

### 巻頭言

#### 1 落語絵本「発電お好み焼き横丁」 楽しく学べるエネルギー教育

山野元気

### 時論

#### 2 コロナが世界を変えつつある

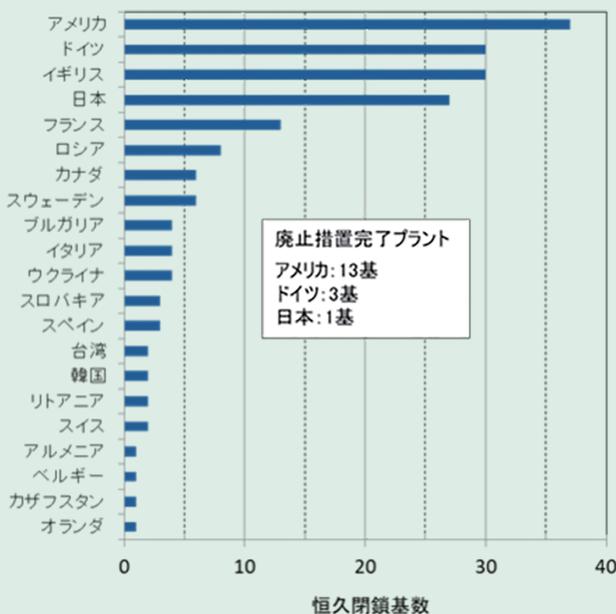
佐田 務

### 解説

#### 9 米国における廃止措置シーン —進化する廃止措置ビジネス形態—

世界ではこれまで187基が閉鎖し、17基が廃止措置を完了した。ここでは廃止措置をめぐる概況と、世界をリードする米国の状況、そして同国のライセンス移転方式の発展について述べる。

澁谷 進



各国の恒久閉鎖プラント基数  
(2020年2月末現在)

### 連載講座 よくわかる PRA

#### —うまくリスクを为了能に (2)—

#### 25 リスクと不確かさ

PRA から得られる知見などリスク情報は有用だが、不確かさの問題が付きまとう。リスク情報の活用における不確かさがもたらす課題について安全目標との関わりも含め述べる。

牟田 仁, 糸井達哉

### 15 Column

#### 映画『Fukushima 50』をどう受けとめるか

井内千穂

環境問題にとっての「未来」とは  
原子力発電所を国際間でシェア

小澤杏子

—クロアチアの原子力事情  
大学進路ミスマッチ予防策

妹尾優希

人としてできること

鳥居千智

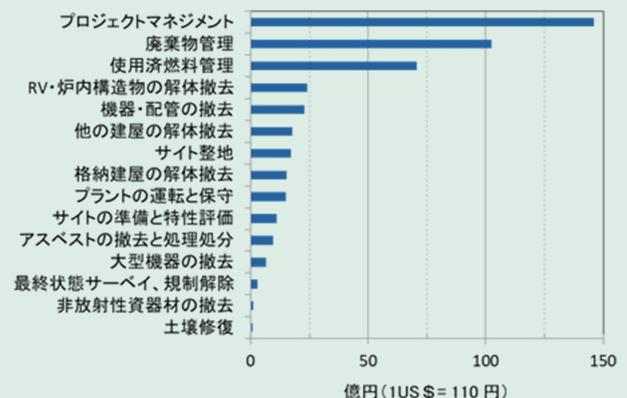
感謝をこめてもてなす「復興五輪」

服部杏菜

服部美咲

#### 廃止措置の方式 (戦略)

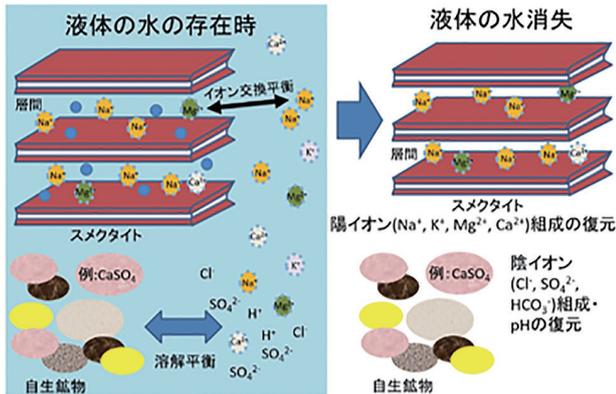
日本 原子力委員会	IAEA 技術レポート TRS446	米国 規制ガイド RG.1.184	概要
即時解体	Immediate Dismantling	DECON	運転終了後、直ちに除染や解体に着手
遅延解体 (安全貯蔵 ・解体)	Deferred Dismantling (Safe Enclosure)	SAFSTOR	一定期間の安全貯蔵後、除染や解体に着手。日本の標準工程では、安全貯蔵期間~10年
原位置埋設 (遮へい隔離)	Entombment	ENTOMB	放射化機器構造物等を遮へい、恒久的に、または解放基準まで隔離 (米国での実施例あり*)



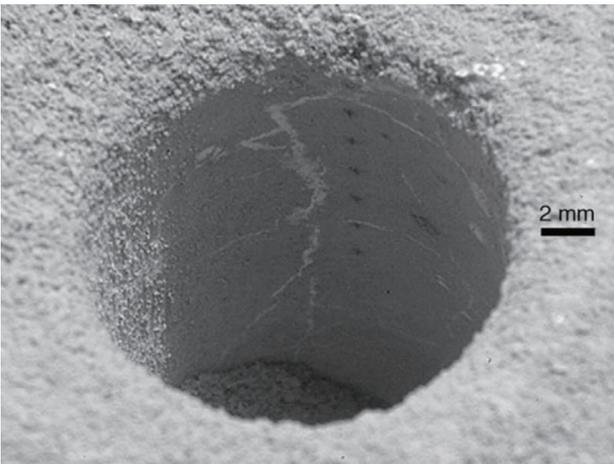
廃止措置費用の項目別見積もり

## 18 火星は生命の誕生と生存に適した環境だった

火星クレータ内部にかつて存在した巨大湖の湖底にたまった堆積物の探査データを解析し、塩分やpHといった火星の水質が生命の生存に適したものであることを明らかにした。 福士圭介, 関根康人



放射性廃棄物の地層処分分野で開発された  
スメクタイトの層間組成を利用した水質復元法



火星の Yellowknife Bay 層 John Klein 掘削サイトの掘削孔  
(©NASA: ID.0270MH0002540050102794C00)

## 談話室

### 40 リケジヨの思い (11) —ここから始めよう

口町和香

## 理事会だより

### 43 新型コロナウイルス禍に思う

佐治悦郎

## 4 NEWS

- 経産省, 産業技術ビジョンまとめる
- 原燃の再処理工場は新規制基準に適合
- 東北大学で次世代放射光施設着工
- 海外ニュース

## 報告

### 29 可逆性を担保する回収可能性に関する技術的対応と性能評価に向けた工学技術の役割—(2)より確からしい性能評価に向けた工学技術の役割

昨年12月に原環センターが開催した研究発表会で、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する標題に係る研究成果が紹介された。第2回目の本稿では、後者の内容について報告する。 江守 稔

### 35 OJE を用いた原子力規制教育の取組み

大阪大学では On the Job Education を用いた原子力規制教育に取り組んでいる。現場で発生している様々な問題を、教員と学生が一緒になって解決する演習だ。これにより原子力産業全体を俯瞰し、原子力安全をより深く考察できる人材育成をめざしている。

北田孝典, 竹田 敏, 中村隆夫

## 視点 社会を語る (10)

### 41 質問紙調査の魅力と落とし穴

齋藤圭介

## ジャーナリストの視点

### 42 福島事故と新型コロナ禍

矢野寿彦

34 From Editors

44 会報 原子力関係会議案内, 新入会一覧, 英文論文誌 (Vol.57, No.7) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

後付 第10回総会資料

# 落語絵本「発電お好み焼き横丁」～楽しく学べるエネルギー教育～

## 巻頭言



八尾市立曙川小学校 主幹教諭

**山野 元気** (やまの・げんき)

公立小学校初のクラウドファンディングの実施や人が乗れるソーラーカーの作製など「あきらめなければ夢は叶う」を合言葉に、学校・地域で協力してエネルギー教育に取り組む。社会人落語選手権に出場するなど落語の腕前も折り紙つきの現役小学校教諭。

日本のエネルギー問題を、誰でも楽しくわかりやすく学べることをめざして創作した落語絵本「発電お好み焼き横丁」。電気をお好み焼きに例え、親子二人が「火力焼き」「水力焼き」「原子力焼き」など、さまざまなお好み焼き屋を巡っていく。実際のデータを基に、発電量はお好み焼きの大きさ、発電コストはお好み焼きの値段などに反映させ、各発電の特徴を楽しみながら学べるものとなっている。火力焼きは自由自在に焼けるが、1枚1,500円とコストが高く、空気を悪くする。太陽光焼きは自分で焼けば買い取ってくれるが、太陽が陰るとお店も止まってしまう。原子力焼きは1番大きくて空気も汚さず24時間営業だが、ゴミ問題がある。このような各発電の特徴を学びながら、最後に「エネルギーミックスマダン焼き」を選ぶという落ちで、発電を組み合わせる重要性にも気づくことができる絵本である。

本校は平成28年度にエネルギー教育モデル校に認定され、現在5年目を迎える。取り組み始めたときは本校の3割以上の児童が「エネルギーがなくなってもなんとかなる」と考えていたが、学習を進めていくと「未来は自分たちで創っていかなくてはならない」と真剣に考える児童が増えていった。また職員も「日本のエネルギー問題は国民全員が知らなければならない重要な問題」と口をそろえて言うようになった。そこで、たくさんの人にエネルギー問題を知ってもらうために、落語「発電お好み焼き横丁」を創作した。気をつけたことは、エネルギー問題を考えるきっかけになるように「楽しく、わかりやすい内容」にすること、そして「各発電の特徴を正しく伝えること」であった。

絵本化に至るまでのきっかけは、他校の児童への落語の出前授業であった。初めてエネルギー教育に触れた児童にも落語の実演は好評で「家族と一緒に未来のエネルギーを考えていきたい」などエネルギーの視点で将来を考えることができた。しかし、参観した教師からは「山野先生にしかできない授業」と言われ、出前授業だけでエネルギー教育を広めていくことに限界を感じた。そこで、誰でもできるエネルギー教育をめざし、落語絵本の作成に至った。作成を進める中で困難もあったが多くの方々の協力で絵本は無事に完成し、一人でも多くの方に読んでもらえるようにデジタルデータでの無料配信をすることもできた。読者からは、絵本に登場する親子のように「大人でも楽しく学べた」や「子どもと一緒に考えることができた」などの感想をたくさんいただいた。

私はエネルギー教育に携わるまでは算数教育を専門に研究を続けてきた。数学は民主制が始まったアテネで「数学には弁論にはない確実性がある」とプラトンが唱え、国民の判断能力を高めるために教育に導入したと言われている。そして現在、OECD(経済協力開発機構)の数学的リテラシーにおいても「思慮深い市民としてきちんとした根拠に基づいて判断ができる力」が求められている。時代が変わっても、国民の判断能力を高めることは国家にとって重要な課題である。この絵本がきっかけで、日本のエネルギー問題についても、根拠に基づいて判断ができる人が一人でも増えてくれることを願う。絵本のダウンロードはiブックから「発電お好み焼き横丁」または <https://www.sisin-wizard.jp/okonomiyaki-street> で検索。

(2020年4月7日記)



## コロナが世界を変えつつある

佐田 務 (さた・つとむ)

日本原子力学会誌「ATOMOS」編集長

新型コロナウイルスの感染拡大が、世界を変えようとしている。世界はどのように変わりつつあるのか。これからどうなるのか。

### I. 見直し迫られるグローバル化

コロナ対応で世界各国は、厳しい人的移動制限を打ち出した。それは経済活動を停滞させ、これからの世界的で本格的な不況を予感させる。同時に失業率が上昇し、格差の拡大と社会不安の増大、そして国家財政の悪化をももたらす。

国際協業の下で需給の最適化と効率化を極限まで突きつめてきたモノやサービスの供給網が、コロナ禍によって部分的に寸断された。その結果、国内回帰や保護主義、自国第一主義という言葉がしばしば見かけられるようになった。

グローバル化はヒトや資源、資本、情報の「移動」や「交流」、 「拡大」を根幹とする。ここにきて私たちは、それらの仲間「ウイルス」が入ってきた(正確に言えばもともといた)ことを思い知らされた。コロナ禍が長期化し本格化すればヒトの移動抑制が恒常化し、資源や資本のふるまいにも影響を与える。それはグローバル化の見直しを必然的に迫る。

また、都市封鎖やそれに準じた措置がとられることは一時的にせよ、政府や自治体が強権的な力をもつことになる。それは利他的であれ、国家が企業活動より圧倒的な優位に立ったことを意味する。さらにこうした強権的な力は、場合によっては民主主義を抑え込む可能性をもつ。中国での強引な都市封鎖は従来からの国家による強権の発動だが、ハンガリーではコロナ対応を機に首相が非常事態宣言の無期限延長の権限を得た。危機時に必要となる強制力は時として恒常化する可能性があり、それは民主主義が成熟していない国々においては今後の大きな懸念を生じさせる。

さらに途上国には、もともと医療体制が脆弱な国々が多い。そこでもし感染が拡大すれば、先進国での医療崩壊の比ではない。場合によってはそれらの国々は存亡の危機をも招きかねない。そのことによって既存の国家権力の空白、あるいはそれを埋める今とは異なる別の秩序や無秩序や混沌が到来する可能性がある。

### II. コロナを経て変わる社会

コロナ禍は市民生活や市民の意識にも変化を与えつつある。生産現場ではロボット化と遠隔化が加速し、教育や医療分野でも遠隔サービスが進行中だ。テレワークが広くビルトインされれば、企業人が住む場所の変化をもたらし、脱都会を進展させる可能性をもつ。そして人と交流するということが基本となっていた生活習慣の相当の部分が、ネットを介したものとシフトし、コミュニケーションのかなりの部分に変容する。

これらを前提とした社会のしくみが構築されれば、ネット環境やデジタル化に適応できない業態や企業、そして個人は、不本意な転換あるいは不遇をかこつことになる。

### III. リスクと対峙する運命共同体としての世界

今は世界中の多くの人びとが、新型コロナに対する不安を共有している。その不安が株価の乱高下や買い占めや流言流布、あるいは分断や他者への猜疑心といった影響を与え続けている。

けれども一方では、こんな時だからこそ、みんなとともにコロナ禍に立ち向かおうという気運も見られる。さまざまなキャンペーンが自発的に繰り広げられ、メディアはそうした美談をしばしば報じる。これは東日本大震災直後にも見られたことだ。被災下にある成員が互いを支援し利他的に行動しようという高揚感が高まるこのような現象を、災害社会学では「災害ユートピア」という。

この現象は今回の場合、世界的にみられる。言い換えるならば世界全体が、いやがおうでも同じリスクと対峙せざるを得ない運命共同体であるとの認識を実感させられたともいえる。そこには、国家を超える連帯が生じる可能性も感じられる。

### IV. エネ需要減は送電網の不安定化を招く

エネルギー問題に話を転じよう。

国際エネルギー機関(IEA)は4月30日に公表した報告で、2020年の世界のエネルギー需要が前年比6%減となると推計した。この報告では、この120年間のエネルギー需要の推移の推計が記載されている。

<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/global-energy-and-co2-emissions-in-2020#abstract>

これを見ると、今回の6%という減少幅は1919~21年のスペイン風邪(最大16%減)、1945年の第二次世界大戦(13%減)、1932年の大恐慌(9.5%減)に次ぐものだ。それはリーマンショックや石油危機の比ではないレベルとなっている。

また、IEA報告ではエネルギー需要減に伴って、2020年の電力需要は前年比5%減になると見込む。エネルギー源別では石油が同9.1%減と激減する予想だ。この予想を待つことなく、原油価格はすでに大幅に低下した。また、運転コストが相対的に高い石炭(前年比7.7%減)、天然ガス(同5%減)が大きく落ち込み、運転コストが安い原子力は同2.5%減と小幅の減少、再生可能エネルギーは同0.8%増になると予測している。

しかし火力が減少し、相対的に再生可能エネルギーの割合が急激に増えることは、電力需給にとって懸念材料である。再生可能エネルギーが現状のまま主力電源となれば、火力などはその変動分に対してより先鋭的な負荷追従を迫られる。さらに石油や天然ガスの価格の低下は関連施設の操業停止や閉鎖と、新規投資意欲の低下を招く可能性があり、それはバックアップ能力の構造的な脆弱性をもたらす。

IEAのビロル事務局長は3月22日に「停電は需要増大時ではなくむしろ需要減少時に起こりやすい」と指摘したが、それはこうした理由によるものだ。同氏はさらに、「政策立案者に対しては極端な条件下でも柔軟性をもった電源の重要性を評価する」よう求めている。

政府はコロナ対応で移動制限など、企業や市民の活動に強く介入した。現時点での再生可能エネルギーへの急激な依存率の上昇は、送電網の不安定化と脆弱性をもたらす。エネルギー政策においても場合によっては、政府が市場原理に委ねている部分に介入する必要があるのかもしれない。

## V. 対応迫られる電力会社やアカデミア

エネルギーや原子力業界、そしてアカデミアも、コロナ対応やデジタル化への適応をより迫られている。原子力業界ではコロナ以前からAIやIoTなどによるデジタル化が相応に進められてきた。発電所での安定運転や系統運用面での効率化、事故防止システムなどへの応用などがそれである。

さらにコロナ対応では、発電所運用に携わる職員の感染防止や拡大といった追加的な対策が求められている。IAEAは4月9日にCOVID-19危機時における原子力施設要員の対策の知見を共有する取り組みを強化し、危機時における制御室要員との通信代替手段の確保や要員の現場居住、作業エリアの滅菌、特定の保護具の用意、職員の勤務時間のシフトなどさまざまな対策を呼びかけ

た。

国内の電力各社も対策を強化した。テレワークやオンライン会議はもちろんのこと、発電所においては中央制御室への入室規制や職員の活動スペースの分離・隔離、専用宿泊場所の確保、感染者が発生した場合に備えた代替要員や代替フロアの準備などを進めている。

また、コロナ禍にともなって原子力学会をはじめ多くの学会が従来方式の会合を中止したが、いち早くこれに対応した学会もあった。情報処理学会や電子情報通信学会、日本データベース学会、日本教育工学会は今春開催の全国大会を急ぎょオンライン会議に切り替え、機械学会や米国原子力学会(ANS)は今後の大会をオンラインで開催することにした。さらに日本リスク学会はHP上に新型コロナウイルス感染症リスク特設サイト

(<http://www.sra-japan.jp/2019-ncov/>)を設け、ウイルス除染ガイダンスやリスク用語ガイダンス、ケアコミュニケーション、会員による情報提供・提言、議論の場を設けた。

## VI. 1F事故とコロナ危機

かつての私たちは、ペストやスペイン風邪におののき、災禍の前にはなすすべもなかった。けれどもコロナに立ちむかう今の社会には、医学をはじめとした科学技術がある。それによってコロナ禍は、いつかは相応の収束を迎えよう。

一方で原子力業界や原子力学会は福島原発事故を経験したことで多くの反省を学び、教訓を得た。また、今のコロナ危機に関する政府や自治体の対応、アカデミアを含めた情報発信の適切性、真偽織り交ざったSNSによる情報流通、感染者に対する差別、風評被害などのテーマは、福島原発事故後と同様の事象を想起させる。これらのクライシスマネジメント、リスクマネジメント、ケアコミュニケーション、オールハザードアプローチあるいはレジリエンスについては、原子力業界においても一定の知見をもつ。

これらの経験と教訓を共有、活用し、今のコロナ対応あるいは将来の危機時対応に貢献できる可能性はないだろうか。具体的に言うならば、私たち原子力に関わる者は、こうした危機時に生じがちな情報の錯綜、最前線に立つ自治体担当者や医療従事者に対するケア、差別や風評被害、分断や人心の荒廃を少しでも和らげることに何かしらの貢献ができないだろうか。

また、先に「世界全体がリスクと対峙せざるを得ない運命共同体であるとの認識を実感させられた」と書いた。であるならばこうした知見の共有や活用について、分野や国境を越えて連携することはできないだろうか。

(2020年5月11日記)

# 米国における廃止措置シーン

## 進化する廃止措置ビジネス形態

原子力バックエンド推進センター 澁谷 進

米国における半世紀に及ぶ廃止措置の経験は、廃止措置の世界に斬新な手法を生み出した。発電という収益事業から支出のみの廃止措置業務への移行において、事業の管理形態はもちろんのこと作業環境の変容が生むリスクや廃棄物対策に向き合い、廃止措置を「安全に早く安く」仕上げるというチャレンジングな課題に、産業界と規制当局が連携して取り組んできている。近年、民間企業が電気事業者からライセンスを譲り受け、廃止措置を請負ではなく自らの事業として展開する事業形態が開発され、最近に至り、使用済燃料やプラントリソースをも取得する革新的な形態へと進化している。

**KEYWORDS:** *Decommissioning Business, License Stewardship Model, Plant Ownership Model, Prompt Decommissioning, License Transfer, Decommissioning Trusts, Spent Fuel Management*

### I. はじめに

柔軟で前向きな米国の規制の枠組みにより、原子力発電プラントの廃止措置において前例のない革新が可能になっている。これら革新の海外の廃止措置プロジェクトでの展開には、各国における規制制度の研究と開発が重要な役割を果たす、とする論文<sup>1)</sup>が、米国の原子力学会(ANS)の Nuclear News に掲載された。廃止措置作業を請け負う究極の形態ともいえる、原子力関係のライセンスの移転を伴う、ライセンススチュワードシップ方式およびその発展形であるプラントオーナーシップ方式がそれである(以下、両者をライセンス移転方式と呼ぶ)。

海外市場として注目されているのは、ドイツを中心とした欧州および日本を中心とした東アジアであるが、本稿では紙幅の関係もあり言及しない。

これらの方式が成立するポイントは、ライセンス移転にあるのは言うまでもないであろう。米国におけるライセンス移転の要件は原子力法に求められ、原子力規制委員会(NRC)は1999年にスリーマイルアイランド1号機(TMI-1)のライセンス移転を伴う売買を承認して以来、数多くの運転ライセンスの移転申請を審査してきた。

この間、ライセンス移転に係わる連邦規則およびNRC ガイドラインの開発と整備が精力的に進められてき

*Decommissioning scene in the United States ; Innovation in decommissioning business model : Susumu Shibuya.*

(2020年3月30日 受理)

た。NRCは、これらのツールを武器に、原子力発電プラントの運転経験を持たない企業が関与するライセンス移転に対して、厳正かつ確に対処することが可能であった。

ザイオン1, 2号機を最初のケースとし、バーモントヤンキーをさらなる進化ケースとして、NRCはこれらのライセンス移転を1年半程の期間で審査し承認している。

本解説では、米国におけるライセンス移転方式の発展がテーマであるが、その理解の前提となる世界的な廃止措置の状況や米国の原子力事情についても概観する。

### II. 廃止措置を巡る世界状況

#### 1. 世界および米国におけるプラント閉鎖の状況

これまで世界で建設、運転されてきた原子力発電プラントは600基以上に及ぶが、2020年2月末時点で187基が恒久閉鎖し(図1)、このうち廃止措置が完了したプラントは、日本の動力試験炉JPDRを含め17基である。

米国についてみると、エルクリバー(BWR:1962年~1968年運転)、 SHIPPINGPORT(PWR:1957年~1982年運転)、共にプロトタイプで、前者は1971年から1974年に、後者は1985年から1989年にかけて廃止措置、が嚆矢となり、以来37プラントが閉鎖され、廃止措置が完了(ライセンス終了)したのは13基である。手探り状態で始めた廃止措置であるが、半世紀に及ぶ経験を重ねる中で、安全かつ円滑、合理的に(安全に早く安く)廃止

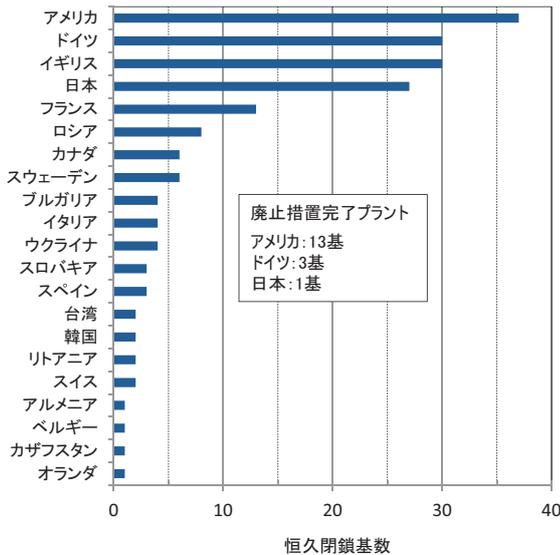


図1 各国の恒久閉鎖プラント基数(2020年2月末現在)

表1 米国における原子力発電プラントの動静

運転終了した/するプラント		運転終了を撤回/回避したプラント	
プラント	運転終了	プラント	運転終了(発表時)
Fort Calhoun	2016.10.24	James A. FitzPatrick	2017.01.27
Oyster Creek	2018.09.17	GINNA	2017以降
Pilgrim	2019.05.31	Nine Mile Point-1, 2	2017以降
TMI-1	2019.09.19	Clinton	2017.06.01
Indian Point-2, 3	2020.04.30	Quad Cities-1, 2	2018.06.01
Duane Arnold-3	2020 (回避も視野)	Hope Creek	~2020
		Salem-1, 2	~2020
Palisades	2022	Davis-Besse	2020
Diablo Canyon-1, 2	2024.11.02	Perry	2021
		Beaver Valley-1, 2	2021
		Millstone-2, 3	2023年以降

措置を進めるために必要な技術開発や関連する制度の整備が不断なく進められてきた。

米国における原子力の存廃を巡っては、2000年前後より情勢がダイナミックに動いている。当時、温暖化防止への貢献が期待され、運転延長を選択するプラントが増加したが、その後、安価な化石燃料電力による経済的な圧迫などにより、2013年ごろから早期に運転を終了し、廃止措置へ移行するプラントが相次いだ。一方で、原子力発電の無炭素電力、雇用確保、地域経済への貢献などが再評価され、州法による補助金制度を受け、恒久閉鎖を撤回あるいは回避するケースも出てきている。

最近の原子力発電プラントの動静を表1にまとめた。

## 2. 廃止措置の方式と制度、仕組み

廃止措置の方式(戦略)は、表2に示す3方式に大別される。このうち原位置埋設は、過去に米国で数例あるだけで、各国では廃止措置に係る制度や規制、電気事業者

表2 廃止措置の方式(戦略)

日本原子力部会	IAEA技術レポート TRS446	米国規制ガイド RG.1.184	概要
即時解体	Immediate Dismantling	DECON	運転終了後、直ちに除染や解体に着手
遅延解体(安全貯蔵・解体)	Deferred Dismantling (Safe Enclosure)	SAFSTOR	一定期間の安全貯蔵後、除染や解体に着手。日本の標準工程では、安全貯蔵期間~10年
原位置埋設(遮へい隔離)	Entombment	ENTOMB	放射化機器構造物等を遮へい、恒久的に、または解放基準まで隔離(米国での実施例あり*)

表3 廃止措置の主要な活動と方策(戦術)

主な廃止措置活動	具体的方策
使用済燃料の取扱い	再処理/中間貯蔵、独立乾式/湿式貯蔵
除染と解体撤去	既存技術の応用、新技術の開発
放射性廃棄物の処理処分	処分場、中間貯蔵(個別サイト/集中施設)
環境修復	跡地の活用策(更地/原子力/他産業)

の状況に応じて、即時解体あるいは遅延解体を選択している。米国で多くの例があるように、SAFSTORからDECONへの方針転換など、運転終了時に選択した方式を途中で変更することもある。

廃止措置での主要な活動は、使用済燃料の取扱い、除染と解体撤去(D&D: Decontamination & Demolition)、放射性廃棄物の処理処分およびサイト修復に大別されるが、その具体的方策(戦術)を表3に示す。これらの活動を安全に早く安く実施するためには、廃止措置を取り巻く環境、即ち、実施体制や資金確保、法規制も含めた制度の整備が必須である。

各国における実施体制や制度の構築、それらを効率的に機能させる仕組み作りは、社会制度や産業構造に応じてそれぞれであり、それらは山内豊明氏の論文<sup>2)</sup>で詳細に解説されている。それを踏まえて集約的に言えば、半世紀の経験から得られた教訓は、廃止措置の推進には、その戦略・戦術と規制や廃棄物処分など関連する制度との、全ての階層的レベルにおいて、柔軟かつ合目的なマッチングが肝要であること、換言すれば、これらの制度や仕組みの制約下で、採用し得るまた近い将来に実現が約束される戦略・戦術の選択肢が多いほど、効率的に廃止措置を進めることが可能であるということである。

## 3. 廃止措置の実施形態(ビジネス方式)

廃止措置の実施体制・事業形態(ビジネス方式)にも、各国でいくつかの方式が採用されてきている。ここでは米国での事業形態の発展的変遷を示す。従来、所有者あるいは電力会社(以下、電気事業者)が工事業者に個別の工事を発注する請負形態(コンベンショナル方式)が一般的であったが、大型炉の廃止措置時代を迎えた1990年代初頭において、電気事業者にとって費用面でのリスクがないとのことから、廃止措置工事を一括して発注するターンキー方式が採用された(表4(a))。しかし、発注者

表 4(a) 廃止措置の従来の請負形態

コンベンショナル方式	ターンキー方式
<ul style="list-style-type: none"> <li>・工事業者は、個別の工事を請け負う。</li> <li>・所有者はライセンスと以下を負う。 <ul style="list-style-type: none"> <li>-NRC規則義務、原子力責任</li> <li>-廃止措置信託基金</li> <li>-使用済核燃料の所有権</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工事業者は、廃止措置工事全体を一括して請け負う。</li> <li>・所有者はライセンスと以下を負う。 <ul style="list-style-type: none"> <li>-NRC規則義務、原子力責任</li> <li>-廃止措置信託基金</li> <li>-使用済核燃料の所有権</li> </ul> </li> </ul>

表 4(b) 廃止措置の新しい事業化形態

ライセンス スチュワードシップ方式	プラント オーナーシップ方式
<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃止措置事業者は、所有者からライセンス、プラント資産を取得、サイトはリース。</li> <li>・所有者は、使用済燃料と一定の資産、サイトの所有権を保持。</li> <li>・廃止措置事業者は、以下の債務、責務を負う <ul style="list-style-type: none"> <li>-NRC規則義務、原子力責任</li> <li>-廃止措置信託基金/不足のリスク</li> <li>-完了時のサイト返却</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃止措置事業者は、所有者からライセンス、使用済燃料を含むプラント資産、サイトを取得。</li> <li>・廃止措置事業者は、以下の債務、責務を負う <ul style="list-style-type: none"> <li>-NRC規則義務、原子力責任</li> <li>-廃止措置信託基金/不足のリスク</li> <li>-環境リスク/責任(契約による)</li> <li>-使用済燃料の所有権</li> <li>-プラント従業員と請負業者</li> </ul> </li> </ul>

と受注者の間に、作業範囲や人員配置についての理解の違い、技術的な課題への非効率的な対処、汚染レベルや低レベル廃棄物の量の過小評価(除染や廃棄物処理処分費が見積りを上回る)などの問題が生じ、この方式は受注者にとってはリスクが高いことが判明した<sup>3)</sup>。

以上の方式は、電気事業者、特にプラントを1基だけ所有する電気事業者にとっては、10数年の歳月と10億ドル規模の費用を要する廃止措置は、プロジェクトとして魅力あるもので、自らが管理することで、雇用の確保や廃止措置の運営管理ノウハウの蓄積、経験を積んだ職員の再就職、利益分配などのメリットがある。反面、プラントの運転から閉鎖への業務変容に伴う数々のリスク、本来事業である発電にリソースを集中できないデメリットもある。当然、ライセンスや規制、安全、費用などに対する義務、責任なども全て電気事業者が負う。

2000年代に入り、それらを回避する方策として、工事業者が電気事業者からライセンスを取得、廃止措置事業者として、廃止措置を事業化するビジネス方式が開発され、現在ライセンススチュワードシップ方式として成立している。最近ではさらに、ライセンスのみならず使用済燃料を含む全てのプラント資産を取得する、プラントオーナーシップ方式に進化している(表4(b))。

以下では、革新的取り組みともいえるライセンス移転方式について紹介するとともに、米国でこのようなビジネスモデルの開発が促進される環境やそれを支援・可能にする制度や仕組みに関して、私見を交えて報告する。

### Ⅲ. 米国でのライセンス移転方式の発展

#### 1. ライセンススチュワードシップ方式

この方式は、電気事業者(電気料金で廃止措置費用を負担する消費者含む)および廃止措置を請け負う工事業者、双方のリスクを軽減する革新的な方法として生み出された。早期のライセンス終了とサイト解放を狙いとす

るこの方式は、廃止措置費用を確定的なものにし、廃止措置において経験と実績を有する専門企業がプロジェクト全体を管理する。電気事業者にとっては、閉鎖プラントの廃止に伴うリスクを軽減し、収益事業である本来の発電ビジネスへの傾注が可能となる。また、工事業者にとっては、廃止措置事業者として自らが作業や工程、資金を管理することができ、ターンキー方式で見られた費用面でのリスクを回避でき、利益率の高い事業となる可能性が高いチャレンジングな魅力ある方式であると言える。

一方で、この方式は、閉鎖プラントの施設の管理と責務(廃止措置期間中の使用済燃料の管理を含む)を伴うライセンス、廃止措置信託基金などの移転が前提である。このため、規制面では、原子力法をはじめとする法体系の中で、原子力発電プラントの運転経験を持たない事業者へのこれらの移転を、厳正かつ的確に規制する枠組みの開発が大きな課題であった。

#### 【ザイオン原子力発電所のケース】<sup>3)</sup>

ライセンススチュワードシップ方式は、ザイオン1, 2号機で初めて採用された。ザイオンのケースは試金石であり、前述のように、規制面では、適正かつ合理的な規制体系の開発への牽引役となり、事業者にとっては、規制要求への対応策や事業運営上のメリットの実現方策の開発と検証の場となった。

エクセロン社が所有するザイオン発電所は、PWR(108.5MWe)2基からなり、両基は1973年に運転ライセンスを取得し、蒸気発生器のトラブルなど経て経済性の観点から、1998年に恒久停止された。その時点で運転ライセンスは所有ライセンスに更新されている。エクセロン社の当初の計画では、SAFSTORを選択、2015年からD&Dを開始し、2028年にサイトの修復を完了する予定であった。その後、2008年にライセンススチュワードシップ方式によるDECONに方針を転換、2010年からD&Dを開始し、2018年にサイト開放という早期の廃止措置完了を目指した。現在、D&Dやサイト修復はほぼ完了し、ライセンス終了の最終段階にある。

ザイオンの場合、廃止措置事業者として、エナジーソリューションズ(ES社)の子会社、ザイオンソリューションズ(ZS社)が設立され、エクセロン社は、2008年1月にライセンスや廃止措置信託基金などのZSへの移転を申請した。NRCは、翌年5月に申請を承認し、ZS社は、D&D、サイト修復および使用済燃料の乾式貯蔵施設(ISFSI: Independent Spent Fuel Storage Installation)への格納などの廃止措置活動に対する責任を引き継いだ。

ZS社は、ほぼ計画通りの工程約9年、費用10億ドル弱で、大型PWR2基の廃止措置を完了し、サイトはエクセロン社へ返却した。費用については、ZS社が2008年に届け出た廃止措置計画での見積もりは9.78億ドルで、

エクセロン社の当初の見積もり 13.74 億ドル(2008 年価値換算)の約 30%削減と評価されていた。

## 2. プラントオーナーシップ方式

ライセンススチュワードシップ方式の成功は、継続的な進化の可能性を示すことになった。最も重要な発展のひとつは、使用済燃料の管理に関するもので、最終処分計画の遅延により、電気事業者は廃止措置終了後も使用済燃料の管理(ISFSI 施設)を負担する。このため、電気事業者の保有するプラントやサイト、使用済燃料などを含め、廃止措置の全ての要素を、廃止措置事業者が取得するプラントオーナーシップ方式が、2017 年にバーモントヤンキー発電所がノーススター(NS 社)の率いる合弁会社への売却が承認されたことで開拓された。

### 【バーモントヤンキー発電所のケース】<sup>4)</sup>

エンタジー社が所有するバーモントヤンキー発電所(BWR:63.5MWe)は、1972 年に運転を開始、運転期間の 20 年延長を申請し、2032 年までの運転を認可されていたが、ライセンス終了を待たずに経済性を理由に 2014 年に恒久停止された。エンタジー社の当初の廃止措置計画では、SAFSTOR を選択、50 年の安全貯蔵後、2068 年に D&D を開始し、2075 年までに廃止措置とサイトの修復を完了する予定であった。その後、早期の廃止措置を目指し、2016 年に DECON に方針を転換し、Entergy and NorthStar Group Services (ENGS 社)とプラントオーナーシップ方式による売買契約に至っている。

実際の廃止措置作業は、NS 社とオラノ USA が設立した合弁会社 Accelerated Decommissioning Partners (ADP 社)が実施する。ADP 社は、廃止措置を完遂するために必要な全ての規制、技術および財務に関する専門知識と経験があり、サイトと使用済燃料を含むプラント資産の「完全かつ永続的な」所有権を取得できる資格を有し、電気事業者にワンストップの最終的な廃止措置の解決策を提供するとしている。

ENGS 社からのライセンス移転申請は、2017 年 2 月に NRC に提出され、翌年の 10 月には承認されている。新しい廃止措置計画では、2021 年までに D&D を開始し、2030 年までにはサイトを修復し、ISFSI を除くライセンスを終了する予定である。同社は、DOE が使用済燃料を引き取るまで ISFSI の管理を続け、引取り後は ISFSI を解体撤去し関連ライセンスを終了、全サイトの修復を完了する。

## 3. プロンプトデコミッショニング

最先端の技術を用いたさらなる加速廃止措置が始まろうとしている。エンタジー社は 2018 年に、所有するビルグリムとパリスードの両プラントをホルテックインターナショナル(HI 社)の子会社とプラントオーナー

表 5 ライセンス移転方式を採用のプラント

廃止措置事業者	プラント	所有者	廃止措置期間	
エナジー ソリューションズ	La Crosse	Dairy Power	1991～ 2020	2016年まで SAFSTOR
	Zion-1, 2	Exelon	1998～ 2020	2010年まで SAFSTOR
	Fort Calhoun	Omaha PPD	2016～ 2030	2020半ばまで SAFSTOR
ホルテック インターナショナル	Oyster Creek	Exelon	2013～	数10年短縮
	Pilgrim	Entergy	2019～	数10年短縮
	Indian Point-2, 3	Entergy	2020～	数10年短縮
ノースター	Palisades	Entergy	2022～	数10年短縮
	Crystal River-3	Duke Energy	2013～ 2027	2020年まで SAFSTOR
	Vermont Yankee	Entergy	2014～ 2030	2021年まで SAFSTOR

シップ方式で売却する契約を締結したと発表した<sup>5)</sup>。

ビルグリム(2019 年運転終了)の場合、エンタジー社の当初計画では、SAFSTOR を選択し、工程はバーモントヤンキーと同様であったが、HI 社が届け出た廃止措置計画<sup>6)</sup>では、ライセンス移転後、2 年半で使用済燃料の ISFSI への格納を終え、ISFSI の管理以外の廃止措置作業を 5 年半で完了するとしている。この計画(プロンプトデコミッショニング)のポイントは、最新のナノテクノロジーを利用した、高熱伝導率を持つ乾式貯蔵キャスクの開発にあり、NRC 温度規制に必要な使用済燃料の冷却期間を、以前の 7 年から 2 年半に短縮できることにある。HI 社は、原子炉が停止してから約 66 か月後に、サイトは元の状態に復元されると述べている。

表 5 に、近年、ライセンス移転方式を採用したプラントと廃止措置スケジュールを示した。

## IV. 進化を支援/可能にする制度と仕組み

### 1. ライセンス移転に係わる NRC 規則

ライセンス移転方式が成立する前提条件は、当然ながらライセンスの移転という課題を、原子力に関する厳正な法規制の中でいかにクリアできるかにある。ポイントは、プラントはすでに運転を恒久的に停止しており、移転されるライセンスは、原子炉の「運転」を含まない「所有」だけのライセンスである点である。

米国の複雑なエネルギー市場では、多くの民間電気事業者および投資事業者が原子力を含めた発電設備を運用している。このため長年にわたり、所有者と運営者の分割や合併、買収は日常的なイベントであり、NRC は、運転中の TMI-1 について GPU ニュークリア社からアメジェンエネルギー社(フィラデルフィア電力エネルギー社とブリティッシュエネルギーグループの JV)への売却を承認して以来、多くの運転ライセンスの移転申請を審査してきている。一方、廃止措置プラントのライセンス移転の場合は、原子力発電プラントの運転や運営のバックグラウンドを持たない事業者がライセンスが移転され

るため、TMI-1 の場合のような電気事業者間の移転とは審査の要点が異なるが、NRC はそれまでの豊富な知見と経験をもとに、ポジティブに取り組むことが可能であった。

米国におけるライセンス移転の要件は、原子力法に由来し、NRC 規則に規定されており、審査のためのガイダンス文書も開発されている。以下に概要を記す。

原子力法(Atomic Energy Act of 1954, as Amended) 第 16 章セクション 184 には、原子力に係わるライセンスの移転は、原則的に禁止されるが、NRC が審査し承認した場合はその限りでないこと、が謳われている。ライセンス移転の規制に係わる連邦規則は、タイトル 10 (10CFR : NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations) の、Part2, Subpart M (公告、文書等、公聴会関係)、Part50, Sec. 50.33 (申請内容)、Sec. 50.38 (申請者の不適格性)、Sec. 50.40 (共通の基準)、Sec. 50.75 (廃止措置計画の報告、記録管理)、Sec. 50.80 (ライセンス移転)、Part51 (認可行為、環境保護)、Part140 (財政的保障、補償契約) である。実際の審査に当たるスタッフのためには、その要領等を示す複数の標準審査プログラム (SRP : Standard Review Plan) が策定されている。

NRC の審査の主要な事項を、以下に挙げる。

- ・技術的資格：プラントは恒久停止されているため、施設設備の保守、燃料貯蔵施設の管理、D&D 作業に焦点を当てた、組織としての技術的・人的能力を審査。これに関する NRC の検査はライセンスが終了するまで継続される。
- ・経済的資格および廃止措置信託基金の調達保証：企業としての財政的基盤、廃止措置費用の妥当性と廃止措置信託基金の調達可否、予備費資金などの審査。廃止措置に係わる財政保証状況は、ライセンスが終了するまで NRC の監視・審査項目となる。
- ・外国、外国人の所有：原子力法では、ライセンス保有者が外国の個人や団体、政府によって「所有、管理、または支配」されることを禁止しており、安全関連の活動が外国から管理されていないことを審査。
- ・原子力災害保険、損害賠償保証：原子力法およびブライス・アンダーソン法により、原子力施設の所有者に事故による公衆の人身傷害または物的損害を賠償するための保険および補償を要求している。NRC はライセンス保有者の保険加入、賠償保障、またサイト修復 (除染) に必要な費用保証について審査。

## 2. 廃止措置資金制度

廃止措置の費用は高額でかつ不確実性を伴うため、廃止措置計画がいかに精緻であっても、十分な資金がなければ、廃止措置を完了することはできない。このため、各国とも、プラントの運転期間中に必要とされる十分な資金が確保されることを保証する仕組みを整備してい

る。日本では電気事業者の内部引当金制度であるが、海外では電気料金から一定額を外部に積み立てる制度をとる国が多い。特に米国では、中小の事業者の電力市場への参入も珍しくないため、廃止措置信託基金 (Nuclear Decommissioning Trusts : NDT) として、運転ライセンス発給時から終了時まで積み立てる方式を採用している。NRC は、廃止措置においては資金の裏付けが最も重要であるとの認識を持っており、電気事業者に対しプラントの各フェーズに応じた頻度で、信託基金への積立て状況や費用の見積りに関する報告を義務付けている。

このように NDT は NRC によって厳格に監視されているが、この制度を利用すると、第三者が電気事業者からプラント資産の所有権やライセンスを取得すれば、廃止措置事業者として、NDT により財政的資格を保証することが可能となる。場合によっては、廃止措置が計画通り完了した後、NDT からの余剰資金を活用できる場合があるであろう。

## 3. DOE による使用済燃料管理の義務

米国では、1970 年代後半にワンスルーの燃料利用を優先させ、再処理を無期限に延期するとの決定により、1982 年に放射性廃棄物政策法 (Nuclear Waste Policy Act of 1982, 1987 年修正) が成立、連邦政府の責任で使用済燃料などの管理に関する政策、規制、責任体制、計画などが明確にされた。これに基づき、DOE は、電気事業者の放射性廃棄物基金への拠出金支払い、DOE の使用済燃料の引取り義務 (1998 年開始) に係る契約を締結した。しかし、処分場開発の遅延により使用済燃料の引取りが行われていないため、債務不履行による賠償金の支払が一部確定している。この裁定も、第三者の廃止措置への参入を促すことに寄与している。

その後、DOE は 2013 年に「使用済燃料および高レベル放射性廃棄物の管理・処分戦略」を公表、2021 年までにパイロット規模の中間貯蔵施設の操業開始、2025 年までに本格的な中間貯蔵施設の建設、その後最終処分場のサイト選定や特性調査、設計、建設を経て、処分場操業開始を 2048 年とすることを実施目標とした。

民間プロジェクトとして進められている中間貯蔵施設は、DOE 戦略では想定されていなかったが、連邦政府による中間貯蔵施設の代替または追加として利用可能な有望な選択肢であり、DOE も検討を始めている。

## 4. 廃止措置費用の構造と雇用・職種形態

廃止措置費用の内訳については、OECD/NEA と IAEA の共同報告書<sup>7)</sup>の中で、100 万 kWe 級のプラント (PWR) について、項目別の見積りが分析されている。それをもとに作成したグラフを図 2 に示す。

総額約 460 億円のうち、プロジェクトマネジメントが約 32 %、廃棄物管理約 22 %、使用済燃料管理約 15 %

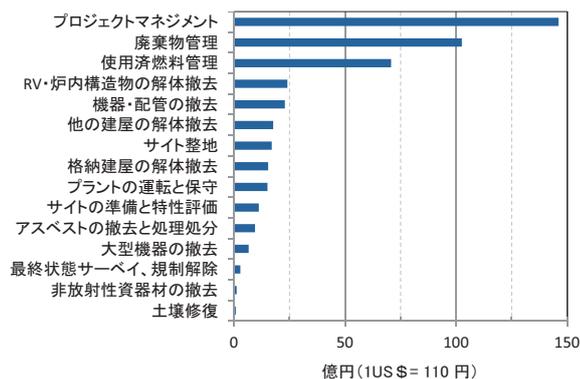


図2 廃止措置費用の項目別見積もり

で、この3項目で約70%(320億円)を占めている。

「プロジェクトマネジメント」と大括りにされている項目には、廃止措置費用見積り国際指標(ISDC)に関するOECD/NEAの報告書<sup>8)</sup>で定義されている、項目06(サイトのインフラと運用)と項目08(プロジェクト管理、エンジニアリング等)が含まれている。前者は廃止措置期間中における施設や設備、サイトなどの運用・維持管理、後者は狭義の所謂プロジェクトマネジメントで、両者とも通常は電気事業者の業務範疇である。図2からは、廃止措置の工事としてイメージされるD&D工事に係る額は、97億円約21%に過ぎないことが分かる。

以上から言えることは、廃止措置に係わる業者にとって、従来の工事請負方式では魅力ある事業にはならないこと、たとえ廃棄物管理などを契約に含めても、前述した見積もり過小評価のリスクはカバーできないであろう。ここに、ライセンスの移転を伴う革新的なビジネス方式に挑戦するインセンティブが存在する。

さらには、究極のビジネス方式ともいえるプラントオーナーシップ方式では、プラント従業員や関連業者の雇用引継ぎも契約に含まれ得る。米国での雇用形態は、日本の終身雇用などとは異なり、任意の雇用(Employment at will)を基にした制度であること、職種としてエンジニアとテクニシヤンの役割分担が明確である構造や、廃止措置費用で人件費の占める割合が70%を超えることなどを考え合わせると、電気事業者にとっても大きなメリットが存在するものと思われる。

## V. おわりに

米国における廃止措置ビジネス形態の革新的な究極ともいえる進化とそれを可能にする廃止措置をとりまく環境についてみてきた。わが国では、閉鎖プラントの廃止

措置期間は概ね30~40年としており、運転期間を最長60年とする現行規制の下では、いかにも長いとの印象は否めない。米国とは、電気事業の成り立ちや産業構造、廃止措置に係わる制度や仕組み、社会環境などにおいて、相違は大きく、早急な進展を求めるのはたやすいことではない。2020年代後半には本格化するであろう廃止措置に向けて、産官学民の総英知を結集すれば、変革の手掛かりを掴めるのではないであろうか。

世界的に見ても商業用軽水炉の廃止措置では、即時解体(DECON)が主流となっている。そこには個々の理屈があるが、根底には、使命を終えた発電プラントの廃止措置を「安全に早く安く」完了することは、電気事業者や廃止措置事業者だけでなく、立地地域、消費者を含めて関係する全てのステイクホルダーの利益にかなうとする社会認識がある。規制も例外ではなく、過剰な労力(=出費)を排除する合理的な規制体系を確立し、それを適正に運用することは、上記の認識を踏まえれば、大きな国益につながるものと思料する。

### — 参考資料 —

- 1) Daniel F. Stenger, et al., "Innovations in decommissioning and their application abroad," ANS, Nuclear News, July 2019, 45-52.
- 2) 山内豊明, 日本原子力学会, アトモス, Vol.61 No.11(2019) 769-774.
- 3) P. T. Daly, et al., "License Stewardship Approach to Commercial Nuclear Power Plant Decommissioning," WM2008 Conference, February 24-28, 2008, Phoenix, AZ.
- 4) "New reactor ownership models set to cut decommissioning costs," Nuclear Energy Insider, Mar. 8, 2017.
- 5) Holtec Decommissioning International Inc., HP (<https://hdi-decom.com/>).
- 6) Pilgrim Nuclear Power Station DECON Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, NRC, ML18320A040.
- 7) "A Joint Report by the OECD/NEA and IAEA, Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities," NEA No. 7344, OECD 2017.
- 8) "International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations," NEA No. 7088, OECD 2012.

### 著者紹介



澁谷 進 (しぶや・すすむ)  
原子力バックエンド推進センター  
(専門分野, 関心分野) 廃止措置, 安全評価,  
放射線物理

## 映画『Fukushima 50』をどう受けとめるか

フリージャーナリスト 井内 千穂

新型コロナ禍中、3月上旬の封切り直後の週末にこの映画を観に行った。事故発生当時は知る由もなかった現場の凄まじさを追体験する映像と人々の命懸けの奮闘に心を揺さぶられる作品だった。

感動のヒューマンドラマであって事実の記録ではないのか？ 案の定、映画に関する賛否両論の感想がネット上に溢れている。同じ映画に対して、事故の強烈な映像が反原発感情を増幅させるという懸念と、逆に、現場のヒロイズムが政権のプロパガンダになるという懸念の両方がある。元々の立場によって受けとめ方は異なるが、何かしら揺さぶられての反応か。しかし、「事実」とは何だろう。

劇中、「俺たちは何が間違ってたんだろうな」と問う伊崎当直長(佐藤浩市)から吉田所長(渡辺謙)への言葉が重く残る。「自然を侮った」とは、津波対策を先送りしたことなのか、福島に原発を建てたことなのか、そもそも原子力という技術自体を言うのか？ 事実とはもあれ、映画は問うている。

どんなに安全対策を講じてもゼロリスクはない。そして、原発を止めても別のリスクがある。実際、現下の危機はこのコロナ禍である。世界中の現場で、医療関係者の奮闘はもちろん、自分を含めた一般市民も必死の努力を続けている。国境は閉ざされたが、玉石混交の情報が世界を駆け巡る。

いろいろ読み過ぎた感想を検証するため、もう一度映画を観ようと思っているうちにコロナ禍はさらに深刻化し映画館もクローズしてしまった。自宅に引きこもったまま、気になる「事実」に近づく手立てになるかと、今さらだが3つの原発事故調の報告書を紐解いている。映画の力とも言える。

## Column

### 環境問題にとっての「未来」とは

東京学芸大学附属国際中等教育学校 3年 小澤 杏子

「未来」とは、一体いつのことを指しているのか。地球の未来のために、私たちの未来のために環境問題を解決していこう...などといったフレーズに使われている「未来」は、一体いつ訪れるのであろうか。私は、「未来」という言葉がいいように使われ、この言葉を使うことで環境問題解決の見えない期日を先延ばしにしているのではないかと感じてしまう。

人類の歴史上、環境問題が多く取り上げられるようになったのはつい最近のことである。産業革命後の科学技術の著しい進歩により、今までは自然が自殺できていた環境破壊に歯止めが効かなくなってしまったのである。世界的に見ると、環境に配慮した国の政策や人々の活動が以前より増えた気がする。しかし、日本はどうだろうか。

昨年(2019年)の12月3日、国際的なNGOである「気候行動ネットワーク」はCOP25(気候変動枠組条約第25回締約国会議)の会場で、地球温暖化対策に消極的な国に贈る、不名誉な「化石賞」に日本などを選出したことを発表した。なお、資源エネルギー庁などの調査結果によると、2018年の発電電力量のおよそ8割が火力発電で賄われている。

国内外のさまざまな企業や団体が環境問題と向き合っているというのに、国全体としては積極的に環境保全に繋がるような取り組みが行えていないように見えてしまう。土地面積もなく、資源大国でもない日本にとってエネルギー関連の課題解決は困難なことなのかもしれない。しかし、「未来」をより良くするためには困難な課題と向き合い、直ちに解決していくのが必要不可欠だと思う。

## 原子力発電所を国際間でシェアークロアチアの原子力事情

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

クロアチアよりこんにちは。本稿では、休暇を利用して訪問したクロアチアのエネルギー事情を旧ユーゴスラビア時代の歴史と共に紹介したいと思います。日本では、旅行先としてはあまり馴染みのないクロアチアは、主にドイツ人、スカンジナビア半島に住む人々が夏の長期旅行に行く先として、人気の観光スポットです。

クロアチアは面積5万6,594km<sup>2</sup>で九州と四国を合わせたのと同様面積に約4百万人が暮らしています。エネルギー資源に恵まれており、自給率は約70%です。2018年における消費エネルギーの約45%が水力発電、約39%が石炭や天然ガスを利用した火力発電、約17%は隣国のスロベニアに位置するクルシュコ原子力発電所より輸入しています。この、クルシュコ原子力発電所は、ユーゴスラビア時代の1975年に、当初はクロアチアとスロベニアが共有する形で米国の支援を得て設立され、1983年に営業運転が開始されました。クルシュコ原子力発電所は、クロアチア国内で一番人口の多いザグレブ市と、スロベニアの第二都市のマリボル市の間に位置します。

1990年1月のユーゴ共産党の分裂に伴う民族紛争を機にユーゴスラビアは複数の国々に分裂してしまいました。連邦崩壊後、クルシュコ原子力発電所の所有権を巡って20年にわたりスロベニアとクロアチア間では争いが続きました。しかし、2010年に半分ずつ共有する共同所有体制が導入され、発電電力量も半分ずつ供給することで長い紛争に終止符が打たれ、2020年現在も同原子力発電所は順調に運転しています。

国際送電網により欧州国内では、電力の輸出入が活発になされていますが、複雑な歴史背景によりスロベニアとクロアチアでは特にユニークな形で原子力発電所が運営されています。

## Column

### 大学進路ミスマッチ予防策

大阪市立大学 鳥居 千智

卒業証明書を発行しようと久々に高校へ行ったとき、先生とたまたま来ていた同級生とで話していたのだが、ふと彼女が私に言ったことに驚いた。「受かる所にしか受けさせようとしないうちは少なくないで。塾の友達の学校とかは結構そういうの多い」けれどもそれを知らないのは私だけだったようで「そうやって大学入ってから、こんなはずじゃなかったっていうミスマッチが起こってるんやよな。どうにかならへんかな」という会話が交わされていた。そのときは、そのようなことを生徒にする学校側は問題だと思っていた。けれどもしばらく経ってこうも思った。なぜ生徒側もそのレールに乗ってしまうのだろうか、と。

ミスマッチが起こらないために、生徒側は進路選択の責任感をより持ち、大学で何をしたいか真剣に考えるべきだ。必ずしも一番力を注ぐものが勉強である必要はないと思う。「この大学のダンス部に入りたい」「勉強はほどほどにしておいて、大学ではこういうボランティアをしたい」「やりたいことがどうしても見つからないから、入学してから分野を決められるこの学部にしよう」これで十分だ。真剣に考えて選んだ道であればミスマッチも起こりにくいだろうし、起こっても責任転換しにくい。自分の意志で行ったのではない道を後悔するのは結構辛いと思う。

私は、安全校ではないがそこで勉強したい大学を受けて落ちた。もっと勉強すればよかったという後悔は少しあるが、受けたことは全く後悔していない。そもそも落ちたからといって将来が暗くなるわけではない。大学は有意義に過ごしながら、その中で将来を決めていく手段の一つだと思っている。

## 人としてできること

福島県立安達高等学校3年 服部 杏菜

先日子ども関係のボランティアをさせていただいた際、ある女の子が私との会話で、「色々なところに保養に行く」と話してくれた。相手が小学生ということもあり、どうしても当時の私と重ねずにはいられなかった。「保養」と聞くと、私は真っ先に小中学生の頃の「何時間もかけて車で遠出をした週末」を思い出す。もちろん毎週ではなかったが、小学生の頃はお出かけ気分でも楽しかったことを覚えていて、今ではさまざまな土地に連れて行ってもらったことへの感謝でいっぱいだ。しかし中学に入るとだんだん親への反発心が芽生えた上に、そもそも周りの友達は誰一人保養など行っていないのになぜ、という気持ちが強くなっていった。十分な知識を持っていないくせに制御不能な感情だけはしっかり持っている私たちは、「正しく恐れる」なんてことはできなかったし、要らないところで争いを生んだ。仮に、保養に疑問を感じていたあの時の私が、その必要性について語れるくらいの知識を身につけていたとしても、必要なら必要で自分の反発心をその知識で抑え込むことはできなかっただろうし、必要でないならいらないで、感情的な親を説得できたかという点、できなかっただろう。ただ、互いを傷つけ合うだけの喧嘩の数は減らせたと思う。あの女の子は楽しそうに保養について話していた。その笑顔がこの先もずっと曇ることがないといいなと願いながら、自分の知識は誰かにとっては間違っただけのものかもしれないことを念頭に置いて貪欲に知識を得ていきたいと思った。そして人と関係を築く中で、どの程度それに頼りどの程度頼らないのかは、私の一生の課題である。

## Column

### 感謝をこめてもてなす「復興五輪」

フリーライター 服部 美咲

新型コロナウイルス感染症の世界的拡大を受け、東京五輪が1年延期になった。この五輪を「復興五輪」と呼ぶことへの異議を時折目にする。福島県では、除染土を詰めたフレコンバッグの山を、生活空間で目にする地域がある。事故を起こした原発の廃炉作業も続いている。それらの傍を聖火リレーが通らないことを指し、「世界に福島の影の部分の部分を隠しておいて、復興五輪と呼ぶべきではない」ということらしい。

海外で、「福島に人が住めるんですか」と訊かれたことがある。福島に残る諸問題を憂い、力になりたいと活動を続ける海外の人もある。原発事故の爪痕は、世界中の人々の胸にさまざまな形で残っている。五輪という晴れ舞台にまで、敢えて「影の部分」をさらさねば、他国は福島の傷の存在を知らないとも思うのか。福島第一原発事故の苛酷さを矮小化するにも程がある。

2020年2月24日の読売新聞で、俳優の石坂浩二さんの言葉を読んだ。「まるで大きな撮影セットを急拵えしたような感じで、セットの陰にはまだ焼け跡が隠れているわけです。でもそこが日本らしかった。小さいけれどきれいな客間に通して、その中で精いっぱいもてなす。」前回1964年の東京五輪を振り返った。東日本大震災の後、ある英紙は1面に日本語で「がんばれ、日本。がんばれ、東北」と大きく掲げた。多くの国々が日本のために祈った。

聖火リレーの火は、福島のJヴィレッジで、復興の火として燃えた。来夏、世界に感謝を伝えられるように、疫病を払う炎ともなれと祈る。

## サイエンスよみもの

# 火星は生命の誕生と生存に適した環境だった

金沢大学 福士 圭介,  
東京工業大学 関根 康人

火星クレータ内部にかつて存在した巨大湖の湖底にたまった堆積物の探査データを解析し、塩分や pH といった火星の水質が生命の生存に適したものであることを明らかにした。分析された塩分になるためには、初期火星において 100 万年程度の温暖期にわたって湖に塩分が運ばれて濃縮される必要があることも確かめ、火星の湖が有機物の重合・高分子化に有利な、生命誕生にとって適した場であったことを示した。

**KEYWORDS:** *Water chemistry, Habitability, Mars, Gale crater, Nuclear radioactive disposal*

### I. 水惑星学と地層処分研究

この寄稿を執筆している福士は環境科学を専門とし研究活動を行っている。原子力分野の研究者ではないものの、博士課程在籍時の指導教員が日本原子力研究所 OB だった経緯もあり、放射性廃棄物の地層処分に関わる基礎研究をいくつか行ってきた。関連研究をいくつかあげてみると、緩衝材-オーバーバック相互作用の長期挙動を理解するためのナチュラルアナログ<sup>1)</sup>、結晶性岩に対するアクチニドアナログ元素の取着研究<sup>2)</sup>、人工バリア材に利用するベントナイトへのセシウム吸着・脱離モデル<sup>3)</sup>などである。

#### 地球外の水を調べ、生命に思いを馳せる

そんな福士が地球以外の太陽系天体の水環境研究を始めたのは 2017 年のことである。きっかけは、本寄稿の著者の一人である惑星科学者の関根からの科研費新学術領域「水惑星学の創成」への参加依頼であった。関根の考える「水惑星学」とは、これまで物理的な水の存否のみが議論されてきた地球外の水研究に化学を導入し、生命にまでつながる学問体系を創成しようとするものである。その時福士が直観的に思い描いた研究のイメージは、地球外に存在する水の詳細な水質成分表を作成することである。当然ながら地球外に存在する水は空間的にはもちろん、場合によっては時間的にも手の届かないところがあるので、この試みは明らかに困難なチャレンジであろう。

*Mars had the suitable water chemistry for life*: Keisuke Fukushi, Yasuhito Sekine.

(2020 年 3 月 25 日 受理)

しかし福士はほぼ同様のチャレンジをしている研究分野があることを知っていた。それは放射性廃棄物地層処分分野である。地層処分が計画されている放射性核種には 10 万年にもおよぶ長半減期のものが含まれる。放射性核種の拡散に接触する地下水の水質は支配的な役割を果たすため、長期安全性の評価には 10 万年先の水質を予測する必要がある。われわれの手の届かない地球外の水質を予測するために、放射性廃棄物の処分分野で培われた手法が利用できるのではないかと考えた。

### II. 火星の水

周回衛星や探査車による火星探査により、火星表面には流水地形や含水鉱物の存在が次々と発見されている。約 40 億年前の火星には液体の水があったことが確実視され、太古の火星での生命存在可能性が現実味を帯びて議論される状況になっている。生命の存在には液体の水が必須である。しかし液体の水が存在しさえすれば、必ず生命が存在するとは限らない。生命の存在に水が必要な大きな理由の一つは、生命は水を介して生存に必要な成分やエネルギーを摂取するからである。液体の水の役割は元素を溶解し、移動させる媒体としての機能にあり、生命存在可能性を議論するには水に溶け込んだ成分(すなわち水質)の理解が必須といえるだろう。

#### 火星には広く水が存在していた

太古の火星における生命存在可能性の議論には、水質それ自体の理解だけではなく、液体の水を取り巻いていた気候や周辺環境の理解も重要である。太古の火星には広範に液体の水が存在したことは間違いないが、液体の

水の存在を許した気候・環境条件はいまだよくわかっていない。地球上を考えると、天然水の水質はその水を取り巻く環境に大きく依存することがわかる。たとえば、日本の気候は温暖多湿で急峻な地形を持つ。そのような環境に存在する湖水のほとんどは淡水である。一方、大陸内部など乾燥地域に存在する湖沼は塩水化しているものが多い。このように、太古の火星に存在した液体の水の水質を復元できたならば、太古の火星の古環境を理解できる可能性がある。

さて水質とはなんだろう？ 化学的にとらえた場合、水質とは水に溶けた成分の種類とその濃度といえることができる。自然界に存在する元素を含有するすべての鉱物は、水と接触すると溶解する。また大気に存在するすべての気体も水と接触すると溶解する。

ただし水に溶解できる量は鉱物・気体の種類によって異なる。天然水に溶けやすい元素は主要溶存成分と呼ばれ、陽イオンではナトリウム、カルシウム、マグネシウム、カリウム、鉄、陰イオンでは塩化物イオン、硫酸イオン、重炭酸イオンの8つがあげられる。水の化学的性質を特徴づける最低限のパラメータはpHとこれら8種類の主要溶存成分濃度といえる。pHとは水素イオン濃度であり、水の酸性度を示す。主要成分の総和は塩濃度に相当し、天然水の水質タイプはこれら成分の組み合わせで区分されることが多い。

### III. 放射性廃棄物地層処分分野で 開発された水質復元法

水質成分表は対象とする水を化学分析することで作成されることが一般的である。一方、われわれ人類は今のところ過去に戻る技術を有しておらず、太古の火星に行き水を採取し、その水を化学分析することは不可能である。

火星表面には液体の水の作用によって生成した鉱物(二次鉱物)が多数見つかり、これら鉱物にはかつて存在した液体の水質の記録が残されていると考えることができる。これまでに、火星に見いだされる二次鉱物組成に基づいて、地球化学反応モデリング手法により、過去の火星の水質を復元しようと試みが行われてきた<sup>4)</sup>。地球化学反応モデリングでは、初期溶液組成、初期鉱物組成、岩石の透水性、水岩石比さらに一連の化学反応を想定することにより、時間進展に伴う水質および鉱物組成の変化をシミュレートできる。さまざまな想定におけるシミュレーションを行い、探査より観測された二次鉱物組成を再現できた場合、その条件における水質を太古の火星に存在した水質と推定することができる。

しかしモデリングに必要とされる入力パラメータは初期火星では決定することが困難であるものがほとんどであり、推定された水質の妥当性を検証することはほぼ不可能であった。たとえば初期溶液組成は必須の入力パラ

メータであるが、それ自体が太古の火星の水質である。知りたい太古の火星の水質をどのように初期条件として定めるのがよいのだろうか？ 先行研究で行われる地球化学反応モデリングにはこの種の疑問が付きまとっていた。

#### 鉱物に残された痕跡から水質を復元する

このような初期条件を与えて反応の進行をシミュレートする地球化学反応モデリングは、ボトムアップアプローチといえることができる。ボトムアップアプローチは鉱物組成や水質の時間進化を理解するには有効であるが、上述のように初期条件に避けられない不確実性がある以上、精密な水質復元には不向きである。

これに対して、二次鉱物の鉱物学的特徴から、鉱物が接触していた水の水質のスナップショットを復元するトップダウンアプローチが放射性廃棄物の地層処分分野で提案されている。フランスなどヨーロッパの諸国では、スメクタイトなど粘土鉱物を主成分とする堆積岩中に放射性廃棄物を地層処分する計画が進められている。放射性核種は長期間にわたり水と接触することで水に溶出し、長い時間をかけて生活圏へ移行することが懸念される。放射性核種がどの程度・どのくらいの時間で水に溶解するか、また溶解した放射性核種がどのくらい地層中にとどまるかは、堆積岩中の水の水質に依存する。

したがって堆積岩中の水質の理解は重要であるが、間隙水を適切に抽出することは技術的に困難である。そこでフランス BRGM(地質調査所)の Eric Gaucher 博士は、粘土岩に含まれる鉱物の特性から、間隙水質を復元する手法を開発した<sup>5)</sup>。

堆積岩に普遍的に含まれるスメクタイトは層状の構造を有する物質であり、層と層の間に陽イオンの交換吸着場を有している(図1)。溶液中に存在する陽イオンはスメクタイトの層間に保持される。天然水の主要陽イオンにはナトリウム・カリウム・マグネシウム・カルシウムがあげられるが、スメクタイトに保持される陽イオン組成はスメクタイトが接触する天然水に溶存する陽イオン組成に依存する。すなわち、スメクタイトの層間陽イオン組成から、周囲に存在する陽イオン組成を制約できる。

一方、粘土鉱物に保持されやすい陽イオンに対して、塩化物イオンや硫酸イオンといった陰イオンは粘土岩から比較的容易に抽出することができる。水中に含まれる陽イオン電荷の総和と陰イオン電荷の総和は必ず等しくなるため、抽出液の陰イオン電荷の総和を利用することで、各陽イオンの絶対濃度を見積もることができ、水中に含まれる主要成分のほとんどが復元できる。さらに堆積岩のスメクタイトに随伴する炭酸塩鉱物など二次鉱物との溶解平衡を考慮することで、水の重炭酸イオン濃度、pH、さらには酸化還元状態といった情報も復元可能となる。Gaucher 博士によって提案された手法はヨーロッパの試験サイトにおけるさまざまな堆積岩中の間隙

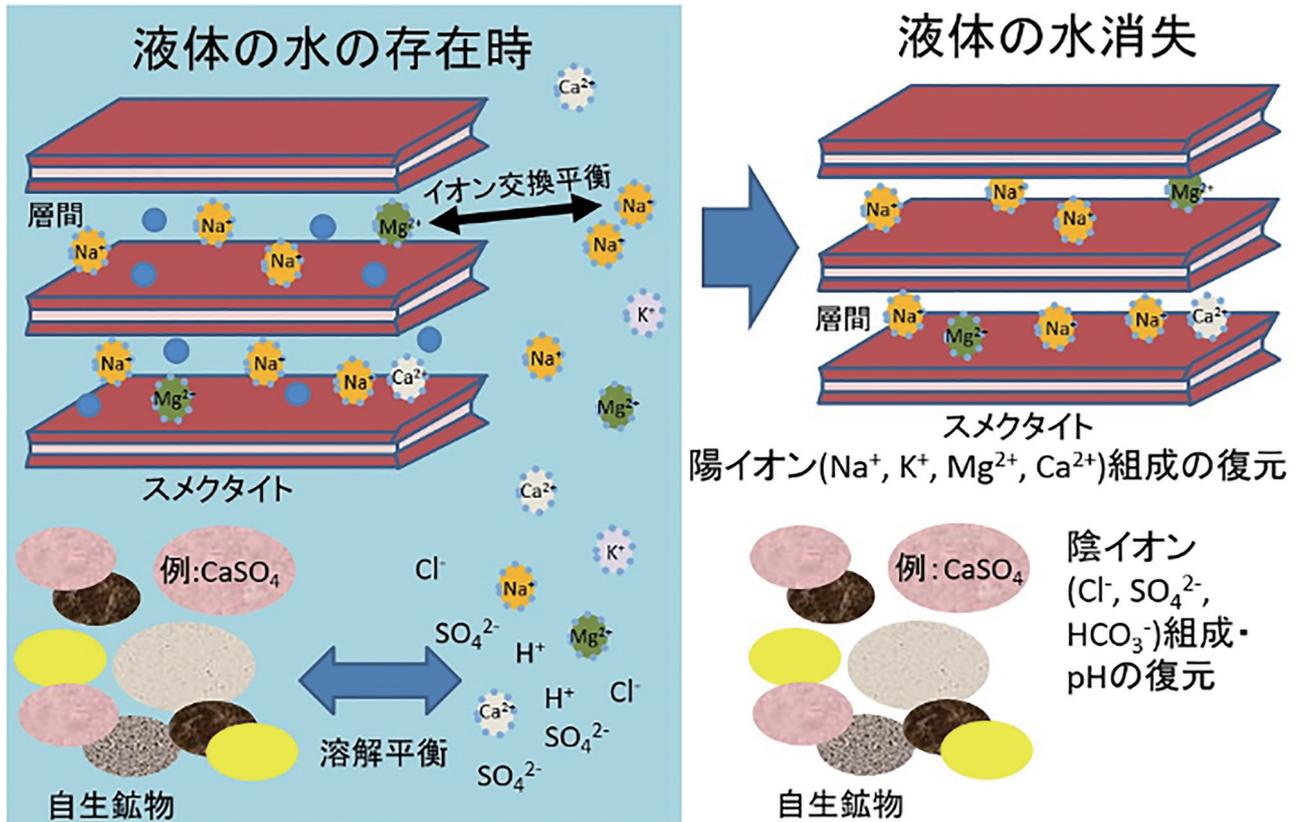


図1 放射性廃棄物の地層処分分野で開発されたスメクタイトの層間組成を利用した水質復元法

水に適用され、その妥当性が検証されている。

スメクタイトは地球のみならず、比較的低温の水の存在下では地球外にも普遍的に存在する物質であり、火星においても探査衛星による探査から全球規模でその存在が確認されている<sup>6)</sup>。現在火星表面には液体の水は存在しないと考えられているが、スメクタイトの存在はかつて火星には液体の水が存在したことを示しており、その層間にはスメクタイトが最終的に接触していた液体の水の水質が保存されていると考えることができる。

#### IV. 火星ゲールクレータ

火星の赤道付近に位置する衝突クレータの一つであるゲールクレータ内には、35～40億年前のある時期に、液体の水をたたえた湖が存在していたことがわかっている。NASAの火星探査車キュリオシティは過去の火星における生命存在可能性を調べるために、ゲールクレータ内にかつて堆積した湖沼堆積物層の調査を行っている。キュリオシティは搭載されているさまざまな分析機器により、採取した土壌や堆積物の鉱物学的・化学的分析を行っており、2012年の探査開始以来2020年1月までに21 km以上におよぶ移動距離の調査を行っている<sup>7, 8)</sup>。

キュリオシティが初めに分析を行った湖沼堆積物はYellowknife Bay層のJohn KleinおよびCumberlandと名付けられた掘削サイトである。Yellowknife Bay層の

堆積物は細かい粒子で構成されるマトリクスにサブ mmの脈が入り込む形状を示している(図2)。マトリクスはゲールクレータが湖沼だった時代にしずしずと堆積し、湖底において湖水と反応して変質(初期続成作用と呼ばれる)を被った土壌粒子から構成される。

一方、脈は堆積後に生じた割れ目に流体が入りこむことで形成したと考えられている。脈はキュリオシティによる局所化学分析より、ほぼ純粋な硫酸カルシウムであることが認められている。

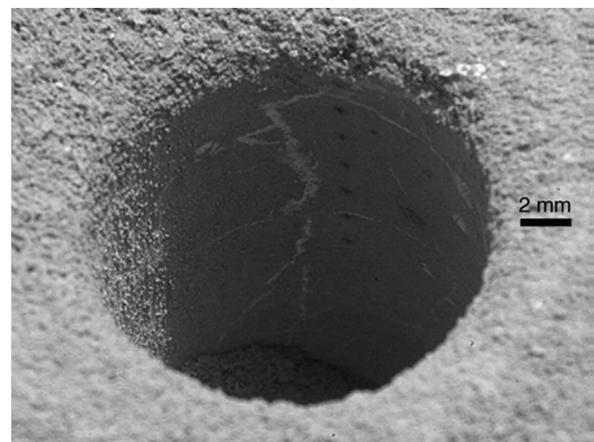


図2 Yellowknife Bay層 John Klein 掘削サイトの掘削孔<sup>7)</sup>  
(©NASA: ID.0270MH0002540050102794C00)

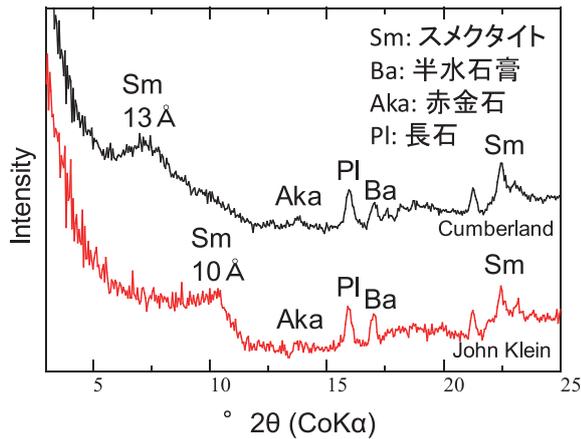


図3 Yellowknife Bay 層堆積物の粉末 X 線回折パターン<sup>7)</sup>  
横軸は回折角度、縦軸は X 線強度を示す。上データは Cumberland 試料、下データは John Klein 試料を示す。

### 35～40 億年前にあった湖水の痕跡を探る

図3に John Klein および Cumberland から採取された粉末 X 線回折パターンを示す。いずれの試料からも水の関与で生成したことが確実な二次鉱物としてスメクタイト、硫酸カルシウム(鉱物種としては無水石膏( $\text{CaSO}_4$ )と半水石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ))および赤金石が認められた。赤金石は塩化物イオンを含有する鉄の水酸化物であり、岩手県赤金鉱山から発見されたことからこの名前がついている。

脈はほぼ純粋な硫酸カルシウムであるので、スメクタイトおよび赤金石は脈には含まれずマトリクスに含まれると推測される。堆積物の状況は、Yellowknife Bay 層では少なくとも2度、液体の水が関与した反応があったことを示唆している。一つ目の水はゲールクレータが湖であった時代の湖水である。この時代にマトリクスが形成され、初期続成作用によりスメクタイトが生成したと考えられる<sup>7)</sup>。二つ目は湖水が消失した後に堆積物に入り込んだ水であり、この流体(後期流体と呼ぶことにする)の作用により石膏に富む脈が生成したと考えられる<sup>7)</sup>。

Yellowknife Bay 層では後期流体後に水の関与する反応は認められていない。したがってゲールクレータ堆積物に記録されている水は、後期流体が堆積物にしみ込んだ間隙水であると考えられることができる。

## V. 水質復元

上述した水質復元手法の適用にはスメクタイトの層間陽イオン組成の解読が不可欠である。地球上の試料の場合、スメクタイトの層間陽イオン組成の測定には、対象試料を高濃度のアンモニウム水溶液と反応させ、抽出された陽イオンを測定する方法が一般的である。もしくはマグネシウム・鉄のようなスメクタイトの構造に入りうる陽イオンが層間には存在しないと仮定できるならば(ナトリウム・カリウム・カルシウムはスメクタイトの構

造には入らない)、試料からスメクタイトのみを抽出し、化学組成を分析することで層間陽イオン組成を求めることができる。あるいは、電子プローブマイクロアナライザによる微小領域分析により、対象試料中に存在するスメクタイトの層間陽イオン組成を測定する方法もある。しかしながらキュリオシティには湿式分析、抽出操作、微小領域分析のための装置が備わっておらず、地球における粘土鉱物分析法を適用することはできない。

### X 線回折パターンから水質を復元した

そのような中、キュリオシティの取得した粉末 X 線回折パターンに着目することで、太古の火星の水質を復元する方法を着想した。スメクタイトの粉末 X 線回折パターン(図3)にみられる低角ピーク( $2\theta=7-11^\circ$ )は通常あまり注目されないピークであるが、実はその角度はスメクタイトの層間距離という重要な情報を保持している(図1)。スメクタイトの層間距離は層間に入り込む陽イオンの種類と湿度によって決まる。

火星ゲールクレータ表面の湿度は日射や季節の影響により0%～100%まで変化するが、粉末 X 線回折測定を行うキュリオシティの試料室では湿度はおよそ1%以下に保たれている。したがって、粉末 X 線回折パターンの低角ピークの形状からスメクタイトの層間に保持される陽イオン組成を推定することができる。

本研究では粉末 X 線回折パターンのピーク分離を行い、層間の各陽イオンの寄与、すなわち層間陽イオン組成の見積もりを行った。さらに、スメクタイトはスメクタイト族の粘土鉱物の総称であり、化学組成や構造に基づき鉱物種がより細分化される。粉末 X 線回折分析に基づいて、Yellowknife Bay 層で認められたスメクタイトは鉄を含むサポナイトであることが報告されている<sup>7)</sup>。地球上におけるサポナイトが生成している水圏環境の水質は、いずれもナトリウム・タイプ、すなわちナトリウムが主要な陽イオンである<sup>9)</sup>。これらから、かつてゲールクレータに存在していた水の水質は、陽イオンについてはナトリウムがその主成分であり、スメクタイトの層間イオン組成に応じたナトリウム・カリウム・カルシウム・マグネシウムなどの陽イオン組成比を持っていたと制約できた。

陽イオンの組成は制約できたものの、陰イオンの組成はスメクタイトのみからではわからない。Gaucher 博士は、粘土岩中の間隙水を直接抽出することにより硫酸イオンや塩化物イオン濃度の見積もりを行っている。しかし、現在の火星ゲールクレータの堆積物中には間隙水が存在しないので、この方法の適用は不可能である。

一方、ゲールクレータ堆積物には普遍的に硫酸カルシウムの存在が認められている。硫酸カルシウムは比較的溶解度が高く、硫酸イオンの溶解度制限固相と考えることができる。堆積物が接触する溶液が硫酸カルシウムと

表1 Yellowknife Bay 堆積物間隙水の水質成分表

	John Klein	Cumberland
Na (mol/kg)	0.085-0.24	0.094-0.12
K (mol/kg)	0.0025-0.018	0.0014-0.0044
Mg (mol/kg)	0.0046-0.11	0.035-0.060
Ca (mol/kg)	0.022-0.12	0.024-0.045
Cl (mol/kg)	0.072-0.59	0.11-0.25
SO <sub>4</sub> (mol/kg)	0.025-0.14	0.044-0.072
ΣCO <sub>2</sub> (mol/kg)	0.0019-0.041	0.0023-0.016
Fe (mol/kg)	0.00024-0.038	0.00012-0.0058
pH	6.7-7.3	6.9-7.3
P <sub>CO<sub>2</sub></sub> (mbar)	6-130	6-40

平衡にあったとするなら、スメクタイトの層間陽イオン組成から制約された溶液のカルシウム濃度に基づき、硫酸イオン濃度を制約することができる(図1)。また Yellowknife Bay 堆積物中の赤金石は塩素含有型であり、これを生成する水質は塩素タイプ、すなわち塩素が主要な陰イオン種であったと推定されている<sup>10)</sup>。

以上のスメクタイト層間陽イオン組成、二次鉱物組成に基づく制約を基に化学平衡計算を行うことで、火星ゲールクレータに35~40億年前という太古の昔に存在していた水の主要溶存成分(ナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウム、鉄、硫酸イオン、塩化物イオン濃度)を推定することに成功した。

表1に John Klein および Cumberland の掘削サイト試料より復元された主要溶存成分濃度の比較を示す。すべての水質成分について、推定された濃度範囲には重複が認められ、カリウムをのぞくと Cumberland により推定された濃度範囲はいずれも John Klein において推定された濃度範囲の間にはいる。Cumberland と John Klein の間距離は約1mと近接しており、間隙水組成に有意な差が認められないのは妥当といえる。

### 太古の水の pH は 7 前後

次に、もう一つの水質を特徴づけるパラメータである pH を復元しよう。炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)などの炭酸塩鉱物は地球表層環境には普遍的に認められる物質である。地球上の湖沼堆積物には炭酸塩鉱物が含まれることもあれば、含まれないこともある。堆積物における炭酸塩鉱物の存否を決める最も重要な因子は pH である。アルカリ性の湖水は炭酸塩鉱物の存在に好適な条件であり、陸から供給される炭酸塩鉱物は溶解せず、場合によっては湖水環境で析出する。一方、中性から酸性条件では供給される炭酸塩鉱物は溶解し、湖水から析出することもない。Yellowknife Bay 堆積物からは炭酸塩鉱物は認められておらず、カルシウムの塩は硫酸塩として存在している。そこで、本研究では、Yellowknife Bay 堆積物のカルシウム塩が硫酸塩であることを使って pH および溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の制約を試みた。

図4は pH と全溶存 CO<sub>2</sub> 濃度(ΣCO<sub>2</sub> 濃度と記述。水

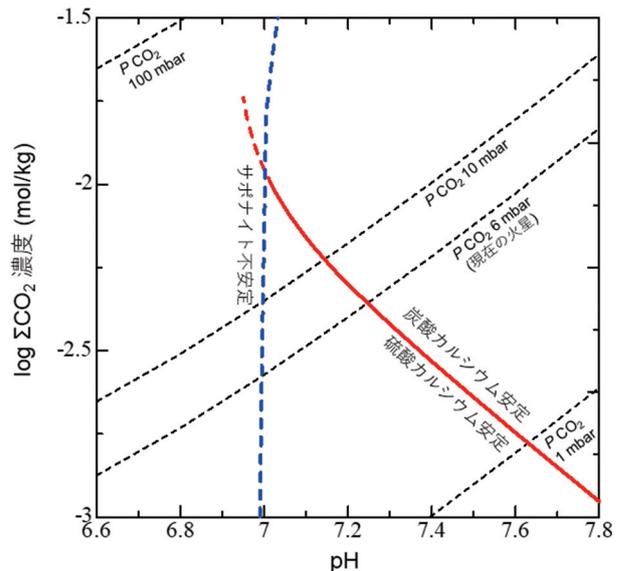


図4 二次鉱物の安定性に基づく pH 復元

に溶存する H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 濃度の総和を示す)の関数とした炭酸カルシウムと硫酸カルシウムの安定領域を示す。計算に必要なカルシウム濃度と硫酸イオン濃度は Cumberland で見積もられた平均濃度を用いている。高い pH および高い ΣCO<sub>2</sub> 濃度で炭酸カルシウムが安定に存在し、低い pH および ΣCO<sub>2</sub> 濃度では硫酸カルシウムが安定に存在することがわかる。間隙水と大気が断絶されていないとするなら、ΣCO<sub>2</sub> 濃度は pH と大気 CO<sub>2</sub> 分圧によって一意に決まる。

現在の火星の CO<sub>2</sub> 分圧は 6 ミリバールである。火星大気 CO<sub>2</sub> 分圧は太古の時代から現在にわたって長期的に減少したことが推定されており、現在の CO<sub>2</sub> 分圧は過去の時代における下限と考えることができる。CO<sub>2</sub> 分圧の下限が定まると炭酸カルシウムが生成しない条件から pH の上限が決まり、その値は pH7.2 と制約される。

次に pH の下限を考える。前述のようにスメクタイトの鉱物種は鉄サポナイトと考えられている<sup>7)</sup>。鉄サポナイトは低 pH 条件では溶解度が上昇し、構造に含まれる鉄が溶出する。鉄は酸性条件では陽イオンであるので、スメクタイトのイオン交換に関与する。図4の点線より左(低 pH)の領域は、サポナイトから溶出した鉄がスメクタイト層間に推定された上限値を超えて導入される pH 条件を示す。

したがって点線に相当する pH は溶液の取りうる下限に相当し、その値は pH7 程度と制約される。図4の例では Cumberland の平均水質を用いたが、水質の取りうる範囲を考慮し pH および溶存 CO<sub>2</sub> 濃度を推定した結果を表1に示す。

## VI. 復元した水質に基づく 初期火星古環境の描像

このように、太古の火星に存在した水の水質復元は、さまざまな二次鉱物に残された複雑な証拠群を、まるでジグソーパズルのピースを組み合わせるように、丁寧に一つ一つ積み上げていくことによって初めて可能となる。では、ジグソーパズルが組み合わさったときに見える全体像ともいえる、水質を反映する初期火星の古環境は一体どのようなものであったのだろうか。

まず、後期流体が流入した後の、間隙水の消失過程を制約することができる。堆積物と接触していた液体の水は最終的には消失したはずであり、火星環境で液体の水の消失には2通りの道筋があると考えられる。一つは温暖・乾燥条件において、水が完全に蒸発することで消失した道筋であり、もう一つは寒冷・乾燥条件において液体の水が凍結し、引き続き昇華することで消失した道筋である。いずれの道筋でも蒸発や凍結に伴い液体中の塩濃度は上昇することが予想される。

### 乾燥寒冷で水が失われた

一方、前者の場合、液体の水は消失直前まで堆積物と接触するため、堆積物に記録される塩濃度は塩化ナトリウムの飽和濃度近くまで上昇することが推測される。後者の場合、逆に水の凍結は水と堆積物の境界から始まるため、堆積物には凍結直前の水質が記録されることが予想される。

復元した間隙水のナトリウム濃度は0.1~0.3 mol/kgであり、塩化ナトリウムの飽和濃度(0℃において9.6 mol/kg)よりはるかに低い。そのため、液体の水の消失は後者の道筋、すなわち乾燥寒冷状態での凍結乾燥によって起きたと結論づけることができる。このことは、ゲールクレータ内の堆積物に後期流体が供給された後、それが失われたときには、現在の火星と変わらない乾燥寒冷な環境であったことを示唆する。

では、ゲールクレータ内に湖があったときの水環境はどのようなものであったのだろうか。ゲールクレータ堆積物の凍結直前の間隙水には湖沼堆積物の堆積時に間隙にトラップされた湖水と、堆積後の後期流体の双方が寄与していると考えられる。後期流体によって生じたと考えられる堆積物中の脈は硫酸カルシウムより構成されている一方、塩化ナトリウムをはじめとする不純物はほとんど含まれておらず、後期流体のナトリウムや塩素の濃度は低かったことが推測される。

われわれが復元した間隙水は比較的高いナトリウムおよび塩素濃度を示すが、後期流体にナトリウムや塩素が含まれていなかったことから考えると、これらは堆積物中にトラップされた湖水を起源とすると考えられる。湖沼が消失した後の堆積物には、間隙に塩化ナトリウムが

塩として残されるはずである。その後にはほぼナトリウムや塩素を含まない後期流体が間隙を満たし、塩を溶解させたならば、その塩濃度は元々の湖水に含まれるナトリウムおよび塩素の濃度と仮定できる。

復元された水質は、pHが中性で、塩分は地球海水の1/3程度、主な溶存成分は地球の海と同じナトリウムと塩素であり、これ以外にもマグネシウムやカルシウムなどのミネラルも多く含む。また堆積物には酸化状態で生成する赤金石と、還元状態で生成する鉄サポナイトが混じりあって存在しており、間隙水-堆積物の系は酸化還元非平衡状態にあったことから生命が利用できるエネルギーも存在していたことが推測される。間隙水の水質は、強酸や強アルカリ、高塩分といった生命を害するものではなく、生命の生存に極めて好適なものといえる。このような水質は、湖水-湖沼堆積物-後期流体の化学的相互作用によってはじめて達成されたと考えられる。

### 火星が一時的に温暖化し、その時に湖が生まれた

初期火星には液体の水が存在したが、そのときの気候がどのようなものであったのだろうか。さらにその温暖な時期はどのくらい維持されたのだろうか。これらの問いは、火星における生命存在可能性にも直結する重要な疑問である。

理論モデルによると、35~40億年前の光度がまだ低い太陽の下、重力が小さく大気を失いやすい火星において、長期に温暖気候を保つことは難しいという結果もあるが、これを実証する地質・地球化学的証拠は乏しい。本研究ではさらに、初期火星に存在した湖の塩濃度を利用して当時の気候の制約を試みた。地球上での湖水分類に基づくと、ゲールクレータ湖は低塩分の塩湖に相当する。地球上の塩湖は多くの場合、流出河川を持たない閉塞湖である。表面に残された地形から、ゲールクレータも流入する河川はあるものの、流出する河川のない閉塞湖であったことがわかっている。湖には、流入する河川などに溶けたわずかな塩分やミネラルが、水と共に供給される。

一方、流出河川のないゲールクレータ湖では、湖面から水が蒸発することによって、水の収支バランスが取れている。しかし、蒸発は水のみを失わせるため、供給された塩分やミネラルは湖に残され、長い期間をかけて濃縮されることになる。湖が形成されていた時期は、液体の水が大量に存在できる程度に温暖であり、塩湖化していたことから半乾燥気候にあったことが推測される。

このような気候は初期火星ではどのくらいの期間維持されたのだろうか。湖中の塩の蓄積量はその存在期間に関係づけられる。湖内において水の流入量と蒸発量が定常状態にあるのであれば、単位時間当たりの蒸発量は流入量に等しい。

本研究では流入水のナトリウム濃度に地球上での玄武

岩中地下水のナトリウム濃度を仮定し、火星気候モデルにより得られた時間当たりの蒸発量を利用することで、湖水のナトリウム濃度を達成するのに必要な水循環の継続期間を見積もった。その結果、復元された塩分になるためには、初期火星に100万年程度の温暖期が生じ、その期間にわたって湖に塩分が運ばれ、濃縮される必要があることが分かった。つまり、35~40億年前の火星は億年スケールで温暖湿潤な気候が継続していたわけではなく、基本的には寒冷な惑星であり、おそらく火山活動が活発化するような時期に、100万年程度の間欠的な温暖期が何度か生じるような気候であったのだろう。

ゲールクレータの湖は、そのような温暖期に一時的に生じた多くの湖の一つであったと推測される。この結果は、長期に火星を温暖に保つのは難しいという上記の理論的な予測を支持するものである。

寒冷期と温暖期を繰り返す初期火星の表層は、生命にとっては快適な環境ではなかったのかもしれない。しかし、このような気候変動は、湖の溶存物質の濃縮と還元が繰り返される場を提供するという意味において、生命の誕生にとって重要だったのかもしれない。実際、ゲールクレータの湖の水質は、ナトリウムだけでなく、多くのミネラルも濃縮していることを示している。このような濃縮と還元が繰り返される場は、有機物の重合・高分子化にも有利なため、地球生命誕生の場の候補とも考えられている。

本研究はかつて液体の水が存在したゲールクレータが、化学進化や生命の誕生にとっても適した場である可

能性があることを示唆している。

#### — 参考資料 —

- 1) K. Fukushi et al., Appl. Geochem. 25, 1120 (2010).
- 2) K. Fukushi et al., Environ. Sci. Technol. 47, 12811 (2013).
- 3) K. Fukushi and T. Fukiage, Environ. Sci. Technol. 49, 10398 (2015).
- 4) M. Y. Zolotov and M. V. Mironenko, J. Geophys. Res. 112, E07006. (2007).
- 5) E. C. Gaucher et al., Geochim. Cosmochim. Acta 73, 6470 (2009).
- 6) B.L. Ehlmann et al., Nature 479, 53 (2011).
- 7) D.T. Vaniman et al., Science 343, 1243480 (2014).
- 8) E.B. Rampe et al., Geochemistry, in press.
- 9) K. Fukushi et al., Nat. Commun. 10, 4896 (2019).
- 10) T.S. Peretyazhko et al., ACS Earth Sp. Chem. 3, 314 (2019).

#### 著者紹介



福士圭介 (ふくし・けいすけ)

金沢大学環日本海域環境研究センター  
(専門分野・関心分野)環境科学・地球科学・水惑星学



関根康人 (せきね・やすひと)

東京工業大学地球生命研究所  
(専門分野・関心分野)惑星科学・アストロバイオロジー・地球惑星進化学・水惑星学



## 書籍販売のご案内

### ■『放射線遮蔽ハンドブック - 応用編 -』

一般社団法人日本原子力学会 「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会編

A4判 420ページ(予定), CD-ROM付 ISBN978-4-89047-173-7, 価格 5,500円(税込・送料別)

「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会では、4年の歳月をかけて「放射線遮蔽ハンドブック - 基礎編 -」の続編出版にこぎつけました。内容は以下の通りです。

1章「概要」、2章「設計手順および計算の選択ならびに注意点」、3章「高度な計算手法」、4章「ベンチマーク実験と解析」、5章「原子力施設の遮蔽設計例」、6章「RI、加速器施設の遮蔽設計例」、7章「施設の放射化」、付録1~5には各種データ、コード利用のための検証問題集などを収録しています。

ご購入は日本原子力学会ホームページ  
書籍販売のページよりお申し込みください  
<http://aesj.net/hp/>



よくわかる PRA  
～うまくリスクを使えるために～

## 第2回 リスクと不確かさ

東京都市大学 牟田 仁,  
東京大学 糸井 達哉

確率論的リスク評価(PRA)より得られるさまざまな知見や情報が原子力発電所や原子力関連施設の運用に関する意思決定に有用であることは明白であるが、一方で確率論に基づくリスク評価に本質的に付随する不確かさの扱いは非常に難しい。今回は、まずPRAの不確かさについて解説し、意思決定への活用に関係する安全目標との関係や不確かさがもたらすリスク情報活用にかかる課題について述べる。

**KEYWORDS:** *Uncertainty, Risk, Aleatory Uncertainty, Epistemic Uncertainty, Safety Goal, Risk-informed Regulation.*

## I. 不確かさとは何か？

原子力発電所や原子力関連施設の確率論的リスク評価(PRA)で使用されるパラメータ、データおよびモデルは本質的に不確かさを持っている。PRAにおいて、これらを積み重ねた定量評価の結果である炉心損傷頻度(レベル1PRA)や格納容器機能喪失頻度(レベル1.5PRAあるいはレベル2PRA)の値は、確率分布の平均値とばらつきの大きさとして表現される。このばらつきを不確かさと呼ばれる<sup>1)</sup>。不確かさには、後述のように定量的に表現できないものも含まれることから、PRAにおける不確かさは不確かさに包含される概念であり、不確かさが上位概念にあたると言える。

一般に、ばらつきとは統計的な誤差を表すこともあるが、PRAの定量評価の結果における不確かさは統計的な誤差とは明確に区別されるべきものである。不確かさは確率論的リスク評価を構成するパラメータ、データおよびモデルに起因するものである。そもそもPRAを実施する解析者がこれらの全てに関して一点の曇りのない知見を有していれば不確かさは一切存在しないのであるが、不幸にして全てのことに十分な知見を有することは不可能であり、結果として実態がよく分からないものはモデル上もよく分からないと表現せざるを得ない。

ここで、「よく分からない」というのは、例えば、故障

率等のパラメータがどの位変動し得るか、データはどの程度確からしいのか、モデルは実際の事象をどの程度精度良く表しているのか、ということに対するものであり、これが不確かさと呼ばれるものである。つまり、不確かさとは、PRAにおいてパラメータ、データおよびモデルは解析者にとってどのように捉えられているかを表しているものである。従って、不確かさは統計的な誤差を表すものではない。

例えば、機器の故障率は、平均的にどのくらいの発生率で故障しているか、またこの故障の発生率は統計的にどのくらいの幅でばらつくのか、というように表される。故障率は、実際の実務では整備された故障率データベースを用いることが多いが、PRAの実施基準<sup>1, 2)</sup>においては、運転経験データを基に統計的に算出され、どのデータに基づきパラメータを算出するか、パラメータはどのような確率分布をしているか、データ件数が少ない場合はどのような想定に基づきパラメータを算出するか等、解析者が判断しなくてはならない。これは、すなわち解析者の不確かさの解釈に他ならない。

またモデル化のプロセスにおける例として、地震による応答の相関のモデルをどのように考えるか、具体的には実際の事象を解析モデルで表し切れない部分をどう扱うか、という点にも解析者のモデルの捉え方が込められており、これも不確かさとなっている。

確率論に基づくリスクはあくまで未来予測であり、一点で決まる正解値はない。不確かさも含めてリスクである。未来に生じ得る事象を適切に予測するためには、この不確かさの考え方は不可欠である。次章ではこの不確かさの分類について述べる。

*For Better Understanding of PRA – Guidance for Better Usage and Application of PRA (2) ; Risk and Uncertainty* : Hitoshi Muta, Tatsuya Itoi .

(2020年2月4日 受理)

■前回タイトル

第1回 確率論的リスク評価の技術課題

## II. 現状の PRA における不確かさ

現状の PRA の不確かさは大きく物事のランダム性に基づく偶然的な不確かさ (Aleatory uncertainty) と知識不足に起因する認識論的不確かさあるいは不確かさ (Epistemic uncertainty, 以降、認識論的不確かさと呼ぶ) とに分類できる<sup>1)</sup>。偶然的な不確かさは、例えば機器故障等の事象の発生 の偶発性であるが、PRA はランダムプロセス (確率過程) の明示的モデルであり、従って偶発的な不確かさをモデル化したものと考えられる。一方、認識論的不確かさは、PRA モデルにおいてプラント挙動や機器故障等の事象の表現に関する認識的な不完全性から生じるものである。

認識論的不確かさはさらに以下のように分類できる (図 1<sup>1), 3)</sup>。

- 1) データ不足による不確かさ
    - モデル上のパラメータの値が、データ不足によって 1 点に定められないことによる不確かさ
  - 2) モデルの不確かさ<sup>i</sup>
    - モデルが現実を単純化していることによる不確かさ
  - 3) 事象の理解の不完全性による不確かさ<sup>i</sup>
    - ① 既知だが未考慮による不確かさ<sup>i</sup>
      - リスクへの影響が小さいと判断して無視していることによる不確かさ
      - 影響の評価がなされていないことによる不確かさ
    - ② 未知の要因による不確かさ<sup>i</sup>
      - われわれが予想していない事故シナリオが存在しうることによる不確かさ
- 以上によると、偶然的な不確かさおよび認識論的不確かさのうち、データ不足による不確かさのように定量的に捉えられるものと、認識論的不確かさのうち、モデルの不確かさや事象の理解の不完全性による不確かさのように半定量的あるいは定性的にしか取り扱えないものが存在することになる。また、未知の要因による不確かさのように、努力しても必ずしも分からないもの、実際の事象が

発生して初めて理解できるものもある。このようなことから不確かさを含む不確かさは扱いが難しく、PRA の実施においてはしっかりと分析・検討すべきことが多い。

## III. 安全目標と PRA

### 1. 安全目標とは

原子力発電所を運用する事業者は、発電所が果たす社会的役割に基づき、安全性を含む発電所の運用にかかる目標を設定し、実際の性能との乖離を把握しつつ、改善を含めた継続的なマネジメントを行う必要がある。規制機関は、そのうち、安全性に関わるものについて、「どの程度安全であれば十分安全であるか」を判断するにあたって参照すべきレベルを、社会情勢なども鑑みて、安全目標として示すことが求められる。安全目標は、規制基準の策定や審査などにあたっても参照されるべきものである<sup>4)</sup>。具体的には、現行の規制により達成される安全性と安全目標を比較することで、社会的に受容される水準にあるかどうかを判断するとともに、両者の乖離を把握・認識し、規制基準や審査の改善に資することなどの役割を担う。また、どの程度の規模の自然事象に対して安全規制すべきかを議論する際の基盤ともなる。

安全目標は、社会が受容可能なリスクレベルを定性的、定量的に設定したものである。つまり、安全目標は社会との約束事である<sup>5)</sup>。安全目標の議論においては、その施設が生み出す社会的な便益の大小、事故のリスクの大きさ、経済的な実現性、選択肢の有無などが勘案される<sup>6)</sup>。つまり、社会が示すさまざまな「価値」を考慮し、公衆の関心事を取り入れる努力が欠かせない<sup>5)</sup>。

国が定める安全目標について、わが国では、原子力安全委員会 (当時) が平成 15 年 12 月にまとめた中間とりまとめ<sup>7)</sup>に加えて、平成 25 年 4 月 10 日原子力規制委員会における「発電用原子炉については、事故時の Cs137 の放出量が 100TBq を超えるような事故の発生頻度は、100 万炉年に 1 回程度を超えないように抑制されるべきである (テロ等によるものを除く) ことを、追加するべき

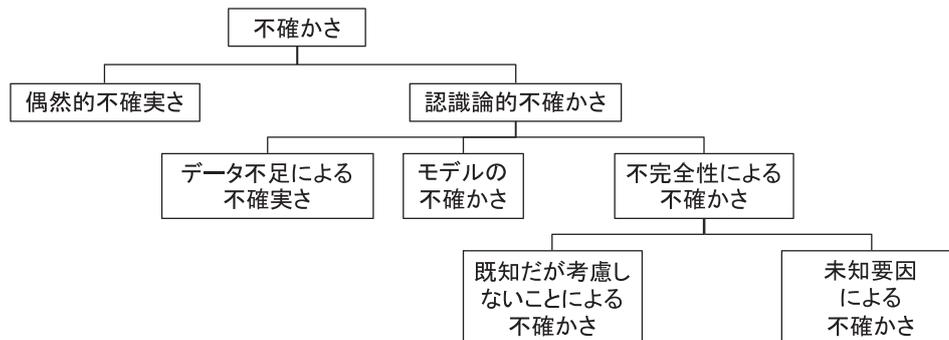


図 1 不確かさの分類

<sup>i</sup> 参考文献 1) では全て「不確かさ」と表記される。

であること。」という決定事項があるが、規制に関わる正式に決定された安全目標を有しない数少ない国であるとされる。

## 2. 原子力発電所が安全目標に適合しているかを判断する目安

安全目標を原子力発電所およびその設備の設計や運用におけるリスクマネジメントに活用するにあたっては、具体的なリスクマネジメント活動において参照するための代替目標(「性能目標」とも呼ばれる)を適切に設定することが求められる。定量的な安全目標に対応する代替目標として、CDF(炉心損傷頻度)やLERF(大規模早期放出頻度)、CFR(格納容器機能喪失頻度)などの数値が用いられる。

わが国では、原子力安全委員会(当時)が平成15年12月にまとめた中間とりまとめに対応するものとして、CDF(炉心損傷頻度)とCFR(格納容器機能喪失頻度)を指標として併用する案が提示されている<sup>8)</sup>。(図2)

## 3. 安全かどうかの判断

原子力発電所の安全性は、発電所やそれに関わるさまざまな人や組織の活動の総体として実現する。よって、安全かどうかの判断も多面的な尺度を用いて議論される必要がある。そのため、PRAの結果に加え、安全余裕、決定論的手法による深層防護の有効性評価の結果、運転経験、組織的要因など、安全に関連する多面的な尺度を用いて議論することが一般的である。

PRAでは、さまざまな知見が集められ、吟味され、統合される形で評価されるべきものである。そのような結果として得られるリスク情報は、上記の判断を行う上で最も重要な要素のひとつといえる。PRAから得られる結果のひとつであるCDF(炉心損傷頻度)、CFR(格納容器機能喪失頻度)、ソースターム等の評価結果についても、プラントのその時点のリスクの大きさを把握し、設

個人死亡率 (1/年)	身近なリスク源 <sup>ii</sup>
$1 \times 10^{-2}$	全死因 ( $7.7 \times 10^{-3}$ ) 疾病合計 ( $7.1 \times 10^{-3}$ )
$1 \times 10^{-3}$	
$1 \times 10^{-4}$	不慮の事故合計 ( $3.1 \times 10^{-4}$ )
$1 \times 10^{-5}$	安全目標 ( $10^{-6}$ 程度)
$1 \times 10^{-6}$	

図2 安全目標案(参考文献7)を基に構成)

<sup>ii</sup> 「人口動態統計」(厚生労働省)2001年データより。

計や運用などが概ね妥当であるか否かを上述した形で多面的に判断する際のひとつの指標として有効に活用できる。ただし、PRAから得られるこれらの数値には、前述したPRAの性質上、その結果に不確かさが含まれるため、不確かさ幅についても定量的に見て、判断の確からしさを把握する必要がある。

## IV. リスク情報活用における不確かさの位置付け

ISO31000が示すような一般的なリスクマネジメントにおいては、システムやプラントのリスクを把握、リスク目標(値)との関係からリスクの低減の必要性を判断、必要な措置を採りその改善効果を確認するといったプロセスを経る。原子力発電所や原子力関連施設を対象としたリスク情報を活用した運用において、PRAがもたらす情報を参考にさまざまな意思決定を行う際にはリスクの目標が必要であり、前述の安全目標あるいはその代替目標(性能目標)がこの役割を持つ。この場合、CDFやCFRといったリスク情報における不確かさをどう解釈するかが問題となる。

安全目標値との直接比較が必ずしも必要でない、対策前後の相対的な評価によるリスクの低減効果の確認であれば、両者の評価結果の不確かさの元は同じであるため、判断の確からしさの確保は比較的容易と考えられる。しかしながら絶対的な物差しとの比較を行わずして活用されるリスク情報は、高度な安全が求められる原子力発電所等の運用への適用は考えにくく、上記のような相対的なリスク改善の確認程度の利用方法にとどまると考えられる。

前述のように、不確かさは解析者の確信の程度を表現するものであり、定量的や定性的に分からないところを明確に表現したものである。従って、安全目標や性能目標との比較において、不確かさを織り込んだ判断を行うための考え方が必要である。

旧原子力安全委員会で議論された安全目標案<sup>7)</sup>はある程度の幅を持たせた目標値を提示しており、これが不確かさに対する配慮であると考えられるが、PRAの結果が持つ不確かさあるいは不確かさとの整合については明確にされていない。目標値に不確かさという曖昧さを持たせるよりは、不確かさの要因が明確であるPRAの評価値に幅を持たせる方が合理的である。これは、前述のように不確かさの元となるデータおよびパラメータの不確かさが定量的に明示されていること、もう一方のモデルの不確かさに代表される定性的な不確かさは工学的な判断に基づく場合が多く、一般的にCDFあるいはCFR評価結果の不確かさに織り込まれて表現されていることによる。

この観点から、内的事象のレベルIPRAのようにデー

タやパラメータが豊富にあり、かつモデルの整備が成熟している分野では、不確かさが比較的小さく、不確かさの中身がわかりやすいと言える。このような場合は、定量的に評価されるPRAの不確かさが確率分布の信頼区間で表され、例えば95%の信頼区間と目標値との比較によって判断や意思決定を行うことは合理的と考えられる。

しかしながら、認識論的不確かさの寄与が相対的に大きい、地震のような自然現象を含む外部ハザード等を対象としたPRAでは、CDFあるいはCFF評価結果のばらつきが大きく、内的事象のレベル1PRAを参考にする場合と同様な判断は難しい場合も考えられる。更に、未知の要因も含む不確かさに対しては、保守的な解析を行ったり、設計余裕を十分に考慮したりすることで対処をしていくべきであり、この点においては深層防護の重要性や、不確かさについて十分な分析を行うことも含め確率論的アプローチと決定論的なアプローチとの関連性が増していく部分である。そのような意思決定を合理的に行うためには、PRAにおいても、CDFやCFFなどの定量値に加えて、裕度に関する情報、事故シナリオに関する情報なども含めた多様な情報を活用することが、有効であると考えられる。

## V. 最後に

安全性を包括的に分析し、“想定外”を可能な限りなくすという観点からは、不確かな事象を取り扱うリスク論の導入は不可欠であるが、同時に、リスクに不確かさはつきもので、切り離して考えることはできない。

データ不足による不確かさなど、合理的な範囲で努力できるものは愚直に努力することに意義がある。既知ではあるが、モデル化できていない部分は技術の進歩あるいは実務における取り扱いに関する進展に期待がかかる部分であり、今後、研究も含めた検討をすべき分野であると言える。特に、未知領域をどう捉えるか、は大きな

課題であり、研究者が最も活躍すべき範囲であろう。

### － 参考資料 －

- 1) 日本原子力学会, 「原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準: 2013(レベル1PRA編)」, 2013年.
- 2) 日本原子力学会, 「原子力発電所の確率論的安全評価用のパラメータ推定に関する実施基準: 2010」, 2010年.
- 3) USNRC, Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making (NUREG-1855 rev.1), March 2017.
- 4) 原子炉安全専門審査会・核燃料安全専門審査会, 「原子力規制委員会が目指す安全の目標と、新規制基準への適合によって達成される安全の水準との比較評価(国民に対するわかりやすい説明方法等)について」(平成29年2月1日付の指示に対する回答), 平成30年4月5日.
- 5) 弥生研究会 安全目標に関する研究会, 「『安全目標』再考-なぜ安全目標を必要とするのか?-」, 2018年3月.
- 6) 日本学術会議, 「報告 工学システムに対する社会の安全目標」, 平成26年(2014年)9月17日.
- 7) 原子力安全委員会安全目標専門部会, 「安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ」, 平成15年12月.
- 8) 原子力安全委員会 安全目標専門部会, 「発電用軽水型原子炉施設の性能目標について-安全目標案に対応する性能目標について-」, 平成18年3月28日.

### 著者紹介



牟田 仁 (むた・ひとし)

東京都市大学

(専門分野/関心分野) 確率論的リスク評価, シビアアクシデント, システム信頼性, 原子力社会学



糸井達哉 (いとい・たつや)

東京大学

(専門分野/関心分野) 原子力安全, 外的事象に対するリスク評価

## 可逆性を担保する回収可能性に関する技術的対応と 性能評価に向けた工学技術の役割 ～(2)より確からしい性能評価に向けた工学技術の役割～

原子力環境整備促進・資金管理センター 江守 稔

2019年12月に開催された原子力環境整備促進・資金管理センター(以下、「原環センター」という。)の研究発表会において標題の観点から取りまとめて紹介された調査研究成果を2回に分けて報告する。本稿では第2回として、副題の性能評価の実施に向けた工学技術の役割を扱う。

原環センターでは資源エネルギー庁委託事業の一環として、地層処分事業における製造・施工技術に係る品質保証体系やモニタリング技術の整備に取り組んでいる。閉鎖後長期の安全性の確保が求められる地層処分施設を対象とした品質保証体系の構築という工学的な取組の具体化に向けて、相互に関連する品質保証、モニタリングならびに性能確認などの取組を、施設の最終閉鎖の判断に資する取組(セーフティケース開発におけるより確からしい性能評価の実施に資する取組)と位置付けて整理し、今後の研究開発の方向性について考察した<sup>1)</sup>。

### I. はじめに

隔離、閉じ込め、多重安全機能ならびに受動的手法といった地層処分が有する安全確保の概念が国際的に共有されていること、また、長期に及ぶ処分事業の実施過程において地層処分の信頼性を段階的に向上させるという技術的な観点等から事業を段階的に進めることが提案されていることを第1回目で紹介した。このような地層処分の概念や特徴を踏まえれば、閉鎖後の長期安全性は人の能動的な管理に依存しないものとなるが、その反面、閉鎖に至るまでの操業段階における人工バリア等の製作・施工に係る品質の確保や状態把握のためのモニタリングといった工学的な取組が重要となる。

これらの取組に関する先行的な検討や共同研究などが諸外国でも精力的に進められているものの、地質環境や処分概念(地下施設の構成等)の違いや各国の規制制度の違いに加え、品質保証やモニタリングという用語が幅広い取組を想像させることもあり、個々の用語ならびに取組の範囲や役割など、その捉え方に課題も見受けられる。そのような状況を踏まえ、諸外国の検討事例などを概観しつつ、品質保証やモニタリングの考え方や役割の整理を試みた。そのうえで、わが国の地層処分施設の製造・施工に係る品質保証体系の整備・構築に向けた技術的対応の考え方や研究開発の方向性について考察した。

*Technical approach associated with the adoption of reversibility and retrievability, and the role of engineering in contributing to performance evaluation (2); Role of engineering in contributing to performance evaluation: Minoru Emori.*

(2020年3月10日 受理)

### II. 地層処分施設の安全性の示し方

品質保証などの工学技術の役割を考察するうえで、これらの取組で得られる情報が、どの様に処分場の安全性などの評価に反映されるのかを理解しておく必要がある。地層処分施設の安全性を立証するための知見や論拠等を体系化・構造化するための手法として、「セーフティケース」と称される手法が開発されている。

#### 1. 段階的な進め方とセーフティケース開発

セーフティケース開発に関する考え方の整理に向けた議論が1990年代より国際機関によって進められてきた<sup>1)</sup>。その開発の目的や特徴ならびに役割は表1のように要約整理できる<sup>2,3)</sup>。表内の「処分事業の主要な節目」とは、研究開発や概念・戦略決定ならびにサイト選定段階などを含む「操業前段階」、施設の最終閉鎖までの「操業段階」ならびに「閉鎖後段階(閉鎖後に一定の管理期間が含まれる場合がある)」の各節目および各段階に含まれるステップを指す<sup>3)</sup>。現在のわが国の制度で例えると、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が定める段階的な調査ステップの節目ならびに核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律が定める各種の段階的な許認可手続きや定期安全レビューなどがこれらの主なステップと考えることができる。

<sup>1)</sup> 国際機関の主導のもとで1990年代より着手された検討を経て、その概念(構成や要素の定義を含む)や開発の方法論などが経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)や国際原子力機関(IAEA)によって取りまとめられている<sup>2,3)</sup>。

表1 セーフティケース開発の目的・特徴と役割

<p>セーフティケース開発の目的・特徴</p> <p>セーフティケースとは、処分場が安全であるという主張を、定量化し立証するための根拠、解析、論拠等を統合したものであり、処分事業の主要な節目に整備され、段階を追って逐次更新され、成熟してゆくものである。具体的には、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○閉鎖後の処分システムの挙動と性能の理解の実証のために、構造化された追跡可能で透明性のある方法で関連する情報を統合する、</li> <li>○処分施設が人の健康と環境を防護するように機能するという合理的な保証を提供することにより、その安全を実証する、更に、</li> <li>○処分システムの挙動と性能に関する不確実性を特定し、その重要性を解析し、重要な不確実性の管理のためのアプローチを特定する。</li> </ul> <p>セーフティケースの役割</p> <p>セーフティケース開発(各節目における段階的なセーフティケースの整備)によって、上記に加えて、次のような役割が期待されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○処分施設の開発の段階的なアプローチにおける重要な各節目における意思決定を支援する。</li> <li>○処分に関連する課題やテーマについて、規制当局や利害関係者間のコミュニケーションを促進する。</li> </ul>
--

表2 主要国の技術報告書(取りまとめ)の例

国(発行者)	技術報告書の名称等	種別
フィンランド(Posiva社)	2012/TURVA-2012, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiloto, Synthesis	許認可申請(付属書)
スウェーデン(SKB社)	2011/SR-Site, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project	許認可申請(付属書)
米国(DOE)	2008/Yucca Mountain Repository License Application Safety Analysis Report	許認可申請(付属書)
フランス(ANDRA)	2005/Dossier 2005 Argile SYSTHESES, Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation	研究成果報告書
スイス(Nagra)	2002/Project Opalinus Clay Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent	研究成果報告書
ベルギー(ONDRAF)	2001/SAFIR2 Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2	研究成果報告書
英国(NDA)	2010/gDSSC 2010, Geological Disposal, An overview of the generic Disposal System Safety Case	研究成果報告書

## 2. セーフティケースの構造と性能評価の役割

前述のセーフティケース開発の概念を踏まえると、表2に示す諸外国の主要な技術報告書(取りまとめ)は、各国の事業の節目におけるセーフティケースと位置付けることができる。国際機関の取りまとめや諸外国の先行検討事例などを概観すると、セーフティケースは概ね次の

表3 セーフティケースの主要な項目に関する目的や役割に関する分析

構成要素名	目的・役割
処分場の設計 DESCRIPTION OF THE DISPOSAL SYSTEM (DESIGN)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○処分場の構成要素や施設展開方法を定義</li> <li>○閉鎖後長期の安全性が確保できるように、処分場の各構成要素に対して安全機能や性能要件・目標を設定し、設計要件・設計仕様へと展開</li> </ul>
処分システムの性能評価 PERFORMANCE ASSESSMENT	<ul style="list-style-type: none"> <li>○地質環境を含む処分システムの構成要素に関する短～長期の変遷挙動(状態変化や機能変化)について分析・評価を実施(要件や性能目標の達成を確認)</li> <li>○性能評価をととして、処分システムの変遷に関する基本シナリオを具体化(同シナリオに対する要件や性能目標の達成を確認)、併せて、</li> <li>○発生確率の低い事象や許容可能な不確実性を特定</li> </ul>
安全評価 SAFETY ASSESSMENT	<ul style="list-style-type: none"> <li>○性能評価結果を踏まえ、安全規制が要求する安全評価方法(統合/分解アプローチなど)に従い、安全性を示すための指標や基準(リスク基準/線量基準など)を満たすことを示す</li> <li>○安全規制の要求事項や性能評価結果(核種移行パラメータの変遷を含むシステムの機能変化など)を踏まえ、安全評価としてのシナリオ分類や核種移行パラメータの設定などが検討される、併せて、</li> <li>○不確実性の特定およびその管理方法が検討される</li> </ul>

注)参考資料4)に示された解説等を参照して原環センターで分析・整理。

ような項目、①サイトの地質環境、②処分場の設計、③処分システムの性能評価、④シナリオ開発、⑤安全評価を包含している。これらの主要な構成要素の目的や役割は表3のように整理できる。

工学的な取組である処分場の設計手法に関する一例として、フィンランドのPosiva社が示している要件管理システムを用いた設計手順を図1に示す。上位の法規制で規定される要件等から処分場構成要素に関する個々の設計仕様に至るまで、要件を階層的に展開・管理するものである<sup>4)</sup>。要件や仕様の展開・設定の適切性が表3に示す「処分システムの性能評価」を通して評価され、線量基準等の規制要件などへの適合性が「安全評価」で確認されることとなる。

表3に整理したように、性能評価は人工バリアおよび天然バリアの双方の状態や機能の変遷挙動を評価するものである(図2)。フィンランドのように、地質環境を含む処分システムの短期～長期的な変遷挙動を「処分システムの性能評価」と題して安全評価とは別に展開してい

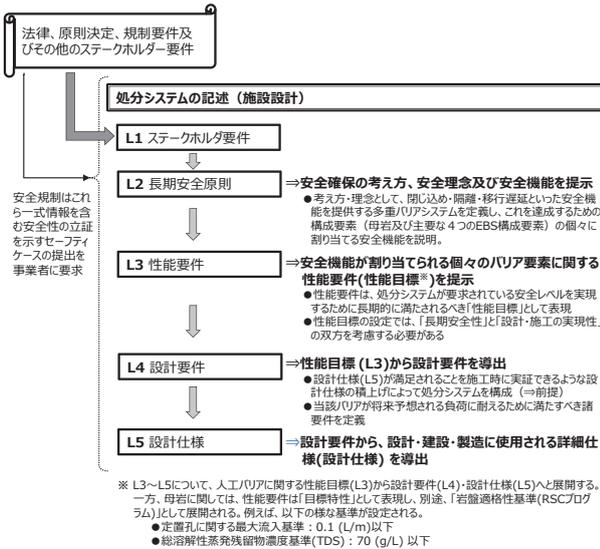


図1 Posiva社の要件管理に基づく処分場の設計手順

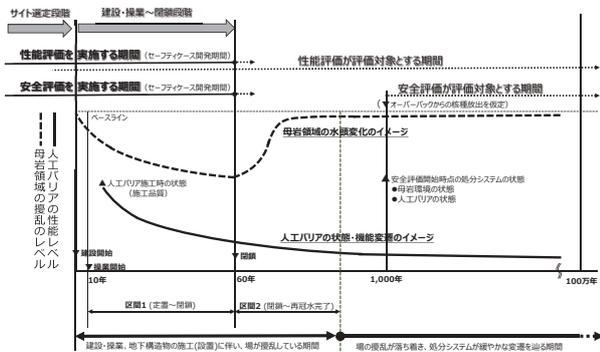


図2 性能評価の実施期間と評価対象の概念

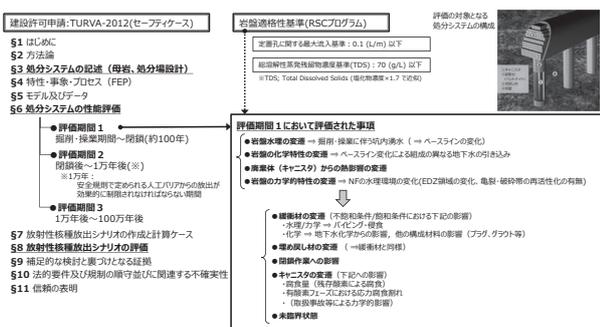


図3 Posiva社のセーフティケースの構成

(出典) 参考資料4)の情報を図式化。右上図は、資源エネルギー庁発行「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について2019年度版」のP39の図より転載

る例(図3)もあれば、これを「変遷挙動」と題して扱う例もある。例えば、フランス(Dossier 2005)では「地層処分場の現象論的変遷」、スイス(Project Opalinus Clay)では「システムの変遷」と題して処分システムの変遷挙動に関する評価結果を取りまとめている。

### III. 品質保証やモニタリングの役割

#### 1. 最終閉鎖判断に資する取組としての考え方

諸外国における先行的な検討を通して、「品質保証」や「モニタリング」ならびにそれらを包含した「性能確認」といったプログラムの概念が検討・具体化されつつある(以下、これらを総じて「一連のプログラム」と称す)。モニタリングについては、事業期間中の安全確保に関連するものを含めて(例えば放射線安全、一般労働安全、周辺環境保全など)、多様な目的や意図に応じた活動を想定し得るが、ここでは地層処分事業に特徴的な取組となる「閉鎖後長期の安全確保」に関連するものを指す。

例えば、米国の規制文書では、これら一連のプログラムを表4のように規定している。また、これらに関する国際共同研究も進められており<sup>ii</sup>、このような諸外国の検討事例を概観すると、一連のプログラムは、必ずしも原位置での直接/間接測定などのモニタリングだけで達成するのではなく、品質保証や別の場所での事前の実験や実証など、多様な取組を組み合わせて達成することが窺える。

表4 米国の規制文書における品質保証や性能確認に関する規定(抜粋要約)

サブパートG: 品質保証(以下「範囲」より)

○地層処分場およびその構造物、システムまたは構成要素が、実際の使用において満足のゆく性能を発揮する点について適切な確信を得るために必要な、あらゆる計画的および系統立った措置。

○品質保証には品質管理が含まれ、この品質管理は材料、構造物、構成要素またはシステムの物理的な特徴に関連する品質保証措置で、材料、構造物、構成要素またはシステムの品質が予め規定された要件に適合したものとなるように管理する手段・措置で構成される。

#### サブパートF: 性能確認プログラム(以下「一般的な要件」より)

- 以下の判断に資するための情報を提供する(「§ 63.131より」)
- ・建設・操業期間中に得られる地下環境(および環境の変化)が、許認可審査で想定された限度内に収まっているか。
  - ・閉鎖後長期にわたりバリア機能の発揮が期待される天然/人工バリアが、意図および予測された機能を果たしているか。
  - 性能確認プログラムは、サイト特性調査中に開始され、最終閉鎖段階まで継続されなければならない。
  - 性能確認プログラムには、要求されるデータを入手する上で適切と考えられる原位置モニタリング、室内試験およびフィールド試験、原位置実験が含まれなければならない。

注) 上表は、米国NRC規則(10 CFR Part 63)より抜粋要約したものの。

<sup>ii</sup> 欧州委員会による研究フレームワークの一環として実施された、MoDeRnプロジェクト(2009~2013年)やModern2020プロジェクト(2015~2019年)など。詳細は同プロジェクトのポータルサイト(<http://www.modern2020.eu/>)を参照されたい。

2. セーフティケースへの反映の考え方

標記を考えるうえで、事業進展に伴いアップデートされるセーフティケースの構成要素の1つである性能評価と一連のプログラムとの関係を整理する。

(1) サイト選定段階における性能評価

操業前段階(建設前の段階)では、地下環境等に関する情報は限定的なものとなる。また、人工バリアを含む地下構成要素の施工も行われていないことから、実際の施工品質(施工実績)は得られていない。ゆえに、この段階における性能評価は、地下環境等に関する限定的な情報や設計ベースでの地下構成要素の施工品質(設計仕様あるいは施工仕様)を前提として、モデルや解析等を主体とした状態予測やシミュレーションによって処分システムの性能評価が行われる。

(2) 建設・操業～閉鎖段階における性能評価

建設・操業段階では、その進展に応じて、地下環境等に関する情報が拡充・詳細化され、地下構成要素の施工品質は施工実績として得ることができる。従前の性能評価の一部を、本段階を通して得られる情報に置き換えることで、より確からしい性能評価を実施することができる。ゆえに、一連のプログラムは、より確からしい性能評価の入力情報を提供するための取組と整理することができる。つまり、図2に示した段階的なセーフティケース開発における性能評価は、一連のプログラムを通して、より確からしい評価とすることができる(図4)。具体的には、これらの運用を通して、次のような情報が拡充・詳細化されることが期待される。

- 地下構成要素の施工品質を施工実績として把握(他の類似環境での事前確認や実証を含む)
- 原位置における地下環境や施工した構造物の変遷挙動に関する、より確からしい予測評価に資するための情報を取得(原位置モニタリングならびに事前の実験や実証によるデータや知見の拡充など)
- 地下活動の進展に応じて地下環境等に関する詳細な情報を把握

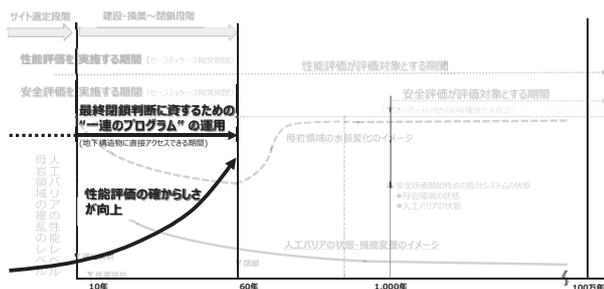


図4 一連のプログラムの役割に関する概念

IV. 一連のプログラムの具体化に向けた技術的対応(研究開発)の考え方

地層処分の候補サイトが具体化した後は、適用する処分場の概念や設計が具体化され、併せて“一連のプログラム”が事業許可申請段階までに開発整備されることとなる。これらの円滑な整備に向けた今後の検討の出発点として、当面の技術的な対応や研究開発の進め方について考察・提案する。

1. 工学的観点からの技術的対応の考え方

今後、わが国に適用可能な一連のプログラムを具体化していくうえで、「品質保証プログラム」と「性能確認プログラム」の2つを切り分けて考える。これらに関する適切な用語や定義が必要となるが、ここではその一案として表5のように整理する。

モニタリングについては、広範な意味や取組を包含するため、何を対象として何を取得するためのものか、表5に示す2つのプログラムのサブ・プログラムとして位置付ける可能性にも留意して、注意深く検討を進めていく必要がある。

より確からしい性能評価に資するという目的を踏まえれば、性能確認プログラムの対象は人工バリアを含む地下構成要素および母岩(ニアフィールド)の双方であり、また、閉鎖後の長期にわたる性能評価に資するものとなるべきであるが、まずは今後の検討や研究開発の出発点として、工学技術(設計、製造・施工)の観点から取り組むべき当面の範囲を次のように提案する(図5)。

- 地下の人工構造物を対象
- 長期にわたる性能評価のうち再冠水に至るまでの期間を念頭(図2を参照)

前者については、人工構造物の変遷挙動に影響する母岩側(ニアフィールドの地下環境)との関係に留意が必要である。後者については、建設・操業～閉鎖に伴う擾乱を経て再冠水に至った段階における処分システムの状態

表5 品質保証や性能確認プログラム等の定義の例

<p><b>品質保証プログラム</b></p> <p>人工構造物を対象として、一定の施工品質(仕様)を確保するための取組。製造・施工プロセス管理によって達成するものもあれば、施工物の現物検査などによって品質を確認することもある。</p>
<p><b>性能確認プログラム</b></p> <p>構築した処分システムの変遷挙動に関する、より確からしい評価(性能評価)に資するための情報を得るための取組。品質保証プログラムをとおして得られた構造物の初期の施工品質(製造・施工実績)に加え、その後の人工構造物の変遷挙動に関する確からしい予測評価のための情報を取得する。性能確認プログラムの対象には、人工構造物と母岩(ニアフィールド領域 +α)の双方が含まれ、それらの変遷挙動の把握のために、原位置でのモニタリングが行われることもある。</p>

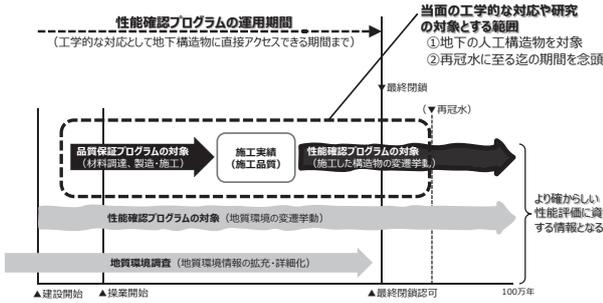


図5 当面の工学的な対応や研究の対象とする範囲

をより確からしく予測評価し、その後の長期にわたる性能評価の初期条件として引き渡すことで、より確からしい性能評価の実施に寄与することを目標とする。

2. プログラムの具体化の方向性と留意点

諸外国における先行的な検討や他分野の事例などを踏まえると、一定の施工品質を確保するための品質保証プログラムを具体化するための参考事例は多く存在する。例えば、近年の一般産業界では、従来の現物確認を伴う「品質規定方式」から、一定の品質レベルの達成が実証された工法で品質を確保する「工法規定方式」への転換が図られつつある。他方、性能確認プログラムは、地層処分固有の取組であり、その具体化に向けて表6に示す2つのアプローチ(技術的対応や研究開発の方向性)を想定し得る。

地層処分分野におけるこれまでの研究開発は、主に方向性1に注力されてきたと推察するが、何をどこまで開発すべきか際限が見えないといった状況も窺える。方向性2では、原位置での測定機器等の導入を伴う取組を最小化することで、機械化・自動化の促進、費用の合理化ならびに閉鎖後管理活動の最小化など、将来の事業実施において多くのメリットを想定し得る。

一方で、2つの方向性には図6に示すようなトレードオフの関係が生じ得る可能性が想定され、また現時点において、いずれの方向にも技術的な制約や課題も存在する。このようなプログラムを最終化する段階では、実施主体や規制当局などの関係者が、トレードオフのバランスならびに技術的な実現性や制約を踏まえて、2つの方

表6 具体化に向けた2つのアプローチ(方向性)

	プログラム具体化の方向性	研究開発の指向性
方向性1	処分場原位置での測定やモニタリングを主体としてプログラムを具体化	原位置測定・モニタリング技術の高度化を指向
	モニタリング技術の高度化 ⇒ 地下原位置で必要な測定が可能 ⇒ 状態予測技術の役割は小	
方向性2	模擬した環境(別の場所)での試験等を主体としてプログラムを具体化	原位置測定・モニタリングに係る活動を最小化した取組の開発を指向
	状態予測技術の高度化 ⇒ 原位置の状態・機能の変遷の予測が可能 ⇒ 原位置測定・モニタリングの役割は小	

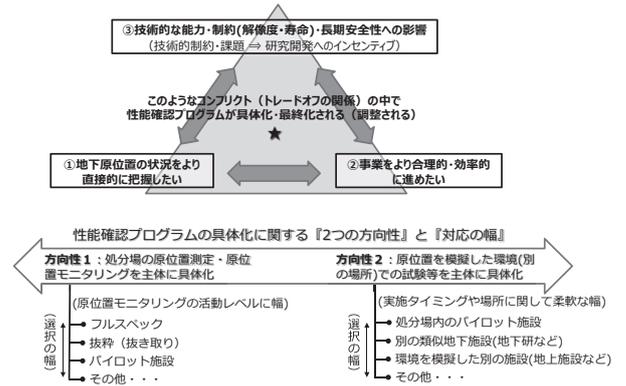


図6 具体化の方向性とトレードオフの関係

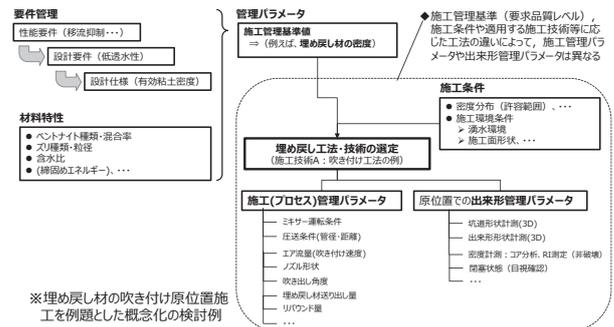


図7 品質保証プログラムの概念化の検討例

向性のいずれかの選択、あるいは両者の相互補完による中間点を模索して、「現実的なプログラム」を調整する必要があることが諸外国の検討動向などから窺える。

3. 研究開発の進め方

前述した特徴を有する品質保証や性能確認プログラムの具体化に向けた研究開発の目的は、適用技術の実現性や制約を示し、現実的なプログラムの最終化に向けた検討や調整を支援することである。当面の研究開発における最初のステップでは、これらに関する理想的なプログラムのイメージを関係者間で共有できるレベルに概念化し、その実現における技術課題を抽出することと考える。

概念化に向けて、例えば、材料調達、地上施設での製造、地下への搬送・施工といったプロセスを対象として構成される「品質保証プログラム」については、他分野における類似のプロセス管理手法や、北欧や米国で整備された地層処分事業に特化した具体的なプログラムなどを先行事例として参照することで概念化が可能である(図7に埋め戻し材の吹き付け施工を例題とした概念化の検討例を示す)。「性能確認プログラム」のうち、方向性1については、特定の処分坑道に多くの測定機器を配置するようなプログラムを検討しているフランスや米国の検討事例が、方向性2については、模擬環境での事前の試験に相当するフィンランドの実証試験の取組事例などを参考にすることができる<sup>iii</sup>。ただし、これらの諸外国の事例を参照する際には、各国特有の地下環境や処分概念の違いに加え、プログラムに対する要求事項(規制要件

など)や成立条件の違いにも留意が必要である。

## V. おわりに

本稿では、原環センター研究発表会での報告内容を原著となった資源エネルギー庁委託事業「平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(地層処分施設閉鎖技術確証試験)」の成果<sup>1)</sup>の一部で補完しつつ紹介した。紙面の都合から本稿での報告は限定的となったが、委託事業の全体成果は参考資料1)に取りまとめているので参照されたい。

## － 参考資料 －

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(地層処分施設閉鎖技術確証試験) 報告書, 2020.
- 2) OECD/NEA, “The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories”, 2013.
- 3) IAEA, Safety Standards Series, Specific Safety Guide No. SSG-23, “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste”, International Atomic Energy Agency, 2012.
- 4) Posiva, POSIVA 2012-12, “Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012”, 2012.

## 著者紹介

江守 稔(えもり・みのる)

本誌, 62[6], p.25(2020)参照.



## From Editors 編集委員会からのお知らせ

－最近の編集委員会の話題より－

(6月2日 第12回 論文誌編集幹事会)

- ・4月16日から5月15日までに英文論文誌に19報の新規投稿があった。
- ・英訳公表事業の出版に関する理事会の了承が得られたことが報告された。
- ・英訳公表事業の進捗状況が報告された。Vol.3の翻訳が進行中である。
- ・各グループの2019年度の活動報告と2020年度の活動方針が示された。
- ・若手編集委員からの英文誌の現状に対する意見聴取結果の概要が報告された。
- ・英文論文審査・査読要領の改訂案を検討した。
- ・各分野別責任者から状況報告があった。
- ・今後の委員会、幹事会等の進め方について意見交換した。

(6月2日 第9回 学会誌編集幹事会)

- ・「福島原発事故から10年」企画の進捗状況について報告があった。コロナ対応についても言及を依頼することも検討中。
- ・来年度編集委員体制と特集号発行に伴う委員増員について改めて説明があった。
- ・巻頭言、時論の提案状況を確認した。
- ・核燃料部会より連載講座の提案書が提出され、内容が審議された。来年から連載開始の予定。
- ・zoomを使用した座談会などの提案が出された。今後前向きに検討していく。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

<sup>iii</sup> フィンランドのPosiva社では、資材供給から施工までの操業作業の実証や処分システムの初期の変遷挙動に係る情報取得を目的として、2016年よりわが国の精密調査施設での活動に相当する原位置実規模実証試験に着手している。

## O J E を用いた原子力規制教育の取組み

大阪大学 北田 孝典, 竹田 敏, 中村 隆夫

大阪大学では、福島事故を踏まえ、原子力安全ならびに原子力規制の基礎基盤を理解した技術者等の育成が強く求められていることを受け、2016年からOJE(On the Job Education)を用いた原子力規制教育に取り組んでいる。OJEとは、工学研究科で10年以上前から実施しているユニークな実践教育手法であり、現場で発生しているさまざまな問題を教員と学生が一緒になって解決する演習を行う。原子力規制教育にOJEを用いることにより、原子力分野だけでなく全ての産業分野において必要とされる社会的規制の基礎を理解した技術者を育成することを本教育の目的としている。

**KEYWORDS:** *Education on Nuclear Regulation, Fukushima Daiichi Nuclear Accident, OJE (On the Job Education), Social Regulation*

### I. はじめに

大阪大学では東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、福島事故という)の教訓を踏まえ、原子力安全ならびに原子力規制の基礎基盤を理解し、原子力施設の安全確保や危機管理、規制等を中心となって推進できる技術者等を養成するため、原子力規制の現場の実態を正確に認識するとともに、原子力産業全体を俯瞰し、将来の原子力安全および原子力規制についてより深く考察できる人材を育成する教育を、原子力規制庁原子力人材育成等推進事業補助金(原子力規制人材育成事業)を受けて2016年度から開始している。

本学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻ではこれまで他大学・研究機関・民間企業を含めた協働体制を構築し、原子力分野の重点教育を実施している。今回、福島事故の教訓を踏まえて、原子力安全や原子力規制を深く理解し、将来を担う人材を育成するため、これまでに構築した人材育成ネットワークを拡充し、規制に係わる法令などを加えた基礎基盤習得プログラムを実施することとした。更に基礎基盤を習得した学生および教員により、OJEを用いた課題探究型のグループ討論および原子力規制機関や原子力事業者などとの意見交換を実施し、合わせて原子力事業所の現場視察研修を行うことで教員と共に現場の知見を深め、更には教育プログラム関係者全員が参加する研究報告会を開催することにより原子力安全および原子力規制についてより深く考察する

*Education Program of Nuclear Regulation by OJE in Osaka University* : Takanori Kitada, Satoshi Takeda, Takao Nakamura.  
(2020年4月10日 受理)

場を設けることとした。

本教育プログラムは2020年度に5年目を迎え、これまで多くの修了生を輩出している。

本稿では、これまで規制教育に中心となって関わってきた、環境エネルギー工学専攻およびフューチャーイノベーションセンター(以下、CFiと言う)の教員が、規制教育プログラムの概要とそのねらい、教育による効果と将来の展望について報告する。

### II. 教育プログラムの概要

#### 1. ねらい

従来、大学における工学教育では、工学技術の利用に関する法令の講義が行われてきたが、法令の基礎となる社会的規制のあり方についての教育は行われてこなかった。

福島事故以降、国の規制組織が見直され、原子力規制の目的として「人と環境を守る」ことが明記されたが、このことこそが「社会的規制」の目的である。原子力分野のみならずあらゆる産業分野において、規制側、被規制側を問わず「社会的規制」についての十分な理解が求められており、少なくとも大学あるいは大学院を卒業するまでに社会的規制に関する基礎的な教育を受けることは、高度な産業社会において工学利用に携わる技術者に必須のことと考えられる。

#### 2. OJEの特徴

OJEとはOn the Job Educationの略で、「具体的な仕事を課題とした学習」の意味として使われている。本学のビジネスエンジニアリング専攻(以下、BE専攻と言う)ではこのユニークな実践教育手法を用いた演習(以

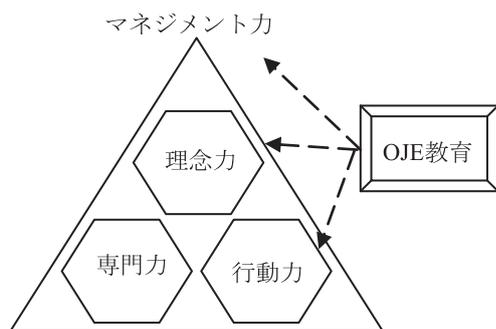


図1 OJEの役割

下、BE研究という。)を10年以上にわたり行ってきた<sup>1)</sup>。

BE専攻ではBE研究は必修科目であり、週1回、2コマの演習が1年間にわたって行われ、工学系教育としては他に類を見ないものである。学生を企業などに派遣するインターンシップとは基本的に異なり、学生と教員が一体となったグループ討論、現場調査などにより実社会における課題の解決に取り組む経験を積ませることで、特定の技術領域(機械や電気など)における専門力に加えて、実社会において複数の領域にまたがる融合的な仕事に求められる汎用的能力(コンピテンシー)を育成することに重点が置かれている。大学として専門的な知識や技術を身につけ「専門力」を養うことはもちろんのことであるが、それだけではなく、目指すべき社会を考え続ける「理念力」、社会に働きかける「行動力」、そして、それらの要素をマネジメントする「マネジメント力」を身につけていくための芽を作っていくのがOJEの役割であると言われている。(図1)

このことから、OJEはこれから取り組む原子力規制教育にふさわしい教育法であると考えられ、この手法を取り入れることを基本として本教育プログラムの検討を進めることとした。

### 3. 教育プログラムの検討

#### (1) 全体計画

本教育プログラムの期間は、2016年から5年間として計画する。そのうち初年度はフィージビリティスタディ(以下、FSと言う)として、具体的な教育内容および教育体制について詳細な検討を行い、2年目以降の本格実施の準備を行うこととした。また、プログラムが終了した後に大学のカリキュラムに取り込む教育内容についても、教育の進捗と合わせて検討を進めることとした。

本専攻は、学部3年次からエネルギー量子コースと環境工学コースに分かれて、その後大学院に進学する。本教育のテーマである社会的規制は全ての産業分野に共通のものであるが、検討の対象を原子力分野において教育を実施するため、エネルギー量子コースの学生の履修科目として計画を進めることとした。

OJEに基づく新たな規制教育を実施するため、初年度のFSにおいては、OJEを適用した教育計画の検討ならびに使用教材の選定作業等を補助する役割で、学生からリサーチアシスタント(以下、RAと言う)を採用した。また、2年度以降の本格実施においても、継続的に教育計画の改善を図るとともに、現場研修のサポートや規制教育に使用するための新たな教材作りを補助する目的で本教育の修了生の一部をRAとして採用することとしている。

OJEでは実社会における課題の解決に取り組むことが重要である。そのためCFiが有する既存の他大学、研究機関、民間企業を含めた協力機関との人材育成のネットワークを活用し、これに規制機関も含めた規制人材育成のための協力体制を確立して、基礎基盤セミナーや現場意見交換を実施することとした。

#### (2) フィージビリティスタディ(FS)

初年度(2016年度)は、FSとしてOJEに相応しいテーマおよび協力先について検討し、原子力規制人材育成への効果を確認すると共に、OJEによる教育内容および実施方法について協力先と調整を行い、2年度(2017年度)以降に実施する規制現場との意見交換が円滑に進められるように試行準備した。FSには教員3名とRA6名が参加した。

以下に試行結果とその結果を踏まえた教育プログラムに反映すべき事項をまとめる。

#### 1) 規制関連書籍レビュー

一般的な社会的規制に関する書籍をレビューし、規制の目的や考え方、課題等について取りまとめ、規制を理解する上で問題となる点を調査する。

レビュー対象の書籍(英文)を3冊選定し<sup>2~4)</sup>、6名のRAが分担して、書籍の内容に加え、重要と考えられる点や今後取るべき対策などについてまとめた。

#### <反映すべき事項>

- ① 学生は規制に対する知識が乏しいため、原子力規制の前に一般的な規制について学ぶ。
- ② 座学より、目的意識をもって自ら書籍を読み、更にグループ討論を行って議論する。
- ③ 自分の将来の就職先との関連があると興味がわくため、大学OBから就職先での規制との関わりについて話を聞く。
- ④ 規制の実例に基づく説明を加える。

#### 2) 福島事故調査報告書に関するグループ討論の試行

国会事故調<sup>5)</sup>および政府事故調査報告書<sup>6)</sup>についてRAがグループに分かれて議論した。その結果を発表してグループ討論を行った。

#### <反映すべき事項>

- ① グループ毎に分かれて討論したが、理解を深めるた

めに一緒に討論する。

- ② 規制機関に就職している大学 OB から話を聞く。
- ③ 国会および政府事故調査報告書はそれぞれまとめ方に特徴があるため、両方を読む。

3) 京都大学複合原子力科学研究所との意見交換の試行  
新規制基準による安全確認の審査を受けた複合原子力科学研究所を見学し先生方と意見交換を行った。

<反映すべき事項>

- ① 規制に関する理解を深めるため、グループ討論を踏まえて現場見学を行う。
- ② 事前に勉強して問題意識を持ち、現場での意見交換の時間を長く取る。

#### 4) 基礎基盤セミナーの試行

電気事業者の講師による原子力発電所の安全対策に関するセミナーを実施し、安全性向上を目指した電気事業者の取組み、新規制基準への対応状況、安全文化の向上に向けた活動などについて RA が話を聞き、原子力分野における規制がどのように実施されるか、そしてその効果などについて理解を深めた。

<反映すべき事項>

- ① 原子炉の安全設計を初めて学ぶ学生にも分かりやすい説明となるよう、講師とセミナーの内容を検討する。
- ② 時間の割に説明内容が多く、質問の時間が十分に取れず理解が不十分に終わったことから、説明資料を事前に入手して、質問を出せるようにする。

#### 5) 原子力規制に関する総合討論の試行

原子力規制を「規制側」と「被規制側」の両面から考察するため、RA を「規制側」、「被規制側」の2つのグループに分け、それぞれの立場から福島事故を踏まえた規制の問題点や改善すべき事項などについてグループ討論を試行した。

<反映すべき事項>

- ① グループ討論は理解を深めるのに有効であるが、討論の進め方や発表資料の作成方法などを改善する。
- ② 教材が難しいため、もっと分かりやすい内容とする。また、深い議論となるように討論のテーマの出し方を工夫する。

#### (3) 原子力規制教育の全体の流れ

初年度に実施した試行結果を元に、2017年度から2020年度までの4年間について、半年間を1ターム(4月～8月、10月～2月)として、原子力規制教育を計画した。

#### 1) OJE に相応しいテーマの選定

「福島事故の再発を防止するために原子力規制はどう

あるべきか」をメインのテーマに選定し、福島事故の遠因となった規制上の問題点や、その後に実施された規制改革、今後の課題等について議論する。

#### 2) OJE に相応しい協力先の選定

原子力規制を「規制側」と「被規制側」の両面から考察していくために適切な協力先を選定する。

- ・規制側：原子力規制庁、原子力規制事務所
- ・被規制側：電気事業者、原子力事業者、研究機関
- ・その他第三者機関：地方自治体

#### 3) OJE による教育内容と教育方法

- ① 基礎基盤セミナーおよび現場視察研修
  - ・法令規制に関するセミナーを実施する。
  - ・現場視察研修により規制現場を理解する。
- ② グループ討論および現場意見交換
  - ・課題探求型のグループ討論を行う。
  - ・現場技術者との意見交換を行う。
- ③ 研究報告会
  - ・受講生、RA、担当教員以外の学生、教員等も参加し、研究成果について発表し議論する。

原子力規制教育の全体の流れを図2に示す。

#### 4) 原子力規制教育の効果の検討

規制については、座学で教えるよりも、目的意識をもって自ら調査し、議論を通して理解するのが効果的であり、規制がどのように行われているかを実例に基づいて勉強することで理解が更に深まる。そのため課題探求型のグループ討論を教育プログラムの中心に据え、現場視察研修や意見交換において大学 OB から就職先での実

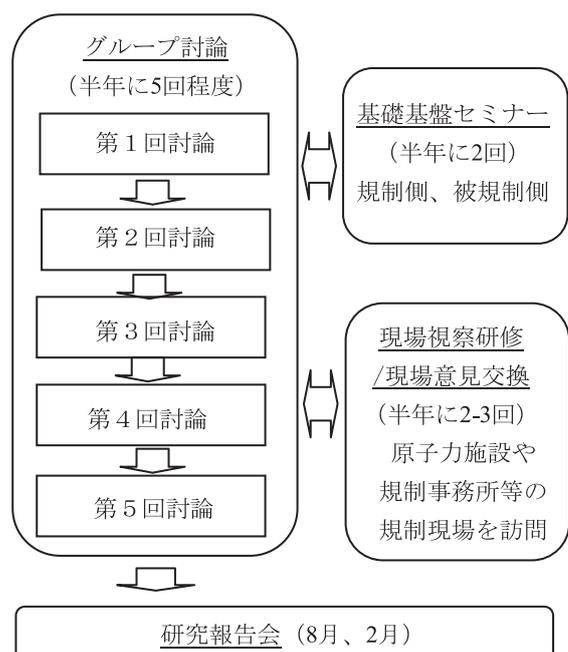


図2 原子力規制教育の全体の流れ

務と規制との関わりについて話を聞く場を設定して規制に対する興味を持たせることとした。

教育の効果については、グループ討論や研究発表会での発表内容や研修レポートの結果から分析評価することとした。

#### 4. 原子力規制教育の実施

##### (1) 教育スケジュールと参加人数

原子力規制教育スケジュールの例を表1に示す。また、これまでに参加した受講生とRAの人数を表2に示す。

##### (2) グループ討論

グループ討論は5段階で進める。まず受講生が分担して調査した結果を発表し、RAが推進役となり全員で質疑を行う。その後、規制に関して議論すべきテーマを決めてRAと受講生が数名のグループに分かれて自由討論を行う。自由討論では、例えば、「規制側、事業者側の立場からそれぞれ相手に求めるものは何か」などのテーマを選んで討論を行う。表3にグループ討論に使用した教材例を示す。

社会的規制の教材は、NTT出版の「社会的規制の経済学」<sup>7)</sup>を用いた。この書籍は「外部性」、「公共財」、「情報の非対称性」、「直接規制」、「間接規制」など規制の基礎についての解説や、「安全規制」、「製造物責任制度」、「労働安全衛生規則」等の一般規制について詳しい説明があるため、社会的規制を学ぶ上で優れた教材である。

表1 原子力規制教育スケジュールの例(2019年度前期)

月	4	5	6	7	8
グループ討論	△ 第1回	△ 第2回	△ △ 第3, 4回	△ 第5回	
基礎基盤セミナー				▲	▲
現場視察研修/意見交換				◆	◇
研究報告会					■

表2 これまでに参加した受講生とRAの人数

年度	2016	2017	2018	2019	2020
前期(名)		7 (2)	7 (4)	9 (4)	8 (4)
後期(名)	(6)	5 (3)	8 (5)	5 (4)	未実施

注：かっこの数字はRAの人数を示す。

表3 グループ討論に使用した教材例(2019年度前期)

回	グループ討論の教材
1	「社会的規制の経済学」の教員・RAによる講義
2	「社会的規制の経済学」の一般規制のレビュー
3	国会および政府事故調査報告書のレビュー
4	福島事故後の原子力規制改革資料のレビュー(1)
5	福島事故後の原子力規制改革資料のレビュー(2)

また、原子力の規制改革に関する教材としては、インターネットから入手した規制側あるいは被規制側から出されている資料を元に、受講生の人数分のテーマに振り分けて用いた。例えば、「規制組織」、「規制基準」、「自主的安全性向上」、「検査制度の見直し」、「防災計画」、「規制の信頼回復」、「国際的な規制」、「安全目標」、「安全文化の定着」などのテーマを選定した。

##### (3) 基礎基盤セミナー

セミナーの講師は、規制に精通した専門家の派遣を協力先に依頼し、前期、後期それぞれに規制側および被規制側からの講義と意見交換を実施した。

セミナーで重要なのは講義よりも意見交換であり、受講生から事前に質問を集めて講師に送り、当日その回答を説明頂き、更に質問することにより理解を深める。また、受講生からグループ討論でまとめた資料を発表し、その発表内容に対して講師からコメントをもらう。この双方向の意見交換を行うことで、受講生にとって規制を更に身近なものとすることができた。

##### (4) 現場視察研修/意見交換

当初、現場視察研修は規制現場の見学に、現場意見交換は規制に従事する技術者との意見交換に重点をおくことで計画したが、いずれの場合も見学に加えて、事前に資料を読んで質問を出しそれに基づき意見交換をすることに重点を置くこととし、規制について深く理解することとした。また、大学OBとの懇談の場を設定することで、自分の就職先として規制を考える機会とした。

2019年度は関係機関の協力を得て、前期は、東京電力HD(株)福島第一、第二原子力発電所と廃炉資料館、中国電力(株)島根原子力発電所、京都大学複合原子力科学研究所、後期は、日本原燃(株)六ヶ所再処理事業所、関西電力(株)大飯発電所、原子力研修センターおよび大飯原子力規制事務所の見学ならびに意見交換を実施した。

##### (5) 研究報告会

規制教育は、半年毎に新たに受講生を受け入れて開講する。RAについても、同様に修了した受講生の中から半年毎に選任する。教育プログラムの最後に受講生が原子力の規制改革について調査した内容を発表する研究報告会を半年ごとに実施する。RAについても、半年間の間に規制に関する自主的な研究テーマについて調査し、その結果を研究報告会で発表する。

研究報告会には規制教育担当の教員の他、専攻の教員や学生も参加し、多様な観点から議論を行っている。

### III. 原子力規制教育の効果

原子力規制教育の効果は、グループ討論や研究報告会での受講生の発表内容や研修レポートにより分析評価す

る。ここでは研修レポートによる評価結果を報告する。また、修了生の進路についても調査した。

### 1. 研修レポートに基づく教育効果の評価

原子力規制教育の実施に際し、教育の効果を確認するため、第1回グループ討論の前にアンケートを行い、規制に関する理解度を調査した。研究発表会が終了した時点で提出された研修レポートの内容と比較し、理解度の変化について分析した。

分析結果から、次の評価が得られた。

- 1) 規制は、安全確保のためのルールや制限であるという事前の理解から、国民の利益の確保、社会全体の利益の最大化に向けた前向きの活動であるとの理解に変わった。
- 2) 規制の持つ良い点と悪い点、どこに注目して取り組むべきか、どんな社会を目指すべきかについて理解が深まった。
- 3) 規制の全体像を理解し、自らと関わりの深い活動と感じるようになった。

### 2. 修了生の進路について

2016年度から2019年度までの4年間に原子力規制教育を受講し大学院を修了した学生は33名であり、全員が就職している。就職先の内訳は、国家公務員が2名、民間企業が31名である。民間企業の内訳は、プラントメーカーが14名、電気事業者が8名、その他が9名となっている。

## IV. 規制教育の将来展望

わが国の大学では規制教育はほとんど行われておらず、欧米と異なり適切な教科書もないのが現状である。大阪大学が取り組んでいるOJEを活用した規制教育は、福島事故を契機とした原子力規制改革を活かした教材として活用し、新しい規制が作られていくプロセスから社会的規制について学ぶ良い機会を提供している。

大阪大学ではこれまでに得られた経験を基に大学での規制教育を更に発展させ、OJEの良さを維持しながら既存の教育カリキュラムとの融合を図ったより先進的な規制教育プログラムの実施に向けて検討を進めている。

次の段階では、原子力を専攻する学生と他分野を専攻する学生が共に議論して原子力規制に対する理解を深めるとともに、多様化する社会で求められる原子力規制のあり方について学んでいく教育を目指す予定である。

## V. まとめ

2016年から開始した大阪大学におけるOJEによる原子力規制教育は、規制教育のひとつの方向性を示すと共に、原子力安全や原子力規制を深く理解し、将来を担う

人材を育成することに大きな成果を上げた。

当初計画した5年間の最終年度を迎えるに際し、これまでに取り組んだ原子力規制教育の概要とねらい、教育効果と将来の展望について取りまとめた。

大阪大学での取り組みがわが国の大学における規制教育の今後の発展に寄与することを期待している。

### — 付 記 —

本教育は、原子力規制庁原子力人材育成等推進事業補助金(原子力規制人材育成事業)を受けて実施したものである。

規制教育の実施に当たり、基礎基盤セミナーや規制現場との意見交換の実施に際して、協力先である関係諸機関ならびに関係企業から多大の協力があつた。

### — 参 考 資 料 —

- 1) 米谷淳編著 うまくやれる工学のアクティブラーニング OJE, 大阪大学出版会, (2016年).
- 2) REGULATION A Primer Second Edition by Susan E. Dudley & Jerry Brito, MERCATUS CENTER George Mason University (2012年).
- 3) Daniel Carpenter & David A. Moss PREVENTING REGULATORY CAPTURE, Cambridge University Press (2014年).
- 4) The Oxford Handbook of REGULATION, Oxford University Press (2010年).
- 5) 国会事故調報告書, 東京電力福島原子力事故調査委員会 (2012年).
- 6) 政府事故調 中間・最終報告書, 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(2012年).
- 7) 植草益編 社会的規制の経済学, NTT出版, (1997年).

### 著者紹介



北田孝典 (きただ・たかのり)  
大阪大学 大学院工学研究科  
(専門分野/関心分野)  
原子炉物理, 原子力安全, PRA



竹田 敏 (たけだ・さとし)  
大阪大学 大学院工学研究科  
(専門分野/関心分野)  
原子炉物理, 確率論的リスク評価



中村隆夫 (なかむら・たかお)  
大阪大学 大学院工学研究科  
(専門分野/関心分野)  
原子力安全, 規格・基準, 経年劣化



# 視点

## 〈社会〉を語る

### 第10回 質問紙調査の魅力と落とし穴

岡山大学 齋藤 圭介

社会調査には、大きく2つの調査手法——質的調査（インタビューやフィールドワークなど）と量的調査（質問紙〔アンケート〕調査など）——があることをこれまで紹介してきました。

毎年、社会学領域の卒業論文を指導していて感じるのですが、とくにここ数年は質的調査よりも量的調査を希望する学生が増えてきているような印象を受けます。背景には、社会全体で盛り上がったビックデータの話題、なんらかの判断をするさいエビデンス（データ）が求められる風潮、あるいは文系理系問わず統計手法の理解が浸透したことなどがあるでしょう。

質問紙を作成・配布して、ランダムに選んだ対象者に答えてもらうという量的な社会調査は、比喩的にいえば、特別なセンサー（＝質問紙）を使って社会の実像をはかる調査といえます。社会は曖昧模糊としていて、捉えどころがありません。できるだけ精度が高く、誤差が少ないセンサーを作ることではじめて、社会の実像をより正しく精確に把握することが出来るようになります。さらに、量的調査は統計手法との相性が一般的によく、少数の標本から母集団全体の傾向を推測できるという点でも非常に有効です。

WEB調査の登場などで、誰でも、どこでも、どのような形でも、量的調査を気軽にできるようになりました。それ自体は喜ばしいことです。他方、あまりにも安易に質問紙調査が実施されているのではないかと感じることもあります。今回は、量的調査の普及に伴う負の側面について2つの話題を紹介したいと思います。

1つめはセンサーの精確性についてです。考えてみると当たり前ですが、社会調査の専門家でなくても、質問紙調査（もどき）は誰にでもできます。いくつか適当な質問を作って、なんとなく紙に並べて（WEB上で設定して）、そこら辺にいる人に答えてもらえばよいのですから。街を歩けば、企業やなんらかの団体が、一所懸命に質問紙を配っている場面に出くわしますし、飲食店では卓上にアンケートが置いてあるのを目にします。そうした巷にあふれる質問紙をみると、首を傾けたくなるものも少なくありません。安易な量的調査の結果に依拠することで、むしろ、誤った判断をするのではないかと心配になることもあります。

こうした事例は枚挙に暇がありません。有名な例として世論調査があります。各新聞社・メディアの内閣支持率が大きく異なることはよく知られています。ほぼ同じ趣旨の質問をしていますが、質問の仕方によって結果が大きく異

なっているのです。内閣支持率というたった1つの社会的事象についてさえも、これだけ数字が異なることは、よく考えてみるとおかしなことですよ。社会をはかるセンサーが正しく機能していないのですから。

質問紙調査において回答が歪む理由やその仕組みについては、すでに多くのことが明らかになっています。そうした知識を用いて、社会調査の専門家は、回答に歪みが生じないように細心の注意を払い質問紙を作ります。逆にいえば、その知識を総動員して、あえてある傾向に回答を誘導することは造作ないことです——もちろん、悪意ある調査はご法度です。質問紙調査を正しく実施しないと、社会の実像をいびつに反映してしまい、かえって社会的な害となることもあります。

2つめは、誰もが安易に質問紙調査をすることで、回答する人の負担を増やしているという点です。最近ではWEB上での質問紙調査が増えてきました。WEB上の質問紙調査の大きな利点は、紙での実施と比べ配布・回収・データ入力をする手間（それに伴う金銭面！）を省けることや、回答者の数を簡単に増やせることにあります。紙よりもWEB上での質問紙調査を実施したくなる人が増えるのは当然の流れでしょう。

他方、質問紙調査がWEBによってさらに身近になることで、安易な調査が増えているように感じます。私も毎日のように所属大学の各部局をはじめ、所属している諸学会、あるいは行政機関やメディアから質問紙がひっきりなしに送られてきます。質問数が多く回答に時間がかかるものもあります。答えても答えても次々に質問紙が届くという状況に辟易してしまうこともあります。

質問紙調査の氾濫は、回答する人の負担をやみくもに増やしてしまい、長期的には回答に積極的に協力してくれる人を減らしてしまうかもしれません。すると、質問紙の回収率が下がってしまい、結果として社会調査の信頼性や妥当性にも大きな負の影響を与えることになります。

質問紙調査は、社会の実態の一端を掴むには最適の方法ですし、実施もしやすいです。逆説的ですが、実施がしやすいからこそ、安易な実施をしないように注意する必要があります。このあたりのバランスは非常に難しいですが、質問紙調査の有効性を社会全体で認め、惜しまずに協力をしつつ、同時に回答者の負担が過重にならないような調査になるよう、調査者は配慮する必要があります。といえるでしょう。

## 福島事故と新型コロナ禍

日本経済新聞 矢野 寿彦

映画「Fukushima(フクシマ)50」は2011年3月11日の東日本大震災で起きた東京電力福島第一原子力発電所の事故を忠実に再現した良質な作品といえる。事故から9年がたち、われわれの記憶が時間とともに薄れていくなか、3基同時の炉心溶融(メルトダウン)という、あってはならない災害の本当の意味を考えるために、より多くの人、そして原子力関係者たちにぜひみてほしい。

事故当時、わたしは科学技術部のデスク(編集者)をしていた。1号機が爆発したテレビ映像を見て、「あっ、終わった」と思った。恥ずかしながら原子力建屋が水素爆発するという知識を持ち合わせておらず、原子炉が吹っ飛ぶ「チェルノブイリ事故の再来」が脳裏をよぎった。

あの爆発の瞬間にも建屋周辺には、もう死ぬかもしれないと思った多くの人が存在していたという視点を当時もっていなかった。映画を見て大いに反省させられた。

事故の最前線にいた「フクシマ50」の面々を英雄視して描いている印象が強かった。1~3号機が炉心溶融を起こし、4号機のプールが崩壊寸前だったにもかかわらず、「日本消滅」につながらずに済んだのは偶然の産物にすぎない。

今(この原稿は4月16日に書いている)、日本も世界も新型コロナウイルスという見えない恐怖と闘っている。原発事故で拡散した放射性物質もわれわれは目にすることができない。パンデミック(世界的大流行)後に一変してしまった日常生活を、9年前の風景とオーバーラップさせている人もきっと多いだろう。

11年以降、原子力を巡る新たな変化といえば、新規規制基準ができたこと、そして高速増殖炉「もんじゅ」の廃炉ぐらいだろう。政権交代後にかつてないほどの力をもつ安倍1強体制ができたにもかかわらず原子力政策は何も動かなかつた。エネルギー政策上、原子力を重要な電源と位置づけてはいるが、具体策は何も示さない。思考停止の状態が続く。

国内の原発は、15年2基、16年2基、17年1基、18年4基の計9基が営業運転再開にこぎ着けた。しかし、19年に再稼働した原発の数は新規制になって初めてゼロだった。20年も19年に続き新規の再稼働はないだろう。

むしろ、テロ対策への遅れから原発は再び止まり始めた。必然の流れなのかもしれない。「脱原発」に向けては動き出したといえる。原発を重要な電源とする国の方針が瓦解していくのは自明といえる。原子力政策を支えてきた核燃料サイクルのほうはもう破綻している。

国が動かないならば、民が主導すればいい。そんな考えができるかもしれないが、原発を担ってきた電力会社にどうやらそんな気概はなさそう。「国策民営」を脱して原発を前に進めようとしていた関西電力だが、もくろんでいた美浜原発での4号機の新設計画も、高浜原発を巡る地元との金品受領問題が明るみになって、幻と消えた。原発が生き残る道は閉ざされてしまった。

世界はいま、新型コロナウイルスの流行になんとか待ったをかけるため、都市封鎖や外出禁止に動いた。それを解除する策を巡らすなか、「ニューノーマル」という言葉に注目が集まる。2008年のリーマン・ショック時に生まれた言葉のようで「新常态」と訳す。危機を乗り越え回復したとしても、危機前の姿には戻れない。今は「新しい日常」を表現する言葉として使っている。

東日本大震災による福島事故は、日本にとってリーマン・ショックや新型コロナ禍に匹敵する、歴史に刻まれる災いだった。いや、「汚染水問題」をみればわかるように、過去形にするのは早い。今なお進行形の災いである。

原発をどうするかはエネルギー政策にとどまらず温暖化対策や国の安全保障にも大きく関わってくる。「原発は捨てられない」という呪縛にとらわれず、「ニューノーマル」の思考も取り入れ、原発の行方を真剣に考えていかなければならない時機に来ている。

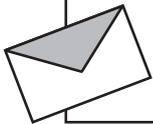
### 著者紹介

矢野寿彦 (やの・ひさひこ)



現職は編集委員兼論説委員。1988年京都大学法学部卒、89年日本経済新聞入社。産業部、大阪経済部、整理部を経て2000年から科学技術部に在籍。主に科学技術政策や医療、原発問題を取材。福島第1原発事故やSTAP騒動の報道をデスクとして率いる。2016年から3年間、科学技術部長。

## 理事会だより



### 新型コロナウイルス禍に思う

今回の「理事会だより」のトピックスは、当初予定では「2020年春の年会理事会セッション報告」となっていたのですが、ご承知の通り、春の年会は中止となり、報告対象自体がなくなっていました。そこでタイトルを「新型コロナウイルス禍に思う」としましたが、だからと言って、ウイルスと放射性物質という目に見えない脅威の類似性と本質的な違い、社会の反応とそこから何が見えてくるか、といった原子力関係者なら筆者ならずとも考察を深めてみたいと考えるテーマを「理事会だより」で論じるのも場違いですので、ここはやはり、この尋常ならざる事態が理事会や関連する活動にどのような影響を及ぼしているかについて書くしかなかろうと考え、筆者の知るところ、思うところを記すことにいたしました。

春の年会中止という当時としては大変重い理事会決定がなされたのは、2月25日です。これに先立つ21日に会長、副会長、他数名の関係者で協議の結果、中止やむ無しという結論に至り（といっても筆者はその会合には参加していませんが）、同日、速やかに理事会の緊急メール審議に付されました。2月21日といえば、政府が大規模イベントの自粛や学校の一斉休校の要請を行う前であり、世間はまだ自粛一色というほどでもなかった頃でしたので、中止という選択の是非を問うメールの内容にやや驚きつつも、関係各位の苦渋の決断に思いをいたし、承認の旨、返信しました。過去に年会・大会が中止となったのは、東京電力福島第一原子力発電所事故（1F事故）直後の一度以外記憶にありません。今回の春の年会はその福島の地での開催であり、かの地ならではの種々の企画が用意されていたので、悩みに悩んだ末の決断だったであろうことは想像に難くありませんでしたが、今から思えばまことに適切な判断でした。

その後、理事会およびその傘下に設置されている多くの常置委員会も軒並み会合が中止または延期となりました。本来ならば、face to faceで意見を交わし、決めていくべきさまざまな事柄がすべてメールでの審議、または議論自体を棚上げすることとなったのです。たとえば、筆者が幹事を務める企画委員会では、1F事故から10年を迎える来春を見据えたイベント企画を考えていく重要な時期に差し掛かっているのですが、その議論が十分にできずにいるのです。今（4月中旬）の段階では全く先が見通せず、いつになったら活動を再開できるのかとやきもきしていますが、政府が緊急事態宣言を発出するに至り、最早、観念するしかありません。

こういうとき、電子メールというものの限界を思い知らされます。形式的な審議事項ならメールで十分ですが、さまざまな意見を交換し、しっかり議論すべき事柄についてメールは（建前論はともかく現実的には）非力だと感じます。世の中ではテレワークが進み、働き方改革が加速されるという肯定的な受け止めさえある中で、何を時代錯誤なことを言っているのかと冷笑を買ってしまうであろうことは自覚しています。もちろん、Web会議などを活用すればもう少し状況は改善するのですが、それでも実際に一堂に会してコミュニケーションをとらないということに筆者自身は物足りなさや心許なさを感じてしまうのです。

「銃・病原菌・鉄」や「文明崩壊」などの著作で知られるジャレド・ダイヤモンドは、近著「危機と人類」（小川敏子、川上純子訳、日本経済新聞出版社）の中で、現在の米国民民主主義が危機的な状況に陥りつつある原因のひとつにソーシャル・キャピタル（社会関係資本）の減少<sup>i</sup>があり、それは「顔を合わせないコミュニケーションの台頭と、直接的コミュニケーションの減少」によるとする説が一般的だと指摘しています。学会も、一種のソーシャル・キャピタルであり、構成メンバー相互の理解、信頼、敬意を基盤とした自発的なエネルギーによって支えられているものです。電子メディアに強く依存したコミュニケーションは、利潤を上げるという明確な目的がある企業活動ならまだしも、学会活動では上手く機能しない局面も少なくないように思います。

以上の通り、現在の状況は当学会にとっても深刻な事態であり、会員の皆様には多大なご不便やご迷惑をおかけしておりますが、どうかご理解のほどお願いいたします。前段で述べたことは矛盾しますが、現状において学会活動を継続するためには、電子的ツールに依存する他なく、そうした手段を活用した当学会の機能維持のための危機管理対策を理事会としても検討する必要があると考えております。皆様のご意見やご提案をお寄せいただければ幸いです。

（4月17日 記）

（MHINS エンジニアリング（株）・佐治 悦郎）

「理事会だより」へのご意見、ご提案の送り先  
rijikaidayori@aesj.or.jp

<sup>i</sup> ソーシャル・キャピタルの減少については、Robert D. Putnamの著書「Bowling Alone: The Collapse and Revival of American Community」（2000）を紹介して説明しています。