

§ 1 はじめに

1.1 終活について

本書の題名である『高レベル放射性廃棄物の「終活&永代供養」』にある終活とは、「終末期の生活」をいい、主に自分や家族が生活の最後の段階においてどのようなケアや準備をするかを考え、計画的に最期を迎えることを指さす。一般に「終活」には、医療や法的な側面だけでなく、心のケアや遺産の整理、葬儀や墓地の選定なども含まれる。その主要素を挙げると次のようになる。

- ・医療面：治療の選択や拒否、病院やホスピスの選定など、医療に関する計画。医療の指示書（生前指定医療）や遺言書の作成。
- ・法的な側面：遺言書や任意後見契約など、法的な文書の整備。遺産分割や相続の計画。
- ・心のケア：心理的なサポートやカウンセリング。自分や家族の感情や希望に対するコミュニケーション。
- ・経済的な整理：銀行口座や保険の整理。葬儀や墓地の費用の検討。
- ・葬儀や墓地の選定：葬儀や告別式のスタイルや内容の選定。墓地や骨壺の選定。

以上から終活は、急な状況や病気に備えるだけでなく、自分の意志を尊重し、家族や関係者にも負担をかけないようにするための重要な取り組みをさす。近年では、終活に関するセミナーや相談サービスも提供されており、人々が積極的に終活を進める傾向にある。

原子力発電のみならず、とりわけ高レベル放射性廃棄物は、終活の段階にあるのではないかと筆者は思っている。また上述した要素との関連において、墓地の選定が関連するといえる。原子力においては、放射能との関係からこれはまたいわゆる「永代供養」としなければならない。

1.2 永代供養

本ノートを執筆することになったのは、原子力発電（原発）を利用すると発生する高レベル放射性廃棄物の深地層処分について学習し、また関連する研究センターを見学した結果である。原子力発電に伴う放射性廃棄物は、その特性上、長期間にわたり私たちの健康を損なう社会的な影響を及ぼす。これらの廃棄物は、まさに「原発における廃棄物の永代供養」とも言えるような、超長期の管理が求められる。そこで、永代供養として関連づけて、この問題を考えることを投げかけている。

「永代供養」とは、亡くなった方の霊を永遠に供養し続けることを指す言葉である。これは、特定の宗教や信仰体系に基づくものであり、寺院や霊園などで行われることがある。具体的な内容や形式は、宗派や地域によって異なる場合があるが、一般的には以下のような要素が含まれる。

- ・位牌の設置：亡くなった方の名前が書かれた位牌が、特定の場所に設置される。
- ・法要や供養の儀式：定期的に法要や供養の儀式が行われ、故人の霊に安らぎと平穏を祈る。

・継続的な管理：位牌や供養のための場所は、永続的に管理され、後世にわたって供養が続けられる。

寺院が故人の骨を永遠に安置し、供養を続けるように、原子力発電から生じる廃棄物もまた、私たちの未来への責任として永遠に安置する必要がある。この使命は、技術と倫理が調和した取り組みを通じてのみ果たされるべきである。唯一の違いは、放射性廃棄物については、あらゆる事物に神の存在を考える日本においても宗教上の神仏性は考えることはなさそうである。

しかしながら超長期の安全性を確保するためには、科学的な進歩と継続的な監視が欠かせない。廃棄物の適切な保管場所の選定や、地域社会との協力による情報の共有が必要であり、人間の生命と健康についての課題であり、これらを十分に対処した「永代供養」することが解決策の鍵となるといえる。

「原発における廃棄物の永代供養」は、現世代を生きる私たちの責任であり、そのメソッドの選択には、未来の世代に対する責任が課せられる。それはまさに前掲の「終活」の局面となる。

安全で持続可能な方法で廃棄物を管理し、私たちの地球を大切にすることが、責務であり、何万年という永遠の課題であり、それは科学を超えた宗教にも似た供養の形であるともいえるかもしれない。

§ 2 エネルギーについて

2.1 そもそもエネルギーとは？

本ノートは原子力発電の利用に関わるものであり、それは人間社会が長い歴史のなかにおいて獲得した《エネルギー》の一つであった。そこで、まず「エネルギー」について、再考しこれを記すことから始めたい。

エネルギーとは、物体や物理的なシステムが作業を行い、変化を引き起こす能力を指すといえる。これは、動く物体、加熱された物体、または他の形態のエネルギー変換などの現象などに合致することから理解できる。そのエネルギーは、さまざまな形態に変換できるため、その存在や変換は物理学や工学などの科学分野で広く研究されている。エネルギーは、つぎのような代表的な形態に分類される。

- ・運動エネルギー (Kinetic Energy)：物体の運動に関連するエネルギーで、物体の質量 m と速度 v に依存する。代数式で表すと、

$$E = 1/2 \cdot mv^2$$

である。

- ・位置エネルギー (Potential Energy)：物体が重力や役割、位置によって持っているエネルギーで、高い位置にある物体は低い位置にある物体よりも位置エネルギーは高くなる。これも代数式で書くと、

$$E = mgh$$

となる。ここで、 m ：質量、 g ：重力の加速度、 h ：高さである。

- ・熱エネルギー (Thermal Energy)：分子や原子の運動に

よって生じるエネルギーである。物体の温度が上昇すると、その物体はより多くの熱エネルギーを持つ。

- ・化学エネルギー (Chemical Energy) : 分子の結合や化学反応によって保持されるエネルギーで、食物や燃料などがこの形態のエネルギーの例といえる。

- ・電気エネルギー (Electrical Energy) : 電子の移動に伴うエネルギーである。電池、発電機、電力網などが電気エネルギーを生成・供給し、現代の社会では最も身近な形態である。

- ・放射線エネルギー (Radiant Energy) : 光や放射線の形態を取るエネルギーである。太陽光や電磁波がこのカテゴリに含まれる。

エネルギーは保存の法則に従い、異なる形態に変換されても、その量は変わらないのではあるが、実際には変換時にエネルギーの損失があるため、一般に変換後のエネルギー量は減少する。

エネルギーは物理学的な現象や機械の動作など多くの側面で中心的な役割を果たしており、現代社会のあらゆる分野で利用されている。エネルギーという名前は、幼稚園生でも言葉として発する私たちの暮らしには必須の概念でもあり実体でもある。

2.2 アインシュタインによる革新

本ノートの背景にある原子力発電のエネルギーにおいては、アルベルト・アインシュタインによって提唱された著名な物理学の公式 $E=mc^2$ として表記される「エネルギー

「質量等価原理」が関わっている。この公式は、エネルギー E の大きさは、質量 m と光速 c に関係しているというもので、アインシュタインの特殊相対性理論に基づいている。光速は、 $c = 299,792,458$ メートル/秒で一定である。

この公式は、質量とエネルギーが直接的に関連しており、一方が他方に変換可能であることを示している。その例としては、原子爆弾の爆発や核反応でのエネルギー生成が挙げられる。

アインシュタインによるこの発見は、物理学における重要な革新の一環であり、従来の古典物理学の枠を超え、相対性理論に基づく新しい物理学をつくりあげた。その影響は広範に及んでおり、原子力発電の開発と、その発展に動機づけを与えてきたといえる。

§ 3 これまでのエネルギーと発電のしくみ

3.1 畜力や奴隷によるエネルギー

有史におけるエネルギーの利用の始まりは、人間自身やウシやウマなどの畜力によるものであった。人間の利用では、社会の形成により、奴隷という存在を生んだのであった。こうして、この時代のエネルギーはつらいものであり、筆者は、畜力と奴隷によって得ていた時代のエネルギーを「ムチのエネルギー」と呼ぶことにしたい。

「ムチのエネルギー」という表現は、歴史的な文脈や社会的な視点から見ると、歴史的な不正義や人権侵害を連想させる表現となる。それは、歴史から教訓として学ぶことができる。畜力や奴隷に対してムチを用いて動力とするエネルギーは、いまの時代からすれば大きな量ではなかったが、その時代を象徴する社会の制度でもあったといえる。

3.2 燃やしてつくるエネルギー

次に、薪・石炭・石油などの化石燃料を「燃やしてつくるエネルギー」の時代が、やってきた。この表現は、資源を燃焼させてエネルギーを得るプロセスを強調している。実は、それは蒸気の利用と呼応している。

「燃やしてつくるエネルギー」は、次に述べる自然由来のエネルギーのうち、水車や風車によるエネルギー利用が産業として発展する経緯をたどる。その主役は、石炭を利用した蒸気機関の発明による産業革命をつくり出した。有名なジェイムズ・ワットの活躍である。

原子力発電でも蒸気を使うのであるが、その熱生成、すなわちエネルギー生成は、核反応を介して放射線を、そして熱エネルギーを取得するのであり、「燃やしてつくるエネルギー」のからはやや外れる要素がある。それは原子力発電では放射性物質の核分裂反応に依存しており、通常の燃焼プロセスではないからである。

筆者が「燃やしてつくるエネルギー」と表現するのは、異なるエネルギー源が、蒸気を利用するという共通の特徴を持つことを強調し、一般の人にエネルギーの起源について考えてもらうことを意図するのであり、エネルギーについてコミュニケーションするアプローチである。本ノートのもう一つの意図でもある。

3.3 自然由来のエネルギー

つぎに、対象として「自然由来のエネルギー」を表現したい。水力、太陽光、バイオマス、風力、地熱などの再生可能エネルギー源を指すもので、表現としては、これらのエネルギー源が自然の循環や変動に依存していることを強調したい。

これらのいろいろの「自然由来のエネルギー」の利用と発展には長い歴史があり、水車や風車の時代から、太陽光や地熱利用の時代までには長い年月の隔たりがあった。

そして、現代においては、これらの「自然由来のエネルギー」は、「自然エネルギー」や「再生可能エネルギー」と呼ばれ、時代の寵児としての意義づけもされている。

その過程では、「自然由来のエネルギー」は、天候や気象、地球の自然なプロセスに影響されるため、「由来」（ゆ

らい)は「ゆらぎ」とも揶揄され、その変動性や可変性も強調されたのであった。例えば、風力発電は風の吹き具合に依存し、太陽光発電は日照条件に左右される。

このようなエネルギー源は、自然のサイクルや条件に順応する必要がある。しかし、利用の方法や蓄電を併用することにより、現在では改善される。また太陽光発電と風力発電では日中と夜間のように補完の関係として利用できる。「自然由来のエネルギー」は、エネルギーの持続可能性や環境への配慮を強調する観点からも、関心を引き出す表現ではないだろうか。

3.4 原子の火によるエネルギー

原子力発電は、「燃やしてつくるエネルギー」には組み入れられないのであるが、「原子の火によるエネルギー」との表現は、どうだろう。

この表現は、原子の核分裂反応によって発生する熱エネルギーを、一種の「原子の火」と見立てのことである。原子力発電では、原子核の分裂によって放出される熱を利用しているので、通常の燃焼とは異なることを理解する必要があるだろう。通常の火は酸素との化学反応によって熱のエネルギーを生成するのであるが、原子力発電では原子の核分裂反応が熱生成の中心である。

「原子の火によるエネルギー」については、次章でも述べるので、ここでは詳述しないで、この表現だけにとどめておくことにしたい。

§ 4 原子力発電の利用と課題

4.1 原子力発電のウラン燃料とその確保

(1) ウラン燃料の基本事項

原子力発電所でのウラン燃料についての基本的な情報とその確保に関するポイントを以下にまとめてみたい。

- ・ウラン鉱石の採掘：原子力発電所で使用されるウラン燃料は、通常、ウラン鉱石から採掘される。その主な組成としてはウラン酸化物 (U_3O_8) が挙げられる。

- ・ウラン濃縮：採掘された鉱石にはウラン 235 (U-235) とウラン 238 (U-238) が含まれるが、原子炉での使用には U-235 を増やす必要がある。濃縮プロセスを経て、天然ウラン中の U-235 の濃度を増すことが行われ、その濃縮にはガス拡散法や遠心分離法が使われる。

核燃料の製造：濃縮されたウランは、ペレット状に成形され、それを燃料棒に詰め込む。これが原子炉内での核反応の発生源となる。

(2) ウラン燃料の確保

原子力発電所の持続的な運用には、ウラン燃料の確保が不可欠である。世界的なウラン市場の動向や供給源の多様性が、安定的かつ安全な原子力エネルギーの供給に寄与している。

- ・ウラン鉱石の供給源：ウラン鉱石の主要な供給国は、カナダ、カザフスタン、オーストラリアなどである。これらの国々は、世界のウラン市場で重要な地位を占めている。

- ・国内生産と国際取引：一部の国は自国でウランを生産し、原子力発電所に供給する。他の国々は国際市場でウランを購入し、原子力発電所の燃料供給を確保している。そのため商業契約や国際的なウラン取引が行われている。

- ・ウラン価格の変動：ウラン市場では供給と需要の変動があり、これがウラン価格に影響を与える。国々や企業は価格変動に対応して、戦略的にウラン購入を行うことがある。

- ・新たなウラン採掘プロジェクト：需要増加に対応して、新しいウラン鉱山の開発や既存鉱山の拡張が進められることがある。これにより将来の供給が確保されることが期待されている。

4.2 原子力発電の放射性廃棄物

原子力発電所の放射性廃棄物は、放射性物質を含んでおり、その処理と管理は環境と公衆の安全に関する非常に重要な問題である。放射性廃棄物は主に高レベル廃棄物と低レベル廃棄物に分類されている。

(1) 高レベル廃棄物 (High-Level Waste, HLW)

高レベル廃棄物は、原子炉の燃料から取り出された使用済燃料や再処理により発生したガラス固化体で、高い放射線量を持ち、長期間にわたって安全に管理することが必須とされている。

一般的な処分方法としては地下深層処分が考えられ、それは地下の安定した地層に廃棄物を保管し、地球の表面から遮断して人々と環境を保護する方法といえる。

(2) 低レベル廃棄物 (Low-Level Waste, LLW)

低レベル廃棄物には、原子力発電所の設備や装置から発生する放射性物質が含まれる。これらの廃棄物は比較的低い放射線量を持っており、適切な処理と管理が行われると、一般のごみと同様に処分できる場合もあるといわれる。また、低レベル廃棄物の処分には、処分場などでの安全な埋め立てが考えられる。

(3) 原子力発電における放射性廃棄物への課題

原子力発電は、放射性廃棄物を処理しなければならない。後述するプルサーマル方式により一部は再利用できても、どうしても最終の廃棄物が出ることになる。その廃棄物を超長期にわたって保管しなければならない。そのためには、放射性廃棄物を「うんち」と呼ぶと、その処理施設は「トイレ」に当たる。

原子力発電所の課題は、「トイレのないマンション」という表現がされることがあるが、それは原子力発電所に関する課題を皮肉や風刺を加えて比喩的に表現されたものである。これは、一般市民への具体的な問題提起や議論のきっかけにするものである。その場合においても重要なのは、原子力発電に伴う放射性廃棄物の取り扱いや管理に対する公共の理解と透明性が確保される、またそれを確保するということである。

国や地域によっては、放射性廃棄物の処理・処分に関する法律や規制が異なる。原子力発電所は、これらの法令を遵守し、適切な技術と安全基準を用いて廃棄物を処理・処分する責任がある。また、廃棄物管理においては、透明性

や公共への情報提供が求められ、地元コミュニティとの対話も重要となる。本ノートもその一端となれればと考えている。

次節では、高レベル放射性廃棄物処分についてまとめる。

4.3 高レベル放射性廃棄物処分

(1) 地層処理（地層処分）

地層処理（地層処分）は、高レベル放射性廃棄物などの放射性廃棄物を安全に処分する方法の一つである。この方法では、地下の安定した地層に廃棄物を保管し、地上から隔離して安全性を確保する。以下に、地層処理の主な特徴や手順をまとめたい。

- ・地層の選定：適切な地層の選定は非常に重要である。安定していて、地下水の流れが制限されている地域が選ばれる。地質学的な特性が安定している必要がある。今回、見学した幌延深地層研究センターは 350m の深度であったが、500m に向けた研究対策が行われている。

- ・廃棄物の包囲：使用済燃料や高レベル放射性廃棄物は、適切な容器や包囲材料で封入され、これによって、放射性物質が地層から漏れ出すのを防止する。

- ・地層への配置：廃棄物は地下の採掘施設や坑道を通じて地層に運ばれる。地下に安全に配置され、地層の特性によって放射線を遮蔽することが期待される。

- ・埋設と密封：廃棄物が地層に配置されたら、施設は密閉され、地上から隔離される。通常、コンクリートで覆われたり、地下坑道が閉鎖される。

- ・モニタリングと監視：地層処分施設は、安全性を確保するために様々なモニタリングシステムが設備される。これには地下水や地層内の放射性物質の監視も含まれる。
- ・長期的な安全性の評価：地層処分の安全性は、数十年から数万年にわたって確保される必要がある。施設は長期的な安全性の評価を受け、必要に応じて対策が講じられる。

以上のように、地層処分は、高い技術と厳格な規制が必要な方法であり、国や地域の法律に基づいて実施される。安全性と透明性が確保されなければならないため、地元のコミュニティや関係者への情報提供とコミュニケーションが不可欠となる。永代供養という表現は、大袈裟のようにも思えるが、お墓やお骨の永代供養よりは、高レベル放射性廃棄物の深地層での埋設&安置においては、さらに厳しい統制が前提としてかつ継続して行われなければならない世代を超えた社会システムが前提としてなされなければならない。

(2) 六ヶ所再処理工場

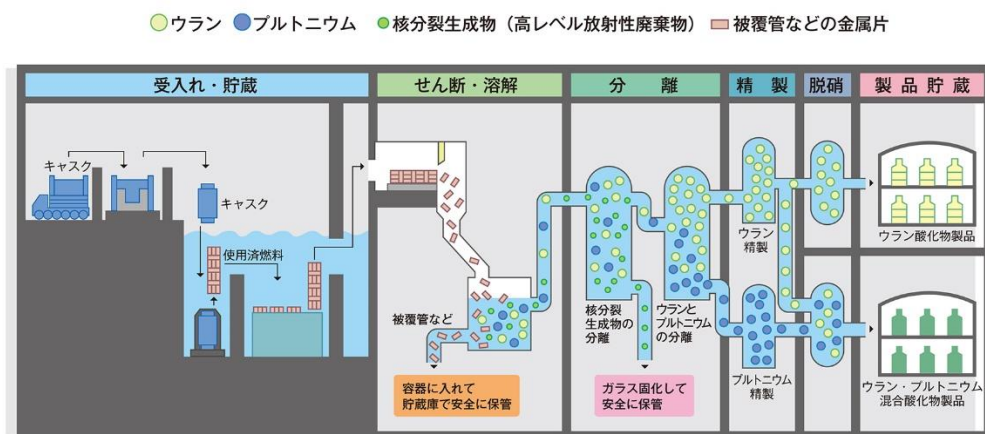
六ヶ所再処理工場は、日本の再処理工場のひとつで、主に使用済燃料からプルトニウムやウランなどを回収する処理施設である。筆者は、近くには訪ねたことはあるが、内部については未体験であるので、以下に、六ヶ所再処理工場について、公表されている情報からまとめてみたい。

- ・所在地：六ヶ所再処理工場は、青森県上北郡六ヶ所村に位置している。
- ・運営者：六ヶ所再処理工場は、日本原燃株式会社によって運営されている。

・概要：六ヶ所再処理工場は、日本の原子力発電所で使用された燃料から再処理によって有効な原子燃料成分を取り出し、再利用することが目的とされている。

具体的な処理手順は下図のように、まず放射能を弱めるため貯蔵プールで冷却・貯蔵し、十分に放射能を弱めた後、約3～4cmの長さに細かくせん断し、燃料の部分を硝酸で溶かし、ウラン、プルトニウム、核分裂生成物に分離する。ウラン溶液とプルトニウム溶液は、精製、脱硝してウラン酸化物とウラン・プルトニウム混合酸化物にされる。

再処理の工程



出典：原子力・エネルギー図面集

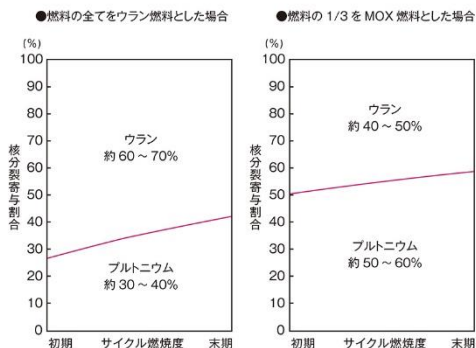
なお、原子力発電で使い終えた燃料(使用済燃料)には、

ウランやプルトニウムといった再利用可能な物質が約 95～97%含まれている。このウランやプルトニウムを使用済燃料の中から取り出して（再処理）、ほかの物質と混ぜ合わせ「MOX 燃料」と呼ばれる燃料に加工して、もう一度発電に利用する取り組みが「原子燃料サイクル（核燃料サイクル）」と呼ばれている。

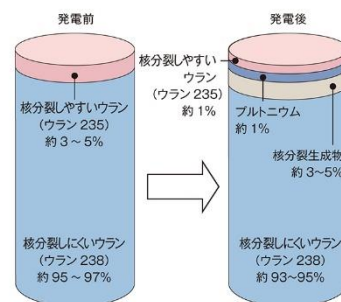
原子力発電所の使用済燃料からは、下図の右側に示された約 3～5%の核分裂生成物が廃棄物として出る。この高レベル放射性廃棄物が、深層処分の対象となる。

軽水炉内でのウラン燃料の燃焼による変化

①炉心におけるウランとプルトニウム核分裂寄与割合
(BWR平衡炉心の例)



②発電前後でのウラン燃料の変化(例)



出典：原子力・エネルギー図面集

・日本のエネルギー政策と関連：六ヶ所再処理工場は、日本のエネルギー政策において再処理とプルトニウム利用

の一環として位置づけられている。しかし、国内外で再処理に対する様々な懸念が存在し、政策の見直しが行われている現状がある。

- ・国際的な視点：再処理は国際的な議論の対象ともなり、再処理施設が核兵器の拡散リスクを伴う可能性があるとして、国際社会においても慎重に議論され、かつ貢献している。

六ヶ所再処理工場は日本の原子力政策において重要な施設の一つであり、その運営や将来の方針については慎重に検討されており、市民の理解が重要である。そのため見学会なども行われている。

(3) 幌延深地層研究センター

幌延深地層研究センターは、地下深層に関する研究や地質学的な調査を行う施設であり、同センターは、地下の構造や地層、地下水の動態などを理解し、エネルギー、環境、地震学などの研究に寄与する目的で設立されている。

幌延は北海道の地名であり、地質学的には様々な特徴がある地域である。今回、筆者のグループでは、同研究センターを見学する機会を得た。以下、その体験を通じてその施設概要を述べたい。

まず、HP で予備知識を得ることができる。その web サイトは以下である。

<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>

筆者らは、2023 年 11 月 9 日に、幌延深地層研究センターを見学のため訪問した。同センターには、「ゆめ地創

館」があり、同研究センターの概要を、いろいろの展示品を通じて、その場で模擬的に知ることができる。その館内の様子は、インターネットでもこのゆめ地創館をバーチャルで3Dとして観ることができる。

<https://my.matterport.com/show/?m=Uvs5LHJ9qAt>

筆者の場合、現地を体験しており現地の体験と重ねて確認することができるので、その3Dは印象深いし、よくわかる。

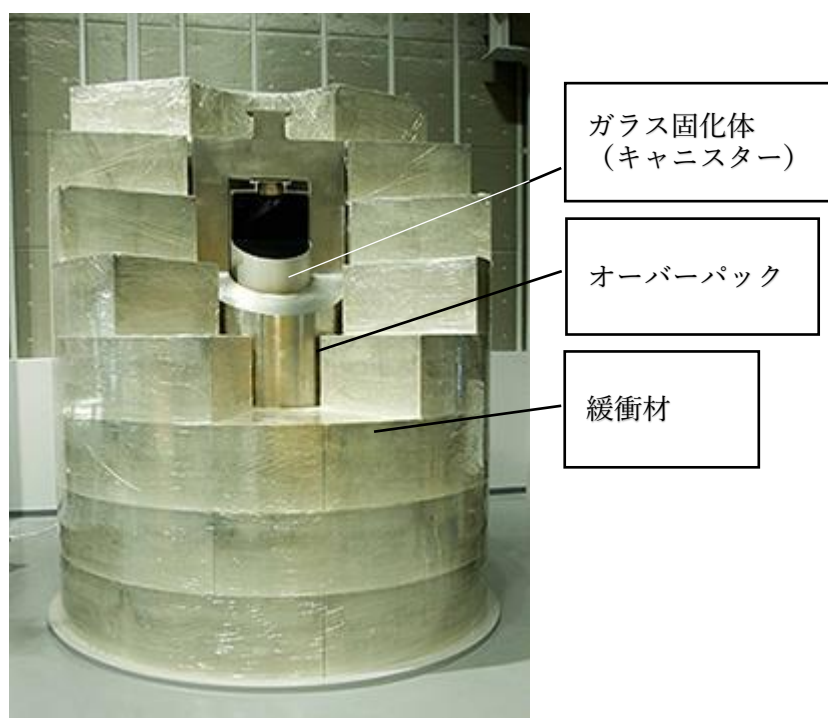
さて、この研究センターでの最も重要な展示や教材は、高レベル放射性廃棄物の地層処分についてである。その具体的な例を以下に示す。

ゆめ地創館の1階フロアには、深地層処分を行う高レベル放射性廃棄物、ガラス固化体の模型が展示されている（下の写真）。



ゆめ地創館の展示例（ガラス固化体）

ゆめ地創館の隣にある実規模試験施設の展示室には、上述のガラス固化体の深地層処分の現場での埋設における「人工バリア」が設置展示されている（下の写真）。これが、本ノートいう永久供養の有様であるといえる。



人工バリアの構成

多重バリアシステムにおける各要素の名称と役割を簡単に下記に示す。

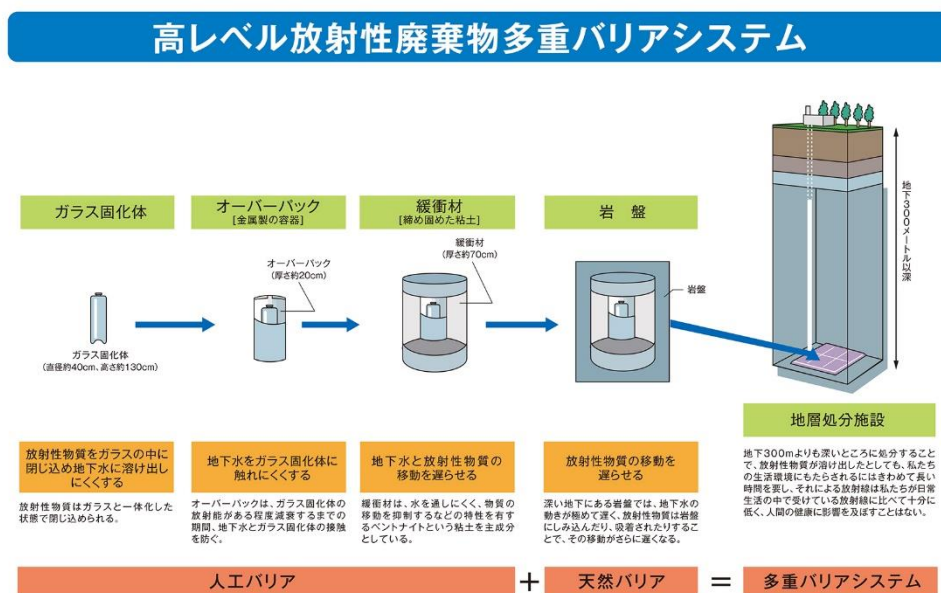
- ・多重バリアシステム：天然と人工のバリアからなる高レベル放射性廃棄物を長時間にわたって守る方策。
- ・ガラス固化体：キャニスターと呼ばれる容器の中に、高

レベル放射性物質をガラスと一体化させて閉じ込め、地下水に溶けにくくしたもの。

- ・オーバーパック：ガラス固化体を収める金属製の容器。地下水との接触を防止し、地圧などの外圧からガラス固化体を守るもの。

- ・緩衝材：オーバーパックの周りを覆う粘土で、その主成分はベントナイト。その役割は、地下水の侵入を防止し、放射性物質の動きを抑制するとともに地層の動きに対するクッションとするもの。

これら要素の相互の関りを平面的に展開して説明する図を下に示す。



深地層処分における要素技術は以上のようなものであるが、次に高レベル放射性廃棄物の実際の量や数量などの規模についても知ることができた。

現在、原子力発電所などで保管されている 19,000 トン以上の使用済燃料を今後リサイクルすると、すでにリサイクルされた分も合わせて、約 27,000 本のガラス固化体（キャニスター）の本数になるという。

さらに現在の原子力発電所の稼働を想定すると、試算では 40,000 本以上の地層処分の規模となる。これだけの量を処分する地下に構築される地下施設の面積は約 $3\text{km} \times 3\text{km}$ となる。これをわかりやすく表現すると、羽田空港の一つくらいの面積になるという（下図参照）。

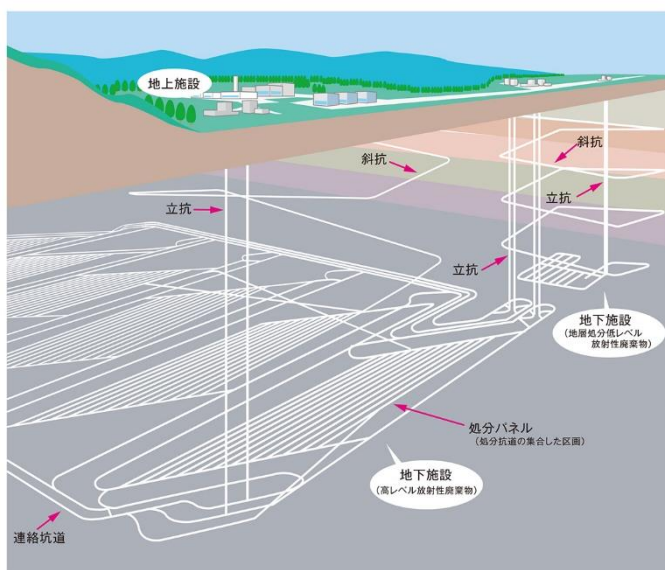
高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念図

地層処分施設のレイアウト例

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分施設を併置した例

仕様の一例（結晶質岩、深度1,000mの場合）

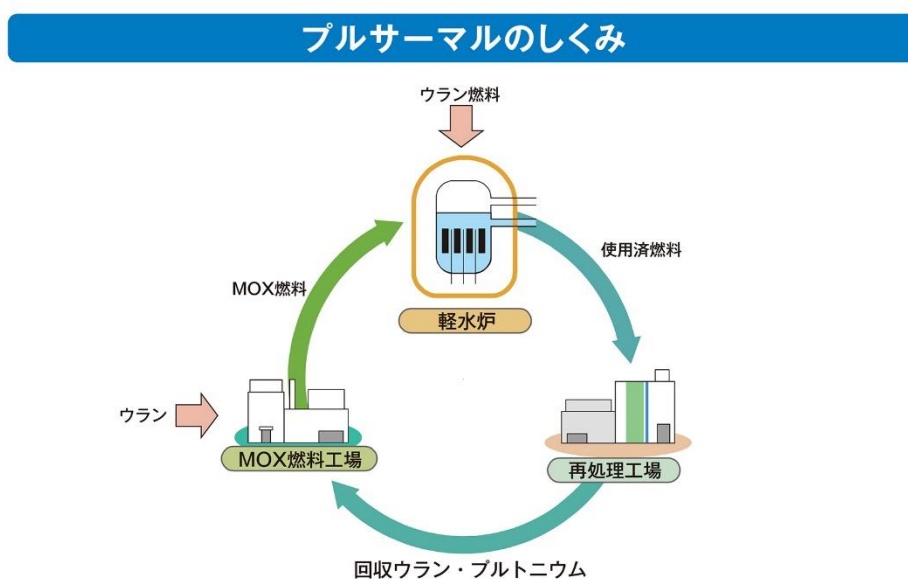
地上施設	敷地面積1~2km ²
高レベル放射性廃棄物の地下施設	大きさ（平面） 約3km×約2km
地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設	大きさ（平面） 約0.5km×約0.3km



4.4 プルサーマルによる対策

(1) プルサーマル方式

プルサーマル方式（PWR: Pressurized Water Reactor）は、原子炉で使用する燃料の中に含まれるプルトニウムを再利用する方法の一つである。通常、原子炉で 사용되는ウラン燃料の中で、一部が中性子の吸収によってプルトニウム 239（Pu-239）に変換される。プルサーマルでは、この使用済燃料から取り出されたプルトニウムを再利用し、新しい燃料（MOX 燃料）として原子炉に投入するプロセスをいう。下図が、その概要である。



(注) プルサーマル：軽水炉でMOX燃料を使用すること

7-5-1

原子力・エネルギー図面集

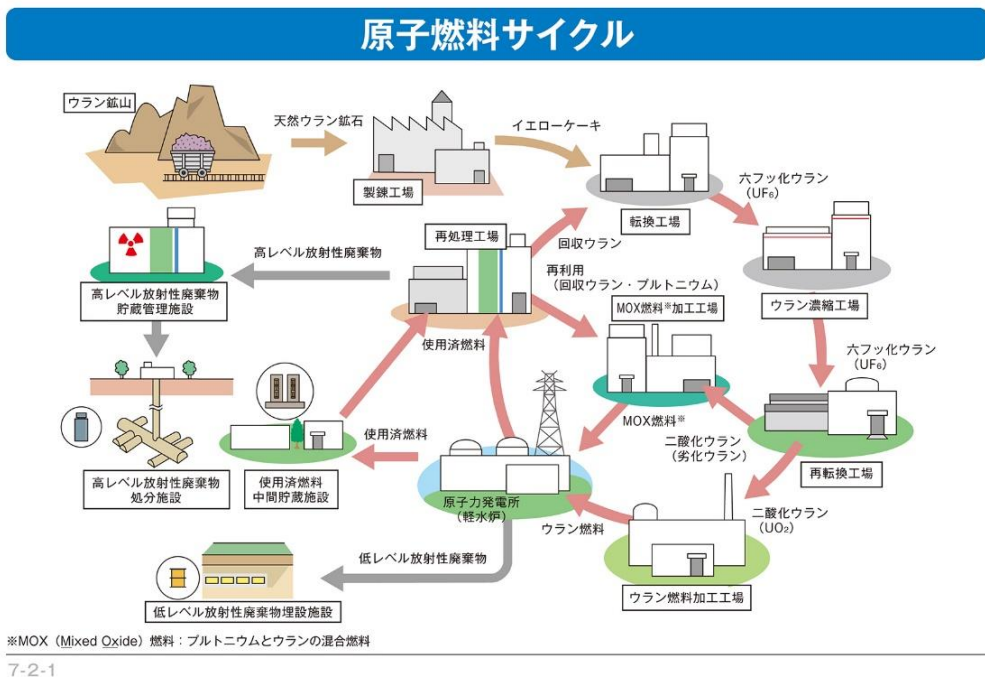
出典：原子力・エネルギー図面集

以下が、プルサーマルの概要と放射性廃棄物との関係で

ある。

- ・プルサーマルの概要：使用済みのウラン燃料からプルトニウムが取り出され、次に、取り出されたプルトニウムは、新しい燃料に混ぜられる。この混合燃料（MOX 燃料）が再び原子炉に投入され、プルトニウムが核分裂を起こし、エネルギーを生み出す。

- ・放射性廃棄物との関係：プルサーマルを実施することで、プルトニウムを再利用し、原子燃料（核燃料）の資源を有効活用できるという。しかし、原子燃料（核燃料）サイクルにおいても最終的には使用済燃料が発生する。使用済燃料は、依然として長寿命放射性物質を含む放射性廃棄物として扱われることになる。



原子力・エネルギー図面集

出典：原子力・エネルギー図面集

(2) プルサーマルにおけるプルトニウムの利用

プルサーマル方式におけるプルトニウム (Pu) の利用について述べると、プルトニウムは通常、中性子の吸収によって発生する核分裂反応によって生成される。これは核燃料サイクルの一環として利用されることがある。以下に、その各段階について小括する。

- ・ウランの燃焼：最初に、原子炉でウラン燃料が使用される。ウラン（核分裂しにくいウラン 238 (^{238}U)) は中性子の吸収によってプルトニウム 239 (^{239}Pu) に変換される。 ^{239}Pu は、原子燃料として利用できるもので、これが原子燃料サイクルの再処理で回収することができる。

- ・プルトニウムの分離：使用済燃料からプルトニウムを回収するために、再処理プラントで燃料を分解し、化学的な処理によりプルトニウムを取り出す。

- ・プルトニウムの再利用：回収されたプルトニウムは、再度燃料として使用することができる。これにより、新たな原子燃料が生産され、ウラン鉱石などの天然資源の採掘を減少させるために、この再利用が行われている。

- ・核分裂反応：プルトニウムが再び原子炉で使用されると、中性子の吸収によって新たなエネルギーが生成される。これにより、発電プロセスが継続する。

これにより、プルサーマル方式ではウランだけでなくプルトニウムも燃料として利用することで、エネルギーの効率を向上させることが可能となる。ただし、プルトニウムの利用には安全性や核拡散の懸念が伴うため、適切な管理や国際的な規制が必要でとなることは勿論である。

§ 5 オルタナティブ

5.1 代替の可能性（エネルギー）

現在の主流のエネルギー源（主に化石燃料）に代わるエネルギー源に関する選択肢や代替手段を意味づける「オルタナティブ (Alternative)」が、しばしば用いられている。すなわち、オルタナティブなエネルギー源が、持続可能性、環境への影響の軽減、気候変動の対策などの観点から求められている。

化石燃料、具体的には石油や石炭、あるいは天然ガスを燃料とする火力発電によるエネルギー源（一般には電気）に対するオルタナティブを対象とする話題を以下に述べる。

(1) 再生可能エネルギー

- ・太陽光エネルギー：太陽光を利用して発電する太陽光発電である。ほかに、太陽熱を利用して発電する方法もある。
- ・風力エネルギー：風力発電は風の力を利用して発電する。陸上のほか海上での利用が注目されている。
- ・水力エネルギー：水の流れを利用する水力発電が一般的であり、ほかに潮流や波力なども範疇となる。
- ・地熱エネルギー：地球の地熱を利用して発電する地熱発電である。
- ・バイオエネルギー：生物由来の資源を利用する方法で、生ごみやもみ殻、および木質バイオマスを燃料とする発電が一般的である。

これらのエネルギー源の利用を前提として、筆者の団体である一般社団法人洗楓座は設立された背景があり、その名前にはこれら 5 つの再生可能エネルギーが盛り込まれている。

(2) 持続可能な技術

オルタナティブを支援する技術を「持続可能な技術」として以下に掲げる。

- ・エネルギー効率向上：より効率的なエネルギー利用や省エネルギー技術の導入がねらいとされる。
- ・スマートグリッド：グリッドシステムを情報技術で制御し、エネルギーの分散型発電や需要応答を促進することで、再生可能エネルギーに対してならでのものである。
- ・蓄電技術：電気蓄貯技術：電気を蓄電&貯蔵し、需要が高まった時に放電&利用する技術である。
- ・水素エネルギー：再生可能エネルギーを用いて水を分解して得られる水素をエネルギー源の利用が注目されている。
- ・核融合エネルギー：核融合は、太陽のような高温・高圧の状態で軽い原子核が融合してエネルギーを生成する技術で、従来の大型の原子力発電に代わる技術として、研究開発が行われているが、安全性や廃棄物の問題がある。まだ実用化には至ってはいない技術である。

5.2 トレードオフ

これらのオルタナティブなエネルギー源は、持続可能な発展の観点からますます重要視され、研究や開発が進んで

いる。地球環境の保護や気候変動の対策を考慮して、これらのエネルギー源の導入が進むことが期待されている。

その場合においても、ある対立や抵抗があるはずで、その解決には、「トレードオフ」と呼ばれている、ある面で取捨選択が行われる。原子力発電と再生可能エネルギーは、エネルギー供給の手段として異なる特性を持っているが、それぞれの選択には利点と課題があり、トレードオフの対象（対照）となっている。

【原子力発電】

✓ 利点

- ・高出力：理想としては、原子力発電所は連続して安定した発電が可能で、大規模な電力供給ができる。
- ・低温室効果ガス排出：原子力発電は発電過程においてほとんど温室効果ガスを排出しない。

✓ 課題

- ・原発事故のリスク：原子力発電所には事故の可能性がある、事故が発生した場合には深刻な影響を与える可能性がある。
- ・放射性廃棄物：使用済燃料（放射性廃棄物）の管理と処分には課題があり、放射性廃棄物の長期間の保管が必要となる。

【再生可能エネルギー】

✓ 利点

- ・持続可能性：再生可能エネルギーは自然のエネルギー源を利用するため、無尽蔵に利用できる可能性がある。再生可能性が特徴（特長）である。

- ・低温室効果ガス排出：再生可能エネルギーの導入は一般的に温室効果ガスの排出を低減する。

- ・分散型エネルギー：太陽光発電や風力発電などは分散型のエネルギー供給を可能にし、エネルギーの自給自足や地域のエネルギー安全保障を向上させる。

✓ 課題

- ・不安定な供給：天候や時間帯に依存する再生可能エネルギー（太陽光や風力など）では、連続して安定した供給が難しいという課題がある。これに対処するための蓄電技術などの発展が求められる。

- ・用地の要件：大規模な再生可能エネルギー発電所には広大な用地が必要であり、その影響が環境や生態系に及ぶこともある。

トレードオフは、エネルギー政策や技術の発展においてバランスを取る必要がある。国や地域のエネルギーミックスは、これらのトレードオフを検討し、持続可能で安定したエネルギー供給を実現するために工夫されたものといえる。

§ 6 未来のエネルギーの選択

6.1 カーボンニュートラル

「カーボンニュートラル」とは、ある特定の活動やプロセスが排出する温室効果ガス（主に二酸化炭素など）のほか、これと同等の量の温室効果ガスを削減または吸収する手段を取ることで、その活動全体の温室効果ガス排出量をゼロにする状態を指す。

これは、地球温暖化の対策として、持続可能な環境への移行を促進するための主要な目標となっている。

以下は、カーボンニュートラルに関連するいくつかのポイントを挙げる。

- ・温室効果ガスの削減：カーボンニュートラルを達成するには、まず対象となる活動やプロセスで排出される温室効果ガスを最小限に削減する必要がある。これにはエネルギーの効率化、再生可能エネルギーの利用、省エネ対策などが含まれる。

- ・再生可能エネルギーの導入：再生可能エネルギー源（太陽光、風力、水力など）の積極的な利用が、カーボンニュートラルを達成する上での鍵といえる。これにより、化石燃料に依存することなくエネルギーを生み出すことができる。

- ・吸収手段の活用：カーボンニュートラルを達成するためには、温室効果ガスを吸収する手段も利用される。たとえば、植林や森林保全が二酸化炭素を吸収し、カーボンニュートラルの達成に寄与することになる。

- ・技術革新の導入：カーボンニュートラルを実現するため

には、新たな技術やイノベーションの導入が必要である。これには、二酸化炭素を直接捕捉する技術（CCS：Carbon Capture and Storage）や持続可能な交通手段の開発などが含まれる。

- ・カーボンオフセット：カーボンニュートラルを達成する一環として、排出されたガスに相当する量の温室効果ガスを削減プロジェクトやカーボンオフセット手段を通じて補償することができる。

企業や国がカーボンニュートラルな状態（状況）を目指すことは、気候変動の緩和のために、また持続可能な未来の構築に対する取り組みの一環として重要である。そのため、国際的な合意や枠組み（例：パリ協定）に基づき、様々な組織がカーボンニュートラルを実現するための目標を掲げて行動している。

6.2 未来のための世代間倫理

世代間倫理は、異なる世代間での道徳的な配慮や責任の問題に焦点を当てた概念である。これは、現在の世代が将来の世代に対して、環境、経済、社会的な側面で配慮を払い、責任を果たすべきであるという倫理的な原則に基づいている。以下に、世代間倫理に関連するいくつかの側面を示す。

- ・環境保護：現在の世代が環境への負荷を最小限に抑え、持続可能な開発を促進することは、将来の世代に対する責任であるといえる。気候変動、自然資源の過剰利用などに対処するために、環境に配慮した行動が求められる。

・経済的責任：現在の経済的な決定が将来の経済に影響を与えることがある。公平な経済システムの維持や貧困削減、社会的な不平等の是正などは、将来の世代に対する倫理的な配慮を反映している。

・社会的な正義：社会の構造や政策が将来の世代に対して不平等や差別を生み出さないようにすることが重要となる。公正で包括的な社会を構築し、異なる世代に対して平等な機会を提供することが求められる。

・教育と文化：知識や文化の伝承は世代を超えて継承されるべきである。教育制度や文化の保護は、将来の世代に対する投資として位置づけられる。

・技術とイノベーション：新しい技術やイノベーションの導入は、将来の社会に影響を与える可能性がある。安全性や倫理的な観点から、技術の開発と利用に対して慎重な検討が求められる。

・財政責任：財政政策や国の借金などの経済的な要素も含まれる。将来の負担を避けるために、現在の資源の効果的かつ持続可能な利用が求められる。

世代間倫理は、持続可能な発展と社会の長期的な福祉を考える上での指針となる。これには、現在の世代が自己中心的な利益追求だけでなく、将来の世代に対する責任を考慮に入れる必要があるといえる。

6.3 水素のエネルギー

水素は、エネルギーのキャリアとして注目されることが増えている。ゆえに水素のエネルギーに関する基本的な情

報を以下に掲げる。

(1) 水素の生成方法

- ・電気分解（電解）：水を電気分解することで水素と酸素を得る方法で、電気分解は再生可能エネルギー源を利用して行われると、環境に優しい方法といえる。これはグリーン水素と呼ばれることがある。
- ・天然ガスの蒸気改質：天然ガスから水素を生成する方法で、産業的に一般的である。この場合は、ブルー水素やグレー水素などともいわれることもある。

(2) 水素のエネルギー利用

- ・水素燃料電池：水素を酸素と反応させて電気と水を生成する水素燃料電池が主要な応用といえる。これはクリーンで効率的な発電手段と考えられる。
- ・水素の直接燃焼：水素を燃料として使う内燃エンジンやガスタービンを用いて、直接的にエネルギーを得ることも可能である。発電利用だけでなく、ほかの動力や動力源としての実用の道がある。

(3) 特徴と利点

- ・クリーンエネルギー：水素の燃焼や水素燃料電池では、ほぼゼロの排出物しか生成されない特長がある。
- ・エネルギー密度：重量あたりのエネルギー密度が高く、長距離の移動やエネルギー貯蔵に適している。
- ・多様な応用：交通機関、発電、産業など、様々な分野で利用が期待されている。

(4) 課題と課題への取り組み

・水素の生産におけるエネルギー消費：現行の水素の大部分は石油や天然ガスなどの化石燃料、メタノールやエタノールを原料としており、その生成時にはエネルギー消費があり、CO₂の排出を伴う。CO₂の排出しない再生可能エネルギーを利用した水素生産技術の開発が進んでいる。

・貯蔵と輸送：水素は高いエネルギー密度を持つ一方で、取り扱いが難しく爆発性もあるため、効果的な貯蔵と輸送技術の開発が求められている。

水素はエネルギーの将来において有望視されているが、課題もある。技術の進化が加速しているが、同時にインフラ整備を進めなければならない。両者は呼応して進捗することが必要である。

(5) 水素吸蔵合金

水素の貯蔵と輸送においては、水素吸蔵合金を用いる方法もある。水素吸蔵合金は、水素を物質内部に吸収して保存できる物質をいう。

特に、マグネシウムとの水素吸蔵反応は注目されている。マグネシウムに水素を吸蔵すると、常温で大気圧の下で貯蔵と輸送ができる。具体的には、マグネシウムと水素は反応して MgH_2 (マグネシウムハイドライド) を形成する。この反応は通常、高温と高圧で進行するが、特定の触媒や添加物を用いることで、相対的に穏やかな条件で反応が進む。

この特性を利用して、水素を吸蔵したマグネシウムハイドライドが水素の貯蔵や輸送に使用されている。マグネシウムハイドライドは比較的安定しており、水素を必要なときに放出できるため、効果的な水素の吸蔵材料となる。

いま実用化に向けた技術の開発が進行中で、水素吸蔵合金を含む新しい技術の進展は、水素の貯蔵と輸送の課題への取り組みの一環として注目をされている。筆者の関りにおいても、あるメーカーと一体となって、高校生など将来世代への普及を進めている。

- ・課題は価格：水素技術全般において価格は大きな課題の一つである。水素の製造、貯蔵、輸送、そして使用にはそれぞれコストがかかり、これが水素エネルギーの普及を制約している。

以下に、価格に関する主な課題点をいくつか挙げよう。

- ・製造コスト：現行の水素の製造方法の多くはエネルギー集約的で、特に再生可能エネルギーを利用した電気分解法でも高いコストがかかる。新しい製造技術の開発やエネルギー効率の向上が求められている。

- ・貯蔵コスト：水素の貯蔵に使用される材料や技術、例えば吸蔵合金や高圧容器などはコストが高いことがあり、また貯蔵技術の進化やコスト削減が重要である。

- ・輸送コスト：水素の輸送も、高い圧力や低温の条件下で行われることがあり、これには特殊な設備とエネルギーが必要である。輸送インフラの整備や効率向上が求められている。

- ・水素関連技術のスケール効果：現在の水素関連技術はまだスケールが小さく、大量生産によるコスト削減が限定的であるといえる。技術の普及と産業スケールの拡大が進むことで、価格競争力が向上することが期待される。

これらの課題への対処として、研究開発や技術革新、政

策のサポートなどが進められている。将来的にはこれらの努力により、水素エネルギーがより経済的で持続可能な選択肢となることが期待されるのである。



§ 7 おわりに

エネルギーという意味は、仕事や作業を行う能力、すなわち働く源ということでもある。それは、人間の「労働」と直結した意味で、当初においては労働は筋力 (Muscle) を使ってなされた。筋力を活かすことが、働くことすなわち労働であった。そのために、つらい労働から人間が解放されるべく働く源である「エネルギー」が求められた。

筋力に代わるエネルギーの開発と効率化が、主眼として今日まで、エネルギーの獲得の歴史であった。またエネルギーの獲得のために戦争を起こしたりした。原子力発電も大規模・大出力・高効率を謳い言葉として進められてきた。そして「夢のエネルギー」として迎えられた。しかし、それには大きな落とし穴があった。

気が付けば、放射能の危険性であり、また高レベルの放射性廃棄物との係わりであった。しかもそれは、原子力発電を利用している世代との係わりではなく、むしろ何十何百世代へもの保全管理という厄介な責務を遺産としなければならないものであった。



すると、エネルギーの利用について再考しなければならない。エネルギーの枯渇や炭酸ガス (CO₂) の増加、地球温暖化という悪害の顕在化も含めてエネルギー利用も見直しが必要になった。こうした視点に立つと、エネルギーに求められるもの、そしてそれを考える際には、つぎの三つの要件が重要となる。

すなわち、

売上げではない経済性
環境重視の精神性
そのための管理運営

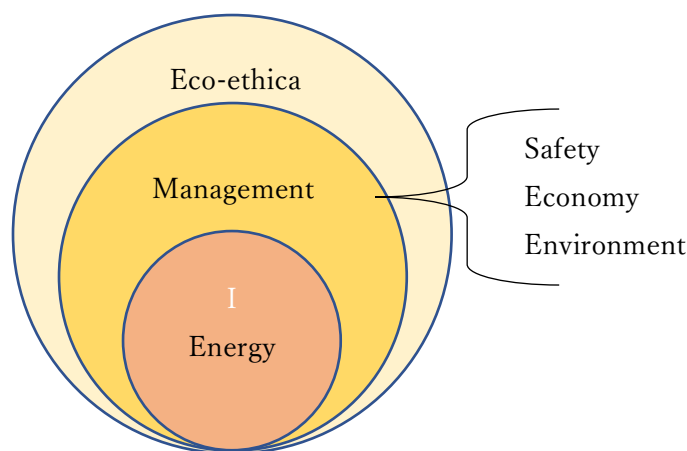
である。

それを、三つの M として言い表せば、

Money < Mind & Management
マネーから脱する精神性とその管理

である。

以上の指摘は、身近には国連が広める SDGs（持続的な開発目標）に叶うことでもあるが、むしろエコエティカ（eco-ethica）、すなわち生圏倫理学との関りが強い。これを入れて、重層的に図示表現すれば下図のようになる。



未来のエネルギーの構築

エネルギーは、環境と経済と安全について管理され、組織と集団の倫理学としてのエコエティカがその全体をカバーするのが適当である。エコエティカでは、持続可能性も、安全を保証するものである。科学技術の進展した社会は、もはやそれ自体が環境として存在し、科学技術抜きには生きることができない。しかし、科学技術の適用が現世代ばかりか次世代に負担を与えあるいは遺してはならない。



筆者は、技術とは、「経験を通して獲得した対象行動への優れた適応力」とであると、定義している。これは、技術とは、時間をかけても目的とする対象についての行動（すなわちアクション）を、経験や科学や思考（哲学）によって、得られる最良の方法で対策して課題を解決し乗り越えるメソッドを見出し提案し遂行する能力である。

高レベル放射性廃棄物という厄介なものを、エネルギー獲得への欲求からつくり（創り、作り、造り）出してしまった人類は、特に日本人は、その解決のための対象行動として、過去の経験を活かし未来に禍根を残さないために、現在取るべき方法を見出すことを求めなければならない。それが付け焼刃でないためには、優れた適応力としなければならない。

本ノートの第4章「4.3 高レベル放射性廃棄物処分」
(3) 幌延深地層研究センターにおいては、同センターを見学して得た情報、同時にインターネットで得たほかの情報について述べた。

それから得た重要な視点は、300m以上の深地層の場所を地元の自治体および住民の理解を得て、原子力発電所を運転して生成された「高レベル放射性廃棄物」を放射能が減衰するまでの長年にわたって保全しなければならないという責務を課せられてしまったということである。

この現実には、如何に対応すべきかに対する答えを、現世代を生きる私たちが出さなければならない。その一端を原子力発電環境整備機構（NUMO）や日本原子力研究開発機構（JAEA）が行っているということであった。



実は、その答えを出すのが、これまでにこの責務をつくった前世代の関係者は、もはや個人としてはこの世には存在しない。ゆえにいま（現世）の時代を生きている私たちが代わりになさなければならない。例えば 1 万年という年月を、100 年を一世代としても、 $10^4 / 10^2 = 10^2$ であり、100 世代に亘って止めることなく継続してバトンを渡し続けなければならないということである。

現世代からいえば、1 つ前の世代から渡されたバトンをいま次の世代に渡すべく廃棄物の処分技術（すなわち、これまでの経験を通して獲得した高レベル放射性廃棄物を管理保全するという対象行動への優れた適応力）を見出さなければならない。見学会でも話題になったが、現世代のその技術が、次や次々世代の人々によって新たな処分技術が獲得されたら掘り返しても、その当該技術に転換することも想定するのであるという。

このことは、代々の世代に、飽くなき対策という責務を課すことであり、望ましいことではない。前述した「世代

間倫理」からも合致しない。厄介なバトンを渡されたが、できれば、そうした迷惑を新たにつくらないための選択と遂行をしなければならないだろう。



身近な先祖の慣わし（習わし）からすれば、先祖の霊と遺骨を守ると同じに、自身の霊と遺骨を以降の子孫に伝えるかどうかと同じで、《終活》に対して考えることと同じであり、それは遂行ということでは《永代供養》と解釈すると理解しやすいだろう。この《終活》と《永代供養》にもお金と場所と管理者が必要である。

遺骨は長くても数世代で土に還ったり海川に消えるのであるが、放射能を帯びた遺骨（ある面ではうんち）は、とても厄介な遺産であると気が付いた。NUMO や JAEA の見出した「技術」は、State of the Art には合致するのではあるだろうが、三つの M とエコエティカの視点からは議論されるべき大きな課題を提供しているといえる。それは、また別の機会に考えを述べたい。



おわりに、以上のように、新たな視点をつくり出す機会を与えていただいた一般財団法人日本原子力文化財団、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）、原子力発電環境整備機構（NUMO）の方々に謝意を申し上げる。