

報道機関 各位

国立大学法人東北大学 金属材料研究所
FTB 研究所株式会社

高品質単結晶シリコンの低コスト製造技術を開発

－ 結晶シリコン太陽電池の発電コスト低減に寄与 －

■ 発表のポイント ■

- ・ 世界で初めて澆液るつぼを用いた単結晶シリコン製造方法(LCZ 法)を開発
- ・ 従来の製造方法よりも安価かつ高品質な単結晶シリコンの製造に成功
- ・ 2020 年の発電コスト^{※1} 目標 14 円/kWh に向けて大きく前進

■ 概要 ■

東北大学金属材料研究所【所長 高梨 弘毅】(以下「金研」)結晶物理学研究部門 藤原航三教授、および結晶材料化学研究部門 宇田聡教授は、FTB 研究所株式会社【代表取締役 堀岡 佑吉】(以下「FTB 研」)、国立研究開発法人 産業技術総合研究所【理事長 中鉢 良治】(以下「産総研」)、福島再生可能エネルギー研究所再生可能エネルギー研究センター【研究センター長 仁木 栄】太陽光チームの福田哲生招へい研究員、高遠秀尚チーム長と共同で、高品質単結晶シリコン^{※2}の低コスト製造技術を開発しました。

単結晶シリコンの高品質化には、MCZ 法という石英るつぼの外部から磁場を作用させながら結晶を製造する手法が主に用いられていますが、太陽電池に強く求められるコストダウンが課題でした。今回我々は、磁場を作用させることなく、シリコン融液をはじく特殊な処理を行った石英るつぼ(以下「澆液るつぼ」という)を用い、結晶製造条件を最適化することによって、低コストで高品質な単結晶シリコンの製造方法(LCZ 法)の開発に成功しました(図1)。本技術は、新規の投資をほとんど必要とせず、MCZ シリコンと同等、またはそれ以上の高品質シリコンを製造できることが特徴です。高効率太陽電池のコスト低減が期待されると同時に、2020 年の発電コスト目標(業務用電力並 14 円/kWh(非住宅分野))の達成に向けて大きく前進できます。

なお、本技術については本年 3 月 19~22 日に東京工業大学で開催の第 63 回応用物理学会春季学術講演会で発表されました。

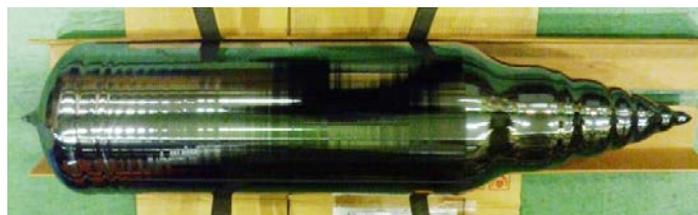


図 1 LCZ 法で製造した単結晶シリコン(直径 200mm、全長 800mm、重さ 50kg)

■ 開発の社会的背景 ■

再生可能エネルギーの普及拡大には、その発電コストが化石燃料によるコストを下回る必要があります。そのためには、太陽電池の変換効率を限界まで向上させなければなりません。現在、結晶シリコン太陽電池の低価格化と共に変換効率向上のための競争が世界的に激化しており、太陽電池の基板となる結晶シリコンの品質向上が強く求められています。

■ 研究の経緯 ■

東北大金研と産総研は、平成 25 年に太陽電池の変換効率向上を目指し結晶シリコンの高品質化に関する共同研究を開始しました。また FTB 研によって発明された澆液るつぼが、平成 26 年から FTB 研と東北大金研の共同研究によって改良されています。

そこで三者が協力し、澆液るつぼの更なる改良、これを用いた単結晶シリコンの製造と結晶評価、先端太陽電池の試作に亘り量産技術の展開に向けた研究を開始しました。この一連の研究は、単結晶シリコンの分野では世界で初めての取り組みです。

■ 研究の内容 ■

単結晶シリコンの製造は、石英ガラス製の円形るつぼ^{※3}で原料シリコンを融かしてシリコン融液とし、予め準備した細い棒状の単結晶をその表面に浸漬し連続的に上方へ引き上げることで行われます。この結晶製造方法を CZ 法と呼びます。シリコン融液は非常に活性であるため、接触した石英るつぼ壁を溶かし出します。また融液は熱対流を起こしており、これが石英るつぼの溶解を加速します。

一方、石英るつぼには種々の不純物(酸素、重金属)が含まれるので、高品質の単結晶シリコンを製造するには、石英るつぼの溶解を抑制して不純物を減らした融液にする必要があります。従来の高品質化技術は、石英るつぼ内のシリコン融液が液体金属であることに着目し、石英るつぼの外部から磁場を作用させて対流を抑止する MCZ 方法が最もよく知られています。しかし MCZ 法は超伝導磁石の設備が必要なため、コストダウンを強く求められる太陽電池用には不向きです。

澆液るつぼは、るつぼ内壁の表層(澆液層)に特殊な処理を行って融液をはじく性質を持たせたものです。我々は澆液性の特徴に鑑み、CZ 法で澆液性が最も効果的に発現される結晶製造方法(LCZ 法)を確立、これを用いて実用サイズの直径 200mm の単結晶シリコンを製造することに成功しました。本技術は磁場を用いず、通常の CZ 法でるつぼの溶解を抑止するので、より安価で高品質(後述図 4)の単結晶シリコンを製造できる利点があります。図 2 に、CZ 法で結晶を製造した後になるつぼ断面の観察を行った箇所を青枠で示します。観察位置は、結晶製造直前の融液とるつぼの境界です。また図 3 に、結晶製造終了後の従来の石英るつぼ(1)と澆液るつぼ(2)の断面をそれぞれ示します。従来石英るつぼでは融液との反応で石英が溶解して肉薄になっていますが、澆液るつぼでは、澆液層の厚さが殆んど減少していないことがわかります。

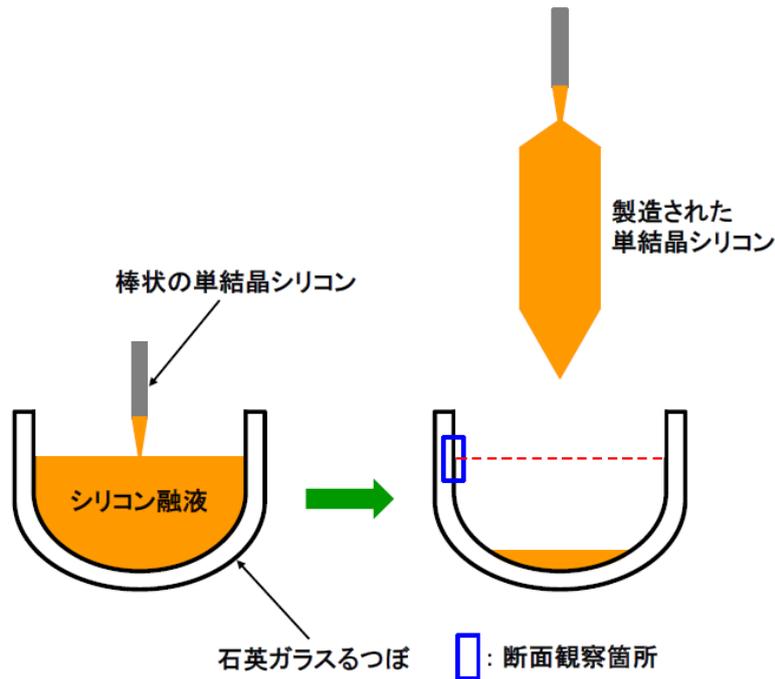


図2 結晶製造後のるつぼ断面の観察箇所(青枠部分).

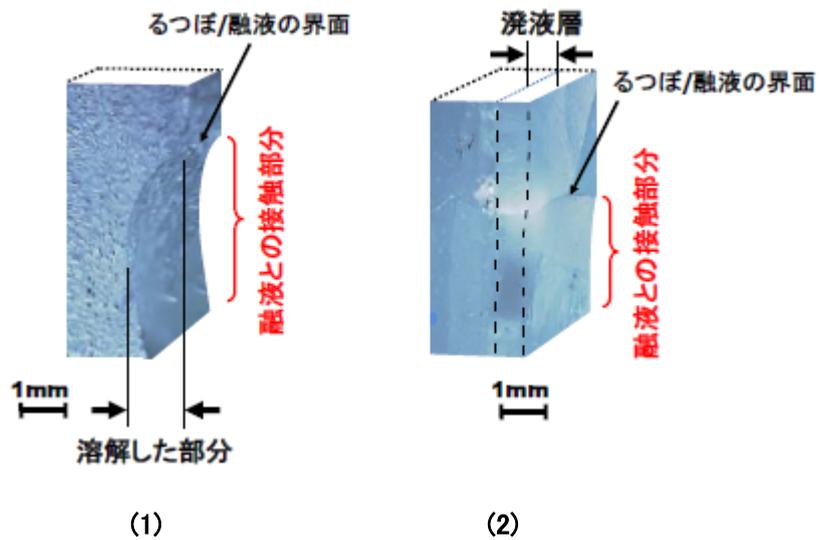


図3 結晶製造終了後の従来の石英るつぼ断面(1)と澆液るつぼ断面(2)の比較.

図4に、LCZ法で製造した単結晶シリコンと市販されている結晶のそれぞれの品質の比較を示しています。図では、市販品としてMCZ、GZ両単結晶シリコンを用いています。結晶の品質は、ライフタイム^{※4}と呼ばれる物理量で定量的に測定することができ、この数値が大きいほど高品質であることを示します。図4より、本技術で製造した単結晶シリコンは、MCZ結晶と同等かこれを凌ぐ品質であることが判かります。

LCZ 法による単結晶シリコンからシリコン基板を作成して標準型太陽電池を試作したところ、従来の結晶シリコンを用いた太陽電池に比べ変換効率が最大 1.03 倍向上しました。このように本技術により製造した高品質シリコン基板は、太陽電池の高効率化に有効であることが明らかとなりました。

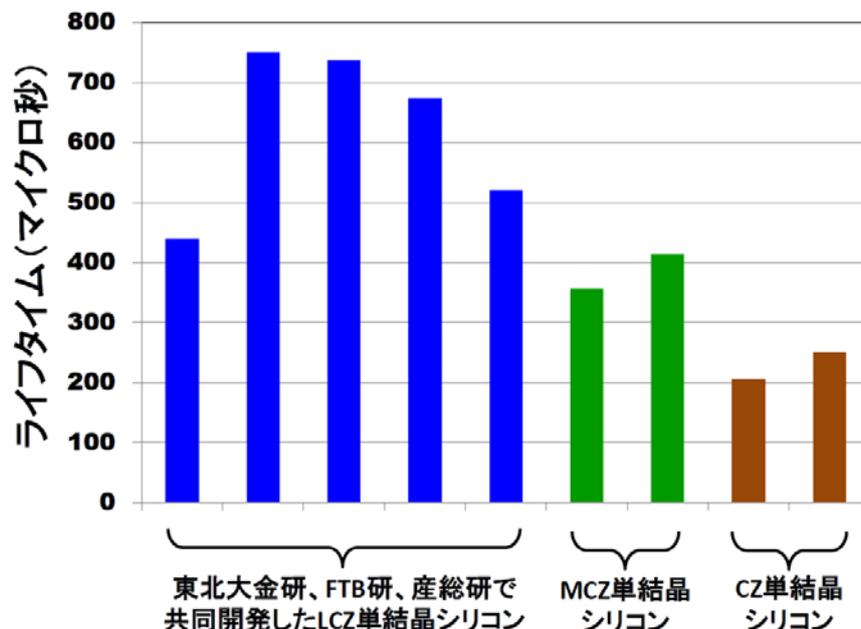


図 4 LCZ 法で製造した単結晶シリコンと市販品の比較

■ 今後の予定 ■

LCZ 法を用いることで、新規の投資をほとんどせずに石英るつぼと結晶成長条件を変更するだけで高品質の単結晶シリコンが得られます。その結果、現在の標準型太陽電池の変換効率が向上するため、太陽電池メーカーにとっては大きな魅力となります。今後は需要に応じて澆液るつぼの製造設備の拡充を行い、るつぼの低コスト化を図る予定です。

同時に金研、FTB 研、産総研は、今後も澆液るつぼや結晶成長技術の改良を行うとともに、より高品質な結晶シリコンの量産化に対応した製造技術の開発に取り組み、2020 年発電コスト目標 14 円/kWh の達成に寄与していきます。

■ 本件問い合わせ先 ■

○研究に関すること

東北大学金属材料研究所 結晶物理学研究部門

教授 藤原 航三

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

Tel: 022-215-2010

E-mail: kozo@imr.tohoku.ac.jp

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所
再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム
招へい研究員 福田 哲生 〒963-0298 福島県郡山市待池台 2-2-9
TEL:029-849-1547 FAX:024-963-0828
E-mail:tetsuo-fukuda@aist.go.jp

再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム
チーム長 高遠 秀尚 〒963-0298 福島県郡山市待池台 2-2-9
TEL:029-862-5493 FAX:024-963-0828
E-mail:h-takato@aist.go.jp

○報道に関すること

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班
横山 美沙 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel:022-215-2144
E-mail:pro-adm@imr.tohoku.ac.jp

【用語の説明】

※1◆発電コスト

発電コスト目標に関しては、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の技術開発指針「太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）」（下記 URL）を参照。

<http://www.nedo.go.jp/content/100573590.pdf>

※2◆結晶シリコン

結晶シリコンは、ケイ素(Si)原子の並び方に一定の規則性のある材料であり、現在商品化されている太陽電池の90%以上が、結晶シリコンを基板として製造されている。結晶シリコン全体のケイ素原子がすべて同じ並び方をしているものを単結晶シリコン、そうではないものを多結晶シリコンと呼ぶ。単結晶シリコンを基板として用いる方が多結晶シリコンより高効率の太陽電池を製造できる。

※3◆石英ガラスるつぼと結晶製造方法

単結晶シリコンを製造するには、まず図 5(1)のように原料シリコンを石英ガラスるつぼに充填し、これを製造炉内に設置する。次にヒーターで加熱してシリコン融液を作り、あらかじめ準備した棒状の単結晶シリコンを融液中央部に浸漬して静かに上方へ引き上げると、図 5(2)のように一定直径で長い単結晶を製造することができる（但し引上げ速度と融液温度を適切に制御する必要がある）。これをチョクラルスキー（Czochralski）法（以下「CZ 法」と呼ぶ）。

現在は、直径 600mm 以上の大型るつぼを比較的安価にかつ比較的高純度で作ることができる。

石英るつぼ中には酸素や重金属が含まれるが、酸素は石英ガラスの構成元素であるので当然大量に含まれる一方、重金属は ppb のオーダーで含まれている。

シリコン融液の温度は約 1400℃であり、るつぼの中で熱対流を起こしるるつぼ壁の溶解を早める。またシリコン融液は液体金属状態であるため、外部から磁場を作用させればその対流を抑制できる。最も代表的な高品質化技術は、超電導磁石を用いて外部から磁場をかけて対流を抑制し、るつぼの溶解を低減させた状態で結晶製造を行う MCZ (Magnetic field -applied CZ) 法である。

今回、磁場を作用させることなく、シリコン融液をはじく特殊な処理を行った石英るつぼ(「撥液るつぼ(“liquinert” quartz crucible) 」)と結晶製造条件の最適化により、高品質な単結晶シリコンの製造方法(“Liquinert” quartz crucible-applied CZ(LCZ)法)の開発に成功した。なお“liquinert”とは“liquid(液体)”と“inert(不活性な)”から作られた造語であり、ユニオンマテリアル(株)の櫻木史郎氏によって 2004 年に初めて提案された。

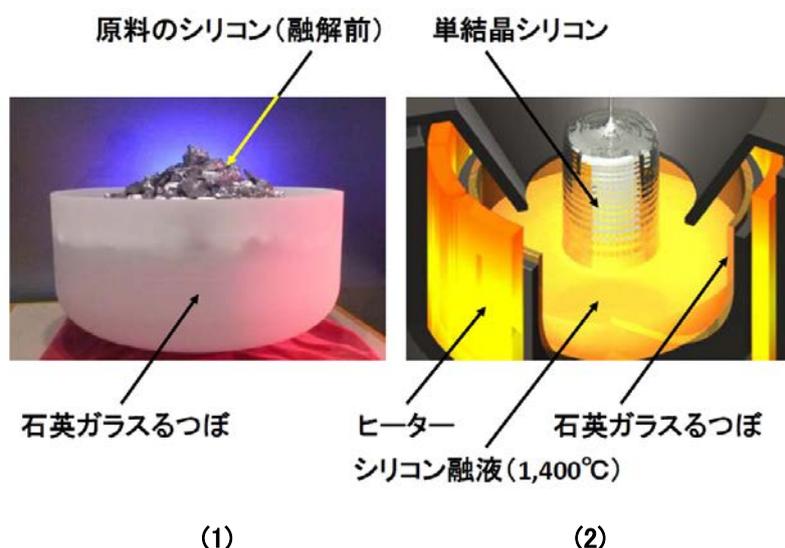


図 5 石英ガラスるつぼに原料のシリコンを充填した状態(1)、結晶製造炉内でシリコン融液から単結晶シリコンが製造される様子(2)。この時のシリコン融液の温度は約 1,400℃である。

※4◆ライフタイム

結晶シリコンに太陽光を照射すると、その内部で等量の正の電荷(正孔)と負の電荷(電子)が過剰に生成される。これらが再結合して消滅するまでの時定数($1/e = 1/2.7$ になる時間)をライフタイムと呼ぶ。結晶シリコン内に酸素や金属などの不純物が多いと再結合が増加するので、ライフタイムの短い結晶となる。一般に単結晶シリコンのほうが多結晶シリコンよりライフタイムが長く、単結晶シリコンの中でも高純度の単結晶はさらにライフタイムが長い。

結晶のライフタイムを比較することにより、結晶品質の評価を行うことが出来る。結晶シリコン太陽電池の高効率化のためには、高品質の(ライフタイムの長い)結晶シリコン基板を用いることが必須となる。単結晶シリコンの場合、ライフタイムは一般に数 100 マイクロ秒(1 マイクロ秒=百万分の1秒)から数ミリ秒(1 ミリ秒=千分の1秒)のオーダーである。