

# 総合学習と理科教育

## － STS 教育をめぐるって－

関口 昌秀

### はじめに

総合学習の類型について、城丸章夫は、(ア)戦前の修身科型、(イ)「双関カリキュラム」や「融合カリキュラム」(わが国でいう「コア・カリキュラム」)、(ウ)小学校低学年での「遊びや仕事」、そして(エ)現代社会の緊急で典型的な諸問題についての学習の4つに大きく分けたことがある。<sup>1</sup> その分類にしたがえば、筆者が考えている総合学習は第4の型に属するということになるだろう。現代的課題を扱うのが総合学習だと考えているからである。さて、本稿では現代的課題を扱った学習スタイルのなかで、現代の科学技術をめぐる諸問題を扱うSTS教育に焦点をあてて、総合学習と理科教育の関連について考えてみたい。

STSとは科学・技術・社会 (Science, Technology, and Society) を略したものだが、もう少し具体的内容的に言えば、社会における科学・技術のあり方を研究する科学史・科学哲学・科学社会学などや、あるいは科学・技術が社会に及ぼす影響、科学・技術が引き起こす社会問題を研究する学問分野を指している。STS教育とは、字義的に言えば、その教育ということになるが、ここではもう少し広い意味で、それほど厳密ではないという意味でもあるが、社会との結びつきを強く意識した科学についての教育というほどの意味のものとして理解してもらいたい。

本稿で考えたいのは、中等教育におけるSTS

教育であるが、その起源は英国におけるSISCON-in-Schoolsにあるといわれる。<sup>2</sup> そこで、第1章においてSISCON-in-Schoolsについて紹介することからはじめたい。

続く2つの章では、日本社会において課題となっている問題を紹介する。第2章では、福島原発事故以後とりわけ問題として意識された「放射線の危険性と安全性」、および原発の核廃棄物の問題を扱う。「放射線の危険性と安全性」については田崎晴明の論述を紹介する。核廃棄物の問題については山本義隆の論述を紹介する。第3章においては、地球温暖化の原因として話題になっているCO<sub>2</sub>は、実は地球温暖化の原因の6分の1にすぎないという赤祖父俊一の論を紹介する。

## 1 SISCON-in-Schools

### 1.1 大学教育としてのSISCON

中等教育におけるSISCON-in-Schoolsの動きは、大学におけるSISCONからはじまった。SISCONというのは、Science In a Social CONtext「社会的文脈における科学」の略である。この運動は、エディンバラ大学、リーズ大学、サセックス大学などの8大学とニューカッスルほかの3つのポリテクニク(工業高専)が参加して、新しい形の大学教科書を開発するプロジェクトとして、1973年からはじまった。1977年から、その成果として、十数冊のセミナー用教科書が刊行された。

その中のいくつかのタイトルを示すと、『科学技術は中立か』『原子爆弾』『現代社会の限界—成長の限界論研究』『技術と生存』『ガリレオとコペルニクスの天文学』『社会と食料—第三世界をめぐる』などがある。このタイトルからわかるように、SISCONは、科学史や科学哲学、科学社会学、そして経済学から政治学など、多角的な側面からの分析をくわえ、科学・技術をめぐる諸問題について教育しようとするものである。

大学のコースとして言えば、従来の物理学科・化学科・生物学科のように高度に専門化され技術化されたコースではなく、科学方法論や科学史、科学哲学、科学社会学などより幅広い観点から科学を眺めたコースである。「要するに、それは教養ある人間を育成するのに学部レベルで古典学や人文学を学ばせるのと同じ立場で科学を学ばせようとするものといえるだろう」と、SISCONプロジェクトのコーディネーターだったリーズ大学のビル・ウィリアムス (Bill Williams) は語っている。<sup>3</sup>

ウィリアムスの発言をもっと明確にすれば、ジョン・ザイマン (John Ziman) のいう「サイエンス・グレート (science greats)」という考え方になるといってよいだろう。<sup>4</sup> オックスフォード大学には古典文化を言語・文学・政治・歴史などの多方面から学習する「グレート (greats)」というカリキュラムのコースと、哲学・政治学・経済学を満遍なく学習する「モダン・グレート (modern greats)」というカリキュラム・コースがある。これらは「特別な専門的知識を必要としない職業、例えば上級公務員などの養成に適すると考えられている」。<sup>5</sup> それをもじって「サイエンス・グレート」を考えるわけである。そうすると、このコースは、科学政策立案に関わる上級公務員の養成を目指すということになる。また他方で、「社会問題を考えることのできる科学者」や、「技術革新や環境のアセスメントを専門とするアナリスト」の養成を目指したものともいえるだろう。

## 1.2 中等教育としてのSISCON-in-Schools

以上のように、SISCONプロジェクトの意図はあくまでも高等教育における「社会的文脈にける科学」のコースづくりを目指したものであり、大学教育を超えて広げる意図はなかった。しかし、SISCONのサマースクールに参加した中等教育の教師たちから、中等教育における科学教育でも同じようなアプローチが必要だとの意見が出され、中等教育レベルの教科書づくりのプロジェクト、SISCON-in-Schools がはじまった。<sup>6</sup>

SISCON-in-Schoolsのテキストシリーズの編集代表となったジョン・ソロモン (Joan Solomon) は、「社会的文脈における科学教育」を中等教育段階でも行う理由として、たとえ将来専門の科学者にならない青年たちも市民として、科学的知識がなければわからないような社会問題を理解する必要がある。そのために、今までの科学教育とは異なる科学教育が必要なのだという。たとえば、エコロジー、ゴミと汚染、原子力、テクノロジー、経済学と産業などを教える科学教育である。もう一つの理由として、彼女は、科学の応用というのはつねに人類に利益をもたらすものではなく、そこには危険性も伴うこと、科学の技術的応用には常にメリットとデメリットがあるということを教える必要をあげている。<sup>7</sup>

SISCON-in-Schoolsのテキストは、わが国の教科書とはだいぶ違う。それは教科書というより読み物と言った方がよい。そういう意味では、サブテキスト的な作り方をしているといった方がわかりやすい。

これは、そもそも、「社会的文脈における科学教育」は、既成の科学教育と授業方法が異なるからである。科学概念や科学法則についての知識を教えることを目標とするこれまでの科学教育は、その知識の効果的な伝達を重視することから教師中心の講義型の授業になりがちである。それに対して、「社会的文脈における科学」を教える「授業」は、生徒中心というか、生徒

が調べ発表し、議論をし合うという形の授業をめざしている。

これは、中等教育のSISCON-in-Schoolsだけでなく、大学のSISCONでも同じである。「学生中心型の学習形態が望ましく、学生の積極的参加が求められる。決して教師主導の講義形式は薦められない。各単元は学生に何らかの活動をするように求めている。考えること、読むこと、書くこと、質問すること、質問に答えること、議論することなどなど。」<sup>8</sup>と、ウィリアムスは大学における「社会的文脈における科学」の授業について述べている。

一般に、「社会的文脈における科学」の教育は、このような授業形態を想定する。生徒に考えさせること、意見発表させること、議論させること、そうして自分の意見と突き合わせ内省させること。このような循環的なプロセスを含んだ活動がその理想的形態とあってよいだろう。従来の専門的な科学教育に比べると、科学そのものについての知識のレベルは高度ではない。求められる知識は、社会と科学・技術のつながりである。そういう意味で、その知識は幅が広いとあってよいかもしれない。

### 1.3 SISCON-in-Schoolsの教育内容

このように、SISCON-in-Schoolsのテキストにおける知識の量は少ないように見える読みの内容的なものだが、それでも、これらのテキストの内容が大学の入試科目を構成することになるのである。そこには入試の必修領域となるテキストもある。SISCON-in-Schoolsで作成されたテキストは合計8冊で、そのうち2冊が入試の必修領域を構成し、6冊が選択領域となる。翻訳されたのは必修領域の2冊と選択領域の2冊である。翻訳では原書テキストの1冊1冊を単元と呼んでいる。後で述べるように、入試の科目としては、これらすべてを合わせて入試科目を構成する。そしてその中で、必修領域と選択領域に分けている。

翻訳された4冊（4単元）分のページ数は、

180ページ弱となる。これには、その単元について出題されたある年の入試問題も含まれている。入試に必要なのは必修2単元と選択3単元だから、換算すると220ページほどになる。わが国の「物理基礎」や「化学基礎」などの教科書は230～270ページほどある。「物理」や「化学」の教科書は400～500ページになる。入試科目の選択で考えると、物理とか化学とか生物という選択になり、それらは各「基礎」と「物理」とか「化学」などを合わせたものを指すから、それと比べれば、量は少ないということになる。

しかし、この比較は適正とはいえないかもしれない。「物理基礎」や「物理」の教科書は物理の概念と法則を教えることを目標とした従来型の科学教育である。それに対して、SISCON-in-Schoolsのテキストは、従来型の科学教育とは目的を異にした「新しい科学教育」である。

「物理基礎」と「物理」は理科の中の物理分野の教科書である。理科の各分野の教科書は、専門家養成プロセスとしての「完全カリキュラム」(ザイマン)<sup>9</sup>として作られている。これが科学教育のふつうのカリキュラムである。数学で「教科の系統性」といわれるものに相当して、各分野の系統性によりカリキュラムがつけられている。たとえば、物理学や化学や生物学の最先端に進むために、小学校から中学校、高校へとカリキュラムを組むのである。高校では科目の専門性が高くなるという理由から、選択制を導入する傾向が高くなる。わが国では、高校理科の必修部分は広くなったり狭くなったりいろいろ変動しているが、高校まで来ると内容が高度化してくるので選択的になりやすい。科学の専門家のコースは、大学で物理・化学・生物学のいずれかの学科を選ぶことになる。高校での物理・化学・生物学の選択は、工学部や薬学部や農学部、あるいは医学部などへの進路選択とも関係する。物理学科や工学部の多くの学科では力学が必要とされる。力学のためには連立方程式の解法や微分積分が必要である。その必要

なものを下から上へと積み上げていく。完全カリキュラムというのは、それである。理科系の各学科へ進学するために必要な数学や理科の内容を学習するようになっていく。

このようなふつうの科学教育とSISCONの「社会的に文脈における科学教育」とは、カリキュラムの原理自体が異なる。テキストの量が少ないと述べたが、この点についてもう少し正確に比較してみよう。わが国の教科書は完全カリキュラムに基づく科学教育のテキストであり、SISCON-in-Schoolsの方は「社会的文脈における科学教育」のテキストである。前者は知っておくべき概念や法則をすべて説明し、その故に高度な内容となっている。それに対して、後者は科学概念の内容がそれほど難しくなく、読み物的なテキストとなっている。それらと比較するには、テキストの量だけでなく、単位(授業時間)数も比較してみる必要がある。

SISCON-in-Schoolsの教師用指導書<sup>10</sup>を見ると、この科目の対象学年がシックス・フォームの年齢とある。シックス・フォームというのは、大学入学前の2年間の学年をさすから、日本でいえば高校2・3年である。中等学校での最初の3年間で学修する「一般科学」を学んだものを対象とするという表現もある。こちらで考えれば、高校1・2年となる。わが国の中学校理科と英国の一般科学を対応させて考えるのが妥当である。共に、必修であり、内容が理科一般である。それに対して、高校からは共通の必修部分がなくなる。このことから、細部の内容はともかく、わが国の中学校理科と英国の一般科学を対応させて考えるのがよい。

先ほど述べたように、SISCON-in-Schoolsの8冊のテキストのうち2冊が必修で、6冊が選択部分となっている。その内容を教える時間数は、最低70分×2で1年間とされている。70分×2というのはひと続きの授業形態とされている。単なる講義形態ではなく、意見発表や議論を含んだ授業形態がよいとされている。しかも理想的には、科学教師ともう1人別の教師が

2人合同で行うのがよいとされている。現実には、生徒6人という受講者の少ないクラスでは、1人の教師が生徒とテキストを読み合うことからはじめたという授業形態も紹介されているので、<sup>11</sup>あくまで他教科の教師と2人というのは理想に過ぎないのだろう。しかし、テキストの内容をみると、理科の内容から逸脱して範囲が広く、理科の教師が行うにはちょっときびしい内容である。

70分×2というのは、わが国でいえば50分×3とほぼ同じだから、単位的には3単位という量になる。つまり、1年間3単位程度のものが入試の1つの科目となっているということである。単位数だけ見ると、ずいぶん少ないように考えられるが、「教師用指導書」に書いてあるのはあくまでも最低の時間数の目安であり、現実の入学試験に備えるにはおそらくそれよりも多いと考えるべきなのかもしれない。

SISCON-in-Schoolsのテキスト8冊(8単元)分は、先ほどの計算で360ページ程になる。これで3単位とすると、わが国の教科書と比べても少なくない。むしろ多いというべきかもしれない。入試に必要な部分だけを取ると、必修部分2冊(2単元)と選択が3冊(3単元)だからテキストは220ページ程度となり、わが国の3単位分の教科書と同じ程度となる。このように考えると、授業の時間数とテキストの量との関係は、彼我において大差ないとみてよい。

## 1.4 SISCON-in-Schoolsでの入学試験

### 1.4.1 入学試験「科学と社会」のシラバス

SISCON「社会的文脈における科学」が入試科目として認められたことに意味がある。入試科目になることがカリキュラムにおける科目の安定性を決定するので、入試科目として認められたことは大きい。今、SISCONが入試科目として認められたと述べたが、もう少し正確に見ると、入試の科目枠は「科学と社会」と呼ぶのが正しいのかもしれない。

SISCON-in-Schoolsのテキストの裏表紙には「これらの本はシックス・フォーム・レベルの一般教科 (general studies) である科学と社会 (science and society) の中に新しいコースを提供するものである。」<sup>12</sup>と表記されている。また、翻訳の「教師用指導書」の中にも、入学試験に関連して「4 シラバス『科学と社会』(A/O レベル, CSE 試験用)」という項目があり、そのシラバスが示されている。そこを見ると、SISCON-in-Schoolsのテキストと少し違うことがわかる。単元名で違うところがある。シラバスでは第1単元は「人間と自然の相互作用」とある。SISCON-in-Schoolsのテキストでは「社会が産み出すものと社会を変えるもの—科学と技術—」である。原題は 'Ways of Living' である。第2単元はシラバスでは「科学に適用される論理と確実性」であるが、テキストの題名は「科学は本当に確実なものだろうか—科学の本性—」である。原題は 'How Can We Be Sure?' である。翻訳にある他の2つの単元の名称はシラバスとほぼ同じである。

単元の内容を正確に表したものは、明らかにシラバスの方である。「人間と自然の相互作用」といえば明瞭だが、'Ways of Living' 「生活様式」では、理科でなく社会科の教科書なのかとも思え、何をテーマとするのかわかりにくくなっている。'How Can We Be Sure?' 「どうやって確実なものに到達できるか」は、生徒にわかりやすい表現でそれほど悪くないが、「科学に適用される論理と確実性」の方が単元で論じるテーマがより明瞭で、焦点が絞られているとあってよい。

ここでは単元2のシラバスの目標だけ示しておくが、後でSISCON-in-Schoolsのテキストの内容も示すからそれと比較してほしい。入試科目の内容を決めるこのシラバスの内容が、SISCON-in-Schoolsのテキストの内容を決めているという関係になっていると見るのがおそらく正しい。

## 単元2 科学に適用される論理と確実性

- ・演繹的思考。1つの普遍的前提と1つの個別的言明とから妥当な演繹ができること。この演繹的方法を、ある事象を説明する理論の科学的研究と対比できること。分類規則や一般化と実験や観察との間の相違がわかること。
- ・科学的言明。科学理論には、厳密な意味における確実性もともと欠如していること、また科学理論には、想像的、あるいは機械論的 (メカニズム的)、予言的な性質があることを理解すること。
- ・科学理論の成長を、少なくとも1つの事例 (例えば、光の性質と虹の説明、大陸移動とプレートテクトニクス) と、理論変化の例で学ぶこと。
- ・実験の性質。観察や解釈に理論が与える影響を理解すること。
- ・民主的意志決定への市民の参加。選挙・下院議員・地方公共団体。公開審査会・圧力団体の市民社会における機能を理解すること。<sup>13</sup>

SISCON-in-Schoolsのテキストは、このようなシラバスに基づいてできあがっている。そして、試験問題の内容を縛っているのも、このシラバスである。すぐあとで確認するが、わが国の試験制度とは大きく違うと思った方がよい。シラバスの拘束力というか、拘束される内容に関する拘束度が違うのである。

わが国の試験文化に慣れた人にとっては、その縛りの緩さは不思議に思えるかもしれない。おそらくわが国においてなら、出題される試験問題の内容がもっと明確に限定されるようにしないと、試験が実施できないのではないだろうか。そこには国民性の違いというものもあるように思われる。

### 1.4.2 SISCON-in-Schoolsでの入学試験

入学試験の拘束力だけではない。大きな違い

は、試験がペーパー試験だけでない点である。

SISCON-in-Schools の科目あるいは「科学と社会」の科目の試験は、試験問題だけで決まらない。試験問題以外の課題研究（レポート）やクラスでの議論への参加度が得点の25%～50%を占めている。SISCON-in-Schools の科目のA/Oレベルの試験では、試験問題が75%、クラスでの議論への参加度が5%、課題研究が20%である。CSE試験における「科学と社会」の試験では、試験問題が50%、学校での学習成果が20%、課題研究が30%である。<sup>14</sup>

この点がわが国の入学試験と大きく異なるという点についてよい。わが国の推薦試験制度と比較しても意味がない。英国における標準的な試験制度が上記のような配点で構成されているのである。しかもこれは資格試験である。ここが根本的に異なる。

#### 1.4.3 GCEのA/Oレベルの問題

試験問題もだいぶ異なっている。基本的に記述試験である。2つの必修部分の内のひとつ、必修単元「科学は本当に確実なものだろうか—科学の本性—」の問題を示すと次のようになっている。これは1982年のGCEのA/Oレベルで出題されたものである。

- (a) 次の2つの言明を注意深く読んで、どちらが科学理論であるか決めなさい。また、その答えを支持するできるだけ多くの理由を挙げなさい。
- (1) 小さな粒子の層に覆われているあらゆる岩石は堆積岩である。
  - (2) 世界のあらゆる大きな大陸プレートはゆっくりと移動している。
- (b) 18世紀には、鉄の棒が熱せられると膨張するのは、熱が鉄の棒に流れ込んでいくある種の流体であって、それが原子の間を広げるのだと信じられていました。19世紀になると、鉄の棒が熱せられるとその原子が振動する幅が大きくなってそのために

より大きな空間が必要になるというように考えられていました。

- (1) ハンマーで繰り返し鉄の棒を叩くと熱くなる理由をよく説明するのはどちらの理論でしょうか？
  - (2) 熱せられた鉄の棒のX線写真には原子がかなりぼんやりと写っています。どちらの理論がこの現象を予言できるでしょうか？
- (c) 原子力施設から放射性物質が漏れた場合、ある専門家はまったく害はないといい、またある専門家は危険性があると反論します。
- (1) どのようにしてそのような意見の不一致が生じるのだとあなたは思いますか？
  - (2) この問題に対してあなた自身はどのように反応するのかを説明しなさい。
- (1982年のGCEのA/Oレベル、JMB (Joint Matriculation Board) により出題。<sup>15</sup>)

以上の問題が基本的にテキストに沿っていることはまちがいないが、細かく見るとテキストにないものもある。(a)の(1)の堆積岩の命題はテキストでは触れられていない。(c)の(2)は純粋に解答者の意見を述べる問題だが、わが国ではこのような問題は大学入試にはないだろう。大学における授業の試験でもないとお目にかからない。文化の違いを感じさせられるところである。

問い(a)は、入学試験のシラバスにある「演繹的方法と科学的研究方法との相違」を理解できているかを確認する問題である。演繹法と帰納法の違い、科学は帰納法であること。これを理解した上で説明せよという問題は、むずかしい問題である。これを言葉で説明する、そういう訓練をするのが西欧の伝統と理解すべきなのだろう。わが国ではこのような伝統は弱い。

#### 1.4.4 CSEレベルの問題

次に示すのは、同じ単元のCSEの「科学と

社会」の問題である。

- 1 科学においては、「すべての脊椎動物は背骨をもつ」といったような分類に関する言明を使うことがある。新しく発見された動物を分類するのにこの言明がどのように使われるのか示さない。
- 2 多くの科学理論は直接的には観察できないことに関するものである。そのような理論を1つ挙げなさい。
- 3 (a) これまでにあなたが学習した理論を1つ取り上げて、その理論で説明される実験でしかも自分でやったことのあるものを何か記しなさい。  
(b) 次に、その実験結果をあなたの学習した科学理論を使って説明しなさい。  
(c) その実験は説得力をもっていると思いましたが？（その理由も述べなさい。）
- 4 社会問題を説明するのに科学理論が使われるとき、専門家たちは時としてお互いに意見が一致しないことがある。次の文章を注意深く読んで質問に答えなさい。

子どもたちが自動車の排気ガスのように鉛の蒸気が多く含まれている空気の中で呼吸をしていると、知的発達に阻害されることがある。道路の交差点近くに住む子どもを調べてみたら、知的発達レベルがわずかに平均よりも劣っていることがわかった。ある専門家たちは、これは自動車の排気ガスの鉛蒸気のためだと言った。しかし別の専門家たちは、空気中の鉛の濃度は有害となるほど高濃度にはなっていなかったと言った。彼らはその原因について、この問題とは別の社会経済的要因（すなわち、その地域に住む人々が社会経済的に恵まれない生活状態にあること）を考えていた。

- (a) 両方の専門家が合意している点を2つ挙げなさい。

- (b) 両方の専門家の見解が異なっている点を2つ挙げなさい。

- (c) 他に何かやってみる価値のあるいい調査法はないか？

- (d) 鉛は自動車の性能を改善するためにガソリンに添加される。それを加えないと、ガソリンの値段は今より1リットル当たり数円高くなると予想される。ガソリンに鉛を加えることについて、あなたはどのような意見をもつか。

(1982年にLREB (London Regional Examining Board) がCSEの「科学と社会」<sup>16</sup>として出題した問題。)

この問題の方は、SISCON-in-Schoolsのテキストとはぜんぜん違っているといってもよい。試験のシラバスには即しているはずで、これを見れば、シラバスの拘束力というのはいさぐらいゆるいことがわかる。こちらの問題もかなり難しいように見える。これが、16歳の就職用の資格試験とはとても思えない。そのようなレベルにある。

#### 1.4.5 GCEとCSE

以上のような問題がどういう受験生を対象としたものなのか。それについて、翻訳の注をもとにして記しておく以下ようになる。

GCEはGeneral Certificate of Educationであり、Aレベル(Advanced level)はシックス・フォーム修了者を対象とした上級試験であり、Oレベルは中等学校3年間で修了した16歳で受験できる普通試験 Ordinary levelだという。<sup>17</sup>しかし、問題が同一なのでAとOの区別をどうしているのかは不明である。同一問題とする以上は合格点が異なるとする以外はないだろう。

JMBというのは、「いくつかの大学が共同で組織する大学入学試験委員会」のことであり、「たとえば、オックスフォード大学とケンブリッジ大学は両者でこの組織を作っている」<sup>18</sup>

という。そこから先のことはわからない。試験問題が同じなので、ここでもA合格はどこでも同じなのだろう。JMBごとにA合格のレベルが違うというのは考えにくい。

詳しいことはわからないが、以上の問題が大学入学試験だということ、そして対象年齢はわが国の高校3年あるいは高校2年だということ、これを押さえておけばいいだろう。

CSEというのは、もう1つの中等教育修了資格試験 Certificate of Secondary Education のことであり、これは「主として、就職希望者用」だということ。もっとも翻訳時点(1993年)において、CSEとGCEのOレベルは統一されて、GCSE (General Certificate of Secondary Education) 試験となっているという。<sup>19</sup>

2つの試験を比べれば、GCEのA/Oレベル試験はSISCON-in-Schoolsのテキストに適合し、CSEの問題はそのテキストからはずいぶん離れている。前に紹介した「シックス・フォームの一般教科『科学と社会』の中に新しいコースを提供したのがSISCON-in-Schoolsのテキストなのだ」という(SISCON-in-Schoolsのテキスト裏表紙の)文言を思い起せば、このように問題が大きく違うことも納得のいくところがある。

ふつうの理科の問題のように科学的概念や法則についての知識を問うのではないことが、2つの問題に共通する。これは大きな科目枠「科学と社会」に共通である。そこで問われているのは、科学の言明は数学のような演繹的命題ではないということである。これは科学が経験科学であることと関連する。SISCON-in-Schools第2単元の日本語訳の副題にあるように、それが「科学の本性」である。ただし、よく見ると、CSEの問題の方は、科学の理論を演繹の方法と比較するという視点は弱い。

GCEは燃焼についての18世紀の流体説と19世紀の原子の振動説を比較させて、「科学理論の発展」を扱った問題を出題している。CSEの方にはそれがなく、科学理論の性格を問う問

題が続いている。最後の問題が、専門家としての科学者の意見が一致しない問題であることは共通している。

試験のシラバスからの逸脱はないが、CSEの方はバランスが悪い。私たちの感覚では、バランス良く出題しようとするが、そういうことは考えなくてもよいのだろう。ここも文化の違いといえるのかもしれない。

しかしそれでも、大枠「科学と社会」の問題が、ふつうの理科の問題とは大きく異なっている点は、両者に共通していることはまちがいない。

## 1.5 SISCON-in-Schoolsの全体の構成

ここで、SISCON-in-Schoolsの全体の構成を見ておこう。翻訳には単元が指定されているが、原書を見る限りではそこが必ずしもはっきりしない。原書テキストの裏表紙にはこのシリーズの書名が紹介されている。翻訳の単元指定がこの書名の順番に一致しているので、ここではこれに基づいて単元を構成して示しておく。単元の名称については翻訳を尊重し、同時に原書のテキスト名を付した。

<第1単元>

社会が産み出すものと社会を変えるもの—科学と技術—

Ways of Living

<第2単元>

科学は本当に確実なものだろうか—科学の本性—

How Can We Be Sure?

<第3単元>

技術・発明・工業

Technology, Invention and Industry<sup>20</sup>

<第4単元>

進化と人間

Evolution and the Human Population<sup>21</sup>

<第5単元>

戦争と科学のかかわり—原子爆弾開発と科学者—

## The Atomic Bomb

## ＜第6単元＞

エネルギー：仕事ができる能力

Energy: the Power to Work<sup>22</sup>

## ＜第7単元＞

生活の近代化と科学のかかわり—健康・食料・人口—

Health, Food and Population

## ＜第8単元＞

宇宙空間・宇宙観・フィクション

Space, Cosmology and Fiction<sup>23</sup>

翻訳されなかった部分を含めて、すべての単元の内容を見ておこう。翻訳されたのは第1, 2, 5, 7の各単元であり、これらの見出し・小見出しの名称は基本的に邦訳テキストを尊重したが、一部変更したところもある。

## 1.5.1 第1単元の内容

## ＜第1単元＞

社会が産み出すものと社会を変えるもの—科学と技術—

1. 星の世界に適用された技術
  - ・先史時代のイギリス
  - ・バビロニアの天文学
2. 古代社会の考え方
  - ・予言と予兆
  - ・感応の呪術
  - ・占星術
  - ・自然に対する態度の変化
3. 私たちの考え方：エコロジー
  - ・工業社会の出現
  - ・エコロジー
  - ・森林の伐採と開発
  - ・農作物と殺虫剤
  - ・その他の対策
  - ・肥料
4. 水の行方
  - ・上水道と下水道
  - ・工業と水

## 5. 大気を行方

- ・スモッグと大気の浄化
- ・二酸化硫黄と酸性ガス
- ・自動車の排気ガスの危険性
- ・二酸化炭素の場合

## 6. 人類を行方

- ・地下資源
- ・再利用の問題点
- ・都市の生活
- ・新技術の波紋

## 1.5.2 第2単元の内容

## ＜第2単元＞

科学は本当に確実なものだろうか—科学の本性—

1. 私たちはなぜ知る必要があるのか
  - ・専門家の言うことは確実か
  - ・論理学はどのように始まったか
  - ・演繹の規則
  - ・合意はいつ生まれるか
    - ア) 数学
    - イ) ゲーム
    - ウ) 法体系と憲法
    - エ) 宗教体系
    - オ) 分類の規則
2. それほど確実ではない
  - ・観察と一般化
  - ・帰納：うまく働くか
  - ・糸口・理論・予言
3. 科学理論の誕生
  - ・光・屈折・虹
  - ・大陸移動とプレートテクトニクス
  - ・科学理論とはどのようなものか
4. 理論の学習と実験の説明
  - ・確立された理論
  - ・私たちは学校でどのように科学を習うか
5. 科学は考えを変える
  - ・光線とは何か
  - ・燃焼とは何か

- ・フロギストン理論
  - ・空気 (あるいは酸素) 理論
  - ・まだ確実ではない
6. 科学者の意見が一致しないとき
- ・私たちに危険が及ぶだろうか
  - ・これに対して私たちには何ができるか
  - ア) 地方選挙と国政選挙で投票することができる
  - イ) 地方選出の国会議員に手紙を書くことができる
  - ウ) 地方政治にもっと関心をもつこと
  - ・公開審査

### 1.5.3 第3単元の内容

#### <第3単元>

技術・発明・工業

1. 発明の要因
  - ・市場の牽引力
  - ・科学の知識
  - ・技術の研究
  - ・工程の開発と生産
  - ・発明の後押し
  - ・特許
  - ・4つの発明物語
2. 工業における研究開発
  - ・加速
  - ・研究と利益
  - ・成功しそうなものを選び出す
3. 事例研究：プラスチックの場合
  - ・需要と機会
  - ・科学の介入
  - ・巨大化学会社の出現
  - ・最初の合成ゴム
  - ・織物づくり
  - ・ポリエチレンの急増
  - ・どこにでもあるプラスチック
  - ・プラスチックと自然環境
  - ・医療用プラスチック
  - ・ビル建設と道路建設
4. 事例研究：マイクロエレクトロニクスの

場合

- ・電線無用の波
- ・鉱石と針電極
- ・真空管の勝利
- ・それほど早く進まなかった研究の20年間
- ・レーダーがマイクロエレクトロニクスを必要とした
- ・純度を上げ細く仕上げることの難しさ
- ・シリコン・チップの出現
- ・空間を狭くする競争
- ・コンピュータ用チップ
- ・新たな開発
- ・コンピュータの未来と社会への効用

### 1.5.4 第4単元の内容

#### <第4単元>

進化と人間

1. 進化とは何か
  - ・動物と私たち
  - ・進化についての昔の考え
  - ・ビーグル号の航海
  - ・進化論の形成
  - ・進化のメカニズム
2. ダーウィンの理論を誰が信じるか
  - ・宗教上の反発
  - ・証拠に説得力があるか
3. 進化と人間の社会
  - ・社会ダーウィニズム
  - ・優生学
  - ・出産計画
  - ・人種主義
4. 遺伝はどのように働くのか
  - ・庭園修道士メンデル
  - ・遺伝子
  - ・乳児の遺伝障害
  - ・遺伝相談
5. 未来の進化は
  - ・子をもうける新しい方法
  - ・突然変異

- ・遺伝子操作

### 1.5.5 第5単元の内容

#### <第5単元>

戦争と科学のかかわり—原子爆弾開発と科学者—

1. 科学とお金
  - ・お金を出すのは誰か
  - ・お金はどこへ行く
  - ・戦争のために研究する科学者たち
2. 原子エネルギーの発見
  - ・質量とエネルギーについての理論
  - ・原子の内部
  - ・原子を分裂させる
  - ・いろいろな新聞の見出し
  - ・中性子の発見
  - ・核分裂と連鎖反応
3. 戦争が始まる
  - ・科学が秘密になる
  - ・イギリスで計画が始まる<sup>24</sup>
  - ・アメリカで計画が始まる
4. 原爆の製造
  - ・ロスアラモスの秘密の大学
  - ・ウラン爆弾：リトル・ボーイ
  - ・プルトニウム爆弾
  - ・爆発テスト
  - ・爆弾をどのように使うべきか
  - ・決定が下される
5. 責任と裏切り
  - ・一線の科学者への影響
  - ・機密保護法
  - ・原爆スパイ
  - ・世界平和か世界の破滅か
6. 核戦争の脅威
  - ・大気圏核実験と核による汚染
  - ・抗議行動と核実験禁止条約
  - ・戦略兵器
  - ・戦術核兵器
  - ・核拡散

### 1.5.6 第6単元の内容

#### <第6単元>

エネルギー：仕事ができる能力

1. 了解しようと試みる
  - ・エネルギーとは何か
  - ・昔の機械
  - ・エネルギーは不滅か
  - ・最初のエンジン
  - ・熱と電気
  - ・エネルギーは新しく生じることもなければ無くなることもない
2. 役に立つエネルギー
  - ・熱を動力に変える
  - ・電気を発生させる
  - ・石炭を使う
  - ・石油と天然ガス
  - ・原子力発電所
  - ・原子力をもっと増やすべきだろうか
3. エネルギーは生活にどのような影響を与えるか
  - ・イギリスにおけるエネルギーの使用
  - ・家庭
  - ・製造業
  - ・運輸
4. エネルギーの未来
  - ・何ができるか
  - ・太陽光エネルギー
  - ・風力と波力
  - ・地熱エネルギー
5. 開発途上国で使うエネルギー
  - ・エネルギーの世界的な使用状況
  - ・調理と家庭での使用
  - ・軽工業と農業
  - ・運輸

### 1.5.7 第7単元の内容

#### <第7単元>

生活の近代化と科学のかかわり—健康・食料・人口—

1. イギリスの公衆衛生

- ・予防衛生
- ・下水設備と上水道
- ・食料と食事
- ・予防接種
- 2. 薬の安全性
  - ・なぜ薬の安全性を確かめることが必要か
  - ・昔の人工薬
  - ・サリドマイドの惨劇
  - ・医薬品の試験検査の方法
  - ・避妊薬ピルの話
  - ・避妊とその試験
  - ・危険性と反応
- 3. 第三世界に住むということはどういうことか
  - ・農業と食料の供給
  - ・緑の革命
  - ・農業に関する適正技術
  - ・バランスのとれた食事か栄養失調か
  - ・新しい蛋白源
  - ・水によって伝染する病気
  - ・医療活動を行うための補助的人材の養成
  - ・人口爆発
  - ・家族計画と産児制限

### 1.5.8 第8単元の内容

#### <第8単元>

宇宙空間・宇宙観・フィクション

1. 昔の宇宙観
  - ・神話の創造
  - ・中世の宇宙観
  - ・暦の問題
  - ・数学か異端か
  - ・ガリレオの発見
  - ・挑戦と迫害
  - ・イデオロギーと検閲
2. 科学的な宇宙観
  - ・重力は地球の外でも働く
  - ・宇宙はどのくらいの大きさか

- ・拡大する宇宙
- ・SFが始まる
- 3. 初めての宇宙旅行
  - ・ロケットの打ち上げ
  - ・戦争で使われるロケット
  - ・成熟するSF
  - ・ロケットが宇宙軌道に打ち上げられる
  - ・月の探査
  - ・地球外生命体は存在するか
- 4. 宇宙空間をどのように利用するか
  - ・太陽系を探査する
  - ・探査衛星
  - ・商業の対象になる宇宙空間
  - ・宇宙空間での戦争

### 1.6 SISCON-in-Schoolsの特徴

各単元のテーマを見てみよう。第1単元のテーマをまとめれば、自然観の歴史とエコロジーとしてよい。入学試験のシラバスの単元名「人間と自然の相互作用」は、その本質を示している。社会における科学の技術的応用の影響を考えることはSTS教育の核心である。シラバスを見ると、この単元に含まれるものとして、エコロジーについては次のことが挙げられている。水質汚染・大気汚染・ゴミ問題などの環境問題を2つ以上取り上げること、富栄養化・森林伐採・河川の汚染問題などを取り上げて生態学的バランスの意味を理解させること、希少鉱物資源とリサイクル問題などの資源問題にふれることである。自然観の歴史については、占星術を含めて古い時代の自然観とその時代の人々の自然に対する態度に触れることが挙げられている。

近代科学以前の自然観を理解するという点は、現代的課題を中心とするのがSTS教育であるという見方からすれば、余計なものという感じがするかもしれない。ここはSTS教育のあり方を最も幅広く取った立場といえよう。下手をすると相対主義的科学観と批判されかねないものもある。それを含めて、「社会的文脈に

おける科学教育」を考えている。この点については、わが国においては支持されにくいかもしれない。

ただし、数あるエコロジーの主張の中には、一部、そういう科学観も含まれているといえるだろう。自然を前にした人間の謙虚さというものには、そこに通じるものがあるだろう。

第2単元のテーマの第1は、科学的真理は数学のような演繹の真理ではなく、基本的には観察実験に基づいた経験科学であるということを理解することである。科学理論は演繹ではなく帰納法的だということである。次に、これと関連して、経験科学であるから科学理論は変化する余地があるということ、それを光の粒子説とか波動説、あるいは大陸移動説などの事例を通して理解させることである。そして最後に、このような科学理論の本質的性格の結果として、社会問題に関する科学者の意見の不一致が生じることもあり、そのような事態に対して市民とすることができることを考えることである。

第1単元と第2単元の2つが必修で、ここでの主眼は、現代的課題を取り上げることより、社会における科学のあり方の性格を教えることである。第3単元以降において、個々の現代的課題を主眼にした単元構成がなされている。

SISCON-in-Schoolsの考えるSTS教育の特徴は、下手をすると相対主義的な科学観と見誤られる可能性もあるが、現代科学を相対化するという厳しい視点をもった科学哲学に裏づけられた科学教育になっているともいえるものである。この点については、私たちも見習う必要がある。

第3単元のテーマは工業社会における技術的開発。第4単元は進化と進化論が与えた社会的影響、優生学と人種主義の問題、そして遺伝。第5単元は原子爆弾と核の問題。第6単元はエネルギー問題。第7単元は衛生問題・薬害問題・食料問題など健康に関わる問題。第8単元は宇宙空間をめぐる、宇宙の見方の歴史的变化とロケットによる宇宙空間利用の問題。これらは

すべて、STS教育で扱う個々の現代的課題である。

先にも述べたように、SISCON-in-Schoolsの特徴は、必修の第1、第2単元の内容である自然観・科学観を広く歴史的に捉える科学哲学的視点にある。ここを含めて「新しい科学教育」を考えようとするのが新しい。この点については、わが国の理科教育においても行う価値があるように思われる。

ただし、これを現行の理科教員が教えるには、その方面の勉強を多少する必要がある。「科学と社会」に関する学修は科学史・科学哲学のコースで行うものである。理科教員はふつう物理学科とか化学科とか生物学科とかなどの専門学科の出身者であり、その方面の学修は必修でない。また教員免許状でも必要とされていない。大学時代興味関心のあった学生はもちろんその方面の知識を有しているだろうが、この方面の知識については教員個人の努力によって獲得されなければならない。教員個人の学習能力は低くなく、興味関心があればそれほど困難ではない。実際、私が知っている限りでは、熱心に教育実践研究運動をしている教師たちは、そういう形で学習している。

入学試験の科目枠としての「科学と社会」と連動して、シックス・フォームにおける「社会的文脈における科学」SISCON-in-Schoolsも制度的に存続できている。したがって、そのような入試科目枠をつくるのが、わが国においてもSISCON-in-Schoolsのような教科ないし科目を定着させる上では一番有効である。しかし、現実的に当面それは不可能である。入学試験制度としては、推薦入学試験等の利用は考えられる。しかし、このやり方で高校の科目を安定的に構成することはできない。わが国では全国一律の学習指導要領が教科科目を構成し、それが入試の科目を規定するからである。

そう考えると、英国のSISCON-in-Schoolsのような科目を構成しようとする、どこで可能かということになる。その可能性として最も

高いのは、高校における「総合的な学習の時間」を利用することである。その時間枠を利用して実践するというのが、最も実践しやすいものと考えられる。これなら、熱意のある理科教師なら誰でも実行可能なのではないだろうか。

## 2 原発事故以後の提起から

この章では、福島原発事故以後に提起された原子力発電に関わる問題を紹介したい。これらは総合学習における現代的課題の1つとなる。紹介する1つは「放射線の危険性と安全性」の問題である。もう1つはいわゆる「核のゴミ」の問題である。これらは問題としては、事故が起こる前から客観的にはわかっていた事柄といつてよいが、事故以後、とりわけ社会的に注目を集めた問題である。

ここで紹介するのは、2人の理科教師がそれぞれに中学生ないし高校生向けに書き表したものである。1つは田崎晴明『やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識』<sup>25</sup>である。もう1つは山本義隆『原子・原子核・原子力』<sup>26</sup>である。

田崎は大学で物理（と数学）を教えている。専門は統計物理である。彼の著した『統計力学Ⅰ,Ⅱ』<sup>27</sup>は、理論的にしっかりした筋の通った教科書である。現在、わたしの読んだ統計力学書の中で最も筋が通っているものである。個人的な印象として強いのは、朝永振一郎によるエルゴードの説明<sup>28</sup>が誤っているという指摘であった。昔、朝永のエルゴードの説明を読んで、「なるほど」と納得していただけに、ガーンと頭を殴られた感があり、唖然とした。一生懸命努力してやっとのこと朝永の説明を理解したが、一瞬にして崩れ去った。人生で初めて味わったショックであった。そういう意味で私に貴重な体験をさせてくれた本である。

田崎はマクロな立場に立つ熱力学の教科書『熱力学』<sup>29</sup>も書いている。この本は「筆者〔＝田崎〕なりに熱力学という学問について出発点

から考え直し、再構成して、もっとも論理的で見通しがよいと思われる形で読者に再提示しようとする試み」であり、弱点を含んだクラウドジウスの論法に従った従来の教科書とは違った観点、「仕事を主題にした操作的な視点」から熱力学を体系化したものであると、著者自ら言う。<sup>30</sup>熱力学はわかりにくいというのが通り相場だが、田崎の『熱力学』は筋がはっきりして、わかりやすい。経験科学として熱力学を論理構成しようとする立場がきわめて明解である。

2つの本とも論理的展開がしっかりして明解である。それゆえに、わかりやすいのである。そういうわかりやすさである。物理学の教科書の多くは何をやっているのかわかりにくいものになりがちである。数式自体は、もちろん理解できる。式の展開も理解できる。数学的に、式と式の展開は理解できる。理解しにくくなるのは、それらの式が成立する根拠や、その式が表わす意味である。経験科学としての物理学のその経験的な根拠を論理的に展開することが、多くの教科書では弱いのである。そういう中で、田崎の本は貴重である。

このように、統計物理の研究を本職とする田崎が「安全か危険かではなく、何がわかっていて、何がわかっていないかを、じっくりと、ていねいに」、「放射線についての基礎知識を、できるかぎり短く、正確に、そしてわかりやすく解説した本」<sup>31</sup>が、上記『やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識』である。

もう1人、山本義隆は予備校で物理を教えている。社会的には、元東大全共闘代表としての方が有名であるかもしれない。研究者としては、科学史の世界で有名である。私が読んだものだけでも、『熱学思想の史的展開』<sup>32</sup>や『磁力と重力の発見』<sup>33</sup>などがある。『原子・原子核・原子力』は、山本が予備校で行った卒業生たち向けの講演を基にしてできあがった本である。それだけに物理教師としての立場が前面に出ており、高校生にもわかるように書かれている。

田崎の本も山本の本もどちらも、物理の教師として中学生や高校生に向けて、福島事故までは世の中でほとんど知られていなかった事柄について解説したものである。主題のちがいを別にすれば、両者のちがいはその対象者のちがいくらいである。中学生向けの田崎の本には数式はほとんど出てこない。それにくらべれば、高校生向けの山本の本には、高校レベルの数式が多少出てくる。今これらの本を紹介するのは、SISCON-in-Schoolsのテキストと同じような読み物と位置づけられるからである。あるいはテキストの参考文献と位置づけられるからである。どちらにしても、彼らが説明した事柄は、原発事故以後の私たちが生きていく上で知っておくべき基礎知識となっているといつてよい。

## 2.1 放射線の危険性と安全性

田崎が説明するのは、放射線の安全性というのはどのように確保されるか？という問いに対する答えである。残念ながら、答えはこうすれば絶対的な安全性が確保されるというものではない。そもそも絶対的な安全という考え方はしない。それが安全性について世界標準的な考え方ということなのである。放射線というのは、地球の外から来る宇宙線の中にも含まれており、誰でもが日常生活において被爆しているものなのである。そういうこともあり、放射線については絶対的な安全でなく、安全の一応の目安をつくるという考え方に立っている。そのことについて、中学校で習う原子とその構造の話のレベルから、ていねいにわかりやすく説明しているのが田崎の本である。

書名にある「放射線と向き合って暮らす」というのは、単に福島の事故で出た放射性物質による放射線だけでなく、宇宙線や健康診断で使うX線やCTなどの放射線を含めて、私たちがすでに放射線の中で暮らしている現実をまずしっかり見つめ、それを認識した上で、放射性物質のことを考えよう、という意味でもある。

田崎の本は、第1章「はじめに」から第2章

「放射性物質と放射線」、第3章「原子力と原子力発電所事故」、第4章「放射線の被曝と健康への影響」、第5章「放射性セシウムによる地面の汚染」、第6章「放射性セシウムによる食品の汚染」、そして第7章「さいごに」と続く。これに2つの付録がつく。

### 2.1.1 原子核崩壊で発生するエネルギーは化学反応の10万倍にもなる

第2章「放射性物質と放射線」では、原子核崩壊反応で出るエネルギーが化学反応より10万倍以上も大きいことが強調される。

化学反応は中学校で習うように、原子のくつき方を組み替える反応だが、化学反応で出る熱は、例えば水素分子と酸素分子から水分子ができる反応では5 eV（電子ボルト）程度である。それに対して、福島原発事故で出た放射線のセシウム137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) の原子核崩壊において、セシウム137が安定なバリウム137 ( $^{137}\text{Ba}$ ) に崩壊するときには、ガンマ線（光子）とベータ線（電子）を放出する。このとき光子のエネルギーは約60万 eV、電子のエネルギーは約20万 eVである。

このように、原子核崩壊反応は化学反応に比べて10万倍以上のエネルギーを出す。

原子核は陽子と中性子が核力で結びついた堅い塊で、そのまわりを陽子と同じ数の電子が「まわっている」というのが、原子の構造である。原子核の大きさは原子の10万分の1程度しかない。原子核は「すごく堅い」のだが、その中には不安定なものもある。原子核の安定性を決めるのは陽子と中性子の個数の割合にある。たとえば、陽子55個と中性子82個のセシウム137は不安定で、陽子56個と中性子81個のバリウム137は安定である。セシウム137は、自然に、バリウム137に崩壊する。陽子数と中性子数の和を質量数といい、原子核の崩壊で質量数は変わらない。セシウム137がバリウム137に崩壊するときには、セシウム原子核の中の中性子1個が陽子と電子に分かれると考えればよ

い。そうして、陽子数が1個多く中性子数が1個少ないバリウム137になる。電子の方は原子核の中にいられなくて、外に放出される。これがベータ線である。そして原子核崩壊では膨大なエネルギーが解放されるから、これが光子（ガンマ線）となって放出される。

原子核の崩壊は確率的なもので、いつ起きるとは予言できない。予言できるのは、膨大な数の原子核の量が半分に減少する時間である。この時間を半減期といい、これは原子核ごとに決まっている。セシウム137の半減期は30.2年、約30年である。半減期は原子核の不安定さを表わすと考えてよい。半減期が短くなればなるほど不安定さが増す。ヨウ素131 ( $^{131}\text{I}$ ) の半減期は約8日だから、ヨウ素131の方がセシウム137より不安定である。

半減期8日のヨウ素131は、 $8 \times 2 = 16$ 日で4分の1となり、 $8 \times 10 = 80$ 日で1000分の1となる。一ここの詳しい計算は理科の学生向きになるが、半減期を10倍するという事は半減期を10回繰り返すことになる。そこで $2^{10} = 1024 \approx 1000$ を使う。一すると、 $80 \text{日} \times 2 = 160 \text{日}$ で $1000 \times 1000 = 100 \text{万}$ 分の1に減少し、240日では1億分の1にまで減少する。したがって、ヨウ素131が福島原発の爆発で仮に1kg出たとしても、1年経つとその量は1gの100万分の1以下となり、その影響はほとんど無くなると考えてよい。それに対して、セシウム137の半減期は30年だから、60年で4分の1、90年で8分の1、300年経ってやっと1000分の1に減少する。このように、不安定さが中途半端にながいのものほど、影響がながく残る。

この半減期の性質を変えることはできない。ということは、放射性物質を人工的に減らすことはできないということである。つまり、放射性物質の影響をコントロールすることがほとんど不可能だということになる。

### 2.1.2 被曝の健康への影響

第3章「原子力と原子力発電所事故」では、

原子力発電の原理と事故の簡単な説明をする。ウラン235 ( $^{235}\text{U}$ ) に中性子を衝突させ核分裂させると、複数の中性子が生じ、この中性子がまた別のウラン235の原子核を分裂させて、次々と連鎖的に核分裂反応が起きていく。このように連鎖反応によって、巨大なエネルギーを取り出し続けることができる。これが原子力発電の中心的な原理である。

ウラン235の分裂の仕方はいろいろあるが、その中にセシウム137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) とルビジウム95 ( $^{95}\text{Rb}$ ) に分裂し、中性子4個が生じるものがある。<sup>34</sup> 核分裂反応後にはさまざまな放射性物質が残る。これらが爆発（水素爆発）で飛び散ったのが、原発事故である。

第4章「放射線の被曝と健康への影響」がこの本の中心である。放射線被曝には内部被曝と外部被曝がある。内部被曝とは体内に放射性物質を取り込んで、そこからずっと被曝され続けるもので、事故の初期に問題となったのは、ヨウ素131の内部被曝である。もう一つは外部被曝である。体外にある放射性物質から放射線を浴びることである。問題になる放射線はほとんどガンマ線である。

「被曝による体へのダメージ」を表わすのが、実効線量でその単位が「シーベルト」(Sv) である。実効線量は内部被曝によるものと外部被曝によるものを合わせたものである。では実効線量をどうやって決めるか。それは、ICRP (国際放射線防護委員会) の作った換算表による。原子核ごと、外部被曝と内部被曝 (内部被曝はさらに吸入摂取と経口摂取に分けてそれぞれに)、年齢ごとに、作られている。単位はSv/Bqである。

このBq (ベクレル) というのが、純粋な物理量である。1 Bqというのは1秒間に1個の原子核が崩壊する量である。原子核ごとに半減期がわかっているから、その原子核が1 Bqとなるために必要な個数 (あるいはモル数) はすぐわかる。<sup>35</sup> 結局、原子核ごとに1 Bqに対応するモル数は半減期がわかれば、それでわかるとい

うことである。Svは体に対するダメージの量だから、核分裂によって何個の放射線が出てくるか、そのエネルギーがどれくらいかによって、1回の核分裂でも原子核の種類によってダメージは異なる。それを、いわば経験的に換算する表をICRPが作成しているというわけである。

なぜ放射線が体にダメージを与えるのかといえば、それは原子核分裂反応で出る放射線のエネルギーが化学反応で出るエネルギーに比べられないほど大きいからである。放射線のエネルギーはDNAを切断してしまう。切断されたDNAでは、細胞分裂がうまくいかなくなる。それによって、人間もガンなどになる。

### 2.1.3 ガンのリスクについての「公式の考え」

被曝した放射線の量が多ければ、当然、ガンのリスクは高くなる。ただし、科学的にわかっているのは、放射線の量が多い場合であって、低線量被曝の場合は、実は、専門家の意見は一致していない。

ICRP（国際放射線防護委員会）の「公式の考え」は、低線量被曝のリスクについて「線形閾値無し仮説」と「線量・線量率効果係数」という2つの考え方をとっている。

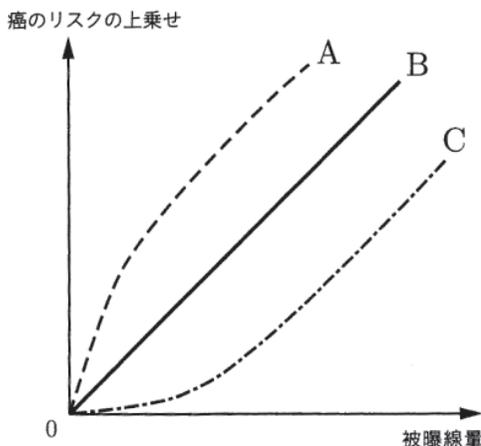


図1 低線量での被曝についての典型的な考え方を示す模式図

〔出典：田崎，2012年，p. 65〕

「線形閾値無し（直線閾値無し）仮説（LNT=Linear-non-Threshold）」というのは、わからない低線量被曝の領域にも、「被曝線量」と「ガンのリスクの上乗せ」との間に高線量被曝で成り立つ線形（比例）の関係を認めることである。図1でいうと、Bである。

ちなみに、Aは低線量でのガンのリスクは高線量でよりも大きくなると考える場合であり、逆にCは小さくなると考える場合である。

わかっていることは、高線量被曝では「被曝線量」と「ガンのリスクの上乗せ」との間に線形関係（直線的な関係）が成り立つということである。グラフで示せば、図2のようになる。それがICRPの「公式の考え」である。このグラフは、あくまで考え方を示したものであって、被曝0 mSvで「ガンによる生涯死亡率25%」となっているのは単なる仮定である。そしてこのグラフが0 mSvからずっと直線的になっているのは、「線形閾値無し仮説」を使っているからである。念のために言うが、線形になるのは、「ガンのリスクの上乗せ」分と「被曝線量」との関係であるから、被曝0でもガン死亡率は0になることはない。

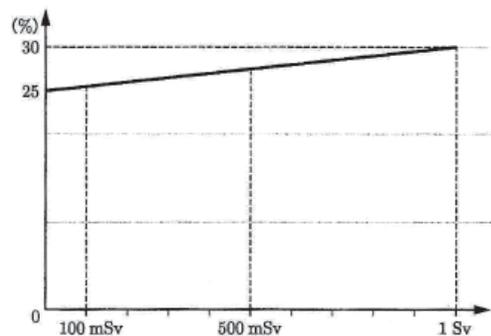


図2 ICRPの「公式の考え」を示したグラフ  
〔出典：田崎，2012年 p. 63〕

もう少し、正確に言えば、人間の日常生活には宇宙線など「自然被曝」がある。この自然被曝を除いた「人工的被曝」によって、「ガンによる生涯死亡率」がどの程度上昇するかを、このグラフは示しているのである。自然被曝には

花崗岩からのものもあるので、住む地域によって異なるが、世界平均は年間2.4 mSv、日本の平均は2.09 mSvであるという(田崎, 51-52頁)。ICRPの「公式の考え」のもう1つの仮説、「線量・線量率効果係数」というのは、次のような考えである。

低線量被曝でのガンのリスクを、「線量・線量率効果係数」の2で割って小さく見積もるとのことである。小さく見積もる理由は、低線量被曝は「ゆっくりとした長期的な被曝」だから、その時間の中にDNAの傷が治されると見込まれるからだという。係数の2という数値は、ICRPが選んだものだ。この低線量というのを、どの値から適用するかというと、「通算の実効線量が0.2 Sv以下であるか、または被曝した線量率が0.1 Sv/h以下のとき」(田崎, 66頁)としている。

したがって、先に説明した図1の「線形閾値無し仮説」についての記述は、一部訂正されなければならない。直線Bが「線形閾値無し仮説」だと説明したが、「線量・線量率効果係数」の考えをそこに追加すれば、グラフの直線Bは被曝量0.2 Svまたは線量率0.1 Sv/hの点で折れ曲がることになる。Cのような曲線になるわけではないが、Cに似たような「下向きに折れた直線」になるのである。ICRPが「線形閾値無し仮説」と「線量・線量率効果係数」の考えで成り立っているということは、直線Bの「線形閾値無し仮説」が、今述べたように修正されるということである。<sup>36</sup>

#### 2.1.4 低線量被曝の危険度についての様々な考え方

ここで、低線量被曝の危険度についての考え方について、田崎の本を離れて、より詳しく紹介しておこう。

図3を見てほしい。これは、福島事故が起きる前に、原発批判者である小出裕章が出版した本<sup>37</sup>から取ったものである。

今さきほど、ICRPの考え方は直線Bから「下

向きに折れた直線になる」と述べたが、正確には、直線はつながらない。図3の中にあるようになる。図3の実線が高線量での考え方で、ICRPの低線量での考え方は0.2 Sv (または0.1 Sv/h) の点で不連続となる。これが正しい。

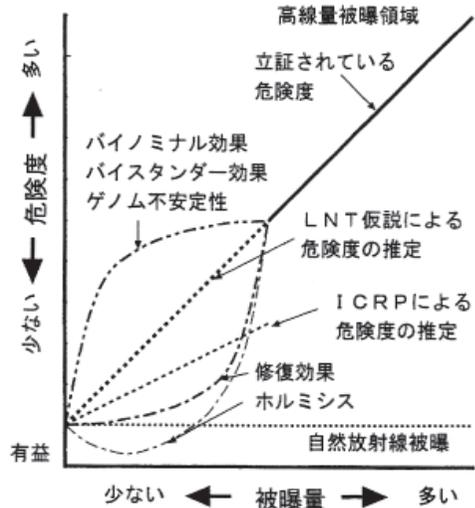


図3 低線量被曝の危険度についての考え方  
【出典：田崎, 2012年, p. 65】

小出は原発批判者だが、図3には原発推進派から反対派までの様々な考え方が載せられている。ここでは、長くなるが公正を期して、小出の文章をそのまま引用しておこう。

「原子力を推進する人たちは、「直線・しきい値なし」仮説すら認めようとせず、50 mSv以下の被曝領域では被曝の影響がないかのように主張しています。

生物には放射線被曝で生じる傷を修復する機能が備わっている(修復効果)、あるいは放射線に被曝すると免疫効果が活性化される(ホルミシス)から、量が少ない被曝の場合には安全あるいはむしろ有益だというような主張すらあります。そういう主張を含め、低線量被曝領域における危険度をどのように考えるかを図3に示します。

国際放射線防護委員会(ICRP)は「生体防護機構は、低線量においてさえ、完全には効果

的でないようなので、線量反応関係にしきい値を生じることにはありそうにない<sup>38</sup>と述べ、放射線の被曝はそれが低線量であっても影響があることを認めています。

ただし、そのICRPも実は「直線・しきい値なし」仮説を使っていません。ICRPは、低線量での被曝影響には線量・線量率効果係数(DDREF)と呼ぶ係数を導入して、影響を半分に値切っているのです。

ところが、人間の被曝についてもっとも充実したデータを提供してきた広島・長崎の原爆被曝者データ<sup>39</sup>は、図4に示すように、むしろ低線量になるに従って単位線量あたりの被曝の危険度が高くなる傾向を示しています。

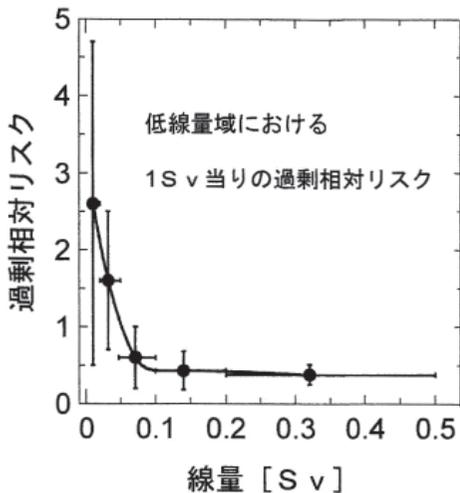


図4 被曝者データが示す危険度 ([Sv]:シーベルト)  
〔出典：小出，2012年，p.16〕

保健物理学の父と呼ばれ、ICRP委員などを歴任したK・Z・モーガンさんが、「非常に低線量の被曝では高線量での被曝に比べて1レムあたりのガン発生率が高くなることを示す信頼性のある証拠すらあり、それは超直線仮説と呼ばれる<sup>40</sup>と述べているのも、そうした証拠を踏まえているからです。

そして、とくに最近の科学の進歩によってバイスタンダー効果(被曝した細胞から隣接している細胞に被曝情報が伝えられること)、遺伝

子(ゲノム)不安定性と呼ばれる継世代影響などの生物影響が発見され、低線量での被曝は高線量での被曝に比べて、単位線量あたりの危険度がむしろ高いというデータが、分子生物学的にも裏付けられてきました。<sup>41</sup>

このように、小出は低線量被曝の危険度についてまとめている。先に述べたように、この指摘は福島事故以前になされたものであることは、注意しておく必要があるだろう。低線量被曝の危険度について意見の相違は大きい。そういう理由もあって、田中はICRPの考え方に限定しているのだろう。

### 2.1.5 放射線を「気にする自由」と「気にしない自由」

さて、田中の本に戻ろう。第5章と第6章は、応用編である。第5章は放射性セシウムによる地面の汚染についての話題である。空間線量率と地面の汚染密度との関係や、空間線量率から大まかに年間の被曝線量を見積もる方法などを述べている。第6章は放射性セシウムによる食品の汚染についての話題である。これは内部被曝の問題であるが、放射性セシウムの内部被曝を自然界の中にずっと昔からあるカリウム40による内部被曝と比較する方法などが紹介されている。

第7章の「さいごに」では、自ら「玉虫色」的だと述べているが、「気にする自由」と「気にしない自由」を主張して終わっている。放射線のことを「気にしない」で生きている者が、周囲の人間に自分と同じように「気にしない」生き方を要求するのはよくない。同じように、その逆の場合もよくない。放射線のことを「気にして」生きている者が、周囲の人間に自分と同じように、放射線を「気にした」生き方を要求するのはよくないということである。

「気にする人」と「気にしない人」が同じ社会で暮らしていけば、意見の不一致や不便なことは出てくるに違いないが、それは仕方のないことで、「日本は戦争以来の最大の危機に見舞

われたのだから、不都合が出てくるのも無理はない。どちらか一方が(あるいは、両方が)ある程度の我慢をして譲らなくてはならないだろうが、そこは理性的に話し合っただけで決めていくしかない。」(田崎, 120頁)

## 2.2 「核のゴミ」の問題

山本がとくに注意を向けるのは、原発の正常な運転において発生する原子核反応後の「燃えかす」、「核のゴミ」の問題である。田崎の本が事故による危険の問題に焦点をあてたのに対して、山本は原子力発電というシステムそのものがもつ問題に焦点をあてた。

山本の『原子・原子核・原子力』の章立ては次のようになっている。第1章「原子論のはじまり」、第2章「イオンと電子の発見」、第3章「X線と放射線の発見」、第4章「アインシュタインと光子仮説」、第5章「原子モデルをめぐって」、第6章「原子核について」、そして最終章の第7章「原爆と原発」。最終章で扱うテーマ原発問題に向けた教科書という体裁である。レベルも高校生を対象にしているだけに、本格的なものになっている。

### 2.2.1 高校レベルの物理と化学を使って原子核の大きさまで推定する

第1章は、高校化学で扱う化学反応において成立する質量保存の法則やアボガドロの法則を確認し、理想気体の状態方程式とその説明としての気体分子運動論をみる。気体分子運動論の説明を理解するために、ニュートンの運動方程式から仕事とエネルギーの関係という力学の基本について解説する。最後の方の計算は、分子を剛体球と仮定して、クラウジウスが求めた平均自由行程と半径の関係式やマクスウェルが求めた平均自由行程などについても説明している。高卒レベルの程度になっている。

第2章は電磁気学の初歩で、高校で習う点電荷が作る電位や電気分解のファラデーの法則を説明し、そこから水素イオンの比電荷について

述べる。また、磁場によるローレンツ力によってゼーマン効果を説明し、電子の比電荷について述べる。そして、陰極線の実験についてトムソンが求めた比電荷が電子のそれと同じになることから、電子の実在が信じられる1つの合理的理由を示す。

第3章は、レントゲンによるX線の発見から、ベクレルやキュリー夫妻の研究、ラザフォードらによる放射線の研究について述べ、放射線が研究者の人体に与えたと推測される影響について述べている。

第4章はアインシュタインによる光電効果の説明からはじまる。これは光についての粒子説に立つもので、アインシュタインが説明で使う数式は高校物理でも紹介される簡単なものである。コンプトン効果でも粒子説の正しさが確認され、結局、光子の波動性と粒子性が確認される。

第5章は、太陽系に似た有核原子モデルがラザフォードによって確認されたことを述べ、クーロンポテンシャルを使った高校程度の簡単な古典力学の計算によって、原子核の大きさの最大値を推定してみせる。しかし、古典物理学ではどうしても原子の安定性と原子から出てくる光のスペクトルについて説明できない。そこを説明したのがボーアの原子モデルである。この計算は高校物理でも紹介される。化学で教える原子核を「まわる」電子の殻構造について、大学レベルの量子論の結果の概要を述べ、最後に第1次大戦へ向かう中で多くの科学者が国際協調主義から熱狂的な愛国主義となり、率先して戦争に協力していった事実を紹介している。

第6章は原子核についての研究である。トリウム自然崩壊現象についてのラザフォードとソディの研究を、高校で教える半減期についての計算を使いながら説明する。窒素の原子核に $\alpha$ 粒子をぶつけて、酸素と水素の原子が生成したラザフォードの実験結果から、5章の計算を使って原子核の最小値を推定する。5章で最大値を推定したので、この両方によって、原子核

の大きさが $10^{-14}\text{m}$ 程度と推定されることがわかる。

推定に使った計算は、古典力学の運動エネルギーとクーロンポテンシャルのエネルギー保存則なので、高校レベルの物理で原子核の大きさを計算してみせている。

## 2.2.2 核力を推定する

この後、第6章の後半は中性子発見の事実を述べ、原子核が陽子と中性子とからなることが判明すると、原子核を構成する陽子と中性子を結びつける核力について説明する。ここは大学レベルの物理の話である。

安定な原子が原子番号92のウランで終わるということから、核力は陽子同士に働くクーロン力の90倍程度であると推測される。なぜなら、原子核では、周辺近くにある陽子1個に働く他の陽子からの斥力は加算され、原子番号にはほぼ比例するからである。そして、核力は、近くにある陽子や中性子にしか力を及ぼさない短距離力と考えられる。

これらのことから、原子核における核力の位置エネルギー（核力のポテンシャル）の大きさが、数 $10\text{MeV}$ と推定されることが示される。

中性子発見の後には、原子核分裂の連鎖反応の発見がくる。これが原子爆弾と原子力発電の原理である。人工的な原子核崩壊の実験では、ある原子核にある粒子をぶつけて、その原子核を崩壊させたのだが、この崩壊はいわば1回切りのものである。連鎖反応というのは、ある粒子をぶつけると、崩壊によって同じ粒子が出てきて、それがまた別の原子核を崩壊させていくというようにして、原子核の分裂反応がいつまでも続くものである。

発見されたのは、ウラン235 ( $^{235}\text{U}$ ) に中性子をぶつけることによって、1回の核分裂で複数の中性子が飛び出してくる連鎖反応である。ウラン235の半減期は $7 \times 10^8$ 年である。天然のウランの中にはわずか0.7%しか含まれていない。だから、天然ウランを濃縮しなければ、

連鎖反応は起こせない。

ウラン235が1個分裂するときに発生するエネルギーは $200\text{MeV}$ ほどになる。この値の見積もりを山本は2つの方法で示して見せる。1つは、原子番号92のウランが同じ原子番号46の2つ原子に分裂したとする。その原子核の分裂直前の状態を、2つの電荷が原子核の大ききの1.5倍程度の距離 $1.5 \times 10^{-14}\text{m}$ 離れた瓢箪型になっているとする。このときの分裂直前の位置エネルギーが分裂した電荷の運動エネルギーとなると考えられる。位置エネルギーは、距離 $1.5 \times 10^{-14}\text{m}$ 離れた正電荷 $46e$ の2つの電荷のクーロン斥力による位置エネルギーだから、それを計算して求まる。クーロン力による位置エネルギーは高校でやる計算である。

もう1つの方法は、核子1個当たりの結合エネルギーから求める方法である。これは質量エネルギーを使う方法である。アインシュタインの特殊相対性理論が提起した質量エネルギーについては、その結果だけは高校でも習う。そして実際、核子1個当たりの結合エネルギーのグラフを使った問題は、大学入試で出題される問題である。このことから、質量数235とその半分の質量数120辺りの核子1個当たりの結合エネルギーを比べて、その差を質量数235（核子の個数）倍して、 $200\text{MeV}$ という値を求めることができる。

これは概数で、ここで重要なのは桁数である。それは化学反応の値、数 $\text{eV}$ の100万倍のエネルギーだということである。

もう1つ大事なことは、核分裂で失われた質量、すなわち欠損質量がエネルギーになるという質量エネルギーの法則は全く正しいのだが、そこで失われる質量は、元の質量の1000分の1程度にしか過ぎないということである。核反応の前後においても、質量数は変わらない。陽子と中性子を合わせた核子の個数は変わらないのである。ということは、核反応後に残る物質の量は反応前の物質の量とほとんど変わらないということである。

核分裂後に生成するのは基本的に不安定な放射性元素である。それがさらにそれぞれの半減期にしたがって自然崩壊を繰り返す。そうして、やっと安定な元素に到達する。ウラン235の分裂には様々な分裂の連鎖の系統があるが、分裂後に生成するのは基本的にすべて不安定な放射性元素である。これが「核のゴミ」といわれるものである。

そして、「核のゴミ」は最初にあったウランとほとんど同じ質量だけ生成されるのである。

### 2.2.3 使用済み核燃料の問題

第7章ではこの「核のゴミ」がどの程度のものかが見積もられる。

第6章の最後で見積もったように、ウラン235が1個分裂したときに生じるエネルギー(発熱量)は、200MeVなので、普通の単位であるジュール(J)に直すと、それは $3.2 \times 10^{-11} \text{J}$ になる。

したがってウラン1mol(モル) =  $6.0 \times 10^{23}$ 個では、

$$3.2 \times 10^{-11} \text{J} \times 6.0 \times 10^{23} = 1.9 \times 10^{13} \text{J}$$

他方で、現在の大型原子力発電所の平均的な出力は100万kWである。単位としてW(ワット)は、J/sに等しい。kW(キロワット)はその1000倍だから、

$$\text{出力 } 100 \text{ 万 kW} = 100 \times 10^7 \text{ J/s}$$

の発電所の1日当たり、つまり

$$24 \times 60 \times 60 \text{ s} = 8.6 \times 10^4 \text{ s}$$

当たりの発電量は、

$$100 \times 10^7 \text{ J/s} \times 8.6 \times 10^4 \text{ s} = 8.6 \times 10^{13} \text{ J}$$

これだけの発電量を得るためには、

$$8.6 \times 10^{13} \text{ J} \div (1.9 \times 10^{13} \text{ J/mol}) = 4.5 \text{ mol}$$

のウラン235が必要となる。

ウラン235は1molで235gだから、4.5molでは、

$$235 \text{ g} \times 4.5 = 1057 \text{ g} \approx 1 \text{ kg}$$

つまり、100万kWの原発を1日稼働させるためには、約1kgのウラン235が必要となるわけである。ちなみにこれは、広島に投下された原爆1個分のウラン235の量に相当する。

実際には、熱効率を考えなければならないから、この量では足りない。発生した熱エネルギーのうち電気エネルギーに変換されるのは、3分の1程度なので、3kgのウラン235が必要となる。1年では約1トンとなる。ちなみに、「最新型の火力発電所では、熱効率は50%に近く、原発の熱効率がいかに悪いかかわかる」(山本, 209頁)という。

先ほど述べたように、「核のゴミ」は燃やしたウラン235とほぼ同じ量排出するから、100万kWの原発1基で毎年1トンの放射性廃棄物を生み出す計算となる。広島に落とされた原爆の1000倍の「死の灰」が毎年出るわけである。

さらに、天然ウランのほとんどはウラン238だから、ウラン235を3~5%に濃縮したものを燃料として使う。したがって、燃料として必要な濃縮ウランは(ウラン235を3%として)約30トン余りとなる。さらにいえば、燃焼効率からいってウラン235が完全なくなるまで使うことはないので、実際にはもう少し必要である。

こうして計算すると、1年後には使用済み核燃料が約30数トン残されることになる。現在日本全体で1万6千トンの使用済み核燃料が残されている。

使用済み核燃料の内訳は、「燃え残り」のウラン235の他は、大部分が核分裂にあずからないウラン238だが、ウラン238と中性子が反応して作られた<sup>239</sup>Pu(プルトニウム)が1%ほどあり、ウラン235の「燃えかす」である「死の灰」が数%ある。

「死の灰」の中には、ヨウ素131(半減期8日)やセシウム137(半減期30日)やストロンチウム90(半減期29日)などその他、放射性物質が含まれている。プルトニウムは、半減期が2万4千年と特に長く、高エネルギーのα線を放出するとともに危険な物質である。

### 2.2.4 安全にするための時間

いったいどの程度の時間をかければ、これら

の危険な放射性物質を安全にすることができるか。

結論を言えば、まず、この問い方、問題設定の仕方が間違っている。「安全にする」と能動態で言ったが、人間が放射性物質に働きかけてそれらを無害な物質に変えることはできない。できることは、ただそれらの放射性物質が自然崩壊して安定な原子核に変換するまで待つだけである。この点、原子の結合の仕方を変換する化学反応を扱う場合と決定的に異なる。原子核反応は核子（陽子と中性子）の結合を変換するのだが、それには膨大なエネルギーが必要である。

ウラン235に中性子をぶちあてて核分裂の連鎖反応を起こして巨大なエネルギーを取り出したのが原発の技術だが、放射性物質を人工的に安定化させる技術はない。そのためには、これ以上のエネルギーを外から与えなければならないことになるはずだが、人類にそのような技術はない。だから、放射性物質が安定な原子核になるまで待つ以外にないのである。

ではどの程度待つのか。それは半減期から推定できる。半減期の10倍の期間で放射性物質は1000分の1に減少する。福島で事故で飛散したセシウム137の場合、300年待てば1000分の1の量に減少する。プルトニウムでは24万年待たないと1000分の1にならない。もちろん1000分の1になれば安全というわけにはいかない。現在あるプルトニウムの量が多ければ無害化にはそれだけ長い時間が必要だ。24万年というのは、単なる目安である。

10万年というのは、日本列島の形が変わる時間である。2013年12月20日付の『東京新聞』は、千葉県柏市の12万～13万年前の地層から鯨一頭の頭や肋骨、背骨の化石、さらに複数種類の鮫の歯の化石数百点が見つかったことを伝えている。場所は、現在では東京湾から20キロメートルも離れているが、そこはかつて海だった。房総半島は10万年ほど前、本州から切り離されていたわけである。

また10万年というのは、人類の進化にかかわる長さでもある。SISCON-in-Schoolsの1冊には、20万年前から5万年前まではネアンデルタール人で、5万年前からが現代人だという解説図が載せられている。<sup>42</sup> 今から10万年後は次の段階の人類になっているかもしれないのだ。SFじみたと思うかもしれないが、10万年とはそういう長さなのだ。

その間、プルトニウムを安全に保管するのは至難の業である。後先を考えず作ってしまったというほかない。しかし、もうすでにそこに存在する以上、それを安全に保管しなければならないのだ。

短いセシウム137で考えてみても、数百年が必要である。10世代以上の長さである。このような長さに渡って、人間が何かを管理したことがあるのだろうか。それでさえ、想像を絶する長さである。

### 3 CO<sub>2</sub>は地球温暖化の原因の6分の1でしかない

この章では、CO<sub>2</sub>の温室効果は地球温暖化の6分の1しか説明しないものであって、地球温暖化のほとんど、6分の5の原因は自然変動によるとする説を紹介する。地球の気候は1200年頃から1800年頃にかけて「小氷河期」にあり、1800年頃から「小氷河期」からの温暖化が始まっている。したがって、CO<sub>2</sub>が温暖化の原因だと考えるのは誤りである。赤祖父俊一はこのように主張する。<sup>43</sup>

赤祖父はアラスカ大学国際北極圏研究センター所長を勤めていた北極圏研究者である。

#### 3.1 小氷河期の存在

図5は、木の年輪から推定した800～2000年の気温変化のグラフである。<sup>44</sup> 気温変化の基準点（0℃の点）は現在の気温である。1000年頃の中世に温暖期があり、その後1200年頃から1800年頃にかけて小氷河期があり、1800年頃か

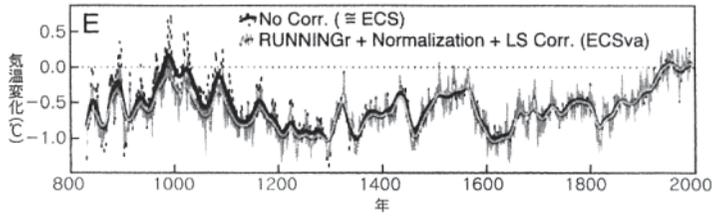


図5 木の年輪から推定した気温変化〔出典：赤祖父，2008年，p. 64〕

ら小氷河期からの回復があることが示されている。

現在の地球温暖化は、小氷河期からの回復の温暖化として考えるべきだというのが、赤祖父の主張である。

この点の証拠をもう少し示そう。

図6を見てほしい。<sup>45</sup> これは、わが国の諏訪湖で観測されてきた「御神渡（おみわたり）」の日の記録である。御神渡というのは、湖面が

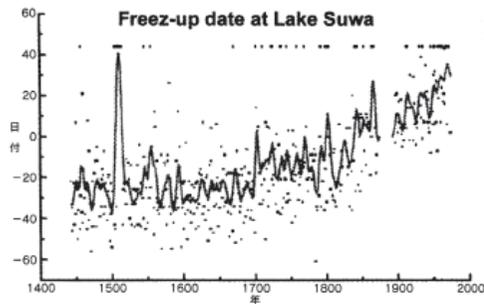


図6 諏訪湖の御神渡の日の記録  
〔出典：赤祖父，2008年，p. 87〕

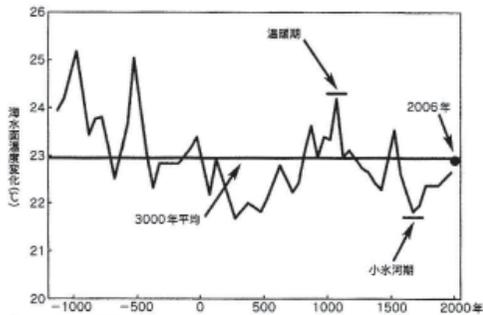


図7 北大西洋の海底堆積物の酸素同位体 ( $^{18}O$ ) から推定した気温  
〔出典：赤祖父，2008年，p. 90〕

凍結した後まもなく、「神様の渡り道」のように氷の盛り上がりができる現象である。日付の基準点(0日)は1月1日である。グラフから御神渡の日が1700年頃より直線的に遅くなっていることがわかる。つまり

1700年頃より気温が上昇しているということである。

図7は、北大西洋の海底の堆積物に含まれる酸素同位体 ( $^{18}O$ ) から推定した海水面の温度である。<sup>46</sup> 先に示した図5と同様、1000年頃に温暖な時期があり、その後小氷河期があり、そして1700年頃より温度が上昇している。さらに、紀元前500年頃と紀元前1000年頃は現在よりも海水面温度が高かったことも示されている。現在の温暖化は決して「かつて無いほどの異常」ではないのである。

図8は、過去少なくとも4回繰り返した大氷河期において、気温と二酸化炭素（炭酸ガス）の量の変化に非常によい相関関係があることを示している。これは気温の上昇が二酸化炭素によるものだとする証拠として使われてきたものである。

しかし、このグラフが示すのはあくまでも気

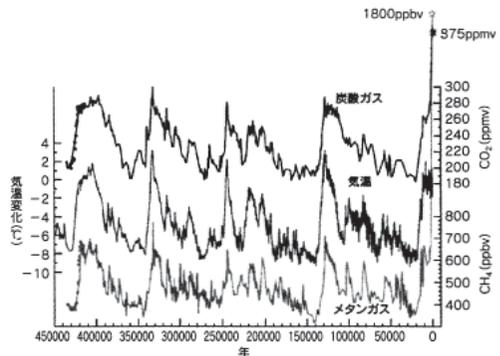


図8 過去450,000年間における大気中の炭酸ガス量(上)、気温(中)、メタンガス量(下)の変化、南極中部のポストック基地の水コアの解析による  
〔出典：赤祖父，2008年，p. 57〕

温と二酸化炭素の相関関係であり、因果関係を示すものではない。二酸化炭素の増加が気温の上昇に先行すれば、二酸化炭素の増加が気温の上昇の原因だといえるが、このグラフからはそこまでわからない。

「現在南極の氷を使って発表されている研究段階では、気温が約800～1300年ほど先行しているという結果が出ている。すなわち、炭酸ガスの増加によって気温が上昇したのではなく、気温が上昇したために炭酸ガス量が増加したということである。」(赤祖父, 57-58頁)

### 3.2 CO<sub>2</sub>は地球温暖化の6分の1の原因ではない

図9は過去100年間の地球全体の温暖化を示す有名なグラフである。問題はその原因である。

その原因として二酸化炭素を強調する立場からは、このグラフがとくに1960年代から急増しているように見える点を重視することになる。理由はわからないが、1940頃に小さな温暖化の頂点があり、そこから1960年頃に向けて気温が下がっていき、そこから温暖化が進んでいくように見えるからである。

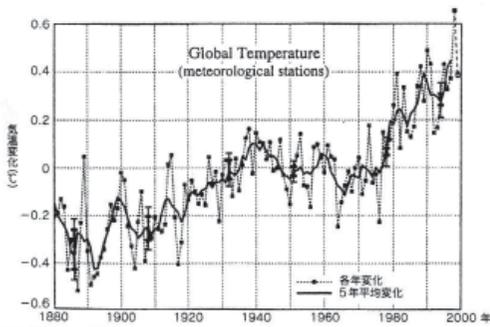


図9 地球の気温変化 (IPCC)  
[出典：赤祖父, 2008年, p. 38]

問題はこのようなグラフの読み取りが正しいかということである。赤祖父はそれに対して、否と答える。このグラフは直線的な上昇を示すものと解釈すべきである、というのが赤祖父の立場である。統計的には、図10のように直線的に見ることも妥当なのである。

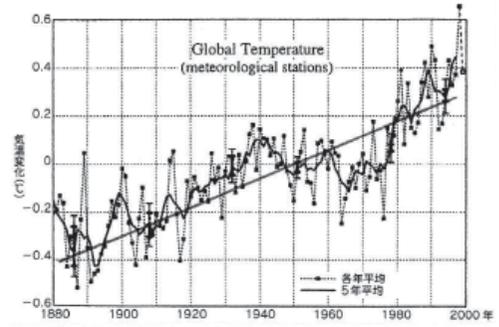


図10 図9を直線で統計的にしたもの  
[出典：赤祖父, 2008年, p. 77]

そのことについて説明していこう。

図11は、図9にある1880～2000年の地球全体の平均気温の変化 (Global) に、同じ時期の北極圏の気温変化 (Arctic) と化石燃料 (石炭・石油・天然ガス) の使用量を加えたものである。北極圏の気温は、北極海の海岸に沿った観測点の気温である。北極圏の気温変化の傾向が基本的には地球全体の気温変化と同じ傾向にあり、1940年頃の気温の上昇は地球全体の気温変化より顕著に出ていることがわかる。化石燃料の使用の急速な増加は1946年頃からである。

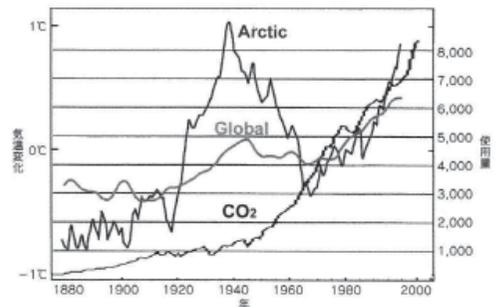


図11 (Global) 地球の平均気温の変化。  
(Arctic) 北極圏での気温変化。  
(CO<sub>2</sub>) 石炭, 石油, 天然ガスの使用量。  
単位は1000万トン。  
[出典：赤祖父, 2008年, p. 53]

図12の(上)は観測期間を1725～2000年に広げたものである。もちろん温度計で測定した記録はないから、測定手段を変更しなければならない。北極海の孤島セバナヤゼムラヤ (Severnaya Zemlya) 島の氷河から氷コアを

取り出して、そこに含まれている酸素同位体 ( $^{18}\text{O}$ ) の割合から気温変化を推定したものである。<sup>47</sup>

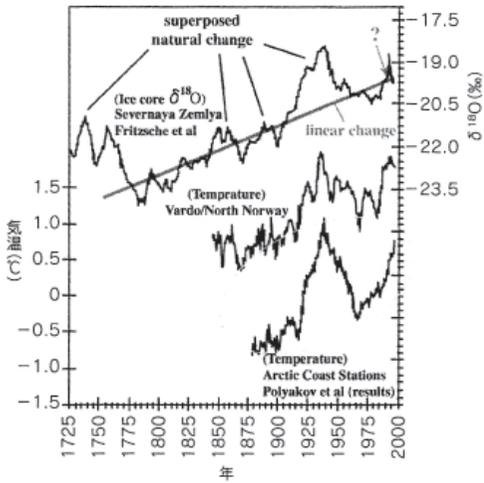


図12 (上) 北極海の島の氷河のコアの中の酸素同位体 ( $^{18}\text{O}$ ) から推定した1725～1995年の気温変化。  
(中) ノルウェーでの気温変化。  
(下) 北極圏での気温変化。  
[出典：赤祖父，2008年，p. 81]

この方法は、過去の気温を推定する方法として最も信頼されている方法である。(中)のグラフはノルウェーにおける寒暖計の記録である。(下)のグラフは図11にある北極圏の気温変化を再現したものである。(中)と(下)のグラフと(上)のグラフの動きが基本的に同じであることがわらう。そこから、気候変化の期間を1725～2000年に広げた気温変化が、おおよそ地球全体の気温変化を示していると見てよいことがわかるだろう。

ここから、赤祖父はグラフにあるように、図10に引いた直線の変化が1800年前後まで延ばせることを示す。つまり、図9のように、100年程度の期間を見ただけではわからない気温変化の傾向も、観測期間を図12(上)のように延ばすことによってより確かな傾向を把握することができる。

図13は、過去100年間における地球全体の気温変化を直線で表わしたものと二酸化炭素の変

化とを示したものである。図12で示したように、現在の温暖化は1800年頃から始まるものであり、それは先に示した1200年頃から1800年頃にかけての小氷河期からの回復であり、自然変動なのである。

図13を見てわかるように、地球全体の気温変化と二酸化炭素の変化とは基本的に違っている。

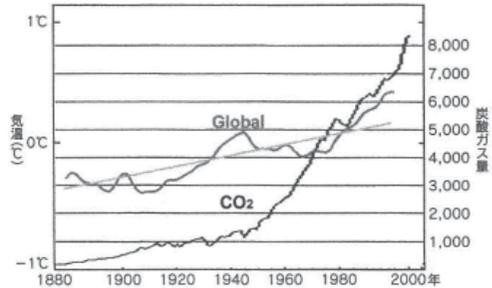


図13 気温変化とそれを直線で表わしたものと炭酸ガスの変化  
[出典：赤祖父，2008年，p. 119]

「1800年頃より現在までの気温上昇の直線の温度勾配は、極めて大ざっぱな推定であるが、 $0.5^{\circ}\text{C}/100$ 年ほどである。IPCCは炭酸ガスによる温暖化は $0.6^{\circ}\text{C}/100$ 年としているが、もしこの直線の上昇が自然変動であるとする、炭酸ガスの影響を極めて過大推定したことになる。すなわち、現在の温暖化の6分の5は自然変動で、わずか6分の1が炭酸ガスのためということになる。」(赤祖父，91頁)

### 3.3 IPCC批判

IPCC (国際気候変動パネル) が2007年2月に発表した報告の要約、「政策立案のための要約」では、「20世紀半ば以降観測された地球全体の平均気温の上昇の大部分 (most) は、人類活動による温室効果ガスによる可能性が極めて高い」としている。<sup>48</sup> 赤祖父はこれを批判している。IPCCの問題点は、小氷河期の存在についてIPCCが充分研究していなかったことである。

そもそも、気候の自然変動は大きく、その原

因やメカニズムについては、ほとんど何もわかっていない。これが現在の科学の状況である。自然変動の代表は太陽（黒体放射エネルギー）の変化と火山活動であるが、それだけではない。地球を少なくとも4回襲った大氷河期の原因を含めて、まだ原因のわからない気候変動は多くある。1910～1940年に起きた温暖化の原因もわかっていない。

前項で述べたように、1800年頃から温暖化は始まっているが、氷河の後退が始まったのも、1800年代、またはそれ以前であり、決して化石燃料によって二酸化炭素が増加した1946年頃からはではない。北極海の海氷は現在縮小しているが、これも1800年代から始まった現象であり、自然現象である。1946年頃から始まった現象ではない。

IPCCは学会でもなく、権威あるものでもない。「IPCCの主導グループは、極めて巧妙に2500人の専門家の「見解の一致 (consensus)」を作り出した」(赤祖父, 26頁)。しかし、現状ではまだそのような「見解の一致 (合意)」は得られていない。多様な学説が意見を闘わしているというのが現在の状況である。それは科学研究の最先端として健全なことでもある。

地球温暖化により南太平洋の島々が水没すると報道されたが、これはIPCCの初期の過剰な予測であった。現在では、2100年までの海面上昇はせいぜい17センチメートル程度と推定されている。

図14は1800年頃からの海面上昇と上昇率を示したものである。<sup>49</sup>

現在の海面上昇は1850年頃より始まったことが示されている。海面上昇は二酸化炭素が増加した1946年以降の現象ではない。逆に上昇率は1950年前後から減少している。過去100年間の上昇率は1.7ミリメートル/年であるが、1960年頃から上昇率は減少し、1.4ミリメートル/年となっている。

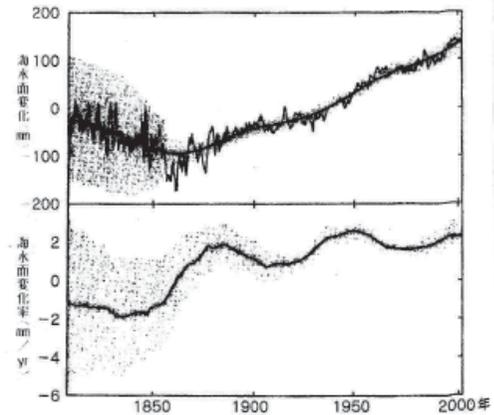


図14 1800年から現在までの海水面の変化  
上図が海水面変化。  
下図は海水面変化率。

〔出典：赤祖父, 2008年, p. 106〕

#### 4 STS教育と総合学習と理科教育

ここまで、第1章でSTS教育を代表するものとして英国のSISCON-in-Schoolsを紹介し、第2章では原発問題に関わって、第1節で放射線の危険性と安全性についての考え方を紹介し、第2節において原発廃棄物、いわゆる「核のゴミ」問題を紹介した。そして第3章で、地球温暖化の原因として二酸化炭素の寄与はそれほど多くない(6分の1)という主張を紹介した。

SISCON-in-Schoolsは「新しい理科教育」としてSTS教育を提起した。「科学、技術、社会 (Science, Technology and Society)」という言葉本来の意味からすれば、STS教育は科学・技術が引き起こす社会問題をテーマとすることになる。SISCON-in-Schoolsの場合はそれより広く、科学本来の性格を教えることまで含んでいる。そういう意味で、SISCON-in-Schoolsの考えるSTS教育は広い考え方をしている。

第1章においてくわしく確かめたように、SISCON-in-Schoolsのテキストは、8単元のうち最初の2単元が近代科学の本質や近代科学以前の自然観も扱った広い立場のSTS教育となっ

ており、残りの6単元が狭い意味でのSTS教育、科学・技術がかかえる現代的課題を扱う内容のSTS教育となっている。

第2章と第3章で紹介したのは狭い意味でのSTS教育の内容となる現代の課題である。放射線の危険性、原発の核廃棄物、地球温暖化、すべてが現代社会において解決を迫られた重要課題であることは誰も否定できないものである。

さて、ここで紹介したようなSTS教育をわが国で行うことは可能だろうか。紹介したままに、そのままするというのではないにしても、現代的課題についての授業を作り上げることは、わが国においてどの程度可能だろうか。

SISCON-in-Schoolsのような広い規模での本格的なSTS教育を行うことは、わが国では不可能なように思われる。SISCON-in-Schoolsを実行するには、最低週3時間で1年間の授業時間を確保する必要がある。全8単元すべてをするには、おそらくこの倍の時間が必要である。これは、理科の中の1つの分野、たとえば物理の分野なら「物理基礎」と「物理」の2科目を合わせた授業時間数にほぼ等しい。「科学と社会」の分野を1つの「科目」として、理科の中に作るという考え方もありうる。それは、SISCON-in-Schoolsと同様、「新しい科学教育」を目指したものなのだから、そういう行き方もたしかにある。これは、将来の学習指導要領の考え方の問題である。

SISCON-in-Schoolsの単元の中からいくつかを選んで授業をすることなら実行可能だろう。第1、第2単元のような広い意味でのSTS教育でも、そこだけを行うなら可能であると思う。広い意味のSTS教育も狭い意味のSTS教育も理科の教員免許状の必須事項ではないが、これらは教員の熱意があれば、それほど難しくなく解決可能なことだろう。私の知っている理科教員たちは自ら学習する能力も熱意も持っている。

問題は授業時間数を確保することである。授

業時間としては、総合的な学習の時間を利用することが一番考えやすい。狭い意味のSTS教育が取り上げる原発問題や地球温暖化問題などの現代的課題は、通常の理科の授業時間においても話題として、短い時間なら取り上げることができると思われる。しかし、それらの課題を生徒が深めていくためには時間的な保障をしなければならない。そのために、総合的な学習の時間を使うことが有効なのである。

---

### 【注】

- 1 『城丸章夫著作集』(1993年、青木書店) 第8巻第1章第3節『総合学習』の検討(54-60頁)。
- 2 小川正賢監修『科学・技術・社会(STS)を考える——シスコン・イン・スクール』, 東洋館出版社, 1993年。中島秀人『科学見直し』の見直し——新しい科学技術論としてのSTS(小林傳司・中山伸樹・中島秀人編著『科学とは何だろうか』, 木鐸社, 1991年, 253-274頁)。
- 3 ウィリアムス『SISCONの起源』(『科学・技術・社会(STS)を考える』, 197-203頁)。
- 4 John Ziman, *Teaching and Learning about Science and Society*, 1980. ザイマン(竹内敬人・中島秀人訳)『科学と社会を結ぶ教育とは』, 産業図書, 1988年, 182頁。
- 5 同書, 183頁の訳注。
- 6 ウィリアムス『SISCONの起源』, 201頁。
- 7 ソロモン「日本の科学教師の方々へ」(『科学・技術・社会(STS)を考える』, 179-181頁)。
- 8 ウィリアムス『SISCONの起源』, 200頁。
- 9 ザイマン『科学と社会を結ぶ教育とは』, 211頁。
- 10 「教師のための解説: STS教育とは何か——SISCON-in-Schools教師用指導書から(抜粋)」(『科学・技術・社会(STS)を考える』, 182-196頁)。

- 11 「教師のための解説」, 186頁。
- 12 Joan Solomonを編集代表として, 1983年に Basil Blackwellから出版された8冊のテキスト・シリーズである。本文の引用はそのすべての裏表紙に表記されている。8冊のテキストの名称は以下の通りである。
- Ways of Living,*  
*How Can We Be Sure?,*  
*Technology, Invention and Industry,*  
*Evolution and the Human Population,*  
*The Atomic Bomb,*  
*Energy : the Power to Work,*  
*Health, Food and Population,*  
*Space, Cosmology and Fiction.*
- 13 「教師のための解説」, 196頁。
- 14 「教師のための解説」, 185頁。GCEとCESの2つとも, 大学入学試験に使われるものである。詳しくは, 後の本文を見よ。
- 15 『科学・技術・社会(STS)を考える』, 88頁。
- 16 『科学・技術・社会(STS)を考える』, 89-90頁。
- 17 『科学・技術・社会(STS)を考える』, 183頁の注2)。
- 18 『科学・技術・社会(STS)を考える』, 185頁の注4)。
- 19 『科学・技術・社会(STS)を考える』, 183頁の注3)。
- 20 Joan Solomon, *Technology, Invention and Industry*, 1983, Basil Blackwell.
- 21 Joan Solomon, *Evolution and the Human Population*, 1983, Basil Blackwell.
- 22 Joan Solomon, *Energy : the Power to Work*, 1983, Basil Blackwell.
- 23 Joan Solomon, *Space, Cosmology and Fiction*, 1983, Basil Blackwell.
- 24 邦訳にはこの小見出しが抜け落ちている。
- 25 田崎晴明『やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識』, 朝日出版社, 2012年。
- 26 山本義隆『原子・原子核・原子力』, 岩波書店, 2015年。
- 27 田崎晴明『統計力学 I, II』, 培風館, 2008年。
- 28 朝永振一郎『量子力学 I [第2版]』, みすず書房, 1969年。「付録 I Boltzmannの原理」(同書245-260頁)に, エルゴードの説明がある。統計力学が対象としているのは, 熱力学の平衡状態—たとえば(P, V, T)が平衡にある状態である。この平衡状態をボルツマンの原理(等重率の原理)によって記述するというのが, 確率論的な統計力学である。平衡状態を等重率の原理によって確率論的に記述してよい根拠を, エルゴード仮説に求めるというのが, エルゴードの説明である。その議論が誤りであること, そして記述根拠が別にある—そこに求めなくてよい—という田崎の説明は説得的である。
- 29 田崎晴明『熱力学』, 培風館, 2000年。
- 30 同書, 「はじめに」(ii頁)。
- 31 田崎『やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識』, iii頁。
- 32 山本義隆『熱学思想の史的展開1~3』, ちくま学芸文庫, 2008-2009年。
- 33 山本義隆『磁力と重力の発見1~3』, みすず書房, 2003年。
- 34 田崎『やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識』(29頁)に図入りで紹介されている反応である。ただし, ルビジウム 95 ( $^{95}\text{Rb}$ ) は, ルビジウムの「おもな放射性同位体」としては『理科年表』に掲載されていない物質である。
- 35  $1\text{Bq}$ に対応する原子核の個数は, ほぼ
- $$1.44 \times T,$$
- $1\text{Bq}$ に対応するモル数は, ほぼ
- $$2.40 \times 10^{-24} \times T$$
- となる。ここで  $T$  は半減期を表し, 単位は秒とする。
- 36 田崎の本には, そのような図はない。またそのようになる説明も見当たらない。図1(田崎の本では図4.9)の説明で, 「低線量被曝の影響を小さく見積もる」のが  $C$  であり, 「線

- 形閾値無し仮説」はそれとは違う、という説明は、不正確である。Cのように曲線になるとは考えていないが、「線形閾値無し仮説」の直線が Bのままではなく、Cに近く折れ曲がる(Aの方向にではなく折れ曲がる)のだから、この点については、注記すべきであったと思う。実際、ICRPの考えは、「低線量被曝の影響を小さく見積もる」ものだからである。「線量・線量率効果係数」の考えは「線形閾値無し仮説」を修正するものなのだから、この点についての説明が不正確な点は問題だと思う。
- 37 小出裕章『隠される原子力・核の真実—原子力の専門家が原発に反対するわけ』, 創社社, 2010年。
- 38 International Commission on Radiological Protection, 1990. Recommendation of the International Commission (ICRP Publication 60), *Annals of the ICRP*, 21, Nos. 1-3 (1991). 邦訳『国際放射線防護委員会, 1990年勧告』, 日本アイソトープ協会, 1991年, 62頁。
- 39 馬淵清彦「疫学に基づくリスク評価の立場から」, 『保健物理』, 第32巻第1号 (1997年), 5-8頁。
- 40 K・Z・モーガン『原子力開発の光と影』松井浩他訳, 昭和堂, 2003年, 195頁。
- 41 小出裕章『隠される原子力・核の真実』, 15-17頁。
- 42 Solomon, *Evolution and the Human Population*, p.25.
- 43 赤祖父俊一『正しく知る地球温暖化』, 誠文堂新光社, 2008年。
- 44 このグラフの引用元の文献は以下である。Moberg, A., D. M. Sonechkin, K. Holmgren, N. M. Datsenko, and W. Karlen, Highly variable northern hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data, *Nature*, 433, 613, 2005.
- 45 このグラフの引用元の文献は、伊藤公紀のウェブサイトである。また次の文献も参照。伊藤公紀『地球温暖化』, 日本評論社, 2003年。
- 46 このグラフの引用元の文献は以下である。Keigwin, L. D., The Little Ice Age and medieval warming period in the Sargasso Sea, *Science*, 274, 1504, 1996.
- 47 このグラフ(上)の引用元の文献は以下である。Fritzsche, D., R. Schutte, H. Meyer, H. Miller, F. Wilhelms, T. Opel, and L. M. Savatuyugin, Late Holocene ice core record from Akasemii Nauk Ice Cap, Severnaya Zemlya, in Dowdeswell, J. W., and I. C. Willis, eds., *Annals of Glaciology*, No. 42, A150, 2006.
- 48 赤祖父『正しく知る地球温暖化』, 13頁。また19頁参照。
- 49 このグラフの引用元の文献は以下である。Jevrejeva, S., A. Grinsted, J. C. Moore, and S. Holgate, Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, *J. Geophys. Res.*, 111, C09012, doi: 10.1029/2005JC003229, 2006.