

21 世紀のエネルギー問題とトリウム原子炉の可能性

テクノ経済研究所 弘岡正明

キーワード：次世代エネルギー、石油枯渇、原発問題、トリウム原子炉

はじめに

これからの世界は人口の指数関数的な増大に伴い、エネルギー・資源の消費が加速度的に拡大し、紀史の 2050 年を待たずに破局を迎える可能性が高い。1972 年にローマクラブの提言「成長の限界」¹⁾ では、人口の加速度的増大と、資源エネルギーの爆発的な消費の増大が 21 世紀後半にかけて深刻な問題となるとの警告がなされた。その 2 年後にはローマクラブ第 2 レポート「転機に立つ人間社会」²⁾ で破局回避策について論じられた。さらに 30 年後の 2004 年に「成長の限界—人類の選択」³⁾ が刊行され、事態はさらに深刻になって、すでに限界を超えてきたが、まだ人類には選択の余地が残っているとの論調となった。それから 7 年が経過した現在、これらの予測は決して侮れない状況であることには違いない。

従来、現代の石油漬けの高度文明社会はいずれそう遠くない時期に破綻するとみられ、次なるエネルギー源の主役として位置付けられてきた原子力エネルギーが、福島原発事故で大きな曲がり角に立たされている。日本のエネルギー供給比率で見ると、1973 年の石油危機から、現代の 2006 年への変遷は、石油依存度が 76% から 44% へと減少しているの比べ、原子力は 1% から 11% へと大きく増大している⁴⁾。発電電源別比率で見ると、原子力エネルギー依存度は、フランスが 79% と圧倒的に大きく、次いで日本の 28%、ドイツの 27% と続く。アメリカは石炭依存度が 50% もあり、原子力は 19% に留まっている。日本のエネルギー政策は今後どうあるべきなのか、どのようなエネルギースキームを設定すればよいのか、問題点を考えてみる。

1. 現代の位置づけ

エネルギー問題を論ずるに当たって、まずは現代がどのような過去の上に位置付けられているのか、大局的な展望をしておかねばならない。地球の環境は、第一に内部のマントルが上昇し、ホットプルームがわき上がってくると温暖化し、超大陸が分裂する。一方分裂した大陸はコールドプルームの沈みこみによって集まり、超大陸が形成される。超大陸の形成により大陸は冷えて、氷河期となる。再びホットプルームが上昇すると火山活動が活発になり、大陸は分裂する。地球ができた 46 億年前からこのようなプルームの上昇と下降によって、超大陸の形成と分裂が交互に繰り返されてきた。6 億年前から現代までを顕世代

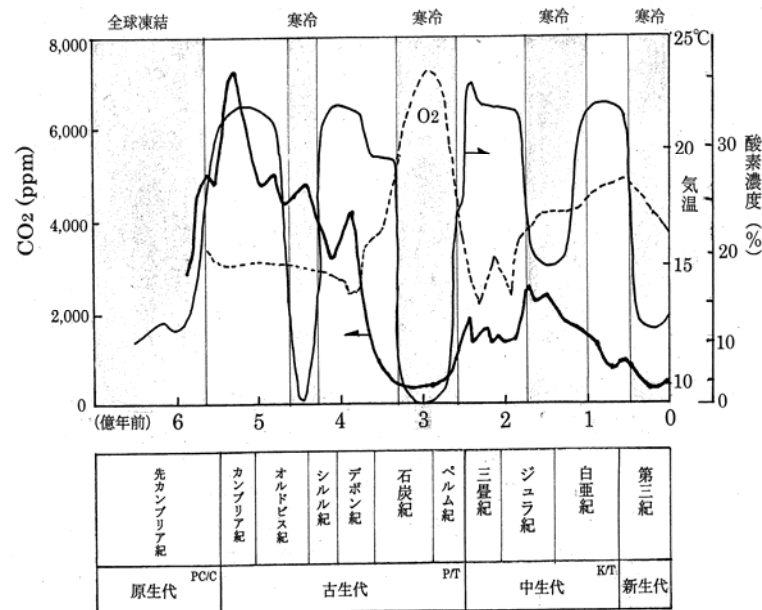


図 1. 顕生代の地球環境

といい、その初期、温暖なカンブリア紀に初めて本格的な動物、植物の活動が始まった。当初は二酸化炭素が現代の 20 倍も高い 6000ppm もあったので、植物の生育が活発で大きく成長、大量の植物の堆積が石炭紀を構成した。それと共に植物が出す酸素濃度が増大し、現代の 21% より高い 35% にも達したことから、動物の活動も活発となり、大型の動物に進化し、恐竜時代へと進展した。今から 3 億年前、石炭紀の後半には、パンゲア大陸の形成と共に、ゴンドワナ氷河が発達して氷河期となり、過去 6 億年の中でもとりわけ寒冷化が進んだ。その後、アフリカスーパープルームの上昇に伴い、大陸が分裂し始めた。このペルム紀と三畳紀の境界、いわゆる P/T 境界で 2000 年もの長期間に及ぶ酸欠状態、いわゆるスーパーアノキシアが発生、生物の大量絶滅が起こった。ペルム紀の後半に酸素濃度が急速に低下したことが、生物の大量絶滅を起こした原因と考えられる。それは、スーパープルームの上昇が活発となり、吹き上げられた噴煙が天空を覆い、いわゆるプルームの冬が訪れて、植物の生育が極端に低下した結果、酸欠になったことが考えられる。顕生代ではその後、アフリカスーパープルームに次いで、南太平洋スーパープルームの上昇があり、温暖な白亜紀を生み出した。図 1 に顕生代 6 億年の気候と大気組成を示した。

1 億 5000 万年前から始まった白亜紀はその後半 1 億年前から温暖な気候が続いたが、南太平洋スーパープルームの弱まりと共に、6500 万年前の K/T 境界から寒冷な季節に入った。現代はその中で、およそ 200 万年前から始まった氷河期の中にある。特にその中でも幸いなことに、10 万年に一度現れる温暖な間氷期にある。しかし、図 2 から判るように、過去 200 万年の経緯からみてこの温暖な間氷期はおよそ 1 万年しか続かないので、1.1 万年前に始まった現代間氷期はいつ氷河期に入ってもおかしくないタイミングにある。近年、

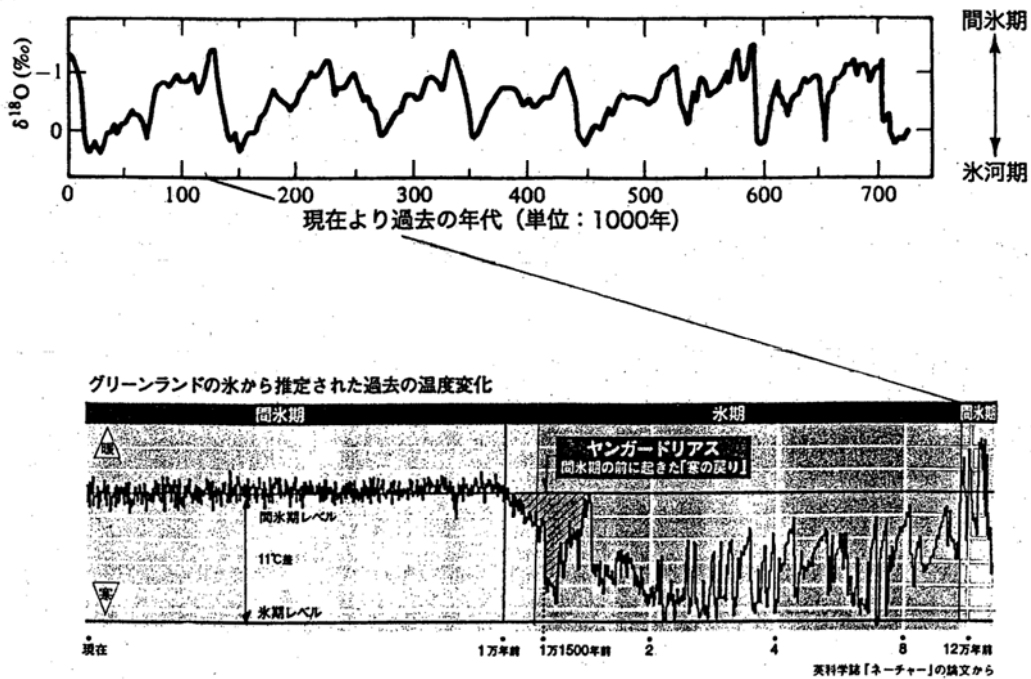


図2 現代氷河期と間氷期の経緯

地球の温暖化が大変だということが真剣に論じられているが、実は氷河期への転落の方がより深刻な問題として対処しなければならない事態にある。その意味で、エネルギー問題は長期的な展望の下に、しっかりした対策を講じておかねばならない。

2. 石油資源と諸問題

21世紀のエネルギー問題を検討するに当たって、まず最初に考えなければならないのは石油資源問題である。なぜ石油なのか、それは最初に枯渇が予測され、その依存度が桁外れに大きいにもかかわらず、その減耗と枯渇に至る将来像が十分理解されないままに、安穩に打ち過ぎていているという危機感の欠如がある。

石油資源について、まずその生成がいつ、どのようにして発生してきたのかを考える。図3に石油の生成年代とその埋蔵量を示した。現在発見されている油田の大部分は6億年前のカンブリア紀から多少の生産は見られるものの主要な生産はジュラ紀から始まり、圧倒的に多いのは2億1,200万年前の白亜紀であり、6500万年前の第3期にかけて少なくなっていく。白亜紀には100万年当たり6000億 m^3 も産出しており、ほとんどが白亜紀の産物であることが判る。古代の地球を見ると、三疊紀後半から超大陸パンゲアが分裂を始め、三疊紀の終わり、ジュラ紀の初めにローラシア大陸(Laurasia)とゴンドワナ大陸(Gondwana)の間にテティス海(Tethys)ができる。この位置は、世界の主要油田である中東油田地帯に当たっている。この海で活発な生物活動の結果、その死骸が堆積し、地下に埋

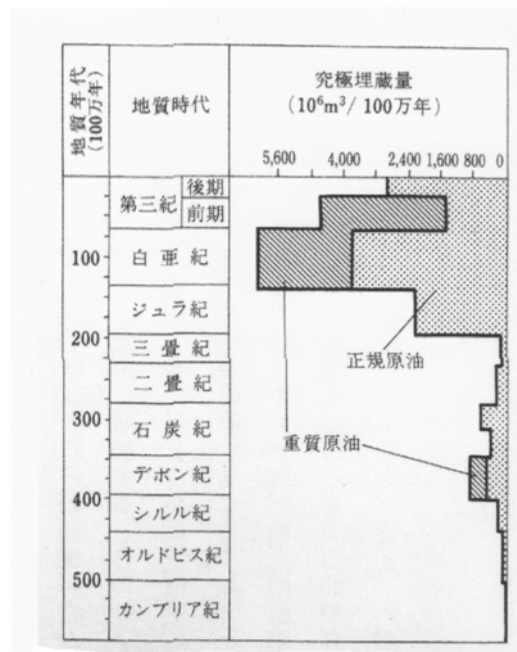


図3 石油生産の年代と油田埋蔵量
[Tissot & Welte(1984)]

没し、高温・高圧で熱変性を受けた結果、石油に変成したと考えられる。このような「有機起源説」、または「ケロジェン起源説」に対して、地球惑星が誕生した時にすでに大量の炭化水素が含まれており、それが地表近くまで出てくるといふ「無機由来説」も提唱されていたが、現在では圧倒的に前者の「有機起源説」が支持されている。動物の死骸が石油になり、植物の堆積が石炭の起源であるとの考え方である。

さて、40年も前から、石油はあと40年しかないと言われ続けてきたが、いまだに40年の期待がある。魔法の玉手箱のような印象さえ生まれ、イソップ物語の「狼が来た」のお伽話の世界の中でさえある。でも本当に狼が来るのはそう遠くないのではないか。現状をつぶさに見てみよう。

図4に石油の大油田発見の経緯と確認埋蔵量の推移を示した⁵⁾。石油がもはや多くを望めず、枯渇に向けた減耗の時代に移行していることを示している。2005年のポール・ロバーツ著「石油の終焉」⁶⁾によれば、石油の確認埋蔵量は1兆7000億バレルでその半分は中東に局在化している。未発見埋蔵量を9000億バレルとしても可採量は2兆6000億バレルに留まる。新規油田の発見は1961年をピークに減少を続け、1975年以降では、北海油田、アラスカ油田などが開発されたが、もはや多くを期待できない。なお可能性としてはアフリカ、ブラジル沖があり、カナダ、グリーンランド、シベリア沖の北極圏が残っているが、多くを望めない。石油はあと40年ほどしかもたないというのが大方の予測である。その根拠として、Hubbert Peakの概念がある。これは石油の産出経過が左右対称の釣鐘

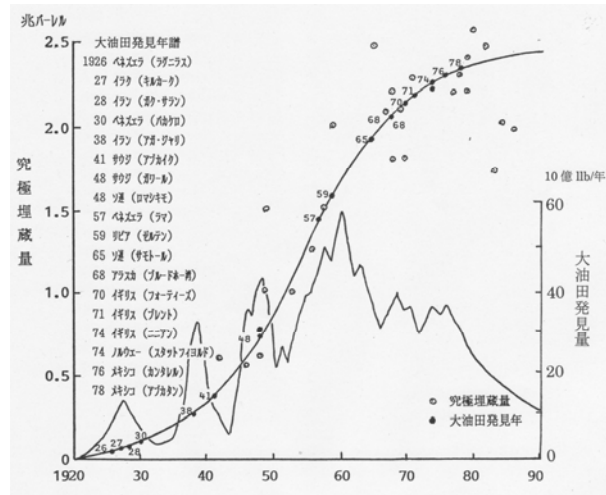


図4 大油田開発の経緯と究極埋蔵量

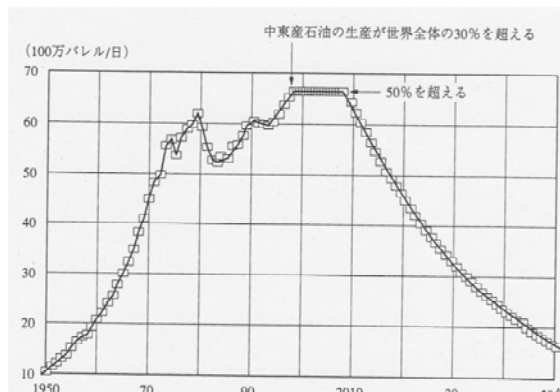


図5 世界の石油生産の Hubbert peak

型になり、その半分の採掘時にピークとなることから、最終埋蔵量が予測できるというものである。1956年、米国の地質学者M. King Hubbertが米国各地の油田の採掘経緯を調べ、採掘量が加速度的に増大し、ピークに達した以後は加速度的に減衰してゆく経過から、そのピークを見ることによって、究極埋蔵量を予測することができるを見出し、米国48州の原油生産量は1965～1970年にピークに達し、以後減衰してゆくと予測した⁷⁾。そして、米国原油生産量のピークが1971年にあったことから、彼の予測が正しかったことが証明された。この概念をHubbert Peakといい、その後の推定に重要な役割を果たした。このPeak Oilの概念はその後、ASPO (Association for the Study of Peak Oil & Gas) のCampbell, C.J.⁸⁾により積極的に検討され、さらにDeffeyes, K.S.によるHubbert Peakの再評価がなされている⁹⁾。Heinberg, Richardの著書「The Party's Over」¹⁰⁾では世界各地の油田のOil Peakを推定しており、世界のピークは2006年であったと見積もられ、アメリカは1970年、英国は2001年、中東でも2009年にピークとなったとしている。このことは世界の石

油事情がすでにピークを過ぎ、加速度的に減耗の局面に入ったことを意味している。確かに、最近の石油統計によれば、世界の石油生産量は 2004 年から停滞し、2008 年にピークを打っており、消費量も 2007 年が最大となっている。日本でもこの問題は深刻に議論されており、石井吉徳らにより工学アカデミーから「豊かな石油時代が終わる一人類は何処へ行くのか」として出版されている¹¹⁾。しかし、政府をはじめ世間の反響は極めて鈍く、問題意識が乏しいのが実情である。図 5 に Henberg の提示した世界の Hubbert peak を示した。

3. エネルギー収支比 (EPR, Energy Profit Ratio, または Energy Payback Ratio)

ここで考えるべきことは、エネルギー開発における質の評価である。特に、エネルギーを開発する時の投入エネルギーに対してどれだけのエネルギーが生産できるかの収支比が重要である。そのシステムを作るのに要するエネルギーが生産するエネルギーよりも小さい、すなわち EPR(Energy Payback Ratio, 利用可能エネルギー／採掘投入エネルギー比)が 1 より小さければ、エネルギー生産システムの意味がないわけで、EPR が大きいほど効率のよいエネルギー生産システムであるということになる。電力中央研究所の資料¹²⁾によれば、従来の発電システムとしては、石炭、石油火力発電の EPR は 7～8 であり、水力発電では 15 程度と大きい、原子力発電は 20～40 と抜群の効率である。一方、自然エネルギーでは、風力 4、地熱 7 であるが、太陽光 2、波力 1.9、潮力 2.3、海洋温度差発電 1.9 などと、著しく小さいことがわかる。太陽光発電では計算によっては 0.98 と 1 を切る評価もあり、十分採算性を検討する必要があることを示している。また、EPR は資源採掘のタイミングによっても変化するもので、たとえば石油が発見された時代には、油井から自噴するような容易な採掘が可能であったので、高い EPR を示したが、今日では大量の水を注入しない

表 1. 各種エネルギー生産方式の EPR

石油生産	>100	(19 世紀)
	8	(現代)
原子力発電	17, 20～40	
水力発電	15	
石油火力発電	7～8	
地熱発電	7	
風力発電	4	
潮力発電	2.3	
太陽光	2～0.98	
波力発電	1.9	

と採掘できない油井が多く、EPRは著しく低下している。たとえば、米国で19世紀に石油が発見された当時のEPRは100を超えていたのが、1970年代には8まで低下し、質が悪くなっている。原子力では、1980年代のEPRは6程度と低いものであった。それはウラン燃料の濃縮にガス拡散法が使われ、濃縮に多くのエネルギーが必要であったことによるもので、今日ではEPRは28を超えるまでに向上した。現在のところ、世界の濃縮法はガス拡散法と遠心法が同程度の生産規模になっているので、その平均としてEPRは17程度とされている。

4. 代替エネルギーとその特質

今後のエネルギー需要の予測を図6に示した。この予測では石油、天然ガスは2070年までに枯渇し、その代替エネルギーは再生可能エネルギーと原子力エネルギーに頼るしかないことを示している。石油に近いエネルギーとしてはカナダのタールサンド、ベネゼラのオリノコタールなどの重質油があるが、石油の代替としてはその採掘・精製に多くの費用がかかり、極めて低いEPRしか期待できない代物である。これらの低質油や天然ガスを入れても、2020年には化石資源の資源量はピークを迎えると予測されている。さらに、最近日本近海で3000m以上の深海にメタンハイドレートが発見され話題となっているが、まだ採算に合うような技術は完成されていないので、資源とは評価されていない。それでは今後のエネルギー開発はどうなるのか、福島原発の事故以前には、原子力発電が将来を担う最有力候補であり、大きな期待があったが、今回の事故でその期待が大きく損なわれた。しかし、原子力発電は安価で効率的なので、これに代わる代替案は難しい。多くの為政者が自然エネルギーにシフトすべきだと安易な発言を繰り返しているが、本当に自然エネル

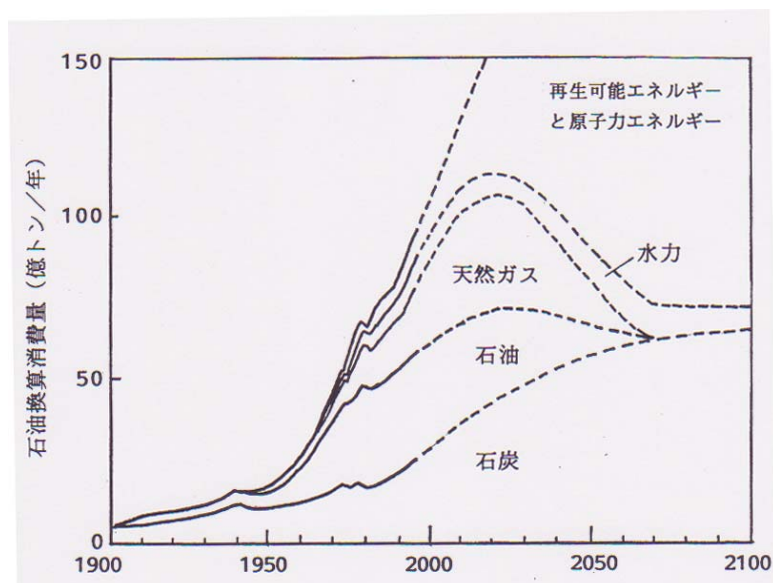


図6 エネルギー需要の長期予測

ギーが石油に代わるエネルギー源として機能するようになるのか、はなはだ疑問である。太陽光発電に代表される自然エネルギーは極めて効率が悪く、量的に原子力発電を代替できる規模は期待できないし、コストも高い。その他、風力発電、波力発電、潮汐発電などがあるが、いずれも規模に問題があり、採算性が低く、到底原子力発電を代替できる代物にはなっていない。地熱発電については日本が米国（300万KW）、インドネシア（200万KW）に次いで世界第3位であるが、日本の潜在量は2347万KW(別の資料では1420万KW)もあるが、発電量は53万KWしか実用化されていない。なぜ日本が遅れているのか、その理由の一つは主要な地熱発生地が国立公園にあることであり、環境省の許可が得にくいこと、第2に政府が新エネルギーとして認定していないことがある。今後の買い取り価格が採算ベースに乗るようになれば、新規建設の動きが出てくると思われる。1970年代の石油ショック以来40年余り、多くの時間と金をかけて石油代替エネルギーとしての自然エネルギーの検討が加えられてきたが、いまだに有力候補が見出されていない。これからは、過去には思いつかなかったような画期的なアイデアが出ない限り、石油を代替できるような新エネルギーが見つかるとは思えないのである。それではどうするのか。

5. 原子力発電の諸問題とトリウム原子炉の可能性

石油の次に来る次世代の汎用エネルギーとして原子力エネルギーが考えられ、多くの国で次なるエネルギー源の本命として具体的な体制作り而努力してきた。特にフランスは原子力への依存度を高めており、発電エネルギーの電源の79%を原子力に依存している。日本はフランスに次いで原子力依存性を28%まで高めてきたが、今回の地震により壊滅的な被害を受け、大きく頓挫した。確かに、今の原子炉では固体の燃料棒を炉心に据え、冷却能力が失われると、制御が難しくなる。この問題は過去のスリーマイル島事故、ロシアのチェルノブイリ事故で顕在化した。今回の事故も固体炉心の冷却が失われたことにより、発生した。いずれも炉心溶融が起これ、重大事故につながった。

このような固体燃料の問題点を回避した炉がトリウム溶融塩原子炉である。これは1960年ごろに、米国エネルギー省オークリッジ研究所が実験炉として5年間運転し、臨界後、1969年に成功裏に終了したプロジェクトである。その成功にもかかわらず、現在に至るも採用になっていないのは、ウラン原子炉が先行して実用化してきたことにある。トリウム炉は原子爆弾を作れないのでかえってインセンティブがなかったともいえる。1980年代初頭、京大教授、南極越冬隊長として活躍した西堀栄三郎が日本生産性本部理事として日本工業倶楽部で、「原子力エネルギー開発の新方向」¹³⁾と題して講演したのがトリウム溶融塩原子炉であった。従来のウラン軽水炉には多くの問題点があると西堀は指摘する。スリーマイル島の原発事故で原子力発電の安全性が問われる事態となり、チェルノブイリ事故で、多大の犠牲者が出た。西堀の指摘する問題点とは、軽水炉の燃料が濃縮ウランであることである。濃縮ウランはペレットに加工して、金属ジルカロイという金属の鞘に入れた燃料棒を使うことで、150気圧という高圧で冷却水が流れている。その高圧水のために燃料の被覆

管を傷つけたり、その保護の対策が難しい。燃料の炉心温度は 2000℃にもなっており、この熱を吸収する水は 300℃が限度なので、数 100℃という熱ギャップが存在する。鞘のジルカロイはまた非常に高い放射能に晒され、同時に内外の高い温度差によって熱膨張を起こし、ペレットの間に隙間が生じ、事故の原因となる。バイブレーションが起こる心配もある。これに対して、熔融塩炉ではこのような無理がないので、より安全な操業が保証される。上述の西堀のまとめによればトリウム熔融塩炉の長所は次のようなものである。1) 安全性が高い、2) 資源量が豊富、3) 液体燃料で、固体燃料棒が不要、4) 液体なので炉心熔融が起こらない、5) 燃料塩は水や空気と激しく反応しない、6) 高放射能廃棄物の発生が極めて少ない、7) 原子爆弾が作れないので核拡散問題がない、8) 燃料再処理設備がいない、9) 燃料交換が要らない、運転しながら燃料を追加できる。問題点としては、オークリッジでの実験終了後原子炉に微細な亀裂が入っていたことがある。容器の Hastelloy N の粒間に微細なクラックが入っているのが見つかったが、これにニオブを少し加えれば、解決できることが判った。また、燃料塩中のリチウムから、有害なトリチウムが比較的多量に発生するが、冷却塩中の水分を利用して回収し、放出を防げた。なぜ、こんな優れた炉が採用に至らなかったのか。それはまさにタイミングの問題で、濃縮ウラン軽水炉がすでに実用化の段階に入っていたことが、決定的な要因であったといえる。また従来の原子炉と違って、化学的な要素が多く、化学工業のようなところがあって、なかなか理解されにくいこともあったといえる。

トリウム原子炉とはどんなものか。まず、トリウムでどのように発電するのか、その原理を、ウラン原子炉と比べてみる。

ウラン原子炉：天然ウランには核分裂性の ^{235}U は 0.7%しか含まれていないので、核分裂を起こさせるには ^{235}U の濃度を 90%以上に高めなければならない。そのために大規模な濃縮設備と大量のエネルギーが必要となる。一方、 ^{238}U に中性子を吸収させることでプルトニウム ^{239}Pu が得られる。これは自然界にはほとんど存在しない元素であるが、ウランの濃縮のように大量の電力を消費することなく生成し、臨界量もウランの 22kg に比べて、5kg と少量で済むという利点がある。そこで当初ウランで作られてきた原子爆弾をプルトニウムで作るようになった。

トリウム原子炉：トリウム (Th) は、アクチノイド系元素の中で、地殻中にウランよりも多量に含まれる元素であり、ウランの 5 倍以上存在し、世界各地に広く分布している。天然に存在するトリウムは、ほとんどが ^{232}Th であり、そのままでは核分裂を起こさない。これに中性子を吸収させると、 ^{233}Th となり、壊変により ^{233}U となって、核分裂を起こす。Th から ^{233}U を製造し、これを核燃料として使用する原子炉を Th サイクル原子炉、またはトリウム炉という。Th サイクルは、1) 核燃料資源が豊富、2) ^{235}U などの核分裂物質の利用の効率化、3) ^{235}U 濃縮要請の解消、4) Th 燃料の安全性、などの理由で原子力開発当時に活発な研究開発が行われた。しかし、ウランの高速増殖炉の方が有利だとの見解が優先して関心が低下して行った。特に、ウランの軽水炉が実用化され、世界に普及して行

ったことがトリウム原子炉への関心を失わせてしまったといえる。今日、Th サイクルで運転されている原子炉はなく、 ^{233}U を主な燃料とする原子炉もごく限られている。しかし、IAEA では、上記のいくつかの理由により、研究の推進を図ってはいる。特に、中性子工学的に望ましい炉は熔融塩法によるものであり、前述のように、高い変換効率が期待できることや、また炉が高温のため高い熱効率が得られるなどから、なお研究の必要性を認めている。すでに述べたように、米国エネルギー省のオークリッジ研究所では、1967年から2年半にわたり研究され、熱出力7.4MWの熔融塩炉MSBR(Molten-Salt Breeder Reactor)が建設されて、649°Cの燃料温度で成功裏に運転された。また、トリウム資源の豊富なインドでは積極的な開発が進んでおり、天然ウランを燃料に重水炉を運転、使用済み燃料を再処理してプルトニウムを生産、高速増殖炉で増殖して途中から ^{232}Th を装荷して ^{233}U を生産、新型重水炉によるトリウムサイクルの確立を目指している。1983年にはソ連科学アカデミーがトリウム熔融塩炉の共同開発に関心を持ち、1988年、ソ連、米国オークランド研究所、古川の三者による共同開発研究を提案、1997年、共同開発計画に合意した。また2011年にはチェコとの共同開発事業が開始された。しかしながら、福島原発事故を受けて、現在のトリウム熔融塩炉の計画は不明確な状況にあると言わざるを得ない。ウラン軽水炉型原子力発電に大きな懸念が渦巻く今日、今後の行方には多くの困難が予想されるが、明らかに炉心熔融事故が起り得ないトリウム熔融塩炉の重要性はこのような事態であるからこそ、声を大にして指摘されるべきと思われる。

いまや日本は長期的展望の下に、エネルギー政策を再構築する時であり、その視点に立てばトリウム熔融塩炉はまさに本命に位置付けられるべきものである。本論については、元日本原子力研究所主任研究員、東海大学開発技術研究所教授、現国際トリウム熔融塩国際フォーラム代表の古川和男が、熱心な推進者であり、文芸新書¹⁴⁾に「原発革命」(2001)、「原発安全革命」(2011)という解説書を上梓し、国際共同開発にも着手している。このような安全な原子炉であれば、世間の理解も得やすいので、エネルギー問題を早期に解決できる決め手になると期待できる。

参考文献

- 1) ローマ・クラブ「人類の危機」レポート、「成長の限界」、ダイヤモンド社(1972)、Meadows, D.H., Meadows,D.L., Randers,J., and Behrens III,W.W., 'The Limits To Growth-A Report for THE CLUB OF ROME'S Project on the Predicament of Mankind, Universe Books, New York (1972)
- 2) ローマクラブ第2レポート、「転機に立つ人間社会」、ダイヤモンド社(1975)、Mesarovic, M. and Pestel,E.,'MANKIND AT THE TURNING POINT-The Second Report to THE CLUB OF ROME' E.P. Dutton & Co. Inc, Readers Digest Press, New York (1974)
- 3) 「成長の限界-人類の選択」、ダイヤモンド社(2005)、Meadows, D., Randers, J., and Meadows, D., 'Limits to Growth- The 30-Year Update', Chelsea Green Publishing Company, Vermont (2004)

- 4) 経済産業省、資源エネルギー庁、「日本のエネルギー事情」(2007)
- 5) 弘岡正明、「技術革新と経済発展－非線形ダイナミズムの解明」日本経済新聞社(2003)
- 6) ポール・ロバーツ、久保恵美子訳、「石油の終焉」、光文社(2005)、Roberts, Paul, 'The End of Oil', Houghton Mifflin Company(2004)
- 7) Hubbert, M. King, '*Resources and Man*', National Academy of Sciences and National Research Council(1969)
- 8) Campbell, C. J., '*The Coming Oil Crisis*', Multi-Science Publishing Co.(1997)
- 9) Deffeyes, K.S., '*Hubbert Peak – The Impending World Oil Shortage*', Princeton University Press(2001)
- 10) Heinberg, Richard, '*The Party's Over – Oil, War and the Fate of Industrial Societies*' ClairviewBooks(2003)
- 11) 日本工学アカデミー、石井吉徳、大矢暁、内田盛也「豊かな石油時代が終わる－人類は何処へ行くか」(2004)
- 12) 電力中研ニュース、No.439「エネルギーの「質」から、将来の石油代替エネルギーを考える－EPRという指標を用いた分析」、電力中央研究所(2007)
- 13) 西堀栄三郎、「原子力エネルギー開発の新方向」、日本工業倶楽部第206回産業講演会(1980)
- 14) 古川和男、「「原発」革命」、文芸新書、文芸春秋(2001)、「原発安全革命」、文芸新書、文芸春秋(2011)