

## 講演5 ; 「地球温暖化とエネルギーセキュリティの課題と対策 世代間倫理の観点も含めて」

氏田 博士\*,\*\*

環境安全学研究所 代表\* アドバンスソフト株式会社 リスク研究開発センター長\*\*

本原稿は、2018年11月20日に東京都港区においてアドバンスソフト主催で実施した「エネルギーで世界を牽引する日本—エネルギーの安定供給に向けたシミュレーションの活用」に関する講演会において、氏田博士代表にご講演いただいた内容を、アドバンスソフトが書き起こした内容です。また、章立てに関する情報もアドバンスソフトで付加したものです。

### 1. はじめに

皆さんこんにちは。氏田と申します。よろしくお願いたします。

今日のタイトルなのですが、「地球温暖化とエネルギーセキュリティの課題と対策 - 世代間倫理の観点も含めて」というテーマで話をしたいと思います。

紹介にありましたように、アドバンスソフトではリスクアナリシスを専門にしております。環境安全学研究所という小さな自分だけで持っている研究所があり、そこではシステム思考の考えからに基づきエネルギーシステムシミュレーションなど様々なことをやっており、その紹介をやらせていただきます。

図1 (P2) では、システム思考の考え方を示した著書を紹介します。まず基本的にリスクベースの安全を確立したいと思っています。その根本はシステム安全学という、要するに、「部分最適は全体最悪を生む」という言葉がありますけれど、そのようなことがないように対象の全体を1つのシステムとしてみて対処する考え方です。もう1つは、全てのシステムをリスクベネフィットで議論すべきだという、考え方です。今日の話の中でもリスクベネフィットの議論をしてみたいと思

\*環境安全学研究所 代表

President, Institute for Environment and Safety Studies

\*\*アドバンスソフト株式会社 リスク研究開発センター長

Manager, Risk Research and Development center

ます。その後、いわゆる環境関係の研究をキヤノングローバル戦略研究所で行っておりました。そこでもやはり環境問題をシステムとして捉えたいということで、キヤノングローバル戦略研究所に電中研、エネ総研など様々な専門家が集まって、エネルギーシステムシミュレーションに基づく長期予測をまとめました。もう1つが東工大の時に原子力系の研究仲間と作った本なのですが、エネルギー科学の観点で、特に地球温暖化を対象にエネルギーの長期的課題と価値を議論しました。要は、システム思考で環境や安全の問題を政策科学として捉える研究をして参りました。

### 2. 長期的な課題

今日の講演もこれに近い話をいたします。地球温暖化やエネルギーのリスクベネフィット、エネルギーセキュリティ、グローバルな観点の環境エネルギー問題、現在の問題だけではなく長期的な課題についてもお話させていただきます。

図2は、この図を説明すると大体の話が終わるくらい1番インパクトがあるものですが、10,000年前から10,000年後までのエネルギー密度に相当する量の変遷を示してあります。化石燃料時代といわれる現世代で、石油、石炭、天然ガスをほとんど使い切ってしまうという図になっております。

人口はエネルギーによって決まるといわれていて、300年前の江戸時代で3000万、今が1億3000万で4倍くらい、使っているエネルギーでいうと1人当たりで江戸時代の40倍ですから日

## 参考資料



リスクとベネフィット

長期予測

長期的課題と価値

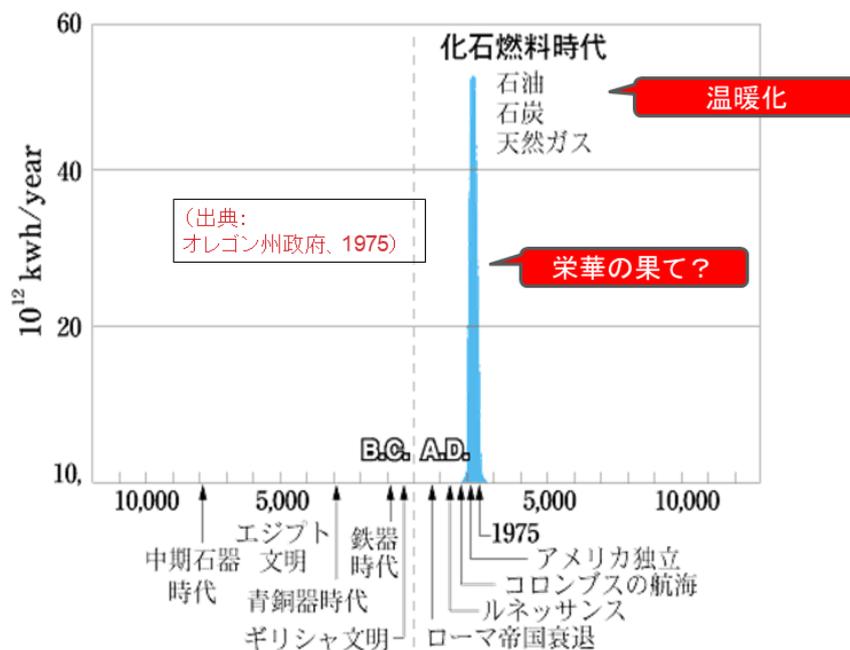
システム安全学の体系化

システム環境学の体系化の試み  
→ 環境政策科学

2

図 1 参考資料

## □ 地球温暖化とは一瞬の化石燃料時代



4

図 2 地球温暖化とは一瞬の化石燃料時代

本国全体でいうと 100 倍以上のエネルギーを使っているということになります。それは化石燃料が圧倒的に使いやすく、そのエネルギー密度が圧倒的に高いので、今の我々は豊かな生活ができているのが、そのことが全て温暖化の原因となっており、また使い果たしてしまった後のエネルギーを一体どうすれば良いのかという、長期的な温暖化の課題とエネルギーセキュリティの問題が表されていると思います。ここからお話することは、なぜこのような状況になってしまったのかまたどのような対策が考えられるのかということをご紹介していきたいと思っております。

まず、なぜ CO<sub>2</sub> が問題になるのかという話で CO<sub>2</sub> の排出量をみていこうと思います。エネルギー源には、いわゆる化石燃料と呼ばれる石炭、石油、LNG、再生可能と呼ばれる太陽光、風力、地熱、それと原子力があります。このようなエネルギー源をみた時に CO<sub>2</sub> がどこで出ているのかという、どのエネルギー源でも建設時や維持していく中で出てくるものと、基本的には化石燃料を燃やした時圧倒的に出てくるものがあります。CO<sub>2</sub> 問題でいえば化石燃料を止めてしまえばかなりの問題は解決してしまいます。しかし、エネルギーとして化石燃料がなくなって本当に生きていけるのかという問題もあるので、バランスの問題です。

ご承知だとは思いますが CO<sub>2</sub> があることによって、地上から逃げていくエネルギーが遮断され、エネルギーが貯まり温室効果で温暖化になります。温室効果自体は非常に良いことで、温室効果がないと地表付近の温度は平均マイナス 19℃ですが現実には平均 14℃あるので 33℃くらい温度が上がり、それが地球上の生命に役立っています。

次の図 3 は、IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)のレポートから取ってきたものです。温暖化による環境影響のリスクということで温度が現状の温度で一定であれば問題はないのですが、温度が上がることにより様々な弊害が出るといわれております。1900 年からの温度の変化をみていくと 2000 年くらいまでで温度が 0.5℃程上がっていきそうということと、今後 2000 年から 2100 年までの間を予測すると対策を何もとらなければ 5℃くらい上昇してしまい、どんなに対策をとっても 1.5℃くらいはどうしても上がる、ことが分かります。2℃までに抑えるというのが国連ではよくいわれていますが、その 2℃が何かというと、はっきりいって政治的ネゴシエーションの結果で答えがあるわけではないのです。環境影響をみてみます。小さな環境影響だと竜巻が増えたり、台風が増えたり強くなったり、などのローカルな影響は既に出てきています。また深海潮流という地球上の海底に流れている潮

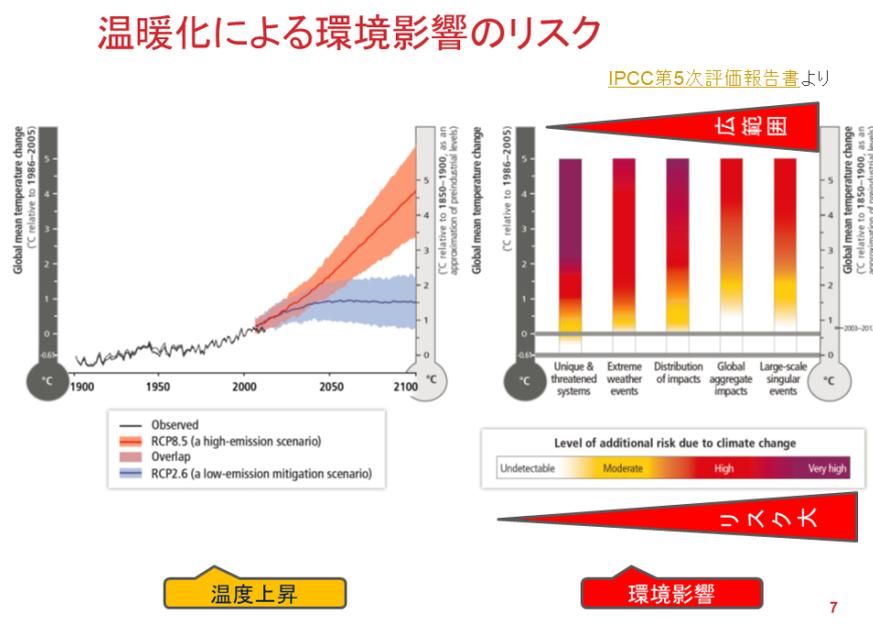


図 3 温暖化による環境影響のリスク

表1 各種電源のエネルギー密度

## 各種電源のエネルギー密度

- 発電所敷地面積あたりの発電電力量(筑波大、内山)

| 対象       | 敷地面積あたりの<br>電力密度<br>[kWh/m <sup>2</sup> ・年] | 備考                             |
|----------|---|--------------------------------|
| 家庭の電力需要  | 35  | 一戸建(敷地50坪、契約40A)               |
| 事務所の電力需要 | 400   | 8階建て(延床面積3,000m <sup>2</sup> ) |
| バイオマス発電  | 2   | ポプラプランテーション(6年サイクル)、発電効率34%    |
| 風力発電     | 21  | 米国テハチャビWF、C.F.20%              |
| 太陽光発電    | 24  | 家庭屋根(50坪、3kW、設備利用率15%)         |
| 水力発電     | 100   | 日本の水力発電所約100箇所の平均値             |
| 石炭火力     | 9,560                                       | 碧南石炭火力(210万kW)                 |
| 原子力発電    | 12,400                                      | 柏崎刈羽(821.2万kW)                 |

分散  
電源

基幹  
電源

9

流が変わってしまうと生態系が崩れてしまうというグローバルな影響も将来には少しは出てきそうです。色の濃淡でリスクの大きさを図で表しておりますが、2℃であればまだ薄い(黄色くらい)が、2.5℃までいってしまうとリスクが大きすぎて受け入れられないという程度の微妙な判断ではあります。このような形でCO<sub>2</sub>が増えることにより温度上昇し生体系や自然に影響を与えてしまうので、CO<sub>2</sub>を抑えなければいけないということになります。

地球温暖化を防ぐためにはCO<sub>2</sub>を減らせば良いと答えは単純ではありますが、それをもう少しブレイクダウンして議論した元東大教授の茅先生がおしゃっている茅の式があります。CO<sub>2</sub>を減らすためにはどのようにすれば良いのかを、4つの項で分けてみたものです。1つがCO<sub>2</sub>排出量をエネルギー消費量で割った、これはエネルギーの種類でもあるので、例えば再生可能なのか化石なのかということです。さらにエネルギー消費量をGDP(国内総生産)で割ったGDPあたりのエネルギー消費量ですから、エネルギー効率に相当します。またさらにGDPを人口で割る、これは人口

あたりのGDPですので、国の豊かさのようなもので、最後に人口をかける。国の豊かさや人口の伸びは抑えるべきではないものなので、エネルギー効率の向上とエネルギー源の種類で対応するしかないこととなります。例えば、化石燃料を止めれば出てくるCO<sub>2</sub>を一気に減らせるということで、これが1番重要なキーワードになるかと思えます。

次に3種類の1次エネルギーについてです。1次エネルギーとは地球上にあるエネルギー資源です。因みに2次エネルギーは、電気やガス、ガソリンなど実際に我々が使うエネルギーです。1次エネルギーは3種類しかなく、要するに宇宙ができた時のエネルギーをどう使っているのかということになるのですが、化石燃料と核燃料というのはもともと持っているストックみたいなものです。化石燃料は太陽エネルギーが数億年分溜め込まれたエネルギーなので圧倒的にエネルギーが多いけれど、いわゆる枯渇性といわれ使い切ってしまうばなくなってしまいます。地球が生成した時からある核燃料も質量とエネルギーの変換で決まりますので圧倒的なエネルギー量です

が、これも枯渇性ですのでなくなってしまいます。再生可能は、基本的に太陽があれば存在するものでこれを使い切る問題はないためほぼ永遠の資源だといえます。化石燃料と核燃料は枯渇性であるがストック型なので圧倒的エネルギー量、それに対して再生可能はフロー型なのでエネルギー密度が小さいということになります。

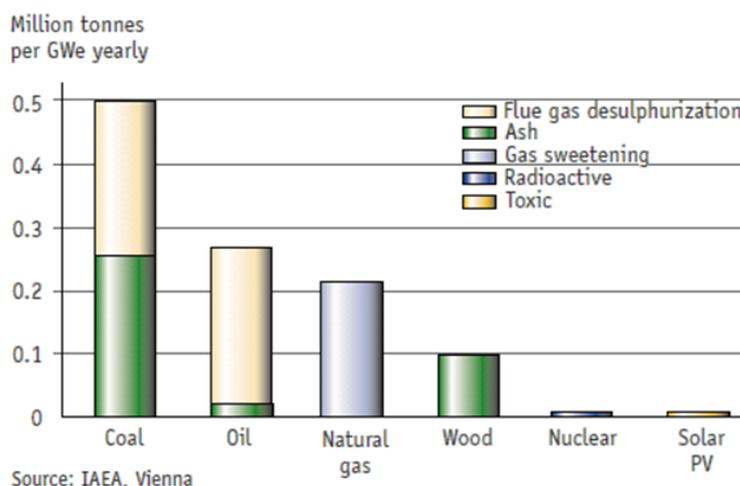
エネルギー密度はどうなっているのかを、表 1 (筑波大の内山先生が作成) でみます。敷地面積あたりの電力密度で比較してあります。家庭や事務所で必要とする電力が 100 くらいだとすると、再生可能では水力が 1 番良いですがそれでも 100 です。それに対して石炭火力、原子力発電は 2 桁以上上回っているので圧倒的なエネルギー密度の差があることが分かります。仮に太陽光発電で原子力発電一基分を発電しようとする、山手線の中を太陽光発電パネルで敷き詰めなければなりません。確か日本全土の戸建てに太陽光発電のパネルを設置しても、日本全土の電力重要の 5% 程にしかならないといわれています。再生可能エネルギーは、エネルギー密度が圧倒的に低いがその代わりに永遠に続くエネルギーであり、石炭や

原子力はエネルギー密度が高いが使えばなくなってしまいうエネルギーです。

「市民のための環境学ガイド」というサイトを作られている元東大教授の安井先生が、1 次エネルギーを以下のように形容しております。化石燃料は「見かけは普通の人間のように見えるが、実は地球を破壊する悪魔」、原子力は「一見は魅力的な人物だが、本性を見せると暴力的危険人物」、自然エネルギー（再生可能エネルギー）は「いかにも善人を装うが、実は気まぐれな浪費家」。このように、一長一短があるので、どれをどのようにどのくらい使っていくかを考えていかなければなりません。

次にリスクベネフィットの比較の例をいくつかみていきたいと思います。まずは、廃棄物の発生量です(図 4)。エネルギー源によって出てくるものが全く違うのですが、エネルギー量当たりの発生量をみると化石は多く、それに比べ原子力や太陽光パネルは圧倒的に少なくなっています。では、その廃棄物による環境問題から健康被害を考えた図 5 をみてみると、残念ながら、再生可能エネルギーには健康リスクの観点ではデータがない

## □ エネルギーのリスクとベネフィットの比較 廃棄物発生量の比較



Source: IAEA, Vienna

Nuclear Energy Today, OECD/NEA, 2002

図 4 エネルギーのリスクとベネフィットの比較、廃棄物発生量の比較

## 健康リスクの比較



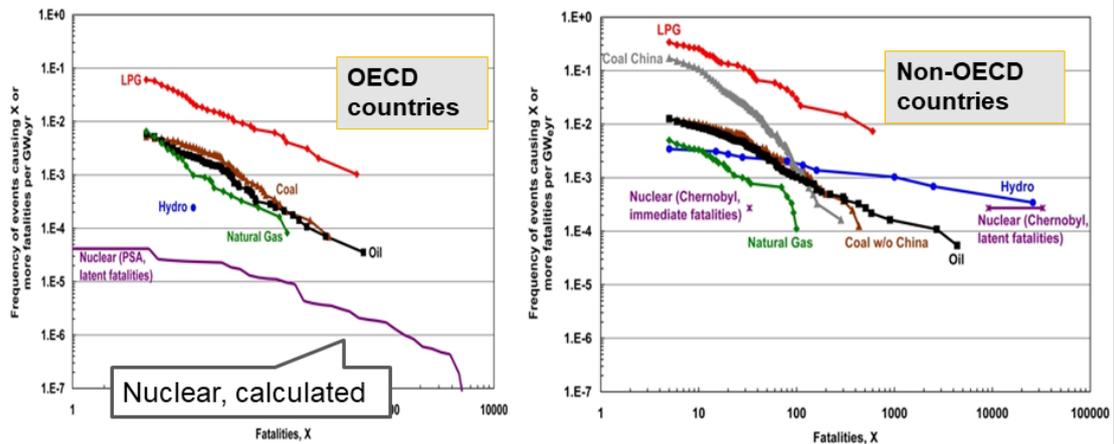
Source: "Comparative Assessment of Emissions from Energy Systems", IAEA Bulletin, 41/1/1999.

Nuclear Energy Today, OECD/NEA, 2002

13

図 5 健康リスクの比較

## エネルギー産業の事故リスク比較



•Fukushima?  
•TMI?

OECD/NEA6862, 2010 by Swiss Paul Scherrer Institute

1969年から2000年の間に様々なエネルギー生産手段により世界で発生した死者数の大きい事故(5人以上)の発生頻度の比較(急性死亡のみ考慮)

14

図 6 エネルギー産業の事故リスク比較

(再生可能エネルギーには、エネルギー密度が低い  
ため多くの面積を取るにことによる環境問題  
が議論されています)、化石燃料と原子力の健康  
リスクの比較の図になります。これをみても原子  
力のガンになる(長期的なものと短期的なものに  
分かれている)健康リスクが小さいことが分かっ  
ていただけだと思います。化石燃料は、エネルギ  
ー密度も高く何にでも使えるために使い勝手も  
よく、大量に 20 世紀中に使われてきましたが、  
廃棄物も多く出して健康リスクという意味合い  
でもすごく問題があったわけです。圧倒的に便利  
だが圧倒的にリスクも大きいのが化石といえる  
かと思います。

健康リスクというのは通常時のリスク問題で  
すが事故時のリスクもあり、それを表したのが図  
6 になります。これにも再生可能エネルギーで入  
っているのは水力のみになります。図が 2 つ並ん  
でおり、右の図のほうがリスクがかなり大きくな  
っていると思います。この図は OECD (経済協力  
開発機構) が行った統計の図で、左は OECD  
countries すなわち主に先進国、右のリスクが大  
きい図が Non-OECD、すなわち発展途上国とな  
っています。横軸が死亡者数で、縦軸が頻度にな  
っていて、右上にいくほどリスクが高いという図  
になっております。死亡者数も右と左を比べると  
Non-OECD のほうが 1 桁程大きい、頻度も 1 桁  
程高い。すなわち、合計すると途上国は先進国よ  
りもリスクが 2 桁程度大きいということになりま  
す。では原子力はといいますと、これは計算なの  
ですが WASH-1400 といわれる 50 年ほど前の  
1975 年に計算された、アメリカは 100 基プラ  
ントを持っていますので、100 基のリスクの結果に  
なります。Non-OECD 側にチェルノブイリ原  
発事故はありますが、なぜ福島と TMI の事故が左  
の図にのっていないかといいますと、直接的な死  
亡がないからです。単純にリスクだけで考えると  
原子力のリスクは低いといえるかと思われま  
す。

ここで少し話を変えまして、エネルギーセキュ  
リティという観点でみた時にどうなるのかとい  
うことで話をさせていただきます。これも短期の

問題で地球温暖化とは関係なくエネルギーセキ  
ュリティという面でみた時にエネルギー源がど  
うなっているのかみていきます。2000 年くら  
いのデータではありますが、日本のエネルギーの自  
給率は 4% くらいです。食料自給率がすごく悪い  
といわれておりますがそれでも 40% くらいはあ  
りますが、エネルギー自給率は 4% です。16% と  
いわれることもあります、原子力は燃料が小さ  
くても圧倒的なパワーが出るため輸入してしま  
えば当分は備蓄できるので、准国産エネルギーと  
いう扱いでそれを入れると 16% になるというこ  
とです。日本は、再生可能では 4% の水力がほと  
んどであり、化石も原子力も輸入なので自前では  
ほとんど何にもない国になります。ドイツは脱原  
子力していますが未だに動いており、フランスは  
脱原子力に向かっているといわれておりますが未  
だ 50% くらいは原子力が占め、それを入れると  
自給率は高いといえます。もっともヨーロッパは  
電力ネットワークで繋がっておりますので、実際  
にどこが作ったか分からないですし、ドイツも足  
りなくなればフランスから輸入したりしていま  
すので実体までは掴めません。国別でみると、日  
本は圧倒的に自給率が低く国家の体をなしてい  
ない国だといえます。

では、自前では何にもない国がどのようにリス  
クを減らしていくのかということ、Risk Index  
という供給不安定度指数という言葉で議論しま  
す。電中研が作った有名なハーフィンデルインデ  
ックスを使った指標があります。この指標でなに  
をいっているのかといいますと、できるだけ多様  
性を持たせてリスク低減を図ろうというもの  
です。エネルギー源を、同じ化石でも 3 種類とも利  
用してみたり、原子力を入れたり、再生可能は自  
前なので多く入れたり、石油も中近東だけではな  
いところから輸入したり、新たなシェールオイル  
を安全な場所から探したりしながら、多様性を持  
たせてリスク低減を図るのが日本のエネルギー  
供給安定のための方策です。確かに、Risk Index  
をみると時代により変わってきています。1 次エ  
ネルギーの供給量は、オイル、ガス、石炭、水力、  
再生可能エネルギーの順でなっていました。オ

イルショックが2回あり、それ以前までは石油がどんどん輸入されてバランスが悪かったためにリスクは上がっていきませんが、オイルショックを経て天然ガスも入れつつ石炭も増やし、原子力も導入したりしてバランスを取ることによってリスクは低減しそして今は安定しているので、日本はエネルギーの多様化で今までエネルギーセキュリティ問題に対処してきたといえます。自給率が上がりづらいために多様性を持たせるしか日本はセキュリティ対策がないという感じです。

ここからは長期的な課題や地球温暖化の問題を、科学的な視点も入れながら課題を整理したいと思います。ご承知の通り地球温暖化やエネルギー問題で1番有名なのがメドウズの「成長の限界」といわれる本ですが、これは地球が大変なことになっているということで、ローマ・クラブという学者が集まって作った本です。実はこの本が出る10年前くらいから環境問題は意識されていて1962年にレイチェル・カーソンの「沈黙の春」が出ました。これはDDTがマラニアに圧倒的に効くが環境問題も出てくると最初に警鐘を鳴らした本です。次に1963年にバックミンスター・フラワーの「宇宙船地球号」という言葉です。環境問題がローカルには起っているが地球は大きいのでグローバルな問題になるなんて思ったことはなかったのですが、実は地球は小さくて環境問題やエネルギー問題が大変になるということが、この頃からいわれ始めました。その後1972年に「成長の限界」で、地球は飢餓で減んでしまう、資源も足りないということを書いたが、結果としては全く当たらなかった。しかし、多くの優れた学者が集まり本を書いて、「成長の限界」というタイトルで出したということで、深刻な危機感を人類が持ったという警鐘の意味ではとても意義がありました。これはシステムダイナミクスという発散系なので解析者の好みでどこにでもいくような予測手法ですが、今の地球温暖化関係の予測というのはエネルギーコストの最小化という最適化手法を使うことが多いのでシステムダイナミクスはあまり使われていないようです。要は発散系

なので、解析者がどうみるのかによって、20年後に書き換えて、また10年後に書き換えてと新しい地球をみながら書き換えていくということで、将来予測は意外と当たらないが人類に対して警鐘は与えられました。このあたりから、科学者と政策とがリンクしてきました。環境問題は、こうであるとはなかなかいえないもので、結果が出るまで待てなかったり、実証できなかったり見解が一致しないなど、科学だけでは解決できない問題が発生し始めました。地球温暖化はこれの典型的なものです。

では地球温暖化や長期のセキュリティ問題や長期の環境問題などはどうすれば良いのが疑問となります。予測をしないといけないが誰も答えは知らず予測も外れます、シミュレーションは特に合わないといわれています。シナリオプランニングが出てきたのは、シミュレーションはシミュレーションする人の意図通りの答えしか出せないで、シナリオプランニングという形で色々な分野の専門家が集まって議論したシナリオが1番それらしいといわれております。シミュレーションは合わないといわれていますが、それしかないでそれでもやっていくしかありません。地球温暖化のような問題は、多くの研究者がシミュレーションで答えを出してこうなったから信じてくれということしかできず、警鐘の学問なので社会に発信していかなければならない。どのようなモデルを使って、どのような仮定があつて、どれくらいの不確かがあるのかを踏まえた上で、政策決定者に課題の提示することしかできない。

このこともあつて、IPCC (Inter-governmental Panel on Climate Change)では、第1次評価から第5次まで報告書を出しているが、科学的知見の評価の書き方が変わってきています。第1次は1990年でその時は総合所見で何をいつているのかといいますと、人間活動が温室ガスの増加に寄与しているのは確実だろうから、第2次では人為的活動が地球気候に影響を与えるから、第3次ではより確かになり、第4次では人間活動の結果が非常に高いとなり、1番最近の第5次では95%以上であると、言い方を徐々に変えながら提言して

います。これをいうために広く認められた論文を何千ケースも集めて来ることにより、信じてもらい実行してもらえるように提言し、国連の会議で政策決定者により議論される。科学者はこのようなことをしていくしかないということです。

科学者といっても気象学者からエネルギーの技術者まで色々いますが、その人達が協力し合っ  
て対策を練っていくということになります。話し合っていく中で、地球温暖化の難しさというのが科学者の良心や能力だけで決まらない難しさがあるのですが、CO<sub>2</sub>を減らさないといけないというのは全ての人が理解をしているわけです。

2030年からCO<sub>2</sub>を減らそうと頑張ったとしてもCO<sub>2</sub>の濃度が安定化するのには100年~300年ほど要し、気温が安定するのは数百年かかり、海面上昇は数千年かかったりするであろうといわれています。この話もこのくらいは確かであるというのが集まってくるわけですが、とにかくいま対策しないと将来世代に大変な影響を与えるかもしれません。ただこれがどのくらいかといわれると正確な答えはないわけですが、やはり大変でしょうし今すぐ対策にとりかからないと将来世代に大変な影響を与えるというのが、地球温暖化問題の特徴な訳です。

先ほどのエネルギーセキュリティの問題もそうなのですが、今、化石燃料を使い果たしたら将来世代に何が残るのかという問題になってくるかと思えます。どうしたら減らせるのかとなった時、図7がCO<sub>2</sub>排出量のシミュレーション結果で、2100年まで計算していますが2050年までの間で先進国と途上国の差をみていきたいと思えます。現在の排出量は28Gtくらいなのが何も対策しないと2050年には倍の50Gtくらいになるということで、今いろいろ考えてCO<sub>2</sub>制約をかけない実現できない。そのためには、まず先進国が下げなければいけないわけですが、先進国は成長しきっている上に対策すべきことは実施してきたので、そんなには減らすことができない。このため、これから成長していく途上国が減らさないとうとうしようもないのが現状です。長期の課題という意味ではもちろん先進国もやらないといけ

ないのですが、結局は途上国がどう減らせるかですが途上国は先進国のせいだといっており、下げないといけないのは皆が理解をしているがなかなか下がらない。衡平性指標という言葉がありどのようにすれば先進国と途上国が公平に分担していくのかと考えた時、まず責任問題があり、途上国が先進国に対し今まで勝手な生活をおくっていたためにこのような問題になったので、先進国が減らすべきだといっています。次に支払い能力ということでGDPが高い国、すなわち先進国が払うべきだとなっています。最後に実効性で限界削減費用というのがありCO<sub>2</sub>を1t下げるのにどのくらいのコストがかかるかということです。日本は対策をやりつくして乾いたぞうきを絞るような状況なので、他の国に比べると限界削減費用が1桁くらい高くなっています。できないものはできないので、日本としては限界削減費用が合理的な指標であり、重視するべきであると主張したいところではありますが、力関係やほとんどの国が自国の利害を優先するためなかなか話が収束しません。

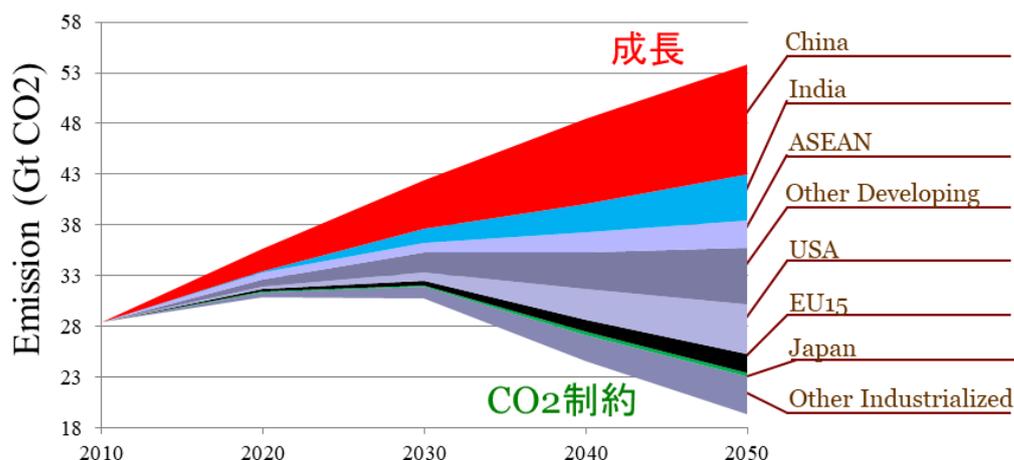
地球温暖化と経済発展で有名なキーワードが、**Sustainable Development** といひまして、持続可能な発展です。先進国は先進国で、途上国はこれから人口も増えて豊かになっていく中でCO<sub>2</sub>をいかに削減できるのかということです。もう1つは先ほどもお話いたしました**Equity** 衡平性です。空間的な問題では衡平性が問題になるということで、持続可能な発展を言い換えたようなものですが、共通だが差異ある責任、**Common but Differential Responsibility**、途上国と先進国では状況はぜんぜん違うが責任があるということでは同じであるということです。キーワードは出てくるのですが対策に結びつかないのが問題です。もう1つが時間的影響でこちらも先ほど申したように大きな時間遅れがあつて今やらないでも良いだろうという意識はどうしてもあり、また科学者間のコミュニケーションも結構難しい。例えば海水のレベルの上昇は数千年オーダーで、技術開発は100年オーダーですし、経済分析は30年が限界といわれていますが、その中で

も対策を打っていかねばならないという中で出たキーワードが後悔しないために今のうちに対策しようとする **Precautional Principle**、事前警戒原則と将来世代のためにどのように責任を取るのかという **Inter-Generation Ethics**、世代間倫理です。要は、課題の多い化石は使い勝手が良く色々使うこともあるだろうから将来世代のために取っておいて、再生可能をできるだけ使うようにするというようなことです。

では原子力はどう役立つのかと思いますが、図8の1990～2100までのシミュレーションの図を用いて説明いたします。CO<sub>2</sub> 制約の兼ね合いで、世界で大量の原子力が使われるようになります。図の下から3つ目の（赤色で記されている）日本までの米国、西欧、日本が先進国になりその上からは途上国になります。途上国は発展しないといけないがCO<sub>2</sub>制約があるため、化石はあまり使えないので原子力に大きく移っていきます。そうすると実は21世紀中にウランを使い切ってしまう結果にどうしてもなってしまいます。

皆さまがご存知の通り、自然界にある燃えるウラン235はウランの内の0.7%しかありません。残りの99.3%のウラン238はプルトニウムに変換すれば使うことができ、軽水炉でウランだけを使うやり方からプルトニウムを燃やす高速増殖炉に移行すれば、ウランを100倍以上有効に使えます。ただ、色々政策的問題がありそうはいかない問題はあります。しかし、これがあれば1万年は使えるので再生可能エネルギーと併用でCO<sub>2</sub>を出さずにエネルギーの確保ができるのではないかと考えております。それに付随してよくいわれるのが、軽水炉のようにウランだけ燃やして残って捨てていたプルトニウムを全部使い切れば廃棄物の処分量は3桁下がり天然ウランのレベルの普通に生活できるくらいまで落ちるのには、軽水炉方式の10万年から高速増殖炉方式では300年になるといわれています。地球温暖化や環境問題、また長期のエネルギーセキュリティを考えた時には、軽水炉のウランだけで良いという選択肢はないというのが私の結論であります。

## 領域ごとのCO<sub>2</sub> 排出量削減



世界の削減量の70%は主要な途上国の削減による

(氏田, キヤングローバル戦略研究所2008)

22

図7 領域ごとのCO<sub>2</sub> 排出量削減

## ウラン資源の利用(CO2制約)

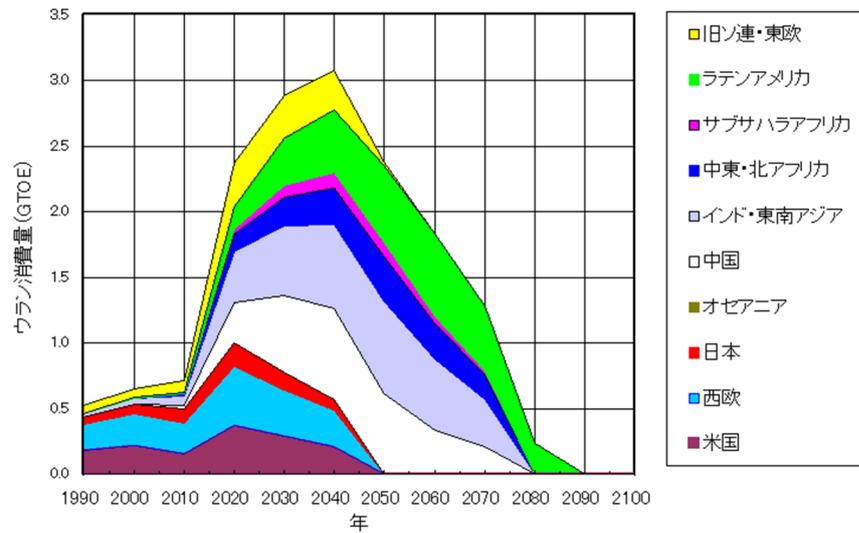


図 8 ウラン資源の利用 (CO<sub>2</sub> 制約)

表 2 まとめ (リスクベネフィット比較/長期的価値の評価)

## □ まとめ(リスクベネフィット比較/長期的価値の評価)

| 評価指標       |                      | 化石エネルギー           | 原子力                          | 再生可能エネルギー         |
|------------|----------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| リストとベネフィット | 廃棄物発生量               | ××<br>脱硫排煙、灰      | ◎<br>放射能                     | ◎<br>酸            |
|            | 健康リスク                | ××<br>SOx、NOx、粒子  | ◎<br>ガン                      | -                 |
|            | 事故リスク                | ×<br>(××@LPG)     | ◎                            | -                 |
|            | CO <sub>2</sub> 排出量  | ××<br>燃料<br>設備・運用 | ◎<br>設備・運用                   | ◎<br>設備・運用        |
|            | エネルギー密度              | ◎<br>需要の2ケタ上      | ◎<br>需要の2ケタ上                 | ××<br>需要以下        |
|            | EPR (エネルギーブロードフィット比) | ○                 | ○                            | ×                 |
|            | エネルギー自給率             | ×<br>輸入           | ○<br>準国産                     | △<br>国産だが寄与少      |
| 長期的価値      | 資源                   | ×<br>資源枯渇         | ◎<br>Uには資源枯渇があるが、Pu利用で1万年に延長 | ×<br>永久に存在するが量的制約 |
|            | 廃棄物                  | ××<br>地球温暖化環境問題   | ○<br>消滅処理により百年オーダーで処分可能      | ◎                 |

### 3. まとめ

まとめに移ります。表 2 は、3 種類の 1 次エネルギーの利害得失をまとめたものです。私が勝手に○×を付けた個人的な評価なので異論はあるかと思いますが、このようなリスクベネフィットの議論をしないと政策決定はできないと思っております。今あるリスクとベネフィットと長期的な価値でどのように考えていけば良いのかというのを考えた時に、化石エネルギーは使い勝手がよく 20 世紀は圧倒的に使われましたがこれからは使わないか、使うにしても CO<sub>2</sub>を出さない対策をした上で少しであれば使って良いかと思いません。いずれにしても、将来的には原子力と再生可能エネルギーに移っていくと思われまます。その際に、エネルギー密度の問題があり原子力を基幹電源として再生可能エネルギーを分散電源という役割分担で使い分けをしていけば良いのかなと思います。

以上です。ありがとうございました。

※ スライド資料をアドバンスソフトの HP シミュレーション図書館に公開しております。本稿とスライドは、ひとつの段落がひとつのスライドに対応しておりますので、ダウンロードの上、本稿をみていただければより詳細な情報となります。

[http://www.advancesoft.jp/support/download/28simlib\\_seminar\\_20181120\\_all.html](http://www.advancesoft.jp/support/download/28simlib_seminar_20181120_all.html)