

秩父 148号 (令和2年7月) No.1515

## エネルギーシリーズ① 日本におけるエネルギー資源

川島 順 予科21-7  
(越谷市) 航空7-1



### 目次

#### エネルギーシリーズ

- ①日本におけるエネルギー資源  
発電用エネルギー源  
火力発電 (秩父 148号)
- ②再生エネルギー発電 (秩父 149号)
- ③原子力エネルギー (秩父 151号)
- ④日本のエネルギー需要将来予測  
(秩父 152号)

### はじめに：

本稿からエネルギーシリーズを立ち上げました。

1941年(昭和16年)、米・英・中華民国・オランダの4国よりなるABCD包囲陣が日本に対して石油の全面禁輸政策を強行するに及び、日本は自衛のため大東亜戦争に踏み切った。

又、戦後は、1973年と1979年の2回のオイルショックによって、日本経済は大混乱を引き起こした。このように、石油資源が殆どなく総て輸入に依存している日本は、産油国の思惑や世界経済の変動によって変わる石油の原価や産油量によって、日本の国民生活や産業の発展に不可欠なエネルギー確保上で常に不安定な立場に置かれている。

そこで、日本のエネルギー資源の種類とその需要量の過去の実績を調べ、将来の予測を立ててみたいと考えた。

## I. 日本におけるエネルギー資源

日本で使われているエネルギーの種類

は4つに分けられる。その1つは古代から使われている天然資源、即ち木草や動植物油等である。燃料用としては薪が主力で、その製品木炭も家庭用としては重宝に使用されてきた。照明用としては、蝋や植物油が主として使用されてきた。

2つ目は化石燃料である。化石燃料の代表的なものは石炭、石油、天然ガスである。

3つ目は、再生可能エネルギーである。再生可能エネルギーとは、学術的には、太陽・地球物理学的・生物学的な源に由来し、利用する以上の速度で自然界によって補充されるエネルギーのことで、太陽光、水力、風力、地熱、潮力、バイオマス等により発生されるエネルギーのことである。

4つ目は、原子力エネルギーである。

### 1. 天然燃料

昔は世界各国と同じように日本でも明治時代以前は、燃料用としては薪が主力で、その製品木炭も家庭用としては使用されてきた。照明用としては、蝋や植物油が主力として使用されてきた。動力用としては、水力や風力が水車や風車として直接使用されてきた。

### 2. 化石燃料

#### (1) 石炭

石炭は西洋では紀元前からその存在が知られており、紀元前300年頃の古代ギリシャでは鍛冶屋が燃料として使用していた。1765年ワットが発明した蒸気機関が産業用や船舶・機関車用に使われるようになってから、石炭の使用量は爆発的に増大してきた。

日本では1469年(文明元年)九州の大牟田の百姓が枯れ葉を集めて焚き火をしたら黒い岩が燃えだし、燃える石として言い伝えられてきた。江戸時代に筑豊炭田の石炭が瀬戸内海の製塩に用いられた記録がある。明治初期に炭鉱が産業として発達し、石炭は製鉄、発電、船舶や

機関車の蒸気機関用の燃料として、日本産業のエネルギー源の主力として使用されてきた。

大東亜戦争の終戦後は、日本の復興のための主力エネルギー源として政府は国策として石炭の増産を奨励してきた。しかし、1960年頃から発電用の燃料として石油が用いられ、その後も石油は、発電、船舶や車両の燃料や化学合成品の原料として大量に輸入され日本のエネルギー源の主力は石油にとって変わられた。

## (2) 石油

石油の存在は紀元前から知られていた。当初はアスファルト、灯油として使用されていたが、1859年米国のペンシルヴァニアで油井が発見され、ロックフェラーが1870年にスタンダード石油会社を設立、燃料用石油の量産が始まった。

日本でも668年(天智7年)に越の国(現在の新潟県)から燃える水が発見されて宮廷に献上されたという記録がある。明治時代に入り1871年石坂周造が設立した長野石油会社が長野県の浅川油田で石油採掘を行い、これを精製販売したのが嚆矢とされている。石油は当初は主に石油ランプ用に使用されていたが、1910年頃より、漁船や自動車の燃料としての需要が伸び始めた。1920年代になると国産石油の生産量が減少し始め、それに代わり海外原油の輸入が本格化し始めた。

その矢先、1941年前述のごとく、ABCD包囲陣による石油の全面禁輸により、大東亜戦争が勃発した。そして1945年日本は敗戦により終戦を迎えたが、戦後の外貨不足により十分な石油を輸入することができず、また、石炭に頼らなければならない状況になったが、石炭産業も戦争で大打撃を受け、生産量も戦前の最盛期の半減となっていた。政府は戦後復興の3大事業として、石炭、鉄鋼、

肥料(硫安)の増産を奨励した。その結果、石炭産業は復活した。

しかし、1960年代に入ると政府は石油の輸入自由化を定め、これにより、原油の輸入量が急増し、石炭価格より重油価格の方が割安となり、火力発電の燃料は石炭から石油に切り替えられてきた。

当時の池田内閣の所得倍増計画のスローガンに沿って高度成長期は第1次オイルショック迄続く。この高度成長期の国民総生産(GNP)に比例して原油の輸入量も急増した。

## (3) 天然ガス

天然ガスはメタンを主成分とするガスで、液化した状態で輸送される。液化の際に硫黄酸化物などの不純物が除去されるので、燃焼時に二酸化炭素や煤煙の発生も少ないクリーンなエネルギーである。

天然ガスは世界中に分布しているが、北欧、ロシア、東南アジアで多く産出されている。

日本でも1959年帝国石油が新潟で天然ガス田を発見、東京までパイプラインを建設して、1962年都市ガスとして東京に供給された。

1969年には日本では天然ガスを液体天然ガス(LNG)として輸入を開始した。輸入相手国は、オーストラリア、インドネシア、マレーシア、カタール等10カ国以上に上り、安定確保上極めて有利となる。さらに、最近米国のシェールガスの輸入が開始された。

## 3.再生可能エネルギー

再生可能エネルギーとは、太陽光、水力、風力、地熱、潮力、バイオマス等により発生されるエネルギーのことである。

古来より、水力、風力は水車、風車によって動力源として利用されてきた。近年では電気が人類社会の主要なエネルギー源となってきた。水力発電はその主力をなしていたが、最近になって、太陽光、風力による発電設備が急増してきた。し

かし、太陽電池、風力発電は、天候に左右され、主力のエネルギー源とするには

問題が多い。

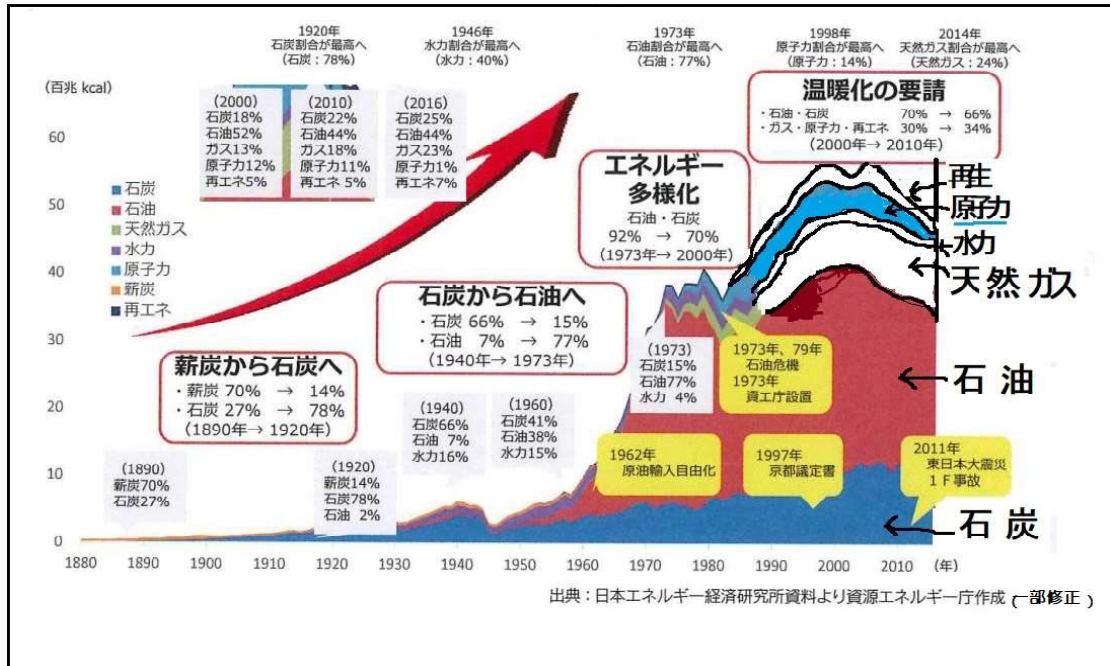


図1 明治維新後の日本のエネルギー事情変遷図

#### 4. 原子力エネルギー

原子力エネルギーは原子核の変換や反応によって放出されるエネルギーで、その平和利用としては、ウランを核分裂させて得られる熱エネルギーで蒸気タービンを回転させて電気を起こす原子力発電が1950年代に誕生した。

日本では1955年、原子力基本法が成立し、1966年日本原子力発電(株)の東海発電所が商業用発電の運転を開始した。1973年の第1次オイルショックが起き、石油依存の体質を改善するために、原発の建設が急ピッチで促進された。ところが、1979年米国のスリーマイル島で、1986年ソ連のチェルノブイリで原発事故が起これ、原発反対の世論が起こってきた。さらにそれに追い打ちをかけるように、2011年日本で東日本大震災による福島第一発電の事故が発生し、殆どの原発が安全性調査のため休止している状態である。

#### 5. 日本のエネルギー資源需要の変遷

図1は明治維新後のエネルギーを巡る我が国の歴史を図解したもので、明治維新の1867年から約20年経った1890年には文明開化の日本の近代化が実を結び新炭時代から石炭時代へと飛躍してきた。

支那事変が始まった1940年には石炭から石油へと益々近代化が進むが、石油の輸入を絶たれた日本は大東亜戦争へと突き進んだ。

しかし1945年敗戦を迎え日本のエネルギー事情は最悪の状態となるが、1950年に朝鮮戦争が始まると日本の景気も回復し、石炭、石油の需要が伸びてきた。

日本経済は、1960年代からいわゆるバブル期に入り、特に石油は1962年の原油自由化政策により需要は急増した。

しかし、1973年のオイルショックで経済は停滞、石油の需要は一段落する。

1966年から原子力が導入され、石炭、

石油、原子力が主力エネルギー源として使われるようになる。ところが2011の福島原発の事故によって、原子力は殆ど休止に追い込まれ、石炭は温暖化対策として抑制され、その代替エネルギー源として天然ガスが急増し、現在に至っている。

再生可能エネルギーの主力は水力であるが日本の大規模水力資源は殆ど開発され、全体の3.5%で横ばいの状態である。

太陽光等その他の再生エネルギーはオイルショックからその必要性が叫ばれているものの、今でも全体の4%にしか過ぎない。

## Ⅱ. 発電用エネルギー源

次に、我が国の国民生活や生産活動において最も重要なエネルギーは電力である。図2に示されるように、日本の第1次エネルギー源の約半分は発電用に使用されている。次の項で電力を発生するエネルギー源について考察してみたい。

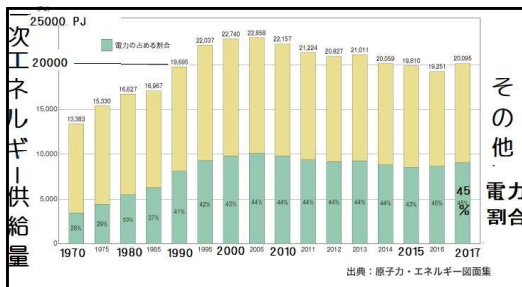


図2 日本の一次エネルギー需要中電力用エネルギーの割合

発電用エネルギー源としては、コスト、出力変動の容易性、及び出力一定の3要素によってエネルギー源が選定されている。即ち、図3に示すように、ベースロード電源としては、コストが安く出力が一定している電源、即ち、原子力、石炭、ダム式水力、地熱が適している。ミドルロード発電のエネルギー源としては、コストが中で、出力変動可能な、天然ガス、

LPガスが適している。ピークロード電源としては、コストが高いが出力変動容易な石油、揚水式水力、太陽熱、風力が適している。

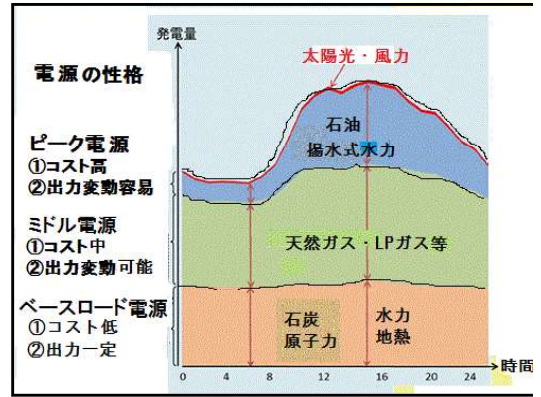


図3 電力需要に適した電源構成

次に、各燃料源による発電方式の違いとその特徴について述べる。

## Ⅲ. 化石燃料による火力発電

化石燃料を使用する発電は所謂火力発電であるが、その燃料の種類によって利害得失がある。

### 1. 石炭を使用する火力発電

石炭を使用する火力発電は低コストで一定の電力を安定して供給できるのでベースロード電源として最適である。

しかし、排出物に温暖化の原因になる炭酸ガスを多量に排出し、発がん性物質である窒素酸化物や硫黄酸化物を多量に含むため最近では規制の対象となっており増設もままならない状況である。

最近では様々なクリーンコール技術が開発されている。その技術の一つとして石炭をガス化することにより発電効率を高める石炭ガス化複合発電(IGCC)、石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)やガスタービンと蒸気タービン及び燃料電池を加えたトリプル複合発電等がある。

さらに、現在開発中の先進超超臨界圧A-USC(Advanced Ultra Super Critical)

がある。これは、蒸気タービン入口の温度を従来より100度高めの700度にするにより、石炭火力発電の熱効率を向上させて二酸化炭素排出量を削減することができる。

それに加えて、排出されるCO<sub>2</sub>を捕集して地中に封じ込めるCCS (Carbon dioxide Capture and Strage) 技術や、捕集したCO<sub>2</sub>を油田に注入して地中に保留すると同時にその圧力で残存している石油を押し出して回収するCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Strage) 技術等CO<sub>2</sub>を少なくする様々な技術が開発されている。

その結果、火力発電会社では2002年に比べて現在は、NO<sub>x</sub>は92%、SO<sub>x</sub>は83% 粒子物質 (PM) は90% 減少していると強調している。

## 2. 石油・天然ガス使用の火力発電

石油を使用する火力発電はミドルロード電源として使用されているが、コストが高い、産油地が偏在して安定供給にリスクが高いので、最近では殆ど液化天然ガス (LNG) に切り替えられている。

LNGはコストも安く、産地が分散しているので最近急激に天然ガスを使用する火力発電が増え、石炭火力よりも多くなり、火力発電の約半分を占めている。

(続く)



秩父 149号(令和2年10月)

## エネルギーシリーズ② 発電用エネルギー源

川島 順 予科21-7  
(越谷市) 航空7-1

### IV. 再生可能エネルギーを使用する発電

#### 1. 水力

日本に初めて水力発電により電気が灯ったのは約130年前、明治20年代で、その時代に建設された仙台の三居沢発電所や京都の蹴上発電所により仙台や京都の町に電灯が点灯された。

水力発電には、ダム式と流水式とがある。

現在全国で1936の水力発電所があり、最大出力合計22,278,414kw、全発電量の8.5%を占めている。そのうち、出力が1000kw未満の中小水力発電所は512地点、最大出力合計216,536kwである。中小水力発電所の大部分は流水式で主に農協や土地改良区が運営している。

余剰電力を蓄積する発電所として揚水発電所というものがある。これは夜間等の電力需要の低い時間帯の余剰電力を利用するため、夜間のうちに下方のダムから水を電動ポンプでくみ上げて上方のダムに貯めておき、電力需要の大きいピーク時間帯に発電する方式で、水の位置エネルギーを利用して大量の電気を蓄えておけることがメリットである。

日本では大型ダムを建設する用地は殆どなくなっているため、21世紀には中小規模の発電所の開発が中心になると思われる。中小規模とは平均出力約4500kwで、約1500世帯の電気量に相当する。

#### 2. 太陽光

太陽光発電は、半導体に光を当てると電気が生まれる「光電効果」を利用して発電する方式で、ソーラーパネルは、n

形、p形という2種類のシリコン半導体を重ね合わせた構造になっている。

太陽光発電は天候に影響を受けやすい、設備コストが高いというデメリットがあるが、CO<sub>2</sub>を発生しないので、温暖化対策としては有力な発電方式である。

4kw程度の住宅用太陽光発電を設置する場合の費用は約100～200万円、さらに蓄電池を設置する場合は100～150万円の費用がプラスされる。一方、2020年改定された売電価格は10kw未満の住宅用は21円/kwhで10年間、10～50kw住宅で13円/kwhで20年間である。

### 3. 風力

近年、風力発電は環境負荷が少ない発電方法として注目を集めている。

風力発電の種類は、陸上風力発電所、洋上風力発電所、浮体式洋上風力発電所がある。CO<sub>2</sub>の発生がないというメリットの反面、発電量が風速に左右される、騒音が発生する、風景や周囲環境への影響により適地が限られるというデメリットがある。

### 4. 地熱

二酸化炭素などの有害物質をほとんど排出せず、環境負荷が少ない点が最大のメリットである。

地熱発電の種類はフラッシュサイクルとバイナリーサイクルの2種類がある。

フラッシュサイクル日本で最も多く使用されている方式で、地下から200℃以上の高温の熱水をくみ上げ、この熱水を蒸気と熱水に分離させ、蒸気によってタービンを回して発電する。

このフラッシュサイクルには「シングルフラッシュ」と「ダブルフラッシュ」とがあり、ダブルフラッシュでは、シングルフラッシュで分離させた熱水にさらに圧力をかけて蒸気をつくるため、発電量が増加させることができる。

バイナリーサイクルは、水蒸気の温度が100度に低い場合でも、この水蒸気で沸点の低いアンモニアなどの媒体を加熱

し、媒体蒸気で発電する方式である。

既存の温泉熱(水)・温泉井戸等を活用することができるので、新たな掘削、熱水還元井等を必要としない利点がある。

### 5. 潮力

潮力発電とは、潮の満ち引きのときにおこる海水の流れによる運動エネルギーを利用して発電をする方式である。海のそばに貯水池を作り、満潮時に水門を開いて貯水池に海水を導入し、干潮時に水門を開くと、満潮時には海面から貯水池に向かって水が入り、干潮時には逆に、貯水池から海面へ向かって水が流れる。この海水の流れの運動エネルギーを利用してタービンを回して発電する。

潮の満ち引きは、あらかじめ計算できるので、計画的な発電ができ利点がある。

なお、潮力発電と同じように海で行う発電として波力発電がある。

これは、波の力を利用して発電をする方式で、発電量が予想しやすく計画的な発電ができる。

### 6. バイオマス

発酵しやすい下水汚泥や家畜の糞尿を発酵させてメタンなどのガス(バイオガス)を発生させ、そのバイオガスを燃焼して、タービンを回して発電する。水分が多く燃えにくいバイオマスでも活用できることや、廃棄物の有効利用になること、発生するガスの発熱量が高く、高効率である特徴を有する。

木材のチップなどを燃料として、燃焼ガスでタービンを回す発電方式もこの部類に入る。

### 7. 水素

自動車や火力発電の燃料としての石油や天然ガスの代替燃料として、CO<sub>2</sub>を発生しない水素が急浮上してきた。

政府はその重要性を認識し、2017年に、2050年に水素社会を実現するため

に、2030年までの行動計画を示した「水素基本戦略」を決定した。この行動計画によれば、従来のエネルギーコストより安い水素燃料の確保及び自給率の向上を狙っている。

水素発電とは、ボイラーで水素を燃焼させてそのエネルギーでタービンを回して電気を発生させる方式である。

水素は自然界に存在しているが、単純に抽出できるものではなく、石油や天然ガスから産出するか、水を電気分解して生産されている。現在の生産方法ではコストが高いという欠点がある。

そこで、上記の「水素基本戦略」ではコストの安い水素の入手方法を提案している。その提案は：

(1) 褐炭水素サプライチェーン・プロジェクト：

豪州の未利用エネルギーである安価な褐炭を燃焼しその燃焼ガスから水素を分離し、日本に輸送して利用する計画である。

(2) 「有機ケミカルハイドライド法による水素固定法の研究」

水素の貯蔵及び輸送には通常、高圧タンクに貯蔵する方法及び水素を液化する方法が使用されているが、いずれも高圧タンクを使用しなければならない。

そこで、水素をトルエンに付加してメチルシクロヘキサン(MCH)に変換し常温で液体の状態での貯蔵・輸送し、MCHは利用サイドで脱水素化を行い、得られるトルエンは再利用する。

現在、次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合(AHEAD)がブルネイ・ダルサラーム国の水素化プラントで、水素有機ケミカルハイドライド法の実証実験を行っている。

(3) 福島水素エネルギー研究フィールド(FH2R)』

このフィールドに整備された太陽光発電パネルの電気を使い、水電解により水素を製造し、貯蔵、輸送するコストの削

減による未来の水素社会実現のモデル構築の実証実験を行っている。

上記(1)、(2)は、化石燃料の燃焼ガスから水素を抽出する方法であるが、副生するCO<sub>2</sub>を、CO<sub>2</sub>地下貯蔵システム(CRUS)と結びつけると、経済的に有利なシステムを構築することができる。

又、水の電解による方法は、例えば、砂漠等で太陽電池パネルで発生した電気で水を分解すれば、気候変動の少ない条件でコストの安い水素を得ることができる。

さらに一步を進めて、空気から直接水素を作る技術が開発されている。これは、オランダ・エネルギー基礎技術研究所(Dutch Institute for Fundamental Energy Research)が、トヨタ自動車の技術開発拠点であるトヨタモーター・ヨーロッパ(TME)の協力を得て、大気中に含まれる水分を太陽光のエネルギーで分解して酸素と水素を得ることができる多孔質の素子を開発した。

このように発電用の燃料としての水素の重要性はますます高まり、数十年後にはベースロード電源またはミドルロード電源の石炭、石油、天然ガスの代替燃料として主力の燃料源になる可能性は高い。



## エネルギーシリーズ③ 原子力エネルギー

岡本 祥一  
予科5-7  
航空16-4  
(川口市)



### 原子力エネルギー

#### I まえがき

原子エネルギーの源泉は、核反応に伴う質量欠損である。核反応により原子核の質量の一部が失われ、失われた質量がエネルギーに変換される。

質量が失われることによりエネルギーが放出される核反応は2種類ある。一つは、U-235のような重原子の核分裂反応によるものであり、他の一つは、水素等の軽い原子核を原料とする核融合反応である。

1905年、アインシュタイン(ユダヤ系ドイツ人、米国に亡命。1879-1955)は特殊相対性理論の帰結として、物質の質量とエネルギーは等価であるとの概念を提出した。質量 $m$ の物質に内在するエネルギー $E$ は光速 $c$ を含む次式でしめされる。

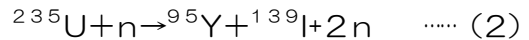
$$E=mc^2 \quad \dots\dots (1)$$

例えば太陽の中心、半径約14万kmの範囲、超高圧、超高温の状況で水素4個が融合してヘリウム原子1個が作られている。ヘリウム原子1個の質量は水素原子の4個分の質量より0.7%ほど軽く、この失われた質量がエネルギーに変換されて膨大な太陽エネルギーとして放出されている。

太陽の膨大なエネルギーの源泉としての熱核融合反応を地上で実現できないだろうか。可能であれば世界のエネルギー問

題は一挙に解決されよう。「地上に太陽を」。この遠大な計画の実現に向けて、世界の人知を集めた懸命な努力が現在続けられている。

現在実用化されている原子力発電では、天然ウランに0.7%含まれている「燃える」 $^{235}\text{U}$ の割合を3~5%に濃縮、「燃えない」 $^{238}\text{U}$ も併せて、二酸化ウランの形で燃料棒に加工、 $^{235}\text{U}$ の核分裂による発熱エネルギーを制御する制御棒と組み合わせて炉心が形成されている。多彩な核分裂反応のうち代表的な例を次式に示す。



$^{235}\text{U}$ は中性子 $n$ を吸収し、 $^{95}\text{Y}$ と $^{139}\text{I}$ とに分裂する。この式で元素記号に続けて示した整数、(質量数)は原子核の中に存在する陽子と中性子の和であり、中性子 $n$ を含めて右辺と左辺の質量数は等しい。なお、質量数は質量ではない。

$^{235}\text{U}$ の核分裂反応の場合、反応生成物( $^{95}\text{Y}+^{139}\text{I}$ )の総質量は、反応前の $^{235}\text{U}$ の質量に比べ、軽くなっている。この質量数と質量の差を質量欠損と呼んでいる。 $^{235}\text{U}$ の核分裂により生ずる質量欠損は、(1)式の関係から核分裂エネルギーとして放出され、熱水として発電装置に送られ、電気エネルギーに変換される。

#### II 核燃料サイクル

燃料棒を構成する「燃えない」 $^{238}\text{U}$ は、「燃える」 $^{235}\text{U}$ の核分裂反応の際に発生する中性子の作用で、「燃える」 $^{239}\text{Pu}$ に変化する。つまり $^{235}\text{U}$ の核分裂を利用する原子力発電では、発電に寄与しない $^{238}\text{U}$ が人の手を加えることなく燃料としてのプルトニウムに変化する。原子炉の中では、燃料が燃えて新しい燃料が作られる、画期的な仕組みが起きている。原子力発電の一連の核反応で、使用済み核燃料を再処理してプルトニウムを取り出し、改めて原発で燃やす核燃料サイクルはわが国



の国策として重視され、取り上げられてきた歴史がある。

使用済み核燃料を処理し、プルトニウムを新燃料として取り出す工場の建設は日本原燃が請け負い、1997年の完成予定であった。しかし、トラブルが相次ぎ24回も作業が延期された。最近、2020年5月、原子力規制委員会が再処理工場について新規基準に適合するとの審査書案を了承した。工場の完成に向け大きく前進することになる。ただ、詳細設計の審査や安全対策の工事が残り、原燃が目指す21年度の完成は不透明である。

全国の原発では、大量の使用済み核燃料が再処理工場への搬出を待っている。工場が予定とおり稼働すれば、年間800トンの使用済み核燃料を処理できる。各原発の燃料プールが満杯になる事態を回避できよう。ただ、再処理工場がフル稼働すれば年間約7トンのプルトニウムが新たに取出される。問題はその使い道がほとんど無いことである。

### Ⅲ プルトニウム

プルトニウムを消費するには、高速炉の活用、およびMOXの利用、の二つの手段がある。本命であった高速炉での利用は、ナトリウム漏れ事故を起こした原型炉「文殊」の廃炉で開発が行き詰まっている。「文殊」後継の実証炉を作るめどもない。

一方、ウランとプルトニウムを混ぜた「MOX」燃料を普通の原発で燃やすブルサーマルも広がっていない。現時点で実施されているのは4基だけで、目標の16~18基には遠く及ばず、プルトニウムを大量に消費するのは難しい。今、国内外にある日本のプルトニウムは47トンに及ぶ。その削減が日本の国際公約となっている。

原子力発電で生じたプルトニウムがそのまま原子爆弾に利用できるかのような報道が多く見受けられる。たとえ

ば、5月14日（2020年）の朝日新聞社説では、日本が保有している原子炉級プルトニウム約47トンを「原子爆弾6,000発分」と表現している。日本がすぐに強大な核兵器保有国になれると言わんばかりの表現である。筆者はこのような報道に強い疑問を持ち続けていた。

{2018年7月15日朝日新聞社説、秩父；147号、岡本}

原子爆弾級のプルトニウムを入手するには $^{239}\text{Pu}$ を93%程度に濃縮する必要がある。原子力発電炉から排出されたプルトニウムは、核分裂を阻害する $^{240}\text{Pu}$ が20~30%程度含まれており、そのままでは核爆弾は作れない。我が国としては、原子炉級プルトニウムは燃料として再利用するしか道は無いのである。

### Ⅳ 原子力発電

$^{235}\text{U}$ をエネルギー源として利用する原子力発電は、使用済み核燃料の処理に二つの大きな壁が指摘される。一つは上述のプルトニウム処理の問題であり、ふたつ目は、長期間にわたり放射線を出し続ける有害な放射性物質を大量に処理しなければならない点である。

2011年3月の福島第一原子力発電所の事故以来、各電気事業者は原子力発電所の一部廃炉あるいは稼働を中断した。その後、原子力規制委員会が設置され、福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、同委員会により原子力発電の新規制基準が制定された。その基準による原子力発電所の現状は、2020年4月現在、再稼働9基、設置変更許可7基、審査中11基、未申請9基、廃炉24基となっている。増設の計画は無い。

現時点で、2030年度の電源構成は、LNG火力27%程度、石炭火力26%程度、再生

可能エネルギー22～24%程度、原子力20～22%程度、石油火力3%程度を目指している。政府、経財界は原子力発電を20%台に保ちたい意向のようである。

IEAのF.ピロル事務局長は委員会挨拶のなかで、「原子力発電は他の従来型発電技術とともに電力の供給セキュリティ上、重要部分を担い続けるにも拘わらず、先進国での近い将来、大幅に増加する見通しは暗い」と指摘。世界的に原子力発電の前途は暗い。火力発電の衰退も無視できない。日本の政府の対応策としては核融合発電の開発が有力な候補であろう。核融合発電の実現は今世紀半ば以降である。

わが国の2030年度までのエネルギー将来像を定めた「エネルギー基本計画」では、今後、原発依存度は可能な限り低減させていくということがうたわれている。そのために、再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大はもちろん、火力発電所を効率化して温室効果ガス排出を抑えつつ発電量を増やす取組、また省エネルギーをさらに追求して電力需要量を減らすなどの取組が進められことになっている。

## V 核融合発電—ITER開発計画

1985年、ジュネーブで行われた米ソ首脳会談をきっかけとして、平和利用のための熱核融合研究の重要性が認められ、実用化に向けて国際協力への合意が成立した。この合意に基づき、1988年、核融合開発計画策定が日本、米国、ロシア、EUにより開始され、強力な磁場で燃料を閉じ込め加熱するトカマク方式を基本としたITER（イーター：International Thermonuclear Experimental Reactor＝国際熱核融合実験炉）の基礎設計が進められた。2007年10月、ITER協定の発効を迎え、フランス、カラダッシュに実験炉、ITERの建設が開始された。その間中国、韓国、インドが参加、合計7ヶ国、世界人口の半分

を占める国による大きなプロジェクトとなっている。

当初の全体計画としては建設に10年、運転に20年、解体処理に5年、計35年の期限となっている。最近の発表では2025年、実験炉工事完了を目指して作業が進められており、2020年初頭現在、約70%進捗のことである。この壮大なプロジェクト、本格稼働までの総事業費は約200億ユーロ（約2兆6000億円：1ユーロ＝130円で計算）と巨額である。日本の負担は建設段階で9%、運転期には13%となる予定である。

現在建設しているITERは「実験炉」であって、発電はしない。核融合エネルギー利用の科学的、技術的実証を行い、その後、「原型炉」で発電実証段階に入る計画である。核融合炉を実用化するためには「実験炉」、「原型炉」、「実証炉」を段階的に建設して研究を行い、その成果を踏まえて発電を行う「商用炉」を建設する段取りになっている。現時点での計画では、発電は2050年代に実現できる見通しである。

## VI 核融合炉の燃料

### a) 重水素(Deuterium)

燃料となる水素には質量数が1の軽水素（Hydrogen:H）、質量数が2の重水素（Deuterium:D）、質量数が3のトリチウム（Tritium:T）が同位体として存在する。これら三種の水素核融合反応の組み合わせ、H-H、D-D、T-T、及びH-D、H-T、D-T等のうち実現の可能性の最も高いと考えられている組み合わせはD-T反応である。

重水素：Dは天然水中に重水D<sub>2</sub>Oとして0.015%程度含まれている。資源としてはほぼ無限と考えてよいであろう。そして軽水素：Hのほぼ2倍の質量があるため重水D<sub>2</sub>Oの密度は約10%程度大きく、沸点も101.4℃、氷点は3.8℃と物理的性質が異なり、化学的性質例えば反応

速度や平衡定数なども異なる。これらの物性値の違いを利用して重水と軽水を分離することができる。

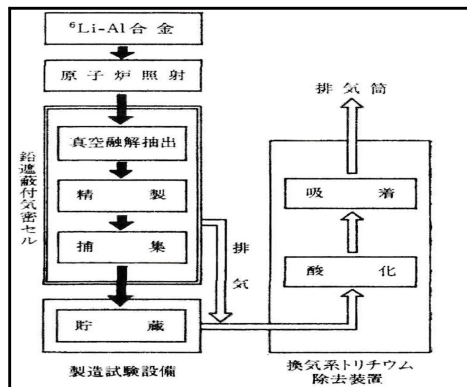
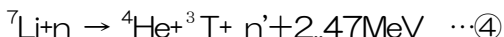
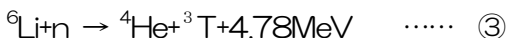
例えば沸点の差を利用して蒸留による濃縮分離、或いは交換反応法、電解法などを組み合わせて濃縮が可能である。また、電解法では、あらかじめ70%程度に濃縮されている重水素水を電気分解すれば、100%の重水素：D<sub>2</sub>を製造することができる。

なお、わが国では、2018年まではD<sub>2</sub>全量を輸入に頼っていったが、ここに来て国内で生産される運びとなっている。このような次第で、重水素、D<sub>2</sub>は高価ではあるが、市販品として入手可能である。これに対して、トリチウム、Tは天然にはほとんど存在しない。人工的に製造する必要がある。

## ② 三重水素(Tritium)

トリチウム：T<sub>2</sub>の製造は米国、ソ連、フランスなどで、水素爆弾の原料として既に1950年代前半に開始されており、かなりの量が蓄積されていると推定されている。しかし、軍事面での制約から、技術情報の入手は困難な状況にあった。これに対して、わが国の原子力研究所では、核融合開発研究の一環として1980年代にトリチウム製造研究に着手し、1985年代には本格的な製造試験に移行した。

第1図にその製造工程を示す。リチウム-アルミニウム合金(Li-Al)を原子炉内で中性子(n)照射する。③及び④の核反応によりトリチウムが合金の中に作られる。

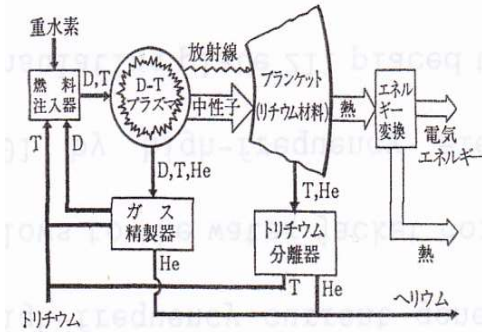


第1図 トリチウム製造工程

真空中で合金を加熱融解(700℃)すれば、トリチウムはヘリウムとともに気体として放出される。続いて粉末ウランを充填したゲッタを通して精製、捕集の工程を経て貯蔵される。

上記のほかに、トリチウムを取り出す有力な手段がある。D-T核融合炉からエネルギーを取り出す過程で、トリチウム製造が可能であり、その量を適当に選べばトリチウムの自己充足が可能となる。つまり、トリチウムは最初に核融合炉を起動するために必要な量だけでよいことになる。

第2図にD-T核融合炉全体の概念図を示す。炉内で発生するエネルギーの80%は高速中性子の形で、融合炉を取り巻くブランケットに送り込まれる。ブランケット内にチタン酸リチウムや酸化リチウムなどリチウムを含む物質を予め挿入しておく。リチウム成分は高速中性子との反応(③及び④)によりトリチウムとヘリウムに変化する。トリチウムは分離機を通して融合炉に燃料として送り込まれる。



第2図 D-T核融合炉概念図

将来の定常状態核融合炉では1GWの熱出力あたり、150g/dayのトリチウムが消費される。システムとしてトリチウムの自己充足を図るためには、定常状態の消費以外にブランケットの構造材、冷却配管材等のトリチウム吸収効果等による損失を考慮し、消費量(150g/day)より多い、増殖率として1.1程度の生産、補充が必要と考えられている。

トリチウムは3種類ある水素の同位体であり、放射線の一種であるベータ線(電子)を放出するが(半減期は12.3年)そのエネルギーは非常に弱く、水と同じように新陳代謝などにより排出され、人間の体に蓄積されることはない。

D-T核反応により放出された高速中性子は、自身と同じ程度のごく小さな元素の原子核に反応する傾向が強い。このため、高速中性子のエネルギーは、ブランケット内を流れる高圧冷却水の水素原子や酸素原子、それにリチウムに吸収される。高速中性子のエネルギーを受け取った高温、高圧の冷却水は炉外で直接かまたは熱交換器(蒸気発生器)を通じて発電機を回し、電気エネルギーに変換される(第2図)。

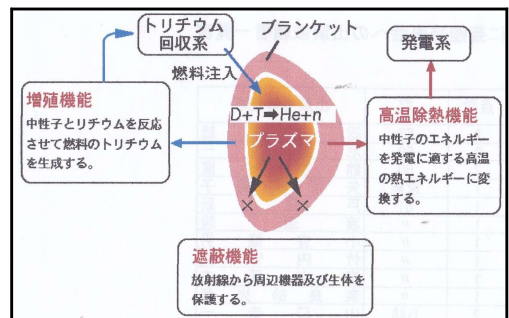
トリチウムの原料としてのリチウムは海水中に0.17%程度含まれており、これを効率よく回収すれば資源として事実上無限(約2,000万年)といえる。

## Ⅶ トカマク

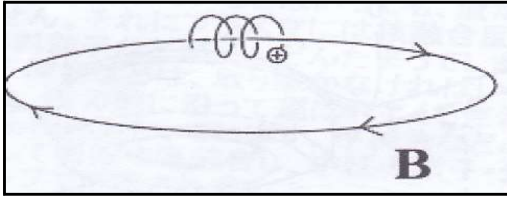
核融合反応の実現には、高温、高密度のプラズマを利用する。物質を加熱すると、固体から液体に、さらに気体にと状態が変化する。さらに加熱すると、気体の分子は原子に分解される(解離)。さらに温度を上げると原子は正の電気を帯びた原子核イオンと電子とに分解される(電離)。これらに加えて気体の原子や分子などがごちゃごちゃになって存在している状態をプラズマと呼んでいる。

自然界のプラズマには、太陽、太陽風、極地の空を彩るオーロラ等がある。また宇宙全体で考えると固体、液体、気体に比べてプラズマの占める体積は圧倒的に大きく全体の98%以上がプラズマであると言われている。

すでに述べた様に(秩父;115号、平成24年4月)、一口に核融合といっても様々な種類がある。その中で最も実用化に近いといわれているのが強力な磁場でプラズマを閉じ込める「トカマク」方式であり、現在建設が進行中のITERはこの方式を採用している。荷電粒子の集合体であるプラズマに磁場を加える。荷電粒子は磁場から力を受け、磁力線に巻き付くように運動する(第4図)。

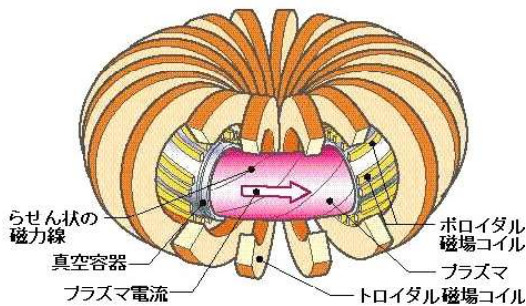


第3図 トカマク型融合炉の断面図



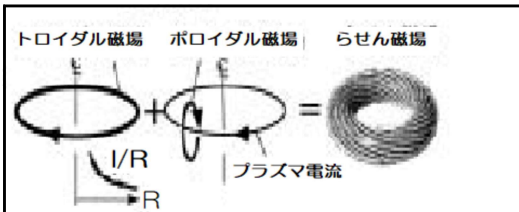
第4図 円形磁場に巻き付く荷電粒子

磁場を円形にすれば、荷電粒子は磁力線に沿ってぐるぐるといつまでも同じ軌道を回り続けようとする。トカマクの真空容器がドーナツ状になっているのもここに理由がある（第5図）。円形磁場はドーナツ状の核反応容器を囲んで超電導巻線をコイル状に配列すればよい。第5図にトロイダル磁場コイルとして示されている。



第5図 融合炉の模式図

このような配位をトーラス型と呼んでいる。ただトーラス型の磁場はドーナツ状の容器の中心から外側に行くにつれて弱くなり、プラズマの分布が広がってしまう。これを防ぐために、プラズマ電流によるポロイダル磁場に加えて同じ向きに磁場を生じるポロイダル磁場コイルを装着する。ポロイダル方向の磁場とトロイダル磁場とを合わせてらせん磁場を作る（第6図）。



第6図 らせん磁場の成り立ち

らせん磁場によりプラズマは反応容器の壁に接触することなく、中心部分に集中、核融合反応が進むことになる。

### Ⅷ 核融合のリスク

原発では、ウランに中性子が衝突して分裂したときに、エネルギーが生み出される。そのときに新たに中性子が飛び出し、再びウランにぶつかるという具合に、連鎖的に反応が続く。連鎖反応の暴走を抑えるために慎重な制御が重要である。核融合発電の場合、D-T反応で発生した中性子は、直ちに反応系を取りまくブランケットに飛び込みD-T核反応に関係しなくなる。このため連鎖反応は起きず、暴走はしないと考えられている。また、燃料のプラズマを1億度という「高温」に加熱し、 $1\text{cm}^3$ に10兆個という「高密度」にする必要があり、何かトラブルがあればプラズマがすぐに消えて反応が勝手に止まり、危険はない。

核融合発電にかかわる放射性物質は、燃料の「トリチウム」と、核反応により発生した中性子によって「放射能をもつようになった核融合炉」である。汚染された核融合炉は、装置そのものなので、放射性物質が拡散するリスクは低い。

燃料としてのトリチウムは気体なので、何らかの要因で拡散する恐れがないとは言いきれない。トリチウムはβ線を放出する。β線の正体は、原子核の中から勢いよく飛び出してきた「電子」である。電子線は一般的に衣服や皮膚で容易に遮られるので、「外部被ばく」のリスクは小さい。体の中に取り込まれたトリチウムは、おもに2つの形態を取る。ひとつは酸素と結合して水のような「水トリチウム」、もうひとつは有機物と結合する「有機トリチウム」である。水の場合は10日、有機物の場合は40日ほどで体内から放出され半分になる。トリチウムからのβ線自体は周囲の物質により簡単に吸収され

るので、内部漏ばくによるリスクは弱いと考えられている。総合して核融合発電は、現在使用されている原発に比べて、はるかにリスクは少ないと判断できる。

秩父 152号(令和3年7月)

### エネルギーシリーズ④ 日本のエネルギー需要の将来予測

## IX 核融合発電の利点

核融合の利点とされている項目を列挙する。

### 1. 豊富な資源：

燃料となる重水素は海水中に豊富に存在し、また三重水素を得るためのリチウムも入手容易である。

### 2. 固有の安全性

核融合反応は暴走しない。核分裂反応と比べて安全対策が比較的容易である。

### 3. 環境保全

発電の過程で二酸化炭素を発生しない。  
高レベルの放射性廃棄物が発生しない。

川島 順 予科 21-7  
(越谷市) 航空 7-1

## エネルギーシリーズ

### VI 日本のエネルギー需要の将来予測

#### 1. エネルギー庁のエネルギー基本政策

2002年(H14年)制定されたエネルギー政策基本法に基づいて2003年10月に策定されたエネルギー基本計画では、2030年に向けた目標として次の点を挙げている。

#### ☆2030年に向けた目標

(1) 資源小国である日本はエネルギー安全保障を強化するため自主エネルギー比率を現在の38%から70%にする

(2) 電源構成に占めるゼロ・エミッション(原子力及び再生可能エネルギー)の比率を現在の34%を70%にする。

(3) 家庭部門のエネルギー消費から発生するCO2を半減させる。

(4) 産業部門で世界最高のエネルギー利用効率を維持・強化する。

(5) 日本の企業群がエネルギー関連製品・システムの国際市場において最高水準を維持・増進する。

#### ☆電力エネルギーベストミックスモード

電力の需要変動に応じて発電用電源が安定的にしかも経済的に電力を供給するためのエネルギー源の最も好ましい構成割合とそれに適した電源設備を次の電力ベストミックスモード表で表示する。

ベースロード電源： 40%

原子力発電

水力発電

## X あとがき

核融合発電実現のため世界的規模で現在研究開発が進められている。数十年後の成果が待ちどろしい。

その成果に基づき、更に発電装置の開発プロジェクトが発足する。核融合発電が実現し得るのは四半世紀以上先の話となる。我々としては草葉の陰から見守るしかすべは無いのである。しかし将来の人類の滅亡を救う重要手段としてその実現が強く求められていることは言うまでも無い。(2020年7月脱稿)

石炭火力発電	
地熱発電	
潮力発電	
ミドルロード電源:	30%
ガス火力発電	
バイオマス発電	
ピークロード発電:	30%
石油火力発電	
太陽光発電	
風力発電	
揚水式水力発電	

なお、このエネルギーベストミックスモードにおける総発電量に対するゼロ・エミッション電源（再生エネ+原子力）の比率は現在の12%から2030年には44%を目指している。その内訳は再生エネ22~24%、原子力が20~22%となっている。しかし、今注目されている太陽光発電や風力発電は気候に変動されるので最も重要なベースロード発電には利用できない。

## 2. 新しいエネルギー基本政策

2018年（H30年）にエネルギー政策基本法の再検討が行われ、第5次エネルギー基本計画が示され、新たに2030年の目標の見直しと2050年の目標の設定が行われた。

見直された目標では、2030年に向けた対応として温室効果ガスの削減目標として26%が明示された。さらに2050年に向けた対応としては、温室効果ガスの削減目標として80%と非常に高い目標が示された。

この目標を達成するためにはエネルギーミックスモードの確実な実現とエネルギー転換・脱炭素化への挑戦としてあらゆる選択肢の追求、科学的レビューによる重点決定が重要であると指摘している。

なお、このエネルギー基本計画の分科会では、エネルギーベストミックスの掲げる2030年における目標、原子力20~

22%は現状ではほど遠く及びそうもないという指摘や、それを実現させるためには「小型モジュール原子炉」(SMR)のような安全性の高い原子炉の導入が必要であるとの意見が出ている。

さらに、原子力に対する2050年の目標では、安全炉の追求、バックエンド技術開発と抽象的に述べるだけで、核融合原子炉については全く触れていないことは残念である。

## 3. エネルギー政策に関する国際的な動き

SDGs (Sustainable Development Goals) 持続可能な開発目標

2015年9月に国連サミットにおいて採択されたSDGsは、2016年から2030年迄の15年間に「人類の幸福の増進と地球環境を改善するための目標」を示すもので、17の目標 (Goals) とそれを達成するための169のターゲット (手段) を定めたものである。

17の目標は、図1のプロジェクションマップに表示されている。

本稿に特に関係の深い7番目の目標は「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」の標語で表されている。

さらにそのターゲットは2030年までに、7.1: 安価で信頼できる現代的エネルギーサービスに総ての人がアクセスできるようにする。

7.2: 世界のエネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの割合を拡大させる。

7.3: 世界全体のエネルギー効率の改善を図る。

7a: 再生可能エネルギー、エネルギー効率及び環境負荷の低い化石燃料技術の研究、開発のための国際協力と投資の促進を計る。

7b: 開発途上国に現代的で持続可能なエネルギーサービスを行うためのインフラの整備を計る。

図1 国連サミットで採択された開発目標

## 4. 将来予測

## (1) 世界人工の急激な増加

図2に示されるように、世界人口は1950年以降急激に増加している。

1950年に25億人、2020年現在77億人、2050年に97億人、2100年には110億人と100億人を突破する。

(2) 世界エネルギー需要の急激な増加  
世界人口の増加に比例してエネルギー需要も急激に増加している。

**図2 世界人口・エネルギー消費量の増加**

総エネルギーの石油換算消費量は1965年37億トン、2016年に133億トンと人口の増加に比例して増えている。

## (3) 化石燃料の枯渇

化石燃料の可採埋蔵量は次のごとく50年から100数十年で、いずれも枯渇する。

石油	1729億バーレル	50年
天然ガス	197兆m <sup>3</sup>	51年
石炭	1548億トン	132年
ウラン	614万トン	99年

**図3 化石燃料の可採埋蔵量** 関西電力資料より

## 5. 再生可能エネルギーのみで人類は生存可能であるか

## (1) 最悪のケース

化石燃料の奪い合いで世界戦争が起こる一原爆の応酬で人類は滅びる。

白亜紀の大量絶滅の再来。

## (2) 次のケース

戦争が起こらなくとも化石燃料が枯渇すれば、再生可能エネルギーの不足分を森林で補い世界の森林が消滅する。地球から緑がなくなればあらゆる災害が発生し、人類は滅びる。わずかに残った人類は新炭時代の昔に戻る。

## (3) 残った唯一の選択肢

核融合原子力をベースロードとし、再生可能エネルギーを補助とするミックスモード：2020年10月17日の読売新聞の社説でエネルギー計画は「電力の安定

供給が前提条件だ」として「化石燃料ばかりに頼れないとすれば、原子力の活用が最も有効であろう。二酸化炭素を出さず、安定した発電が可能だ。輸入に頼る化石燃料と異なり、発電を増やせばエネルギー自給率が高まる。」と結論づけしている。[この主張は、秩父148号(令和2年7月)日本におけるエネルギー資源①における論説でも述べている。]

そして、「廃炉が決まったものを除く33基のうち、再稼働した原発は9基しかなく、政府は新計画で原発の必要性を国民に説明し、再稼働を後押しせねばならない。」と主張している。

しかし、肝心な原発も、その燃料のウランは100%輸入に頼っている。しかも、そのウランも図3に示すように、可採年数は99年である。いずれ化石燃料と同じ枯渇の運命にある。

ではどうすればよいか、残った唯一の選択肢はこの項で述べたように、核融合原子炉以外にない。そのためには、現在の核分裂原子炉の継続的運用を通じて、用地、人材、設備を維持し乍ら、核融合原子炉の開発を待つ [現在の予測では2050年頃：秩父151号(令和3年4月)「原子力エネルギー」岡本祥一]、その運用開始にバトンタッチすればよい。