

巻頭言

3 福島での人材育成

上 昌広

時論

4 異分野交流さまざま：防護と治療

坂東昌子

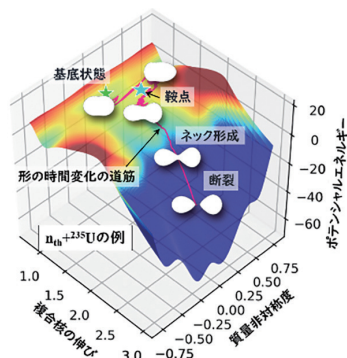
解説

25 核分裂の理論研究最前線

一分裂する原子核の変化する形を追って

核分裂現象の理論研究は近年、急速に進展し、核データ評価への応用も視野に入りつつある。重い原子核が中性子を捕獲するときの変化は極めて多様だ。ここでは核分裂過程を、原子核の“形”をキーワードにして解説する。

石塚知香子, 千葉 敏



二中心モデルによるポテンシャル面の様子と、ポテンシャル面上での4次元ランジュバン法による核分裂軌道の様子

連載講座 よくわかる PRA

うまくリスクを为了能に (4)

48 安全目標の現状と今後の課題

安全目標は国民のリスクの抑制水準を示すものだ。原子力の安全目標は社会の安全目標の一部をなすもので、原子力の定量的なリスク評価の活用には欠かせない。その現状と、社会定着へ向けた課題について述べる。

山口 彰, 成宮祥介

新会長あいさつ

1 原子力の信頼回復と未来に向けて

中島 健

講演

38 高レベル放射性廃棄物等の地層処分場立地可能性調査の受け入れを求めて —原子力発電環境整備機構の対話活動—

近藤駿介

特集 原子力災害による福島農業の現状と課題

12 農用地における放射能汚染対策の成果と今後の課題

—福島県の水稲栽培と農業用水を中心に—

農地除染、吸収抑制対策など、震災後これまで農用地における放射能汚染対策とその成果を紹介するとともに、福島県の現状から継続的に必要な取り組み、今後の課題について報告する。

申 文浩

16 原子力災害による被害から営農再開まで一食の安全を確保するために

福島県産米を「入口」の段階で安全性を担保し、流通経路にのる「出口」段階でさらに全量全袋検査を行うことで安全と安心を確保する仕組みとなっている。福島県における9年間の放射能汚染対策、流通風評対策について報告する。

小山良太

20 震災10年以降を見据えて —復興政策の課題—

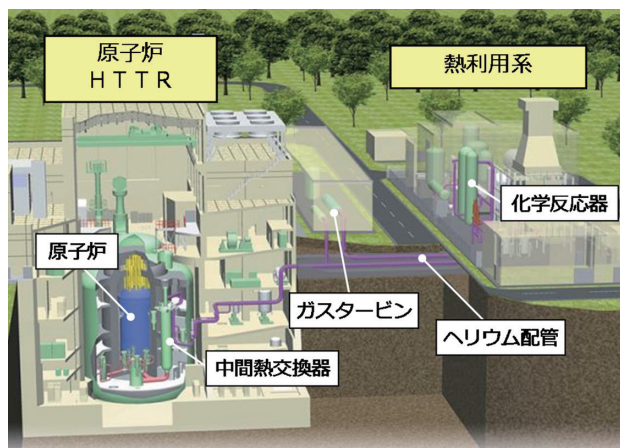
原発事故から9年余がたった今も、福島では4万人が避難生活を余儀なくされている。復興はどこまで進んでいるのか。どんな課題があるのか。

橘 清司

30 高温ガス炉システムの実用化をめざして

高温ガス炉は優れた固有の安全性を有しており、発電のみならず水素製造などの多様な熱利用に用いることができる。ここではその実用化に向けて原子力機構が取り組んでいる技術開発の最前線を紹介する。

峯尾英章ほか



HTTR-GT/H2 試験

報告

53 失敗を許す社会へ

失敗した個人を批判する組織よりも批判しない組織の方が組織学習やパフォーマンスの点で優れることが示されている。個人だけでなく組織を免責するアプローチの必要性や留意事項などについて議論する。

松井亮太

58 原子力人材育成ネットワーク活動の国際展開—IAEAの国内ネットワーク構築プロジェクト支援—

IAEAは加盟国における原子力人材育成・知識管理国内ネットワークの構築を支援している。この枠組みのもとで日本の原子力人材育成ネットワークはトルコとマレーシアでのネットワーク構築を支援した。

山下清信, 中園雅巳, 鳥羽晃夫

理事会だより

61 2020年度（令和2年）新たな体制で活動開始

高木宏彰

35 Column

冊子がいざなう時空の旅

井内千穂

「防護服」廃炉作業と感染症治療

上野和花

ビル・ゲイツから学べる準備の大切さ

小澤杏子

震災と新型コロナ第2波への対策

妹尾優希

甲状腺スクリーニング検査の意義を改めて問う

服部杏菜

出口なき誹謗の矢を射るリスク

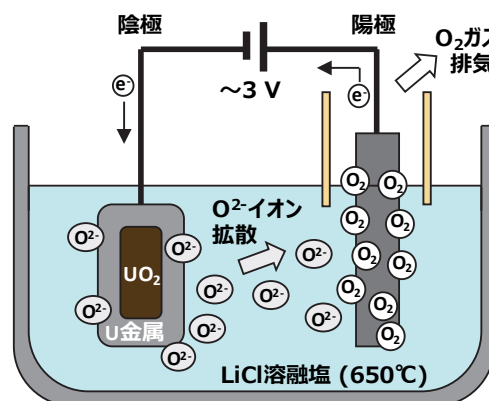
服部美咲

サイエンス

44 溶融塩電解で酸化ウランを金属に還元する—金属燃料高速炉への燃料供給に向けた技術開発

金属燃料高速炉に燃料を供給するためには、酸化物燃料を金属に還元する必要がある。そのために高温のLiCl溶融塩中で酸化物燃料を電気分解する方法を開発している。

坂村義治



電解還元法の概要

6 News

43 From Editors

62 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 新入会一覧, 寄贈本一覧, 英文論文誌 (Vol.57, No.9) 目次, 和文論文誌 (Vol.19, No.3) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

福島での人材育成

巻頭言



医療ガバナンス研究所 理事長

上 昌広 (かみ・まさひろ)

東大医学部卒。東大医科学研究所特任教授などを歴任。専門は血液・腫瘍内科学、真菌感染症学、メディカルネットワーク論、医療ガバナンス論。

日本の新型コロナウイルス対策が迷走している。なぜだろうか。対策策定のために必要な臨床研究が弱く、曖昧なイメージで議論しているからだ、私は思う。世界保健機関(WHO)の調査によると、5月22日現在、各国が発表した論文数は、多い順に首位は中国で1,158報、ついで米国1,019報、イタリア375報、英国312報、フランス182報と続く。日本は56報で、韓国や台湾にも劣る。未知のウイルスとの戦いで、正確な情報を持たないことは致命的だ。

この状況は福島第一原発事故と対照的だ。この事故で福島は甚大な被害を蒙ったものの、内部・外部被ばくとも軽度で、避難や独居に伴う高齢者の慢性疾患の悪化が問題となるということが国際的なコンセンサスとなった。

これは震災後、被災地に入り、診療の傍ら、論文を書いた若手医師・看護師の存在が大きい。その代表が坪倉正治医師だ。6月20日、安藤忠雄文化財団が表彰した。医師ではペシャワールで灌漑活動に従事した故中村哲医師に次いで二人目だ。

坪倉氏と私が出会ったのは2006年だった。当時、彼は東京大学医学部の学生で、従来の医師のあり方に問題意識を抱く若者だった。私は東大医科学研究所に研究室を開設したところだった。その後、彼との付き合いは続き、2011年4月、彼は私の研究室に博士課程の学生と在籍することとなった。その直前に起こったのが福島第一原発事故だ。

私はご縁があって、立谷秀清・相馬市長を支援していた。医師で病院経営者の優秀な人物だ。私は、坪倉氏に「福島に行かないか」と勧めたところ、即座に承諾した。これが坪倉氏と福島の付き合いが始まるきっかけだ。

それから2020年6月現在まで、現地での診療・研究を続けている。約130報の英文論文を発表し、多くが世界保健機構(WHO)ガイドラインに引用され、世界の原発事故対策に大きな影響を与えている。

ただ、彼らは論文のために被災地を「利用」した訳ではない。住民を支える活動の続け、その結果を発表した。

例えば、2012年8月に坪倉医師が『JAMA』(アメリカ医師会誌)に発表した内部被ばくに関する論文だ。

相双地区で最初に内部被ばく検査を始めたのは南相馬市立総合病院だった。この論文では2011年9月～2012年3月までに同院で内部被ばく検査を受けた住民9,498人の検査結果をまとめた。小児の16.4%、成人の37.8%で内部被ばくが確認されたが、被ばく量の中央値は小児で590ベクレル(範囲210-2,953)、成人で744ベクレル(210-12,771)だった。預託実効線量が1ミリシーベルトを超えたのは1人だけだった。

これは福島の内部被ばくの実態をはじめて世界に報告したものだ。世界中のメディアが「福島の被ばくは問題とならないレベル」と報じ、風評被害対策に貢献した。

これが彼の学位論文となった。私はこの論文を高く評価する。それはインパクトファクター47.6という一流誌に掲載されたからではない。内部被ばくに悩む住民を支えるための活動の結果だからだ。

内部被ばく検査を立ち上げるのは至難の業だった。その際、中心的役割を担ったのは坪倉医師だった。自衛隊や早野龍五・東大理学系研究科教授(当時)らに助けを求め、試行錯誤を繰り返した。

検査開始後は検査に立ち会い、住民の相談に乗ってきた。坪倉医師は「立ち会った検査は10万件、個別相談に応じた住民は数千人を超える」と言う。

今年6月、坪倉医師は福島医大の放射線健康管理学教室の主任教授に就任した。それ以前から特任教授を務めていた関係で、約10名の大学院生を指導する。多くは医師や看護師の社会人大学院生で、診療の傍ら研究を進める。原発事故を契機に福島から新しい医療が生まれようとしている。(2020年6月21日記)



異分野交流さまざま：防護と治療



坂東 昌子 (ばんどう・まさこ)

NPO 法人あいんしゅたいん理事長
京都大学大学院理学研究科博士課程修了。
同大学講師、愛知大学教授、日本物理学会長
などを歴任。

日本学術振興会の「放射線の利用と生体影響第 195 委員会」で、コロナ禍と放射線事故の違いの議論になり、「コロナで科学者の知見に極端な対立がないのは、感染症免疫学に基づくマクロ政策が 1927 年に提唱ⁱされた SIR モデルⁱⁱが共通認識の基礎にあるからだ」との指摘が出た。1927 年！マラーが X 線照射によるハエの実験を発表した年である。疫学には 1800 年後半からの長い伝統がある。ロンドンに発生したコレラ流行に挑んだ「医者探偵」ジョン・スノウが、患者の感染経路から感染源を探しあてた粘り強い調査が有名だ。その伝統と蓄積が今日の基礎を与えた。「日本は、数値的情報の発信は出遅れているな」「天気予報などではすでに、相当科学的な情報が流れ、結構専門的な表現が使われているが、啓蒙が行き届いたせいでしょうね。」などと話したのは 3 月初めだった。しかし、徐々に基本再生産数や感染者の時間変化のグラフなど定量的な情報が出始め、話が空中戦にならず科学的考察が増えた。放射線の単位がミクロとマクロの単位がごっちゃになって、混乱を招くことが多かったが、放射線量の単位と異なり、コロナの場合、データの規模は何人、時間は何日などという単位なので、直感的にわかりやすい。見る見るうちに、インターネットにテレビに新聞にグラフが紹介されるようになり、マスコミの記述も次第に数量的な言い方が多くなってきた。実効再生産数、 R_t もなども市民が口にするようになり、新規感染者数にとらわれず検査率や陽性率、そして移動平均などを使い、統計疫学の中身に入り込んで議論され始めた。政策面での意見は異なるが、科学的知見に関してはそれほど対立がない。放射線の時は、「危ないか。安全か」「いくら少量でも放射線を浴びるのは危険」といった議論とは大変な違いだ。

そんななか、6 月に入って、英国に ISAGE という組織が生まれた。政府の諮問機関である SAGEⁱⁱⁱとは独立にコ

ロナを分析する組織が生まれたのである。科学技術ジャーナリスト会議の小出氏によると、1990 年代、狂牛病における専門家と政府が社会的信頼を失墜し、その反省から、SAGE への動きが本格化したと聞いていた。放射線リスク問題で起きた日本での混乱に対して、英国は科学顧問が有効に働いた^{iv}というので日本もお手本にするべきだと高く評価していた英国の動きにびっくりした。専門家の助言と政策決定に関するテーマは、福島事故以降の日本にとって重要課題で、195 委員会でも重視していた。このお手本とも言うべき、SAGE が提示したコロナ対策の予言する「集団免疫」に合わない現象が出てきて、積極的な感染防止策が必要だったのではないかという世論が多くなった。集団免疫よりはるかに以前に感染の嵐が収束するように見える現象を、「感染させられる人口(S)がはるかに少ない。この感染に参加しない人口のことを、分析のリーダーであるフリストンは「ダークマター」と名付けた。彼は神経生理学者の天才的リーダーで、「脳の自由エネルギー説」を唱えていて、コンピュータが人と同じ機能を持てるというアルゴリズムを提案しているという。疫学から見れば異分野からの挑戦である。自由エネルギーを提唱したヘルムホルツが、超知能というようなことも 1 世紀半も前に考えた物理学者だったことを初めて知った。ともかく、確実なデータのみを使って、SIR とは異なる手法で分析したのだ。

科学者の間でもまだ決着していない未知な問題に対して、異なる知見を提示することは、政治家が自ら政策を決定する自由度を広げる優れた方法である。日本もこれだけの人間が、異分野からも議論を広げ SIR を改善し、認識を高めた知見を構築することこそ、真の科学の在り方ではないかと思うはあるが、これは、なかなか実現は難しそうだとは私は今悩んでいる。周辺の物理屋さんを見ただけでも、SIR に対してさまざまな修正や拡張の提案がなされている。ただ、どうもお互いの相互議論もな

ⁱ Kermack と McKendrick が提唱した模型。

ⁱⁱ Susceptible, Infected, Recovered という 3 状態モデルで頭文字をとって SIR の微分方程式で表される

ⁱⁱⁱ Scientific Advisory Group for Emergencies

^{iv} そして、2011 年 3 月、福島事故の直後に、英国政府首席科学顧問が事故の最悪予測と放射線影響の見通し、事故の全体像を伝え、結果的にパニックの回避に役立った経緯があったという話を聞いていた。

く、いきなり、反論がマスコミでの発表になっているのが気になる。その前に、科学者間の議論がないと、また放射線の時のように、市民を混乱に陥れるのではと気になる。異分野の新しい感覚が既成の概念を超えてパラダイムシフトとして定着できるか、今が瀬戸際だ。このままでは、どちらにとっても不幸であろう。

さて、放射線防護の世界では、しきい値なし直線仮説(LNT)直線2次曲線モデル(LQM)が放射線のリスク評価の標準とされている。それに対して、私たちは、LQMモデルは決定的欠陥があると思っている。被ばく量に依りてリスクが増えるのは確かだが、相手は生きものである。リスクを放置したりしないで、危険な異物を除去する機能を持っている。このアウトプットとのバランスが生命を維持する重要なカギで、それを考慮してモデルがモグラたたきモデル(WAM)である。ごく当たり前の話だが、これが本当に理解され、LNTの固定概念を変革・転換できれば、100年近くもの呪縛から解放されるはずだと思っている。しかし、常識であるLQMはそう簡単に捨てられない。なぜ総線量だけでリスクが決まると思ったのか、歴史を振り返ると思い当たる。放射線の生体影響研究は、放射線の発見と同時に始まった。細胞損傷(当時は細胞死)の解明とがん治療への効用、つまりネガティブ(放射線防護)・ポジティブ(放射線治療)の両面から追及された。細胞死の推定に際して、提出された「標的理論」はLeaとされているが、実は、このアイデアは、科学者間で盛んに議論され、「細胞の中には“sensitive zone(標的)”が存在し、放射線はこの標的にヒットすると細胞死に導く」とマリー・キュリーの論文(1930)に記述がある。細菌・正常細胞・がん細胞すべてに適用できる放射線のイメージを捉え、持続的放射線照射で生き残る割合を滅菌作用で確かめた。横軸は時間でなく総線量としたが、連続照射だと総線量は時間変化とも連動していたので、横軸は時間経緯ともとれる。Survival rateという物理量は当時から使われていたが、あくまでSurvival functionは時間の関数、survival functionとはいわない^v。これを受け継いだのが物理屋のLeaだ。さまざまな未解決の問題を引きずりながらLQMは標準的な理論として重用されてきた^{vi}。この矛盾は医療分野の放射線利用へも影響していることを知ったのは、つい最近、WAMからさらに、がん細胞の放射線影響の研究を進めてからだ。がん細胞は強力な増殖力をもつから、放

射線照射とがん細胞の生長を同時に考慮する必要がある。実際、放射線治療では、1日1回か2回放射線治療を行い、別の日にまた照射するという方式をとる。そうすると、この間がん細胞は増殖する。がん細胞の増殖と放射線による細胞死が同時に時間推移で起こる。そうすると、総線量だけで決まるLQMは使えない。いかに時間変化を考慮するかが課題である。もともとWAMモデルは、時間変化する過程を微分方程式で定式化しているから、自然にがん増殖効果も取り込める。これをシーソー(SS)モデルと名付けて、医療分野への挑戦を開始した。

とはいえ、WAMで、やっと放射線リスクに関心を持つ生物屋さんや放射線には関係ないが医療研究者とのネットワークができたとはいえ、放射線医療分野とは繋がっていない。どうして現実のデータでできるだろうかと考えあぐねていたが、偶然にも機会が訪れた。WAMに共感して共同研究を始めた放射線防護分野の角山さんが国際がんセンターの講演でWAMを紹介したら、手島教授ががん治療計画で使うFowlerの公式(BED指標)が実際に合わないことを痛感されていたのだ。こうして、今回、大阪国際がんセンターの病院特別研究員に申請するに際して、医学研究倫理の受講をする必要があることを知った。こんな試験があることは医療研究者である鈴木さんに言われて初めて知った。初級編、臨床研究の歴史と被験者保護から始まって17科目をやり遂げてみて、なんといっても感銘を受けたのは、最新のバイオテクノロジーに関するルールまで、しっかり明記してあることだった。医の倫理指針は常に更新され、最新の知見に追いつこうという姿勢をひしひしと感じる。「過去には正しかったけど今はアウト、なんてのがあり得るのです。最大限の誠実さはとても大切」と言われて、改めて命と向き合う医療の厳しさと厳格さを痛感した。しかも、科学的構造や知見がいまだ不明な部分があっても、そこで「未解明であるが少なくともこの部分だけは順守すべき」と明確に現地平線を明示したルールが明示される。なんとも明快で、最善を尽くす努力が伝わる。それと比べて、放射線防護は研究の最前線をシベアに見直すことよりは、いかに規制をクリアするかに集中する。医療は技術の進歩に追いつきつつ規則を決めている。興味深い発見だった。まさに生死に向き合う現場だ。私のように好奇心だけで研究に飛び込んだのとは違う。放射線リスクから放射線治療の分野に飛び込み、分野を超えた交流を通してさまざまな発見と価値観に巡り合った私は新たな挑戦に胸を躍らせている。

(2020年8月1日記)

^v この日本語の解説では間違っているので注意が必要。

^{vi} この時、滅菌できず生き残った細菌の数を「生き残り比率」Survival rateと定義していた。生物の死亡や機械系の故障で、生物が死亡したり機械が壊れたりする場合、生き残っている割合を時間の関数で表した量である。あくまで、時間の関数であって、総線量の関数ではない。これはSurvival function(生存時間関数)とは異なるので混同しないよう注意が必要である。

農用地における放射能汚染対策の成果と今後の課題 福島県の水稲栽培と農業用水を中心に

福島大学 申 文浩

東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故から、復旧や除染作業が進み、帰還困難区域を除く避難指示の解除とともに営農が再開されつつある。本稿では、農用地における農地除染、吸収抑制対策、放射性セシウムの動態解明など、震災後からこれまでの放射能汚染対策とその成果を紹介するとともに、震災復興、営農再開のために継続的に必要な取り組み、課題について報告する。

KEYWORDS: *Radioactive cesium, Fukushima, Decontamination, Paddy field, Irrigation water, Radionuclide*

I. はじめに

平成 23 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震によって、福島県内の農地、堤防、排水ポンプ場や水路など、約 4,300 箇所被害を受けており、その被害額は農地・農業用施設のみでも約 2,300 億円にのぼる¹⁾。

さらに、東京電力福島第一原子力発電所(以下、第一原発)の事故で、放射性物質の影響が大きかった地域では、放出された放射性核種の農産物への移行が懸念され、作付け制限とともに避難指示が発令された。

震災から 9 年が経過した令和 2 年 5 月時点で、第一原発事故の影響で一部の帰還困難区域では、被害調査もできない状況であるが、農業水利施設などの復旧工事や、住宅、農地、森林(生活圏)等の除染作業が行われ、農地においては、平成 30 年 3 月時点で福島県内の国直轄除染対象地区農地(延べ面積: 31,061 ha)の除染が完了した。

令和 2 年 3 月まで帰還困難区域以外の旧避難指示区域の避難指示が順次解除され²⁾(図 1)、住民の帰還も段階的に進められている。

第一原発の事故後、土壌中の放射性セシウム濃度と作物への移行係数の解析や農業用水中の放射性セシウムの水稲への影響分析など、さまざまな研究活動が行われ、その成果に基づくカリウム施用による放射性セシウム吸収抑制対策が実施された結果、基準値を超える作物の割合は減少した。

震災直後からこれまでさまざまな分野の多くの技術者や研究者が福島の復旧・復興のために活躍した結果であ

Achievements of measures against radioactive contamination and future tasks in agricultural land in Fukushima: Moono Shin.

(2020 年 6 月 11 日 受理)

るに違いない。

本稿では、巨大地震と原子力災害による深刻なダメージから、農用地における政府や研究機関等の放射能汚染対策や震災復興に係わる取り組みを紹介するとともに、その成果に基づく今後の課題等を報告する。

II. 事故後の放射能汚染対策

1. 作付け制限と農地除染

第一原発事故による放射性物質の大気放出と拡散から農地や農産物への汚染が懸念され、厚生労働省は平成 23 年 3 月 17 日に玄米などの穀類中の放射性セシウム濃度の暫定規制値を 500 Bq/kg と定めた。

食品安全基本法では、食品の安全性の確保に関する施策の策定に当たっては、食品健康影響評価が行われなければならないとされているが、この暫定規制値は、「人の健康に悪影響が及ぶことを防止し、又は抑制するため緊急を要する場合で、あらかじめ食品健康影響評価を行ういとまがないとき」に該当するとして、食品安全委員会による食品健康影響評価を受けずに定められた³⁾。

また、同年 4 月 8 日に原子力災害対策本部では、水田の土壌から玄米への放射性セシウムの移行の指標(移行係数: 最大 0.1)を前提として、玄米中の放射性セシウム濃度が暫定規制値(500 Bq/kg)以下となる土壌中の放射性セシウム濃度が 5,000 Bq/kg 以下であれば、暫定規制値超えは発生しないと判断し、稲の作付け制限についての考え方を公表した⁴⁾。

なお、土壌中の放射性セシウム濃度は、作土層(表面から 15 cm)の平均濃度であり、平成 24 年 4 月 1 日より一般食品の新しい基準値(100 Bq/kg)が設定された。

土壌中の放射性セシウム濃度が 5,000 Bq/kg を超える農地は、除染が必要となり、平成 23 年 6 月から農業・食

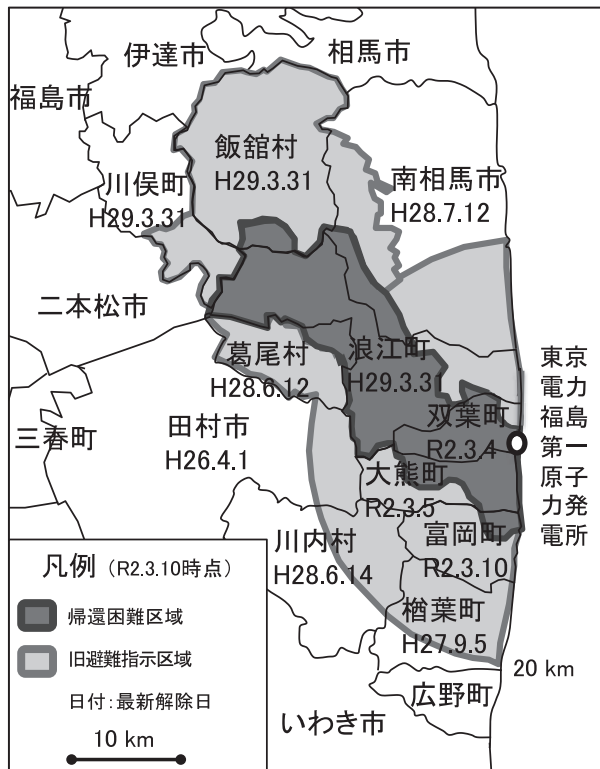


図1 避難指示区域と解除
(出所) 経済産業省, 避難指示区域の概念図より作成

品産業技術総合研究機構(農研機構), 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 福島県農業総合センターなど, 7 独立行政法人, 11 大学, 6 県の農業試験場, 1 財団法人, 3 民間企業が参画し, 農地除染技術開発を行い, 表土削り取りや反転耕などの物理的手法や土壌洗浄などの科学的手法, 生物学的手法であるファイトレメディエーションが検討された⁵⁾。主に採用された農地除染工法⁶⁾を図2に示す。

表土削り取りは, 表層付近に高濃度に集積している放射性セシウムを効率よく除去するために, バックホウ等の機械を用いて表土を物理的に削り取る工法であり, 第一原発の事故後に耕起していない農地に適している。

反転耕は, トラクタに取り付けたプラウにより土壌中の放射性セシウム濃度が高い表層と濃度が低い下層土を反転させ, 放射性セシウムを地中に隔離する方法であり, 廃棄土壌が生じないが, 工事後に反転深さ以上に耕起すると放射性セシウムが再露出する可能性がある。

水による土壌攪拌・除去は, あらかじめ水質を測定し安全を確認した用水を農地に導水し, 代かきに準じて農業用機械で表層土壌を攪拌(浅代かき)した後, 濁水を排水し放射性セシウムを多量に含有する土壌中の粘土を主体とする細粒子のみを排出する工法であり, 原発事故後耕起した農地に適している。

表土削り取りは, 作土層の表層部分を削り取る工法であり, 水による土壌攪拌・除去は, 土壌中の粘土を主体とする細粒子を排出させる工法であることから, これら

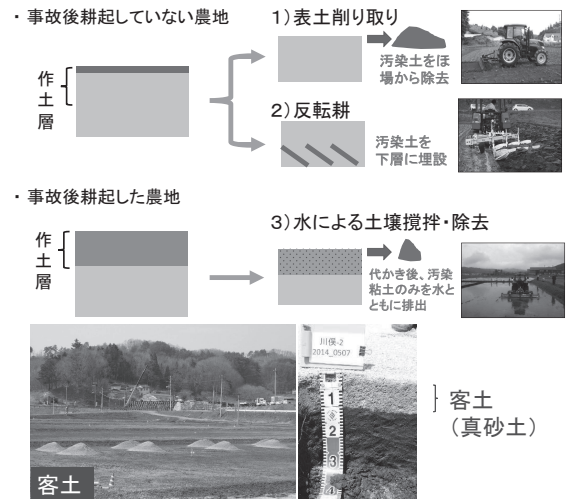


図2 農地除染工法と客土の例
(出所) 農林水産省, 農地除染対策実証事業の結果より作成

の工法を採用した農地では, 地力低下が想定されるため, 各地区の土壌の状況に応じて客土(主に, 真砂土)するとともに, $1,000 \text{ m}^2$ あたりにゼオライト 1 t , ケイ酸カリ 80 kg , 熔リン 100 kg を用いて地力向上を図った。

一方, ファイトレメディエーションの効果が期待されたヒマワリ, アマランサス, ソルガム, ナタネなどを用いた試験結果では, ほとんど効果が認められなかった。

当時, チェルノブイリ事故で効果があつたと多くのメディアに取り上げられ, 平成 23 年に複数の地域でヒマワリを栽培したが, ヒマワリを一作栽培した際に除去できる放射性セシウムは, 土壌に含まれる量の約 1,700 分の 1 であり, ヒマワリの除去率に経年変化がなく放射性セシウムが自然壊変しないと仮定した条件で 10 年間栽培しても除去できるのはわずか 0.6 % であつた⁷⁾。

2. カリウム施用による吸収抑制対策

平成 24 年に福島県内 432 地点で玄米および土壌中の放射性セシウム濃度を調査した結果(^{134}Cs と ^{137}Cs の合計値), 土壌中の放射性セシウム濃度は高いが, 玄米中の濃度が低い検体がある一方, 土壌中の濃度は低い, 玄米中の濃度が高い検体もあり, 土壌と玄米の放射性セシウム濃度に明確な関係は見られず, 土壌から玄米への移行については, 土壌中の放射性セシウム濃度だけでなく, 土壌中の交換性カリ含量や土壌のセシウム固定力が重要であることが明らかになった⁸⁾。

その対策として, 放射性セシウムの吸収抑制の観点からは生育初期の交換性カリ含量を確保することが重要であり, 速効性の塩化カリを施用することが基本となり, 水稻, 大豆, そば, 牧草等, 土壌中の交換性カリ含量の目標値を確保した上で, 慣行の基肥(窒素・リン酸・カリ)を行うこととなった(表 1)。

その結果, 基準値(100 Bq/kg)を超える作物の割合は減少し, 水稻の場合, 全量全袋検査において, 年間検査

表1 慣行施肥前の土壤中の交換性カリ含量の目標値
単位: $\text{mg} \cdot \text{K}_2\text{O}/100 \text{ g}$

作物 区分	水稲	大豆 ^{注1}	そば ^{注1}	牧草 ^{注2}
目標値	25	25	30	30~40

注1 大豆、そばの放射性セシウム濃度が高くなる可能性のある地域では $50 \text{ mg} \cdot \text{K}_2\text{O}/100 \text{ g}$ を目標としている。

注2 牧草は茎葉が対象である。

対象の約 1,100 万袋の内、平成 26 年産からは基準値を超える玄米 2 袋が検出されたが、平成 27 年産以降は確認されていない。

なお、日本ではカリウム肥料をカリ(加里)と呼び、交換性カリ (K_2O) 含量は、 $\text{mg} \cdot \text{K}_2\text{O}/100 \text{ g}$ の単位を用いる。たとえば、水稲の目標値 $25 \text{ mg} \cdot \text{K}_2\text{O}/100 \text{ g}$ (約 $208 \text{ mg} \cdot \text{K}/\text{kg}$) の場合、 1 m^2 あたりの作土層の重さを 100 kg とみなして施肥すると、 $25 \text{ kg} \cdot \text{K}_2\text{O}/1,000 \text{ m}^2$ となり、カリウム (K) 60 % の塩化カリ (KCl) 40 kg を施肥することになる。

また、収穫後の水田への稲わらのすきこみは土壤中の交換性カリ含量を高め、玄米中の放射性セシウム濃度を低減する効果があること、カリウム施用による吸収抑制対策を行っても玄米の食味等には影響がないこと、などが報告されており⁸⁾、各作物の目標値は、平成 24 年度の調査に基づいて設定したことから、農林水産省等では吸収抑制対策地域や、施肥量の見直しを検討している。

3. 農業用水由来の影響分析

第一原発の事故後、帰還困難区域など、除染されていないため池等に水源を持つ地域では、水稲などの栽培が開始されているものの、一部では比較的高い濃度の放射性セシウムを含む用水が地区内水田に流入することが懸念され、特に土地改良区などの農業用水管理者や農業者からは、用水中の放射性セシウムによって、除染後水田の再汚染や、玄米への影響、風評被害などが懸念されていた。

これを受け、農林水産省、農研機構等は、作付けが制限されている地域に位置する除染後の水田を対象に、営農再開に向けた水稲栽培試験を行い、農業用水に含まれる放射性セシウム濃度を形態別に調べるとともに、水田への出入りの定量化を図り、水田内における放射性セシウムの動態分析が行われた⁵⁾。

農業用水中の放射性セシウムは、浮遊する土壌粒子や有機物など不溶性の懸濁物質に固定・吸着されている懸濁態放射性セシウムと水中にイオン等で溶けている溶存態放射性セシウムに区別される(図 3)。

懸濁態放射性セシウムは直接水稲の茎や根から吸収され難いものであり、溶存態放射性セシウムは茎や根を通じて移行しやすいと言われているが、用水中の放射性セシウム濃度は、懸濁物質(SS)の移動が多い降雨時に高く

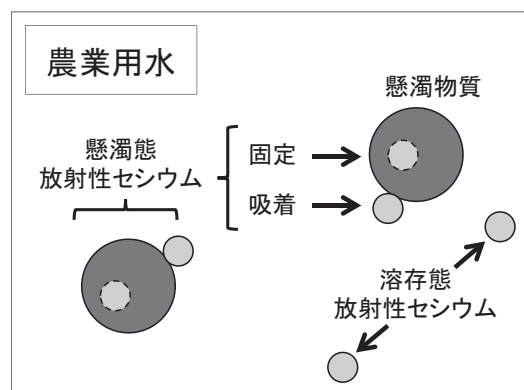


図3 農業用水中の放射性セシウムの存在形態の概略

なり、ほとんど懸濁態放射性セシウムとして存在する。

水田に流入した用水中の放射性セシウムは、水尻に向かって減少傾向にあり、水口付近を中心に蓄積される可能性が高いが、除染後 930 Bq/kg の土壤中の放射性セシウムの平均濃度をもつ水田を対象に調べた結果、用水から水田に流入した放射性セシウム総量は、すでに水田に存在する土壤中の放射性セシウム総量の 0.076 % であり、再汚染の可能性は低いと報告されている⁸⁾。

営農が行われている地域においては、カリウム施用を適切に行えば、農業用水を通じて流入した放射性セシウムによる基準値を超える米への影響は認められず、その影響は限定的であると考えられている。

4. 水中の放射性セシウム濃度の監視技術

前述のように吸収抑制対策が成功し、農業用水中の放射性セシウムによる再汚染や玄米中の放射性セシウム濃度への影響は認められないことが明らかになったが、営農再開後の安全安心への材料の一つとして、特に降雨時における農業用水中の放射性物質の見える化が求められている。

農業用水中の懸濁物質(SS)濃度と懸濁態放射性セシウム濃度には、濁度と同様に、地点毎に強い相関が認められ、これらの関係を用いた用水中の放射性セシウム濃度の推定値、水質、取水量などの情報を、ICTを活用してリアルタイムで農用水管理者や農業者に共有できる技術が開発された⁹⁾。

本技術は、帰還困難区域に位置する大柿ダムの取水施設や、一部の幹線水路に導入され、濁度センサーを用いて、農業用水中の放射性セシウム濃度の推定値をモニタリングしている。

Ⅲ. 営農再開の特徴と今後の課題

第一原発の事故後、さまざまな研究活動や公的支援によって、短時間で復旧作業や除染が進み、避難指示が解除され、一部営農再開の開始は評価すべきである。しかし、震災復興は完了ではなく、継続的な取り組みが必要

である。

筆者はこれまで、作付け制限区域で避難中の農業者とともに営農再開に向けた実証栽培試験を行い、多くの農業者と出会った。地域を従来どおり取り戻したい意欲を持つ農業者が存在する一方で、営農意欲を失い、各種の補償のみ求める農業者も少なくなかった。令和3年度以降、復興支援策の転換に伴い、政府等による公的支援が減少あるいは廃止されても、農業者が自立できる持続可能な農業政策が今後の大きな課題である。

特に、福島県の農業農村は担い手不足、耕作放棄地の増加などの全国的な課題が加速しており、日本の将来の姿でもあると言える。令和2年3月時点での避難指示解除後の帰村率から(表2)、少ない帰村者で営農が再開されると、従来の手法では対応できないさまざまな問題が生じてくると思われる。

営農再開における稲作の特徴は、一挙に少人数による経営という環境条件が与えられたこと、政府等の特別な公的支援が行われる環境にあること、中山間地域を含む過酷な特別条件を持ち、農村地域の将来の姿の先取りの可能性にあること、などである。

帰村し営農を再開するには、放射能の問題、急激な生活の変化、各種の補償、被災による心理的な問題が存在し、農業水利施設の損傷、農業機械の故障など、さまざまな特別条件を持ち、一般の地区とは異なる諸条件を考慮しつつ、被災地に適した公的支援が必要である。

農学分野において大別して、①避難先からの帰村による営農再開や、地域コミュニティの再建、②農林業の生産物やその加工品の安全確保、③放射能汚染をめぐる風評被害の克服、④営農再開後、農業者自らが維持管理できる環境づくり、などの課題の解決が求められていることから、技術的、財政的な公的支援のあり方が重要な課題である。

IV. おわりに

本稿では、東京電力福島第一原子力発電所の事故後、農用地における放射能汚染対策とその成果、今後の課題について報告した。

表2 旧避難指示区域の住民登録人口と居住人口
単位：人、世帯

区分 市町村	震災前 人口	登録数 (a)	居住数 (b)	割合 (b/a×100)
飯舘村	6,177 (2,697)	5,394 (2,278)	1,452 (737)	26.9 % (32.4 %)
浪江町	21,434 (7,671)	16,950 (6,837)	1,332 (843)	7.9 % (12.3 %)
南相馬市 小高区	12,840 (3,791)	7,290 (2,716)	3,663 (1,608)	50.2 % (59.2 %)

※()は世帯数、登録数と居住数は令和2年3月現在
(出所)飯舘村、浪江町、南相馬市のホームページより作成

避難指示が解除され今後営農再開が期待される地域において、カリウム施用を適切に行えば、農業用水等による玄米への影響は認められないとされているが、これは主に吸収抑制対策によるものであり、従来通り対策が不要で安全が確認されるまではモニタリング調査を継続し、農業者および消費者の理解を深める必要がある。また、農業者自らが実践できる営農システムづくりや、そのための公的支援のあり方が今後の大きな課題である。

－ 参考資料 －

- 1) 福島県農林水産部、農林水産分野における東日本大震災の記録, https://www.pref.fukushima.lg.jp/download/1/99_ikkatsu.pdf(参照 2020.4.30)
- 2) 経済産業省、避難指示区域の概念図と各区域の人口および世帯数について(令和2年3月10日), https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/hinan_history.html(参照 2020.4.30)
- 3) 高橋和之、食品中の放射性核種濃度基準値の設定, 食品衛生学雑誌, 54(2)97-101, 2013.
- 4) 原子力災害対策本部、稲の作付けに関する考え方, https://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/ine_sakutuke.html(参照 2020.5.8)
- 5) 久保田富次郎, 申文浩, 宮津進, 錦織達啓, 農研機構の農業農村工学分野を中心とした原発事故対応研究, 農業農村工学会誌, 88(2)107-110, 2020.
- 6) 農林水産省、農地除染対策実証事業の結果, <https://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/kekka.pdf>(参照 2020.6.10)
- 7) 佐藤睦人, ファイトレメディエーションによる放射性セシウム除去効果の検証, 日本土壤肥科学雑誌, 85(2)136-137, 2014.
- 8) 農林水産省、放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について, https://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/youin_kome2.pdf(参照 2020.5.8)
- 9) Moono Shin, Tomijiro Kubota, Yuzo Manpuku, Yukio Suzuki, Tetsuo Yasutaka, Hisaya Matsunami, Takeshi Ota, Behavior of radiocesium in decontaminated paddy fields in Fukushima Prefecture, Japan, Paddy and Water Environment 17(4)703-714, 2020.
- 10) 申文浩, 久保田富次郎, 宮津進, 引木信也, 李相潤, 被災地の農業用水の安全・安心へ向けた ICT 活用の取組み, 農業農村工学会誌, 86(4)281-284, 2018.

著者紹介

申 文浩 (しん・むの)

福島大学食農学類
(専門分野/関心分野) 農業土木学, 農業水利学, 水資源利用学



原子力災害による被害から営農再開まで 食の安全を確保するために

福島大学 小山 良太

東日本大震災、東京電力福島第一原子力発電所事故から9年が経過した。福島県では福島県産米等に対し、「入口」の生産段階で安全性を担保し、流通経路にのる「出口」段階でさらに全量全袋検査を行い、安全と安心を担保するという2段階の仕組みとなっているが、その取り組みが一部に周知されておらず、事故直後のイメージのままの消費者が現在でも存在している。本稿では福島県における9年間の放射能汚染対策、流通風評対策について現状と課題を示す。

KEYWORDS: Nuclear disaster, Radioactive contamination, Harmful rumor, Food safety, Inspection system, FUKUSHIMA, Risk communication

I. はじめに

福島県では、作付制限、出荷制限品目などの放射能汚染に関わり農業生産、農産物流通の制限を経験し市場評価の低下、「風評」問題が継続している。生産現場では営農意欲の減退から離農問題が顕在化している。

原子力災害以前(2010年)の福島県の農業粗生産額は約2,330億円であったが、農産物の損害賠償額が625億円にのぼることから、年間では1,000億円程度の損失と推計された。2019年の損害賠償額は累計で約2,500億円(請求額3,300億円)となっている。フローの産出額のみでこの被害実態の規模である。震災前の販売農家は約7万戸であったが、1年間で約2,000戸の減少となっている。福島県人口は原発事故後1年で4.5万人が減少し、200万人を切る人口規模となっている。

このような数字上の損害だけではなく、農村自体も問題を抱えている。農村内部には、自然の恵みに加え、地域の営農を支えるさまざまな資源、組織、人間関係が構築されてきた。このような農村内部の関係性(社会関係資本)により、日本の農業は維持・形成されてきたのである。今回の原子力災害の最大の問題は、放射能汚染により農産物が売れないといった経営面に限った事柄ではなく、生産基盤である農地、ひいてはそれを維持する農村という共同体それ自体も大きく毀損したことである。福島県では、地域の担い手や集落での営農方式などが受けた被害からどのように地域農業を再生させるのが大きな課題となっている。

II. 原子力災害の到達点

2011年3月11日に発生した東日本大震災からの復興は中間地点に差し掛かっている。復興庁(東日本大震災からの復興の状況と取組, 2019)によるとその被害状況はほぼ回復という評価をされている。発災当時、約47万人いた避難者は6.2万人まで減少し、被災3県(福島・宮城・岩手)における津波被災農地の営農再開率83%(16,770 ha)、漁業産出額回復率93%(743億円)、製造品出荷額は震災需要の増加もあり3県ともに100%を超える回復率となっている。しかし、地震・津波に加え原子力災害の被害地域となった福島県においては、農地の復旧率(除染を含め営農再開可能な農地)55.6%、漁業産出額回復率46.7%に留まっている(福島県、ふくしま復興のあゆみ第23版, 2018)。これは放射能汚染に伴い、長期間に及ぶ避難、放射性物質検査の実施、作付制限・出荷自粛、試験栽培・試験操業など原子力災害特有の被害を回復させることの困難性を表しており、まさに「社会変動」を体现している。

放射能汚染による社会変動を経験した地域産業の損害は3つの枠組みで捉えられる(小山・小松, 2013)。

第1は、フローの損害である。これは、作付制限対象となった農産物、出荷制限となり生産物が販売できなかった分の経済的損失および「風評被害」等による取引不成立や価格の下落分の損害である。原発事故以前(2010年)の福島県の農業粗生産額は約2,330億円であったが、事故後(2011年)は1,851億円と減少し、2018年には2,077億円まで回復している。この間の損害賠償額は約3,030億円であり、作付制限・出荷制限に伴う賠償の他、農地を利用できない期間の賠償も含まれる。

第2はストックの損害である。これは、物的資本、生

From damage caused by the nuclear disaster to the resumption of farming ; To ensure food safety : Ryota Koyama.

(2020年6月30日受理)

産インフラの損害であり、農地の放射能汚染、避難による施設・機械の使用制限などが含まれる。2013 年度より、東京電力による財物賠償が開始されたが、減価償却が終了した農機具などは一括賠償の対象となり、再購入価格には程遠い賠償額が査定されてしまうという問題を抱えている。

重要なのは第3の社会関係資本の損害である。これまで地域で培ってきた産地形成に関わる投資、地域ブランドなど市場評価を高めるための生産部会活動、農村における地域づくりの基盤となる人的資源やそのネットワーク構造、コミュニティー、文化資本など多種多様な社会関係資本が損害を被り、地域社会は危機の段階から変動を前提した構造に変化した。避難指示区域では十数年におよびこれら地域資源・社会関係資本を利用することが出来ない。この損失分をどのように測定するか、対策としてどのように穴埋めするか、このことは極めて重要な問題となる。現段階では、原子力損害賠償紛争審査会（原子力損害の賠償に関する法律第18条に基づいて文部科学省に臨時的に設置される機関、2011年4月11日設置）でもまったく手つかずの状況である。

原発事故という「危機」を経験し、福島県の被災者・住民はさまざまな局面で分断されてきた。放射能のリスクに関する考え方、事故直後に避難したのかしなかったのか、福島県産農産物を食べるのか食べないのか、福島で子育てを行うのか、避難指示解除区域に帰村するのか避難を継続するのか、賠償金を貰っているのか貰えないのか。さまざまな場面で分断が継続・深化している。それぞれ異なる意見を一つにまとめるためには時間がかかる。原子力災害の最大の損害は再生の準備のための時間を奪ったことに他ならない。緊急時の復旧段階から本格的な復興段階に移行するにあたり、このような損害と損失、損害の現象形態を整理した上での復興政策の策定が必要である。

原子力災害発災10年を機に検討されている放射能汚染対策、放射性物質検査体制の転換に対し、この間の「風評被害」状況および流通構造の変化を踏まえた新たな検査制度、産業振興政策の構築とそれに基づく産地形成の在り方を検証する必要がある。そのためには震災10年の間に何が損なわれ、何が回復可能であったのか、原子力災害の損害構造を明確にすることが必要であり、原子力災害に伴い実施されたさまざまな事業、補助の総括を行うことが求められる。震災前には戻れない福島の産地において新しい産地と流通システムを構築するための基礎資料の作成が急務である。

Ⅲ. 震災10年の総括を

今回の原子力災害では、まず賠償の枠組みが示されたことによる混乱が大きな問題となっている。原子力損害

賠償法では、価格下落分の賠償（風評）、避難に伴う経済的損失などを個人ベースに賠償する仕組みであったが、産地、農村、地域ブランド価値の下落といった面的な損害に対する補助、支援の枠組みが不明確なまま現在に至っていることが地域内のさまざまな軋轢や分断を生んでいる。この根本的な原因はそもそも震災、原発事故により何が毀損されたのかを明確に区分できていないことに起因する。回復可能な損害（出荷停止分や価格の下落、移転費用など）と不可逆性の高い損失（ブランド価値の低下や後継者層の流出など）を明確に区分するためにも原子力災害実態調査報告の作成が急務であるといえる。

原発事故の原因と責任に関しては、問題点も指摘されているが、国会、政府、民間による事故調査委員会の報告書が出されている。しかし、原子力災害、放射能汚染問題に関しては、福島県、復興庁、福島県立医大など各主体がそれぞれの地域の課題・テーマで報告を行っている状況である。一方、旧ソ連、ベラルーシ、ウクライナにおけるチェルノブイリ事故の報告では、国の機関である緊急事態省による年次報告書、5年ごとの報告資料など、健康、避難、食品検査などに関する総合的な報告書が提出され、原子力災害に関する国際的な総括資料となっている。

10年が経過する今、国による総合的な原子力災害の総括が正式な報告資料として発表されていないのである。国際的にも日本のどの報告書を基に放射能汚染問題、原子力災害の10年間の結果を判断したらいいのか分かりづらく、それがさまざまな不安を増長させる一因となっているといえる。避難計画、食の安全検査、被ばくの抑制など放射能汚染対策を体系的に整理した原子力災害対策のためには、10年が経過した現状を詳細に整理した原子力災害に関する報告資料を作成する必要がある。

Ⅳ. 農産物における放射能検査の到達点

筆者は、事故当時から、福島大学うつくしまふくしま未来支援センター（以下 FURE と表記）を中心に関係研究機関と連携しながら原子力災害の損害構造の解明、食料・農業生産の再生に向けての試験研究を実施してきた（H23年5月～）。当時は、FURE 農業復興支援担当として、農地放射性物質分布マップの作成（小山・小松・石井、2012）、作付制限地域における試験栽培の実施と作物への放射性セシウム移行メカニズムの解明、吸収抑制対策の効果の検証を組織的に推進してきた。放射能汚染地域における食と農の再生には、自然の物質循環サイクルにおける放射性物質の挙動の分析と農地・営農環境・作付作物ごとの移行メカニズムの把握が必要である。この成果の一部は日本学術会議の提言として発表し、その上で作物ごとのリスク評価、リスクレベルに合わせた吸収抑制対策の実施と検査体制を設計し、それを認証する仕

組みが必要であることを示した(日本学術会議, 2013)。

現在, 課題となっている食品と放射能に関する「風評」被害問題は, 一方的に安心してくださいと情報を押し付けるのではなく, 消費者が安心できる「理由」と安全を担保する「根拠」を提示することでしか解決できない。安全の根拠は, ①営農環境における放射能汚染実態, ②植物体への移行メカニズムの把握とそれに合わせた吸収抑制対策の実施, ③リスクに応じた検査体制の確立と認証制度, を基に構築することが必要であり, 放射能汚染対策と検査体制の体系化が求められてきた。

東京電力福島第一原発事故後, 9年間, 福島県産農産物に関して, 米は毎年約35万トン, 1,000万袋を全量検査し, 米以外の果樹, 野菜, 畜産物等は毎年2万検体を超えるモニタリング検査を実施してきた。その結果, 山菜, きのこなど野生物を除く作物では, 放射性物質の基準値を超えるものはなくなり, 検出限界を超えるものはほぼみられなくなった。これは農地の除染, カリウムの施肥などの吸収抑制対策, 移行係数の高い作物から作付転換, 過去に放射性物質の検出された農地などにおける作付自粛など, 結果として総合的な対策が福島県において自主的に実施されてきた成果である。

米は水田を利用する作物であり, 2011年の事故初年度はさまざまな要素の影響を受け作物中の放射性物質濃度の分散が大きかったこととその要因が明らかになっていなかったため, 全農地, 全農家, 全玄米を検査することとなった。事故当時の農業用水の影響や土壌中カリウムの欠乏がセシウムの吸収を促すことなどさまざまな試験研究の成果が蓄積され, 作付制限, 農地の除染, カリウム散布(標準施肥量)による吸収抑制策など, 生産面での対策が強化された。その結果, 栽培レベルで安全性を確保することが可能になった。つまり, 福島県産米は「入口」の段階で安全性を担保し, 流通経路にのる「出口」段階でさらに全量全袋検査を行い, 安全と安心を担保するという2段階の仕組みとなっているのである。

本来, 消費者, 流通業者としては米に放射性物質が混入していないという安全性の担保を求めており, それは「入口」で確実に実施されるものである。その実効性をモニタリング検査(サンプル方式)で確認するのが安全性確保の考え方である。入口における生産段階での対策が確立していなかった当時, やむなく出口において全量全袋検査を実施し, 検査漏れを防ぐ対策を施してきた。

生産面における放射能汚染対策が実施されている現在, 流通段階における全量全袋という検査方式を見直すことは理にかなっている。問題は, 生産面での対策が実施されていることが多くの流通業者, 消費者に周知されていないことである。周知のための期間の確保と啓発の取り組みが必要である。

V. 原子力災害からの復興過程

原発事故, 原子力災害, 放射能汚染問題を受けて, 福島県では, この9年, さまざまな取り組みを行ってきた。その過程を整理すると5つの段階に分けられる。

第1段階は「原発事故と避難・防護」である。原発事故直後, 放射能汚染から身を守るために初期段階の避難が必要であった(予防原則)。

第2段階は「放射能測定と汚染対策」である。原発事故により, 放射性物質が広範囲に拡散した場合, まずは放射能飛散状況を確認し, どの地域にどの程度放射性物質が降下したのかを把握する必要がある。

第3段階は「損害調査と賠償」である。これは, 原子力災害による損害状況を調査しそれに基づく賠償方式を構築することである。現在の賠償方式は政府の示した賠償指針に基づき「原子力災害対策特別措置法」のもと, 事故当事者の東京電力が個別に賠償(補償)を行うという枠組みである。裁判以外にもADR(裁判外紛争解決手続)という手段が用意されている。しかし, この考え方では, まず賠償の枠組みがあり, その枠組みのもとで損害を認定せざるを得ない。つまり, 賠償範囲外の損害は無視されてしまう。この枠組みの下ではそもそも原発事故により何が毀損されたのか, 原子力災害の現状を把握することが出来ないのである。

第4段階は「食の安全性の確保と風評被害対策」である。風評対策は, 検査体制の体系化に伴い食の安全性の確保ができてはじめて可能となる。汚染状況が不明のまま安全宣言を出した2011年の原発事故初年度とは, 状況が大きく変わっている。

最後にこれらの段階を踏まえ, 第5段階としてはじめて「営農再開・帰村と復興」が可能となる。段階的な避難区域再編に伴い, 避難地域では汚染度の低い地域から段階的に帰村が始まっている。しかし住宅の周りだけ除染し居住空間の線量率だけを下げても, それだけでは帰村後の生活は元に戻らない。周辺の山林や里山が利用可能か, 農業を再開し自給することが可能かどうかという点が重要なのである。帰村の判断を保留している避難者は先行して帰村した方達の現状を詳しくみている。農村の生活のサイクルを考慮した復興政策が必要である。この意味において, 地産地消における安全性の確保, 地域での食と農の再生が復興の鍵となるといえる。

震災, 原発事故から6年が経過した2017年時点には, 避難地域の解除が進んだ。葛尾村は2016年の6月に避難指示解除を行い, 2017年3月には川俣町, 浪江町, 飯館村の一部, 4月には富岡町が解除となった。しかし, 避難区域における住民アンケート調査結果をみると, 高齢層はある程度帰村するが, 若年層, 勤労世代はほとんど帰らない。解除地域全体の帰村率は8.6%に留まっていた(復興庁調査, 2017)。

ここには二つの問題がある。一つは、原発事故による避難指示が長期間にわたるという問題である。避難が長期間となり、避難先で生活再建しているケースでは帰村の判断が複雑となる。原子力災害は、二次的な問題として、避難が長期化しているという事実を念頭におく必要がある。

避難から6年をへて避難指示を解除したとき、長期間避難していることを念頭に避難解除後の設計をする必要がある。2011年避難当時70歳であり、2020年時点で79歳の高齢者の場合、人生の最後にふるさとに戻りたいと希望することもある。70歳を過ぎ、9年間知らない土地で過ごしたが、終の棲家に帰りたいという思いである。一方で、子育て世代であれば、長期間の避難の中で子供の就学のサイクルの問題に突き当たる。2011年度の避難時に子供が小学校4年生だったとする。2020年度大学1年生である。その場合、転校や進学の問題に直面する。子どもたちは多感な小中学校高校時代の9年間を新たな避難先で過ごし、新しい人間関係を構築している。ただ「故郷が大事だ」というだけでは、現実的ではないのである。

もう一つは、生業(なりわい)の再生の問題である。9年間、まったく何もおこなわれていなかったところに戻ったときに何をするのか。地域での生業という点では、その地に立脚した第一次産業は重要な産業である。しかし、農林水産業こそが原子力災害の最大の被害産業である。帰村した後、農林漁業がたとえ自給目的でもできないとなれば、村で生活するうえでは大きな障害になる。これからが真の復興の正念場であると言える。

VI. おわりに

損害構造の把握が困難な状況下で緊急的な復興政策が施されたが、市場構造の変化に対応した対策は為されず、イベントを含む「風評」対策では、本来必要な生産復興と流通対策への接続が形成できずにいる。

原子力災害発災10年を機に復興庁の縮小再編や、福島県産米全量全袋検査からモニタリング検査への移行が検討されている。旧避難地域である双葉8町村では帰村・営農を再開しているが、帰還、事業再開に関して、「損害構造」(①フロー：域内生産物、②ストック：地域内資源、③ストック：社会関係資本)の解明を前提に新たな

復興政策の構築が必要である。また、賠償制度や検査体制など原子力災害対策の転換に対し、放射能汚染対策から地域産業復興へと新たな復興政策に繋げる仕組みの検討が必要である。

震災後の地域産業における「社会変動(風評被害状況および流通構造の変化)」を踏まえ、震災10年を目途に損害と損失構造の把握、それに基づく地域産業形成の在り方を提示し、震災前には戻れない福島の産地において新しい産業構造と生産・流通システムを構築することが必要である。

－ 参考資料 －

- 1) 濱田武士・小山良太・早尻正宏、福島に農林漁業をとり戻す、みすず書房、2015年。
- 2) 小山良太・小松知未・石井秀樹、放射能汚染から食と農の再生を、家の光協会、2012年。
- 3) 小山良太、東日本大震災からの復興と地域研究—福島県における原子力災害研究に注目して—、地域経済学研究、第33号、日本地域経済学会、2017年。
- 4) 小山良太、農業復興と情報、災害情報、No.14、日本災害情報学会、2016年7月。
- 5) 小松知未・小山良太・小池晴伴・伊藤亮司、米全量全袋検査の運用実態と課題—放射性物質検査に関する制度的問題に着目して—、農村経済研究、第33巻第1号、東北農業経済学会、2015年。
- 6) 小山良太「原子力災害の復興過程と食農再生」『計画行政』第38巻第2号、日本計画行政学会、pp.9-14、2015年5月15日。
- 7) 小山良太・小松知未、放射線量分布マップと食品検査体制の体系化に関する研究—ベラルーシ共和国と日本の原子力発電所事故対応の比較分析—、2012年度日本農業経済学会論文集、日本農業経済学会、2012年。
- 8) 小山良太・小松知未、農の再生と食の安全—原発事故と福島の2年—、新日本出版社、2013年。
- 9) 日本学術会議「原子力災害に伴う食と農の『風評』問題対策としての検査態勢の体系化に関する緊急提言」2013年9月6日。

著者紹介



小山良太 (こやま・りょうた)

福島大学食農学類

(専門分野/関心分野) 農業経済学、地域経済学、協同組合学、フードシステム/原子力災害、風評被害、食の安全

震災 10 年以降を見据えて 復興政策の課題

福島県庁 橘 清司

震災から 9 年余りが経った今なお、福島の復興・再生は約 4 万人が県内外で避難生活を継続する等まだ道半ばである。避難指示解除の時期の違いで復興の進捗にも明確な差が生じており、震災 10 年以降、進捗に応じて生じる新たな課題への的確な対応が必要である。イノベ構想では、国際教育研究拠点の具体化を始め、これまで整備したさまざまな拠点施設を有機的に連携させ、経済効果を県内全域で実感できるように引き上げていく必要がある。

KEYWORDS: *The Great East Japan Earthquake, Tsunami, Nuclear disaster, Reputational damage, Difficult-to-return zone, under evacuation, Fukushima Innovation Coast Framework*

I. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災は、わが国の観測史上最大のマグニチュード 9.0 の地震が発生し、大津波で広範囲にわたる被害が生じるとともに、東京電力福島第一原子力発電所 1～3 号機の炉心溶融および 1, 3, 4 号機の水素爆発で放射性物質が大気中に放出されたことに伴い、多くの住民が避難を余儀なくされ、産業への打撃や風評被害が発生する等、未曾有の複合災害となった。

福島県では、死者が 4,137 人(うち関連死 2,307 人)、住家被害が全壊 15,224 棟、半壊 80,803 棟、一部損壊 141,044 棟等、公共土木施設等被害額が約 3,162 億円ⁱ、農林水産業被害額が約 2,753 億円、さらには県内外に最大 164,865 人にも上った避難者等、極めて甚大な被害に見舞われた。加えて、県土へ広く放出された放射性物質に起因して国内外から“FUKUSHIMA”に対する謂われなき偏見・差別の目が向けられ、福島県産農水産物の価格急落やインバウンドを含めた観光客入込数、修学旅行等の教育旅行入込数の大幅減等の風評被害に苦しめられることになった。

復興に当たっては、国会で東日本大震災復興基本法が制定され、政府において、「東日本大震災からの復興なくして日本の再生なし」との基本認識の下、同法に基づく「東日本大震災からの復興の基本方針」が定められ、震災からの 10 年間について、最初の 5 年を「集中復興期間」、次の 5 年を「復興・創生期間」と位置付け、総力を挙げて復興に取り組むことになった。

復興の司令塔の役割を担う復興庁が設置されるととも

に、激甚災害法等の各種法令に基づく措置に加え、復興財源約 32 兆円を確保した「復興財源フレーム」の策定、復興特別会計の設置、特例措置の法制化、被災自治体の人的・財政的支援等の復興を支える仕組み等、復興を強力に進めるための体制・制度・財源が整えられた。特に、福島の復興・再生に対しては、その置かれた特殊な事情を踏まえ、福島復興再生特別措置法(以下「福島特措法」という。)が制定された。

復興庁、経済産業省および環境省では、福島県内に現地事務所として福島復興局、原子力災害現地対策本部および福島地方環境事務所が設置されるとともに、原子力災害から最も厳しい被害を受けた 12 市町村ⁱⁱ(以下「原子力災害被災 12 市町村」という。)を中心に、現地駐在員を派遣しプッシュ型で被災地の課題や要望を把握する等、政府と被災自治体との間で円滑な意思疎通を実現する体制が整備された。

被災事業者の自立に向けては、政府・福島県庁・民間事業者が一体となって福島相双復興官民合同チームを設置し、全ての被災事業者を個別訪問して課題や要望を丁寧把握し、きめ細かに支援する取組が行われた。

さらには、経済界・産業界やアカデミア(大学、専門学校等)、NPO、ボランティア等、国内外のさまざまな主体から温かくきめ細かな支援が継続的に提供された。

本稿では、未曾有の複合災害から 9 年余りが経過した福島の復興・再生の現状を整理するとともに、震災 10 年以降を見据え今後の復興の基本的方向性を説明する。

Future perspective of restoration policy in Fukushima after 10 years From the Great East Japan Earthquake and nuclear disaster : Kiyoshi Tachibana.

(2020 年 5 月 25 日 受理)

ⁱ 避難指示区域内では災害査定が実施できないため、南相馬市の一部および双葉郡 8 町村の被害額は含まれていない。

ⁱⁱ 田村市、南相馬市、伊達郡川俣町、双葉郡(広野町、楡葉町、富岡町、川内村、大熊町、双葉町、浪江町、葛尾村)、相馬郡飯館村

II. 福島を取り巻く環境

1. 復興・再生の現状

福島第一原発は、原子炉の冷温停止状態が達成された後、中長期ロードマップに基づき、燃料デブリや使用済燃料プールからの燃料取出し等、1～6号機の廃炉措置等の取組が進められている。ALPS(多核種除去設備)処理水の処分方法については、今年2月、政府の小委員会が海洋放出か大気放出が現実的との報告書が出され、風評被害等の社会的な観点も含め、政府で結論を得るための議論が進められている。福島第二原発についても、昨年7月、1～4号機の廃炉措置が決定され、これによって、県内に立地する原子炉10機全ての廃炉が決まった。

県内の空間放射線量は、帰還困難区域ⁱⁱⁱを除いて2018年3月末までに、対象となった全ての市町村で面的除染が完了し、自然減衰の効果も含めて、大幅に低下した。

2014年以降、原子力災害被災12市町村の避難指示解除が段階的に進み、帰還困難区域を除くほとんどの地域で避難指示が解除され、避難指示区域の面積は県土全体で震災直後の約12%から約2.4%へと縮小した。

2017年5月の福島特措法の改正では、将来にわたって居住を制限するとされてきた帰還困難区域内に避難指示を解除し居住を可能とする特定復興再生拠点区域(以下「拠点区域」という。)を定めることができるようになり、6町村^{iv}で計画が作成され、今年3月、双葉町、大熊町および富岡町の拠点区域内の一部で避難指示が解除された。

避難指示の解除を契機に、買い物、医療、介護、福祉、教育、鳥獣害対策等、生活環境の整備を進め、避難者数は減少してきたものの、未だ約4万人(県外に約3万人、県内に約1万人)の県民が県内外で避難生活を継続しており、避難指示が解除された区域全体の居住者は約1.3万人に留まっている(住民基本台帳上の人口は約6.9万人)。

被災地の経済発展の基盤となる道路、鉄道等の交通インフラについては、2015年3月の常磐自動車道の全線開通や2020年3月のJR常磐線全線再開、県北部で常磐自動車道と東北自動車道を結ぶ相馬福島道路の2020年度中の全線開通等、復旧や整備が飛躍的に進められた。

産業・生業の再生については、原子力災害被災12市町村において、福島相双復興官民合同チームによる事業者および農業者への個別訪問等を通じて、約2,700の事業者が地元または避難先等で事業を継続・再開し、約350の農業者が営農を再開しているものの、営農再開面積は3割弱に留まっている。中小企業等グループ補助金、企業立地補助金、復興特区税制等により、製造品出荷額等が県全域では震災前の水準をほぼ回復しているものの、双葉郡8

町村では震災前の2割程度の水準に留まっている。

観光については、教育旅行も含めて、インバウンドを含めた延べ宿泊者数が全国に比して特に低い水準に留まる等、根強い風評被害への対策を進める必要がある。

このように、福島の復興・再生は、深刻で複雑な課題が山積しており、未だ道半ばの状態にある。

2. 復興・再生に影響を及ぼす事象の発生

昨年10月、台風19号等が襲来し、県内の広範に及ぶエリアにおいて、県内を南北に縦貫する一級河川の阿武隈川やその支川等、23の河川で50ヶ所の堤防が氾濫し大規模な洪水が発生した。死者が38人(うち関連死6人)、住家被害が全壊1,497棟、半壊12,311棟、一部損壊6,552棟、公共土木施設等被害額が1,389億円、農林水産業被害額が636億円等にも及ぶ甚大な被害が発生した。破堤した河川堤防等、公共土木施設等の復旧には、今後、複数年間を要する見込みである。

さらに今年は、新型コロナウイルス感染症の影響を受け、緊急事態宣言が全国で発令され、県内でも4例のクラスター発生を含め、4月30日時点で感染者が73例を数える等、感染拡大が続いており、医療提供体制の逼迫とともに、地域経済に深刻な影響が広がっている。

特に新型コロナウイルス感染症は、県民の日々の暮らしから働き方に至るまで、感染拡大防止に人と人との接触をなるべく減らすため「3つの密(換気の悪い密閉空間、多数が集まる密集場所、間近で会話や発声をする密接場面)」をできるだけ避ける等、「新しい生活様式」を取り入れることが求められ、働き方についても在宅勤務やテレワークの導入の飛躍的な進展等、大きな社会変革がもたらされ始めており、沈静化後の社会状況を見通すことが難しい状況にある。

県民はこうした復興・再生に大きな影響を及ぼす事象の発生により三重苦、四重苦に苦しんでいる状況にある。

3. 人口減少の見通し

福島県の人口は、1998年1月の約214万人をピークに減少に転じてきた中での東日本大震災の発生であったが、震災以降、18万人を超える人口が減少し、現在、約183万人(2020年4月1日現在)となっている。今後も、未婚化、晩婚化、晩産化等が進行して子どもの数の減少による自然減や、進学期と就職期、特に20～24歳の若者の東京圏への流出による社会減という構造的要因から減少傾向が続く見込みであり、避難者の動態予測も踏まえた福島県庁の独自推計によると、2040年には約143万人、2060年には約100万人になると推計されている。

こうした急激な人口減少が進行することにより、地域経済では就業者や消費者の減少による、各産業での人材不足や消費市場の縮小が進んで活力が低下するとともに、地域社会では地域コミュニティや社会保障、行財政

ⁱⁱⁱ 放射線量が非常に高いレベルにある(年間積算線量50mmSv超)ことから、バリケードなど物理的な防護措置を実施し、避難を求めている地域を言う。

^{iv} 双葉町、大熊町、浪江町、富岡町、飯館村、葛尾村

運営等地域を支えるさまざまな分野で、従来の水準を維持することが困難になることが懸念されている。

原子力災害被災 12 市町村でも、復興プロセスの長期化により「課題先進地域」と呼ばれるほど、少子高齢化や過疎化による地域経済の縮小や地域コミュニティの衰退等、わが国が現在抱える社会課題を先取りして加速度的に顕在化する地域となっている。

Ⅲ. 浜通り地域等の重要課題

1. 福島イノベーション・コースト構想

福島イノベーション・コースト構想(以下「構想」という。)は、東日本大震災および原子力災害で失われた浜通り地域等の産業・雇用を回復するため、新たな産業基盤の構築を目指して 2014 年 6 月にまとめられたもので、2017 年 5 月の福島特措法の改正で、構想の推進が国家プロジェクトに位置付けられている。同年 7 月、構想を推進する中核的な機関として「福島イノベーション・コースト構想推進機構」(2019 年 1 月より公益財団法人へ移行)を設立して、福島県庁と復興庁および経済産業省、福島相双復興官民合同チーム等が連携を深め、その具体化や効果発現に向け、全力で取り組んでいるところである。

構想では、福島第一原発の廃炉作業を円滑に進めるために必要なロボット技術等の研究開発等が、廃炉以外の分野の先端課題の解決においても活用できるポテンシャルを秘めており、研究者や技術者がけん引役となって地域の復興を支えることを目指している。これらに加えて、地域で興りつつあるエネルギーや先進的な農林水産業等のプロジェクトを土台として、新たな研究・産業拠点を地域全体で戦略的に整備していくことによって将来的な新技術や新産業の創出につなげていく。

このため、(1)廃炉、(2)ロボット・ドローン、(3)エネルギー・環境・リサイクル、(4)農林水産業、(5)医療関連、(6)航空宇宙の 6 分野を重点分野に位置付けている。

構想推進地域は、原子力災害被災 12 市町村に、いわき市、相馬市、新地町を加えた 15 市町村になるが、地元企業の経営力・技術力等を強化し、新たな事業展開や取引拡大を図って域外から企業や人材を呼び込み交流人口を拡大させることによって、経済効果は、浜通り地域等に留まらず、県内全域に及ぼせることを目指している。

2019 年 12 月、復興庁、経済産業省および福島県とで「福島イノベーション・コースト構想を基軸とした産業発展の青写真」を取りまとめた。これは、復興・創生期間後も見据えて中長期的かつ広域的な観点から浜通り地域等が目指す自立的・持続的な産業発展の姿と、その実現に向け国、県、市町村、関係機関が進める取組の方向性をまとめたもので、「あらゆるチャレンジが可能な地域」「地域の企業が主役」「構想を支える人材育成」を取組の 3 つの柱としている。

(1) 廃炉

浜通り地域等の復興に必要な不可欠な廃炉を進めるため、国内外の英知を結集し、研究開発を進めるとともに、取組の効果を産業面にも波及させ、浜通り地域等に産業の集積を図るものである。

2015 年 9 月に楡葉町で日本原子力研究開発機構(JAEA)の遠隔技術開発センター、2017 年 4 月に富岡町で廃炉国際共同研究センター(CLADS)の国際共同研究棟の運用が開始され、2018 年 3 月には、大熊町で分析・研究センターの運用が一部開始されている。

富岡町の CLADS 国際共同研究棟は、国内外の大学・研究機関等が共同研究のために利用できる施設となっており、全国の大学や企業と連携して廃炉に関する基礎・基盤研究と人材育成が行われている。

(2) ロボット・ドローン

陸・海・空のフィールドロボットの研究開発、実証試験、性能評価、操縦・管制訓練を行うことができる世界に類を見ない一大開発・実証拠点「福島ロボットテストフィールド(以下「RTF」という。)」(南相馬市・浪江町。今年 3 月全面開所)を中核拠点として、災害対応や物流・インフラ点検等の分野で活用が期待されるロボットやドローンの研究開発・実証試験を積極的に呼び込み、ロボット産業の集積を図るものである。

RTF の研究棟研究室には、全国から 16 の大学や企業等が入居して開発・実証を進めており、これまでロボット・ドローン等の実証実験は 100 事例を数えているほか、研究棟に併設した福島県ハイテクプラザ南相馬技術支援センターが技術相談や設備使用(加工機器、分析機器等)・試験分析等、企業に寄り添った支援を行っている。

(3) エネルギー・環境・リサイクル

福島県は、震災以降、2040 年頃を目途に県内エネルギー需要の 100 %相当量を再生可能エネルギーで生み出す目標を掲げており、再生可能エネルギーを核とした産業の育成・集積を図って地域経済の復興・再生に取り組むとともに、太陽光パネルや石炭灰等の先端的なリサイクル技術開発の取組等を推進するものである。

2014 年 4 月、郡山市に再生可能エネルギーを研究するわが国唯一の国立研究機関として、福島再生可能エネルギー研究所(FREA)が設置された。エネルギーネットワーク(スマート制御、蓄電池等)、太陽光、風力、水素等の研究に加え、クロスアポイントメントや共同研究を通じて大学院生等の人材育成等が行われている。

今年 3 月には、浪江町に、太陽光発電の電力を水素に変え、再生可能エネルギーを有効活用する大規模な実証を行う、世界最大級の水電解装置を有する「福島水素エネルギー研究フィールド(FH2R)」が開所し、同年 7 月に実証運転が開始される予定となっている。

2016 年には、三春町に福島県の環境回復・創造に向けた総合的な取組を行う公設試験研究機関として福島県環

境創造センターが設置された。研究棟には JAEA 福島環境安全センターと国立環境研究所(NIES)福島支部が入居し3機関が連携協力して研究が進められている。交流棟コミュタン福島では放射線や福島に関する展示を活用した学習等が行われている。

(4) 農林水産業

ICT やロボット技術等の開発・実証を進めるとともに、これらの先端技術を取り入れた先進的な農林水産業を全国に先駆けて実施し、浜通り地域等の農林水産業の復興・再生を進めるものである。

2019 年 4 月、福島大学に新たな学部として農学群食農学類が設置された。実践性、学際性、国際性、貢献性を培う人材育成が開始されている。浜通り地域で福島大学を核とした全国の研究者との連携による食と農の教育研究拠点の構築を目指している。

南相馬市小高区では、避難指示が解除された後、㈱紅梅夢ファームが、ロボットトラクタや食味・収量測定コンバイン、ドローン等の先端技術を取り入れて経営の効率化を図り、高レベルで均質な農産物の生産と規模拡大をかなえる技術体系の実証に取り組んでいる。

(5) 医療関連

高齢化や医療・介護人材の不足が進む浜通り地域等において、技術開発支援を通じた企業の販路開拓を支援して医療関連産業の集積を図るものである。

医療機関・高齢福祉施設等の現場ニーズを反映させ、導入につながる製品への改良等、モデル事業を創設して導入に向けた取組を支援している。

(6) 航空宇宙

航空宇宙産業の育成・集積に向けて、参入企業の支援や産業を担う人材育成に取り組んでいる。

RTF において、㈱ Sky Drive やテトラ・アビエーション(株)が 2019 年度から有人飛行ができるエアモビリティ、いわゆる“空飛ぶクルマ”の開発・実証を行っており、今年度は飛行実験の回数を増やし、航続距離の延長、安全性の確保等、より良いものへの改良を重ねている。

2. 大学等の「復興知」の活用

浜通り地域等では、震災以降、県内外の大学等が現地をフィールドとして、地元被災自治体と連携しながら、構想の重点分野を始めとしたさまざまな分野での教育研究活動が活発に行われてきた。

全国の大学等有する福島復興に資する知「復興知」を、浜通り地域等に誘導・集積するため、市町村と協定を締結して拠点を置きつつ組織的に教育研究活動を行う大学等を 2018 年度から支援している(大学等の「復興知」を活用した福島イノベーション・コースト構想促進事業。一般枠(2020 年度補助上限額 2,000 万円/件)で 2018 年度は全 20 件総額 1 億 4 千万円、2019 年度は全 25 件総額 3 億 2 千万円、2020 年度は全 19 件総額 2 億 1,700 万

円を採択)。

2019 年度からは、重点枠(2020 年度補助上限額 5,000 万円/件)を設けて、浜通り地域等で拠点を充実化させ、教育研究活動の長期的継続・拡大や大学間・研究機関とのより連携した取組を行う意欲的な大学等を支援している(2019 年度は全 3 件総額 6 千万円、2020 年度全 4 件総額 1 億 6 千万円を採択)。

3. 福島浜通り地域の国際教育研究拠点・人材育成のあり方の検討

浜通り地域では、これまで、CLADS や RTF 等のさまざまな拠点の整備や産業集積が進められてきたが、未だ局所的、個別の取組に留まっており、全体が連携した広がりのある取組にまでは至っていないとの問題意識から、さまざまな分野の研究者や技術者を育成し、輩出された人材が、長期にわたり浜通り地域の復興をリードしていくための中核的な拠点の整備が必要とされ、構想の重点分野等の多様な分野を対象とした国内外の人材が結集する国際教育研究拠点・人材育成のあり方を検討するため、2019 年 7 月、復興庁において「福島浜通り地域の国際教育研究拠点に関する有識者会議」が設置された。同年 11 月に中間取りまとめがなされたが、今年度夏項目途に最終取りまとめ、今年内に政府の成案が取りまとめられる。

中間取りまとめでは、その国際教育研究拠点のあり方について、廃炉および廃炉技術応用分野、基幹産業の農業等や放射性安全・健康等住民生活基盤の回復に資する分野を原子力災害に起因し浜通り地域にとって必須の研究分野とし、ロボット・IoT 等の最先端技術についても中核となる研究分野と捉えることとされた。

運営主体は国が適当としつつ、組織形態については、まず研究する場所を置き、そこに大学らしい教育機能を付加してスタートするとの方向性が示され、国立研究開発法人等、さらに議論を深めるとされた。

また国内外の大学・研究機関・企業等の人材集積には、生活環境整備、まちづくりそのものが極めて重要であり、まずは研究者やその家族等を受け入れられる生活環境・インフラを備える「研究タウン」をコンパクトに整備し、そこに多くの人が集まることにより、さらに生活環境・インフラが拡大する好循環を目指すべきとされた。

IV. 今後の政府の復興方針

政府において、昨年 12 月、「「復興・創生期間」後における東日本大震災からの復興の基本方針」が閣議決定された。これは、2021 年度からの 10 年間において、政府が東日本大震災からの復興をどのように進めていくのか、その方向性を取りまとめたものである。

復興事業については、これまで進めた取組の結果、「地

震・津波被災地域」は復興の総仕上げの段階に入ってきたことから、復興・創生期間後5年間において、国と被災自治体が協力して残された事業に全力を挙げて取り組むことにより復興事業の役割を全うすることを目指す、「原子力災害被災地域」、すなわち福島復興・再生には今後も中長期的な対応が必要であり、引き続き国が前面に立って取り組み、復興・創生期間後においても、まずは当面10年間、復興のステージが進むにつれて生じる新たな課題や多様なニーズにきめ細かく対応しつつ、本格的な復興・再生に向けた取組を行う。

原子力災害被災12市町村は、避難指示解除の時期によって復興の進度や住民の居住率に大きな差が生じており、住民意向調査でも避難指示解除が遅くなった市町村では「戻らない」と回答した方が5～6割程度で若い世代ほど「戻らない」と回答する割合が高い傾向にある。2023年春までの拠点区域全域で避難指示解除を目指しており、避難者の帰還に向け必要な生活環境整備を進めるとともに、域外からの移住の促進や交流人口・関係人口の拡大等の新たな活力を呼び込む必要がある。

また、帰還困難区域についても「たとえ長い年月を要するとしても、将来的に帰還困難区域の全てを避難指示解除し、復興・再生に責任を持って取り組む必要がある」との国の決意が示されており、拠点区域外の帰還困難区域の対応を検討することが必要である。

体制(組織)については、司令塔として各府省庁による縦割りを排し、政治の責任と強いリーダーシップの下で復興を成し遂げるため、被災地の強い要望を踏まえ、復興庁の設置期限が10年間延長され、財務省への復興事業予算の一括要求や被災自治体からの要望をワンストップで受け付ける総合調整機能等、現行体制が維持される。

財源については、必要な復旧・復興事業を確実に実施するため、復興特別会計や被災自治体の財政負担を軽減する震災復興特別交付税制度が継続され、今夏を目途に復興・創生期間後当面5年間の事業規模を整理し、所要の財源を手当てする「復興財源フレーム」が示される。

法制度については、東日本大震災復興特別区域法において復興交付金が廃止されるが、規制の特例、復興整備計画、金融の特例は対象地域を重点化した上で必要な支援が継続されるとともに、復興特区税制も対象地域を重点化した上で適用期限の延長が検討される。

福島特措法においては、移住促進や交流・関係人口拡大等の新たな活力を呼び込む施策の強化等の必要な見直しや外部参入も含む農地の利用集積、六次産業化施設の整備促進による営農再開の加速化、イノベーションや風評被害等の課題に対応した税制措置等が検討される。

被災自治体の支援についても、復興の進捗状況を踏ま

えながら、必要な人的・財政的支援策等が継続される等、体制・制度・財源等の復興を支える仕組みが継続される。

V. おわりに

震災から9年余りが経った今なお、原子力災害からの福島復興・再生は未だ道半ばの状態にある。復興は、復興・創生期間が終わって2021年度から新たなステージへと入るが、避難生活の長期化や避難先の状況、原子力災害被災12市町村の復興の進度の差等、復興・再生に向けては深刻で複雑な課題が山積しており、中長期的な対応が必要である事実は変わらない。

新型コロナウイルス感染症の終息が見通せないなかで、withコロナで迎える新しい社会に適切に対応し、復興・再生に遅れが生じさせないようにしなければならない。

重要課題である構想については、これまでさまざまな拠点整備が進められてきたが、未だ局所的、個別的な取組に留まっており、アカデミアの参画等による国際教育研究拠点の具体化による人材育成を基礎に、各拠点を有機的に連携させ、経済効果を浜通り地域等とはもとより県内全域で実感できるところまで引き上げていく必要がある。

原子力災害からの復興・再生は国の責務であり、引き続き国が前面に立って取り組む姿勢が示されているが、現場を預かる被災地の基礎自治体を補完する立場にある広域自治体である福島県庁としては、復興の進度に応じて生じる新たな課題やニーズを個別かつきめ細かに丁寧把握していく努力が欠かせない。

福島の復興・再生のエンドステート(いつまでにどのような状態にもっていくか)についても、議論を深めていく必要がある。今後、福島県庁の役割はますます重く重要なものになる。

－ 参考資料 －

- 1) 「復興・創生期間」後における東日本大震災からの復興の基本方針(令和元年12月20日閣議決定)。
- 2) 福島浜通り地域の国際教育研究拠点に関する中間とりまとめ(令和元年11月28日福島浜通り地域の国際教育研究拠点に関する有識者会議)。

著者紹介



橘 清司(たちばな・きよし)

福島県企画調整部

2019年4月、総務省から福島県庁へ赴任。東日本大震災・原子力災害からの復興・再生や地方創生、人口減少対策等を担当。

核分裂の理論研究最前線

—分裂する原子核の変化する形を追って—

東京工業大学 石塚 知香子, 千葉 敏

ここ十有余年、核分裂現象の理論研究は急速に進展し、十年前には期待できなかった核データ評価への応用も視野に入りつつある。重い原子核が中性子を捕獲すると励起エネルギーを得てアメーバのように形状変化し、ある時は細長くのびて自分自身のクーロン反発力の助けを借りて分裂に至る。そのとき原子核の形がたどる変化は極めて多様で、その変形経路の違いが核分裂生成核の収率の広がりや形の違いを生む。その結果、核分裂中性子の数や即発ガンマ線のエネルギーも決まってくる。本稿では筆者らの最新の研究結果を踏まえつつ、原子力の核心にある核分裂という過程について、原子核の“形”をキーワードにして解説する。

KEYWORDS: *Nuclear fissions, nuclear shapes, fission fragment mass yields, actinides, super heavy elements, prompt neutrons, fission cycles, r-process, shell effects*

I. はじめに

「水は低きに流れ、人は易きに流れる」というのは孟子に由来する言葉だが、これは物理的な真理をも良く表している。これをポテンシャルエネルギーという観点で読み解くと「何事も放っておけば(外力が働かなければ)ポテンシャルエネルギーの低い状態(=より楽で安定な状態)に向かって進んでいく」という意味になる。本稿で取り上げる分裂する原子核の形も、原子核が伸びて二つに分かれるまでの間に基本的にはポテンシャルエネルギーが得るように変化していく。では、最終的にどんな原子核に分かれるとポテンシャルエネルギーが得をするのだろうか？この問いのカギを握るのが魔法数である。本稿ではポテンシャルエネルギーと魔法数を鍵に核分裂過程で現れる原子核の様相について解説する。

1. 魔法数と核分裂

原子核になじみのない読者でも、高校時代に「ヘリウムガスが安定なのは閉殻だから」と教わったことがあるに違いない。閉殻は各々の電子殻に最大数の電子が詰まった状態のことで、電子殻のうちK殻には最大2個、L殻には最大8個、M殻には最大18個の電子が入れる。代表的な希ガスであるヘリウムではK殻が閉殻、ネオ

ンではK殻とL殻が閉殻である。

このように閉殻構造だと安定になるというのは原子の化学的安定性に限った話ではなく、原子核の場合にも成り立つ。原子核を構成する中性子数や陽子数がある特定の数(魔法数)になると、その原子核は非常に安定になることが知られる。地球上で安定に存在する核種(安定核)では、 $2 \cdot 8 \cdot 20 \cdot 28 \cdot 50 \cdot 82 \cdot 126$ が魔法数であることが昔から知られており、安定核に比べて中性子数の多い核種では $8 \cdot 20 \cdot 28$ の代わりに $6 \cdot 16 \cdot 34$ が魔法数となることが近年明らかになってきた。魔法数と核分裂の関係は実にシンプルである。原子核が二つに分かれるとき、先述の「水は低きに…」の例えのように出来るだけ安定な原子核(エネルギー的に低い状態)に分裂する。このエネルギー的に低い状態は原子核が魔法数になると実現する。

例えば熱中性子入射により少しだけ励起したウランの核分裂では、ウランの半分の質量数ではなく質量数が140と96付近の二つの原子核に分かれる。質量数140近傍の魔法数といえば陽子と中性子が同時に魔法数となる錫(^{132}Sn は陽子数魔法数50と中性子数魔法数82からなる二重魔法数の核)が最初に思い浮かぶ。しかしⅢ章で詳しく述べるように、ウランの核分裂生成物の質量数を決定づけているのは錫の二重魔法数だけではない。これから筆者らの最近の研究成果に基づきながら、ウランで経験的に知られる重い核分裂片の平均質量数140が二重魔法数132から離れている理由を紐解いていく。

Frontier nuclear theories on nuclear fissions ; In pursuit of a nuclear shape to be divided : Chikako Ishizuka, Satoshi Chiba.

(2020年5月1日 受理)

Ⅱ. 分裂する原子核と変化する形

1. 二つの原子核への断裂まで

一つの重い原子核が二つに分裂する過程を取扱う理論は種々ある。中性子などが入射して励起しほぼ平衡に達した原子核を複合核と言うが、まずこの複合核のかたちの時間変化を、摩擦のある確率過程に応用できるよう拡張されたニュートンの運動方程式(ランジュバン方程式)で計算することを考えよう。この方法¹⁾では経過する時間の各点で状態が熱平衡になるものと仮定する。量子分子動力学法を用いた千葉の試算では、核分裂過程の時間スケールである $10^{-(20\sim21)}$ 秒と比べると非常に短い時間 ($3\sim30\times10^{-24}$ 秒) で原子核内部の核子運動が熱平衡に至ることがわかっている。図1は ^{235}U に熱中性子が入射して形成される複合核 ^{236}U が3次元ポテンシャル上で伸び縮みを繰り返しながら核分裂に至る様子を示している。ポテンシャル面は三次元濃淡図で描かれておりポテンシャル面上の太い実線はランジュバン法で得られた核分裂に至る道筋である。道筋の要所々に示した白抜ききの瓢箪は対応する座標点での原子核のかたちを表している。図1の道筋に注目すると、基底状態近傍の始状態から断裂に至るまでにポテンシャルの低い場所を彷徨いながら最終的に谷筋に沿った経路をたどっている。

ここで紹介したランジュバン法は原子核を構成する個々の核子の動きは考えず、原子核の形状のみを変数とする非常にシンプルな理論である。にも関わらず、パラメータ調整を必要とせずアクチノイド領域のさまざまな核分裂片(核分裂直後の二つの原子核)の質量数や全運

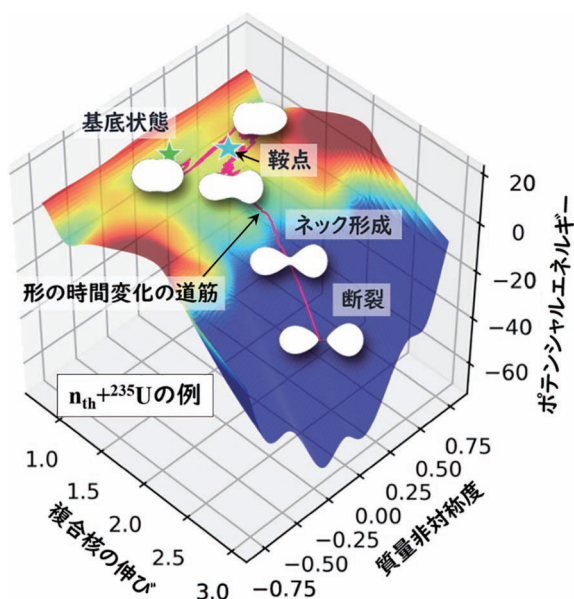


図1 二中心模型によるポテンシャル面の様子と、ポテンシャル面上での4次元ランジュバン法による核分裂軌道の様子。図中に現れない残る2つの二中心模型の変数で最小化した3Dポテンシャル面および軌道上の形状は各々共同研究者のMark Usang氏、張旋氏にご提供いただいた。

動エネルギーの実験的な性質を精度良く再現できる。その為、実験による測定が困難な核種での核分裂の性質の予言が期待できるのである。最後に、原子核のようなミクロな世界を支配する量子効果、すなわち殻構造と対相関はこの計算にも合理的に取り込まれていることは強調しておく必要がある。そもそも量子力学に依らずして図1のようなポテンシャル面は計算できない。

2. 断裂後の経緯—即発中性子放出—

複合核が二つの原子核に断裂した後は、「即発中性子、即発ガンマ線、遅発中性子、遅発ガンマ線などを放出しながら安定な原子核に至るまで壊変を繰り返していく」というのは教科書にも載っている通りである。しかしながら核分裂中性子の99%以上を占める即発中性子が「どんなタイミングで、どこから」放出されるのか、という点は今も未解明の難しい問題なのだ。この謎を解明すべく、筆者らはランジュバン法とは別に、個々の核子自由度を微視的に取扱える反対称化動力学模型(AMD法²⁾)を用いた核分裂の研究も行っている。AMD法は微視的模型とも呼ばれ、軽～中重核の核反応と核構造の両方で成功を取めてきた純日本産の原子核理論である。図2ではAMD法による複合核 ^{236}U の核分裂の様子を並べてある。

図2では基底状態にある原子核①に時間の経過に伴ってネックが形成され②、複合核は③、④、⑤と伸び縮みを繰り返しながら断裂⑥に至り、断裂直後の核分裂片から即発中性子が放出される様子⑦、⑧が核子密度の核子密度の高低を濃淡で示した図で表されている。ここでネック断裂の直後⑥から即発中性子放出⑦までのタイムスケールを見ると約100 fm/cつまり 3.33×10^{-22} 秒である(fm/cは原子核・素粒子分野でよく使われる時間単位)。複合核形成から断裂に至るまでのタイムスケールが $10^{-(20\sim21)}$ 秒であることを思い出すと断裂から大変短い時間で即発中性子放出が起き得ることが筆者らの研究で分かってきた。

話を即発中性子の謎に戻そう。即発中性子の放出機構

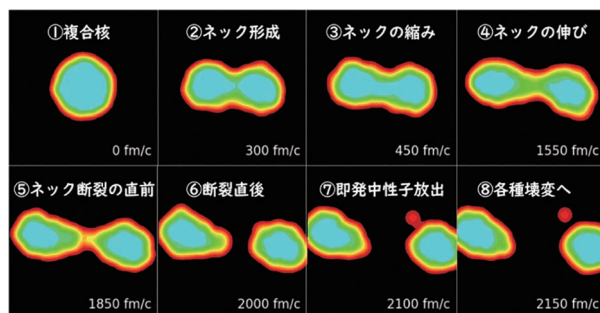


図2 AMD法による ^{236}U の核分裂の様子。ネックの断裂直後に励起した核分裂片の表面から即発中性子が放出されている。AMDの計算結果は共同研究者の陳敬徳氏からご提供いただいた。

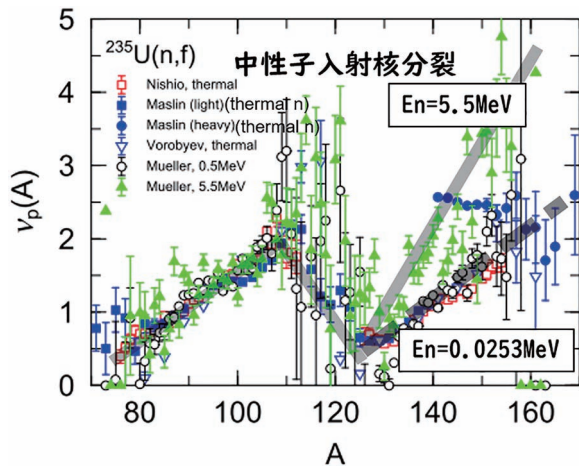


図3 ^{235}U の中性子入射核分裂における即発中性子数 v_p と核分裂片の質量数の関係(鋸歯構造)を示す実験データのまとめ。

に関して解明されていないのは放出される場所やタイミングだけではない。核分裂片から放出される即発中性子の個数(即発中性子数 v_p)と核分裂片の質量数との関係も不明な点が多い。アクチナイドでは即発中性子放出多重度が核分裂片の質量数に対してノコギリの刃のような分布(鋸歯構造)を示すことが実験的事実として良く知られている。

図3を見ると、 ^{235}U のさまざまな中性子誘起核分裂の実験データで同じような鋸歯構造が出現している。ところが鋸歯構造の出現機構を理論的に完全に説明することは非常に難しい。特に不思議なのは、核分裂片の質量数が複合核の質量数の半分よりも軽い場合と、半分よりも重い場合で、入射中性子のエネルギーに対して異なる挙動を示すという点だ。なぜ二つの核分裂片ペアの重い方だけが入射中性子エネルギー E_n に強く依存するのだろうか？

筆者らが核分裂に関するさまざまな物理量を分析するうちに、思わぬところから即発中性子数の謎解明の糸口が見えてきた。筆者らの開発した原子核の形状を4つの変数で表すランジュバン法で原子核の変形過程をシミュレーションしたところ、断裂直後の核分裂片の変形具合と、即発中性子数との間に非常に酷似した関係があることが分かってきた。まずは図4をご覧ください。

図4は質量数 A_F (F は分裂片(fragment)の F) を持つ核分裂片の変形具合を四重極モーメント Q_{20} で表している。パラメータ Q_{20} は原子核の伸び具合に対応する物理量であり、 Q_{20} が正の場合には原子核はラグビーボールのように扁長な回転楕円体に変形(プロレート変形)している。また $Q_{20}=0$ の場合には原子核形状は球形である。負の Q_{20} では原子核はみかんのように扁平な回転楕円体に変形(オブレート変形)している。本稿では Q_{20} を簡単に楕円変形度と呼ぼう。

図3の即発中性子数 v_p と、図4の楕円変形度を比較すると、共通する二つの特徴に気づく。核分裂片の質量

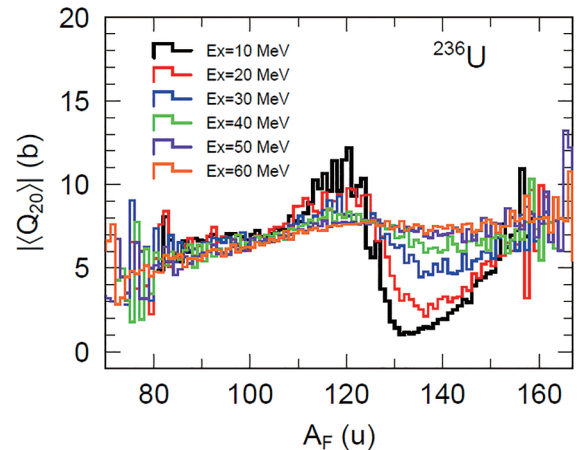


図4 ^{235}U の中性子入射核分裂における核分裂片楕円変形度 Q_{20} と核分裂片質量数の関係。複合核の励起エネルギー E_x が 10 MeV (太線) から 60 MeV までのシミュレーション結果であり、 Q_{20} は E_x 質量数 $A_F \approx 118$ で大きく変化する。

数に対する鋸歯構造および重い核分裂片のみに見られる強いエネルギー依存性の出現である。異なる物理量に現れた二つの酷似した性質から、筆者らは即発中性子数 v_p の不思議な性質は原子核の形に由来すると考え、現在も核分裂片の形と即発中性子の関係の原因をより深く知ろうと努力を重ね、前途に光明も見えてきている。Ⅲ章で原子核の形について詳しく述べる前に、Ⅱ-3節で即発中性子放出後の核分裂過程について簡単に解説する。

3. その後の経緯—遅発中性子放出など—

即発中性子から遅発中性子まで話題がジャンプする前に核分裂過程についておさらいしたい。核分裂には中性子、陽子、 γ 線、 β 線の吸収などによって誘起される誘起核分裂と自然に起きる自発核分裂とがあるが、図5は原子力で最も馴染み深い中性子誘起核分裂過程を時系列で並べた模式図である。Ⅱ-1節でも述べたように、中性子が入射して出来る複合核が熱平衡に至る時間は非常に短い。複合核の形成からネック形成、ネックの断裂までの時間は $10^{-(20\sim 21)}$ 秒であるのに対し、即発中性子放出のタイムスケールは $10^{-(20\sim 12)}$ 秒と8桁に亘る。遅発中性子に至っては即発中性子放出が終わった後、更に約10桁も時間が経った頃に起こる。このように核分裂と一言で言っても、異なるタイムスケールで進行する①複合核形成～ネック断裂までの過程、②ネック断裂～即発中性子過程、③遅発中性子放出過程の3つの過程に分けて捉えることができる。

Ⅱ-1節で紹介したランジュバン法は複合核形成直後からネックの断裂までを取り扱える。またⅡ-2節で登場したAMD法を用いた計算では、複合核の形成直後からネックの断裂後さらに長い時間を経たのちの即発中性子放出過程の初期までを扱うことができる。とはいえ、複合核形成から即発中性子放出および遅発中性子放出過程の全てを、これら2つの理論で扱うことは不可能であ

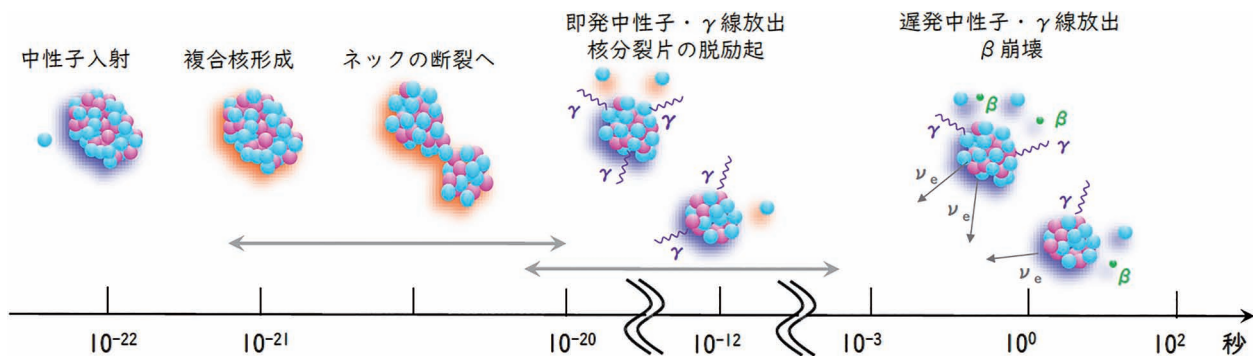


図5 中性子入射核分裂の時系列をまとめた模式図。参考までに時間軸は $1 \text{ fm}/c = 3.3356 \cdots \times 10^{-24}$ 秒で読替えられる。

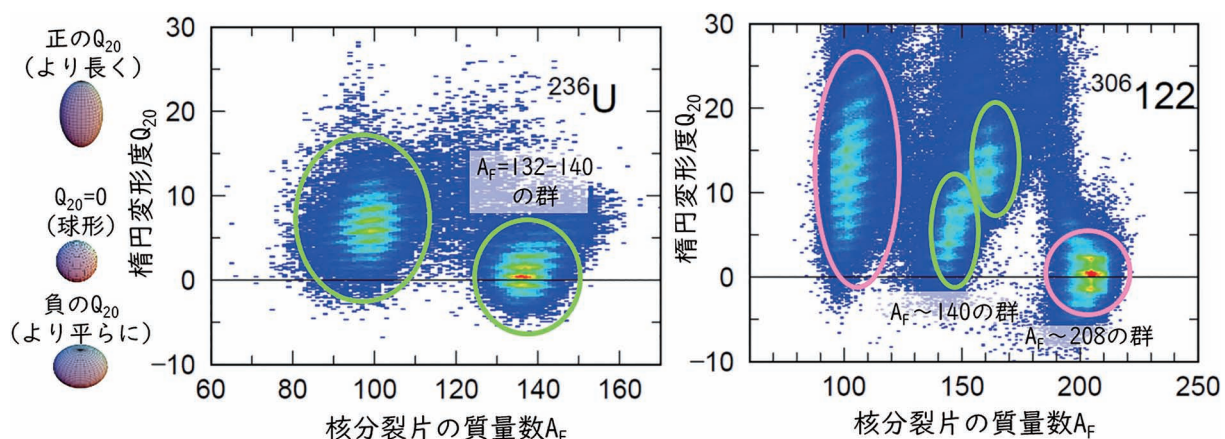


図6 複合核 ^{236}U (左)と $^{306}122$ (右)における核分裂片の楕円変形度 Q_{20} の様子。

る。例えば AMD 法で時間発展を頑張ったとしてもネック断裂直後までが限界であり、そこから 10 桁以上も時間を隔てた β 崩壊を記述するには別途それに適した理論につなぐ必要がある。ありがたいことに核分裂障壁を超えてから準静的な状態になるまでのタイムスケールは 10^{-21} 秒のオーダーと非常に短い。そのため断裂直後から先は統計模型と呼ばれる強力な理論モデル計算につなぐことができるのだ。実際に筆者らの研究グループでは、即発中性子放出や遅発中性子放出については、ランジュバン法の計算結果を統計模型の王道とも言うべき Hauser-Feshbach 法³⁾につなげて計算を行なっている。ただしネック断裂から先の詳細は「分裂する原子核の形を追う」という本稿のテーマから逸れるため割愛する。

Ⅲ. 分裂した原子核の形

前章では核分裂過程の進み方を断裂に至るまでの原子核の形に着目して解説した。本章では断裂直後の原子核つまり核分裂片の形について述べる。本稿の冒頭で触れたように、ウランの中性子誘起核分裂では即発中性子放出後の核分裂生成物の収量分布(独立収率)が核分裂片の質量数の関数として二山構造を持つことが広く知られている。この二山構造は原子核の魔法数で決まる重い核分裂片の山と、そのペアである軽い核分裂片の山から成る。軽いほうの山のピーク位置は複合核の総質量数から

重いほうの山のピーク位置を除いたおつりとして決まるため、ウランの中性子誘起核分裂の独立収率で本質的なのは重いほうの山のピーク位置である。さてウランの重い山の平均ピーク位置は二重魔法数 132(陽子数 $Z=50$, 中性子数 $N=82$)から少し離れた質量数 140 近傍に来ることを思い出していただきたい。

ウランの重い核分裂片の平均質量数 140 の内訳を見ると、陽子数 $Z=54$ のキセノン(Xe)を中心に $Z=52\sim 56$ のような陽子魔法数 $Z=50$ から少しだけずれた元素がピークを形成することが実験的に知られている。一方で二重魔法数より少しだけ陽子数や中性子数の多い領域(質量数 $A=140\sim 150$, 陽子数 $Z=52\sim 56$, 中性子数 $N=84\sim 88$)では、基底状態が変形していることが近年の実験や理論⁴⁾で明らかになってきた。

図6では、ランジュバン法で計算した熱中性子誘起 ^{235}U 核分裂における核分裂片の楕円変形度分布 $Q_{20}(A)$ を質量数の関数として示した。原子核の変形は、大まかに Q_{20} と洋梨型のくびれ具合(八重極変形)を表す Q_{30} で表現できる。後者はとりあえず洋梨型変形度と呼ぼう。ランジュバン法で複合核 ^{236}U の断裂直後の Q_{20} や Q_{30} を調べると、楕円変形度 Q_{20} は図6のように核分裂片の質量数に強く依存した分布を示すのに対し、洋梨型変形度 Q_{30} は質量数に依らずほぼ一定($Q_{30}\approx 2$)である。蛇足だが、ランジュバン法で得られた Q_{30} の値は実験や

量子ダイナミクスを記述する時間依存密度汎関数理論⁵⁾とも良く一致する。

さて、ここで特筆すべきは原子核の伸び具合を表す楕円変形度 Q_{20} が核分裂片の質量数 $A_F=132$ の $Q_{20}=0$ 近傍の値から $A_F=140$ に亘って右上に向けて高密度で分布する点である。質量数 $A_F=132$ の二重魔法数(陽子数 50, 中性子数 82: ^{132}Sn)は非常にエネルギー的に得な状態で、魔法数を持つ他の原子核と同様に球形($Q_{20}=0$ かつ $Q_{30}=0$)を好み、変形させるには高いエネルギーが必要となる。一方、 $A_F=140$ ($Z=52\sim 56$ 付近)の核は基底状態が Q_{20} および Q_{30} の両方において変形しているため、核分裂の結果できるネックを持った左右非対称な形状と相性が良く、核分裂のダイナミクスがこの領域核を生成するように働く。このことから最近の理論や実験等で示唆されているように、ウランの重い核分裂片の質量数ピークで現れる原子核の形状は、非常に強い二重魔法数そのものの影響だけでなく、二重魔法数の近傍に存在し、核分裂のダイナミクスの好まれる変形領域(基底状態が変形した領域)との競合によるものと考えの方が自然だろう、というのが現状でのわれわれの結論である。

IV. 原子核の大きさと核分裂片の形

本章では、宇宙の彼方ではあるものの、原子炉と同じくらい日常的に核分裂反応が起こるもう一つの場所、つまり中性子星やブラックホールが合体する場所に焦点を当てる。そこではアクチナイドの代わりに超重核が核分裂の主演となり、超高中性子束下の急速な中性子捕獲による元素合成(r 過程元素合成)が起きる。宇宙や太陽系にある金やウランなどの重い元素がこのときに生まれているのだ。 r 過程元素合成で生まれた超重核は核分裂して大量の核分裂生成核を生み出すことが近年明らかになってきた。その生成核の詳細な情報がいま必要とされている。そこで筆者らは高い予言力を持つランジュバン法を用いて超重核核分裂を系統的に調査した⁶⁾。本稿ではその一例として超重核 $^{306}122$ (質量数 306, 陽子数 122 の元素名がない核)の核分裂片の様子を図 6 に示す。紙面の都合上、要点だけを述べると $^{306}122$ で分裂片が球形核($Q_{20}=0$)となるのは ^{236}U のときの質量数 $A_F=130\sim 140$ の核分裂片ではなく、錫 ^{132}Sn より更に重い二重魔法核(鉛 ^{208}Pb)近傍の核分裂片である。また洋梨型変形度 Q_{30} はここで極めて大きく、全般的にウランの場合より

も洋梨型度が卓越する。そのため質量数 $A_F=132$ ではなく $A_F=140\sim 160$ にも分裂片が局在する点も興味深い発見である。このように核分裂する原子核の大きさが変わると核分裂片の形もまた大きく異なる。 r 過程は地球上にある鉄より重い元素の約半分を作り出した起源であるが、そのうちのかかなりの割合が核分裂生成物としてできたものであることは核分裂の研究者として興味深い。

V. おわりに

核分裂が発見されてから 80 年が経った現在、核分裂はさまざまな原子力エネルギー源として広く活用されている。それにも関わらず未だにその根幹となる即発中性子放出機構や核分裂収率を決定づける殻効果など、解明しきれない謎が残されている点が核分裂研究を現在も面白くしていると日々感じている。本稿では筆者らの研究内容をベースに、分裂する原子核の形の変化について出来るだけ平易な解説を試みた。

— 参考資料 —

- 1) C. Ishizuka, M. D. Usang, F. A. Ivanyuk, J. A. Maruhn, K. Nishio, S. Chiba, Phys. Rev. C 96, 064616 (2017).
- 2) N. Ikeno, A. Ono, Y. Nara, A. Ohnishi, Phys. Rev. C 93, 044612 (2016).
- 3) 奥村 森, 日本原子力学会誌 Vol.61, No.11, 775 (2019).
- 4) R. Yokoyama, T. Inakura et al., Prog. Theor. Exp. Phys., Volume 2018, Issue 4, 041D02 (2018).
- 5) G. Scamps, C. Siminel, Nature Vol.564, 382 (2018).
- 6) C. Ishizuka, X. Zhang, M. D. Usang, F. A. Ivanyuk, and S. Chiba, Phys. Rev. C 101, 011601(R) (2020).

著者紹介



石塚知香子 (いしづか・ちかこ)

東京工業大学

(専門分野/関心分野) 核データ 核分裂, 核反応, 原子核理論, 天体核物理



千葉 敏 (ちば・さとし)

東京工業大学

(専門分野/関心分野) 核データ, 核分裂の動的模型, 元素合成, 核変換

最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構

第5回 高温ガス炉システムの実用化をめざして

日本原子力研究開発機構 峯尾 英章ほか

高温ガス炉は、ヘリウムガス冷却、黒鉛減速の熱中性子炉で、優れた固有の安全性を有しており、発電のみならず、水素製造などの多様な熱利用に用いることができる。このため、わが国のみならず、海外においても温室効果ガス排出量削減に有効な技術として期待されている。本稿では、ガスタービン発電や水素製造などの熱利用施設と高温ガス炉で構成される高温ガス炉システムの実用化に向け、日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)が取り組んでいる技術開発の最前線を紹介する。

KEYWORDS: HTGR, Helium, Isotropic graphite, Coated fuel particle, Gas turbine, IS process, Hydrogen production, High Temperature Engineering Test Reactor, SMR

I. 高い安全性と多様な熱利用

1. 高い安全性

高温ガス炉の炉心を構成する被覆燃料粒子および黒鉛構造物は非常に耐熱性が高く、冷却材喪失時においても炉心の黒鉛が、崩壊熱を吸収して原子炉圧力容器外表面から熱を放出することにより、炉心熔融を起こさない設計が可能である¹⁾。また、冷却材のヘリウムガスは高温でも化学的に安定な不活性ガスであり、燃料や黒鉛構造物と反応しない。

高温工学試験研究炉(HTTR)を用いた高温ガス炉の安全性を実証する試験を2002年から実施し、2010年には、経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)のプロジェクトとして、出力30%の状態からヘリウムガス冷却材の循環機を強制的に停止し制御棒の挿入による原子炉停止操作も行わない、炉心流量喪失試験を実施した。ドップラー効果により原子炉は自然に停止し、その後、安定な状態が維持されることを実証した。

2. 多様な熱利用と高い熱効率

耐熱性の高い炉心と化学的に安定な冷却材により、高温ガス炉では最大950℃の高温の熱を供給できる。このため、水素製造、発電、化学合成等、多様な目的の熱源

としての利用が可能である。HTTRでは、2010年に原子炉出口冷却材温度950℃で50日間の連続運転を行い、高温の熱利用の実現可能性を示した²⁾。

この高温の熱を高温から低温までカスケードに利用することで、極めて高い熱利用率を達成することができる。例えば、850℃以上の熱を水素製造や化学プロセス等の熱源として利用し、850℃以下の熱でヘリウムガスタービンによる発電を行う熱電併給システムでは、約200℃の発電システムの廃熱も海水淡水化等の熱源として利用することにより、システム全体の熱利用率は約80%に達する³⁾。

II. 高効率ガスタービン発電

高温ガス炉を用いた発電については、軽水炉と同様な蒸気タービンを用いた発電に加えて、原子炉から取り出された高温のヘリウムガス冷却材を用いた高効率ガスタービン発電が可能である。ここでは、高効率ガスタービン発電技術の概要と技術開発の現状について述べる。

図1に、原子力機構が民間企業の協力を得て設計した高温ガス炉用ガスタービンの構成を示す⁴⁾。ガスタービンは単一の軸系に接続したタービン、圧縮機および発電機から構成される。原子炉から取り出された高温のヘリウムガスはガスタービンに導入され直接駆動して発電を行う。軽水炉では冷却材温度が300℃程度で発電効率が33%程度であるのに対して、高温ガス炉ではガスタービン入口温度条件950℃において50%程度の発電効率を達成可能である⁵⁾。加えて、ヘリウムガスタービンは、高圧

Research and Development Activities of JAEA for HTGR System Realization : Hideaki Mineo, Tetsuo Nishihara, Hirofumi Ohashi, Minoru Goto, Hiroyuki Sato, Hiroaki Takegami.

(2020年5月12日 受理)

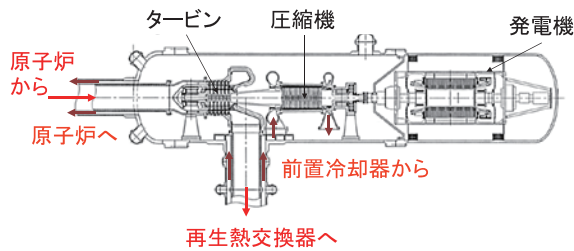


図1 高温ガス炉用ガスタービン

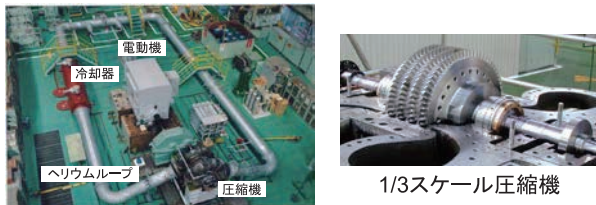


図2 実機(300 MWe)1/3スケール圧縮機試験装置

ヘリウムを作動流体とするため体積流量が小さく、また、タービン熱落差が小さく、かつ、作動流体であるヘリウムガスの定圧比熱が大きいいため、小型で軽量である。

しかしながら、ヘリウムガスタービンは同規模の燃焼ガスタービンと比べ、ヘリウムの比熱が空気に比べて5倍程度と非常に大きいため、段数が多く、翼高さが低くなる。このため、特に圧力勾配に逆らって作動流体が流れる圧縮機において、翼端すき間での漏れ流れや端壁境界層の成長による損失が顕著となる。この課題を解決するため、三次元翼形状の採用や端壁近傍の翼形状を調整する等の方針に基づく圧縮機設計手法を確立するとともに、図2に示した実機(300 MWe)1/3スケール段数4段の圧縮機を用いた試験装置を用いて空力性能に係るデータを取得した。試験結果から、実機規模の20段の圧縮機において91%を超える高い断熱効率が達成できることが示された⁶⁾。

さらに、後述するように高温ガス炉用のガスタービンは密閉サイクルで原子炉と直接接続しているため、発電機の負荷変動に対してシステム全体の圧力を調整する運転制御方式を採用し、数値シミュレーションによりその有効性を確認している。今後は、発電プラントとしての安定的な運転を確認するため、HTTRにガスタービンを接続し運転制御性を確認する試験が必要である。

Ⅲ. IS プロセスによる水素製造技術

IS プロセスは、高温の熱と化学反応を組み合わせ水分解して水素を得る、熱化学水素製造法の1つである。図3に示すように、ヨウ素(I)と硫黄(S)を含む3つの化学反応(ブンゼン反応、HI(ヨウ化水素)分解反応、硫酸分解反応)を組み合わせ水分解し、水素を製造する。

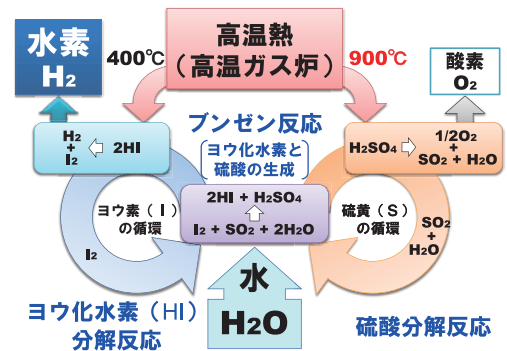


図3 ISプロセスの概要



図4 連続水素製造試験装置

IS プロセスは、CO₂を排出せず大規模水素製造が可能なプロセスで、高温ガス炉を熱源としてCO₂フリーの大量水素製造を実現することができる。加えて、太陽熱のようなCO₂フリーの熱源を用いた水素製造も可能である⁷⁾。

IS プロセスは、高い熱効率も魅力の1つで、原子力機構のフロー計算により40～50%が得られている⁸⁾。例えば、水の電気分解による水素製造では電気分解効率が約80%と高いものの発電効率(軽水炉で約33%)を考慮すると約26%の効率となるため、ISプロセスが優位となる。

IS プロセス実用化の課題の1つは、高温かつ厳しい腐食環境で使用できる実用工業材料製機器の確立である。容器・配管の材料には安価なガラスあるいはフッ素樹脂のライニング材料を選定し、汎用的機器が適用できない主要反応(ブンゼン、HI分解、硫酸分解)の反応器はそれぞれ新たに開発した。これらを統合し、図4に示すプロセス全システムを実用工業材料製機器で構成した「連続水素製造試験装置」を製作した⁹⁾。この装置を用い2019年1月に連続150時間(水素製造量:約30 L/h)の連続水素製造試験を達成し、世界で初めて実用工業材料によって構成された装置で安定かつ長期間の水素製造に成功した。

現在はプロセスの熱効率を高めるため、水素分離膜を用いたHI分解器を開発している。高温、強腐食性ガス環境のHI分解器で使用できるシリカ膜を基に高性能水素分離膜を開発し、試作したHI分解器で平衡分解率が20%のHI分解効率を、50%まで高めることに成功した¹⁰⁾。

今後は、IS プロセスの自動運転制御技術の開発とともに、機器のスケールアップおよび信頼性の確証を進める。その後、民間への技術移転へ向け、HTTR に IS プロセス水素製造施設を接続して、接続時の安全基準策定や安全基準に適合する設計対策を確立する試験が必要である。

IV. 高温ガス炉システムの魅力

ここでは、HTTR 建設を通じて確立した技術や蓄積された知見を基に、原子力機構が民間企業と協力して構築した実用高温ガス炉システムの概要について紹介する。

図 5 に実用高温ガス炉発電プラント GTHTTR300 の原子力システム概念を示す¹¹⁾。本プラントは、熱出力 600 MW の原子炉と電気出力 300 MWe 規模のガスタービン発電システムから構成され、商用電源喪失や 1 次系の配管が破損するような異常状態においても動的機器や運転員操作なしに安全確保が可能な優れた安全性を有する。また、直接ガスタービン発電サイクルの採用により、簡素でコンパクトなプラント構成を実現したことに加え、約 50 % と高い発電効率の達成により、高い経済性を有する。

また、原子炉やガスタービン、熱交換器、配管については GTHTTR300 と同一仕様のまま、ガスタービン上流に中間熱交換器を設置し、中間熱交換器を介して水素製造施設へ熱供給を行うことで、新規技術開発の要素を排除しつつ、水素電力併給を可能とした実用高温ガス炉水素電力併給プラント GTHTTR300C の概念を構築している¹²⁾。水素製造施設への熱供給量 370 MW、水素製造効率 50% の条件では、52,000 Nm³/h の水素製造が可能である¹²⁾。なお、水素製造施設への熱供給量は中間熱交換器の熱交換量を変えることで任意に変更可能である。

GTHTTR300C は、水素電力併給が可能であることに加え、閉サイクルガスタービンの優れた部分負荷運転特性や大きな熱容量を保有する炉心を活用することで、再生可能エネルギーと優れた調和性を有する。これまで、数値シミュレーションにより、自然変動電源の出力変動に起因する電力需給差の長周期成分に対して、原子炉出力、発電効率一定での水素製造量/発電量変更により補

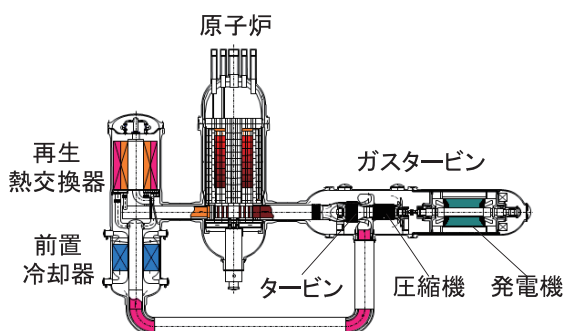


図5 実用高温ガス炉発電プラント GTHTTR300⁵⁾



図6 高温ガス炉による調整力価値の提供

完可能であること、短周期成分に対しては炉心を蓄熱体として活用することで、原子炉出力一定のまま電気出力を調整し補完可能であることを示している¹³⁾。このように GTHTTR300C は電力系統に電力量 (kWh) に加え、需給調整力 (Δ kWh) および容量 (kW) 価値を提供可能である (図 6)。

V. 各国で注目される高温ガス炉

発電と熱利用を同時にできる高温ガス炉は、地球温暖化対策の切り札として世界的に関心が高まっている。また、Small Modular Reactor (SMR) の候補炉型としても注目が集まっている。以下に、高温ガス炉の建設を目指したプロジェクトを推進している国の現状を紹介する。

1. 米国¹⁴⁾

米国は、世界に先駆けて 1960 年代から大型高温ガス炉の実用化を目指して実験炉および原型炉を建設・運転し、技術の成立性を確認してきた。ところが、TMI 事故や発電炉の需要低下などにより、開発が中断した。その後、2000 年代中頃から、エネルギー省 (DOE) の支援の下で、第 4 世代原子炉として安全性および経済性を向上した高温ガス炉の開発を再開した。現在は、DOE の支援を受けた X-Energy 社が、熱出力 200 MW の発電炉の設計や被覆燃料の開発を進めている。また、Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) は、熱出力 15 MW の超小型モジュラー炉の設計を進めている。

2. カナダ^{14, 15)}

カナダは、自主開発した加圧重水炉 (CANDU 炉) を多数導入しているが、2030 年頃には全ての原子炉が運転寿命を迎える見通しである。カナダ天然資源省は、2018 年に SMR ロードマップを公開し、戦略的な開発を進めていく強い意志を示した。カナダ原子力研究所 (CNL) は、チョークリバーサイトに SMR 実証炉を建設するプロジェクトを立ち上げ、民間企業 6 社の提案を審査中である。6 社中 3 社 (USNC, StarCore Nuclear, U-Battery Canada) が高温ガス炉を提案している。このプロジェクトとは別に、カナダ原子力安全委員会 (CNSC) は、許認

可申請前ベンダー設計審査を行っている。高温ガス炉に関しては4件の申請があり、USNCの設計の審査が開始されている。

3. 英国^{14, 16)}

英国では、炭酸ガス冷却炉(GCR)や改良型ガス冷却炉(AGR)が導入されてきたが、GCRは全て運転が終了し、AGRも寿命を迎えつつあり、代替炉としてSMRの導入を目指している。まずは軽水炉型のSMRの導入を優先し、その後、先進モジュール炉(AMR)を導入する計画である。ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)の支援の下、フェーズ1として2017年末から8社から提案されたAMRのフィージビリティスタディを進めており、フェーズ2では4社程度に絞り込む予定である。高温ガス炉はU-Battery Developments, USNC および DBDの3社から提案されている。

4. ポーランド¹⁷⁾

ポーランドは、石炭火力の依存度を下げ、CO₂排出量を削減することを目指し、産業用熱供給のために高温ガス炉の導入を目指している。2018年にポーランドエネルギー省は、熱出力10MWの研究炉を2025年、熱出力165MWの商用炉を2031年までに建設する計画を公表した。研究炉を国立原子力研究センター(NCBJ)に建設予定であり、原子力機構はNCBJと協力して高温ガス炉の研究開発を進めている。

5. 中国^{14, 18)}

中国では高温ガス炉開発を精力的に行っている。ドイツの技術を基に清華大学に研究炉HTR-10(熱出力10MW)が建設され、2000年から運転を開始し、安全技術、発電技術の研究が行われた。この成果を基に、実証炉HTR-PM(熱出力250MW×2基)を山東省に建設中で、2020年に初臨界の予定である。さらに商用炉HTR-PM600(熱出力250MW×2基×3組)の設計も進められている。

VI. 高温ガス炉システム実用化をめざして

高温ガス炉の研究開発と導入スケジュール(原子力機構案)を図7に示す。高温ガス炉は比較的小型であることなどに鑑み、国内産業界によって、HTTRから実証炉(商用炉1号機)、実証炉から実用炉(商用炉N号機)の段階を経て実用化されることを想定している。以下に、原子力機構が想定する実用化案を述べる。

HTTRにヘリウムガスタービン発電施設を接続し、高温ガス炉ガスタービン発電プラントの運転制御性を確認するHTTR-GT試験の2020年代後半の実施を、更にISプロセス水素製造施設を接続し、高温ガス炉システムの総合性能を確認するHTTR-GT/H₂試験¹⁹⁾(図8)の

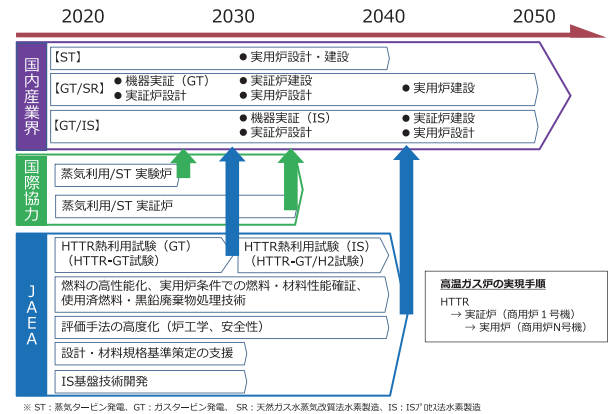


図7 高温ガス炉の研究開発と導入スケジュール
(原子力機構案)

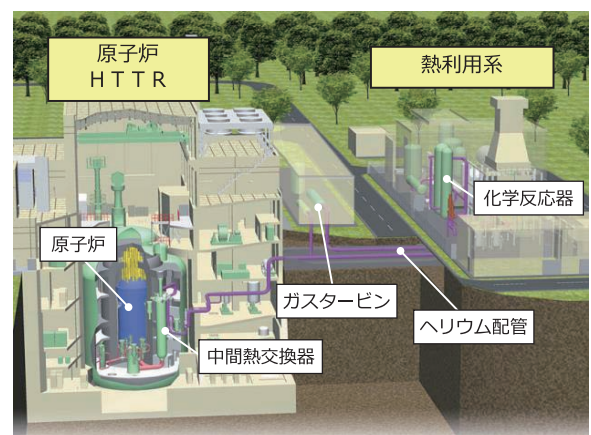


図8 HTTR-GT/H₂試験

2030年代の実施を目指している。これらの接続試験は、高温ガス炉システムの実用化に重要であり、HTTR-GT/H₂試験では、当該装置の設置許可取得を通じて、原子力規制委員会による熱利用施設接続に係る安全基準の策定、適合のための設計方針や設計の妥当性確認を行うことも目的としている²⁰⁾。この他、2040年頃を目途に燃料やISプロセスの基盤技術開発などの研究開発を完了させ、国内産業界へ技術移転を図る計画である。

また、ポーランド、英国、米国などの諸外国においては、原子炉出口冷却材温度750℃の高温ガス炉を用いた蒸気タービン発電又は高温蒸気供給を行うシステムの早期導入が検討されている。自国への高温ガス炉導入を目指すポーランドとの国際協力を有効活用し、炉心高性能化、蒸気発生システムなどの技術開発について、国内産業界の参加を求めて、当該国の実験炉を用いて進める。その後、国内産業界に協力し諸外国での実証炉を活用して経済性および信頼性を実証し、2030年代の蒸気発電用高温ガス炉システムの早期実用化を図る。

ガスタービン発電高温ガス炉システムについては、HTTR-GT試験の成果を活用し、2030年代の実証炉建設、2040年代の実用化を目指す。また、すでに原子力機構で技術実証済の天然ガス水蒸気改質法を用いた水素製

造システム²¹⁾についても同時期の商用化を目指す。ISプロセスを用いた水素電力併給高温ガス炉システムについては、自動制御等の技術開発、HTTR-GT/H₂試験を経て、2040年代の実証炉建設を目指す。なお、これらの接続試験の実施までが原子力機構が主導すべきものと考えている。

実用化に重要な高温ガス炉の安全基準については、わが国の高温ガス炉技術に基づく安全基準を、国際原子力機関(IAEA)において国際標準化することを目指し、原子力機構が中心となり、日本原子力学会「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会において、実用高温ガス炉の安全要件を作成した。さらに、2016年から4カ年にわたり、IAEAの高温ガス炉の安全設計に関する協力研究計画において8か国で実用高温ガス炉安全要件案を検討し、原子力機構提示の案がIAEAエネルギー局案として採用された。今後、さらに実用高温ガス炉の安全基準の国際標準化を進める。

現在、HTTRの運転再開に向け、新規制基準対応に最大限の努力を続けている。HTTRの運転再開後は、まずは震災によって中断した、OECD/NEAプロジェクトの安全性実証試験として、出力100%での炉心流量喪失試験および出力30%で冷却機能を完全停止させた炉心冷却喪失試験(炉心流量喪失に加えて原子炉压力容器を冷却する設備の冷却材流量を喪失させる試験)を行う。このほか、熱利用の負荷変動を模擬した試験等数々の試験を予定している。

原子力関連技術のイノベーションとなり得る、安全性が高く、再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請に応えられる高温ガス炉システムの実用化をめざして、今後も産業界と連携しつつ、国際協力を進め、HTTRを運転再開し接続試験に繋げていきたい。

－ 参考資料 －

- 1) 國富一彦 他, 日本原子力学会論文誌, 1,352(2002).
- 2) 梶尾大輔 他, JAEA-Technology 2010-038, 2010.
- 3) X. Yan, et al., Nucl. Eng. Des., 271, 20(2014).
- 4) X. Yan, et al., Nucl. Eng. Des., 226, 351(2003).
- 5) H. Sato, et al., Nucl. Eng. Des., 275, 190(2014).
- 6) X. Yan, et al., J. Turbomach., 130, 031018-1 (2008).
- 7) O. Myagmarjav, et al., Int. J. Hydrogen Energ., 44, 19141

(2019).

- 8) S. Kasahara, et al., Nucl. Eng. Des., 329, 213(2018).
- 9) H. Noguchi, et al., Energy Procedia, 131, 113(2017).
- 10) O. Myagmarjav, et al., Int. J. Hydrogen Energ., 42, 29091(2017).
- 11) X. Yan, et al., Nucl. Eng. Des., 222, 247(2003).
- 12) K. Kunitomi, et al., Nucl. Eng. Technol., 39, 9(2007).
- 13) H. Sato, et al., Nucl. Eng. Des., 343, 178(2019).
- 14) エネルギー総合工学研究所, IAE-1818115, 2019.
- 15) Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, Ottawa, Ontario, Canada, 2018.
- 16) BEIS, Advanced Modular Reactor (AMR) Feasibility and Development (F&D) Project, 2018.
- 17) Ministry of Energy in Poland, Possibilities for deployment of high-temperature nuclear reactors in Poland, 2017.
- 18) J. Tong, TWG-SMR, IAEA, 2019.
- 19) X. Yan, et al., Nucl. Eng. Des., 329, 223(2018).
- 20) H. Sato, et al., Nucl. Eng. Des., 360, 110493_1 (2020).
- 21) 加藤道雄 他, JAEA-Technology 2007-022, 2007.

著者紹介

所属は、すべて日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門

峯尾英章 (みねお・ひであき)

(専門分野/関心分野) 化学工学/核燃料サイクル・再処理・水素製造・新型炉

西原哲夫 (にしはら・てつお)

(専門分野/関心分野) 原子炉システム/安全設計・水素製造

大橋弘史 (おおはし・ひろふみ)

(専門分野/関心分野) 原子力工学/原子力安全・新型炉・水素製造

後藤 実 (ごとう・みのる)

(専門分野/関心分野) 炉工学/核設計・核変換・再処理

佐藤博之 (さとう・ひろゆき)

(専門分野/関心分野) 原子炉システム設計・高温ガス炉・密閉サイクルガスタービン

竹上弘彰 (たけがみ・ひろあき)

(専門分野/関心分野) 材料工学/水素製造

冊子がいざなう時空の旅

フリージャーナリスト 井内 千穂

廃炉現場と社会を繋ぐさまざまな取り組みを展開している一般社団法人 AFW がコロナ禍中に出版した『福島第一原発と地域の未来の先に… ～わたしたちが育てていく未来～』が版を重ねている。AFW 代表で元東電社員の吉川彰浩さんとは中高生のスタディツアーに同行する中でご縁をいただき、今年2月下旬に実施された京都の中学生たちの福島ツアーでもお話を伺った。全国の小中学校が休校になる一週間前だ。

30 ページほどの冊子の表紙にも、「福島第一原発が出来るまで」「暮らしを支えた発電の時代」「世界史に残る存在へ」「事故の収束と事故処理」「地域再建と廃炉」「廃炉後の未来に向けて」という6つの章立にも、福島第一原発の過去と現在と未来がぎゅっと詰まっている。現地を訪ねても理解が追いつかなかった福島の複雑な問題や原発事故の技術的な話を、豊富なイラストにも助けられて改めて整理できた。誰も悪者にせず、人々の歩みをありのまま伝えて読者の考えを促す文章は吉川さんの語り口そのまま。「未来へつながっていく“今”の『選択』と『決定』をしっかりと見つめていこう」と吉川さんは語る。震災と原発事故の前にも後にも、人々の選択と決定が積み重ねられて現在に至った。まだ福島浜通りを訪ねたことがない中高生は、この冊子を読んで「行ってみよう」と思うかもしれない。彼ら自身の未来のためにも。

コロナ禍の影響でスタディツアーがなかなか実施できないことは、若い世代にとって学びの機会の喪失であり、彼らが担う未来の世界にとっても大きな損失である。「福島どころではない」気分にも陥りかねない日々、廃炉も地域の再建もエネルギー問題も現在進行形であることに思いを致し、次の「旅」を期して、この冊子を周りの人たちと共有したい。コロナの時代を生きていくためにも。

Column

「防護服」 廃炉作業と感染症治療

京都教育大学附属高校1年 上野 和花

5月25日緊急事態宣言が全面解除され、私の高校生活もやっと来週から始まろうとしている。感染患者の治療に尽力する医療従事者に感謝の意を表すブルーライトアップが日本各地で行われるなか、目に留まったのは「原発作業用の防護服 10 万枚を無償提供」の記事だ。

放射線という見えない脅威の中で仕事をする点は廃炉作業に従事している方も同じではないか…折しも今年の3.11に私は映画 fukusima50 を観ていた。映画なので演出もあるのだろう、何となく印象操作を感じたが当時作業員の方々が命がけで奮闘されたことがよく分かった。海外メディアが英雄とたたえた“fukusima50”，作業人数が増えても名称は変わらず当時は国内からも称賛、応援の手紙やメッセージが現場に届いたという。

あれから9年が過ぎた今は？作業員を長期に取材して生の声を集めた本を読んで胸を打たれた。現在も4,000人以上が従事しているが、廃炉作業の最前線がいかに過酷な作業環境であるかは知られていない。

私の父は医師として感染患者治療の場にいる。防護服が必要な最前線と呼ばれる現場…こんなにも社会の反応が違うことについて父に感想を尋ねてみた。曰く、周囲が現在進行形で身の危険を感じるかどうかの違い、コロナもピークが終わると過去のことになって医療現場を気に留める人も少なくなるだろうと。

メディアが取り上げる時期を過ぎると国民の意識は薄れていく。取り扱いを誤れば、被ばくをもたらし放射性物質が拡散しないように、今もなお現在進行形で働く人々のことを忘れてはいけない。

ビル・ゲイツから学べる準備の大切さ

東京学芸大学附属国際中等教育学校 高校3年生 小澤 杏子

コロナウィルスの感染拡大は、未然に防ぐことはできなかったのだろうか。

パンデミックはすでに世界中に広まり、人々を恐怖と困難に陥れている。私はコロナウィルスが日本国内でも脅威となり始めた時、昔インターネットで見かけた1つのTED talkを思い出した。それは、5年前のマイクロソフトの創立者であるビル・ゲイツによる“The next outbreak? We are not ready”というものである。彼はTED talkのなかで、「次の数十年で1,000万人が死ぬ災害があるとすれば、それは戦争ではなくウィルス感染である可能性が高い」と指摘していた。当時その話を聞いた中学校1年生の私はなんとも思っていなかったのだが、今となってはその事態が現実になりつつあることに気づいた。“We are not ready for the next epidemic.”、次の伝染病に私たちは準備ができていないとビル・ゲイツは5年前から警鐘を鳴らしていたのである。このスピーチを再度聞くと、もしかしたらコロナウィルスの感染拡大は防げたのかもしれないと思うのが妥当であろう。

彼のスピーチから学べることは、未然に防げることは本気で防ぐために早めのうちから準備し、対応できるようにしておかなければならないということである。これは感染症だけの問題ではなく、環境問題やエネルギー問題でも同じことが言える。時間が経てば必ず今以上に大きな課題となるとわかっているのであれば、もっと意欲的に課題解決に向けて動き出せるはずである。提出期限前日まで課題を寝かせるよりも、早めのうちに終わらせた方が負担が軽いのは皆わかっているはずだ。

Column

震災と新型コロナ第2波への対策

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

スロバキアよりこんにちは。教育機関の臨時休業の他にも、新型コロナウイルスが2011年の福島第一原子力発電所事故と似ている点として、経済状態の悪い方の健康状態が悪化する点が挙げられます。以前私が翻訳に関わった論文で、南相馬市の帰還困難区域でホームレス生活を続けた男性が、内部汚染を受けてしまったという例があります。男性は、被災者への無料住宅支援が打ち切られた際の混乱で、社会的サポートの連携不足もあり、ホームレスとなってしまいました。ホームレス生活中、男性は帰還困難区域で小川の水や、キノコや山菜を食べて2ヶ月もの間過ごしたそうです。病院搬送時には、Cs-134とCs-137がそれぞれ、538 Bq/body、4,993 Bq/bodyとホールボディカウンターで計測されました。この数値は2013年以降で3番目に高い内部被ばく線量であったそうです。このように、貧困などの社会的要因は、緊急事態では特に健康被害をもたらす要因となってしまいます。

さて、都市封鎖や外出制限などの緩和と、新型コロナウイルス第2波への懸念から、世界各国ではさまざまな対策が進められています。スロバキアでは、第2波への対策として主に公共交通機関の清掃の強化と、ホームレス生活をする人々の、医療機関や医療福祉へのアクセスの確保が進められています。具体的には、首都ブラチスラバ市内に、咳・発熱などの症状が出たホームレスの方々が宿泊できる施設の設置や、食事の炊き出しポイントやシェルターの増設をしているそうです。社会で弱い立場にいる人々の、災害やパンデミック時の健康被害を軽減させるために、地元の医療や福祉施設へのアクセスの強化が重要かもしれません。

参照：Sawano T, Kambe T, Seno Y, et al. High internal radiation exposure associated with low socio-economic status six years after the Fukushima nuclear disaster: A case report. *Medicine (Baltimore)*. 2019;98(47):e17989. doi:10.1097/MD.00000000000017989

甲状腺スクリーニング検査の意義を改めて問う

福島県立安達高等学校 3年 服部 杏菜

夕方のローカルニュース番組で、甲状腺スクリーニング検査をいつまで続けるべきかといった話が取り上げられていた。ナイスタイミングでテレビをつけたなと思っていた矢先、アナウンサーが「県民の意見を聞く」と書かれたフリップを持ち出し、どうやらそれをもってまとめとしているようだった。その特集のほとんどを見逃してしまったらしく少し残念だったが、改めて考えるよいきっかけになってくれた。私はこれまで1度も甲状腺スクリーニング検査を受けたことがない。案内は2年に1度郵送されてくるが、同意したことがないのだ。検査会場が学校で、受ける人が圧倒的多数のため、検査がある度にクラスメートから「なんで受けないの?」と問われた。決まって「親が受けなくていいって言うから」と返していたが、ある時その理由はどうなのかと思い、甲状腺がんやスクリーニング検査について調べたことがある。すると、甲状腺の腫瘍のうち大部分は良性であることや、悪性であっても進行が極めて遅かったり、生命に関わらないものがほとんどだったり、いわゆる「早期発見」が求められるものではなく、むしろ過剰診断が危惧されるのではないかとということがわかってきた。もちろんこれらは検査をしなくてもいいという意見を支えられそうな根拠のみのピックアップだが、最終的に私は検査をする必要はないという結論に至った。予定通りならば今年には検査の年だ。あのアナウンサーの期待に応えられるような「意見」を持っている県民は、いったいどれほどいるのだろうか。

Column

出口なき誹謗の矢を射るリスク

フリーライター 服部 美咲

国の災害対策に科学的な知見は欠かせない。新型コロナウイルス感染症の流行拡大を受け、今年2月に日本政府は専門家会議を集めた。感染症や疫学の専門家が国内外の状況を分析し、対策を提言する。

ただし、科学に絶対の正解はない。医学も科学である。研究の結果言えることには限界があり、反論もあり得る。だからこそ、科学者は科学のマナーに則って相互に検証し、より確度の高い研究成果を出そうとする。専門家会議に集う科学者たちも例外ではない。提言が他者に検証され、より良い対案が出されることを歓迎するだろう。

しかし、科学者たちに放たれる矢の中には、出口のない誹謗に近いものが散見される。専門家会議の議論する距離やマスク着用の有無を非難するネット記事もあった。見覚えのある光景である。東京電力福島第一原発事故の後、福島にきた科学者たちに投げかけられた「御用学者」の誹りである。一挙手一投足を^{あげつら}論^ない、私生活を暴き、言葉尻を詰る。科学のマナーを共有した建設的反論を重ねてきた科学者たちは驚き、福島を離れる人もいた。「福島には二度と関わらない」と再度の協力を難色を示す科学者も少なくない。当然の結果だろう。

今、専門家会議の提言の信頼が失墜すれば、市民が行動の指針を失って社会に大きな混乱が起こる。今後も、科学的知見が必要な災害は起こり得る。その際、科学者の協力を得られなければ、多くの人命を損いかねない。「専門家叩き」の弊害は、深刻である。

高レベル放射性廃棄物等の地層処分場立地可能性調査の受け入れを求めて

原子力発電環境整備機構の対話活動

原子力発電環境整備機構 近藤 駿介

原子力発電環境整備機構(NUMO)は、高レベル放射性廃棄物等の地層処分の実現に向けて文献調査を開始するため、この事業の重要性、地層処分を安全に実施する方法とそのリスク、処分事業が立地地域の環境・経済に与える影響について人々との対話を求め、各地での説明会やウェブサイト、展示車等による広報活動、各種団体の学習活動の支援等の取組を実施している。

KEYWORDS: NUMO, Waste disposal, High-level Radioactive Waste, Geological Disposal, Public Acceptance, Consent-based Siting, Safety Case Report, Human Intrusion, Technologies of Humility

I. NUMO について

NUMO は原子力発電所の使用済み燃料の再処理で発生する高レベル放射性廃棄物等の最終処分を地層処分によって行うことを使命とする、2000 年に制定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(以下、最終処分法という。)に基づき、電気事業者等によって設立された経済産業省所管の特別法人です。私どもは現在、この地層処分場を日本のどこかに受け入れていただくべく、安全を最優先し、技術的にも優れた組織であると社会から信頼されることを基本方針として、技術開発および広報・立地活動を推進してきております。

II. 産業廃棄物の管理

人が生きていくためには物質の利用が必要ですが、これに伴って産業廃棄物が発生します。わが国はこの廃棄物に関して発生量の減量(reduce)、再利用(reuse)、リサイクル(recycle)に努めることにしていますが、それでも毎年約 1,000 万トンを経済処理しています。

この最終処分は地表に設けられた「遮断型最終処分場」等で実施されています。産業廃棄物の有害性の半減期は無限大、つまり永遠に有害ですから、最終処分場を設置しようとするときは、工事の着手前に設置場所を管轄する各行政長に工事の方法を示して許可を受けなければなりません。また、この処分場は所定の処分量に達したら

NUMO's activity to find a site for geological disposal of high-level radioactive waste : Shunsuke Kondo.

(2020 年 6 月 30 日 受理)

維持管理しないですむように廃止したいわけですが、そうするには土壌汚染状況調査によってその区域に土壌汚染の摂取経路のないことが確認される必要があります。

さらに、そうして廃止された後でもその区域で土地の形質変更が行われると周辺に生活環境保全上の支障が生じるおそれがありますので、廃止された最終処分場を含む指定された区域内で土地の形質変更を行う者は、都道府県知事へ事前に届け出て定められた基準に従って行うことが義務づけられています。

III. 原子力発電で発生する放射性廃棄物の管理

原子力発電等に伴って発生し現在貯蔵されている放射性廃棄物は、原子力発電所の運転管理で発生する浅地中ピット処分向け低レベル放射性廃棄物、発電所の廃止措置で生じる大型機器などの中深度処分向け低レベル放射性廃棄物、核燃料工場等で生じるウラン廃棄物、そして使用済み燃料の再処理過程で分離された超ウラン元素や核分裂生成物を主成分とする廃液を 1,100℃ くらいの熔融ガラスに融かし込み、これを直径 40 cm、長さ 1.3 m の円筒形のステンレス容器に流し込み冷却してできた「ガラス固化体」である高レベル放射性廃棄物と、一定以上の超ウラン(TRU)核種や半減期の長い放射性物質を含む長半減期低発熱性放射性廃棄物です。

最後のものは当初米国防関連施設で使われている「TRU 廃棄物」という名称で呼ばれていましたが、対象物には TRU を含まないものもあるので、原子力委員会は 2004 年に原子力政策大綱を取り纏める際、欧州の慣

行を参考にこの長い用語を提唱しました。なお、電気事業者は「TRU 等廃棄物」を用いています。因みに最終処分法では、ガラス固化体を第一種特定放射性廃棄物、この「TRU 等廃棄物」を第二種特定放射性廃棄物としています。

わが国では、浅地中ピット処分向け低レベル放射性廃棄物は青森県六ヶ所村の日本原燃埋設センターにおいて順次処分が行われていますが、それ以外の放射性廃棄物の最終処分場は未開設です。再処理工場から出てくる高レベル放射性廃棄物と TRU 等廃棄物の地層処分場を開設し、これらを処分することが NUMO の使命です。

2500 本あるガラス固化体

高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体は、100 万 KWe の原子力発電所を 1 年間運転すると約 26 本発生しますから、わが国のこれまでの原子力発電量からしますとすでに約 25,000 本が発生しているはずですが、しかし現在は使用済み燃料はまだ 1 割程度しか再処理されていませんので、現在の存在量は約 2,500 本です。このガラス固化体は放射能が高く、発熱量も大きく、強い放射線を出しますが、どれだけ集めても臨界にはなりませんし、爆発することもないので、適切な遮蔽・冷却機能を備えた施設において安全に管理できます。

現在これらの大部分は、日本原燃(株)が、青森県と受け入れ日から 30～50 年後に施設外に搬出する約束をして、「高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター」で安全に貯蔵してきています。なお、欧州に委託した使用済み燃料の再処理で発生する低レベル放射性廃棄物の一部もガラス固化して返還されることになっていますので、ガラス固化体イコール高レベル廃棄物ではないことに注意が必要です。

TRU 等廃棄物は、再処理や混合酸化物(MOX)燃料製造過程で生じる α 放射性核種や半減期の長い放射性核種を一定量以上含む低レベル放射性廃棄物です。この廃棄物の形態には、こうした廃棄物を入れた複数の容器を鋼製の容器に詰めてセメント系材料で固化したものや、上蓋を取り付けた鋼製の容器にこうした廃棄物を入れた容器を収納したものなどがあります。

有害性は時間とともに減少する

放射性廃棄物も産業廃棄物の一種ですが、人類社会にとって新しい種類の廃棄物であり、経済活動の規模あたりの発生量(体積・重量)が少なく、しかも、ウラン廃棄物を除くと、その有害性が時間とともに減じていくという特徴があります。したがって浅地中ピット処分される低レベル放射性廃棄物は、300～400 年後には法律上監視による管理を行う必要がなくなります。一方、高レベル放射性廃棄物のガラス固化体は、その放射能や有害性は時間とともに減衰し、1000 年で 1,000 分の 1 以下になり

ますが、その放射能が原料となった天然ウランの相当量がある放射能と同じ水準になるには数万年を要しますから、地上で隔離処分するとすれば、原子力発電関係者は長期間にわたって放射線の専門家を確保し、安全確保の取り組みを継続する必要があります。

一方、この廃棄物を人間の生活圏から離れた場所に処分できるなら、子孫にそうした負担をかけずにすむはずです。そこで、その場所として地下、宇宙、海底下、南極大陸の氷床下などが検討され、この廃棄物を安定した地質環境の地下深いところに人工的な対策(人工バリア)を施して埋設する地層処分が、隔離と閉じ込めの確実性や実施可能性から判断して最も適切な最終処分方法とされ、現在ではこのことが国際社会の共通認識になっています。

フィンランドでは処分施設の建設を開始

この地層処分に関する研究開発は 1960 年代から世界各国で本格的に開始され、フィンランドやスウェーデンでは高レベル廃棄物に分類される使用済み燃料を金属容器に入れたものを地層処分する場所について地域社会と合意し、フィンランドではその施設の規制当局による安全審査が終わり、2018 年末に建設を開始しました。

わが国では 1970 年代から現在の日本原子力研究開発機構(JAEA)を中心に研究が開始され、1999 年に至り、火山活動や地震活動が活発な日本列島でもこの施設の立地に適した地質環境を見出すことができ、そこで地下深い岩盤に適切な工夫をしてこの廃棄物を埋設すれば安全な処分を実現できるとの報告がなされました。

これを受けて原子力委員会は廃棄物処分懇談会を設置し、全国各地で 23 回のシンポジウムを開催するなどして市民と対話し、その結果を踏まえてこの方式を採用する方針とその取り組みの留意点を決定し、対象自治体の同意を得つつ地下特性の調査を段階的に進めて立地することを定めた最終処分法が制定されたのです。

IV. 地層処分の安全確保戦略

つぎに、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全確保戦略についてお話しします。その目標は、地下にこれを処分しても地上の人々の放射線被ばく線量がもともと地中に存在するウランの崩壊系列に属する放射性元素が発する自然放射線によるものから有意に変化しないようにすることであり、その手段は、処分された放射性廃棄物に含まれる放射性物質が短期間のうちに生活圏に出てくることを妨げるバリアを、個々のバリアの欠陥や弱点を他のバリアが補完するようにする多重防護の方針を採用して人工バリア、天然の岩盤(天然バリア)と多重にすることです。

私どもがレファレンスにしている高レベル放射性廃棄物の処分概念では、この人工バリアの第 1 は、重金属を

保持する能力に優れているガラスに廃棄物の放射性物質を成分として融かし込んでいるガラス固化体です。この特性によりこれが水に接しても、放射性核種が有意に溶出するには長い時間が掛かることになります。人工バリアの第2は、このガラス固化体を密封しているオーバーパックと呼ぶ金属容器です。この金属容器は周囲に地下水があっても、地下は酸素が少ないので、腐食して水と廃棄物が接するまでには長い時間が掛かります。TRU等廃棄物の場合には放射性物質を処理した固体を閉じ込める容器がこの働きをします。人工バリアの第3は、この容器を岩盤中に埋設する際に、周囲に厚いベントナイト粘土層を緩衝材として設けることです。

TRU等廃棄物の場合には、さまざまな形態を有する廃棄体をまとめて収納した廃棄体パッケージを埋設坑道に積み上げて、隙間をセメント系材料で固めます。廃棄体の様相によっては、高レベル廃棄物同様、廃棄体パッケージの周りにベントナイトを敷設します。

ベントナイト粘土は水を吸うと膨潤して体積が増える性質がありますので、埋設された廃棄物近傍で地下水は流れ難く、またガラスやTRU等廃棄体から溶け出た放射性物質は、アクチニド元素は特にそうですが、粘土に収着され易いので、粘土中の移動速度は水の流速よりもずっと遅くなります。この遅い水の動きと粘土の収着性のゆえに、溶出した多くの放射性物質は長期間その場に留まることになります。

地下深部に封じ込める

一方、このように工夫した人工構造物を地下水の流れが遅い安定した岩盤の地下300mより深いところに4m以上の間隔で埋設することで確保されるのが、天然バリアです。粘土は温度が高くなると膨潤する性質を失うので、ガラス固化体の発熱で周りの粘土の温度が高くなりすぎないように、30～50年以上地上で冷却したガラス固化体を、この間隔をとって埋設することにしています。

また、最終処分法に定められている300m以深の安定な岩盤を選ぶのは、地上の予測し難い人間活動や気候変動等の影響が及ばないこと、酸素が少ないので金属が腐食し難いこと、地下水の流れが遅く、岩盤は物質を収着しやすいので、この領域に廃棄物元素が流れ出ても地上に到達するまでには長い時間が掛かり、その間に放射能の大きな減衰が期待できるからです。

地下の岩盤は緻密ですが、それでも岩質によらず孔隙を多少なりとも有し、そこには地下水があり、それが岩盤の透水係数とその場所の導水勾配に応じた速度で流動します。断層付近や亀裂のある岩盤では透水係数が大きく、地下水の移動速度は大きくなります。

岩盤中の地下水の流動状態は、その年代を測定してみるとわかります。NUMOと電力中央研究所が共同で進めている地層処分技術開発の一環として神奈川県の三浦

半島で地下のボーリング調査を行った際に、地下300mより深いところで採取した地下水は100年以上昔の海水と判断されました¹⁾。この半島には数本の断層があり、過去100万年間には何度も地震を経験したはずですが、それでも、その深い地下にある地下水が100年以上昔の海水ということは、この地点の岩盤の構造に由来する結果ですが、その深度の岩盤には地上の水が到達し難く、また、その水は移動し難いことを示しています。

なお、これはこの地点に特異なことではなく、変動帯に属する日本列島でもこのように「地下300mより深いところは長期間にわたって地上から隔離されている」地質環境を諸処に見出すことができるとされています。

V. 地層処分事業の進め方

高レベル放射性廃棄物等の地層処分施設は、地上と地下の施設から構成されます。地上施設は、青森県から海上輸送してきたガラス固化体等を荷揚げし、処分場区域まで輸送する輸送路、ガラス固化体にオーバーパックや緩衝材を施し廃棄体システムとする作業場、地下施設を管理する管理棟および坑道を掘削して掘り出した岩石を一時保管するスペースから構成され、1～2km²の広さです。地下施設は、地下300mより深いところに廃棄体システムを埋設する処分坑道を掘削し、毎年1,000体程度を埋設し、順次坑道を埋め戻していく作業を数十年にわたって継続していくところです。スケールメリットを考え、ガラス固化体を4万本以上処分する施設を考えていますので、坑道の総延長は約200km、その存在範囲は、地下の亀裂分布等に依存しますが、約10km²になります。

最初の扉は文献調査

この事業には、地下の地質環境が処分場に適している安定した岩盤を有する地域を見出すことが肝要です。そこで私どもは全国の地方自治体に対して、地域の地質環境を公開文献で調査させてください、文献調査でこの辺りをボーリング調査等でもっと丁寧に調べたいと判断したら、そうした概要調査の計画を定め、調査受け入れをお願いし、お認めいただいたら、4～5年掛けて調査を行い、この地下なら安全な処分が可能と判断できたら、今度はそこに実際に地下坑道を掘削して、その地質環境特性を詳しく調べる精密調査を10年くらいかけて行いますが、この間に自治体がこの事業と付き合うのを止めると決めたら、私どもはそこで引き下がりますと申し上げて、2002年12月から調査受け入れ自治体の公募を開始しました。

2007年1月に高知県東洋町から正式に文献調査受け入れの意思表示がありましたが、その後、その賛否を巡って町を二分する論争に発展し、同年4月の町長選を

経て応募は取下げられました。以来、今日まで私どもは文献調査を開始できていません。

2012年になって政府は、福島第一原子力発電所の事故を踏まえてこの取り組みの見直しを行い、2014年のエネルギー基本計画において、高レベル放射性廃棄物の最終処分は現世代の責任として地層処分を前提に取り組みを進めること、他方、将来世代が最良の処分方法を選択できる可能性を確保する観点から、この間の可逆性・回収可能性を担保すべきこと、そして、国民の間での議論の進展を期待して「科学的特性マップ」を公開することを明らかにした上で、政府が前面に立って取り組みを前進させることを決めました。

適地を色分けした科学的特性マップ

「科学的特性マップ」は、地層処分に関係する地球科学的特性等を既存の全国データに基づき一定の要件・基準に従って整理し、全国地図に示したものです。具体的には火山の火口から15 km以内、活断層、著しい隆起・侵食、地盤が軟弱等の望ましくない特性のある地域をオレンジ色で、将来人間が掘削するリスクがある鉱物資源が賦存する地域をシルバー色、それ以外のところを薄緑色で示し、さらに、そのうち海岸から20 km以内の廃棄物の輸送の安全確保の観点からも好ましいと考えられる地域を濃い緑で表示しています。

国によるマップの公表は、地層処分を行う場所を選ぶために調査したい地域が広く存在することを示して、各地の皆様がこの地層処分場を実現させることは社会の利益になることだから、地域の将来像の選択肢を広げるためにまずは調査を受け入れてみようかと相談していただくきっかけになればと考えての取り組みです。

VI. 最近の取り組み

マップの公表後、NUMOは使命の達成に向けて数年以内にいくつかの地点で文献調査を開始したいと考え、いくつかの取り組みを行ってきています。その第1はいつでも事業に着手できるように、地下の調査技術および地層処分技術の開発を引き続き着実に進めていくことです。開発課題は、1)地層処分に適した地質環境の把握・選択とその熱的、機械的、水理学的、化学的振る舞いのモデリング技術、2)地層処分場の設計と建設・操業・閉鎖の技術、3)処分場閉鎖前および閉鎖後長年にわたる安全性の評価技術に大別され、JAEA、産業総合研究所、原子力環境整備センター、大学、電力中央研究所という国内の研究開発機関および海外の関係機関と連携・分担して取り組んできています。

最近、これまでに得られた成果を集大成して、包括的技術報告書(レビュー版)を作成・公表しました。これは、法律に定められた段階的な地質環境の調査を踏まえて選定された地点において、NUMOが放射性廃棄物の

地層処分場を安全に建設・操業・閉鎖し、閉鎖後長年にわたって安全を確保できることを説明する準備として、

- ・処分サイトが未定のため、日本の代表的地下岩盤3種(深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類)を選び、そこに想定される処分場としての要件を満たす地質環境特性を踏まえて処分場を設計・建設し、廃棄物を輸送・封入・埋設する一連の業務を机上で実施して、その能力を有することを確認する。
- ・そこの地質環境と閉鎖後の処分場の多重バリアシステムの熱的、機械的、水理学的、化学的挙動の長期的変遷に関する知見に基づき、埋設廃棄物中の放射性物質の長期的挙動の数学モデルを作成し、それに基づく数値シミュレーションで埋設した廃棄物によってもたらされる地上環境における被ばく線量を予測し、地上の人間の安全が確保できることを確認する。

という作業を実施した結果を取りまとめたものです。その主要な結論は以下のとおりです。

- 1)人工バリアと天然バリアの確からしい特性変化の範囲では、特に高レベル放射性廃棄物処分場の場合、埋設されたガラス固化体中の放射性物質の大部分はオーバーパックが機能を失うまでは廃棄体中に留まって減衰し、固化体が地下水と接触した後も溶出はゆっくりである。溶出した放射性物質は緩衝材中に収着され、そこに留まっている時間が長く、その間にその放射能はさらに減衰していく。緩衝材の外側の岩盤に移動した放射性物質は、収着され希釈されて減衰しつつ地表に達する。その結果、それらによる被ばく線量は岩盤中に含まれる天然放射性物質による線量に比べて小さなものとなる。
- 2)こうした地下水による放射性物質の移行による被ばく線量を評価する上で注意すべき放射性核種は、主にTRU等廃棄物に含まれる水溶性で非収着性の Cl-36 、 I-129 、ガラス固化体に含まれる、天然バリアが深成岩類では収着性が低い Se-79 、炭酸物質の濃度が高い高塩分濃度の地下水が存在する新第三紀および先新第三紀堆積岩類では溶解度が高く収着性が低い U-233 である。
- 3)処分場は閉鎖後長期間にわたりマグマが侵入したり、断層で破壊されるという望ましくない自然現象の発生する確率が十分低い地点を選定して立地するが、その確率がゼロとは言えないので、それらが発生した場合に想定される地表での人の被ばく線量を評価したところ、その値は自然放射性物質による線量を超える場合もあるが、それでも防災活動を妨げるほどには高くはない。

この報告書は、私どもの技術開発や文献調査を受け入れていただいている調査・立地活動の妥当性を判断し、今後の活動に指針を与える素材を多く含みますから、現在、内外の専門家のレビューに付しています。

対話活動からわかったこと

第2は、この事業の重要性、地層処分を安全に実施する方法やそのリスク、地層処分場の立地地域におけるNUMOの取り組みが地域の環境・経済、繁栄に与える影響等について人々に説明する説明会を開催し、ウェブサイトやSNSで情報発信し、展示車を巡回しての広報活動を行うとともに、これらについてもっと学習したいとする人々のつくる各地の団体の学習活動を支援する取り組みです。

さらに、私どもの事業は100年を要する事業ですから、次世代の人々に関心を持ってもらうことも大切なので、学校・大学での出前授業やこの事業を教育素材にしたいという教育現場の要請にも応じています。

このうち、事業内容を説明する対話型全国説明会では冒頭、私どもから1)地層処分の重要性和安全性、環境影響、2)科学的特性マップの意味、3)NUMOは同意を得ながら段階的に調査を進めたいので、自治体には社会の利益のために調査に応募していただきたいこと、4)NUMOは、事業の推進にあたっては処分場を受け入れていただいた地域社会の価値観や将来ビジョン、その優先順位を、地域に設けていただいた「対話の場」を通じて学び尊重すること等を説明します。

環境影響については、坑道の採掘土を地上に数mの盛り土の姿で保管すること、港から敷地までの輸送キャスクに入れた放射性廃棄物の輸送を定期的に行うこと等を説明し、さらに、受け入れていただくことになったら、私どもは地域の企業としてそこに居を構え、地域における生活基盤や関連知識基盤、事業に必要な技術者を育成する仕組みを整備して地域の人々の雇用に努め、事業に必要な資材等はできるだけ地域社会から調達する等、地域社会の安定的発展を大事にして事業を進めて参りますとします。その後、少人数でテーブルを囲んで、質疑応答形式での対話を1時間ほど行っています。

説明会で対話の時間に提起された論点は記録し、私どものウェブサイト公表するとともに、よりよい対話ができるよう整理・分析して職員の訓練に生かしてきています。以下には、過去2年間の会合の合計約460テーブルでお聞かせいただいたご意見から約2割を占める地層処分技術や地域への影響に関する質問を除いたものを、乱暴との謗りを覚悟しつつ、5点にまとめてみました。

○これまでの経緯から電力、NUMO、国は信頼できない。最終処分が困難な高レベル廃棄物を発生する原子力発電所を利用し続けることは許されない。

○なぜ地層処分？日本では無理では？危険物は地上で管理して保管の方が安心。もっと良い技術を待て。

○なぜ将来の津波、地震、火山・断層直撃、人間侵入等がもたらすリスクが小さいと言えるのか？

○事業のスケジュールは？青森県とのガラス固化体搬出の約束は守れるか。処分場は何故1箇所？廃棄物発生源の原子力発電所所在地や電力消費者が多い都会の地下に設置するべきでは？

○なぜこの地で説明会を開催？円卓対話方式と言うが、説明が多く対話が不十分。参加者に若い人が少なく、自治体関係者もいない。

私は、これから少なくとも二つの点を心すべきと思っています。第1は、私どもの地層処分事業やそのリスクに関する説明に対して怒りを感じておられ方が少なくないということです。日本では福島事故の後、原子力界に対する信頼が失われ、その回復が進まない状況にあります。この状況で地質環境、しかも数万年以上という非日常の世界を対象にした放射性廃棄物の地層処分のリスクの予測を示されることに対し、反省が足りないと怒りを感じる方がおられると理解しています。

そこでどうしたらいいか。私は、福島事故を防げなかったことを深く反省し、外部事象による共通要因故障の排除や防災対策の充実に努めるなどリスク管理を徹底しつつ原子力発電所の再稼働の取り組みを進めていること、同時に、高レベル放射性廃棄物の最終処分の実施に道筋をつけることはNUMOに託された現代の責任と考え、深層防護の哲学に基づき不確かさの存在に留意して安全余裕を埋め込み、安全確保に係る不確かさの影響が小さい地層処分を実現することを目指して、これを可能にする技術的能力、その一部としてそのリスクを確率的に評価する能力を涵養し、その成果をもとに市民の皆様と対話し、この事業のリスクの姿を不確かさを含めて共有することが大切と思っています。

推進側に必要な「謙虚さの技術」

もう一つ：この対話において、地層処分に関して技術者が「地下は安心」、「長期間の人間の関与は保証できないから天然の閉じ込め機能に委ねるのが適切」、「現時代の責任として解決すべき」とするのに対して、人々が「地下は断層があり、火山もあるので危ない」、「危ないものは見えるところで管理すべき」、「将来に禍根を残さないために地層処分をというのは騙り。絶対に安全といえないなら次世代に託すべき」と反駁することに関しては、「科学と社会」研究の第一人者、ハーバード大学のジャサノフ教授が、科学的知識の不完全さを受け入れ、避けがたい不確実性の下で行動するためには推進側に「謙虚さの技術」が必要、行動の際には曖昧さ、不確定性、複雑性の原因に思いを致し、can doに政治的倫理的分析・生活

の知恵に基づく should do を結合させることが求められるとしていること²⁾を大切に考えています。

各国において実施者が、市民と問題状況と可能な選択肢について議論し、世代間公平性の観点からプロセスの可逆性の担保に合意し、あるいは閉鎖後のモニタリングを社会と相談しつつ継続する方針に合意したのもこの結合と理解し、私どもも、将来世代の代表者とも対話しているという認識も持って市民の皆様とリスク情報を共有し、社会にとって良い選択肢を生み出す、この結合を求める対話を重ねていくことが大切と思っています。

この対話活動は、NUMO にとって学びの旅でもあります。全国説明会のアンケートで、1) 社会の利益のために地層処分事業に協力する地域の人々に対して敬意や感謝の気持ちを持つことは重要である、2) 地層処分事業に協力する地域に対して経済的・財政的支援を行うことは適切である、という2つの意見に対する肯定否定を問うと、約 50 %の方が肯定的、20 %弱の方が否定的、約 10 %の方が中立的、30 %弱の方が不知・無回答とされることに励まされ、事業推進の大切さと責任を強く自覚

し、実現に向けて日々学びつつ前進したいと考えています。

付記：本記事は、令和元年 12 月 10 日 日本原子力学会再処理サイクル部会セミナーにおいて行った講演内容をもとに作成した。

－ 参考資料 －

- 1) 長谷川琢磨 他：地下水年代測定による現海水と化石海水の同定 電力中央研究所報告 N10008(2010)。
- 2) Sheila Jasanoff: Technologies of humility, NATURE Vol 450 1 November 2007.

著者紹介



近藤駿介（こんどう・しゅんすけ）
原子力発電環境整備機構
（専門分野/関心分野）地層処分、福島事故
炉の廃止措置



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－

（8月4日 第2回 論文誌編集幹事会）

- ・テレビ会議システムを使ったリモート会議を実施した。
- ・6月16日から7月15日までに英文論文誌に22報、和文論文誌に3報の新規投稿があった。
- ・伊藤委員長から、英文論文誌のインパクトファクター、英訳公表事業の進捗状況等を理事会に報告しているとの説明があった。
- ・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が若干納期がずれる見込みである。Vol.1と4の製版を開始する。
- ・英文誌の論文テンプレートは出版社提供のものに統一することとした。
- ・ANS ジャーナルとの共同 Virtual Issue に関しては、さらに検討を続けることとした。
- ・若手編集委員から「英文論文誌のインパクトファクター」に関する意見聴取結果の概要が報告され、意見が交換された。
- ・計算科学を主内容とする論文の受付窓口として、新たな分野を設定する

方向で、計算科学技術分科会に打診することとした。

- ・9月に予定していた「論文誌編集委員会の全体会議」今年度は中止することとした。

（8月4日 第2回 学会誌編集幹事会）

- ・テレビ会議システムを使ったリモート会議を実施した。
- ・伊藤委員長、佐相副委員長から理事会報告があった。
- ・新企画案「原子力の未来を予測する、創る」について編集長から説明があり、10年シンポの進捗状況について佐治理事から説明があった。
- ・学会誌アンケート回答結果を確認した。
- ・巻頭言、時論、その他の記事企画の進捗状況を確認し、掲載予定について検討した。
- ・2020年秋の大会の企画セッションより記事候補を選出した。引き続き検討していく。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

サイエンスよみもの

熔融塩電解で酸化ウランを金属に還元する —金属燃料高速炉への燃料供給に向けた技術開発—

電力中央研究所 坂村 義治

金属燃料高速炉に燃料を供給するため、酸化物燃料を金属に還元する技術を開発している。還元方法としては、簡素なプロセスで二次廃棄物の発生を抑制できること、金属燃料の乾式再処理技術と整合性があることから、650℃のLiCl 熔融塩中で酸化物燃料を陰極として電気分解を行う電解還元法を選択した。本稿では、酸化ウランの電解還元技術開発の現状について、金属製錬の代表格である製鉄の話も交えながら紹介する。

KEYWORDS: *uranium, electrolytic reduction, cathode, molten salt, lithium chloride, pyrochemical reprocessing, metal fuel fast reactor, Tata iron-making technique*

I. はじめに

世の中で広く利用されている金属を3つ挙げるとすれば、鉄、銅、アルミニウムであろう。それらの化学的な活性度は、銅<鉄<アルミニウムの順番で、金属へ容易に還元される銅はBC 8000~6000年頃、鉄はBC 2000~1500年頃に金属の生産が始まったとされている。アルミニウムに至っては、ようやく19世紀になって人類は金属を手にした。現代では、それぞれの性質に応じて、銅は水溶液電解、鉄は炭素による化学還元、アルミニウムは熔融塩電解で工業的に金属が生産されている。

ウランの場合、化学的活性度がアルミニウムに近いため、熔融塩電解あるいは強力な還元剤を用いた化学還元により金属の製錬が行われる。1960年代の資料によれば¹⁾、フッ化ウラン(UF₄)をカルシウム金属またはマグネシウム金属と混合して鉄製容器に密封し、加熱することにより瞬時に反応させて、ウラン金属の塊を回収している。これは、マンハッタン計画以後に米国で確立された方法である。

軽水炉燃料からウランやプルトニウムを金属として回収し、金属(U-Pu-Zr合金)燃料に加工して高速炉で燃焼するシナリオにおいて²⁾、つまり再処理技術としての金属製錬では、廃棄物発生量を低減するためにカルシウム等の還元剤はリサイクル利用する必要がある。そこで

1990年代には、LiCl 熔融塩中でリチウム金属を還元剤として使用する化学還元(反応1)とリチウム金属をリサイクルするための熔融塩電解(反応2)が研究された。ここでは、反応1により熔融塩中のLi₂O濃度が増加すると反応2の電解を行い、リチウム金属を再生してLi₂O濃度を減らす。なお、還元剤としてリチウム金属を選択した理由は、高速炉金属燃料の電解精製で使用するLiCl-KCl 熔融塩と、熔融塩成分を共通化するためである。

リチウム金属によるUO₂の化学還元



リチウム金属のリサイクル電解

(陰極でリチウム金属、陽極でO₂ガスが生成)



2000年に、革新的なチタン製錬法として、電解還元技術がケンブリッジ大学の研究グループから提唱され³⁾、筆者らも酸化物燃料の電解還元技術の開発に着手した。これは、熔融塩電解の陰極に酸化物を配置することによって、(1)と(2)式の反応を同時に進行させる方法と言える。次章では、酸化物燃料の主成分である酸化ウランを対象とした電解還元技術開発を紹介する。

II. 酸化ウランの電解還元技術

1. 電解還元法の原理

図1は電解還元法の概要で、その原理は簡単である。

Reduction technique of uranium oxide by molten salt electrolysis to supply metal fuel material for fast reactor: Yoshiharu Sakamura.

(2020年5月29日 受理)

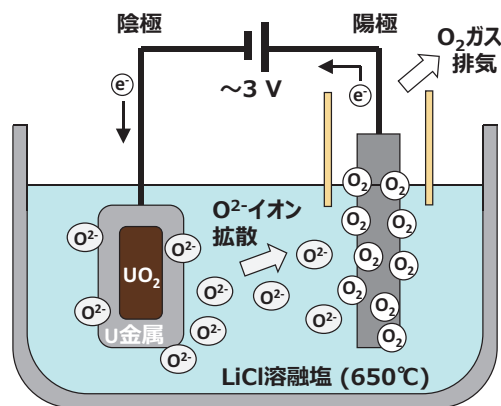


図1 電解還元法の概要

UO₂を陰極として陽極との間に約3Vの電圧をかけると、ウランと結合していた酸素がO²⁻イオンとして溶融塩中に溶解し、ウラン金属が陰極に残る(反応3)。陽極ではO²⁻イオンが電子を手放してO₂ガスとなり、系外に排出される(反応4)。また、電解条件によっては陰極でLi⁺イオンが還元されてリチウム金属を生成し、(1)式による二次的なUO₂の還元反応が並行して起こる。

陰極反応

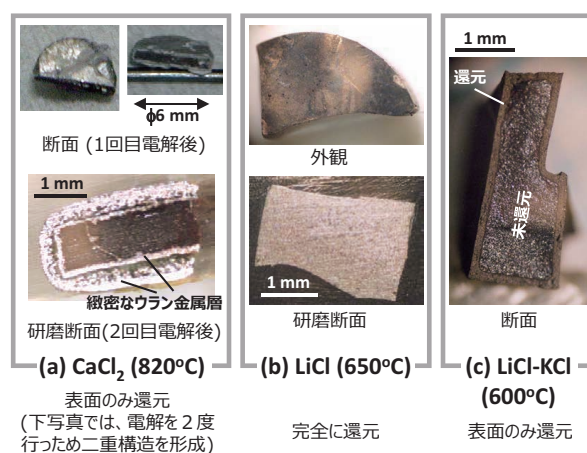
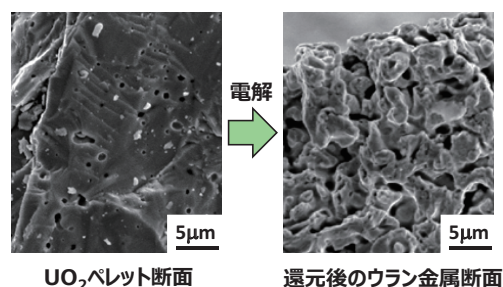
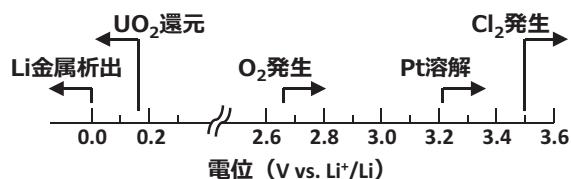


陽極反応



2. 原理の実証 —基礎試験—

UO₂を陰極、白金を陽極として、数種類の溶融塩中で試験を行った⁴⁾。まず、酸化チタンの電解還元で用いられる820℃のCaCl₂溶融塩中で(CaCl₂融点772℃)、厚さ1~2mmにスライスしたUO₂ペレットの電解を行った。その結果(図2a)、電解後のUO₂ペレットの表面は銀色の金属光沢を呈していたが、内部まで還元が進行していなかった。これは、生成したウラン金属が温度が高いため凝集し、表面に緻密な金属層を形成してO²⁻イオンの拡散を妨害したことが原因である。よって、融点が高いCaCl₂はUO₂の還元には適していないことが分かった。一方、650℃のLiCl溶融塩中では(LiCl融点606℃)、電解後のUO₂ペレットは、表面は金属光沢を呈していないが、内部まで金属に還元されていた(図2b)。生成したウラン金属はスポンジ状で(図3)、その隙間に溶融塩が浸透することにより、溶融塩を通路としてO²⁻イオンが外部に溶け出すことが可能となって、内部まで還元が進行する。ここで、操業温度を更に下げることができればメリットが大きいと考え、LiClにKClを加えて(モル比LiCl:KCl=59:41では融点が352℃まで低下)600℃で電解を行った。その結果(図2c)、金属への還元はUO₂ペレット表面のみで停止し、この試みは失敗した。原因は、LiClは650℃においてLi₂Oを

図2 各種溶融塩中での電解還元後のUO₂ペレット片図3 電解前後でのUO₂ペレットの断面SEM像図4 650℃のLiCl溶融塩中での反応電位
(リチウム金属の析出電位を基準とした)

8.8 wt%まで溶解するが、KClを加えるとLi₂Oの溶解度が大きく低下するためであった。LiCl-KCl中ではO²⁻イオンの拡散が遅く、スポンジ状ウラン金属の隙間にLi₂Oが析出してO²⁻イオンの通路が閉塞した。これらより、UO₂をうまく還元するためには、図1に示されているO²⁻イオンの流れが滞らないことが肝要である。

図4は、LiCl溶融塩中で測定した反応電位を整理した図である。UO₂がウラン金属に還元される電位は0.16Vで、リチウム金属析出電位との電位差は小さい。一方、陽極でO₂ガスが発生する電位は2.65Vである。白金を陽極として使用する場合は、3.2V以上では白金がPt²⁺イオンとして溶解してしまう。これを防止するためには、O²⁻イオンが陰極から陽極に速やかに拡散するように体系を工夫し、電流を適切に制御することが肝要である。

3. 試験規模の拡大 —100gのUO₂を還元—

UO₂の還元にはLiCl溶融塩が適しており、その要諦を理解することができた。次のステップとして、一定量

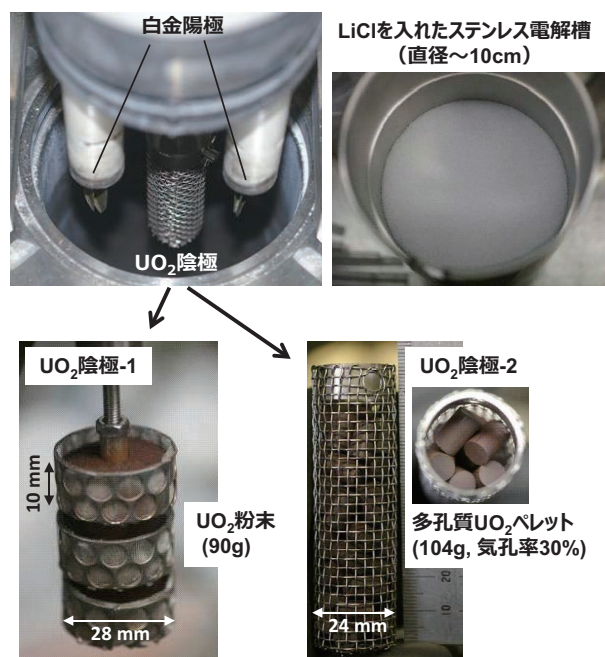


図5 UO_2 -100 g 規模の電解還元試験装置：電解槽内の LiCl (右上) を 650°C で溶融した後に電極を挿入し、電解を実施。 UO_2 陰極-1 と UO_2 陰極-2 では、それぞれ電解時間 8.4 h と 9.3 h で UO_2 を金属に還元。

の UO_2 (～100 g) を実用的な処理速度 (10 時間以内) で金属に還元することを目標にした⁵⁾。100 g の UO_2 は、かさ密度 50 % とすれば体積は 20 cm^3 くらいである。そこで、直径 10 cm の電解槽に深さ 6 cm まで LiCl 溶融塩 (Li_2O を 1 wt% 含む) を入れて、 UO_2 を装荷したステンレスメッシュ製の陰極バスケットを中央に、その周囲に陽極の白金板を配置して、電解を行った (図 5)。白金板はマグネシア管で囲み、発生する O_2 ガスを上端から排気した。電流は、開始直後は 15 A で、還元が進むにしたがって徐々に減少させた。

陰極バスケットに装荷された UO_2 粉末は、図 1 に示したように周囲から中央部に向かって還元が進行する。したがって、目標とする電解時間に合わせて UO_2 粉末層の厚みを制限すればよい。図 5 左下は陰極の一例で、 UO_2 粉末を厚み 10 mm で装荷した皿型バスケットを 3 段積み重ねた構造であり、8.4 時間の電解で還元が完了した。別法として、図 5 右下では多孔質 UO_2 ペレットを作製して装荷した。溶融塩が多孔質ペレットの内部に浸透しやすいこと、目の粗い陰極バスケットを使用できること、電解後の生成物の取り出しが容易であることなど、利点が多い。この電解では 9.3 時間で金属への還元が完了した。これらより、実用的な処理速度で金属に還元するという当初の目標は達成された。

4. MOX への適用

電中研と日本原子力研究開発機構は、高速実験炉「常陽」で U-Pu-Zr 合金燃料の照射試験を行うために、原料の U-Pu 合金を電解還元技術によって調製した⁶⁾。プル

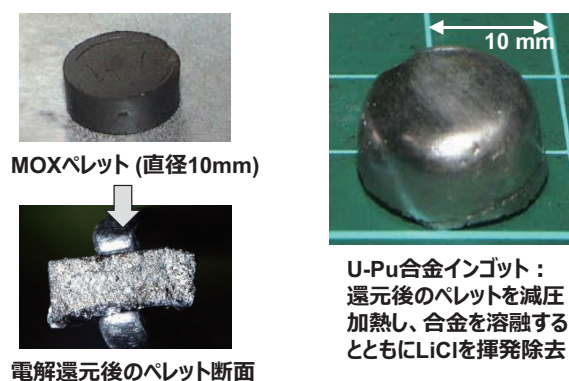


図6 MOX の電解還元による U-Pu 合金の製造

トニウムはウランよりも酸化物が安定であるが、図 6 に示すように、多孔質 MOX ペレット (UO_2 -60 wt% PuO_2 , 3.0 g/個) を陰極として LiCl 溶融塩中で電解することにより、ペレット全体が金属に還元された。得られた U-Pu 合金の隙間には LiCl が浸み込んでいるため、これを減圧下 850°C で処理して LiCl を揮発除去すると同時に合金を溶融させて緻密な金属塊として回収することができた。

Ⅲ. たたら製鉄に学ぶ

1. 製鉄の歴史

本稿はウランの還元を話題としたものだが、日本古来の鉄の還元技術について筆者は深く関心を抱いており、創意工夫に教えられることが多いため、ここで簡単に紹介したい。人類にとって最も重要な金属である鉄は、BC 2000～1500 年頃に小アジアのヒッタイトが生産を始めた。当時は青銅器時代で、銅を生産する時に不純物を取り除くために加えた鉄鉱石が木炭によりたまたま還元され鉄が得られたと考えられている。製鉄技術は、ヒッタイトが長らく秘密にしていたが、その王国の滅亡により周囲に拡がって行った。時は流れ、わが国での本格的な鉄の生産は古墳時代の 6 世紀頃に始まったというから、世界はいかに広大であったことか。その後、国内で独自に技術が進歩し、江戸時代中期に「たたら製鉄」として完成した。その技法は素晴らしいものだが、幕末以降に西洋から導入された生産性の高い方式に取って代われ、産業としては大正時代に終息した。現在では、これも伝統文化・技術である日本刀の原料鉄を得るための製鉄技術として伝承されている。

2. たたら製鉄の技術

たたら製鉄は、土で作製した炉に砂鉄と木炭を装入し、 $1,000^\circ\text{C}$ 以上の高温で砂鉄を還元して金属を作り出す方法である⁷⁾。砂鉄は、風化した花崗岩を山から切り崩して土砂を水の流れにさらし、比重の大きい砂鉄が水底に留まりやすい性質を利用して濃縮した。この選鉱法で、母岩中に 1～2 % 含まれている鉄分を、砂鉄の含有率

として80%近くにまで上げることができる。なお、中国山地は良質の砂鉄が採れるため主要な製鉄地域となったが、砂鉄の採取により、出雲平野を流れる斐伊川などは地形を変えるほどの膨大な土砂が下流に堆積した。木炭は、燃料および還元剤として大量に必要であり、山を荒廃させないように樹木を育成しながら順々に伐採して行くため、広大な山林を必要とした。このように、たたら製鉄の材料調達に要する労力は極めて大きく重要であった。

たたら製鉄の炉は幅1m×長さ3m×高さ1mくらいの箱型で、上部は開放されており、側壁には風を送って木炭の燃焼を促すための吸気口、内部で生成する融体を流し出すための排気口が設けられている。風は、炉の周囲に配置した轆(ふいご：たたらは元来ふいごを意味する言葉)から送りこまれるが、轆の操作は重労働であった。炉の土台には、湿気を防いで高温を維持するための精巧な地下構造が施された。

操業は、「けら押し法」と呼ばれる方式では3昼3夜ぶっ通しで行われる。木炭と砂鉄を交互に炉の上部から入れていき、生成した酸化物スラグ融体を流し出しながら、還元反応を進めていく。還元された鉄は、炉の底部に残る。炉の土壁は、砂鉄や木炭に含まれるSi, Ca, Al, Tiなどの不純物と反応して酸化物スラグ融体となる。したがって、土壁は徐々に浸食されていき、それに耐えられなくなったときに操業が終了するという仕掛けである。これらは、「村下」と称される技師長が、炎の色や融体の状態などを見ながら、砂鉄や木炭の投入、轆の強弱など、まさに名人芸で差配する。おおまかな物質収支は、材料として砂鉄10トンと木炭10トンを消費し、鉄3トンが得られる。生成した鉄の良質な部分は「玉鋼」と呼ばれ、これは日本刀の製造に適した材質で、近代的な製鉄法では直接得られないものである。

材料の調達から製鉄、さらには日本刀など最終製品の鍛冶まで含めて、古代からの経験の積み重ねで培われた技は、近代科学から見ても理にかなった技術として完成された。幕末、洋式高炉による近代的な製鉄が始まった。原料には鉄鉱石とコークスを用い、やがて鉄は連続的に大規模に生産されるようになった。原料に限りがあり、炉を毎回作り直すなど、バッチ式で小規模のたたら製鉄では太刀打ちできない。現代の製鉄所の高炉は直径10m×高さ50mにもおよび、1基あたり1万トン/日以上の鉄が生産されている。これは、江戸時代のわが国の年間生産量に相当する。

IV. おわりに ～電解還元技術の実用化に向けて

酸化物燃料の電解還元技術としての実規模は、1つの陰極に2～5kgの酸化物を装荷して10時間で還元を終えることを想定している。これまでに数kgの UO_2 を

用いた電解還元試験を行い、課題が明らかになってきた⁸⁾。まず、規模が大きくなると陰極全体で一様に還元が進行せず、リチウム金属が局所的に析出しやすい。また、電位を観測しながら巧みに電流を制御するという芸当も難しい。そこで対策として、陽極と陰極を適切に配置して酸化物がなるべく均等に還元されるように設計する。そして陰極では、むしろリチウム金属を積極的に析出させ、そのリチウム金属により二次的に UO_2 を還元することが好ましいと考えている。 UO_2 -100g規模の試験で見られたように、還元時間を短縮するためには、原料酸化物の形態と陰極の形状が重要である。

いま開発中のウラン還元技術を長い歴史を持つ製鉄技術と比すべくもないが、たたら製鉄や近代高炉の技術を学ぶことは、なかには意外な共通点もあり、少なからず参考になる。たたら製鉄は、近代科学の基礎知識がなくても、経験の積み重ねで合理的な高い生産技術に到達した。砂鉄を集め、木を育てて炭を焼き、土で炉を作り、炎の色から還元反応を知るなど。近代高炉では、大規模化と共に連続的な生産方式が革新的であり、原材料の前処理、炉内壁の防護、シミュレーション技術の利用など手本としたい。実際には、アルミニウムやジルコニウムは金属の化学的活性度がウランに近いと、必然的に製錬技術に共通点が多いものの、歴史の古さ、現代技術への飛躍的発展、鉄そのものの性質という点で、鉄は面白い。最後になるが、筆者は開発中のウランの還元技術を世の中に大いに役立たせたいと思っている。

本稿で紹介した酸化ウランの電解還元技術開発は、文部科学省・原子力システム研究開発事業の一環として実施されたものである。また、ウラン試験は京都大学複合原子力科学研究所および東芝エネルギーシステムズ(株)で行われた。

－ 参考資料 －

- 1) 清沢暢人, 日本鉱業会誌, 84(963), 993 (1968).
- 2) 小山正史, 尾形孝成, 日本原子力学会誌, 52(7), 28 (2010).
- 3) G. Z. Chen, et al., Nature, 407, 361 (2000).
- 4) Y. Sakamura, et al., J. Electrochem. Soc., 153, D31 (2006).
- 5) Y. Sakamura and T. Omori, Nucl. Technol., 171, 266 (2010).
- 6) 中村勤也ほか, 日本原子力学会和文論文誌, 10(4), 245 (2011).
- 7) 鉄の道文化圏推進協議会, 出雲國たたら風土記, <https://tetsunomichi.gr.jp/>など.
- 8) M. Iizuka, et al., Nucl. Technol., 184, 107 (2013).

著者紹介



坂村義治 (さかむら・よしはる)
電力中央研究所 原子力技術研究所
(専門分野/関心分野) 溶融塩化学, 電気化学, 乾式再処理, 金属製錬技術

連載
講座よくわかる PRA
～うまくリスクを使えるために～

第4回 安全目標の現状と今後の課題

東京大学 山口 彰,
原子力安全推進協会 成宮 祥介

原子力に限らず、安全目標の議論は理解され難く社会に定着しない。一方で、日々の安全確保活動は適切に行うべき、リスク管理が大切であり、定量的なリスク評価が必要であるという認識と共通理解は次第に醸成されつつある。安全目標は、“How safe is safe enough?”の問いに対する回答と言った観念的な意味だけでなく、リスクや日々の安全確保活動と直結していることを理解することが大切である。また、福島第一事故の教訓を踏まえれば、安全目標には生命や健康を守ることに加え、社会的リスクへの深慮が必要となる。第4回では、わが国の原子力施設が社会との前向きな関係の中で利用されていくために安全目標の国内外での議論を踏まえた上で、どうあるべきかを解説する。そして安全目標の階層構造の概念を用いてリスクとの関係、リスク情報を活用した安全確保活動への展開について考察する。

KEYWORDS: *Safety goals, Performance goals, Risk assessment, Application of risk information, Social risk*

I. はじめに

本稿では、「よくわかる PRA～うまくリスクを使えるために～」と題する連載講座の第4回、「安全目標の現状と今後の課題」について述べる。なぜ、安全目標がリスクと関係するのか、安全目標が日々の安全確保活動にどう関係するのか、これが本稿のテーマであると云っても過言ではない。安全目標とは何か？旧原子力安全委員会の安全目標専門部会(以下、専門部会)は、確率論的な考え方を用いて国民のリスクの抑制水準を示すものが安全目標であるとしている。

安全目標といえば、原子力発電所の性能目標である炉心損傷頻度(Core Damage Frequency: CDF)を連想する方も多いと思う。それをリスク評価と比較して施設の安全確保の取組みの成否を判断しようとする。判断の根拠として、安全目標の受容性や数字の意味の客観的な説明が求められ、CDFは安全の「ものさし」足りうるかと問われる。リスクの定量値を評価する手法やデータが完全ではないと指摘され、次第に不安になる。そこで、通常状

態からの逸脱を過度に忌み嫌い、炉心損傷とは隔たりのある軽微なトラブルを安全上重要な事象と同一視して過剰反応をすることもある。結局、安全目標を定め、使うことはなんと難しいのかと絶望的になる。顧みれば、安全目標がない現在の状態でも、規制の基準があるのだから、当面困ることはなさそうであり、安全目標の考察を深め、策定する努力を諦める。これが現状ではないか。

安全目標は不要であると公言されているのを少なくとも著者らは知らない。その重要性はわかっている必要不可欠と主張する事業者はない。安全目標なしに、安全確保活動やリスク管理をどのように計画・実施すれば良いだろうか。規制基準は限られた知識と制約に基づいて定めたものであるから、改善・進化させるべき余地は多いであろう。安全目標がなければ、何を拠り所として規制基準の改善を図れば良いだろうか。安全目標を持たずして、私たちは「うまくリスクを使える」ようになるのだろうか。

安全目標の構造(体系化された全体像)と役割を明確にする。そのために、まず、わが国における安全目標策定の経緯を振り返る。リスク情報を活用してさまざまな意思決定を行い原子力施設の安全性を向上していく活動を行うための意義と適用のプロセスを概説する。リスクをうまく使うため、安全目標は、どのような役割を果たすのか、安全目標がないとリスクをうまく使えないのか、このような文脈で議論を深めたい。

For Better Understanding of PRA – Guidance for Better Usage and Application of PRA (4); Current status of safety goal and future challenges : Akira Yamaguchi, Yoshiyuki Narumiya.

(2020年5月7日 受理)

■前回タイトル

第3回 外部ハザードについて考えるべきこと

II. 安全目標

1. わが国における安全目標の議論

わが国の安全目標に関する公的な検討は2001年、専門部会の設置に端を発し、その検討内容は2003年に「中間とりまとめ」¹⁾として公表された。その安全目標専門部会が提案した、定性的目標案と定量的目標案が以下である。

“定性的目標案：原子力利用活動に伴って放射線の放射や放射性物質の放散により公衆の健康被害が発生する可能性は、公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意には増加させない水準に抑制されるべきである”

“定量的目標案：原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである。また、原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによって生じ得るがんによる、施設からある範囲の距離にある公衆の個人の平均死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである”

専門部会は、安全目標は原子力利用活動を広く対象として定めるものとしながらも、安全目標をあらゆる原子力利用活動に同等に適用する事は当然とはしないとした。定量的安全目標は、主として原子力施設の安全確保活動の深さと広さを決めるために用いられるからである。したがって、原子力施設の種類ごとに、その施設に固有の重大な事故事象を選び、定量的目標に適合する事故事象の発生確率を性能目標として策定することになる。それぞれのリスクの特性やリスク評価技術の成熟度を見極めたのちに適用すると考えたのであり、安全目標と性能目標は強く関連するものの、本質的に特に普遍性という視点で異なっていると言える。

原子力発電所の性能目標は、2006年に示される²⁾。専門部会は、炉心損傷頻度(Core Damage Frequency: CDF)と格納容器機能喪失頻度(Containment Failure Frequency: CFF)をもって性能目標を構成することとした。原子力規制委員会(以下、規制委と記する)³⁾は、2014年に、専門部会の定めた安全目標をそのまま踏襲するとしたことに加え、「環境への影響をできるだけ小さくと定める」観点から、事故による放射性物質の放出量とその頻度に関する定量的な目標を、事故時のCs137の放出量が100 TBq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)、と整理した。残念ながら、当面は原子力発電所に限定するとし、安全目標を一般化して社会に問う活動は行われなかった。性能目標は表1のとおり提示されている。

安全目標と規制基準との関係については、2018年に原

表1 原子力発電所に固有の性能目標

炉心損傷頻度 (CDF: Core Damage Frequency)	10 ⁻⁴ /炉年程度
格納容器機能喪失頻度 (CFF: Containment Failure Frequency) :	10 ⁻⁵ /炉年程度
事故時のCs137の100 TBq放出頻度 Large Release Frequency	10 ⁻⁶ /年程度

子炉安全専門審査会および核燃料安全専門審査会⁴⁾は、「安全の目標は、福島第一原子力発電所事故のような重大な事故を再び起こさないとの決意の下、安全神話に陥ることなく、不断に安全性向上を図るとの姿勢に基づくものである。また安全の目標は、原子力規制委員会が規制基準の策定などに当たり参照すべきものである」との見解を示した。安全目標の活用については、安全リスクの抑制水準と安全の目標を確率という尺度のみで直接比較できないと述べるに止まり、残念ながらその後、踏み込んだ議論に進展することはなかった。

安全目標がこうして定められた経緯や、海外の状況については菅原ら⁵⁾、山口ら⁶⁾に詳しく述べてある。次節では、専門部会でなぜ安全目標を定めることとしたのかを踏まえ、今後の展望を考察する。

2. 安全目標が必要な理由

そもそも、安全目標を定めた理由はなんであったのか。専門部会は、「社会におけるさまざまな事業活動のなかには、非常に有益な成果をもたらすが、他方で周囲の人々の健康や社会・環境に影響を及ぼす潜在的危険性(リスク)を伴うものがある。(中略)事業のリスクに関する知見に基づき、効果的にリスクを抑制することが求められる。(中略)国は国民の安全を確保する責任から、その事業を行う者に対して国民のリスクを十分小さい水準に抑制する観点から適切なリスク管理活動を求める」と述べ、よって、安全目標が必要となると、専門部会設置の背景を説明する¹⁾。

このことから、3つのポイントを抽出できる。第一に、安全目標は遍く社会全体に適用されるということである。第二に、リスクを良く知ることなしに効果的なリスク抑制はできないということ、第三に、リスク管理活動の目的は国民のリスク水準を十分低くすることである。

第一の論点は、安全目標は原子力分野に閉じるものではないことを示唆している。もし、そうであれば、全ての活動で共有できる行為の安全目標を策定できるはずである。例えば、今現在、猛威を奮っているCOVID-19について、安全目標は何か。ウイルスによる疾患から生命と健康を守ることであろう。高位の目標は、原子力の放射能から国民の生命と健康を守ることと共通である。原子力の安全目標は、このようなパンデミックであれ、自然災害であれ、エネルギー危機であれ、同一の考え方で一般化できる普遍性を潜在的に有していることを知る必

要がある。

第二の論点は、定量的リスク評価の重要性である。リスク評価の役割は決してCDFやLERF(Large Early Release Frequency)の数字を出すことではない。原子炉の特徴、事故の特性、重要な現象を理解することである。リスクの特徴がわからなければ、適切な対策を取れない。しかし、完全に理解するのを待っているのは、リスク管理はできない。今わかっている知識で最善を尽くすのがリスク管理である。これもあらゆるリスク管理に通じる。そもそも、私たちが対象とするリスクは、極めて稀な、想定し難い事象であるのだから。完全なリスク評価は不可能である。リスク評価とは、その対象に対して私たちが知っていることと知らないことを列挙・峻別することであり、知識の現状の集大成がリスクモデルである。知識が増えるたびに改善していく。利用可能な知識を常に最新の状態に保つことが、継続的・自主的安全向上の意味である。

第三の論点は、国民のリスク抑制を最高位の目標に据えるべきということである。専門部会は、リスク水準については、「原子力安全規制活動によって達成し得るリスクの抑制水準として、確率論的なリスクの考え方をを用いて示す安全目標を定め安全規制活動等に関する判断に活用することが、一層効果的な安全確保活動を可能とするとの判断に至った」と述べている。リスクと安全目標が関連づけられ、リスク評価の役割も明確になった。

3. 安全目標は何に役立つのか

安全目標を定めるとどのような利益があるのだろうか。専門部会報告書は、次の三点を述べる。①規制活動に一層の透明性、予見性を与えると同時に、その内容をより効果的で効率的なものにすることができる、②原子力規制活動のあり方に関しての国と国民の意見交換を、より効果的かつ効率的に行うことを可能とする、③事業所のリスク管理活動をより効果的かつ効率的に実施することができる。

①はより良い規制活動のため、②は国民の理解醸成のため、③は事業者のリスク管理のためである。それらを効果的かつ効率的に実施するための安全目標なのである。安全目標は、規制者、国民、事業者のいずれにも利益がある。皮肉にも、このことが安全目標策定の中心となってリーダーシップを発揮する組織が現れないのかもしれない。

COVID-19のリスク抑制のため4月7日に緊急事態宣言が発出された。その結果、経済的影響が顕在化したことから、命を守るのか、経済を守るのかという議論を聞く。リスク抑制活動に透明性・予見性を与え、国民からわかりやすく、各事業主や個人の活動を効果的・効率的に実施するためには、国民の生命と健康を守るという安全目標を共有しなければならない。あわせて、その下

位目標である性能目標がないと、健康を守ることと経済を守ることの関係を整理できない。両者は二者択一ではなく、両立させるものである。原子力の関係者は、福島第一事故の教訓として、このことを身に染みて感じた。

4. 安全目標の将来に向けて

原子力の定量的安全目標は死亡リスクを指標としている。そこには、二つの本質的な問いかけが生じる。一つは、安全目標の構成要素は死亡リスクのみで良いのかということ、第二には、死亡リスクと日常的安全確保活動はどう関係するのだろうかということである。

国際原子力機関(IAEA)は2015年に福島第一原子力発電所の事故報告書⁷⁾を発表した。天野事務局長は巻頭言で、「発電所の設計、緊急時への備えと対応の制度、重大な事故への対策の計画などの点でも幾つかの弱点があった。原子力発電所においては、ごく短時間を超えた全電源喪失はあり得ないと想定されていた。同一施設で複数の原子炉が同時に危機に陥る可能性は想定されていなかった。また、大規模な自然災害と同時に原子力事故が発生する可能性に対する備えも不十分であった」と述べた。このことは、安全目標に新しい観点を加える必要性を示唆した。すなわち、複数基のシビアアクシデントによってもたらされる長期避難や土地汚染への備えである。

著者らは、福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、「健康リスク」に加え、「社会的リスク」を対象とした新たな定性的上位目標として以下を提案した⁷⁾。「放射線の放射や放射性物質の拡散により環境を害し、あるいは広範囲にわたる社会的混乱をもたらすリスクは、他の原因による事故や自然事象がもたらす同様のリスクの合計を有意に増加させない水準に抑制されるべきである」。

この目標は社会的リスクを上位目標として加えるべきとの規制委やIAEAの福島第一事故報告書と整合するものである。安全目標は、人と社会ならびに環境を守るためのリスクの抑制水準を示すものという認識である。これにつながる施設や技術の特徴を踏まえた性能目標の再構築が求められる。次に述べるIAEAの安全目標に関する提案と共通する考え方である。

実際の原子力施設の安全性向上のために実施される活動のためには、その深さと広さを指標で示すことができることが求められる。死亡リスクはそのままでは安全確保活動の判断には使い難いので、性能目標が必要になり、さらに実際の活動に具体化するためにさまざまなリスク指標の工夫が必要である。

IAEAのTECDOC-1874⁸⁾では階層化された安全目標を提示している(表2)。その理由は、①全ての安全事項を評価できる安全目標はないこと、②安全目標・性能目標の間の関係性を階層で示すことができること、としている。安全目標の階層化については、「頂上目標: Top Level」「上層目標: Upper Level」「中間目標: Intermediate

表2 安全目標の階層構造文献(参考資料8)を元に作成)

関係する範囲	レベル	目的	解説	技術との関係性
社会	Top Level 頂上目標 一義的な安全目標	人と環境を電離放射線の有害な影響から防護すること	IAEAのSF-1に示された基本的な安全の目的。 国あるいは規制機関が設定するもの。 社会規模のものであり技術には拠らないもの。	技術に依らない
発電所	Upper Level 上層目標 適切な防護	発電所の全ての設備の全ての状態における適切な防護を確保すること	下層の「中間目標」「下層の目標」へのつながりとなるもの。 通常、技術に依らず、発電所を対象とする。プラントの運転状態と事故状態の両方をカバーする。 例：社会一般におけるリスク、例えば他のエネルギー源の死亡リスク、との比較で表現するもの。	
	Intermediate Level 中間目標 一般的な安全対策	実証されたアプローチや良好事例に基づいた技術的対策と組織的対策を含む、適切な防護を確保するための一般的な安全対策を示すこと	より高い安全レベルを達成するために実証アプローチや良好事例の形成。 技術には拠らないが発電所全体に関するもの。 例： ・発電所全体のLERF (Large early release frequency) ・外部ハザードに対する発電所レベルでの能力	個別技術に依る
設備	Low Level 下層目標 個別の安全対策	発電所の個々の設備に対する、適切な防護を確保するための個別の安全対策を示すこと	発電所の個々の設備が上位の安全目標に合致するように貢献することを保障するために、技術的な個別設備の安全目標を制定すること。 例： ・確定論的安全目標：DBAでの被覆管最高温度制限値など ・CDF、LRF (Large release frequency) ・SSC (Structure, System, Component) の信頼性	

Level]「下層目標：Low Level」に分けられ、技術に特化しない汎用的なレベルから技術固有のレベルに展開される。4つの階層はそれぞれ上位のものに適合するように下位の目標が設定され、下層に向かって設備に係る活動に適用しやすくなる。「下層の目標」にはCDFだけでなく、個々のSSC(構造物、系統、設備)の信頼性や確定的な被覆管最高温度制限値も含まれる。これからわかるように、CDFは下層目標として最も意味あるものではあるが、リスク指標の一つであり、対象とする軽水炉に特有の目標であるとみなすこともできる。

階層化した安全目標体系の考え方は、安全目標を日々の安全確保活動に展開するプロセスを論理的に示している。専門部会で定めた安全目標と性能目標は、それぞれ、頂上目標から上層目標、中間目標から下層目標に相当することがわかる。リスク情報を日々の安全確保活動に具体化するには、下層目標のCDFだけでなく、システム信頼性などのリスク指標を用いて判断することとなる。

Ⅲ. リスク情報活用におけるリスク指標

1. リスク指標の種類

安全目標の階層における「下層目標」となるリスク指標は、リスク評価で得られる多様なパラメータを包含する概念である。立地、設計、運転の各局面においてプラントの安全性向上に資する活動に用いるリスク指標には不確実さが伴う。過酷事故や外部ハザードによる事象では、発生事象の頻度の不確実さも、事故シナリオの多様

表3 CDFに関する確率論的なリスク指標

	指標	説明
1	CDF: (Core Damage Frequency)	炉心損傷頻度
2	CDF(t): (CDF, time dependent)	時間依存 CDF
3	CDF _{AVE} : (Core Damage Frequency, annual average)	年間平均の炉心損傷頻度
4	ΔCDF _{AVE} : (Change in CDF, annual average)	年間平均 CDF の変化分
5	CCDP: (Conditional Core Damage Probability)	条件付き炉心損傷確率
6	ICCDP: (Incremental Conditional CDP)	条件付き炉心損傷確率の増分
7	RAW: (Risk Achievement Worth)	リスク増加価値
8	FV: (Fussell-Vesely)	FV 重要度

性の不確実さもある。専門部会が、確率論的な考え方をを用いるとした理由である。炉心損傷頻度を例にとり、関連するリスク指標を表3に示す。

2. リスク指標を用いた意思決定

意思決定には、判断基準が必要となる。求められる性能の定量表現である性能目標と判断基準とは整合が取れている必要がある。そこで、リスク指標の値と、ある活動を変更する前後のリスク指標の変化の関係をもって判断基準とするという考え方をとる。この考え方に立ったものが米国 NRC の R.G.1.174⁹⁾に示された許容ガイドラインであり、CDF と LERF をリスク指標としている。安全目標シンポジウム(2019年11月)¹⁰⁾にて、元 NRC 委員のアポストラキス氏は、米国には安全目標があったから R.G.1.174 の導入が可能であったと述懐した。原子力学会の、リスク情報を活用した統合的意思決定に関する

る実施基準¹¹⁾も同様な判定基準を提案する。

リスク指標は単一の指標で判断する場合だけでなく、複数の指標を併せて用いる場合もある。CDF の変化量とリスク重要度を用いる例として、保全プログラムの最適化について述べる。

保全計画および実施手順の評価、最適化および設定を、リスク情報を活用して変更する。プラントのリスクに大きな影響を及ぼす設備を対象とし、SSC の機能に関係のない保守作業は除外する。そこで、PRA で得られるリスク重要度(表3のRAWやFVなど)が、保守プロセスの変更の優先順位をつけるためのガイドとして使用される。CDF の変化量は、性能目標への影響を知り、リスク重要度を決定するために使用される。加えて、保全の場合には保守アンアベイラビリティのモデルと故障率(例えば、表2の下位目標の一つであるSSCの信頼性)が必要である。

リスク情報を活用したアプローチは、予防保全を継続して実施すべき設備の特定や、予防保全から事後保全に切り替える場合、リスクに寄与しない故障モードに関する保守を除外する場合、運転中保全に移行する場合などの判断への適用が考えられる。

IV. 今後の課題と総括

本稿では、専門部会(2003年)の報告書に始まり、最近のIAEAの報告書までを概観した。安全目標は未だ定着していないと言わざるを得ないが、安全目標が不可欠であることはご理解いただけたのではないか。また安全目標は、時とともに社会とともに変遷していくものであることも理解されたいと思う。

安全目標は国民のリスクの抑制水準を示すものである。国民のリスクとは、健康リスクと社会的リスクを含むとした。その抑制水準は、社会の他のリスクとの相対において定めるとした。すると、高位には一般性ある目標を据えるのが適切であり、原子力の安全目標は、社会の安全目標の一部をなすと考えられる。また、安全目標は全ての関係者に利益をもたらすものであるならば、それを社会に定着させる努力を払うことは自然であると思う。階層化した安全目標体系は、リスク評価を用いて安全確保活動を展開することを視野に入れており、うまく

リスクを使うために、役立つものである。

連載講座の第4回目として、安全目標について考察を行った。これを機にわが国においても安全目標の議論が活発になり、社会に存在するさまざまなリスクに対して適切な備えが行われることを期待したい。

－ 参考資料 －

- 1) 原子力安全委員会, 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.
- 2) 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設の性能目標について, 平成18年3月.
- 3) 安全目標に関し前回委員会(平成25年4月3日)までに議論された主な事項, 原子力規制庁, 平成25年4月10日.
- 4) 菅原, 稲村, わが国の原子力分野における安全目標の活用—2003年安全目標案の背景とその実際から学ぶ—, 電力中央研究所報告: Y15016, (2016).
- 5) 山口, 竹内, 菅原, 「安全目標」再考—なぜ安全目標を必要とするのか?—, 東京大学弥生研究会, 安全目標に関する研究会, UTNL-R-497, 2018年3月.
- 6) The Fukushima Daiichi Accident, IAEA, (2015).
- 7) 山口, 菅原, 佐治, 「安全目標」再考 わが国でのあり方を問う, 日本原子力学会誌, Vol.62, No.3 (2020).
- 8) IAEA, "Hierarchical Structure of Safety Goals for Nuclear Installations", IAEA-TECDOC-1874, (2019).
- 9) USNRC, "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis, Regulatory Guide 1.174, Revision 3", (2018).
- 10) 安全目標シンポジウム—Pt2, 日本原子力学会リスク部会, <http://risk-div-aesj.sakura.ne.jp/seminar.html>
- 11) 日本原子力学会, "原子力発電所の継続的な安全性向上のためのリスク情報を活用した統合的意思決定に関する実施基準: 2019" (発行準備中).

著者紹介



山口 彰 (やまぐち・あきら)
東京大学大学院工学研究科
(専門分野/関心分野)原子力工学, 安全工学,
リスク学

成宮祥介 (なるみや・よしゆき)

本誌, 62[8], p.42(2020)参照.

報告

失敗を許す社会へ

東京都立大学 松井 亮太

事故や不祥事を起こした組織は社会から強く批判されるが、批判には逆機能があることも知られている。失敗した個人を批判しない免責の仕組みは、すでに航空業界や原子力業界などで取り入れられているものの、事故原因の複雑化に伴い、個人の免責だけでは不十分となる可能性がある。そこで本報では、個人だけでなく組織を免責するアプローチの必要性や留意事項などについて議論した。

KEYWORDS: *failure, blame, no-blame, immunity, person approach, system approach, nuclear safety.*

“過ちは人の常、許すは神の業”

アレキサンダー・ポープ

I. 失敗の批判

原子力業界に限らず、深刻な失敗(事故や不祥事)が起きますと、社会はその失敗を犯した個人や組織を強く批判する傾向がある。

批判という行為は、大きく2通りの見方が可能と考えられる。1つ目は、批判を制裁と見なして、社会に役立つ行為と位置付ける功利主義的な視点である。この場合、批判は受け手にとって不快なものであるため、人は批判を受けるような行為を自ずと避けるようになり、結果として失敗の抑制が期待できる¹⁾。

2つ目は、社会心理的な視点である。何か重大な失敗が起きますと、失敗した人を過度に批判してしまう心理現象は「スケープゴート現象」として知られている。スケープゴート(scapegoat: 生贄のヤギ)という言葉は、古代の贖罪の日に行われていたユダヤ人の儀式に由来するものであり、人間の罪を背負わされたヤギを荒野に放つことで、人々は罪の意識から解放され、気が楽になったのである。それと同様に、大きな事故や災害が起きますと、「これは人災だ」と主張して罪を一部の人々に背負わせることで、大衆はフラストレーションを解消しようとする²⁾。

一方、批判には弊害があることもよく知られている。例えば、人々のエネルギーと労力が失敗の責任者(ら)を特定することに費やされ、システム的要因の分析や是正が疎かになりがちである。また、過度な批判を恐れて当事者が情報を隠すようになり、失敗から得られる教訓の学習が不十分になる可能性もある。

そのようななか、組織内の無批判アプローチに対する関心が高まっており、いくつかの実証研究によって、失敗した個人を批判する組織よりも批判しない組織の方が組織学習やパフォーマンスの点で優れることが示されている。

日本の原子力業界においても、組織レベルで無批判アプローチ(失敗した個人を批判しない)の取り組みがすでに行われているが、本報では無批判アプローチの拡張の可能性について議論する。

II. 失敗に対する2つのアプローチ

リーズンによれば、失敗(事故など)が起きた後の対処アプローチは「個人アプローチ」(person approach)と「システムアプローチ」(system approach)の2種類に分けられる³⁾。

個人アプローチでは、当事者の問題(不注意や怠慢など)によって失敗が発生すると考える。個人アプローチの場合、事故を起こした責任者を探して、失敗した人々の批判や再訓練などにより再発防止を図る。

個人アプローチの代表的な事故モデルとしては、ハインリッヒのドミノモデル(図1)が知られている。ドミノモデルでは事故のシーケンスを5個のドミノとして捉え、第1のドミノが倒れると、その隣のドミノも連続して倒れ、最終的に傷害に至ると考える。ハインリッヒのモデルの特徴は、最も簡単かつ効果的に取り除けるドミノは「(人の)不安全行動・状態」を表す3番目のドミノと主張した点にある⁴⁾。このドミノモデルの考え方は、その後の事故調査・研究に大きな影響を及ぼし、事故調査員や研究者らが「人の不安全行動(ヒューマンエラー)」を探すようになったとされる。ドミノモデルは実際の事故の説明モデルとしては単純すぎるとの批判も寄せられているが、事故研究の理論的枠組みを初めて提唱した重要

Toward a Society that Allows Failure : Ryota Matsui.

(2020年5月14日 受理)

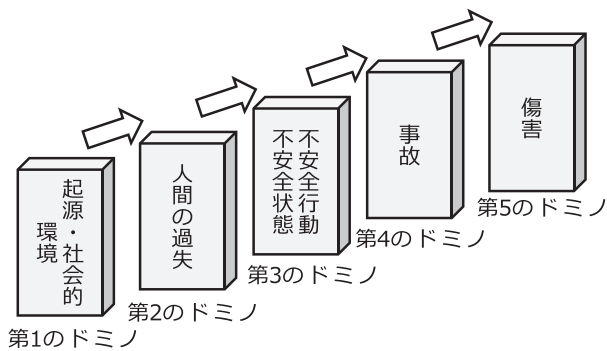


図1 ドミノモデル

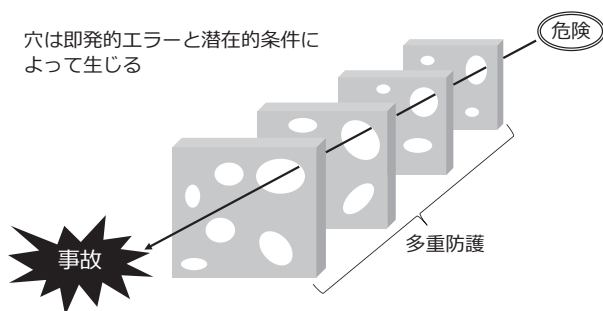
[出所]Heinrich et al. (1980)⁵⁾, 柚原・氏田 (2015)⁴⁾.

図2 スイスチーズモデル

[出所]Reason (2000)³⁾.

なモデルとして位置付けられている。

一方、システムアプローチでは、「最善の組織であっても、人は過ちを犯し、失敗は起きる」との前提を置く。そして、失敗は人々の邪念から生まれるものではなく、システムの要因によって起きると考える。システムアプローチの場合、事故を起こした責任者を批判するのではなく、多重防護システムが破られた原因を分析して是正する。

システムアプローチの代表的な事故モデルとしては、リーズンのスイスチーズモデル(図2)があるⁱ⁾。多重防護を講じていても、各層にはスイスチーズのような穴(欠陥)が多数存在する。これらの穴は「即発的エラー」または「潜在的条件下」によって生じる。即発的エラーは、現場やシステムに直接関与している人々が犯す不安全行動(ヒューマンエラー)のことである。他方、潜在的条件下は、設計者や手順策定者、トップマネジメントなどの意思決定によって生じる欠陥であり、システム内に長年眠ったまま潜伏するため「常在病原体」とも呼ばれる。たいていは1つの層に欠陥があっても他の層で防護されるため事故は顕在化しないが、即発的エラーと潜在的条件下が組み合わせられ、欠陥(穴)が一直線につながったときに事故が発生する。

ⁱ⁾ 一部の安全研究者らは、スイスチーズモデルはシステムアプローチモデルではないと批判している⁶⁾。スイスチーズモデルは疫学的モデル(epidemiological model)とも呼ばれる。

III. 批判の逆機能と免責

失敗した人々を批判する個人アプローチと異なり、システムアプローチでは個人を批判せずにシステムの要因の分析・是正を目指す。その背景には、「個人を批判しても、失敗は減らない」との信念がある。

批判によって失敗が減るかどうか検証した代表的な研究として、ハーバード・ビジネススクールのエドモンドソンの研究がある⁷⁾。エドモンドソンは、懲罰志向の組織文化が失敗(投薬ミス)に及ぼす影響を調べるために、大学病院の8つの看護チームを対象とした調査を行った。8つの看護チームは、技術や専門性、業務量などの点で大きな違いはなかったが、失敗後の対処方法(失敗したメンバーに対する批判の強弱)はそれぞれ異なっていた。調査の結果、失敗したメンバーに対する批判が強いチームでは失敗の報告件数は少なかったが、それはメンバーが批判を恐れて報告しなかっただけであった。分析結果を踏まえてエドモンドソンは、失敗を強く批判するチームよりも失敗を批判しないチームの方が失敗からの学習機会が多くなり、パフォーマンスは高くなる(実際の失敗発生件数は減る)と述べている。

また、失敗した個人を批判しない制度として、米国航空業界の取り組みもよく知られている。米国では、1975年に開始された航空安全報告システム(Aviation Safety Reporting System: ASRS)により航空業界の安全性が大きく向上した。ASRSの大きな特徴は、パイロットがエラー(ニアミス)を10日以内に報告すれば処罰しないという「免責」(immunity)の仕組みにあるⁱⁱ⁾。このような免責制度が必要とされる理由は、失敗した当事者を過度に批判するような環境では、誰も失敗を自主的に報告なくなり、結果として組織や業界が失敗から学習する機会を失うことにつながるためである⁸⁾。

IV. 狭義と広義のシステムアプローチ

「システム」(system)という用語の使われ方は、システムに携わっている人によってさまざまである⁹⁾。これまでシステム論はさまざまな研究者によって広範な議論が展開されてきたのであるが、一般的にシステムという用語は、一群の要素が互いに連結し1つの全体を形成しているという考えを表現するものとして用いられる。そして、システムという概念を用いて思考することを「システム思考」、視野を広くとり要素間の相互作用に焦点を合わせるアプローチ(問題への取り組み方)を「システムアプローチ」と呼ぶ¹⁰⁾。

図3に示すように、対象となるシステムが完全に閉じた性質でない限り、システムの領域は同心円状に無限に

ⁱⁱ⁾ 「故意や犯罪によるものではないこと」「法律で規定された資格や能力違反によるものではないこと」などの条件を満たした場合に限る。

表1 3つのアプローチの比較

	個人アプローチ	狭義のシステムアプローチ	広義のシステムアプローチ
分析レベル	個人レベル	組織レベル*	社会レベル**
事故原因	個人的要因	組織的要因*	社会的要因**
事故モデル	ドミノモデル	スイスチーズモデル*	創発的事故モデル**
事故後の対応	個人的要因の是正	組織的要因の是正*	社会的要因の是正**
個人の批判	あり	なし	なし
組織の批判	あり	あり	なし

* 個人レベルの要因を含む。

** 個人および組織レベルの要因を含む。



図3 システムの領域

広がることになる。どこまでの領域をシステムとして認識するかは、対象の性質によって決まるものではなく、研究者らが「何を、どこまで知りたいのか」という研究目的に依存する⁹⁾。

リーズンの組織事故研究では組織的要因によって事故が起きると仮定しているため、リーズンのシステムアプローチの対象システムは図3の領域1に該当すると考えられる。しかし、社会の複雑化に伴い事故原因も複雑化し、従来の「個人的要因」(ヒューマンエラー、違反など)や「組織的要因」(マネジメント、安全文化など)ではなく「組織間要因」が事故の主たる発生源になると考えられている⁴⁾。この場合、リーズンのようにシステムの対象を組織に限定したシステムアプローチでは不十分であり、システムの領域をさらに広くとって、業界内の各プレイヤー同士および社会との相互作用を見る必要がある。

以下では、組織的要因に着目する従来型のシステムアプローチを「狭義のシステムアプローチ」、システムの対象を社会にまで広げるシステムアプローチを「広義のシステムアプローチ」と称して議論を進める。

スイスチーズモデルのような狭義のシステムアプローチでは、組織的な欠陥(穴)によって多重防護が破られて事故に至ると考える。そのため、事故の防止方法は、多重防護を物理的に厚くしたり、組織内で安全文化を醸成して各層の欠陥を小さくすることなどに主眼を置く。

一方、広義のシステムアプローチでは、何らかの欠陥によって事故が起きるのではなく、要素間の相互作用(例えば組織間関係の問題)によって事故が起きると考える。これは、欧米の安全研究者らの間で関心が高まっている創発的事故モデルⁱⁱⁱ⁾の考え方と一致する⁶⁾。

表1は「個人アプローチ」「狭義のシステムアプローチ」

「広義のシステムアプローチ」をそれぞれ比較したものである。個人アプローチでは、事故原因を個人レベルの失敗と捉えて、事故後は失敗した当事者を強く批判し、個人的要因の是正を図る。また、社会は個人だけでなく組織も批判する。

狭義のシステムアプローチでは、事故原因を組織的要因と捉える。この場合、組織は個人を批判せず、組織的要因の是正を図る。しかし、そのような組織的要因を放置して事故を起こした組織は社会から批判される。

広義のシステムアプローチでは、事故原因を社会的要因(組織間または社会との相互作用)と捉える。この場合、一概に当事者組織だけに非があるとは言えないため、個人および組織を批判するのではなく、社会レベルで問題点の分析および是正が必要となる。

なお、表1はあくまで基本的な概念として3つのアプローチを示したものであり、実際には明確に分類できない場合も存在すると考えられる。例えば、スイスチーズモデルに関しては、システム安全研究者らの間で創発的事故モデルではない(要素間の相互作用を考慮していない)との考えが支配的になりつつあることから、表1では狭義のシステムアプローチとして分類したが、リーズン自身は相互作用を考慮していると反論しているため、広義のシステムアプローチと見なすことも可能と思われる。また、システムの対象範囲が狭い場合でも、要素間の相互作用による創発現象は起こり得る。

図4は、3つのアプローチにおける失敗(事故)後のプロセスを示している。個人アプローチでは、失敗が発生すると組織および社会は当事者を批判するため、当事者は批判を恐れて情報を隠す。その結果、組織は失敗からの教訓を十分に学習することができず、組織的要因が是正されないため、同じような失敗が再び起きる可能性がある。

狭義のシステムアプローチでは、組織は失敗を犯した当事者を批判しないが、社会が組織を批判するため、組織は批判を恐れて情報を隠す。その結果、社会が失敗か

ⁱⁱⁱ 創発(emergence)とは、システムの構成要素を個別に見ただけでは知ることができない全体的な特性を意味する。創発的事故モデルでは、正常な要素同士であっても、それらの予期せぬ相互作用によって事故が起きると考える。

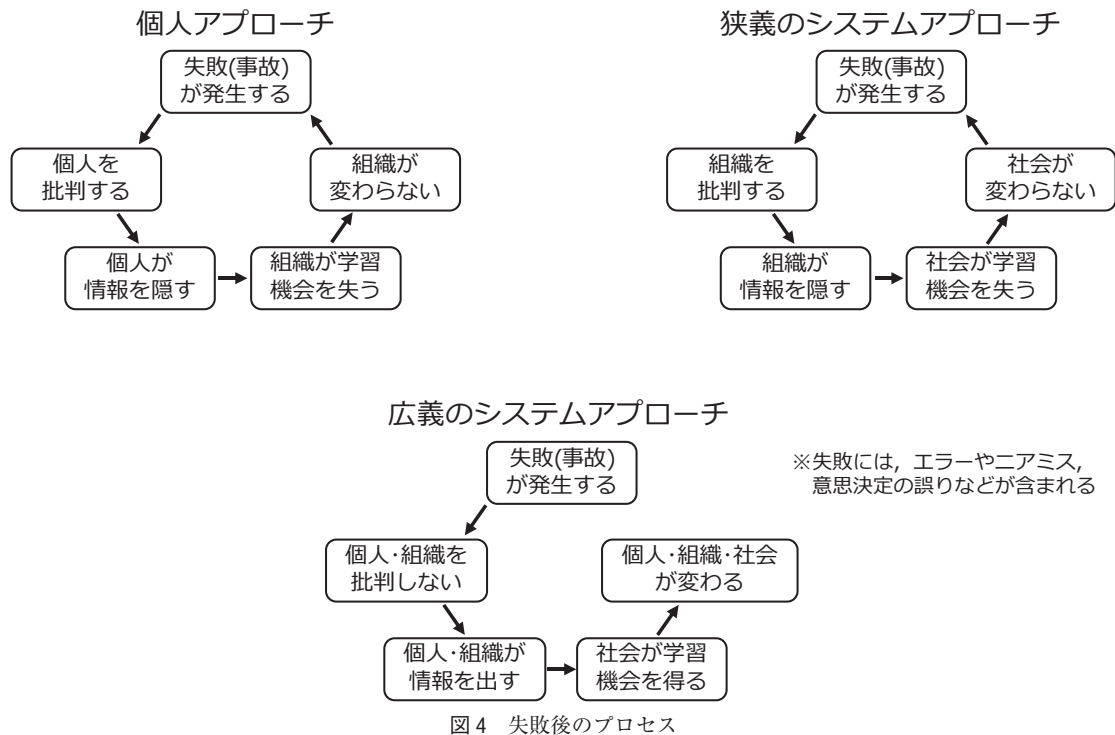


図4 失敗後のプロセス

らの教訓を十分に学習することができず、社会的要因が是正されないため、同じような失敗が再び起きる可能性がある。

本報で提案する広義のシステムアプローチでは、失敗が発生しても個人と組織は批判されない(ただし、悪質な行為を除く)。個人と組織は批判を恐れずに積極的に情報を出すため、社会レベルで失敗からの教訓を深く学習することができる。その結果、個人的要因と組織的要因だけでなく社会的要因も是正され、同じような失敗を防止できる。

V. 失敗を許す社会へ

筆者が広義のシステムアプローチ(失敗した組織を批判しないアプローチ)の必要性について考えるようになったのは、これまで進めてきた福島第一事故政府事故調査委員会のヒアリング記録(調書)の研究がきっかけである。

公式事故調査報告書(政府事故調や国会事故調など)や各種報道においては、東京電力や保安院などの原子力関係者の問題が強く批判されてきたが、筆者は調書の分析を通じて、原子力関係者の問題を是正するだけでは福島第一事故からの教訓の学習は不十分だと考えている。日本の原子力発電所で津波想定やアクシデントマネジメント(AM)の対応が遅れた問題は、原子力関係者に大きな責任があることは論を俟たないが、社会の厳しい反応を恐れて原子力関係者がリスク情報を積極的に出せなかったことも遠因の1つであった。

例えば、鈴木篤之氏(元原子力安全委員長)は調書で以下のように発言している。

AMにしても津波にしても、地元優先という日本的な現実がどうしても存在する。最初に地元に原子力発電所を建てたいと説明してから地元が了解するまで10年は掛かる。しかし、その了解されるまでの間にも技術が進歩し、それを反映しようとする、最初に言ったのと話が違うということになり変えられない。だから、本当は建設時点での最新技術を使いたいのに、日本では必ずしもそのように出来ない。…日本はあまりにも社会的な関わり合いに神経を使わないと物事がうまく進まないが、本当に原子力安全問題は実体的に安全が向上するように是非なって欲しいと思う。【傍点筆者】

1990年代から2000年代にかけて津波やAMに関する知見は高度化していたが、それらの新しい知見を安全対策に取り入れるためには、過去の知見や意思決定が不十分であったこと(すなわち、過去の失敗)を認めなくてはならない。しかし、社会は原子力関係者が主体的に過去の失敗を認めて是正することを好意的に受け止めるのではなく、むしろ明るみになった失敗を批判するという姿勢であった^{iv}。そのため、原子力関係者は事故リスクに関する新たな情報を積極的に出して自発的に安全性を

^{iv} 鈴木篤之氏は調書で「訴訟の時にも、過去の設計に基づく安全性が十分であったかどうかが争点になる。指針に新たに入れると、入れていなかった時点での設計が脆弱であると受け取られ、訴訟に波及してしまう。だから、津波について新たに指針に入れることには、反対していた人が多いと思う」と述べている。

高めることが難しい状況に置かれていた。

このような問題を繰り返さないためには、原子力関係者が失敗や過ちを主体的に発言できる環境を整える必要があり、その実現には、社会が原子力関係者の失敗を許す「社会的免責」が不可欠と考えられる。

しかし、原子力関係者の失敗を強く批判するという社会の姿勢は、福島第一事故後にますます強まっており、原子力発電所で何らかのトラブルが起きれば(悪質な行為によるものではないとしても)、マスメディアなどで大々的に批判されている。それは、原子力発電所が有するリスクの大きさを考慮すれば当然の反応かもしれないが、エドモンドソンの実証研究などで明らかにされているとおり、失敗の批判には逆機能があることも忘れてはならない。福島第一事故の教訓を未来にいかすためには、原子力関係者が変わるだけでなく、社会にも変わるべき要素があるのではないだろうか。

ただし、ASRSで悪質な行為は免責の対象外とされているのと同様に、いかなる失敗も無条件で免責すべきということには当然ならない。また、免責は「モラルハザードが起きる」「被害者が心情的に受け入れられない」などの問題点も指摘されており、社会的免責を導入するためには解決しなければならない課題も多い。

これまで「組織が個人を批判しない」という個人レベルの免責については活発な議論が展開されてきたのに対して、本報で提案した「社会が組織を批判しない」という社会的免責の必要性はあまり注目されてこなかったため、その適用範囲やメリット・デメリットなどについてさらに議論を深めていくことが望まれる。

－ 参考資料 －

- 1) Lupton, B., & Warren, R. (2018). Managing without blame? Insights from the philosophy of blame. *Journal of Business Ethics*, 152 (1), 41-52.
- 2) 釘原直樹 (2011). 『グループ・ダイナミックス：集団と群集の心理学』有斐閣.
- 3) Reason, J. (2000). Human error: Models and management. *British Medical Journal*, 320, 768-770.
- 4) 柚原直弘・氏田博士 (2015). 『システム安全学：文理融合の新たな専門知』海文堂.
- 5) Heinrich, H., Petersen, D., & Roos, N. (1980). *Industrial accident prevention: A safety management approach*. McGraw-Hill (井上威基監訳『ハインリッヒ産業災害防止論』海文堂, 1982年).
- 6) Dekker, S. (2011). *Drift into failure: From hunting broken components to understanding complex systems*. Ashgate Publishing Co.
- 7) Edmondson, A. C. (2004). Learning from mistakes is easier said than done: Group and organizational influences on the detection and correction of human error. *The Journal of Applied Behavioral Science*, 40 (1), 66-90.
- 8) Syed, M. (2015). *Black box thinking: The surprising truth about success*. Hachette (有枝春訳『失敗の科学：失敗から学習する組織、学習できない組織』ディスカヴァー・トゥエンティワン, 2016年).
- 9) 五百井清右衛門・平野雅章・黒須誠治 (1997). 『システム思考とシステム技術』白桃書房.
- 10) Checkland, P. B. (1981). *Systems thinking, systems practice*. Wiley (飯島淳一訳『新しいシステムアプローチ』オーム社, 1985年).

著者紹介

松井亮太 (まつい・りょうた)

東京都立大学大学院社会科学部研究科

(専門分野/関心分野)意思決定, 行動科学, 集団心理, 組織間関係, 組織事故

報告

原子力人材育成ネットワーク活動の国際展開 —IAEA の国内ネットワーク構築プロジェクト支援—

原子力国際協力センター 山下 清信, 鳥羽 晃夫,
国際原子力機関 中園 雅巳

IAEA は、パイロットプロジェクトとして、加盟国における原子力人材育成・知識管理 (HRKD) 国内ネットワークの構築を支援している。当該支援のもと、トルコおよびマレーシアは HRKD 国内ネットワークを構築した。両国は、同ネットワークを活用し初等中等教育、高等教育および社会人の原子力人材育成をすすめている。日本の原子力人材育成ネットワークは、同活動を以前から IAEA に提案し、日本の経験を積極的に提供してきた。IAEA は、これらパイロット国のネットワーク構築経験を提供し IAEA 加盟国の原子力人材育成の持続的発展を強化しようとしている。

KEYWORDS: JN-HRD.Net, IAEA, Nuclear HRD national network, HRKD, HRD +

I. はじめに

産官学の原子力人材育成機関が参加する「日本の原子力人材育成ネットワーク¹⁾ (以下、JN-HRD ネットワーク)」は、教育・訓練施設や指導人材、教材等の教育資源の利用について連携しあうことで、人材育成の基盤強化を図ることを目的として、2010 年 11 月より活動している。参加機関は、大学、高専、学会、研究機関、電力、メーカ、地域拠点、省庁等を含め 83 機関にのぼる。原子力人材育成ネットワーク体制を図 1 に示す。

IAEA は、原子力発電新規導入国の求めに応じて、原子力人材育成の支援を行っているが、当該国の原子力関係組織(大学、研究機関、企業、国等)が教育訓練について持続的に協力する仕組み作りが重要であるとして、人材育成と知識管理(HRKD: Human Resource and Knowledge Development)の国内ネットワーク構築を 2016 年より進めている。これに対して JN-HRD ネットワークは、日本の経験を提供し IAEA のプロジェクトに積極的に貢献してきた。ここでは、日本の IAEA プロジェクトへの支援、トルコおよびマレーシアの HRKD 国内ネットワークの構築、今後の展望を報告する。

II. IAEA 国内ネットワーク構築プロジェクト

2018 年 9 月の IAEA 総会の本決議は、大学、産業界、

International deployment of nuclear human resource development network activities ; IAEA project support for national network establishment : Kiyonobu Yamashita, Masashi Nakazono, Akio Toba.

(2020 年 6 月 15 日 受理)

研究所、政府機関の相互協力が人材育成に有益であること、HRKD 国内ネットワークがこれを促進する上で重要な役割を果たすことを認識しているとしている。更には、先進国の既存のネットワークの支援をうけ、IAEA 加盟国が HRKD 国内ネットワークを構築することを奨励するとある。この決議に先立ち、IAEA の知識管理課は、その有効性を認識し 2016 年 5 月に HRKD 国内ネットワーク構築プロジェクトの第 1 回専門家会議をウィーンで開催した。同プロジェクトは、パイロットプロジェクト方式をとり、少数のパイロット国で HRKD 国内ネットワークの構築を試行し、そこで得られた知見、経験をもとに他の加盟国に普及することとした。パイロット国として、トルコ、マレーシア、ポーランド、南アフリカを選び、これまで、トルコおよびマレーシアで HRKD 国内ネットワークが構築された。日本はリーダー的立場で本プロジェクトに参加し、以前からのネットワーク活動経験をこれらパイロット国に提供して IAEA

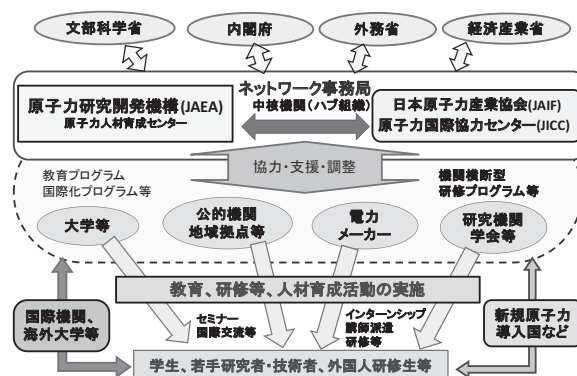


図1 原子力人材育成ネットワークの体制

を支援してきた。これまで、3回の専門家会議、5回の専門家派遣ミッションが開催された。

Ⅲ. HRKD 国内ネットワークの新規構築国

1. トルコ

トルコは、エネルギー需要の急増対応のために2030年までに3つの原子力発電所、計12基の原子力発電プラントを設置する計画をもち、発電量の25%を原子力で発電するとしている²⁾。エネルギー天然資源省(MENR)の中にある原子力エネルギー国際プロジェクト総局(NUP)は、原子力発電所プロジェクトや、原子力発電導入の長期ロードマップおよび人材育成に関する戦略を担当している。

2017年3月にアンカラでHRKD国内ネットワークの構築のための専門家派遣ミッションが行われ、IAEA、日本およびマレーシアならびにトルコの原子力発電所プログラムに関係する12組織の代表者が参加した。日本は、JN-HRDネットワークの構造、活動に関する情報を提供した。会議後、MENR上層部がHRKD国内ネットワークの設立を直ちに承認し、NUPをネットワークの事務局とした。この専門家派遣ミッションに先立ち、日本は、トルコでの原子力人材育成でのリーダー的立場にあるSule Ergun教授(ハセテペ大学)を2016年2月のJN-HRDネットワーク報告会に招待しネットワーク活動を直接見ていただいた。原子力発電導入を目指す開発途上国の基盤整備を支援する原子力国際協力センター(JICC)は、2016年3月にMENRを訪問しネットワークが人材育成に効率的かつ効果的であることを説明した。

2017年4月12日にアンカラで初会合が開催され、HRKD国内ネットワークの構造、規則、参加機関、解決すべき主要な課題について話し合われた(図2)³⁾。同会議で、正式名をトルコ原子力HRKDネットワーク(Turkey Nuclear Human Resources and Knowledge Development Network)とした。

トルコ原子力HRKDネットワークの構造は、運営委員会(SC)、ワーキンググループ(WG)および事務局から構成する。SCは、ネットワークの最高意思決定機関であり、基本的な活動方針を決定し、年間作業計画を調整する。WGは、特定の課題を調査し、その課題解決を担当する。現在、6つのWGが設置され、その活動は、原子力発電のみに限定している。各WGの課題を以下に



図2 トルコ原子力HRKDネットワークの初会合³⁾

示す。

- WG-1：原子力部門における資格と教育ニーズの調査
- WG-2：原子力部門の中級スタッフの教育訓練方法開発
- WG-3：高等教育レベルでの原子力工学教育の開発
- WG-4：国家機関の原子力工学関係職員の強化
- WG-5：海外で働く専門家を国内の原子力部門に雇用
- WG-6：原子力エネルギーの国民理解の拡大

同ネットワークへの参加機関は、省庁(MENR、国家教育省、工業技術省)、政府関係機関(原子力規制庁、トルコ原子力庁、高等教育評議会、アンカラ工業会議所等)、政府所有企業(国営発電会社インターナショナルICC)、非政府組織(放射線防護協会、原子力産業協会等)、大学(ハセテペ大学、イスタンブール工科大学等)、原子力発電所運転会社(アックユ原子力JSC)等である。

設立後の主な成果を以下に示す⁴⁾。

- ① NPPの建設、運用、保守のための技術者ニーズを満たすために、ハセテペ大学で2年間の原子力技術に関する専門教育プログラムを開始させた。
- ② トルコ人学生(250人)が、外国大学院卒業後、原子力プログラムに関連する主要な政府および政府所有の機関で働くことを前提とする奨学金プログラムを国家教育省に提案し実現した。

トルコは、利害関係者を集めることによって、情報を容易に共有し、正確なニーズを特定し、問題に迅速に対応できることから、HRKD国内ネットワーク活動を強化していく予定である。

2. マレーシア

マレーシアは、2010年3月の経済変革プログラムで、2022年までに1,000 MWe級原子力発電プラント2基の運転開始を計画した。この計画に基づいて、政府は、原子力発電導入のための法整備、世論調査、原子力エネルギー戦略の策定等の業務を専任で進める機関(NEPIO)として、2011年1月にマレーシア原子力発電導入推進公社(MNPC: Malaysia Nuclear Power Corporation)を設立した⁵⁾。

2017年9月にマレーシアでHRKD国内ネットワークの構築のためのIAEAの専門家派遣ミッションが開催され、IAEA、日本およびトルコからの専門家ならびにマレーシアの原子力発電導入プログラム関連組織の代表者が本会議に参加した。会議では、日本およびトルコの専門家が、自国のHRKD国内ネットワークの構造、活動に関する情報を提供した。この専門家派遣ミッションに先立ち、日本はMNPCの原子力人材育成担当者をJN-HRDネットワーク報告会に招待しネットワーク活動を視察する機会を提供した。MNPCは、2018年1月に初会合を開催し、解決すべき主要な問題を決定した。また、正式名をMalaysia Nuclear Energy Human Capital and Knowledge Development (MyNE-HCKD)

Network とした(図3)⁶⁾。MyNE-HCKD ネットワークの設立の目的は、人的資本の開発と原子力エネルギーに関する知識管理を促進強化するための協議の場とした。同ネットワークは、運営委員会(SC)および事務局から構成された。SCは、参加する省庁、政府機関、政府関係機関、および高等教育機関からの代表者からなり、人材育成ロードマップと年次作業計画、およびネットワーク活動の調整を行う。MNPCは、NEPIOとして20名程度の専属専門家を有していることから、特定のWGを設置せず必要に応じてこれら専属専門家がタスクフォースを設け、その結果をまとめSCに報告する体制をとった。事務局はMNPCが担当した。参加機関は下記のとおりである。

省庁(首相府直下の経済計画ユニット、エネルギー環境技術水資源省、科学技術省、高等教育省、教育省、人的資源省等)、政府関係機関(MNPC、マレーシア原子力庁、原子力規制庁)、大学(マレーシア工科大学、マラヤ大学、ケバンサーンマレーシア大学等、計24大学)、発電会社(国家電力公社(Tenaga Nasional Berhad)) (以上、二つ前の政権時代の名称)

MyNE-HCKD ネットワークは以下の成果を挙げた⁷⁾。

- ① 工学系大学と海外機関との覚書締結をすすめ、大学生が海外の原子力発電所ベンダーから産業訓練、大学院奨学金、原子力発電所見学の機会を得られるようにした。その他、海外の機関による原子力工学の短期コースの国内での開催を支援した。
- ② 原子力関係機関の職員に海外の原子力施設視察の機会を提供し、社会人レベルの職員に海外大学院留学の奨学金取得を支援した。
- ③ 初等および中等教育で、科学技術工学数学(STEM)推進活動の一環として原子力教育プログラムを組み入れることを教育省に提案した。

MyNE-HCKD ネットワーク設立後、2018年5月の第14回総選挙で新政府が誕生した。新政府下では、原子力発電は発電のオプションとは見なされず、MNPCは2019年10月に解散した。現在は、マレーシア原子力庁

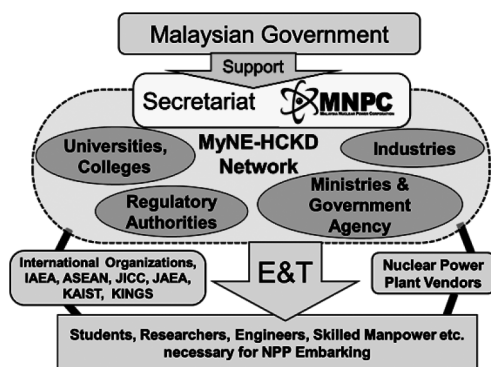


図3 マレーシア MyNE-HCKD ネットワーク

がMyNE-HCKD ネットワークの事務局を引き継ぎ原子力の科学技術への利用促進に活用することを検討している。

IV. おわりに

IAEAのHRKD国内ネットワーク構築プロジェクトのもと、トルコおよびマレーシアはネットワークを国内に構築し、初等中等教育、高等教育および社会人の原子力人材育成を効果的かつ効率的にすすめた。日本のJN-HRDネットワークは、豊富な活動経験を提供し本プロジェクトを積極的に支援してきた。今後、IAEAは、本プロジェクトを他の加盟国にも広げ持続的な原子力人材育成を支援しようとしている。IAEAが進めるHRKD国内ネットワーク構築プロジェクトを支援することは、国際貢献であり、更にこの活動を通し新規原子力発電導入国の関係者と交流を深め信頼を高めることが出来る。このことから、引き続き本プロジェクトを支援していきたい。

－ 参考資料 －

- 1) <https://jn-hrd-n.jaea.go.jp/>
- 2) 原子力年鑑2018；トルコ、270pp.(2018).
- 3) Sari Salih; Status and Activities of National Nuclear HRKD Network in Turkey, IAEA Expert Mission, Tokyo, (2019).
- 4) Sari Salih ; Private Communication.
- 5) 原子力年鑑2018；マレーシア、236pp. (2018).
- 6) MNPC; Development of A Human Capital& Knowledge Development (Hckd) Network in a Preparatory Stage for Nuclear Power Development In Malaysia, IAEA Expert Mission Tokyo, (2019).
- 7) Ibrahim Jamal Khaer; Private communication.

著者紹介



山下清信 (やましたき・よのぶ)

原子力国際協力センター

(専門分野/関心分野) 原子力発電新規導入国への基盤整備協力、原子力理解活動



中園雅巳 (なかぞの・まさし)

国際原子力機関

(専門分野/関心分野) エネルギー政策、原子力知識管理

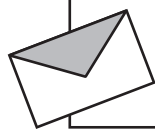


鳥羽晃夫 (とば・あきお)

原子力国際協力センター

(専門分野/関心分野) 原子力発電新規導入国への基盤整備協力

理事会だより



2020 年度(令和 2 年)新たな体制で活動開始

新役員の選任

令和 2 年 6 月 19 日に開催された第 10 回総会において、新役員 10 名(理事 9 名、監事 1 名)が選任され、留任・再任役員 10 名と合わせて 20 名の新体制で活動を開始いたしました。

総会当日に新体制にて第 1 回理事会を開催し、会長・副会長を選出するとともに、各役員の担当を決定いたしました。各役員の担当業務は下記の通りです。

役 職	氏 名	所 属
会長(福島連絡会、支部)	中島 健	京大
副会長(学術、国際)	山口 彰	東大
副会長(ダイバ、経営改善)	藤沢義隆	中部電力
副会長(YGN、廃炉)	中山真一	JAEA
理事(編集、国際、フェロー)	伊藤主税	JAEA
理事(教育、学術、YGN)	宇埜正美	福井大
理事(財務、標準、企画)	川村愼一	日立 GE
理事(企画、教育)	佐治悦郎	MHI NS
理事(編集、標準、総務)	佐相邦英	電中研
理事(財務、経営改善、福島)	三倉通孝	東芝
理事(支部、YGN、部会)	澤 和弘	北大
理事(総務、倫理、支部)	高木宏彰	関西電力
理事(部会、会員、広報)	千葉 敏	東工大
理事(広報、倫理、ダイバ)	土田昭司	関西大
理事(福島、企画、廃炉)	新堀雄一	東北大
理事(広報、会員、福島)	布目礼子	RWMC
理事(部会、会員)	林 巧	QST
理事(支部、フェロー)	山岡聖典	岡山大
監事	星野 剛	日本原燃
監事	楠 丈弘	日本原電

総会の開催

新型コロナウイルスの影響により、総会は Web 会議にて開催されました。2019 年度事業報告および決算審議の後、新役員の紹介が行われ、いつもなら理事と監事が別室に集まり、会長と副会長の互選を行いますが、今回は Zoom のブレイクアウトセッションで中島新会長が選ばれました。新会長からは、本年度は福島第一原子力発電所事故から 10 年の節目であることから、来年 3 月には事故後の取り組みの総括と今後の長期展望をテーマとしたシンポジウムの開催を計画していること、本学会の継続的な発展のため魅力ある学会を目指し、会員数の維持確保に向けた取り組みやホームページのリニューアルを進めることなどが表明されました。

次に、一年間会長を務められた岡嶋氏を推薦会員に推

挙し承認されました。同氏は、創立 60 周年シンポジウムの開催、「福島特別プロジェクト」の推進、当学会の更なる活動拡大に取り組み大なる成果をあげられました。

その後、報告事項として、2020 年度の学会活動全体の事業計画および収支予算の概要が報告されました。

今回 Web 会議ということもあり、会員の皆様から事前にご意見を伺っており、Web 開催となる秋の大会での円滑な運用の取り組みが紹介されました。

今年度の主要な取り組み

2014 年度に立ち上げた「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会(廃炉委)」を中心に、今後長期にわたり取り組まれる廃止措置—福島第一事故炉の廃炉—への学術的提言の発信や、学会事故調の課題のフォローに引き続き取り組んでいきます。また、「福島特別プロジェクト」の活動を通じ、国や国内外の関連機関と協力し、周辺住民の皆様への技術的支援、わかりやすい広報、行政への提言などを積極的に推進していきます。これらの活動をすすめるにあたり、本会が関連学協会に提案した福島復興・廃炉推進に貢献する学会連絡会について、幹事学会として体制づくりを進めつつ学協会間の連携強化を図ります。

その他、学術および技術の調査・研究ならびに標準の制定、春の年会、秋の大会を始めとした学術的会合や講演会などの開催、活発な部会・連絡会活動、支部活動、迅速な広報活動、技術倫理の普及・定着ならびに男女共同参画に関する調査・啓発活動、国際活動として海外学協会との積極的な交流や国際的な組織へのわが国を代表しての参加、国際会議の主催準備なども実施します。

当学会の財務状況については、学会員漸減の傾向にあり、収支は厳しい状況が継続しています。このため、引き続き、会員サービスの向上を図りつつ、一層の効率化を進めるとともに、新設された教育会員の入会促進、賛助会員の増強、新規事業の開拓等の活動を継続し、長期的に安定した学会運営の基盤確立を図るとともに、原子力・放射線の平和利用に関する理解の活動を継続してまいります。

(関西電力・高木 宏彰)

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