

科学(環境)技術は、本当に環境に優しいか

～ 南アフリカ共和国の現状から ～

真野 昌平

上智大学大学院 理工学研究科 理工学専攻 物理学領域 修士課程 2年

要約

今日の環境技術といえば、太陽光発電・風力発電が真っ先に思いつく技術であろう。これらの技術において、ほとんどの人が太陽の光、または風の力だけで発電されると思いついてしまっていることだろう。しかし、それは大きな間違いであり、残念ながら完成するまでに環境にかかる負担は僅かなではないのが現状である。

私は、光触媒（太陽光が当たるだけで、人手なしに家の壁面などをきれいにしてくれる技術）という材料の研究に携わっている。以前は、レアアースを大量に使った SRD（宇宙惑星探査機に搭載している、電力なしに自動で温度調整をする技術）という材料研究をしていた。光触媒・SRD に共通しているのは、電力を必要としない、言わば環境に優しい材料技術である点にある。

しかし、それは本当だろうか。

どの環境技術に携わっている研究者も以下の4点を無視して、研究目的に環境に優しいと唱っているのではないか。

- . 環境技術における原料の調達地で起こっている環境問題
- . 原料を調達・輸送する際の消費エネルギー
- . 実験室レベルにおける材料開発の消費エネルギー
- . 材料の脆さ・非永続性

これらの問題点を検証せずに、本当にクリーンな技術と言えるだろうか。

自らの研究には不利なことは書かないというのが、今日の潮流であるからこそ、何も後ろ盾のない学生である私が検証すべきであると強く確信している。

従来、検証されてこなかったこれらの問題点を、自らが研究する光触媒を舞台に検証してみた。

□. 環境技術における原料の調達地で起こっている環境問題

[実際に使用される原料]

私の研究対象である光触媒であれば、原料はレアメタルである Ti (チタン)。

そこで、原料における考察では一つの国に注目して検証を試みる。

その国とは、BRICs の一角である南アフリカ共和国。理由は3点ある。

- 研究対象である Ti の産出量が世界一位であること。⁽¹⁾

- 様々な原料において世界で主要な産出国である点。例えば、排ガスをクリーン化させる触媒に用いられる Pt (プラチナ)においても南アフリカ共和国は産出量世界一位。
- 今後続々と資源大国となるであろうアフリカ各国の経済リーダーであり、この国を見ることでアフリカの未来が見えてくる点も重要な理由である。

[南アフリカ共和国における現状]

南アフリカ共和国において、Ti や Pt の採取権を持っているのは、南アフリカ共和国生まれの富裕層である。現在、南アフリカ共和国における富裕層を占めているのはアパルトヘイトという身分制度を廃止させるに至った活動でリーダーを務めていた人たちである。1994 年のアパルトヘイト廃止後は、白人に代わり彼らが富裕層になった。しかし、採取権を保有していると言っても、土地を持っている訳ではない。採取しようと思ったところにはもちろん土着民族が住んでいる。彼ら土着民族と交渉するのは、鉱物資源の欲しい外国企業ではない。なぜなら、外国人では話すら聞いてもらえないからだ。そこで、外国企業に代わり交渉するのが、南アフリカ共和国の富裕層である。しかし、土着民族が富裕層に対して好意的に思っているわけではない。むしろ、新アパルトヘイトでも言うべきか、アパルトヘイト廃止後の台頭した彼ら富裕層は、白人に代わり、南アフリカ共和国の国民に不信感を抱かれている。理由は簡単。アパルトヘイト廃止によって、得られた恩恵を彼ら新リーダーたちは独占しているためだ。

[劣悪な労働環境]

鉱物を採取するために必要なものは何か？
ずばり、人と食糧と電力である。この中で、人の獲得に関しては、南アフリカ共和国の現状で説明した通り、土着民族との折衝で決定される。食糧に関する問題は現地の取材に頼るしかないが、懸賞論文という名目上、先に旅費が出ないので直接行くことができない。そのため、ここでは労働力の獲得から見た食糧問題に軽く触れておく。
土着民族との折衝の中で一番の議論すべきは賃金である。その賃金の折衝で折り合いが合うというのは、つまり食糧の問題にも折り合いが着いたものと判断できるので、ここでは食糧問題は無視することにしたいが、問題があまりにも起きているので事実だけを記しておく。

今日、南アフリカでは鉱山開発に関して、限界がきている。
大規模なストライキを土着民族が行っているのだ。一方、開発している企業は強気に出ており、何万人規模という解雇すら決めた企業も存在している。この背景にあるのは、一度弱気になると他の鉱山開発でも人件費が高騰してしまうためだ。この問題の重大さは、解雇を決めた企業単独の判断ではない可能性が高い点にある。中国での賃金上昇にもあるように一部の企業で賃金が上がり始めると、他企業も賃金上昇という大きな潮流に呑み込まれてしまったという過去がある。この苦い過去こそ、いくつかの地域で起きている大量解雇に繋がっているのではないか。そして、様々な地域で解雇された例が起これば、生活に苦しむ人々は劣悪な労働環境に対して行動を起しにくくなる。注意していきたいのは報道されるのは氷山の一角であり、環境技術の根底には人間味が全く感じられない現象が次々と起こり始めていることを認識しなくてははいけない。

次に、鉱山への電力供給における問題を考えてみる。インパラ鉱山（ルステンブルグ近郊）に注目してみる。インパラ鉱山は南アフリカでも Pt の産出量が最も多い。鉱山開発

に電力を供給するため、鉱山の近くには大規模な火力発電所が建設されている。その発電量は 360 万 kW にも相当するが、それらの電力の供給先は、工作機械を動かしたりするためのエネルギーである。つまり、環境浄化の装置やエアコン類を作動させるための電力ではない。したがって、鉱物を実際に採取する現場は、湿度も高く、気温も非常に高い劣悪な環境である。

Ti や Pt を入手するために、自然を破壊し (Pt 採取のため、現在は地中 600m 程掘るのが潮流)、最新の火力発電でもないエネルギー源を用いて、採取のための電力を確保する。環境技術が使用されるのは結局のところ、南アフリカ共和国ではない。先進国である日本や欧米の国々なのだ。先進国は原料調達の際における南アフリカ共和国の環境負荷は無視している。そして、南アフリカ共和国の環境を壊した上で採取した環境技術をクリーンで地球に優しい技術であるかのように唱う、悲しいことにこれが現状である。

$$EPR = \text{回収エネルギー} / \text{投入エネルギー}^{(2)}$$

□. 原料を調達・輸送する際の消費エネルギー

[調達における消費エネルギー]

現在、注目されているシェールガス。古くから原料とされている石油。どちらが環境に良いか。これは、マスコミの影響かもしれないが、ほとんどの人がシェールガスとするのではないか。シェールガスは、天然ガスと同様に燃やす際に石油ほど環境に悪影響のある物質を放出しないためだ。しかし、採掘する際の消費エネルギーや環境への影響を本当の意味で考慮してみると一概に石油が悪いとも言えなくなる。ここで、以下の数式を示そう。

この EPR 値が高ければ高い程、良いエネルギー効率と見なせる一つの指標である。シェールガスは投入エネルギーが大きい割に得られる回収エネルギーが低いのが実際だ。それに加え、石油と天然ガスではエネルギー密度が異なるので、それを考慮しても天然ガスは石油に劣る。

ここで、各種原料のエネルギー密度を以下に示しておこう。エネルギー密度とは、例えば、石油 1kg があれば、 42×10^6 J のエネルギーを有していることを意味する。(M = メガ = 10^6)

石油 : 42 MJ/kg
ウラン : 6.6×10^7 MJ/kg

水素 : 114 MJ/kg
天然ガス : 33 MJ/kg

ここから、本題の調達における消費エネルギーを考察していく。

南アフリカにおける Pt (プラチナ)生産量 180 トン/年
Pt(プラチナ)が鉱石内に存在する重さ 3g/1 トン

この値から、Pt (プラチナ)採掘に必要なエネルギーを求めることができる。

180 トンの Pt (プラチナ)を得るために、1 年間に 6,000 万トンもの粗鉱石を掘り出さなければならない。粗鉱量 50 万トン/年 規模の鉱山における年間エネルギー消費量は、平均で石油 10,677 キロリットルとなっている。⁽³⁾

つまり、粗鉱量 6000 万トンの鉱石を採掘するのに必要なエネルギーは 1 年間に石油約 100 万キロリットルという計算になる。実際には鉱山を掘るために必要な工作機械ですら、作製するまでには大量のエネルギーを必要とすることを忘れてはいけない。

[海運における輸送の消費エネルギー]

輸送エネルギーの議論では、ある程度仮定を入れながら考察する。

南アフリカ国内の運送距離はルステンブルグ ~ 港町ダーバンとする。
ルステンブルグを選出したのはルステンブルグ周辺に大規模鉱山があるためだ。
ダーバンは南アフリカでは、距離的な問題からアジアと取引しやすい港である。
日本造船工業会のデータ⁽⁴⁾ から、以下の消費エネルギーが発生すると仮定。
1t の貨物を 1km 輸送するのに必要なエネルギーは、
トラック : 約 2 MJ/t
海運輸送 : 約 0.54 MJ/t

海運輸送に関して、Ti や Pt などの鉱物を輸送するための船をばら積み貨物船と呼ぶ。
ばら積み貨物船には、様々なサイズがある。

10,000t~35,000t の積載船の数は 34%
35,000t~55,000t の積載船の数は 37%
これ以上大きい船は、少数派であるため、ここでは最も船数の多い 35,000t ~ 55,000t の積載重量を考察してみる。
まずは、南アフリカから日本への輸送量は平均的な重さを取るために、45,000t とする。

ルステンブルグ~ダーバンの距離を約 500km とする。
トラックが 45,000t の荷物を 500km 輸送するには以下のように計算できる。
 $2\text{MJ/t} \times 500(\text{km}) \times 45,000(\text{t}) = 45,000,000\text{MJ}$

ダーバン~博多港の距離を約 20,000km とすると、
貨物船が 45,000(t)の荷物を 20,000km 輸送するには以下のように計算できる。
 $0.54\text{MJ/t} \times 45,000(\text{t}) \times 20,000(\text{km}) = 486,000,000\text{MJ}$

つまり、全輸送にかかるエネルギーは
 $45,000,000 \text{ MJ} + 486,000,000 \text{ MJ} = 531,000,000 \text{ MJ}$

これを石油換算すると $1.26 \times 10^7 \text{ kg}$ に相当する。この数字を見ると分かるが、莫大なエネルギーを使ってわざわざ日本に鉱物を輸送しているのが分かる。これは鉱物だけではなく、あらゆる商品における物流の問題点でもある。

結局のところ、これほど莫大な投入エネルギーに対して、どれ程の環境技術が EPR を 1 以上の値にできるのか。今後、EPR を技術別・製品別に示された研究報告を期待したい。

□. 実験室レベルにおける材料開発の消費エネルギー

これまでの考察で、いかに実験で使用している原料が手元に届くまで環境に負荷をかけているかが分かってきた。

そこで、私は実験するにあたってなるべく環境負荷の少ない方法を見いだそうと試行錯誤してきた。しかし、環境負荷が小さくても性能の低いものしか作製できないのであれば意味がない。そこで、性能も考慮された上で現在応用化に最も有効で環境負荷が少ない光触媒作製を以下に示す。

solgel 法：リーズナブル、かつ低消費エネルギーな薄膜作製法

原料： $\text{Ti}(\text{OR})_4$ (チタニウムテトラ-n-ブトキシドモノマー) [$\text{R} = \text{n-C}_4\text{H}_9$],
2-メトキシエタノール

装置：スピコーター、ホットプレート

ここでは、実験におけるエネルギー消費と直接材料の最適化を考察する。

したがって、間接材料である、2-メトキシエタノール、スピコーター、ホットプレートの作製工程におけるエネルギー消費は無視することにする。

10mm 角サイズの光触媒を作製するのに、

スピコーター： $700 [\text{W}] \times 55 [\text{t}] \times 7 \text{ times} = 269,500 [\text{Wt}] = 0.2695 [\text{MJ}]$

ホットプレート： $950 [\text{W}] \times (60 [\text{s}] \times 7 \text{ 回} + 60 [\text{s}] \times 60 [\text{s}] \times 1 \text{ 回}) = 3,819,000 [\text{Wt}] = 3.82 [\text{MJ}]$

したがって、solgel 法を使用することで、10mm 角の光触媒を作製するのに 4.0895 [MJ] のエネルギー消費、つまり石油 100g 相当のエネルギー消費。

実験には、試行錯誤が毎日行われる。つまり、1 サンプル当りは石油 100g でも、10 サンプルになれば石油 1kg に達する。

商業化に際してだけでなく、実験においても低消費エネルギーでのサンプル作製は非常に重要になってくる。

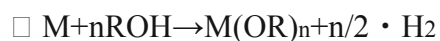
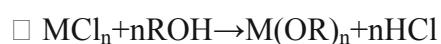
他には高周波マグネトロンスパッタリングやレーザーアブレーションといった電力消費の激しい光触媒作製法がある。これらは、電気消費量だけでなく、様々なガスを用いるため、環境負荷は sol-gel 法以上である。それらに比べて、sol-gel 法で作製することはコストだけでなく、環境の面からも重要な意味を持つ。

ここで、大都市東京における電力消費量で突出している施設を紹介しよう。

それは、東京大学である。東京大学は、確かに日本における重要な研究拠点かもしれない。しかし、同時に日本で最も環境負荷をかけている拠点の一つである。学問的重要度の高い研究のために、どこまでも環境を破壊していい訳ではないのだ。

次に、環境負荷の低い sol-gel 法光触媒の原料について検討していく。そこで、光触媒の直接材料にあたる $Ti(OR)_4$ の製法を示していく。

まず、 $Ti(OR)_4$ の原料においてはルチル鉱石というチタン鉱石を採用する。理由は、最も産出量の多いチタン鉱石はチタン鉄鉱であるが、チタン鉄鉱を採用してしまうと、sol-gel 法ではなく、電力消費の多い薄膜作製法を選択せざるを得なくなる。無理に sol-gel 法で作製するためにチタン鉄鉱から、 $Ti(OR)_4$ を精製しようとするとうまくないエネルギー消費が増えてしまい、環境負荷が増してしまう。



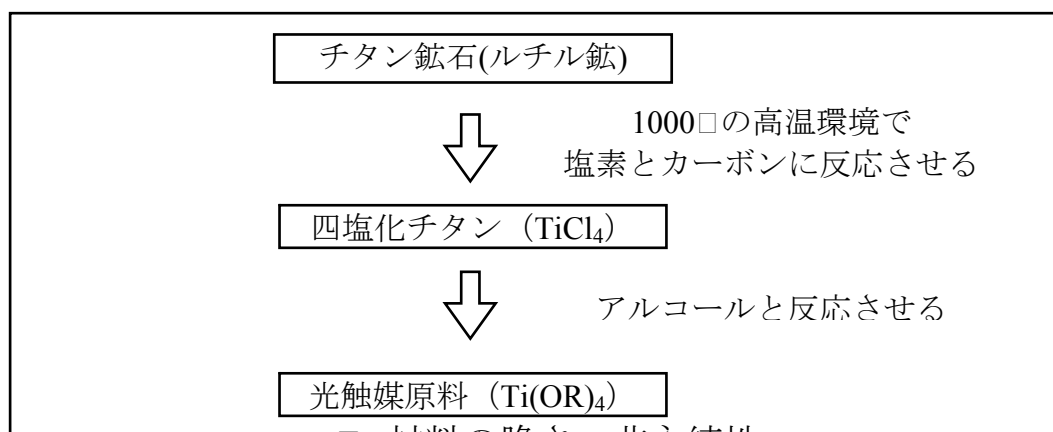
上記のように2通りの $Ti(OR)_4$ 精製法があるが、以下の理由から□が最も効率の良い作製法である。

□における精製法では、塩化チタンを使用する。一方、□における精製法では、純チタンを使用する。純チタンを得るには、塩化チタンをさらに精製する必要がある。まず、塩化チタンをマグネシウムで還元・真空分離することでスポンジチタンを得る。得られたスポンジチタンを熔融することでチタンインゴットとなり、純チタンが得られる。

したがって、純チタンを得るには塩化チタンから高温処理・真空蒸留・ビームによる溶解処理など、かなりの環境負荷がプラスされる。つまり、 $Ti(OR)_4$ を作製するのに必要な原料四塩化チタン・純チタンのうち、より環境負荷の少ない原料は四塩化チタンだということが分かる。

□,□に関しては、純 Ti や $TiCl_n$ から作製するため、チタン鉱石を使用するしかない。

$Ti(OR)_4$ 精製の概要



□. 材料の脆さ・非永続性

ここまでの内容では、いかに見えない部分での環境負荷が高いかを議論してきた。ここからは、高環境負荷で作製された技術がどれ程永続するのかを考えていきたい。

自動車から出る排ガスをクリーン化するための触媒がある。主な原料は冒頭でも紹介した Pt (プラチナ) である。新車の時点では、国が指定する排ガス基準を下回る。しかし、数年後には排ガス基準を上回ってしまうことが問題視され、規制の見直しが検討されている。⁽⁵⁾

これが意味することは重大である。

同じ環境技術でも太陽光発電などは永続性が全くないのは理解できる。原理が違うからである。つまり、太陽光発電の材料は明らかな高環境負荷で作製される。しかし、そのほとんどは月日と共に劣化していく。つまり導入初年度と数年後とでは、性能に大きな開きがある。これは原理からも明らかなこと。

それに対して、触媒と名の付く技術は、自らの材料は変化しないことを意味する。つまり、光触媒や車に搭載する触媒自身は何にも変化しない、つまり劣化しない。その上で、触媒に触れた分子などを分解して半永続的にクリーン化させる。実際に、ほとんどの商品化されている光触媒技術は半永続的であると唱っている。

特に懸念されるのは、電力を生み出す環境技術。脱原発という潮流の中で、重要視されている分野である。しかし、風力や太陽光は完璧な技術ではない。発電原理や維持管理からも、持続可能性は非常に低い。これを、脱原発という大義名分の元にいたずらに研究開発費のばらまきや実用化するのはナンセンスである。大変な労働環境の中、やっと採取できた原料を莫大なエネルギーを用いて、日本まで輸送する。それをまたエネルギーを大量に使い、環境技術が作製される。作製された環境技術は数年後には性能が劣化してしまう。これでは、研究開発費を獲得した研究者以外誰も報われない。

そこで、自信を持って私が提言する技術がある。それは生物に生み出してもらった藻類バイオマスエネルギーである。効率も良いし、生物を育てるだけで、材料や原料もいらない。原発のように危険な物質も生み出さないし、使用しない。必要なのは、温暖な環境・有機物。ゴミ処理場でこの2つは簡単に手に入る。⁽⁶⁾

最後に

- 環境技術における原料の調達地で起こっている環境問題
 - 原料を調達・輸送する際の消費エネルギー
 - 実験室レベルにおける材料開発の消費エネルギー
 - 材料の脆さ・非永続性
- 、以外の項目は環境技術研究者は深く考えてこなかった項目であろう。

そしてI、□は経済学や地学の専門家は個別には研究されてきた問題かもしれない。しかし、環境技術を実際に関係する人たちがこれらの問題点を意識しない限りは何も変わらない。もしも、意識すればこの材料はコストが高いから研究対象から外そうという単純な理由ではなくなるだろう。もっと人間味の溢れる考え方に変わる。材料コストが高いというのは、労働環境が非常に悪い鉱山であったり、輸送コストが高い（環境負荷が大きい）という理由だと瞬時にして置き換えるような科学者が増えるかもしれない。それによって、本当の意味で、環境に優しい環境技術を開発することができるようになるのではないか。

ここで、許されがたい問題点にもう一度だけ触れておく。

日本や欧州では南アフリカから採取した原料で環境に優しい技術を使用している。一方、南アフリカでは環境技術に必要な原料を採取するために環境破壊だけでなく、人も犠牲になっている。これは、他のアフリカ諸国でも南アフリカの後を追うように同様の問題が起こるであろう。

経済面やコストだけを意識する無機質な時代から、環境や人の労働環境を重視した持続可能な社会に向かっていくべきである。

本論文により、環境技術のありきたりな議論ではなく、別の視点で捉えると環境破壊をしている可能性があること、それらの議論を促進させる一助となれば幸いである。

[参考文献]

- (1) 公益財団法人 矢野恒太記念会 (2011) 『世界国勢図会 2011』 矢野恒太記念会出版
- (2) 後藤 敏晴、天野 治、岡島 いづみ、佐古 猛 (2009) 『エネルギー収支比の概念を用いた製造技術の評価方法』 もったいない学会 WEB 学会誌 3, 1
- (3) 松島 潤 (2010) 『エネルギー収支比的視点がなぜ重要なのか -EPR の定義と意義の再検討-』 もったいない学会 WEB 学会誌 3, 42
- (4) 日本造船工業会 (2012) 『造船関係資料 2012』
- (5) 神田朋美、工藤隆治 「排ガス装置 数年で劣化 大型車6万台、基準超えも」 『朝日新聞』 2012年11月29日朝刊
- (6) 真野昌平 『大震災後の地球・いのち・エネルギー』 上智大学 2011年度テイヤールドシャルダン奨学金懸賞論文 (銀賞) <<http://www.st.sophia.ac.jp/chardin/>>