

厨川道雄（（独）産業技術総合研究所長）

「資源枯渇・地球温暖化対策技術と LCA」

（講演内容）

物質の循環

これは炭酸ガスの循環の絵で、「ネイチャー」の 1993 年からとってきたものです。産業革命以前それから産業革命後の状況を示している。化石燃料が発生する炭酸ガスが年々増えていく。こうすることで地球温暖化問題というのが起こっていく。窒素も同じようなことが言える。大気、土壌、植物それから動物と、自然では非常にうまく回っていたのが、し尿とか、産業排水とか、生活排水が入ってくるともう処理仕切れなくなって、例えば地下水の汚染ですとか、富栄養化とか、酸性雨、温暖化それから大気汚染、こういうものを起こしている。自然の循環に対して負荷をかけたのだから、そこを何とかしなければいけない。

資源問題

一つの産業あるいは製品を考えてみても、鉄ですとかそういうものを取ってきて、ものを造って、使って、それから処理して捨てると。結局はこういう流れになる。こういう原料を外からとってくる、地球からとってくるというところを減らさないと、いわゆる枯渇性の問題とか、いろいろな問題が起こってくる。

製品を減らす Reduce は第 1 優先。それから Re-use が第 2 優先、それでそのまま使えないものは、今度は形をかえた形で Recycle する。

リサイクルにおきまして質の低下と言いますか、質の変化と言いますか、そういうところが非常に問題になる。例えば、プラスチックですと、これを燃やして燃料としてエネルギーの一部に使うというこういう使い方もある。最終的にはここから出てきたものが地球に負荷を与える。ほかのシステムでいっても、最終的には負荷を与えるというようなことになる。一つここで問題なのは、例えば、資源をとってくる時に地球の中からとってくるわけですが、例えば、5%の銅を採掘すると 95%は捨てられる。そうすると 20 倍も土砂が出てくる。5%をとるために 95%のむだなものを採掘してどこかに捨てる、そういう問題がある。

化石燃料は当然枯渇の問題がある。

もう一つ、物質の流れだけではなくて、その使用するエネルギーも十分考えてやらなければいけない。先ほどの材料の分離というのは、原理的には可能ですけれども、ものすごいエネルギーを使ってやっつけては何のために分離するかわからない。どうしても頭の中にはものの循環しかありませんが、エネルギーを大量に消費するということは、まず枯渇の問題があるし、そのエネルギーを消費するということによって環境に影響を与える。

エネルギーから見ると、そういう枯渇性のものよりは、いわゆる自然エネルギー、再生可能エネルギーの系統をもってくるべきだという考えもある。ものを回す、できるだけ使うということにおいては、経済の問題、法律の問題、ライフスタイルだとか、倫理の問題がある。

何でもかんでも回せばいいのかというと、必ずしもそうではない。例えば、ダイオキシンを想像してみる。あるものを製造して、それを製品としてつくる、それから使う、それから廃棄すると、こういうところからもういろいろな形でそのダイオキシン等が出てくる。それがいろいろな経路で、大気に入り、それから水に入り、それから土壌から、そこからまたぐるぐる回って人に戻ってくる。

これもやはり循環を起こしているわけですから、循環型というのは、何でもかんでも循環すればいいというものではない。こういうものはできるだけ止めなければいけない。

資源消費の増大

資源をとってくる、それから化石燃料をとってくるというとき、資源の枯渇ということは、エネルギー、化石燃料に比べて出てこない。データは古いが、例えば、鉄ですとか、ニッケルですとか、銅を見ても、使用量というのはずいぶん上がっている。これが問題です。

価格と生産量をみますと、価格の高いもの、価格の安いものがあるが、安いものは生産量が多い。資源の枯渇の点から言いますと、例えば、耐用年数という言葉がありまして、現在使っている消費量と埋蔵量の比で、あと何年使えるか、ということをもとめたものですが、例えば、アルミニウムあたりは生産量が増えていても、耐用年数はあまり変わらない。銅も増えていますがけれども、変わらない。石油も前から30何年と言われたのがほとんど変わっていない。

これはいわゆるローマクラブのデータからですが、いろいろなそういう金属資源それから下のほうに石油、石炭、天然ガスと、こういうものについて、個々の耐用年数というのは、いわゆる今使っている消費量に対して埋蔵量を推定し、埋蔵量に対して、今使っている消費量を続けると何年もつかという値です。

技術的に進歩してきますし、新しい鉱床等も発見されるので、その埋蔵量を5倍と見積もった値がこれです。当然、消費量というのは伸びるということで、こういう伸び率を予定しています。これを見ますと、こちらの場合も見ても大体150年か長くて、あとは100年か、こんな数字が並んでいる。ですから、化石燃料だけではなくて、いろいろな金属もやはり枯渇する。

副産物として生産される金属や金属の存在形態

金属に関しましては、またちょっとややこしいというか、考えなければならないことがある。例えば、ある金属、コバルトですとか、カドミウム、インディウム、こういうものはほかの金属との副産物として回収される。ですから、これだけを何年かもつということではなくて、こちら側を掘らないとこちら側がとれないというようなこともあり、相関性がある。ですから、単にそういう1つの金属を見て、それが何年も持つかではなくて、採掘のところまで考えた耐用年数を

見てやらないといけない。　こういう金属はいわゆるバイプロダクトとして出てきます。

それから、もう一つ採掘の問題でこういうこともある。例えば、今、掘っているところは、例えば、銅ですと 5%とかそういうところを掘るわけです。これからだんだんだんだんなくなる。では、3%のところを、2%のところをと掘っていけばいいんじゃないかという考えがあるわけです。それは技術的な改良それから資源の枯渇について値段が上がってきますので、それだけ掘れるということです。例えば、鉄は非常に埋蔵量が多いので少しづつ掘っていけばいいんですが、例えば、銅、鉛、亜鉛あたりは、ひょっとしたら良いところを掘り尽くしてしまうと、もうほとんど経済的に成り立たないようになる。だから、こういう賦存の形態も考えなければいけないということが問題になる。

地球温暖化問題

地球温暖化というのは環境問題ですが、それだけではない。人口問題であるとか、経済問題であるとか、いろいろなものが絡んできますが、技術的に見て、地球温暖化問題というのは、一回地球温暖化が起これば、どんどん進んでいくのか、あるいは抑制効果が働くのかというのはわからないという点が問題としてあります。こういう環境問題というのは、とにかくストップするんだというよりも、一回起これば、これはちょっと危なくなるんだというようなことを念頭に置いて対策というのは立てておかなければならないということです。

技術的に、そういうところはどうやって地球温暖化の問題を解決していくんだというところで、こういうような技術課題があります。　例えば、発電を流れにとりますと、再生可能エネルギーをたくさん導入するとか、それから化石燃料を使うにしろ、効率を上げるとか、それからものをつくる時は省エネにするとか、それから出てきた炭酸ガスを森林に吸収させるとか、それから分離して地下ですとか・海洋に埋めるとか、こういう技術がある。

いわゆる循環型に話が戻りますと、結局こういうリサイクルをとる、それからあるプロセスをかえる等をやった時に、やはり評価というものをしっかりしないと、ただものを回せばいいということになり易い。例えば、リサイクルをどんどんやればいいといっても、本当にいいのかどうかというのはきちんと評価してやらないとならない。それは非常に大切だと思います。

その場合、ライフサイクル・アセスメント、LCA というのがある。例えば、冷蔵庫を 1 台つくる。このために、どこから原油をとってくるとか、石炭ですとか、鉄鉱石をとってくる、海外から船で運ぶ、それからアルミ原料のボウキサイトから載せて来る。海外から運ぶ。それから、鉄鋼場で製鉄をして、材料をつくり、それから組み立てるとか、プラスチックも同じようにこうやるとか、それから最後、使った後は、どこか廃棄する。あるいはリサイクルするという、いわゆる最初のデビューのところから使い捨てまでという、ゆりかごから墓場までという、トータルのところで計算して、どれだけエネルギーを使ったか、どれだけ材料を使ったか、それからずっとそのサイクルにおいて、どれだけそういう環境に影響を与えたか、CO2 とか NOX、SOX ですとか、

いろいろなものについてですが、すべてにあたって、影響を評価をするというのがこのエネルギー資源の考え方です。

ちょっと見方をかえますと、あるものを造って、使って捨てると、そこにはいろいろそういう原料をとってくる、それから化石燃料あるいは自然エネルギーから電気をつくって供給する、それから輸送に絡んで燃料を当てるとか、こういうものを全部考えていかなければならない。

例えば、冷蔵庫の場合、1990 何年だったか、オゾン層を破壊するというので、フロンをとにかく使えないようにしようとした。フロンから代替フロンにした。代替フロンに変えた時、どういうふうに影響するかというのを解析したデータがあります。

CO₂の排出量で見ると、フロンを使ったほうが使わないものよりも少ないわけですね。ですから、オゾン層を破壊という点から見るとフロンを使わない冷蔵庫というのがいいんですけども、温暖化という点から見ると、CO₂という点から見るとフロンを使ったほうがいいという。ですから、産業の評価というのは非常に複雑で、一面だけから見れないところがある。

地球温暖化に関しては、地球温暖化ポテンシャルというのがあります。CO₂は1、メタンはその24倍ということで、発生したキログラムにこのポテンシャルをかけてやれば、それぞれポイントが出る。

それから、ものにより、オゾン層破壊のほうに影響がありますので、同じ出た量にこのオゾン層のポテンシャルというのを掛けてやる。こういうふうにして、それぞれの温暖化それからオゾン層の値というものは出てくるが、では、これをどうやってトータル的に評価するかというのが非常に今問題になっている。

例えば、オゾン層破壊が1に対して、地球温暖化は2ですよといったって、納得してもらえないと使ってもらえないということで、こういうそれぞれの環境影響評価に対してどう重みをつけていくかというのが、今の大きな問題になっております。

環境影響評価の指数化

その重みの付け方でもうちょっと参考までにご紹介しますと、これはこんなものがありますという例です。カテゴリーとしては、資源の枯渇、温暖化、オゾンの破壊、人に対する特性、環境に対する安全性、こんなものの環境影響の指標をつくってくるわけです。

逆にまた資源のほうをどう評価するかも問題になる。埋蔵量が非常に多いものを使ってもそれほど影響がないだろうというのも一つの指標の考え方で、埋蔵量で割ってやる。また埋蔵量と消費量との比をとるとか、値段の高いものを使うと点が高いとか。

別の指標の考え方としまして、算出ターゲットという考えがあります。それは何かと言いますと、例えば、CO₂の削減目標値に対して今の現状というのを比べたその比です。NO_xでもいいんですが、東京都でこれだけというNO_xの環境基準があるとして、現状がその3倍だとしたら係数が3

になるし、非常に環境基準に近ければ、もうほとんどはゼロ値になる。

いわゆるターゲットに対してどれだけ現状がかけ離れているかという、それを目標値まで減らすにはどのくらいいるかという点で、離れが大きいほどそれだけ影響が大きいという考え方です。

別に、例えば、もう石油、亜鉛ですとか、こういうものに対しては、これだけの生産量に抑えようとか、資源量を考えてこれだけしようという目標値を定めて、現況を比較する。

炭酸ガスにしる、現状はこうだという排出量に全部数値をかけてしまって、エコポイントを出そうというのが一つの考え方です。こういう評価の仕方があります。

もう一つは、物質ごとに評価するもののほうですが、一般の資源から生産をコストに直してやるうとする。資源の価格ですとか、それからこういう健康に関するものに対しては、どれだけそういうお金を払って修復すればいいかというような、本当にみんな換算してやって評価しようというのも一つの考え方です。

それから、これはヨーロッパでやっているほかの方法ですが、オゾン層破壊や、重金属などに、カテゴリーを設けて、例えば、こういうカテゴリーですと、人がこの影響を受けて1年間で死ぬのを防ぐのにどれだけお金を払うかというようなところを示す。

そういうことで影響を評価するというのにはいろいろな考えがあるという段階です。

上野民夫（第6部会員・京都大学農学研究科）

「生物資源とポスト石油化学の産業科学」

—生物生産を基盤とする持続・循環型社会の形成をめざして—

A. レジメ

(第17期第6部の対外報告の背景)

資料1: 第6部報告

資料2: 化学巻頭言(2001年2月号)

1. 人間活動の増大: 人口増加と資源のアンバランス

・ニュートンパラダイムと産業革命

・20世紀における科学の革命:

1) 物理学革命=相対論と量子論 原子力エネルギー

2) 生物学の革命=進化の分子的基盤口遺伝子工学・生命工学

3) 情報科学革命=電子工学・情報工学口情報社会

(第17期日本学術会議特別委員会「20世紀の学術と新しい科学の形態・方法審議のまとめ」: 竹内報告より)

2. 資源の枯渇と新エネルギー

・生物資源と太陽エネルギー

・その他の方法

3. 生命科学と環境科学

・地球温暖化の本質は?

・環境倫理と生命倫理(加藤尚武著「環境倫理学のすすめ」)

環境倫理学の三つの基本主張

1. 自然の生存権口生物種、生態系、景観の保存

2. 世代間の平等 資源の保存

3. 地域間の平等口先進国と発展途上国の平等、地球温暖化問題

4. 21世紀の新しいライフスタイルを求めて

脱「物質・エネルギー社会」と価値観の変革

人口増加の抑制は可能か?

平和問題

(第17期日本学術会議環境・教育特別委員会対外報告: 和田報告より)

5. 生物資源とポスト石油時代の産業科学

・生物生産を基盤とする持続・循環型社会の形成をめざして 工学の農学へのシフト

(第17期日本学術会議第6部対外報告より)

農産物安定供給の重要性:人類生命の維持

第2緑の革命は可能か?

水は確保できるか?

どこまで海洋資源に依存できるか?

リンの回収

バイオインダストリー

6. 日本の役割と先導性

農学—吉田民人氏の「生物的人工物」の制御

育種学・発酵学—食文化、植物保護、応用微生物学

蚕糸学

フィールドサイエンス—生態学・遺伝学・進化学・動物行動学口生物間相互作用の化学

天然物化学—西田律夫「アゲハの産卵行動の研究」化学物質はシンボルかシグナル?

パターン認識の重要性 脳神経と行動

クローン動物

生物情報の地域特異性

畑作か水田か—生産の持続性

7. これからの課題

・環境科学の体系化:21世紀の教育、学術、産業活動のために

B 論議の要約

(バイオマス利用の展望と評価)

生物資源の高度利用が重要であり、バイオマスの利用についてのシンポジウムが6年位前から続いて行われている。

エネルギー資源の面からみると化石燃料は今世紀の終わりには底をつく。産業革命までは生物資源、水車などを使ってきた。それ以後が化石資源、その後はどうしたらよいか問題。

この間科学技術は大進歩をしたが、人類が自然との共生を忘れた時代200年になってしまった。人口は増え、一人あたりのエネルギーが増えてくる。

エネルギー的には農業は優等生でエネルギーを蓄積するのであるが、現在の農業は石油に依存している。これをどう考えるか。日本の米を考えると。そのエネルギーの40%程度石油を食っている。

(資源の枯渇と新エネルギー)

資源の面からは金属資源もあやしい。農業生産には肥料がいる。リン鉱石の推定埋蔵量は2034年位にはなくなる。そのためアメリカはそのままでは輸出しなくなった。日本では輸入し蓄積、廃棄しているが、廃棄物よりリン資源を回収する必要がある。

バイオマスが21世紀のエネルギーで重要になる。全世界の毎年使われているエネルギー量の10倍くらいのものがとれる。その30%程度はメタノール、エタノール、メタンガスなどとして利用できる。

バイオマス利用については食料とエネルギー利用の関連性、耕地面積、森林面積の限界などを考える必要がある。

2050年までにどのようなことが起こるか。食料はどの程度生産する必要があるか。3400カロリーが一人あたり必要。現在の耕地は15億ヘクタールであるが、最大耕作可能面積は約26億ヘクタールとして、新開発地域は11億必要になるが、森林の伐採は許されない。

農業は食料生産のために厳しいのでバイオマスの生産に向けるのは難しい。現在の使用量の30%程度ではないか。

(循環型社会の構築)

循環型社会の構築に際しては農業生産基盤を整備維持するかが重要。これを低エネルギーに変えて行く。天敵農法、有機農法に変えて行く。しかし、人手を必要とする。高齢化をしているので、能率を考える必要がある。アメリカは機械化に向けた交配育種をした。しかし病気に対する抵抗性などで不測の事態も起こり得る。それに備える必要もある。

(バイオマス生産と利用)

農業では生物資源がいっぱいあるが、生物資源から製品を作って、利用できるだけ利用。最後に無機物にしてカスケード的利用をするのが重要。

昔は藁半紙もあった。今でも紙の利用は残っている。しかしリグニンの利用が進んでいない。リグニンを天然の形で取り出して、素材として利用することが重要。木材の天然リグニンをフェノールでそのまま取り出して利用する。セルローズについて自然界で多い未利用資源としてのリグニンの利用が最近進んでいる。

現在はグルコースさえあれば何でも出来るが、経費が問題になる。デンプンはいま1キロ90円する。アメリカでは17円くらい。澱粉1キロから純粹のリノレイン酸が300キロできる。

澱粉を作るのには膨大な畑が必要になる。現在アメリカではリノレイン酸が1リットル70円くらいで出来る。アメリカではこれをBiofuelとして使おうとしている。微生物を使った変換システム、メタボリックエンジニアリングとしての研究が出ている。

バイオマスを利用した産業を如何に起こすか、農業などにおいても生物資源を恒久的に確保し利用することを考える必要がある。

C 配布・参考資料

資料1: 日本学術会議第6部報告(平成12年7月17日)「生物資源とポスト石油時代の産業科学—生物生産を基盤とする持続・循環型社会の形成をめざして—」勸告・声明集第15集(5分冊の5)459-481(2001)

資料2: 上野民夫: 石油化学世紀の終焉と生物資源、化学56巻2号、巻頭言(2001)

参考資料: 船岡正光: 天然リグニンからのポリマー合成、高分子加工、46巻3号、26-34(1997)

船岡正光: 機能可変型リグニン系ポリマー、高分子加工、48巻2号、18-25(1999)