

Title	石油減耗とエネルギー資源のシナリオ
Author(s)	弘岡, 正明
Citation	年次学術大会講演要旨集, 31: 664-667
Issue Date	2016-11-05
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/13874">http://hdl.handle.net/10119/13874</a>
Rights	本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

## 石油減耗とエネルギー資源のシナリオ

○ 弘岡正明 (テクノ経済研究所)

概要：石油の賦存量は有限であり、世界はすでに石油減耗の時代に入っている。その実態を検証し、今後のエネルギー問題を展望する。特に、石油に代わる代替エネルギー資源について、それらの可能性を検討し、石油代替エネルギー開発のシナリオを考える。

### 1. 現代社会の展望とエネルギー問題

世界の人口の推移をみると、現在の64億人から、2,050年頃には、90億人に達すると予想されている。特に、1992年に発表されたローマクラブの「限界を越えて」では、これまで人口の増加と共に工業生産、食糧生産、資源開発など、いずれもピークを打ち、急速に悪化し始めるという悲観的な予測が出された。一方、1980年に発表された米国政府の「西暦2000年の地球」でも、同様な悲観的な将来展望がまとめられている。それに伴い、地球のエネルギー問題がクローズアップされ、代替エネルギーをどうするのか、深刻な問題として浮上した。世界の一次エネルギーの長期展望では、2070年頃には、石油、天然ガスが底をつき、再生可能エネルギーと原子力エネルギーに転換せざるを得なくなる。石油は、一億年前後前の白亜紀を中心にした時代に、テティス海に生成した動物の死骸が地熱で変性されて、生成した特異な生産物であり、その時代の前にも後にも、生成したことがない、希少産物である。近代になって石油が発見され、1880年代からその開発が始まり、現代までに2億5000万バーレルの究極埋蔵量が確認されてきた。しかし、すでに石油の開発はほとんど尽くされて、今や減耗の時代に入っている。

### 2. 石油採掘経緯と究極埋蔵量

石油は、古代から燃える水として知られていたが、大量の油田が発見され、具体的な消費が始まったのは、19世紀の半ば以降である。19世紀後半には米国、ルーマニア、ロシアで石油の産出が始まった。1863年、アメリカのロックフェラー(J. D. Rockefeller)がオハイオ州クリーブランドで石油精製業に乗り出し、1870年にスタンダード石油を設立した。1884年には全米の石油精製能力の77%、販売シェアは80%を越えた。19世紀から20世紀初めにかけて、内燃機関の発明、自動車の実用化など、自動車、船舶など、石油の用途は大きく拡大し始めた。さらに第2次世界大戦後には、石油の用途が化学原料としても大きく進展した。図1に世界の石油採掘経緯と究極埋蔵量を示した。世界の石油は既にその大半を開発し終わって、2006年をピークに、すでに減耗の時代に入った。

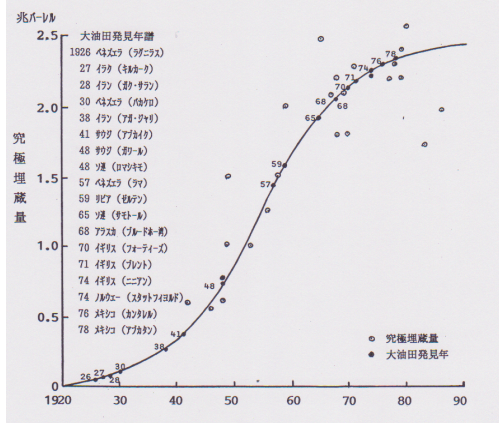


図1 世界の石油採掘経緯と究極埋蔵量

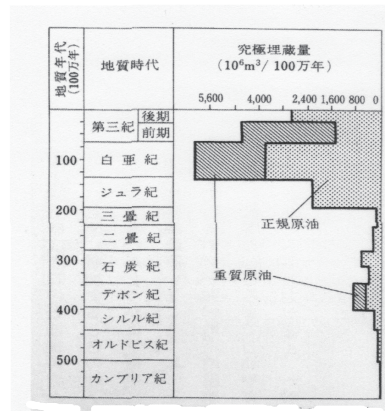


図2 石油の産出年代と産出量

石油がすでに減耗の時代に入ったことはどうして、確認されたのか？それは、1972年、米国の地質学者、M. King Hubbert が、米国の油田の採掘経緯を調べたことに始まる。各油田の採掘のピークを経て、減耗する状況を調べたところ、いずれも左右対称の釣鐘型の経緯を示すことを発見した。このことから油田の将来の残存量、すなわちその寿命を見積ることができるようになった。これを Hubbert Peak という。欧州の ASPO (Association for the Study of Peak Oil and Gas) の Campbell, Collin J.らは、この手法を用いて、世界の油田の Oil Peak を計測した。

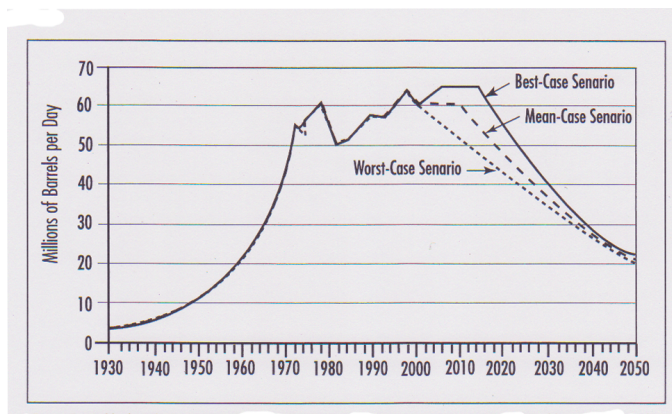


図3 世界の石油資源のシナリオ  
Hubbert Peak by Campbell

その結果、世界の油田の寿命は、すでに 2006 年にピークを打って、減耗の時代に入っている

ことを明らかにした。(Richard Heinberg, "The Party's Over" Clairview Books(2003) ) . この予測によれば、あと 20 年後には、石油の存在量は、今の 60%しかなくなることになり、その代替エネルギーをどう調達するのかが大きな課題である。あと 20 年で、今の石油消費量の 40%に対応するエネルギー資源が本当に調達できるのか、極めて大きな問題といわなければならない。今のところ政府を始め、この問題がどこまで対応できているのか、いささか心配ではある。特に、化学工業は、戦後、石油を主原料として発展してきたので、エネルギー源と違い、化学工業が代替資源を簡単に見つけることができず、石油の減耗は死活問題である。今後どうするのか、対策が急がれる。

### 3. 石油代替エネルギー資源の展望

エネルギー資源としての石油の代替には、いくつかの代案がある。日本は地震国であり、火山の地熱が世界第 3 位であるが、その多くは国立公園にあるので、商業化はほとんど行えずにいる。もう一つの資源が、原子力エネルギーである。しかし、福島原子力発電所の事故以来、原子力発電の信頼は大きく損なわれ、国民のアレルギーは簡単には、回復できない。原子力発電の事故としては、1979 年の米国、スリーマイル島事故がレベル 5、ロシアのチェルノブイリ発電所の事故、および福島第一原子力発電所が、レベル 7 となっている。いずれも、固体の炉心が損傷して、大事故になった。チェルノブイリ発電所では、4 号機の制御棒の引き抜きで暴走、大量の放射能が飛散、ウクライナの広範囲に拡散したので、5.5 万人が死亡するという大事故となった。福島原子力発電所では、津波で全電源喪失により、1~3 号機が炉心溶融、水素爆発で大破した。いずれも、固体の炉心溶融による事故である。

石油代替エネルギーを考える時、エネルギー資源の賦存量よりも、エネルギーシステムを稼働するための投入エネルギーと、それにより取得され、利用できる取得エネルギーの比率、エネルギー取得効率、EPR (Energy Profit Ratio、または Energy Payback Ratio) が重要である。1840 年代に石油が発見され、自噴状態の油田では、100 を越える EPR があったが、1970 年代には 8 まで低下した。石炭は 1950 年代には、80 であったが、1970 年代には、30 に低下している。最近話題になったシェールオイルでは、0.7~13 で、条件によっては採算が取れない。石炭火力発電で 9 程度、太陽光発電では 1.7~1、宇宙太陽発電では 2 程度とみられる。1 以下なら、いかに大量の資源があっても資源としての価値がないことになる。原子力発電は軽水炉で 17、水力発電 15 で優れている。

### 4. 原子力発電とトリウム溶融塩炉

石油資源は今後急速に減耗、逼迫するので、代替エネルギーの開発が急がれる。一つの候補として、原子力発電がある。ウラン原子炉の事故では、いずれも固体の炉心溶融が起り、大事故に繋がっている。そこで、固体の炉心がない原子力発電方式が望まれる。

原子力関連の開発経緯を見てみる。まず、核エネルギーというものが認知されたのは、1830 年代のこと、その後、1896 年、フランスのベクレルがウラン化合物に写真の感光板に感光する成分があることを発見、同年、キューリー夫妻もこのことを認識、さらにトリウムも同様に放射能を持つことを発見し、

これを放射能と名付けた。1938年、ドイツの化学者、Otto Harn と Frits Strassmann は、ウランに中性子を照射すると、核分裂が起こることを発見、核分裂（Fission）と名付けた。1942年、米国の研究用原子炉が臨界に達し、世界初の人工原子炉となった。最初の原子力発電は1951年、米国の高速増殖炉で達成された。1954年、ソ連のオブニンスク原子炉で世界最初の発電が開始された。1956年、最初の原子力発電所が英国、コルダーホールに民間用として運転を開始した。日本では、1956年、東海村に日本原子力研究所が発足、1963年、東海村の実験炉が発電を開始した。2011年、3月11日の東北地方太平洋沖地震で福島第一原子力発電所で事故が発生し、炉心溶融が起こった。

一方、米国では、エネルギー省 DOE の Oak Ridge 研究所で、トリウム原子力発電の研究が行われ、1954年に最初の実験炉が航空機用原子炉として建設、運転が行われた。その後、1960年にトリウム溶融塩炉 MSR の実験炉が建設され、1960年から1967年にわたって運転が行われ、成功裏に終わった。1970年代には、100万KwのMSRを設計したが、その後この溶融塩炉の研究は中止された。原爆ができないトリウム原子力発電はお蔵入りとなったのである。

中国では、2010年、トリウム溶融塩炉プロジェクトの開始を政府決定し、中国にあるトリウム資源の有効活用を図る方針である。2013年、500名の研究者がトリウム溶融塩炉の研究に従事しており、さらに増員するとのことである。2020年以降には、出力10Mwの実験炉を、2030年頃には100Mwの発電実験炉を建設するとしている。

欧州では、第4世代原子炉 GIF が2002年の溶融塩炉 MSR を含む炉型を選定するべく、検討を進めている。フランスでは、原子力庁と電力会社が溶融塩炉の検討を行い、プロジェクトを実施している。インドは、2012年から溶融塩炉研究のプログラムを開始している。インドではトリウムが豊富にあるので、エネルギー自給のために、トリウム固体燃料炉の研究を長らく続けている。2013年、インド原子力庁が、国際会議「トリウム溶融塩会議 CMSNT2013」をバーバ原子力研究所で開催した。

## 5. トリウム溶融塩炉とその利点

日本では、1979年、当時、南極越冬隊長を務められた京都大学西堀栄三郎教授が「原子力エネルギー開発の新方向」と題して、学士会館で講演、トリウム原子炉の重要性を熱心に指摘された。西堀は、従来のウラン軽水炉における各種の問題点を指摘、特にスリーマイル島の事故で、何が問題であったかを論じた。まず、軽水炉の燃料は天然ウランではなく、濃縮ウランで、ジルコンの燃料棒に詰め、3万5000~5万本を炉心に詰める。炉心の周りには減速材があり、冷却材として普通の水、軽水が猛烈な勢いで流れている。炉心を流れる冷却水は、冷却水の温度を抑えるために、150気圧という高圧で流れている。その高圧のために、燃料の被覆管を傷つけやすいとか、噴出の危険性がある。スリーマイル島の事故は、この加圧器の上にある安全弁が開いて閉じなかったことに原因があり、炉内が高圧になるところに無理があった。もう一つの問題点は、燃料の中心温度が2000℃という高温になるのに、この熱を吸収する水は300℃が限度で、炉心との間に大きな熱ギャップがあるということがある。水は猛烈ない勢いで流れるので、バイブレーションの危険もある。一方、トリウム溶融塩炉は、常圧で運転できるので、このような危険性がない。原子炉の中には、減速材のグラファイトが約80%の容量で詰まっており、残りの20%の空洞を溶融塩の液体が循環する。原子炉は常圧なので、特別のモータを使う必要もない。燃料の核分裂で発生した熱は、燃料自体が吸収して、炉外にある熱交換器に送られ、別の冷却材に熱を伝える。これが更に蒸気発生器に導かれ、スチームを発生し、タービンを回して発電する。原子炉の中の成分は、フッ化リチウム、フッ化ベリリウム、フッ化トリウム、フッ化ウラニウムの混合物、融点490℃のFLIBEで、500℃以上にしておけば、サラサラとした液体になる。原子炉の温度は500℃以上に保たれ、炉室全体は窒素気密の部屋に収められている。原子炉は常圧なので、燃料を循環させるポンプは、特別のものを使う必要がない。モータは炉室の外にあるので、故障したらすぐに対応ができる。日本における溶融塩の技術は、世界的にもレベルが高く、化学工場の技術者にも扱いやすいものとなっている。

トリウム溶融塩炉の特徴は、以下のようなものといえる。

1) 安全性が高い：液体燃料なのに蒸気圧が非常に低いので、容器の破裂やパイプの破損で燃料が吹き出すことがない。軽水炉では、冷却水が150気圧位に加圧されているので、パイプが破れると、高圧水が噴き出して、炉心が空っぽになる。その時、崩壊熱で固体燃料の被覆管が破れて、死の灰が噴出する危険性がある。しかし、溶融塩炉では、その危険が全くない。たとえパイプが破れても、流れ出すだけで、室温では固化するので、問題は起こらない。第二の安全な点は、暴走しないということである。固体燃料の場合には、最初に入れる燃料はその寿命の間中、使えるようにあらかじめ余分に入れておかなければならないので、燃料が過剰に入っており、制御棒を余分に、普通は50本ぐらい入れて、過剰な核分

裂反応を抑えている。したがって、たとえば操作ミスで制御棒を規定以上に早く抜き取られたりすると、原子炉は急激に暴走することになる。軽水炉では常にこうした危険が付きまといっている。

しかし、熔融塩炉では、やはりコントロール・ロッドが4本入っているが、初めはこのロッドが必要ないぐらいで、燃料は必要な時に、いつでも追加投入できる。それも、燃料ペレットだけを運転中に投入すればよいだけである。したがって、炉内には常に余分な燃料がないので、たとえコントロール・ロッドが抜け落ちて、暴走することがない。それに、燃料自体がマイナスの温度係数を持っているので、何らかの理由で燃料の流れが止まって、温度が急激に上がったとしても、自動的に反応が衰えて、暴走を自然に防ぐことができる。

#### 2) フィッション・プロダクツは連続処理できる

もう一つの安全性の問題にフィッション・プロダクツがある。フィッション・プロダクツには、キセノン、クリプトンなどのガス状生成物、希土類元素の生成、生成したウラン233、などがある。熔融塩炉では、これらの成分の再処理システムを包含していて、連続的に系外に取り除けるので、連続的に運転を続けることができる。特に軽水炉に起こるような炉心熔融などの暴走が起こらない安全な炉である。

#### 3) 燃料費が低廉

第3に、熔融塩炉の経済性がある。ウランと違って、埋蔵量が6倍と大きく、世界の各地に鉱脈が分布している。日本では採れないが、豪州、インド、ブラジル、カナダ、中国などで相当量の鉱脈が確認されている。その鉱石は、レアアースの原料であるモナズ石に含まれていて、希土類採取のバイプロダクトとして、そのまま貯蔵されているのが現状である。したがって、値段もきわめて安く、ポンド当たり数ドルという水準である。しかも入手が極めて容易であるのが、見逃せない利点である。

さらに大きな利点は、この炉が本来的に増殖性を持っているということがある。運転の最初にインベントリーとしてウラン235が0.3%入れられているが、運転中にトリウムからウラン233が作られ、再処理システムの中に蓄積される。このような増殖性が、さらに燃費を安くする結果となっている。さらに、ウラン軽水炉の場合には、固体燃料の製造に大きな費用と時間がかかるが、熔融塩炉では、炉自体に再処理機能があるので、燃費が安くなる要因となっている。

#### 4) 運転コストが安く、発電効率が低い

ウラン原子炉では、燃料が燃え尽きると、運転を止めて、新しい燃料と交換しなければならないが、トリウム熔融塩炉では、運転を続けながら燃料を追加でき、長期間の連続運転が可能であり、メンテナンスも簡単で、発電効率が低いという利点が大きく、経済性に優れている。さらに注目すべき特徴として熔融塩炉では最高級のスチームが得られ、超臨界蒸気圧が得られるので、発電効率は44%という高い効率が達成できる、熱公害も少ない。また、一次塩（燃料塩）の温度が入口で566°C、出口で704°Cとなり、温度差が140°Cもあるので、非常に余裕のある原子炉ということができる。

#### 5) 核拡散問題とも無縁

開発途上国でウラン原子炉を運転すると、原爆を作ることができるが、トリウム原子炉では、その心配がない。

技術的問題点：トリウム熔融塩炉の研究は、米国、エネルギー省、Oak Ridge 国立研究所で1957年に始まり、1960年からMSREという7メガワットの実験炉が運転に入り、5年後の1965年に臨界に達し、1969年まで5年間運転が続けられた。この間、運転は順調で、技術的に問題の少ない炉であることが実証された。この炉の解体で、炉に微細な亀裂が入っていることが判明したが、炉材の Hastelloy N 合金に少量のニオブを加えることで、解決された。さらに、燃料中のリチウムから比較的多量のトリチウムが発生するが、ほんの少し水を加えることで解決された。

こんな優れたトリウム原子炉がなぜ採用されてこなかったのか、それはすでにウラン原子炉が実用段階に入ろうとしていたタイミングの問題であった。

#### 参考文献)

- 1 西堀栄三郎、「原子力エネルギー開発の新方向」、日本工業倶楽部講演、(1979)
- 2 古川和男、「原発革命」、文芸春秋 (2001)、同、「原発安全革命」文芸春秋 (2011)
- 3 吉岡律夫、木下幹康、「トリウム熔融塩炉の開発の現状について」第17回原子力委員会 (2013)
- 4 Heinberg, R. “*The Party’s Over—Oil, War and the Fate of Industrial Societies*”, Clairview (2003)
- 5 Campbell, C.J., “*The Coming Oil Crisis*” Multi-Science Publishing (1997)