

⇒ 論 説 ⇐

フレデリック・ソディ『富，仮想的な富そして負債：経済学の逆説への解決策』
第2章におけるエネルギーとその利用に関する理論について

藤 堂 史 明

要旨：

本稿では F. Soddy が自然科学的視点から経済学及び経済政策について議論を展開した著作であるフレデリック・ソディ『富，仮想的な富そして負債：経済学の逆説への解決策』の第2章におけるエネルギー及びその源泉，エネルギー資源の人類による利用，経済社会との関係性についての理論を考察する。また，ソディの予測した原子エネルギー開発の，実際の歴史上の経緯，太陽光のエネルギーの葉緑素を介した取り込みとエネルギーの流れについての，生態学及びエコロジー経済学における関連した理論に関して論じる。ソディの構想した，自然のエネルギー資源を制御し，発展してゆく人類社会の在り方は，未来の生態系及び経済について考察する際の，私たちの社会についての一つの希望が持てる見通しと言えるのではないだろうか。

Summary:

This paper analyzes the second chapter of Frederic Soddy's *WEALTH, VIRTUAL WEALTH AND DEBT - THE SOLUTION OF THE ECONOMIC PARADOX* in which F. Soddy developed theories on economics and economic policy from the viewpoint of natural science. We discuss the theory on energy and its source, resource use by human beings and relationship with the economic society. In addition, the actual history of nuclear energy development predicted by Soddy, related theories of the incorporation of sunlight energy through chlorophyll and the flow of energy in ecology and ecological economics are discussed. The idea of human society developing by the controls and usage of natural energy resources conceived by Soddy could be a hopeful vision of our society, when we consider ecology and economy in future.

Key Words: F. Soddy, energy source, atomic energy, photo-synthesis, economic system, ecological economics

I. エネルギー資源の起源と本質的な富について

本稿では、Frederick Soddy, *WEALTH, VIRTUAL WEALTH AND DEBT – THE SOLUTION OF THE ECONOMIC PARADOX*, 1926, Allen and Unwin Ltd. について、まずその第2章を抄訳し、F. Soddy (以下、ソディ) が富の本質的形成のメカニズムと考えている利用可能エネルギーの自然及び人間社会による利用とその経路、とりわけ葉緑素による生物界への太陽光のエネルギーの取り込みとエネルギー資源の利用の人類史上の意味についての理論を紹介する。続いて、ソディが当該書執筆時点で将来を展望した原子エネルギーの開発利用のその後の変遷、そしてエコロジー経済学の系譜におけるエネルギーの扱いと今日における課題との関係性についての考察を試みる。

これまで筆者はソディの同書について研究を行ってきた。同書におけるソディの富と仮想的富についての定義については、既に拙著 (2006)¹において論じたが、ここでは自然の利用可能エネルギーを起源とするエネルギー資源と、素材を人間が加工して得られる財とが本質的な富として定義された。

また同書において、経済学における貨幣的富の概念に対する批判の基礎となる序盤部分については、拙著 (2008)²で訳出、また、4, 5章における経済理論批判については拙著 (2009)³で、そして7章における貨幣論については拙著 (2009)⁴において考察した。本稿で取り上げる第2章は、同書の序盤部のうちまだ取り上げていなかったエネルギー資源の起源と、人類とエネルギー資源との関わりを論じた部分である。

筆者による同書の一連の研究としては実に9年の間隔が空いてしまったが、この間、2011年3月に東日本大震災、東京電力福島第一原発事故が発生し、この問題に関わる経済学的理論と原子力災害対策、放射線防護の問題について集中して多くを論じてきたこともその一因である。

ソディの行った利用可能なエネルギーの流れと富の本質についての研究は、根源的には自然を操る人間による人為の行いと、現代の経済社会の在り方が、本質的な豊かさをもたらすのか、という問いへとつながるものである。原子力エネルギーと人間社会との関わりについても、ソディは考察していた。それは以下に述べるが、本質的な方向性として、支配と制御を及ぼす対象として原子エネルギーを捉えつつ、その実際の運用については懐疑的であったと筆者は考える。

¹ 藤堂史明「フレデリック・ソディの富の概念、価値及び資本の位置づけと、環境及び経済システムのエントロピー論的理解におけるその現在の意義」、『新潟大学経済論集』、第81号、2006年9月、75-105頁。

² 藤堂史明「フレデリック・ソディ『富、仮想的な富そして負債：経済学の逆説への解決策』1章、3章における基礎的分析概念について〔翻訳〕」、『新潟大学経済論集』第84号、2008年3月、105-139頁。

³ 藤堂史明「フレデリック・ソディ『富、仮想的な富そして負債：経済学の逆説への解決策』第4-5章における富・信用・価値についての標準的経済学批判の考察」、『新潟大学経済論集』、第85号、2009年3月、83-125頁。

⁴ 藤堂史明「フレデリック・ソディ『富、仮想的な富そして負債：経済学の逆説への解決策』第7章における貨幣・仮想的富の理論についての考察」、『新潟大学経済論集』、第87号、2009年9月、101-144頁。

今回の考察においても、以前の研究スタイルに倣い、原文の訳文部分については、筆者（藤堂）による訳注（稿全体での通し番号）を加え、原文の注は訳注の注内に原注として表記する方法をとった。また、文中における [] 内で意味上の訳文を補った。また、固有の言い回し、表現を伝えるため原文中の単語を明記する必要がある場合は { } 内に示し、原文中の斜体は参照書名を除き斜体の太字で表記した。

なお、原著は節番号がないが、これまでの拙稿と同じく、本稿においても原文との対応関係を明白にするため、各章の番号 (X)、節番号 (Y)、段落番号 (Z) を (X-Y-Z) の形式で付した。

それではまず、2章におけるソディによる、生物によるエネルギー利用のメカニズムの理論について見てみよう。

II. ソディ(1926)、第2章におけるエネルギーの源泉と人類の関係性についての議論

第2章 生命の発見 “LIFE’S DISCOVERIES”

(2-1) 発見、無意識と意識 “DISCOVERY, SUB-CONSCIOUS AND CONSCIOUS.”

(2-1-1)

時代の基調 {keynote} は発見であり、生命それ自身も発見である。いったん発見されると、無数の世代がその性質について意識的に理解することなく、そして彼らの生活様式をさらに変えることはなく、そしてそれが唯一の生きられる方法であるとみなしてそれを利用する。また別の発見はそれを置き換え、新たな機能を持つ新たな種が進化の体系の中で登場する。種の起源と同じことが、近代社会における生命の経済学 {economics of life} においても起こる。とはいえ、前者の過程が無限に遅いのに対して、後者の過程の速さは驚くべきことになっている。

(2-1-2)

「誰も考えるだけで自分の彫像を少しでも {a cubit} 大きくできる者はいない」し、共同体の中での種の起源は明らかに非合理的な個別の組織の無意識的な成長も反映する。それは [生命に] 生来備わっており、意思とは独立したものである。[生命の] 個体は神秘のうちに生まれ、羊のように忠実に大人へと成長し、呼吸し、血液を循環させ、食物を消化し、そして複雑な酵素とホルモンを分泌し、その正確な性質は、どの分野の論理によるものかとは独立して最も熟達した化学者さえも当惑させる。そして通常は、彼らはそのような驚くべき事例に対する、最も簡単な科学的原理にさえ完全に無知であるのだ。種の起源についても同様に当惑させるものである。人間は明らかにより低い階層の動物から進化したものであり、そのことについて、つい最近になって事実を知らされるまでは全く無意識であったのである。

(2-1-3)

しかしながら、われわれが、科学の時代がその先駆者たち [の業績] から発達させた発見と発明について考察すると、それは全く異なる。駅馬車から蒸気エンジンと自動車への進化においては、数え切れないほどの発明家たちがそれぞれの小さな段階について思いを巡らせ、わずかな者たちだけが成功した。それは例えば、両生類が最初に乾いた陸地に侵入しそこで生活するようになったプロセスがそうであったようではなかったのである。

(2-1-4)

しかしながら、もし、われわれがより大きな視野で見ると、結局のところ、この遠い昔の画期的な出来事と類似したものとして、生物学者たちが種の起源を説明しようとしたことを挙げるができるだろう。そこに本当にそのように大きな違いがあるのだろうか。ジェームス・ワット {James Watt} は彼の伝記作家たちがそう見たように、文明を向上させる強力なレバーに手を伸ばしていると彼自身を見ていたのだろうか？ 普通の人は彼自身が行こうとしている方向をぼんやりとでも意識しているものだろうか？ 彼は社会の構成について、それが沈滞 {*malaise*} していると深いところで意識しているかもしれない。ちょうど、種の進化における失われた環 {missing links} である種が、彼らが消え去る前に彼らの環境との不調和を感じ取っていたように。世界の経済的生活を一変させる発見の後も1世紀の間、多くの声は何か本当の変化がいくらかでも起こったかということについて、気が付かずにただでなく、むしろ否定的でさえあったのである。

(2-1-5)

種の起源についての初期の大まかな理論、すなわち新しい種の起源は、自然淘汰のプロセスによる、純粋に個体に依存しない外的な適者生存の作用によって、同種の個体の間に生じ得る微小な相違によるものである、という見解は、おそらく近頃の生物学者には保持されていない。われわれが通常の個体の成長に関するわかりやすい理論を得るまでの間は、通常の個体から新しい種の創出に至る、大きくかつ明白に不連続な乖離について説明することは明らかに望めないであろう。[自然淘汰による] 選択は新しい [種の] 成長を有利にすることはできても、それ [がなぜ生じたか] を説明することはできないのである。このような初期の見解に並んで、そしてそれはその明らかな影響なのだが、原始的な野蛮人から今日の高度に知性的で強力な種族へという人類の進歩は、外的な必要性によって強要された人類の対応という、無限に小さい歩みの連続によるものであり、そして、それは最初の一步による発見を引き起こす大量 [の歩み] のうちに生じる純粋な偶然によるものだとする理論がある。

そのような人類の進歩と非凡な才能に対する見方は、今日の科学的な発見に関して真実ではないし、また教師であれば誰でも経験する経験とも反し、芸術にも文学にも音楽にも、そして人類の進歩についても全く真実ではないのである。

(2-1-6)

発見者 {The discoverer} は、彼がどのようにして発見を行うかについては知らないかもしれないが、これらの哲学者たちが知らないことを知っている。彼は一般的な大衆が、発見は進歩の通常の果実であるという見解を持っていることについて苦々しく腹を立てている。逆に進歩が発見の果実なのである。そして発見は通常ではなく、例外的な出来事なのである。青銅の精錬や鉄の鍛錬についての技法の無名の発見者たちも [発見が進歩の通常の果実であるという見方] には疑いなく不慣れであろう。種の起源に関するより完全な説明に関して言えば、猿がより人間に似ている点についての、われわれの承認 [できる点] について議論を拡張できるだろう。

(2-1-7)

この件に関して、もし、われわれが事実を覆い隠してしまうと思われる理論ではなく単純な事実について注視を続けるのであれば、生物学的な、そして人類的な歴史は連続性ではなく、それがゆるやかに、あるいはゆっくり行われようと、内在的な成長の力によって行われようと、また理性によって行われようと、いったん発見されると未来の傾向全体と生存様式を突然変えてしまうような、偉大な発見の連続によって成り立っていることに気づくだろう。真実は断続的な驚きが繰り返されたということであるのに、記録によれば着実な連続的な進歩になってしまい、発見をしたこともない歴史家や経済学者、新しい種を創り出したこともない生物学者の目を通して過去を振り返ることによって、全ての [発見の] 段階は見過ごされ、沈滞した決まりきった幕間劇が次第に消え去る [ことが繰り返された歴史に見える] だろう。未来に関して見れば、消化が意志とは無関係であるように、また種の創造に似ているように、発見は社会の意識とは独立した無意識下の成長の性質をより持っていると言えるだろう。自然が飛躍しようとしまいと、生命は間違いなく飛躍するのである。

(2-2) 非生物の世界から生物へのエネルギーの途切れのない流れ “THE UNBROKEN FLOW OF ENERGY FROM THE INANIMATE WORLD INTO LIFE.”

(2-2-1)

葉緑素 {chlorophyll} は、生物の最初のではないが非常に早い段階の発見である。今日われわれが知っており、科学的に研究されている生物でこの発見がなかったことになっても生存できるとされるものがあるかどうか疑わしいほどである。植物にあるこの緑色をした物質は生物の世界にエネルギーが入ってくる入口である。植物界はいまだに自然エネルギーの本質的な起源である太陽光への唯一の鍵を持っており、すべての生き物は太陽光の変換者としての役割を果たす葉緑素染料 {dye chlorophyll} の助けを介して植物界から生存に必要な手段を引き出しているのである。

(2-2-2)

これは1世紀近くも知られていることであるが、その知識の持つ含意はしばしば忘れられがちである。それは経済的には重要ではない数少ない例外を除いては世界を成り立たせている {makes the world a going concern} エネルギーのすべてが太陽からもたらされているということである。生きている有機体の内的なエネルギーは有機体によって創り出されるのでもなければ神の摂理によってでも高利貸しによってでも供給されるものではない。それは太陽から放射の形で放出され、植物の体を通し、次に植物を食べる動物という順で[生物に]もたらされるのである。

(2-3) 内的そして外的な生物によるエネルギー使用 “THE INTERNAL AND EXTERNAL LIFE-USE OF ENERGY.”

(2-3-1)

物質代謝を維持する生物の内的なエネルギーと、動物や植物がその環境に働きかけるのに用いる、すなわち植物が根の成長や枝の伸展への抵抗に打ち克つのに用い、動物が移動やそのほかの動作のために用いる生物の外的なエネルギーとを区別するのは便利であり実際的である。荷物運搬用の家畜や人間については、消費された食物の全体のエネルギーの大きな割合が外的な仕事の遂行に使われる。これらの多くはまたしても摩擦抵抗に打ち克つただけに使われるかもしれないし、それによって熱に変換される。これは、ランフォード伯爵が1798年に古典的な実験によって最初に示したが、それは馬によって回転させられる機械によって大砲を穿つ際に水が沸騰し続けることによって示された。実際、[その原理は] もっとも原始的な人々によっても文明との接触以前に火を起こす際に用いられていた。しかしながら、仕事が動的な抵抗に対して行われるとき、例えば、重力に抗して荷重を持ち上げるとき、それは潜在的形での仕事 {work in potential form} として蓄えられ、仕事として回復可能となる。例えば、その荷重を落下させることによって。ちょうど時計が動く前に [ぜんまいを] 巻かれることによって利用可能なエネルギーの蓄えを与えられなければならないように、人間も時計 [のぜんまいを] を巻く前に巻かれなければならない。そして、生物の経済学はどのようにして自然が人間 [のぜんまい] を巻くかということについてのものなのである。自然の傾向としてのエネルギーが一つの段階を経れば劣化し、価値のない熱に変化するということは、迂回されなければならない、それにより随意に仕事に再度変化させることができ、生命によって使われるなにか、[物質の] 状態ないし [そのような物質] それ自体に、最終的にはなると示されなければならない。

(2-3-2)

さて、生物の内的なエネルギーに関しては、例えば黒鉛と水、風車のエネルギーのような完全に非生物的な原料と力から、それを供給する食物を人工的に合成することに何の理論的な障壁もないのであるが、実際のところそれらはいまだにすべて植物由来である。現在この国で科

学の時代より以前に養うことのできた人口の少なくとも5倍の人口を養うほどに大きく拡張されたわれわれの食糧供給は、はるか離れた国々の産物を運搬し、農業における人間と家畜の労働、技術的な意味では物理的な仕事を置き換えた完全に非生物学的な原動力によって「間接的に」影響されてきたのである。また、無駄に流れていた流水の水力の原動力は利用され、それらのうちのエネルギーのいくらかは化学的なプロセスにより肥料となり、土の生産力を増加させた。植物にもたらされたこれらのうちいくらかはエネルギーを与えられた窒素であり、それは自己生産されることができず、土中のバクテリアによるものか、自然界では雷により空気から生産されるか、ラジウムからの放射線によるか、わずかな量しか供給されないものである。

(2-3-3)

ここでは、しばしばそうであるように一つの筋道に沿って考えている。なぜならそれは連続的であり、つまり自然の中でのエネルギーの流れとそれをどのように生物が使うか、なのである。このことは他の要素が重要ではない、あるいは無視可能であるということではない。そうではなくて、単純にわれわれがこの途切れない筋道を追っていけば、生物が常に満たさなければならぬほかのすべての配慮条件から独立した、確かな物理的な結論が導き出せるからである。現在の例においては、例えば、増加した食料供給については、生物学者たちの仕事によって新しい種類の小麦を生育できるようになったことが大きくかつ増加しつつある要因であるだろう。

(2-3-4)

ひょっとしたら将来の人類は我々が外的な労働を非生物学的なエネルギーを用いて行うのと同じように彼らの内なる火 [生物活動に必要な代謝] を供給するのかもしれない。しかし、完全に新しい発見が行われるまでは農業は依然として生命のための鍵となる産業である。ここまでに科学ができたことは間接的な助力に過ぎなかったのである。本質的にはそれは不変のままであり、太陽光を集め、葉緑素の介在によりそれを直接、あるいは動物を介した変換により間接的に食物の化学的エネルギーへと変換しているのである。この国における農業の不作は世界的な重要性は持たず、局在的なものなのである。科学が現在、非常に大規模に、生物 [の介在] を通り過ぎて自然界に見いだされた完全に非生物学的なエネルギーを、生物の体を通す必要なく直接引き出しているのは、この分野 [農業] ではなく、生物の外的なエネルギーについてののみなのである。人間はまだ必要であるが、毎年 [その必要性は] 小さくなる、というのは決まりきった仕事はますます機械によって自動的に行われるようになるからである。しかしながらその機能は変わってきている。現在、労働者は彼の体自身に求められる部分としてはとるに足らないものしか貢献しなくなっている。彼はどちらかという知能で貢献しているのである。彼は労働者から人為的な過程の監督者となり、エネルギーが自然な傾向として無駄になろうとするのを、力によってではなく注意力によって回避しているのである。

(2-4) 利用可能エネルギーの起源 “THE ORIGIN OF AVAILABLE ENERGY.”

(2-4-1)

エネルギーに関する教義は、エネルギーはすべての過程で保存され、そして決して創造されたり破壊されたりすることはないというものであるが、それは全ての力学的エネルギーの究極的な到達点である、役に立たず利用可能ではない形態、すなわち周囲の環境と同じ温度の熱に、直ちに变化する自然の傾向を持っている。生命はこの傾向が回避される経済的な重要性を持った唯一の過程では全くないが、他と比較できないほど、最も重要なものである。この点で機械は単なる生命の模倣に過ぎず、それらは全て、最初に設計者の脳によって選ばれた、人為的な作業の循環を実行する知能の複製を保有しているのである。

(2-4-2)

今日においては、それによって生命の介入なしに太陽エネルギーからの収入が、役に立つあるいは「利用可能な」{“available”} 形態に変換される経済的に最も重要な過程は、水力が創出するものである。海洋に落下するエネルギーの微小な一部分が役に立たない熱へと劣化し、水を蒸発させることから逃れるのである。これはしかしながら、蒸気機関の中で人工的に生じさせられる過程に大変似た自然の過程 {natural process} である。[蒸気機関では] 蒸気が上昇し、「断熱冷却と拡張」{“adiabatic cooling and expansion”} に従うのである。それ [(蒸気)] は、そのようにして重力に逆らって上昇しつつ自身への役に立つ仕事をする。それは上昇するにつれて冷却され、雨として凝結し、川として集合し、海洋に至る途中で水車やタービンを作動させるのである。かつて航海において、そして灌漑と干拓における風車において、より大きな経済的な重要性を持っていた風力は、まさに類似した分類に属する。

(2-4-3)

しかしながら、最初に生命による不寝番から逃れて二度目の [利用の] 機会を与えるのは太陽からの収入のごく些細な一部でしかない。石油エネルギーの源泉については疑問があり、後に再度言及することにする。潮汐力は [太陽の] 放射を源泉としない例外的な類型である。それは月の地球の周りの公転と地球が地軸の周りで回転する力とからエネルギーを供給されている。このために一日の長さと同じの月の一カ月は、長年の間にますます遅くなっており、最終的には地球の一日は一年と同じ [長さ] になるだろう、すでに月の一日が月の一カ月と同じであるように⁵。火山と温泉のエネルギーは地球の内部熱からもたらされるが、この源泉は石油の源泉と同じ意味で疑問が残るものである、そしてこの点も後に述べる。

⁵ 月の自転周期は公転周期と同じ約27日である。以後、理化学用語及び人名について『岩波理化学辞典 第5版』岩波書店、2008年、を参照した。

(2-5) 代謝の物理化学 “THE PHYSICAL CHEMISTRY OF METABOLISM.”

(2-5-1)

ここで生命の働きにより生命にとって利用可能にされる自然界におけるエネルギーの主な源泉について述べよう。不透明な物体に注がれる太陽 [エネルギー] の収入は直ちに熱に変わる。そして、その後すぐに伝導により周囲の環境と同じ温度の熱に変化する。この形態においてそれは物質を形作っている究極の分子の運動のエネルギーから構成されている。それはまだ運動エネルギーとして減っていない量が存在しているが、役に立たない。力学的なエネルギーは本質的に空間の特定の方向に向かうエネルギーであるが、問題となる運動はあらゆる方向に向いており、あるいは、完全に連繫していない {perfectly deco-ordinated}。得られるよりも多くの仕事を行うことによる以外、再度方向を連繫させることは不可能であるが、熱が環境よりも高い温度であるときは、そのより冷たい物体に流れ込もうとする自然の傾向を利用して、その小さな一部を再度、力学的エネルギーに変換することができるだろう。

(2-5-2)

しかし、太陽エネルギーが植物の葉緑素に注ぐときは、それは熱には変化せず、化学的エネルギーとなる⁶。おそらく密林に入ることによって太陽光からの涼しい救出を経験した人であれば、それが単なる影のおかげではないことに気づいたであろう。森林はその効率性と規模において、人間の仕事のすべてを取るに足らないものとする、自然の主要な変換装置 {transformer house} の一つなのである。太陽光はもはや不透明な物体の抵抗と戦って熱に劣化することなく、少量ではあるが材木の潜在的なエネルギーの蓄えへと変換され、木が燃やされるときに再度回復される事ができるのである。

(2-5-3)

全く神秘的な、しかし純粋に物理学的な過程ではあるのだが、葉緑素は光の波のエネルギーと素材としての二酸化炭素と空気中の水分から、酸素と炭化水素、すなわちホルムアルデヒドと多種類にわたる糖、デキストリン、ガム、澱粉とセルロース、といった分子構造の複雑さを増していく一連の品目を創り出すのである。「炭化水素」{“carbo-hydrate”} という名前が示すように、それらは全て炭素と水からできている。これらが生きている有機体自身に依存し、影響を受ける化学的合成と考えられていることにはなじみであろう。しかしながら、現在これは化学者が触媒作用と呼ぶものとして知られている。そこでは、それ自身は反応せず変化しないまま残る、少量の触媒と呼ばれる物質の存在があれば、[それが存在し]ない場合には起こらない反応がエネルギーの法則に反することなく起こる、ことが知られている。1897年にブフナーは

⁶ 太陽光エネルギーの多くの部分が水の蒸散を通じて熱として放出される、と指摘されている点については後述する。

イーストから抽出したものが、生きているイースト菌の細胞の痕跡が消し去られているにもかかわらず、生きている植物同様に砂糖をアルコールに発酵させることを発見した。この作用は触媒あるいは生物化学で一般的に言われる酵素によるものであり、それは有機体によって分泌されるものであるがそれ自体は生物体でもないし生きてもないものである。完全に鉍物性の物質、例えば細かく砕かれたプラチナやほかの金属は、非有機体的な反応において同様の力を持っている。葉緑素の働きはおそらく触媒的であり、つまり、それがいないところでは反応しないほかの物質を反応させることができるのであるが、この例においては追加的な特徴があり、それはこの過程に傑出した重要性を与えるのであるが、光によって供給されるエネルギーの継続的な補給がなければ化学反応が進行できないのである。葉緑素は実際、エネルギーと物質の結婚を可能とするのである。それは光化学的に活動する触媒であり、植物によって分泌されるが、それ自身は単なる物質であり、生物体であったり、生きているのではないのである。

(2-5-4)

燃料が燃やされたり、食品が代謝によって消費されたりするときは、太陽光の下で葉緑素によって生産されるのとちょうど逆の反応が起こる。炭化水素が大気中の酸素により二酸化炭素と水に燃やされるのである。そして、熱の形のエネルギーがもたらされる。二酸化炭素と水を元の炭化水素と酸素に逆燃焼させる {unburn} には、燃焼の際にもたらされたエネルギーを再供給しなければならない。これが、植物が達成していることである。太陽光のエネルギーが、葉緑素の存在の下で燃焼や代謝による死んだ生産物に再度注入され、酸素が空气中に再解放され、炭素と水によって形成された化合物が植物の組織中に蓄えられるのである。

(2-5-5)

われわれのものとして生じた世界は、その銀河における進化の過程において親にあたる太陽から投げ出された惑星であり、そもそもよく「燃焼している」{“burnt”}、とみなすことができる。それが炭素系の生物にとって適した居住地であるためには、それが酸素と組み合わせさせて存在していなければならないと考えられるであろう。このことは生命の源泉について新しい角度からの疑問を提起する。葉緑素はどのようにして生命無しに発生することができ、生命はどのようにして葉緑素なしに自らを維持することができるのだろうか？なぜなら葉緑素はきわめて複雑な炭素化合物であり、化学者たちは暫定的にそれが炭素原子55個と水素原子72個、窒素原子4個、酸素原子5個、そして金属マグネシウム原子1個から形成されていると考えている。それはこれまでのところ人工的に創られてはおらず、常にどのような人工的合成にとっても必要な準備段階であるのだが、その分子構造の性質は、かなりの程度疑問に包まれたままである。この特定の化合物が生命の介在無しに自然に存在するようになったとみなすことはほとんどできないが、それでもなお、われわれが知るその存在は生命の過程にとって必要不可欠なのである。その茶色の種類は褐藻類として知られているが、化学的には緑のものと区別がつかない。

われわれは、生命は葉緑素よりも単純な光化学的に働く触媒とともに始まったと考えることができるし、そして最初は純粋な鉱物が触媒として用いられたのかもしれないのである。しかしながら、われわれが生命の源泉を辿った限りでは、それはすでにきわめて複雑で独特な物質を用いてそれが必要とするエネルギーを太陽光から得ており、[それは]まったく本質的に驚くべきことであり、実際、ほとんど唯一の活動類型であるのである。化学と生物化学の全分野を含めても類似の例は見当たらないほどである。確実に言えるのは、澱粉とセルロースを製造する自然の方法にいくらかでも類似する方法で、工業的に製造される化学製品は、全くないということである。

(2-5-6)

われわれは化学の実際的な勝利については多くを聞いている。ゆえに、なぜそもそも化学的な変化が生じるかという点について基本的な理論を持っている化学者がいないと聞けば、読者は驚くかもしれない。燃焼の産物が光化学的に活性を持つ触媒である葉緑素の存在の下で太陽光のエネルギーにより、燃焼の逆反応によって {unburnt into} 炭化水素と酸素になるというのは描写 {description} であって、説明 {explanation} ではないのである。

しかしながら、われわれは次のようなことを推測するには至っている。どんな種類の化学的変化であっても、それが生じる前に、反応する分子に何らかの予備的な「活性化」{“activation”} と名付けられた過程が生じなければならず、一般的には放射線が、通常は不活性な分子が互いの経路が交差した際に反応するようにする作用因となる。太陽放射線は放射線の長波長領域の中ほどに位置し、それ[放射線の領域]は短い方では無線通信に用いられる波長から短いものではレントゲンによる X 線やラジウムの γ 線に至るものである。

われわれは、冷たい物体とは熱エネルギーを全く持たないものであり、 -273°C という到達できない絶対零度にあるものであるという意味で、全ての既知の物質は熱いということを忘れがちである。全ては太陽のようにエネルギーを放射しているのである。通常の温度においてはその量はたいへん小さく、[放射される]線 {ray} の波長は可視光線の領域の長波長の領域にある。すなわち、放射はわれわれが視認可能な赤熱 {red-heat} の温度に達するまでは暗黒熱 {dark-heat} [(つまり赤外線の放射)] の線なのである。しかしながらそれは常に放射されており、いくつかの近代的な化学的変化の理論はこの暗黒熱の放射が最も一般的で自発的な化学的変化にあっても、それに先立つ活性化の作用因なのではないかと主張している。もしこの見方に十分な根拠があると示されれば、全ての化学的反応は植物によって行われているそれ [(葉緑素と太陽光によって引き起こされる光合成)] と類似物であるということになるであろう。これらすべての話題は、理屈についてははるか後に、そして極度の困難さをもって説明されることの発見に、生命がいかに直観的に到達したかを示すための説明である。

(2-6) 石炭と石油 “COAL AND OIL.”

(2-6-1)

以前は、生命は海洋で発生しそこから地上に進出してきた、と地質学者たちはわれわれに言っていた。動物の進化がずっと進行するよりも遙か前に、植物たちは巨大な木生シダの形で過剰な豊富さのうちに繁栄していた。その化石化した遺物がわれわれの今日の石炭層をもたらしたのである。この石炭紀 {carboniferous era} においては気温と大気中の二酸化炭素と水蒸気の量は今日よりも高かったはずである。近代的な文明がほとんど完全に依存しているエネルギーの膨大な貯蔵はこのような条件の下で貯蔵され {laid down}, 蓄積されたのである。この蓄積は完全に生命の仕事である。知られている限りではこのような種類のことは今日においては全く起こっておらず、我々が知っている人類の発展は、語られることもない遠い昔に起こった、生物学的なそして地質学的な、都合のよい連鎖的事象に完全に依存しているのである。

(2-6-2)

鉱油 [(石油類)] {mineral oils} の源泉ははっきりしない。それらは本質的に炭素と水素の化合物、というか炭化水素である。大まかに言うと、それらには2つの原因があり、そのどちらかが働いたかもしれない。自然界の油に頻繁に観察される海洋生物の痕跡から、それらは現在よりもはるかに大量に海洋に生息していたかもしれない魚の遺体が分解し、その後熱と圧力によって変換されたことによって生じたと推測されてきた。動物に起源を求めることに特にこだわるのでなければ、石炭のような植物の遺体が、地球の好条件により油に変換されたとするのは極めて納得がいくものである。近代的な技術的過程として、まだ実験段階であるが、粉状の石炭をタールと混ぜ、水素と一緒に大きな圧力と高温の下で変換することで、石炭を油化する「ベルギウス法による油化」{“berginisation”}⁷が知られている。

(2-6-3)

一方で、金属やその酸化物を炭素と加熱し、電気炉の温度で作られる金属炭化物 {metallic carbides} を作ったモアッサン⁸の研究により、純粹に非生物的な源泉が示唆された。例えば石灰 {lime} とコークス {coke} を熱することによって得られるカルシウム炭化物は、それを水と接触させることで生じるアセチレンというガス状の炭化水素の源泉として広く知られている。他の金属炭化物も同様にして他の炭化水素をもたらす。そして、ウラニウム炭化物からは、自然の石油と非常に似た性質と構成の液体炭化水素の混合物が得られている。高温と高圧の条件が存在する地球内部深くにおいて、材料となる要素が存在すれば、そのような炭化物が形成さ

⁷ Friedrich Bergius はドイツの化学者であり、1921年に高圧水素添加により石炭から石油を作り出す方法を考案した。

⁸ Henri Moissan はフランスの化学者であり、フッ素の遊離に成功し、また1896年に電気炉を製作、これによる種々の炭化物を合成した。

れるに至ることは、ほとんど確実である。もしそうであるならば、引き続いて起こった水の浸入により、石油が産出するに至ったと正当に推論することができるであろう。

(2-7) 太陽と原子エネルギー “SOLAR AND ATOMIC ENERGY.”

(2-7-1)

[前節で述べた] 第一の理論によれば [石] 油のエネルギーの源泉は太陽光であり、第二 [の理論] によれば地球の内部熱であることはいくらかの興味を引くであろう。それ [地球の内部熱] は古い見解によれば、地球がまだガス状だった太陽から放逐された際のももとの太陽の熱の遺産の一部とみなされていた。しかし、ジョリー⁹によって展開された近代的な見解によれば地球の内部熱は放射能の過程により継続的に維持されているのである。もしそうであるならば、[石] 油は第二の理論においてその源泉を辿るとそのエネルギーを原子エネルギーから得ていることになる。したがって、その使用は、太陽からの供給への生命の完全な依存からの解放の、初期の段階にあると言える。今日のワケアウエアワのマオリ族¹⁰が、温泉を彼らのすべての家庭的な用途に用いているように、人類がおそらく常実践してきた地球の内部熱の小さな利用についても同じことが当てはまるであろう。アイスランドの人々はその [(温泉熱の)] 助けがなければ気候的に許されないであろうこと、野菜を育てることまでしているのである。[イタリアの] トスカナ州におけるホウ砂産業、そこでは「サフィオニ」{suffioni}¹¹からの蒸気がホウ砂を含む温泉水を蒸発させるのに用いられており、別の例である。イタリアにおける石炭の貴重さによって、実際に、そのようなエネルギーを動力に変える、より大規模な利用法が大戦中に模索された。完全に奇想天外とは言えないのだが、石炭が欠乏した場合に、十分に深い井戸を掘り、圧力を加えた水を循環させることでそれを蒸気に変え、地球の内部熱を大規模に取り出すことが提案されたほどなのである¹²。

(2-7-2)

太陽からのエネルギーそのものについて言えば、それが原子エネルギー起源であることを疑う理由はほとんどない。そのような膨大なエネルギーを供給する放射能と原子核分裂のよく知られた過程が、大変特殊で限定的なものであることは事実である。一方で、相対性理論はエネルギーと物質の関係性に新しい概念を導入した¹³。それはまだ完全に実験的な検証がされていないものの、宇宙的な時代の長さで太陽や星からの気前のよいエネルギーの放出を維持することについての、唯一の有望な説明とみなされている。この理論は、物質が保存されるのはそ

⁹ John Joly はアイルランドの地質学者であり、地殻の放射性物質による熱循環理論を提案した。

¹⁰ Maoris of Whakarewarewa はニュージーランド、ワケアウエアワ地区の先住民のことである。

¹¹ Suffioni はイタリアにおいて火山性の蒸気噴出を指す言葉である。

¹² 今日、地熱発電がここに記載されている方法によって発電していることは周知の事実である。

¹³ 相対性理論における物質とエネルギーの関係性は $E=mc^2$ という基本的な式の両辺に両者が含まれることで示されている。

のエネルギーが変化しない場合だけであり、エネルギーが保存されるのは質量 {mass} が変化しない場合のみであるという意味で、エネルギーと物質に関する保存則を統合するものである。系によるどのようなエネルギーの損失も実際の質量の損失が伴われるものである。ただし、微小なものであることから、実験により証明することが全くできないものではあるが。物質の崩壊は、もしそれが起こるのであれば、失われた質量が光速で動くときの2倍のエネルギーが発生するという結果をもたらすであろう。放出されるエネルギーに関して失われる質量はあまりに小さく、例を挙げれば、知られる限り最も強力な変化であってもそうなのである。宇宙のエネルギーも物質的な崩壊のゆっくりした過程の結果であるかもしれないと考えられるのである。

(2-7-3)

天体分光学からの証拠は、星々はその経歴として、最初は水素やヘリウムから光り輝きはじめ、後になってのみ、より重い元素が彼らの見た目を形作ることを示している。より重い元素はより軽い元素の結合によって形成されることが推測される。もしわれわれが一つの例をとるとすれば、近代的な原子構造の観点からは、ガス状の水素が星間経済において損失するとして、4つの原子が前者の結合状態から後者の一つの原子を作るという水素への結合を行うことになる。この過程のみが宇宙のエネルギーの源泉を説明するに足るものである。なぜなら、そのように4つの水素原子が1つのヘリウム原子に結合するにあたって、それらは約400分の3だけの質量の損失を被るからである。水素原子の重さが1.0075であるとする、ヘリウムのそれは4.000となる。これが近代における宇宙創造の神話論者 {cosmogonist} が主張する [宇宙のエネルギーの] 源泉なのである。原子の発展の初期段階においては、もっとも複雑な原子が放射能によって分裂する最終段階と同じように、エネルギーを必要とするというよりも、それを産出すると想定されるのである。

(2-8) 文明はより近い源泉からエネルギーの流れを制御することを求める “CIVILISATION SEEKS TO CONTROL THE FLOW OF ENERGY FROM NEARER ITS SOURCE.”

(2-8-1)

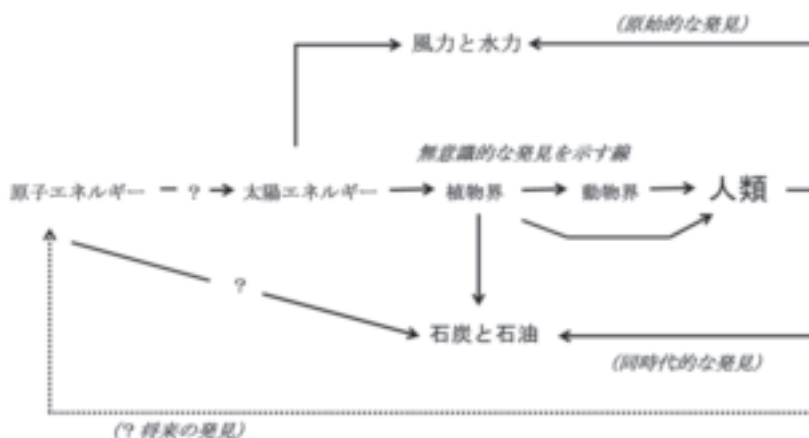
このように自然界におけるエネルギーの源泉について、そしてそれが最初に生命にとって利用可能になったのはどのようにしてか、簡単に述べてきたわけであるが、それに続く段階には目新しさは全くない。動物の世界は、それが自然の非生物的能量を全く使うことができないという点で植物のそれと区別される。これは、最初に植物の組織の中に蓄えられなければならない、そこから草食動物 {herbivora} が糧を得ているのである。肉食動物 {carnivora} は元の源泉から除去された継父であり、人間のような雑食動物 {omnivora} は弓に2つの弦を張っているのである。狩猟 {hunting and the chase} からはじまり、人類はますます、食料のためだけでなく、羊毛、皮革や衣服のための素材のために動物を飼育することを発達させてきた。より定住した時代になると同じ傾向が農耕と、自然の植物を食料と素材のために意識的に耕作する

ことへと導いた。エネルギーの観点から見れば、進歩はより原始の源泉 {original source} に近いエネルギー源を支配し、制御することの連続とみなすことができる。

(2-8-2)

われわれはこの問題における際立った事実を以下のように翻訳することを試みるができるだろう。図は自然からのエネルギーの流れを左から右に向かって示している。太陽エネルギーから人間への線は生命がその内にある自己の成長をしようとする性質から直感的に発達させてきたものである。右から左に向かう線は、人間が供給を意識的に増大させ制御するために取得しようとする方向性を示している。そしてそれは、経済システムから生命を經由せずにそれを行おうとする傾向も示している。

[図1：自然界のエネルギーの流れと人類による利用]



出典：F. Soddy, Wealth, Virtual Wealth and Debt, 1926, p.48.より筆者が翻訳作成

Ⅲ. 利用可能エネルギー，エネルギー資源と生態系，そして人類の市場経済

本節では、

- Ⅲ. 1. ソディのエネルギー資源論の意義と原子エネルギーの扱い、
- Ⅲ. 2. 核兵器開発のための原子炉と原子エネルギー利用の開始、
- Ⅲ. 3. エコロジー経済学の系譜におけるエネルギー利用と生態系、経済社会との関係性の位置づけ、

について、個別に論じてゆく。

III. 1. ソディのエネルギー資源論の意義と原子エネルギーの扱い

まず、IIで抄訳したソディ『富、仮想的富そして負債:経済学の逆説への解決策』第2章「生命の発見“LIFE'S DISCOVERIES”」で取り上げられた内容について概観してゆく。

当該書全体では、ソディは、利用可能エネルギーの流れに支えられた人類社会と、そこにおける物理法則の支配を大前提として、市場経済という社会制度を論じている。銀行金融のほとんどが、部分準備制度を前提とした信用創造された負債として形成されることの結果、実体的で物理的な存在である本質的な富と対をなすものとして形成されるはずの負債が、本質的な富に加えて仮想的富として累積され、本質的な富の従う物理法則（熱力学第一、第二法則）に関係なく増殖してゆくことを批判的視点から指摘している。

このようなソディの論理の最も基礎となるのは、自然界の利用可能エネルギーの流れと物理法則という大前提である。そこから自然的な制約と人類社会とをつなぐ、植物界・動物界などの生態系、利用可能エネルギーを含むエネルギー資源との関係性について、そして人類社会の創り出した「市場経済」という実体と仮想が入り混じった存在を考察しようとするのである。第2章 生命の発見“LIFE'S DISCOVERIES”で取り上げられるのは、太陽からの利用可能エネルギーの、植物及び動物界、そして人類社会への受け入れ口としての生命活動の「発見」である。

冒頭、(2-1) 発見、無意識と意識“DISCOVERY, SUB-CONSCIOUS AND CONSCIOUS.”、(2-1-1) 節でソディは「生命それ自身も発見である」と述べた上で(2-1-6) 節で「進歩が発見の果実なのである。そして発見は通常ではなく、例外的な出来事なのである。」と述べているように、ソディは生命の存在及びその進化を、進歩による連続的な出来事ではなく、不連続な飛躍としての「発見」として捉えている。

そして、生命が存在できるようになった物理的な要因の最重要のものとして、太陽光エネルギーと生物によるその利用を挙げている。この生命によるエネルギーの変換と貯蔵にとって最も大きな「発見」であったのが、「葉緑素」である。

(2-2) 非生物の世界から生物へのエネルギーの途切れのない流れ“THE UNBROKEN FLOW OF ENERGY FROM THE INANIMATE WORLD INTO LIFE.”では、葉緑素を介した自然界のエネルギーの流れについて述べる。(2-2-2) 節で「生きている有機体の内的なエネルギーは有機体によって創り出されるのでもなければ(中略)、それは太陽から放射の形で放出され、植物の体を通し、次に植物を食べる動物という順で[生物に]もたらされるのである。」と述べている通りである。太陽エネルギーが生態系および人間社会における大本の駆動エネルギーであり、そこからシステム全体の構造を記述することは、ソディの理論に一貫した原理である。

ソディが挙げるこの原理は深海の熱水鉱床で硫化水素を用いた代謝を行う生物などごくわずかの例外を除けば¹⁴、地球上のほとんどの生物に適用されることは明らかである。

¹⁴ Corliss, J.B., Dymond, J., Gordon, L.I., Edmond, J.M., von Herzen, R.P., Ballard, R.D., Green, K., Williams, D., Bainbridge, A., Crane, K. and van Andel, T.H., “Submarine thermal springs on the Galapagos Rift,” *Science*, 203, pp. 1073-1083, 1979. 1977年の深海の光合成から独立した生物群集の発見についての論文。

引き続き、(2-3) 内的そして外的な生物によるエネルギー使用 “THE INTERNAL AND EXTERNAL LIFE-USE OF ENERGY.” においては、(2-3-1) 節で、「物質代謝を維持する生物の内的なエネルギーと、動物や植物がその環境に働きかけるのに用いる、すなわち植物が根の成長や枝の伸展への抵抗に打ち克つのに用い、動物が移動やそのほかの動作のために用いる生物の内的なエネルギーとを区別するのは便利であり実際的である。」と述べて、生命維持の内的仕事に使われるエネルギーと外的な仕事（例えば人間の労働）に使われるエネルギーを区別した。

その上で、いずれの場合においても「自然の傾向としてのエネルギーが一つの段階を経れば劣化し、価値のない熱に変化するということは、迂回されなければならない、それにより随意に仕事に再度変化させることができ、生命によって使われるなにか、[物質の] 状態ないし [そのような物質] それ自体に、最終的にはなると示されなければならない。」と述べた。つまり、生命に降り注ぐ利用可能なエネルギーが環境温度と同じ利用不可能な熱に劣化してゆくこと、すなわちエントロピー増大則による回復不能な質的变化を起こすことを一部であっても防ぎ、生命に利用可能な形の物質あるいは物質の状態として貯蔵することが、生命の存在にとって必須の過程であると述べたのである。

そして、(2-4) 利用可能エネルギーの起源 “THE ORIGIN OF AVAILABLE ENERGY.” では、水力、風力、潮汐力、地熱（火山と温泉のエネルギー）といったそのほかの自然のエネルギーとその利用形態について述べているが、全ての力学的なエネルギーが周囲の環境と同じ温度の熱という、利用可能でない形態に変化させる傾向を回避する過程として、もっとも重要な過程は、やはり生命によるそれ（光合成による利用可能エネルギーの貯蔵）であると論じている。(2-5) 代謝の物理化学 “THE PHYSICAL CHEMISTRY OF METABOLISM.” で述べられるように、葉緑素はいわば触媒として働き、光エネルギーの介在の下で、本来であれば進行しない二酸化炭素と水から酸素と炭水化物の合成という光合成反応を引き起こす。今日においても葉緑素による光合成を完全に模倣する人工的な光合成は実現しておらず、部分的な再現を元に研究開発が行われている¹⁵。

化石燃料の起源について述べた(2-6) 石炭と石油 “COAL AND OIL.” の(2-6-1) 節では、気候及び生態系の条件が優れていた石炭紀に、葉緑素による太陽エネルギーの固定化による利用可能エネルギーの膨大な貯蔵が行われ、今日の石炭資源となったことを指摘している。また、石油の起源についても石炭の「ベルギウス法」による油化技術も含めていくつかの源泉となり得る現象の説明を行っている。

(2-7) 太陽と原子エネルギー “SOLAR AND ATOMIC ENERGY.” では、太陽エネルギーの源泉が水素の核融合エネルギーであることを指摘する。それに先立ち、地球の地熱エネルギーが

¹⁵ 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、NEDO ニュースリリース「人工光合成の水素製造で世界最高レベルのエネルギー変換効率2%を達成」2015年3月31日。
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100372.html 2018年1月20日参照。

放射性物質起源であるとの説を紹介するが、これについては今日ではその比率がおよそ半分であることまで含めて観測されている¹⁶。続いて太陽エネルギーもまた原子エネルギーから供給されていること、このエネルギーはアインシュタインの相対性理論が導入したエネルギーと物質の関係性についての概念から説明できることを述べている。すなわち(2-7-2)節で述べるように、「この理論は、物質が保存されるのはそのエネルギーが変化しない場合だけであり、エネルギーが保存されるのは質量 {mass} が変化しない場合のみであるという意味で、エネルギーと物質に関する保存則を統合するものである。」ということである。これは、熱力学の第一法則、質量・エネルギーの保存則を指す。

また、同じく(2-7-2)節で述べるように「物質の崩壊は、もしそれが起こるのであれば、失われた質量が光速で動くときの2倍のエネルギーが発生するという結果をもたらすであろう。」は、相対性理論で導出される物質とエネルギーの関係式を表している。つまり、ニュートン力学的な運動エネルギーの定義で、速度 v で運動する質量 m の物体の運動エネルギー K が $K = \frac{1}{2}mv^2$ と表されるのに対し、この速度 v を光速 c で置き換えて2倍したものが、すなわち、 $E = mc^2$ となることに言及している。このように原子エネルギーが太陽をはじめ、恒星が天文学的時間の長さにならって放出し続ける膨大なエネルギーの源泉であることを強調したうえで、(2-8)に示す、人類とエネルギーの源泉との関係性について提示するわけである。

(2-8) 文明はより近い源泉からエネルギーの流れを制御することを求める“CIVILISATION SEEKS TO CONTROL THE FLOW OF ENERGY FROM NEARER ITS SOURCE.”では、筆者が[図1: 自然界のエネルギーの流れと人類による利用]と付記した図に示される自然界のエネルギーの流れと植物、動物、人類へと続く利用可能エネルギーの流れを説明し、人類が動物、植物を省略してより直接的に、多角的に自然界における利用可能エネルギーの源泉である原子エネルギーの利用に向けて、進んでいることを示している。すなわち、自然の植物や動物を狩猟採取することから、農耕、牧畜へとそれらを制御する進化を遂げ、やがて、石油・石炭やそれ以外の自然エネルギーの変形態態をより直接的に利用するようになり、そして、将来的には原子エネルギーを直接、支配、制御するようになるということである。

筆者もこれまでも取り上げてきたように¹⁷、ソディは放射性同位元素についてラザフォードとともに基礎理論を構築した化学者である。

原子は安定した状態と不安定な状態で存在し得る。不安定な状態であるが物質的な特徴は安定な原子の属性と同一の原子を、放射性同位体と呼び、この放射性同位体は、一定のエネルギーあるいは物質を放出して遷移し、安定な状態となるまで変化する。このような放射性同位体の性質については、ラザフォードとソディの共同研究を初め、前世紀の初頭にかけて種々の研究に基づく基礎理論が確立された¹⁸。

¹⁶ The KamLAND collaboration, Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements, *NATURE GEOSCIENCE*, Vol. 4, September 2011.

¹⁷ 藤堂史明「原発事故による放射線リスクの経済分析」『新潟大学経済論集』第94号、2012年、69-97頁。

¹⁸ 拙著同論文で参照したように、ソディによるラジウムの放射性崩壊の性質についての研究は次の著書にまと

エコロジー経済学の形成への貢献者であるソディは、その原子エネルギーの戦争利用への危険や危険性への警告者としても知られるが、この時点においては人類による原子エネルギーの利用を、進化の過程の必然として、肯定的に捉えていたと思われる。

1920年代にソディが展望した原子エネルギーの利用に関して、その後の核開発の歴史はどのように進行したのだろうか。

III. 2. 核兵器開発のための原子炉と原子エネルギー利用の開始

人類による原子エネルギーの利用の歴史は核開発の歴史であった。20世紀初頭にはすでに原子エネルギーの利用について理論的構想があったわけだが、それが実際の原子炉、爆弾、発電などの装置、技術として発達したのは第二次世界大戦中、米国による核兵器開発計画、当時計画を管轄した米軍の「マンハッタン管区」の名称から「マンハッタン計画」と呼ばれる計画によるものであった¹⁹。

なお、核兵器開発に関しては、ドイツ、日本など枢軸国においても研究が進められていたが、いずれも両国の敗戦までに成功しなかった²⁰。

1945年に人類史上初めて原子核分裂の連鎖反応を爆弾として利用した「核兵器」が使用されたが、広島に投下されたウラン型原子爆弾は砲撃型のウラン235の連鎖反応を、そして、史上初の原爆実験及び長崎へ投下されたプルトニウム爆縮型の原子爆弾は、プルトニウム239による連鎖反応を用いている。

これらの核物質は自然界にはごく微量にしか存在しないか、あるいは原子炉を用いて人工的に生成されるほかに、この目的のために複数の方法が並行して開発された。ウランの核分裂性の同位体であるウラン235は天然ウラン中にわずか0.72%しか存在しないため、ウランを連鎖反応させる爆弾を製造するためにはこれを高濃度に圧縮する技術の開発が必要であった。

このために気体拡散法、熱拡散法、そして電磁分離法の開発が進められた。どれもウラン235の濃度を高めるための方法であったが、このうち最も開発が進行し、最初に核分裂性ウランの一定量の濃縮に成功したのが電磁分離法であった。1944年3月に電磁分離法αプラントから初めての研究用の10%低濃縮ウランが出荷された。続き、同じく1944年6月にβプラントから高濃縮ウランが出荷された。

一方、プルトニウム型爆弾のためには天然ウランの組成のほとんどを占めるウラン238に中性

められている。Frederick Soddy, *The interpretation of radium and the structure of the atom*, J. Murray, 1909. (『ラジウムの解釈』1909年。) また、1913年のBohrによる原子核の理論の成立以前の原子の変化に伴う放射線の発生についての研究は、代表例として次を挙げられる。E. Rutherford and F. Soddy, "The Case and Nature of Radioactivity II", *Philosophical Magazine*, (6), 4, pp.569-585, 1902. そして原子の遷移の周期律についての研究として、次を挙げられる。F. Soddy, *The Radio-Elements and the Periodic Law*, *Chemical News*, 107, pp.97-99, 1913. 及び同雑誌同名の論文pp.168-169, 1913. なお、後半の3論文の邦訳は次に所収されている。物理学史研究刊行会編『放射能』東海大学出版会、1970年。

¹⁹ 山崎正勝・日野川静枝編著『原爆はこうして開発された』青木書店、1997年。本節は主に同書第4章「原爆の開発と生産へ」を参照した。

²⁰ 山崎正勝『日本の核開発：1939～1955』績文堂、2011年。

子を吸収させ、プルトニウム239に変化させる。このプルトニウム生産のための初めての原子炉は1942年にシカゴ大学冶金研究所が建設したシカゴパイル1号機（CP1）である。

シカゴパイル1号機は、パイル（pile：積み重ね）の名称の通り、黒鉛の薄板とウランの塊が楕円球の形になるように積み重ねられたもので、黒鉛、ウラン金属、酸化ウランによって構成された黒鉛減速空気冷却炉であった。そして1942年12月2日午後3時20分に木片にカドミウムの薄膜を巻いた「制御棒」の引き抜きにより連鎖反応が起こっていることが確認された。その設計の目的はウラン235の核分裂「連鎖反応」によるプルトニウム239の生産である。このプルトニウム生産炉としての原子炉が、その後の原子エネルギー開発において中心的な位置づけとなる原子炉の登場と言える。

なお、CP1で始まったプルトニウム生産炉は、その後、CP1を移転したCP2、クリントン・パイル、そして量産レベルのプルトニウム生産炉としてのハンフォード工場へとより大規模化していった。当初ハンフォードのプルトニウム生産炉は熱出力250メガワットのものが3基であり、その発生する放射線の強さから、運転地域からの距離3.2キロメートル、パイル間の距離は10キロメートルであった²¹。ハンフォード工場の立地したコロンビア川の流域では今日でも放射能汚染が問題となっている²²。

拙稿²³で紹介したようにソディは本書第1章（(1-7-2)節）において「大戦の1914年における勃発の以前に『解放された世界』においてH.G.Wellsは、いつもの彼の知的明晰さと洞察をこの問題に捧げた。」と、核兵器を用いた戦争を描写したウェルズ²⁴を評価している。Science Fiction (SF) 作家として名高いH.G.ウェルズはソディが1909年に著した『ラジウムの解釈』に強く影響され、当該書の冒頭謝辞に「フレデリック・ソディの『ラジウムの解釈』に、この物語を献呈して感謝のしるしとする。これは長い何節かについて、あの本の第11章に恩恵をこうもっている。」と述べている。

ソディが指摘した通常物質であっても内部に巨大なエネルギーを秘めているという事実と、それが利用されれば人類の生存に大きな影響を与えるとの考えは、現実に第二次大戦中の二発の原子爆弾の都市への使用という大惨事と、引き続き冷戦における核兵器開発競争、原水爆実験へと続く歴史の先触れであった。そして、1953年の「平和のための核」²⁵政策から原子炉技術を低濃縮ウランによる発電用原子炉へと応用した原子力発電所が、日本をはじめとする世界に拡散していくこととなった。この場合も、プルトニウム生産炉と同じく、核燃料中のウラ

²¹ 山崎・日野川編、同書第4章

²² 2017年にもワシントン州はハンフォード地域の放射性物質の保管体制を改善するよう連邦政府に要請している。<https://www.courthousenews.com/wp-content/uploads/2017/05/HanfordEnforcement-05102017.pdf> 2018年1月20日参照。

²³ 前掲拙稿、2008年（注(2)参照）。

²⁴ H.G.Wells 著、浜野輝訳『解放された世界』、岩波文庫1997年（原著1914年）。

²⁵ 1953年12月8日、米国ドワイト・D・アイゼンハワー大統領が国際連合で行った演説が示す、原子力発電用の核物質及び技術を提供するとともに核兵器開発を制限し、核兵器の不拡散を目指す政策。平和利用の促進を謳うが、自国の核戦力の堅持も同時に掲げ、既存の核兵器保有国による核兵器の独占のための政策とも解釈できる。

ン238がプルトニウム239へと変化することになり、平和目的の発電用原子炉といっても、プルトニウム生産炉としての性格を持っている。核物質の蓄積を意味するこの性質はプルトニウムを増殖させる高速増殖炉を含む核燃料サイクル構想として、むしろ積極的に推進されてきた。

このような核兵器開発とその使用という動きに関してソディがどのような考えを持ったのかははっきりしていない。ソディは第二次大戦中の核兵器開発の動きには全く関係せず、1936年に妻を亡くして以来、戦後に至るまで経済学などの分野も含め研究発表はごく少数しかなかった²⁶。しかし、H.G.ウェルズの『解放された世界』に登場する、核戦争によって荒廃した世界において、「世界連邦」による核兵器廃絶が実施され、平和へと人類が新たな一歩を歩みだす様子が描写されたように、ソディが人類の文化的向上と世界平和を訴求していたことは疑いがない。

III. 3. エコロジー経済学の系譜におけるエネルギー利用と生態系、経済社会との関係性の位置づけ

III. 3. 1 ソディのエネルギー資源論と「エコロジー経済学」

次に、ソディのエネルギー資源の考え方がエコロジー経済学、エントロピー経済学などどのように関連づけられるか考えてみよう。ホワン・マルチネス＝アリエは、『エコロジー経済学』（原著1990年）²⁷において、「人間エコロジー的エネルギー論と経済学との間の相互作用」²⁸について考察すると、彼の「エコロジー経済学」の課題を定義する。その上で、「著名な化学者であるフレデリック・ソディは、著作家目録の中でも特別の位置を与えられるに値する。彼は、経済における農業の役割を（まさに「緑的な」仕方）で強調するために、エネルギーの「生命維持的利用」と「労働的利用」とを区別したが、それはロトカがエネルギーの体内的利用と体外的利用とを区別したのと似ている。」²⁹と述べている。ソディの考え方は既に本稿で取り上げた「(2-3) 内的そして外的な生物によるエネルギー使用」に現れている。ソディは、人類によるエネルギー資源の利用は、生存維持と共にその経済的生活の維持、質の向上のために用いられる、という考え方に基づいており、富と豊かさの創出という概念を念頭におくという意味で、より経済学的な関心に沿った考え方と言える。

III. 3. 2 生態学的アプローチにおけるエネルギー資源論

マルチネス＝アリエがソディの生物におけるエネルギー利用論との類似性を挙げたロトカは、生態系内における生物種の個体数（被捕食者、捕食者）の変動に関する「ロトカ＝ヴォル

²⁶ Linda Merricks, *The World Made New - Frederick Soddy, Science, Politics, and Environment*, Oxford University Press, 1996.

²⁷ ホワン・マルチネス＝アリエ、工藤秀明訳『エコロジー経済学—もうひとつの経済学の歴史』H B J 出版局、1991年。なお、増補改訂版は、ホワン・マルチネス＝アリエ、工藤秀明訳『エコロジー経済学—もうひとつの経済学の歴史』増補改訂版、新評論、1999年。

²⁸ 同書、17-18頁。

²⁹ 同書35頁「エコロジー経済学と金銭経済学」。

テラ方程式³⁰で著名な生態学者である。彼は、物理学的な仕事量と経済価値に関するオストワルドの議論³¹に影響を受けながら、エネルギーと生物との関係性についての議論³²のごく早期において、生物の進化におけるエネルギー利用の重要性について「物質系における物質の分布のあらゆる変化には、一定のエネルギー変換が伴う。したがって、エネルギーの変換を支配する法則は進化の法則である。」と指摘している³³。

生態学の理論をより直接的に経済過程の分析に関連づけようとした日本におけるアプローチとして、鷺田豊明『エコロジーの経済理論』³⁴がある。

鷺田は生態系の構成原理、すなわち「自然の豊かさの指標とは何か」³⁵、という問いに対し、生態系全体の呼吸排熱最大化を意味する「最大呼吸仮説」を提示して、生態系の挙動について分析した。また、近世の石高制に見られる食糧生産と経済的価値との関係づけを詳細に分析した。さらに、現代の経済社会における経済価値の生態学的な基礎について展望した。

鷺田による生態系におけるエネルギー流の扱いについての学説分類³⁶に従えば、ロトカは1922年に「進化のエネルギー論への貢献」³⁷を著し、生態系内の全エネルギー通過量を増大させるように活動する生物が自然選択の恩恵を受けることになる」と述べている、とし、これを「エネルギー流最大化法則 (Law of Maximum Energy Flux) としている。これは、1925年の著書『物理生物学の基礎』³⁸で "The Law of Evolution Adumbrated as a Law of Maximum Energy Flux" としてまとめられている。

また、ロトカは "The result will be to increase the total mass of the system, and, with this total mass, also the total energy flux through the system, since, other things equal, this energy flux is proportional to the mass of the system". 「この結果はシステムの全体の質量を増やすことにつながり、そして、この全体質量と共にまたシステムを通過する全体のエネルギー流もそうなる。なぜなら、他の条件が同一ならば、このエネルギー流はシステムの質量に比例的であるからである。」³⁹とも述べている。これはソディと同じく植物を起点としたエネルギーの固定化量について着目しているようでもある。

³⁰ 生態系内において被捕食者 x と捕食者 y がそれぞれ $dx/dt = Ax - Bxy$, $dy/dt = -Cy + Dxy$ と時間変動するときに、両者の個体数が周期変動することを示した方程式。変動なしの静止点は $(x, y) = (C/D, A/B)$ で得られる。

³¹ W. Ostwald, *Energetische Grundlagen der Kulturwissenschaft*, Verlag von Dr. Werner Klinkhardt, 1909.

³² マルチネス＝アリエによれば、エネルギーと農業、経済の関係についての創成期の議論は、1880年代に複数の論文を発表していた S. Podolinsky によるものである。彼はエンゲルス及びマルクスに農業における人間労働がエネルギー蓄積に貢献し、この意味で労働価値説に科学的基礎を与えると伝えたが、理解されなかったとされている。(マルチネス＝アリエ前掲書、91頁)

³³ A. J. Lotka, *Die Evolution vom Standpunkte der Physik*, *Annalen der Naturphilosophie*, Zehnter Band, 1911, pp.59-74. 引用箇所はp.62参照。

³⁴ 鷺田豊明『エコロジーの経済理論』日本評論社、1994年。

³⁵ 同書、第2章「生態系の構造と自己組織化」35頁。

³⁶ 同書、第2章第4節「エネルギー流と自己組織化」54頁。

³⁷ A. J. Lotka, *Contribution to the Energetics of Evolution*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 8, pp. 147-151.

³⁸ A. J. Lotka, *Elements of Physical Biology*, Williams and Wilkins Company, 1925.

³⁹ 1922年の Proc. N. A. S. 論文 (p.147) で続けて。

鷺田によると、このようなエネルギー流に着目したロトカの構想は、オダムとピンカートンにより、システムはエネルギー流から最大能力を引き出すように組織されるという「最大能力原理」(Maximum Power Principle)に一般的原理として示された。さらに、生態系の自己組織化に関してはジョルゲンソンの「最大エクセルギー原理」⁴⁰やカイとシュナイダーによる「再定式化された第二法則」(最大エネルギー散逸原理)⁴¹が挙げられている。鷺田自身は、独自の生態系の組織原理として「最大呼吸仮説」を提唱しており、それは、「生態系は、群集総呼吸を最大にするように生物種間の相互依存関係及び非生物的環境との関係を自己組織化する」⁴²というものである。それは一見、最大エネルギー散逸原理に似ているが、鷺田によれば「(前略)最大呼吸仮説が問題するエネルギー流は植物によって固定化された部分である。蒸発散という形でのエネルギーの散逸は、植物が固定化できなかったエネルギーによる植物体の体温の上昇をおさえるための防衛的費用の支出でしかないのである。生態系にとって真の所得は、固定化されたエネルギーである。生態系自身の能力の増大は、この所得の利用にかかっているとらえるのが明らかに合理性がある。」⁴³と述べ、かつ、それが(カイ及びシュナイダーによる)生態系全体に対する熱量傾斜(加えられた熱量とともとのその環境システムの熱量との差異)の劣化の手段としての生態系の組織化ではなく、それ自体が目的としての群集総呼吸の増大の原理であることから、生態系のマクロ的及びミクロ的目的⁴⁴という問いに答えることができる組織化の原理としてふさわしいとしている。

本稿で取り上げたソディによるエネルギーの流れと生物、人類との関係性について言えば、ソディは、エントロピー増大法則によるエネルギーの利用可能性の劣化に対して、「経済的な重要性」を持つ過程として生命を捉えている。彼は、(2-4-1)節で以下のように述べている。「(前略)全ての力学的エネルギーの究極的な到達点である、役に立たず利用可能ではない形態、すなわち周囲の環境と同じ温度の熱に、直ちに变化する自然の傾向を持っている。生命はこの傾向が回避される経済的な重要性を持った唯一の過程では全くないが、他と比較できないほど、最も重要なものである。」

このような位置づけは、生物がエントロピー増大の過程において経済的な意味を持つ利用可能エネルギーの蓄積を行うという意味に解釈すれば、先に挙げたジョルゲンソンの最大エクセルギー原理と似た点がある。また動物を含む生物の群集そのものが増殖し繁栄していく過程を考えれば、間接的に、鷺田が「最大エネルギー散逸原理」と呼んで言及している⁴⁵、カイとシュ

⁴⁰ S. E. Jørgensen and H. Mejer, Ecological Buffer Capacity, *Ecological Modelling*, vol.3, 1977, pp. 39-61. 及び, S. E. Jørgensen and H. Mejer, A holistic approach to ecological modelling, *Ecological Modelling*, vol.7, 1979, pp. 169-189. 並びにジョルゲンソン単著による以下が挙げられている。

S. E. Jørgensen, *Integration of Ecosystem Theories: A Pattern*, Kluwer Academic Publishers, 1992.

⁴¹ E. D. Schneider and J. J. Kay, Life as a Manifestation of the Second Law of Thermodynamics, *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 19, Issues 6-8, 1994, pp. 25-48.

⁴² 鷺田, 前掲書, 65頁。

⁴³ 鷺田, 前掲書, 68頁。

⁴⁴ 鷺田は次のように定義している。「個体の目的をミクロ目的と呼び、それに対応するものとして個体群全体の目的をマクロ目的と呼ぶことにしよう。」鷺田, 前掲書, 21頁。

⁴⁵ 鷺田, 前掲書, 60頁。

ナイダーの議論や鷺田自身の「最大呼吸原理」とも矛盾しないと考えられる。ただし、ソディは、鷺田の言う生態系のマクロ的、及びミクロ的的目的については意識しておらず、人類による利用という最終目的をマクロ目的とし、その利用対象としての生態系と、その構成原理という捉え方に関心が集中しているようである。

いずれにせよ、植物がエネルギーの散逸、すなわちエントロピーを最大化すべく光合成をおこなうのか、そうでないのかは、現在でも議論がある一方で⁴⁶、光合成を契機とする利用可能エネルギーの取り込みが、太陽エネルギーの入射からはじまり、植物・動物界を経て人類へとつながる際の最も重要な経路であることの指摘には、間違いがないと思われる。

III. 3.3 エコロジー経済学とエントロピー経済学、人類社会への希望の考え方

発展的な議論となるが、本稿で扱ったソディによるエネルギー資源の起源とその利用経路についての考察は、今日の環境問題及びその学術的な理解を目指すエコロジー経済学の系譜に連なる研究者たちの考察にとって、どのように位置づけられるだろうか。ホワン・マルチネス＝アリエは、その『エコロジー経済学』増補版⁴⁷の増補論文（改訂新版への序文にかえて）で、以下のように述べている⁴⁸。

ジョージ・ジェスク＝レーゲンやウィリアム・カップのようなエコロジー経済学者たちは、彼らの先行者たちと同様、エコロジーの観点から見た場合、経済には共通の測定基準がないと説明してきた。経済学者たちは、依然として価値論をもちえていないのである。これが本書の主要な論点である。経済的な通約可能性の欠如は、市場経済のみならず中央計画経済にも見られる（これについては、オットー・ノイラートが1920年代に指摘していた）。非更新性資源の枯渇や地球の温暖化や放射能汚染といったような通時的な外部性の評価は、あまりに恣意的であるため、合理的な環境政策の基礎としては役立ちえない。他方、政策は、たとえば収容能力基準や「持続可能性」に関するエコロジー的合理性のみに基礎を置くわけにもいかない。そうした通約不可能性があるゆえに、経済は政治と不可分なのである。

（ホワン・マルチネス＝アリエ，同書増補 i 頁より）

これはエコロジー経済学、ないしその広義の意味での発展形であるエントロピー経済学にとっても、基底にある問題意識であると言える。とりわけ、環境問題を外部性として捉え、新古典派経済学の論理と体系をそのまま適用する形での環境経済学、すなわち外部性の理論、環

⁴⁶ T. M. Addiscott, Entropy, non-linearity and hierarchy in ecosystems, *Geoderma*, vol. 160, 2010, pp.57-63.

⁴⁷ ホワン・マルチネス＝アリエ著、工藤秀明訳『[増補改訂新版]エコロジー経済学—もうひとつの経済学の歴史』新評論、1999年（原著増補改訂新版1991年）。

⁴⁸ 翻訳文における補足は省略。

環境価値評価の理論が盛んとなっている状況から、市場における価値評価に、自然生態系と人間社会の仕組みそのものを支配する物理法則が従属することの矛盾、そして社会的規範としての環境上の公正という政治問題に対し、功利主義的な合理化が行われる事を懸念する研究者にとってはそうであったのではないだろうか。

本稿並びにこれまでの拙稿で取り上げてきたソディの『富・仮想的な富そして負債』の執筆時期における、その主な関心領域は自然科学の法則体系、とりわけ熱力学の第一、第二法則という物理法則の経済過程への適用と、既存の経済学分析、そして経済政策の批判にあった。この意味でソディは今日の環境経済学批判の先駆者でもあったわけである。

経済過程の分析にエントロピー法則を適用することについて、包括的な議論を展開したニコラス・ジョージ・スケーラーゲンは、1971年の主著『エントロピー法則と経済過程』⁴⁹において、以下のように述べている。

「(前略) 経済発展はただ2つの要素に煮詰められる。本来の発展、すなわち低エントロピーのうちどうしても廃棄物となってこぼれ落ちてしまう割合を減少させるよう、それをふるいわけより目の細かいふるいを開発すること、それから純粹の成長、すなわち、既存のふるいを利用してふるいわけの過程を拡大すること、である。人類の経済史をふりかえれば、人間のこのエントロピーのための闘争については疑う余地がない。」

このような「エントロピーのための闘争」という人類史の捉え方は、エネルギー資源獲得の競争と見なされがちな人類史の捉え方、それは一方で現在の資源獲得競争と言われる世界経済の状況にも通底する捉え方であるが、人類にとって真に希少な資源とはなんであるかという問いを投げかけたものである。エネルギー資源を用いればエントロピーの増大法則に伴う物質の拡散と利用可能エネルギーの散逸に抗して、生産と消費の規模を拡大させることができる。しかし、それはジョージ・スケーラーゲンが述べている「熱力学第4法則」の考え方、そして「物質も重要である」⁵⁰という点で、エネルギー資源の無制限の供給による持続的な成長という概念もまた、限界があることが明らかである。

日本の熱力学者である植田敦は、環境問題へのエントロピー法則の適用として、地球のマクロ的なエントロピー増大過程に対する地球熱機関という概念、そして入れ子構造となる生物や人類社会の熱機関という考え方により、環境問題と経済政策、そして経済発展に関する独自の考え方を示してきた⁵¹。植田敦の応用的な主張や関連したエントロピー学会に関連する主要な論者の主張については省略するが、ジョージ・スケーラーゲンの経済社会観に比べ、物質循環をより豊かにしてゆくことにより、一定程度の持続可能な発展が可能という考え方が植田のエントロピー論の特徴として挙げられる。

⁴⁹ N. ジョージ・スケーラーゲン、高橋正立・神里公他訳『エントロピー法則と経済過程』みすず書房、1993年、378頁。原著：N. Georgescu-Roegen, *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard Univ. Press, 1971.

⁵⁰ N. ジョージ・スケーラーゲン著、小出厚之助訳「自立的技術体系のプロメテウスの条件」小野周ほか編『エントロピー』朝倉書店、1985年、141-158頁。

⁵¹ 植田敦『熱学外論』朝倉書店、1992年。

このような考え方は、基本的に人類によるエネルギー資源の獲得とその支配・利用を前提として、科学技術の進歩による、平和的で文化的な発展を構想したソディの発想と共通する面が多いと考えられる。

室田武は1979年の著書『エネルギーとエントロピーの経済学』⁵²の第一章「ジェヴォンズからソディへ」で経済過程のプロセス分析の理論としてエントロピー法則を適用した1971年のジョージ・スケーレン⁵³を引用しつつ、同書が指摘している S. ジェヴォンズの『石炭問題』における資源の希少性による経済成長の制約の論点に加えて、ソディが利用可能なエネルギーのフローを経済価値の物理的な根源として主張した事を指摘している⁵⁴。このようなソディのエントロピー経済学の先駆的業績は室田のほかに H. デイリー⁵⁵によって指摘されてきた。

原子エネルギーの利用に関しては、楽観的な（当該書執筆時の）ソディに対し、植田の初期の問題提起⁵⁶に見られるように対立が見られる。それは環境による制約と循環による環境の維持という条件の重要性、すなわち大きなエネルギー資源を得ることよりも、その利用の結果によって環境を改変する内容が重要であること、すなわち宇宙に最終的に廃棄できるエントロピーの形で変化を取り出すことができなければ、環境が変化し、熱機関としての地球環境の安定性、そこに住まう生物と人類社会が危険にさらされるという点についての着目度が、ソディにおいてはまだまだ未知であった、という歴史的必然と言わざるを得ない。

ソディは原子構造およびその崩壊あるいは融合によるエネルギー放出についての研究の創成期、成熟期に活動し、それでも原子エネルギーの軍事的利用とそれによる人類の危機に関しては非常に先見の明があったが、自らの努力と人類の叡智を信頼し、科学と人類社会の改良によるその危機の克服に対して希望的な将来展望を持っていたと考えられる。原子エネルギーの軍事的利用である原子爆弾が二度にわたり使用され、また史上初の3基の原子炉のメルトダウンと4基ももの爆発あるいは炎上という過酷事故の地となった日本に住まうものとして、それが間違っていなかったことを願いたい。

⁵² 室田武『エネルギーとエントロピーの経済学』東洋経済新報社、1979年。

⁵³ N. ジョージ・スケーレン著、前掲、1971年の『エントロピー法則と経済過程』。

⁵⁴ 室田武のエントロピー経済学の創成における貢献は以下の拙著を参照されたい。藤堂史明「エントロピー経済学の創成と環境学の今日的課題」経済学論叢（同志社大学）第65巻第3号、2014年、147-163頁。

⁵⁵ H. E. Daly, The Economic Thought of Frederick Soddy, History of Political Economy, Vol.12, Issue 4, 1980.

⁵⁶ 植田は次の二つの論考によって、核融合発電の限界と「資源物理学」という熱力学第二法則を考慮したエントロピー論の基本的な提案を行った。

植田敦「核融合発電の限界」『日本物理学会誌』第31巻第8号、1976年、598-602頁。

植田敦「核融合発電と資源物理学」『日本物理学会誌』第31巻第12号、1976年、938-941頁。