俊之、萩原理加、本間敬之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中における SiO<sub>2</sub> 電解への液体 Si-Zn 合金陰極の使用に関する検討、第 45 回溶融塩化学討論会、慶應義塾大学日吉キャンパス、2013 年 11 月 20-21 日

島尾武征、楊肖、安田幸司、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、本間敬之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中における液体亜鉛電極の電気化学的挙動、第 45 回溶融塩化学討論会、慶應義塾大学日吉キャンパス、2013 年 11 月 20-21 日

楊肖、安田幸司、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、本間敬之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中における粉末状 SiO<sub>2</sub> 電解還元機構の解明、第 37 回電解技術討論会、大阪府立大

学 I-site なんば、2013 年 11 月 14-15 日  
野平俊之、新たな太陽電池用シリコン製造法を目指して：溶融塩中におけるシリカの直接電解還元、第 2 回 SPERC スマートエネルギー工学講演会、岩手大学、2013 年 4 月 1 日

鳥羽哲也、安田幸司、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、本間敬之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中における粉末状 SiO<sub>2</sub> 電解還元に関するプロセス検討、第 36 回電解技術討論会、滋賀県立大学、平成 24 年 10 月 26 日。

Tetsuya Toba, Kouji Yasuda, Toshiyuki Nohira, Rika Hagiwara, Koki Ichitsubo, Kenta Masuda and Takayuki Homma, "Fundamental Study on Reduction Rate for Electrolytic Reduction of SiO<sub>2</sub> Powder in Molten CaCl<sub>2</sub>", The 222nd Meeting of the Electrochemical Society, Honolulu, Hawaii, 2012.10.8.

鳥羽哲也、小林克敏、安田幸司、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、本間敬之、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中での粉末状 SiO<sub>2</sub> の電解還元における還元速度向上の検討、電気化学会第 79 回大会、2012/3/31、浜松。T.Nohira, T.Toba, K.Kobayashi, K.Yasuda, R.Hagiwara, K. Ichitsubo, K.Masuda, Electrolytic Reduction of High-purity SiO<sub>2</sub> in Molten CaCl<sub>2</sub> for the Production of Solar Silicon, ECO-MATES2011, 2011/11/29, Osaka, Japan.

鳥羽哲也、小林克敏、安田幸司、野平俊之、萩原理加、一坪幸輝、増田賢太、溶融 CaCl<sub>2</sub> 中における SiO<sub>2</sub> ペレットの電解還元、第 43 回溶融塩化学討論会、2011/11/22、大阪。

野平俊之、溶融塩中におけるシリカからシリコンへ直接電解還元、第 176 回溶融塩委員会、2011/10/21、同志社大学京田辺キャンパス。

T.Nohira, T.Toba, K.Kobayashi, K.Yasuda, R.Hagiwara, K.Yamada, K.Miura, Production of Solar-Grade Si from High-Purity SiO<sub>2</sub>, 220th ECS Meeting, 2011/10/10, Boston, USA.

T.Nohira, K.Kobayashi, T.Toba, R.Hagiwara, K.Ichitsubo, K. Yamada, Electrolytic Reduction of High-purity SiO<sub>2</sub> in Molten CaCl<sub>2</sub> for the Production of Solar Silicon, 9th International Symposium on Molten Salts Chemistry & Technology, 2011/6/9, Trondheim, Norway.

## 6. 研究組織

### (1) 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