

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561001

研究課題名(和文) 太陽光発電の導入拡大にともなう希少金属の供給リスク評価と経済性分析

研究課題名(英文) Evaluation of Supply Risks for Scarce Metals and Economic Analysis on Expansion of Photovoltaic Installation

研究代表者

安達 毅 (Adachi, Tsuyoshi)

秋田大学・その他部局等・教授

研究者番号：40262050

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光発電は今後も世界で大幅な導入が進むことが予想されるが、太陽電池セルには多くの希少金属が使用されており原材料となる金属の供給が持続的でない可能性がある。本研究では、1) 太陽光発電の導入拡大にともなう銀供給のリスク分析、2) 不確実性を考慮した太陽光発電導入の経済性分析、3) シリコン原材料の未利用資源の活用について検討を行った。

金属供給のリスクを定量的に示す6つの指標を提案し変動を分析したところ、銀の供給リスクが高まっていることが示唆された。またリアルオプション法を用いた導入の経済性分析では、最適な太陽光発電への投資は2011年の2倍程度まで化石燃料価格が上昇したときであることが求められた。

研究成果の概要(英文)：While photovoltaic (PV) power generation will be rapidly installed in the world, metal supply as raw materials of PV may not be sustainable in the future, because lots of scarce metals are used in PV cells. This study aims to evaluate; 1) Risk analysis for Silver supply by expansion of PV installation, 2) Economic analysis of PV installation considering uncertainties, 3) Efficient use of unused resource for silicon raw material.

We suggest six indicators to measure resource supply risk quantitatively, which show silver supply risk become higher for this decades. In PV installation in Japan, we analyze project valuation using real option method. Result of this model suggests that optimal investment timing in PV installation needs two times higher fossil fuel price.

研究分野：資源経済学

キーワード：太陽光発電 供給リスク リスク指標 リアルオプション分析 銀 高純度シリカ

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーのなかでも太陽光発電は加速的に導入が進んできているが、太陽電池セルには多量の希少金属が使用されていることはあまり意識されていない。太陽光発電の導入が広がるについて、希少金属の現在の埋蔵量から考えると今後、太陽光発電等で必要とされる量を十分に供給できない可能性がある。再生可能エネルギーの開発によって電力供給を緩和し、持続可能なエネルギー供給につながる可能性があるが、その太陽光発電パネルに使用されている希少金属は有限であり、持続可能ではない点を考慮しなければならない。エネルギーの供給と金属資源の供給はリンクしている場合があり、一方の持続性が他方の持続性を損ねることも考慮しなければならない問題点を明らかにする。

2. 研究の目的

本研究は、金属資源側の視点からエネルギー問題にアプローチするものであり、今後太陽電池に必要な希少金属の需要量の予測と定量的かつ総合的な供給リスク分析を行うことを目標とする。さらに、エネルギー資源価格等の不確実性を考慮した我が国における太陽光発電導入の経済性評価を行い、資源価格が太陽光発電導入に及ぼす影響と導入政策の評価を行う。さらに、太陽電池セルの主な原材料であるシリコン供給の持続可能性について検討し、新たな原材料としてこれまで未利用であった資源から高純度シリカを回収する方法について検討する。

(1) [太陽光発電の導入拡大にともなう希少金属の供給リスク評価指標の開発]

近年、地球温暖化やエネルギー資源の価格高騰といった世界的問題を背景に、温室効果ガスを排出せずかつ再生可能エネルギーである太陽光発電は急速な発展をみせている。しかしながら太陽電池材料には銀やインジウムといった貴金属やレアメタルが使用されており、今後の太陽電池需要の急増による資源制約から電池原材料の供給不足が生じる可能性も示唆されている。特に資源小国である日本にとって資源確保に潜在するリスク評価は重要課題の一つであるが、これまで金属鉱物資源におけるリスク評価の報告事例は数少なく、定量的なリスク分析が求められる。本研究では、まず太陽光発電の普及にともなう資源制約の可能性を定量的に示す指標の開発を行い、太陽電池材料確保における資源の供給リスクを、定量的かつ系統立てた分析による総合的リスク評価を目指す。特に本研究では将来的に結晶シリコン系太陽電池の電極材料として大幅に需要が伸びると予測される銀の供給リスクに着目した。

(2) [リアルオプション分析を用いた我が国の太陽光発電導入の経済性評価]

太陽光発電はクリーンなエネルギー源とされ、国内での発電が可能ことから自国の資源セキュリティを高める効果も持つ。そのため、化石燃料を使用する火力発電などの重要な代替候補となっており、導入政策や電池性能向上に関する研究が多く行われてきた。日本では現在、NEDO ロードマップに基づく R&D および実用化プロジェクト、国や自治体による補助金制度や余剰電力買取制度など導入政策がいくつも行われている。しかし、政策的な判断であったとしても投資のリスクは大きく、その経済性を把握することは重要である。その際には、エネルギー価格変動や技術開発の進捗など将来の不確実性を考慮した最適な投資判断が必要である。しかし、全パラメータを現時点の予想値で固定して算出する従来の評価法では不確実性を加味できず、この目的を果たすには限界があった。

そこで本研究では、日本における太陽光発電への投資プロジェクトを対象に、将来の不確実性を考慮した投資モデル構築と経済性評価、最適投資基準の算出を行う。リアルオプション分析を使用し、投資による化石燃料発電から太陽光発電への代替価値を定量的に算出する。また、投資モデルの計画目標に関していくつかのシナリオを作成し、それぞれのシナリオについて評価と比較を行うことで、最適投資基準に影響を及ぼす要素について考察する。

(3) [シリコン原材料の未利用資源の活用]

太陽光発電用のデバイスとなる太陽電池のうち、シリコン系が 80%以上を占めているが、この太陽電池に使用されるシリコン純度は 99.99% (4N) 以上が一般的である。しかし、地殻中にシリコンは単体で存在しないため、酸化物である二酸化ケイ素(シリカ)の中でも、比較的高純度な石英・珪石などが出発原料となる。したがって、今後の太陽光発電導入拡大に向け、安定的な高純度シリカ供給体制の確立が不可欠である。そこで、これまでの高純度シリカからの太陽電池用シリコン製造プロセスについて評価を行った。

また、シリコン系太陽電池の供給拡大に向け懸念される問題は、地殻中に存在するシリカに対して、高純度シリカの存在量が非常に少ない点である。地殻中のシリカは様々なタイプに分類できるが、石英・クリストバライトと、生物濃縮による珪藻土のような起源を異にするものや、結晶構造の有無など形態は多岐にわたる。そこで、これまで太陽電池用シリコン原料として対象外であったシリカ資源に関し、高純度シリカ資源としての供給可能性について評価した。なかでも、苛性アルカリに容易に溶解する性質をもつアモルファス(非晶質)シリカに着目し、湿式法による高純度化プロセスについて検討する。

3. 研究の方法

(1) [太陽光発電の導入拡大にともなう希少金属の供給リスク評価手法の開発]

銀の需要予測

将来の太陽光発電の導入に関するロードマップが IEA や NEDO から報告されており、これらのシナリオは将来の導入計画基準に利用されると考えられる。本研究では世界の太陽光発電の需要予測を WBGU と IEA が示すシナリオに基づいて行う。また、日本については、NEDO が出した「PV2030+」に示される国内のみの普及シナリオと海外輸出分生産量を含むシナリオに基づき需要予測を行う。太陽電池の種類別導入の増減要因として製造コストと、面積当たりの最大出力を考える。製造コストに関しては累積生産量が2倍になるとコストが80%になる経験曲線効果を用い、さらに発電効率の上昇によるコスト逓減効果を考える。また、面積当たりの最大出力は発電効率の上昇を考慮したものを考え、種類別に順位付けを行う。順位に従い、シェアを増減するモデルを考え、それによる将来の太陽光発電の普及予測から太陽電池材料として使用される銀の需要予測を行った。

希少金属のリスク評価方法

銀の供給リスク要因を価格ボラティリティ、可採年数、再資源化率、副産物比率、生産国集中度の5つに分類し、要因ごとに時系列での評価を行う。価格ボラティリティは価格変動率の標準偏差を示す指標であり、価格の不安定度を示す指標である。可採年数は推定される埋蔵鉱量を年間生産量で除した指標で、資源ポテンシャルを定量的に示す指標として利用する。再資源化率は鉱山からの生産量とスクラップからの生産量の比を示し、二次供給量のポテンシャルを示す指標である。また、副産物比率は鉱山から産出される年間生産量のうち、他の金属の副産物として生産される量の比率を示す。これは、その金属需要に対する一種の供給の弾力性を示す指標として考えられる。生産国集中度は供給サイドの寡占度を示すため、Herfindahl-Hirschman 指標 (HHI) と呼ばれる市場寡占度を定量化する為の指標を適用する。

また、資源確保に潜在するリスクを考える際には、供給国のカントリーリスクも考慮する必要がある。既存の研究ではカントリーリスクを定量的に評価した例は極めて少なく、本研究では、資源開発に関するストライキや暴動といったイベントをリスクとして捉え、これらのイベントが生じた日数に応じた保険価格を計算することにより、定量的評価を試みた。イベントに関して非負の離散型確率分布(計数確率過程)を考え、価格決定方法として均衡オプション価格決定方法の一つであるエッシャー変換を用いた計算を行った。

(2) [リアルオプション分析を用いた我が国の太陽光発電導入の経済性評価]

リアルオプション分析とは、金融工学のオプション理論を実物資産に応用した分析手法である。オプションとは、将来定められた価格で金融商品を取引する権利を指し、オプションプライシング理論によって価格付け理論が構築されている。権利は必ずしも行使しなくてよい点に特徴がある。本研究の投資モデルは、太陽光発電への投資延期をオプションとして有し、投資判断の柔軟性に価値を認める。投資によって太陽光発電への代替が進むとし、その価値を定量的に算出する。算出したプロジェクト価値と NPV (従来の価値評価法) の値の比較を行う。その際、化石燃料価格 P が不確実性を有しているとし、(1) 式に示す幾何ブラウン運動に従って遷移するとした。

$$dP = \alpha P dt + \sigma P dz \quad (1)$$

(α : ドリフト率、 σ : ボラティリティ)

リアルオプション分析では、作成した投資モデルに沿って価値算出を行う。価値算出には数値計算が適切であり、モンテカルロ法を応用した多段階 SSA 法を使用する。数値計算によって算出された投資プロジェクトの価値は将来の不確実性が加味されており、投資の際の意思決定における有用な判断材料となる。

日本における太陽光発電投資政策の延期オプション評価を行った。投資モデルは NEDO ロードマップや経験曲線効果などをもとに作成し、3段階の計画段階別投資ステージに分ける(図1)。投資ステージが進むほど太陽光発電コストが減少、累積導入容量が増加するとした。各ステージ間の投資はそれぞれ独立だとし、多段階の延期オプションで構成されたモデルとする。太陽光発電普及の価値は、火力発電の代替によるコスト減少および二酸化炭素の排出抑制にあるとして、1期ごとのキャッシュフローを(2)式のように表す。

$$CF = (P + S + P_{CO2} - C) \times Q \quad (2)$$

(P : 化石燃料価格、 S : 火力発電設備関連費

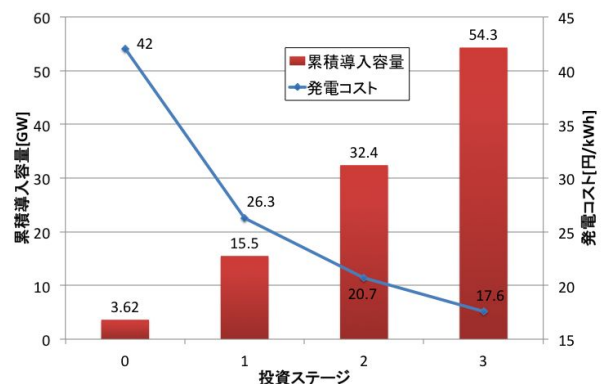


図1 投資における発電コストおよび累積導入容量の推移

用、 P_{CO_2} : CO2 排出削減の価値、 C : 太陽光発電コスト、 Q : 新規導入分の太陽光発電量) オプション価値の計算には多段階 SSA 法を用いた数値計算を行い、投資プロジェクトの価値を算出する。

(3) 【シリコン原材料の未利用資源の活用】

これまでの太陽電池用シリコンの製造プロセスについて文献調査を行い、現状での問題点およびシリコン供給拡大のための対策について検討を行った。

高純度シリカ代替材料として、種々のアモルファスシリカについて調査を行い、苛性アルカリへの溶解、pH 調整による水溶液中からの回収試験などの処理を適宜組み合わせることによる回収プロセスを適用して、高純度シリカ回収プロセスの可能性について評価した。

4. 研究成果

(1) 【太陽光発電の導入拡大にともなう希少金属の供給リスク評価手法の開発】

製造コストと面積当たりの出力の2つの要因を IEA シナリオについて行った結果を図2に示す。2009 年の銀の世界加工需要は 22,072t であり、その内、工業用需要は 10,955t である。将来的にも大きなシェアを占めると予測される結晶シリコン系太陽電池で電極材料として用いられる銀需要は現在およそ 800t 程度であるが、IEA シナリオによると 2050 年には最大 30,780t の需要が見込まれる。需要予測により、将来的に現需要量を超えた太陽電池用としての原材料需要が予測され、供給制約の可能性が示される結果となった。

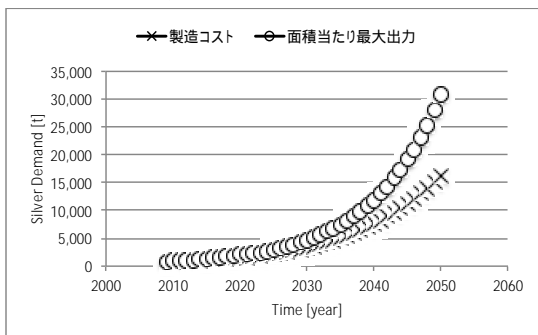


図2 太陽電池用の銀需要予測

次に銀の供給リスク評価を行うため、時系列でのデータを分析した結果、近年、銀価格は上昇トレンドにあり、90年代と比較し4倍近くまで高騰している。これに連動するように価格ボラティリティも上昇トレンドにあり、リスクが高まってきている。将来的に銀価格の高騰が持続することは十分に考えられ、その時に市場は高いボラティリティ、つまりより大きな価格変動を伴うことが予想される。また、資源ポテンシャルは 1997 年に 17 年であった可採年数が 2007 年まで生産

量増加に伴い減少傾向にあり、一時は 13 年にまで減少した。直近では近年の価格高騰による探査の増加などにより、可採埋蔵量が増加し、2009 年には 23 年まで上昇したが、他の金属と比較すると依然として低水準であり、予測される需要拡大を考慮すると、再び減少する可能性が高い。また、再資源化率は近年減少傾向にあり、その要因としてリサイクルプロセスなどによるスクラップ投入が停滞しているにも関わらず、鉱山からの鉱石生産量が一方的に拡大トレンドにあるためである。また、副産物比率は微減トレンドにあるが、依然として約 60% が副産物として生産されている。これは、需要拡大に対して、主産物の生産が伸びる保証はないため、供給側の弾力性が小さいことが示されており、供給制約の一因となる可能性があることを示唆している。一方、銀の資源国の寡占度を示す HHI は 900 ~ 1,000 を推移し、市場評価基準に当てはめると、競争的市場を示す結果となった。つまり銀の生産国集中度は小さく、その点におけるリスクは小さく評価される。

1999 ~ 2008 年におけるイベント件数データより、銀の主要産出国のカントリーリスクを求めた。確率分布をポアソン分布に適用して求めた結果を図3に示す。

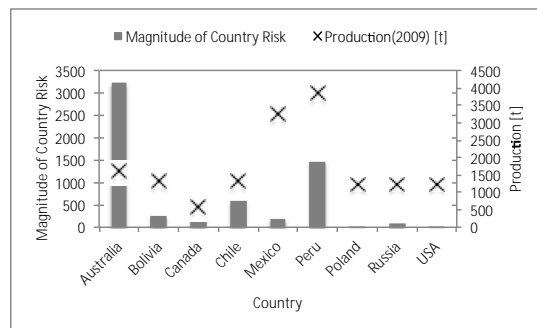


図3 カントリーリスクと生産量の関係

最大の生産国であるペルーはオーストラリアに次いで高いリスクを示す結果となり、供給リスクを考える上で生産国固有のリスクを無視できない結果となった。また、産出量世界3位の中国に関してはデータの利用制限により算出することができなかったが、潜在的风险は高いことが予想される。また、全体として年々カントリーリスクは減少しているが、比較的産出量の多い、ボリビアやロシアでは、イベントデータが欠如しているため、低めのリスクが算出されている点に注意が必要である。

太陽光発電の将来普及に伴う需要予測により、将来的にどの程度、銀の需要が拡大するかが明らかになり、銀の供給制約によって太陽光発電の普及にブレーキをかける可能性が示される結果となった。また、銀の供給リスクの時系列評価を行ったところ、4つのファクターでリスクが大幅に増加していることが明らかになった。さらに、主要算出国のカントリーリスクをイベント発生保証の

保険金額として評価する手法を提案し、その結果、銀の主要産出国のリスクは高く評価され、供給国は多様化しているものの供給リスクは高い状態にあるとの結論が得られた。

(2) 【リアルオプション分析を用いた我が国の太陽光発電導入の経済性評価】

延期オプションを考慮した太陽光発電投資プロジェクトの価値および NPV の値を表 1 に示す。このとき、化石燃料の初期価格は現在の水準にあるとする。従来の評価指標である NPV は大きく負の値となり、投資の中止を示唆する結果となる。しかし、延期オプションを考慮することでプロジェクトの価値は正の値となり、延期オプション価値が非常に大きいと分かる。つまり、投資を延期して将来の投資実行の可能性を残しておくことが望ましいとの結果が得られた。化石燃料価格が現在の水準では投資を実行することは難しいが、すぐには中止せず、投資を延期することの価値は非常に大きいということが分かる。

表 1 ベースケースの計算結果

投資プロジェクトの価値 [億円]	4,812
NPV	-17,523
延期オプションの価値	4,812

次に、各種条件のうち化石燃料価格の初期値のみを変動させ、感度分析によって最適投資基準の算出を行ったところ、図 4 の結果が得られた。現在の価格が 2 倍程度まで上昇すると、NPV に対する延期オプションの割合は小さくなり、オプション価値はほぼ無くなる。すなわち、最適投資基準（投資を実行する上で最適な価格水準）だといえる。この水準まで化石燃料価格が高騰すれば、本モデルではすぐさま投資を実行すべきであるとの判断基準を提示している。その際、太陽光発電導入に関する便益は 5 兆円を越す。

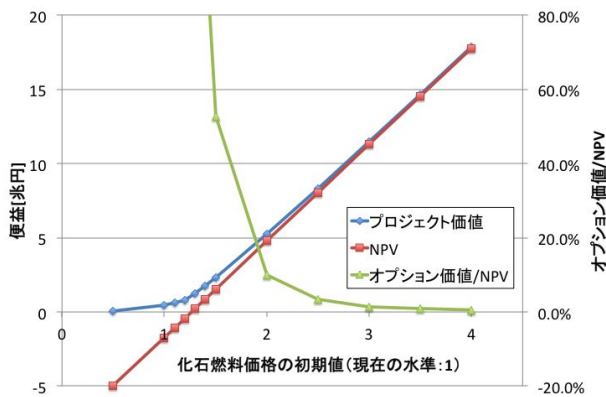


図 4 化石燃料価格に対する感度分析

さらに、ベースシナリオを変化させ、同様の分析を行った。発電コスト削減のみがベースシナリオより早く進む（シナリオ 1）と仮定すると、最適投資基準の初期価格はほぼ現

在の水準に等しく、すぐに投資することが最も経済性を高くすると結果が得られた。一方、導入容量増加のみが早く進む（シナリオ 2）と仮定したとき、ベースシナリオと比較して最適投資基準はほとんど変化せず、NPV に関してはよりマイナスとなった。延期オプションの値は大きくなったものの、導入ペースの上昇によるプラスの効果はほとんど無いといえる。以上の結果から、最適投資基準に影響を及ぼす要素は、導入容量増加よりも発電コスト削減であり、研究開発により優先的に発電コストを削減することが、太陽光発電への投資と普及における最重要課題であることが示唆された。

本研究では太陽光発電への投資プロジェクトを対象に、化石燃料価格に不確実性をおいたモデルを構築し、リアルオプション分析を行った。現在の化石燃料価格水準では、投資を実行するよりも延期することに大きな価値が存在することを指摘するなど、従来の評価手法では分からなかったいくつかの結果を得られた。また、太陽光発電の導入を進めていく上で重要となるのは発電コスト削減といった示唆も得られた。

(3) 【シリコン原材料の未利用資源の活用】

これまでの太陽電池用シリコンは、より純度の高い半導体用シリコンの生産に依存する傾向にあり、製造工程で生じる半導体用に適合しない規格外のスクラップシリコンが原料として用いられてきた。しかし、リサイクル技術の進歩により、スクラップシリコンの産出量は減少傾向にあり、以前の製造工程による太陽電池用シリコン生産量の増加は望めない状況にある。また、半導体産業でのシリコン需要が非常に不安定な状況であることから、今後は、これまでとは異なる原料を用いて、直接太陽電池用シリコンを製造する方法を採用する事が予測される。この工程では、中間精製物である比較的純度の低い金属シリコンへの高純度化プロセスの適用が、全てのシリコン材料の起点となる高純度シリカを原料とした還元・溶融プロセスを経た高純度シリコン化のいずれかが考えられる。さらに、シリコン系太陽電池は、単結晶・多結晶・アモルファス系の順に研究開発されてきたが、変換効率とコストの面を総合的に評価すると、多結晶シリコンを主流として開発されると予想される。

2012 年のシリコン生産量は全体で約 1000 万トンと推計されるが、原料として適合すると考えられる金属シリコンに限定すると約 230 万トンに留まる。また、高純度シリカについて詳細は不明であるが、これまでの供給地であったインド・ブラジルなどにおいては、近年の資源政策により輸出が停滞している。現在、高純度シリカは、おもにアメリカで産出されており、また、ロシアのウラル山脈沿いに有望な鉱床が存在するが、供給の脆弱性は否定できない。

高純度シリカ代替用として、既存の原料と同じ結晶質であるが低品位の石英などを対象とした場合、破碎・粉碎に投入されるエネルギー量や溶融の必要性が生じた場合を考慮すると、コスト面から高純度化プロセスの適用は非常に不利であると考えられる。したがって、結晶質シリカに比べて比較的低温での処理が可能であるアモルファスシリカは、高純度化原料として妥当であると考えられる。これまでの研究において、生物起源珪藻土を用いた高純度化プロセスが考えられた。珪藻土は、大量の珪藻の死骸が堆積したものであり、埋蔵量は8億トンほどと推定され、わが国にも賦存している。この珪藻土に対してアルカリ溶解、pH調整、酸リーチングの工程を実施することで、99.999%の高純度シリカが生成される事が確認されている。

他のアモルファスシリカ資源として、地熱発電所から産出する溶存シリカを含む地熱水を対象に、凝集剤を用いた溶存シリカ回収試験を行った。その結果、ゼラチンを凝集剤として用いると溶存シリカの凝集沈殿効果が確認され、室温条件下では、酸性～中性付近のpH領域において地熱水から約80%の溶存シリカを加圧濾過により容易に固液分離できる事を確認した。また、回収されたシリカは600℃での焼成処理により、含まれているゼラチンを分解除去する事ができ、より純度の高いシリカが得られる可能性が示唆された。

また、高純度化プロセスにおける原料のシリカ品位の影響を考慮して、オパール(蛋白石)シリカを含む試料を対象として、アルカリ溶解・pH調整を軸とするシリカ回収試験を行った。本試料の化学組成および構造分析では、カルサイトなどの鉱物が多数同定され、シリカ品位は50%以下と比較的低い事が伺えたが、アモルファスシリカとの分離性は高いと考えられた。アルカリ溶解では、反応温度やアルカリ溶液との固液比をパラメータとして試験を行ったところ、シリカ溶解に対して他の不純物元素の溶解を制御できた。つぎに、アルカリ溶解により調製された高濃度シリカ溶液に対してpH調整を行った結果、pHを中性付近で適宜調整することにより、不純物の少ないシリカが回収可能であることを確認した。以上の結果から、今回提案されているアルカリ溶解およびpH調整を含む精製プロセスにより比較的低位のアモルファスシリカを原料としても、高純度シリカ資源が確保できる可能性を得た。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計9件)

安達 毅: 太陽光発電への投資と企業のスイッチングオプションの価値評価, 平成24年度資源・素材学会秋季大会, 2012, pp.501-502

別所昌彦, 柴山敦: 地熱水に含まれる過飽和シリカの回収について, 資源・素材

学会秋季大会, 2012, 秋田

Tsuyoshi Adachi and Kazuya Uzuwa: Risk indicators of materials supply for future photovoltaic expansion – the case of silver -, World Mining Congress(WMC2013), Montreal, Canada, 2013, CD-ROM

Tsuyoshi Adachi and Yusuke Aono: Economic comparisons between Photovoltaic and fossil fuels power generations in Japan under uncertainty, The Seven International Conference on Materials Engineering for Resources (ICMR2013), Akita, Japan, AP-23, 2013, CD-ROM

吉岡恭佑, 柴山敦, 別所昌彦: 水溶性タンパク質を用いた地熱水からのシリカ沈殿, 資源・素材学会春季大会, 2013, 千葉
Li Wenhua and Tsuyoshi Adachi: Silver Supply Risk Analysis for Photovoltaic Industry, 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, (Oludeniz, Turkey), Oct 16-19, 2014, Web-site

Wenhua Li and Tsuyoshi Adachi: Long-term Silver Supply and Demand Forecast for Photovoltaic (PV) Installation, 2015 MMIJ Conference Spring, Chiba, 2015, Web-site

Wenhua Li and Tsuyoshi Adachi: Silver Supply Risk Assessment for Sustainable Photovoltaic Installation, International Conference on Risk Analysis (ICRA 6), Barcelona, Spain, 26-29 May, 2015

Masahiko Bessho, T. Ogata, O. Gavrilenko, N. Kulenova, Z. Akhmetvaliyeva; A Novel Approach for Refinement of High-Quality Silica from Amorphous Opal Samples in East Kazakhstan, IX International conference "Efficient use of resources and environmental protection, Kazakhstan, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安達 毅 (ADACHI, Tsuyoshi)

秋田大学・国際資源学部・教授

研究者番号: 40262050

(2) 研究分担者

別所 昌彦 (BESSHO, Masahiko)

秋田大学・国際資源学部・准教授

研究者番号: 40398425