

巻頭言

1 最終ゴールは化石資源枯渇後の代替エネルギーの確保

坂根正弘

時論

2 田中角栄が挑んだ資源立国

前野雅弥

解説

25 地層処分概念における人の関与に関する議論の系譜

地層処分は、人が積極的に関与する必要のない受動的なシステムであるが、社会がそれを受容するための準備として、地層処分における人の関与のあり方を検討しておくことが必要である。

原田亜紀, 増田純男, 梅木博之

33 マルチユニット PRA に関する国際動向について

1 F 事故以降、複数ユニットをもつ原子力電所の全体リスクに関心が高まっている。それを評価する重要な基盤の一つがマルチユニット PRA 評価手法である。

三浦弘道, 猪股 亮, 神田憲一

解説シリーズ

41 WEO2017 と内外エネルギー情勢への示唆 第4回 低炭素化に向う世界の電力需給

今後の世界では電力消費が拡大し、太陽光・風力発電、天然ガス火力が増え、2040 年の再エネ電力比率は 4 割まで拡大する。しかし再エネ普及拡大は電力市場での電源への投資リスクを高める。

小宮山涼一

38 Column

「映画『日本と原発 4 年後』を観て」
「表情は嘘をつかない」
「モロッコの原子力発電事情 (上)」
「脱・プラスチックストローを考える」
「県民の日」
「原子力事故は許されているのか」

井内千穂
北岡哲子
妹尾優希
竹内純子
渡辺真由
渡辺 凜

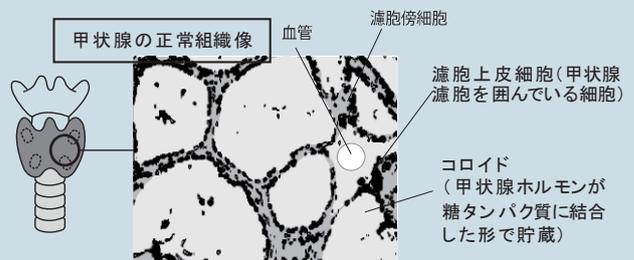
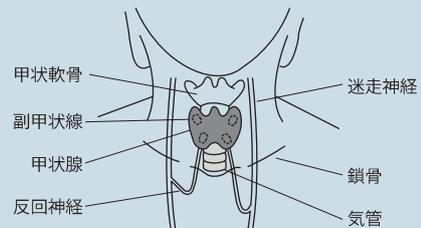
特集 福島第一発電所事故後の福島県における小児・青年期の甲状腺がん疫学調査研究について

福島原発事故後、福島県では若年者 30 万人から約 160 人の甲状腺がん患者が確認された。これは国立がんセンターが公表している甲状腺がん罹患率データの数十倍であり、この結果と放射線影響との関係について、相違なる見解が議論されてきた。

岩井 敏, 石田健二, 仙波 毅, 高木俊治, 猪狩貴史, 福地 命, BAATARKHUU Undarmaa

10 1. 過去の甲状腺がん疫学研究情報

甲状腺がんの種類と特徴ならびに、これまでに知られていた未成年者の甲状腺がん疫学情報の知見を記述する。



甲状腺の形態と位置、ならびに組織の概要

15 2. 福島県県民健康調査における甲状腺検査結果

1 F 事故時に福島県在住の未成年者を対象に甲状腺検査が行われた。その結果と、チェルノブイリ事故後の場合とを比較する。

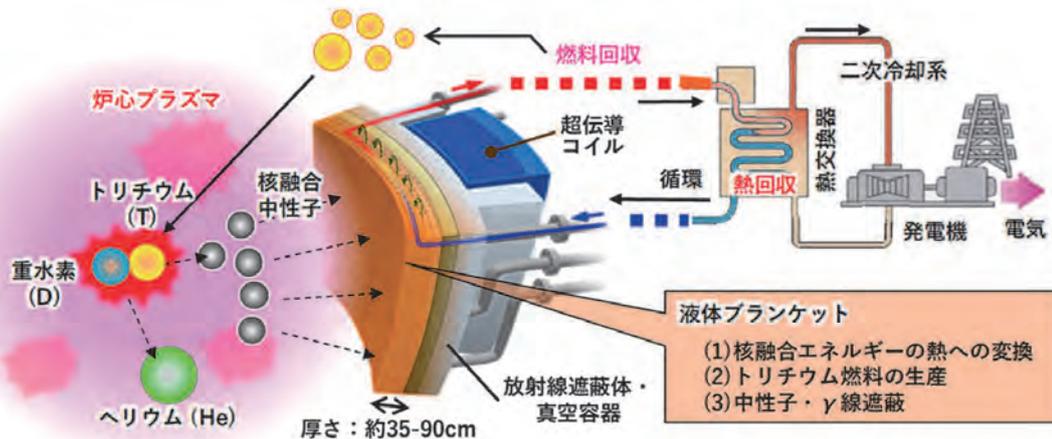
19 3. 甲状腺検査結果に対する見解

福島県での未成年者に対する甲状腺検査結果では、従来の数十倍の値が出た。しかし高性能の像診断装置を用いたことによる影響やチェルノブイリ事故の被ばく線量との相違などから、福島の結果の解釈については異なる見解が発表されている。ここではそれらの見解ならびに国連 UNSCEAR の見解を紹介する。

46 液体増殖材開発の最前線

核融合炉のブランケットとして不可欠な機能を全て兼ね備えている液体増殖材の開発研究が進展を遂げている。原型炉における実環境下試験を目指して展開される研究の最前線を紹介する。

近藤正聡, 田中照也



自己冷却方式の液体ブランケットシステムの概略

4 NEWS

- 広島高裁, 伊方運転差し止め取り消し
- 19年度政府予算概算要求が出そう
- 学会会議が研究炉の提言発表
- 海外ニュース

報告

51 福島の方評被害払拭への新たな鍵—海イベントを通じて

1 Fと社会とのコミュニケーション方法を研究しているAFWは、風評被害の払拭にも強い関心をもって取り組んでいる。

吉川彰浩

談話室

56 双葉の海を喰らう—常磐ものの豊穡

澤田哲生

58 国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告 科学秘書官補佐の経験から学んだこと

荻野晴之

60 リケジヨの思い (1)



口町和香

科学コミュニケーション 第5回

61 共同体の形成

岸田一隆

理事会だより

62 学会としての情報発信

布目礼子

- 63 From Editors, J-STAGE 電子アーカイブ化に伴う過去記事の登載・無料公開について
- 64 日本原子力学会「2019年春の年会」発表および参加申込受付のご案内
- 66 会報 原子力関係会議案内, 新入会一覧, 共催行事, 「2018年秋の大会」学生PS受賞者一覧, 「教育会員」新設・募集のご案内, エディターズチョイス, 英文論文誌 (Vol.55, No.11) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(<https://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>)にお寄せください。

学会誌ホームページはこちら
<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

最終ゴールは化石資源枯渇後の代替エネルギーの確保

巻頭言



コマツ相談役

坂根 正弘 (さかね・まさひろ)

大阪市立大学工学部卒。株式会社小松製作所(コマツ)社長、会長を経て、2013年から現職、2014年から総合資源エネルギー調査会会長。

私はこれまでエネルギーと地球温暖化問題に関わってきた。最初は2009年経団連の環境安全委員長としてコペンハーゲンで開催された第15回気候変動枠組条約締約国会議(COP15)に参加した時である。以来、COPに5回連続で参加した。この間、地球温暖化問題の本質は何なのかを考え続けた。私は何事も他人より1桁長い時間軸で考えると、より本質が見え易くなると確信している。「地球温暖化問題は我々人類が化石燃料の発見と利用技術の向上で経済活動と社会生活を進化させてきた結果であるとしたら、一体この時代は地球と人類の歴史の中でどんな時間軸の中の話なのだろう?」と考えたことから始まる。結論をまとめると、地球46億年を1年のカレンダーに置き換えたとき、我々の先祖であるホモサピエンスが登場したのは午後11時37分で、まだたった23分しか生存していない。我々現人類が化石燃料の大量消費を始めたのが明治維新の頃だとすると、今現在150年経過していることになるが、この150年は地球カレンダーで測ると除夜の鐘の108つ目の1秒間である。この間、日本の人口は4倍、世界は5倍に増え、今75億人。日本は今後人口減少に向かうが世界は2050年には100億人に近づく。

2014年経団連の副会長を退任した直後から政府の総合資源エネルギー調査会会長の仕事を引き受け今日に至っている。私のエネルギーと地球温暖化問題を考える時の基本スタンスは我々人類にとって化石燃料時代はこれまでの1秒間と、あと石油・ガスが50~100年、石炭が100~150年と言われており、合わせて2秒間の短い時代の話で、本質はあと1秒後に化石燃料に代わるエネルギーが見つかるか?だと思っている。パリ協定のCO₂の80%削減目標がどんな厳しいものなのかを日本の例で言えば、日本の産業用素材の基幹産業である鉄と化学分野で、どうしても化石資源を使ってCO₂を出さざるを得ない部分だけで、日本の総CO₂量の20%近くを占めており、他の産業や社会生活のCO₂発生をほぼゼロエミッションにしなければならないレベルである。今の再エネの技術レベルで「CO₂80%削減と原発比率を限りなく削減する」ことは両立しないことが明らかである。

そろそろ、政治は原発に対するスタンスを明確にすべき時がきている。また使用済核燃料の処理の難しさから原発の全てを否定する人がいるが、化石燃料が枯渇した後、再エネだけで人類が生きていけるかどうかだが、私は天然ウランも有限資源なので高い確率で使用済み核燃料の再利用に頼らざるを得ないと思っている。

最終目標である化石燃料資源枯渇後への対応を急ぐためにも、我々先進国は

- ①再エネの発電と利用技術の革新を続け、化石燃料に完全に代替できる新エネルギーを早く確立すること
- ②その間、原発の安全技術と核燃料サイクル技術の革新を続けて将来に備えていくこと
- ③新興国や途上国の化石燃料利用効率を高めるため、技術の更なる向上と提供を続けること

一方、日本は福島第一原発の廃炉を完遂するプロジェクトが今後、40~50年続くことになるが、この仕事は決して後ろ向きな仕事ではなく、通常廃炉は今後世界中で急速に増えていくし、残念ながら世界では将来原発の事故は起こりうる。その時のために日本は福島の実験を世界のために活かす視点で国家プロジェクトとして全力を挙げ取り組む責任がある。

(2018年8月27日記)



田中角栄が挑んだ資源立国



前野 雅弥 (まえの・まさや)

日経新聞 シニアエディター

1991年早大政経院修了，日本経済新聞社入社。経済部，大阪経済部，産業部，西部支社（福岡）などを経て現職。京都府出身。

田中角栄には金権政治のイメージがつきまとう。確かにそれは角栄の1つの側面であることは間違いない。高度成長期，たぐいまれな魅力で官僚を掌握，拡大する予算の配分権を手中に収めた。そこには人が集まり，情報が吸い寄せられ，それがまた新たな利権を生み力となった。その中心に角栄は座り1960年代から70年代にかけ日本の政治に一定以上の影響を及ぼし続けた。「金は力」。その要諦を知り抜いた角栄の政治力は「金」に裏打ちされたものであったことは否定できない。

角栄は新潟県の寒村の馬喰の倅(せがれ)として生まれた。頭脳は明晰だったが，山っ気が旺盛だった父親の事業の失敗も重なり進級は許されず学歴は実質，小学校卒。そんな生い立ちもあって無学な田舎者が，最後は自分自身も金の誘惑に負けロッキード事件という罠にはまり込み失脚したとの構図で語られることが多い。

ただ，筆者はその立場をとらない。角栄の薫陶を受けた政治家や官僚の証言を聞いてある確信を得た。「角栄は権力の掌握そのものを目的とした権力欲にとりつかれた政治家ではなかったし，ましてや政治という職業を通して蓄財に奔走，私服を肥やすようなことは決してなかった」——。それは通産相(経産相)時代と首相時代の2代にわたって連続して角栄の秘書官を務めた元経産省事務次官で後のアラビア石油の社長となった小長啓一氏の証言からも明らかだ。「田中さんのところにたくさんのお金は集まって来たかもしれない。しかし，それを田中さんが自分のポケットに入れたということはない。いつも右から左。それは側にいた私がよく知っている」。

確かに角栄が掌握していた金の力は尋常ではなかった。それは小長氏が目の当たりにした角栄の朝の風景に象徴されている。とにかく角栄の朝はすさまじい。フル回転だ。東京・渋谷の公務員宿舎から東京・目白の田中邸に小長氏が到着すると，まだ7時30分だというのに陳情客でごった返している。それを角栄がサッサッとさばいていくのだが，そのスピードがすごい。1件あたり3分くらい。「分かった。それはやる」「ダメだ。来年までまで。ただし，来年は必ず予算をつける」。時にはその場で電話をすることもある。相手は財務省の主計局長

だったり，担当官庁の事務次官だったり。国の金の流れを知悉し，ツボを押す。この風景は角栄が首相時代もそのまま続いたが，まさにコンピューター付きブルドーザーそのものだった。

ただこれが角栄のすべてだったわけではない。角栄の目線はもっと先にあった。1972年7月，福田赳夫を総裁選で破り首相の座についた時，角栄は国会に行く車のなかで秘書官の小長啓一にこういったのだという。「俺は今，人気の絶頂にある。だからこの人気のある時に大切なことをやる」。

角栄が首相に就任した当初，支持率は60%。圧倒的だった。その高い支持率を背景に角栄は首相でなければやれないことをやろうとした。まず，その1つが日中国交正常化だ。確かにこのタイミングで日中国交正常化を果たすとすれば角栄しかいなかった。少なくとも宿敵，福田赳夫なら動けなかっただろう。日本のヒエラルキーのなかにどっぴりとつかり，その頂点である大蔵省主計局を経て政界入りしたサラブレッドの福田は，米国の意向を忖度，角栄のように米国の頭越しに中国と国交正常化させるという選択はしなかったに違いない。

しかし，角栄は違った。「中国では今，毛沢東や周恩来ら革命第1世代が実権を握っている。世代が変わると話がややこしくなる。日本の企業だってそうだろう。第2，第3世代になると社内の意見が割れて大変だろう。だから第1世代が元気な今のうちに決着をつけてしまわないとならない」。角栄はこう考えた。だから米国に十分に仁義を切らないうちにさっと動いた。個人的には，この判断が良かったとは思わない。むしろ間違っていたと考える。中国という眠れる獅子を急に焦って起こしに行く必要はなかった。角栄は中国市場の成長力に着目，国交正常化により中国という巨大マーケットを引き寄せ，洗濯機や冷蔵庫など日本の家電製品や自動車の有望な輸出先とする戦略だった。ただ，一通り日本製品を吸収してしまった後は日本の製造業を脅かすライバルとして一気に台頭してくるリスクを見逃してしまった。

何よりも角栄自身にとってもマイナスだった。1972年7月，角栄は首相に就任するとすぐさま当時の大統領

ニクソンとの首脳会談にのぞむ。同じ年の8月31日、9月1日。ここで早速、中国との問題を切り出すがこのでの説明が不十分だった。中国との交渉については話を通したが、国交を正常化させることまでは米国は十分に納得していなかった。なのに角栄は押し通した。これが後々、祟る。「角栄は油断ならない男。いったい何をするか分からない」との先入観を与えてしまう。

田中派の筆頭若頭として活躍した石井一も「当時、米国は自分のペースで中国を国際社会に段階的に引き戻したいと考えていた。キッシンジャーが電撃的に訪中したが、それでもその後はゆっくりとやるつもりだった。あくまでも米国のスケジュールでやろうと考えていた。ところがオヤジ(角栄)はそれを無視した。日本が米国を出し抜いて中国と国交正常化を果たしてしまい、それがキッシンジャーやニクソンを怒らせてしまった」

歴史を振り返る時、「if(もし)」を議論しても仕方がないし、意味もない。ただ、それでももしこの時、角栄がもう少し慎重だったら、米国からロッキードで揺さぶられることはなかったかもしれない。角栄ほどの宰相が在任、約2年で失脚したことは日本にとっても、大きな損失だったと言わざるを得ない。もう少し首相をやってくれていたら……。

そう。もう少し角栄が首相を続けていたなら、角栄は何を成していたらだろうか。それは間違いなく資源外交だった。角栄は中国との国交正常化を成したあと、すぐさま資源問題に着手した。角栄にはもともと日本にとって資源問題は極めて重要な問題との認識が強かった。首相に就任した時から側近に「このまま日本が資源を海外に牛耳られているのは問題だ。特に石油をメジャー(国際石油資本)に押さえられた現状ではダメだ。こういうことこそ、政治のトップが前面に立って突破口を開いていかなければならない」。こう話していたのだった。

ここで筆者が思い出すのが1990年代の後半、筆者はエネルギー記者クラブの配属となった時のこと。エネルギー記者クラブの主な守備範囲は電力・ガス業界と石油業界なのだが、ここで奇妙な日本語を耳にする。「石油元売り会社」という日本語だ。日本には「石油会社」はない。あるのは「石油元売り会社」だけだというのが。石油会社というのは探鉱、掘削など石油開発と石油精製をあわせて行うというのが必要条件。日本の場合、石油開発はほとんど行っておらず、手がけているのは石油精製と販売だけ。精製する大本の原油はその大半をメジャーに掘り出してもらい日本に回してもらっている。だから「石油元売り会社」というのが正確なのだというわけだ。

分かったような分からないような話だが、いずれにしても日本のエネルギー調達に完全に海外に押さえられてしまっているという事実だけはよくわかる。角栄はこれを危惧した。第2次世界大戦で中国に出兵した時、「ガソリンがないから」という理由で車に乗せてもらえず歩

いたというエピソードを披露しているが、エネルギーがないということがいかに惨めなことなのか、角栄は身に染みて感じていた政治家だった。

だから、角栄は日中国交正常化を成し遂げた後、さほど時間を置かずに資源外交に乗り出した。1973年9月のことだ。フランスを皮切りに英国、ドイツ、ロシアと角栄にしては珍しい長期の外遊だったが、そこで角栄は徹底的に日本のエネルギー調達ルートの多角化に道筋をつけようと奮闘した。

外遊は角栄の腕力もあり今では考えられない成果を取るが、圧巻だったのがフランス。ここで角栄は首相メスメルと歴史的な合意を果たす。まず1つ、フランスと日本とで協力して石油開発に乗り出すことで合意したのだ。「石油の生産量が低いのはフランスも日本も同じ」とメスメル。「それなら」と両国でフランス、日本以外の第三国で石油開発に着手することで合意したのだった。

しかし、そこでとどまらなかった。角栄はメスメルとウランの共同開発についても話を進める。第三国、例えばニジェールのウラン鉱石の開発などを共同で手がけられないかと持ち掛けたメスメルの提案に「賛成である」とすんなり合意したのだった。

ただ、ここまではある意味、想定範囲内だったかもしれない。日本側も会談前にはある程度はフランスの出方を探っていたし、ここまでは話を出してくるかもしれないと読んでいた。日本側もどう対応するかは十分に検討を進めていたし、角栄は筋書き通りに振る舞ったに過ぎなかった。

ところが、角栄—メスメル会談はさらにここから踏み込んでいく。もう、ここからは筋書きにはなかった。ウランの加工の分野にまで2人は踏み込んだのだった。これまで米国一国に依存してきた濃縮ウランの調達をフランスにも広げる。当時、フランスは濃縮ウランの工場建設に着手していて、将来、その工場が立ち上がった時には、フランスで加工した濃縮ウランを日本の原発の燃料として一定量、輸入してくれないかというメスメルの提案に角栄が乗ったのだった。米国にとっては「あり得ない」日本の選択だった。原子力において長年、続いてきた日本のエネルギー調達構造が180度転換する歴史的合意だった。角栄は未知の領域に乗り出した。そしてこれこそが真に米国の怒りを買ったのだった。

欧州やアジアとの関係を強化、その力を取り込むことで米国への対抗力とする。米国一辺倒だったエネルギー調達ルートの多角化に道をつけるという角栄の外交は、これまで日本の政治家がなし得なかった芸当だ。それは決して日本に実利をもたらせたわけではないし、その後、その路線が引き継がれたわけではない。ただ「100%米国とともにある」とことあるごとに連呼する安倍政権の振る舞いをみるにつけ、もし角栄だったらこうはならなかったであろうと思うのである。(2018年9月5日記)



広島高裁、伊方3号機の運転差し止めを取り消し

広島高裁は9月25日、同高裁が昨年12月に下していた伊方3号機の運転差し止め仮処分決定に関する四国電力の異議を認め、昨年の決定を取り消した。これをうけて四国電力は、同機の原子炉を10月27日に起動すると発表した。

昨年の決定で運転差し止めの根拠となったのが、阿蘇山が噴火した時の安全対策だ。この点について今回の決定では、「その火砕流が伊方原発敷地に到達した可能性が十分小さいと評価することはできない」と、昨年の決定の根拠をいったんは認めた。しかし、「大規模な火山噴火の発生頻度は著しく低く」、また「現在の火山学の水準では火山の噴火の時期や程度を数十年前に正確に予測することはできない」にもかかわらず、規制委が、「噴火

の時期や程度を相当程度の正確さで予測できることを前提としていること自体が不合理である」として、昨年の決定の根拠となった火山ガイドそのものを批判。その上で「破局的噴火によって生じるリスクは、その発生の可能性が相応の根拠をもって示されない限り、原子力発電所の安全確保の上で自然災害として想定しなくても安全性に欠けるところはないとするのが、少なくとも現時点における我が国の社会通念である」と判断した。

これにより高裁は今回の決定で、同機の具体的危険の不存在の主張疎明がなされたとし、同機の運転差し止めを求めた昨年の決定を取り消した。

(原子力学会誌編集委員会)

2019年度の概算要求が出そろ

各省庁による2019年度政府予算の概算要求が、8月31日までに出そろった。

文部科学省は原子力関連で、対前年度419億円増の1,897億円を計上した。このうち核燃料サイクル・高レベル放射性廃棄物処理処分の研究開発は、同92億円増の503億円。高速増殖原型炉「もんじゅ」と新型転換炉「ふげん」の廃止措置に向け、それぞれ179億円(対前年度同額)、92億円(同約3倍)を要求した。「もんじゅ」では、廃止措置の第1段階となる燃料体取り出し作業が8月30日、2022年末の完了を目指し始まった。「ふげん」については2026年度までに使用済み燃料搬出し、2033年度までの廃止措置完了を目指し、施設の解体などを実施する予定。また、新たなエネルギー基本計画に従い、高レベル放射性廃棄物の減容や有害度の低減、再処理技術に資する研究開発も推進する。新規規制基準への対応や安全確保対策については412億円(同約4倍)を要求しており、日本原子力研究開発機構の老朽化施設への高齢化対策などを強化する。

経済産業省はエネルギー対策特別会計で、対前年度

508億円増の8,306億円を要求。原子力の技術開発では「社会的要請に応える革新的な原子力開発支援事業」として新規に10億円を計上した。原子力の革新的な技術開発を行う民間企業の取組を支援し、エネルギー基本計画の掲げる「安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求」、「過酷事故を含めた軽水炉の安全性向上に資する技術や、信頼性・効率性を高める技術等の開発」といった要請に応える。2019～27年度の補助事業で、これを通じて開発された技術を標準化や原子炉への適用を図り、わが国の原子力の信頼回復、産業基盤の強化につなげていく。

原子力規制委員会は対前年度157億円増の699億円を要求した。新規として「原子力の安全研究体制の充実・強化事業」(32億円)があり、研究機関との連携強化などを通じて、引き続き原子力の安全確保に係る人的基盤の強化を図る。原子力災害対策・放射線モニタリング体制の強化は対前年度87億円増の274億円の要求額となっており、原子力災害医療体制の中核となる施設への支援を強化し、実効性確保を図る。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

学術会議が研究炉のあり方で提言

日本学術会議の「原子力安全に関する分科会」(委員長＝矢川元基・原子力安全研究協会会長)は8月16日、「研

究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉のあり方」と題する提言を発表した。同分科会の下、日本原子

力学会で研究炉に係る調査活動をリードしてきた上坂充氏(東京大学大学院工学系研究科教授)をヘッドとする検討小委員会が取りまとめたもので、近年の廃炉・高経年化など、研究炉を巡る状況を踏まえ、「次期炉の検討を早急に進めるべき」としている。

提言では研究炉の利用を、(1)材料開発や放射性同位元素製造などを行う中性子照射、(2)物質構造解析や中性子捕捉療法(BNCT)などを行う中性子ビーム——に大別し、それぞれに適した原子炉の必要性を述べている。このうち中性子照射の研究炉としては、日本原子力研究開発機構の「JMTR」の廃炉決定に伴う影響を懸念し、同規模程度の後継炉を早急に建設することを最重要事項として強調した。「JMTR」は現在、国内でその機能を代替することが困難なことから、これまで多くの実績を持つ東北大学金属研究所では主にベルギーの海外炉を利用しているが、「経費などの理由により、JMTR稼働時の4分の1程度しか照射できていない」と憂慮している。

中性子ビームの研究炉としては原子力機構の「JRR-3」の高経年化と長期停止に伴う学術研究や産業利用に与える影響を懸念し、早期の再稼働とともに、実験設備の高度化などを訴えた。学術会議が大学や研究機関などを対象に実施したアンケート調査によると、「JRR-3」の運転中と停止中の前後で関連の学位論文数が激減してい

るほか、共同利用の採択課題数や利用者数に関しても「長期停止の影響が顕著」とみている。中性子ビームの利用については現在、大強度陽子加速器施設「J-PARC」が産業利用のニーズに応じているが、「とてもすべてをカバーできるものではなく、研究炉の役割は非常に大きい」という意見もあがっている。

さらに、再稼働の前提となる新規規制基準適合性審査の長期化に関し提言では、リスクの大きさを考慮した審査対応、いわゆるグレーデッド・アプローチの重要性も述べている。原子力規制委員会では現在、4基の研究炉(廃炉が決定した「JMTR」を除く)が審査途上となっており、「JRR-3」については、審査の申請から間もなく4年が経過するところだ。

このほか提言では、将来の研究炉の建設・運営に向け、関係省庁間での適切な費用分担、運営組織や共同利用体制のあり方、人材育成への貢献についても述べている。

今後の研究炉のあり方をめぐっては、文部科学省の原子力研究開発基盤作業部会が3月に「新たな照射炉の建設に向けた検討を」とする中間報告書を取りまとめたほか、4月には小谷隆亮・大洗町町長の声かけで立地自治体による開発推進協議会が発足するなど、動きが盛んになりつつある。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

WNA が原子力発電実績報告を公表

世界原子力協会(WNA)は8月16日、「世界の原子力発電実績報告2018」を公表し、昨年の世界の発電量と建設の実績およびWNAが目指すハーモニー・ゴール達成の方向性を示した。(注：ハーモニー・ゴールとは、WNAが2015年のシンポジウムで打ち立てた「ハーモニー・イニシアチブ」の中で目指している目標)

世界の原子力発電量は過去5年にわたり増加を続け、2017年末時点では年間2兆5,060億kWhを記録した。世界で運転中の原子炉は448基で発電規模は3.92億kWで、2016年末に比べて200万kW増加。新規炉4基が送電を開始し、その容量は337.3万kWになった。建設中は2基減の59基。5基が閉鎖されたが、そのうちの2基は長期にわたり停止中の原子炉であった。

2017年に着工開始する原子炉の建設期間の中央値は58ヶ月。2016年の74ヶ月からは低減。この実績は2001

年から2005年の期間と同じレベルとなる。

また、平均設備利用率は81%で2000年以来およそ80%の高い率を維持しており、1980年代の平均60%からは大きく向上している。WNAは「高い設備利用率は順調な運転実績を反映している」としている。しかし、いくつかの国では、負荷追従モードでの運転を行う例が増えており、結果年間の設備利用率が低くなっている例もみられる。さらに、原子炉の実績に高経年化の影響は見られず、過去5年の設備利用率は運転年数に左右される物ではないことを示していると評価している。

WNAのA.リーシング事務局長は、報告書のまとめで、次のように指摘している。

・原子力なしで持続可能なエネルギーの未来は考えられない。全ての低炭素エネルギーとの共存が必要。2050年までに世界の電力需要の25%を原子力が担うという産業界が目指すハーモニー・ゴールを達成するためにも設備利用率の高度化が必要となる。2017年時点の世界の平均設備利用率は81.1%と2016年の80.5%より伸びており、20年以上およそ80%の数字は持続

している。さらに、原子力発電の総量は、過去5年で1,600億kWh増加している。

・ハーモニー・ゴールでは2050年までに10億kWの設備容量が必要とされている。そのためには2016から20年の間に、毎年1,000万kWの設備が開発されることが経過目標となる。2017年の新規の原子力容量は330万kWにとどまったが、2018年と2019年には2,600万kW以上が新規に運転開始予定となっている。

・次の10年間のハーモニー・ゴール達成のペースを保つためには、さらに毎年平均3,300万kW増に加速することが必要となる。そのためには次の3つの主要な分野でのアクションがとられるべきとなる。

- 1) エネルギー市場：原子力が有する価値と信頼性が認識され、他の低炭素技術と平等の機会を与えられること。
- 2) 規制体制：安全性やセキュリティについて妥協することなく、国際的に一貫性があり、効率的かつ予見しやすい原子力許認可体制による調和のとれた規制プロセスが必要。
- 3) 拡大を可能とする安全性認識：原子力の健康、環境、安全面での価値が他のエネルギー源と比較して、一般市民に理解されるための効果的な安全への認識が必要。

報告書では、原子力は立地地域に対してもベネフィットをもたらすとともに国の経済を支援し、世界で高まるクリーンで信頼できる電力需要に応えている。我々WNAはハーモニー・プログラムを通じて、原子力発電が持続可能なエネルギーの未来に完全に貢献できるようにするために必要なステップを示している、と締めくくっている。

【米国】

上院で超党派議員が原子力エネルギーリーダーシップ法を提案

超党派からなる議員らが9月6日、米国上院に「原子力エネルギーリーダーシップ法案(NELA)」を提案した。原子力エネルギー協会(NEI)はウェブサイトで、この法案提出は、連邦政府と原子力産業界が長期にわたって協調して米国の商業原子力技術における国際的リーダーシップを再構築するための努力のスタートラインに立ったものだとして紹介している。提案では、法案作成の背景について下記のとおり述べている。

「かつて米国は、原子力エネルギー分野でリーダー的地位を有していた。最近では中国、ロシアにその地位を脅かされ、エネルギーセキュリティ、経済競争力、国家

安全保障の面でも弱体化している。世界的なリーダーシップを取り戻すために、米国は競争力ある価格で、最も先進的な原子炉を設計・開発しうる健全な原子力産業を持たなければならない。クリーンで信頼でき、かつ柔軟で多様な電源を求めらる中で、先進的原子炉が重要な役割を果たすであろう」。

さらにこの法案を実行することで、「主要な研究機関と最良の産業イノベーターが強固な官民パートナーシップを構築することにより、米国は原子力エネルギーの第一人者の地位を取り戻すことになる」としている。また、同法案は、連邦政府が「適切に商業化された技術を早期に採用することによって、先進的な原子炉の市場化を促進する」、「必要とされる科学研究施設を提供する」、「米国のより明るいエネルギー未来をリードする次世代の原子力科学者の訓練を行う」ための道を容易にするとしている。

NEIのM.コースニック理事長はウェブサイトで「(同法案は)米国の原子力における技術力のリーダーシップを推し進める包括的プランであり、現在米国が直面している国際的競争が激化する環境のなか、まさしく必要とされているサポートとなる」と、この法案提出を歓迎した。

さらに同法案は、「米国がクリーンで先進的原子力技術の国際的リーダーとして再び専心していく意思に対して、間違いのないというシグナルを送っている」、「次世代原子力技術は、国際的にも積極的に追求されているものであり米国がライバル国と競っていく中で求められるものである。イノベーションを加速させるためにも、我々原子力産業界は、連邦政府、国立研究所、民間企業との確固たるコラボレーションが必要」と述べている。

今回の動きは重要な第一歩だが、法案成立のためには今後、上院での通過と共に下院でも同様の手続きを経ること、最終的には大統領署名が必要となる。

【英国】

政府諮問WGが小規模原子力プログラムへの政府支援を提言

英ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)が今年1月に設立した財政専門家ワーキング・グループ(EFWG)が8月7日付けで、「小規模原子力の資金調達のための市場の枠組み」と題する報告書を公表した。

同WGは昨年12月に、R.ハリントンエネルギー担当相が発表した小型モジュール炉(SMR)など次世代の新型原子炉プログラム開発で英国が世界のリーダー的地位を獲得するための包括的原子力産業支援方策の一環として、設けられたもの。以来、政府とは独立した立場で小型原子炉プロジェクトの商業展開を可能にする民間投資

を加速化するための提言をまとめてきた。報告書では、小規模原子力プロジェクトの規模をマイクロ発電から60万kWに、コストの範囲は1億ポンドから25億ポンドに設定している。

同WGの座長を務めたF.ライリー氏は報告書の序文で「世界的な経済活動や小型原子炉への関心が高まっているにもかかわらず、民間からの資金調達を確保するには、これまでの技術やプロジェクトを商業的に成功することへの市場の失敗への懸念が残っている」と述べた。そのためEFWGでは、「市場の枠組みについて提言を作成するにあたり、小型原子炉に関連するリスクを徹底的に見直し、どのようなリスクを最も適切に管理できるか、リスクの結果ならびにその結果についても、どのように管理できるかについて考慮している」と付言した。

報告書は、提言策定までの分析結果などについて全80ページにわたって詳細に記載。英国政府に対して、小規模な原子力プロジェクトが活気ある市場となることを支援するためには、エネルギー政策の明確化や、市場主導型の開発展開の地位を保たせること、BEISの原子力イノベーションプログラムやイノベーション助成金などを通じての小規模原子力技術を実用化するための目標スキルの設定と能力開発を遂行すること、これらのプロジェクトに関連するリスクの共通認識を深めるためにエネルギー、原子力、金融分野のステークホルダーとの連携、さらには他の低炭素エネルギープロジェクトとの平等な競争の場を可能にするため、これまで投資の障壁となっていたリスクへの認識を取り除くことなどを挙げている。

そのほかに英国政府がこれまで特に洋上風力発電で行ってきた先進的なサプライチェーンイニシアチブを確立すること、最適化された柔軟なアプローチを達成するための規制プロセスの見直しなどのために、規制庁(ONR)や環境庁(EA)との連携が必要であることも記載している。

2030年までに商業展開が見通せる技術については、英国政府が初期投資を低減し、リスクを分担することに注力すべきとしている。その方策としては、政府が資金提供しての新たなインフラ基金、あるいは直接投資や政府保証を通じた資金調達などの支援が考えられるとしている。また、差異契約(CfD)、電力購入契約(PPA)および規制対象資産ベース(RAB)についても示唆している。

【スイス】

政府、放射性廃棄物処分3候補地の探査掘削を許可

スイス連邦政府は、放射性廃棄物管理協同組合(NAGRA)が放射性廃棄物処分の候補地を調査するため

の3箇所の探査用ボーリング掘削許可を下したとスイス連邦エネルギー庁(SFOE)のウェブサイトで8月21日に公表した。SFOEは、NAGRAが2016年および17年に全部で22箇所の試験掘削申請していたところ、8月17日に3箇所について許可したとしている。

今回の許可は、北部レゲレン地域での探査掘削と、チューリッヒ・ノルドストの2箇所の探査ボーリング掘削について行われたとSFOEはウェブサイトで述べている。また、掘削の申請に対する703件の反対意見を受け取っていることも述べている。

掘削作業は2019年に開始され、NAGRAは2022年にも、高レベル放射性廃棄物深地層処分場、低中レベル廃棄物処分場あるいは複合型の貯蔵施設のいずれの建設許可申請にするかについて発表する予定であるとしている。

2005年に施行されたスイス原子力法では、放射性廃棄物は発生者の責任で国内での保管が規定されている。また、2006年にそれまで海外(英国、フランス)に委託してきた再処理が連邦決議により、禁止されたため、現在は、使用済燃料を燃料プールで数年間冷却後、発電所内、あるいは中間貯蔵施設で貯蔵している。2001年に建設されたスイス北部ヴェレンリンゲン放射性廃棄物集中中間貯蔵施設では、使用済燃料の他、外国から再処理返還の高レベル放射性廃棄物も貯蔵されている。

NAGRAは1972年にスイスの原子力発電所の事業者の協同組合として設立。民間の原子力廃棄物の管理とスイス国内での処分を担当している。

【ロシア】

高速炉BN-1200の開発計画工程が明らかに

ロシア国内の原子力発電所の運営と管理を担当するロスエネルギーアトム社は8月3日に、ナトリウム冷却高速炉BN-1200(120万kW)の建設工程を明らかにした。ロシアは原子力開発当初から、エネルギー問題解決の鍵として核燃料サイクルの完結と高速炉の開発を積極的に進めている。同社のA.パトロフ社長は、発表の中でBN-1200の建設は早ければ2025年に開始、2032年までに完成する可能性があるとして述べている。

BN-1200については、現在運転中の原型炉BN-800とは異なり、あくまでも商業炉として位置付けていることから、その技術と経済性をほかの原子力発電所やコンバインドサイクル発電との比較評価を2020年末までに行い、建設の最終判断を下すとしている。

また、BN-1200の商業的競争力が確認された後に数年をかけて、必要とされるプロジェクト資料の作成、体制を整えるなどを行い、建設許可を取得する。それらを

経て建設は2024～25年の間に開始、完成は2031～32年になる予定だ。

【UAE】 バラカ2号機で主要な運転前試験を完了

首長国原子力会社(ENEC)は8月6日、アラブ首長国連邦(UAE)で建設中のバラカ原子力発電所2号機(韓国製140万kW級PWR)での温態機能試験(HFT)を成功裡に完了したと発表した。この重要な運転前試験プロセスは、先行して建設中の1号機での同種の試験から得た教訓に基づき、国際基準の品質、安全性、効率の最高水準を達成するために実施されたもの。またENECは連邦原子力規制庁(FANR)の監視の下で、プロジェクトの工事部門の主契約者である韓国電力公社(KEPCO)と強力な連携によって今回のプロセスを達成したと強調している。

ENECのCEOであるモハメド・アル・ハマディ氏は、「我々は、今回の2号機におけるHFTの完了は、安全性と効率性を堅持していることを示すものと誇りに思っている。さらに1号機での教訓を踏まえながら、バラカ発電所を世界的に新規原子力発電所プロジェクトのベンチマークであり続けるよう努める」と語った。

ENECによれば、HFTは原子炉内に核燃料未装荷状態で運転条件で性能を確認するために主要システムで実施された約200の個別試験と統合試験で構成されており、数週間にもわたって行われた。

「これらの運転前試験は、プラントの運転を開始するための複雑で重要なステップであり、安全性および品質の最高水準が達成されていることを実証するためには、核燃料を使用しない運転条件下で試験することが不可欠である」とアル・ハマディ氏は付け加えた。

バラカ2号機の建設は、1号機に1年遅れて2013年4月に開始された。バラカ原子力発電所の工事は1号機の運転開始が2017年終盤で、その後1年に1基ずつ運転開始され、2020年までに全ての原子炉が稼働することになっていた。現状では、1号機はその完成と規制当局の承認を待って、運転管理会社であるNAWAHエナジー社に移管され、運用準備に入る段階にある。

しかし1号機の運転開始については、今年5月に2018年中に予定していた燃料装荷日程を運転員の訓練と規制当局からの承認取得に時間がかかることから、2019年末か2020年初頭頃に延期すると発表している。

2018年6月末現在でバラカ2号機の工事進捗率は93%で、4基全ての進捗率は89%を超えている。全基が稼働すると、UAE域内に安全でクリーンかつ信頼性の

高い効率的な電力を供給し、毎年2,100万トン以上の温室効果ガス排出削減を達成することとなる。

規制当局、カリファ大学との原子力安全で研究協力

アラブ首長国連邦(UAE)の連邦原子力規制庁(FANR)は9月2日に、アブダビのカリファ科学技術大学と原子力安全研究の推進とUAEにおける次世代の原子力平和利用研究者養成に重点をおいた共同研究協定に調印した。調印式は、FANR本部においてFANR事務局長C. ヴィクトールソン氏とカリファ大学副学長のA. ハマディ博士との間で行われた。

今回の協定によると、OECD/NEAが主導している国際的なプロジェクトであるATLAS-2(事故シミュレーションのための熱水力試験ループプロジェクト)にFANRとカリファ大学は継続して参加することとなっている。ATLAS-2は福島第一原子力発電所事故を受けて、2014年から2017年まで韓国原子力研究所(KAERI)が行ってきたATLASプロジェクトをフォローアップするためにフェーズ2として、2017年10月から2020年9月まで韓国およびUAEを含む10か国が参加して実施されている。

ATLAS-2プロジェクトは、韓国が開発した第3世代PWRであるAPR1400の熱水力安全および事故管理に関する課題に取り組むもの。UAEとしては、このATLAS-2に関わる協力協定を通じて、UAEの学生および研究者が集中的な研究活動に参加し、原子力の安全性向上につなげることを企図している。

FANRのヴィクトールソン事務局長は、「FANRが2009年に設立されて以来、原子力安全分野の人材育成を優先させてきた。この研究協定によって首長国連邦の学生と研究者は原子力システムにおける重要な安全性について学ぶことができる上に、ATLAS-2プロジェクトでの訓練情報は、卒業した学生たちにとっても貴重な資料となるであろう」と述べた。

また、ハマディ博士は、今回の協力はエネルギーと水の持続可能性の重要性を強調する「アブダビ経済ビジョン2030」に沿うものであると評価。FANRとの研究および協力協定により、原子力安全に関する地域の専門知識の向上に貢献し、将来の安全解析のための包括的トレーニング資料の作成にも役立つものと確信していると述べた。

UAEでは現在、APR1400が4基(各139万kW)、バラカで建設中となっている。1号機は当初2018年中の運転開始を予定していたが、5月26日に同炉の運転準備状況を包括的に審査した結果として、燃料装荷予定を

2019 年末か 2020 年初頭に延期すると発表している。

【パキスタン】

カラチ 3 号機で華龍 1 号の圧力容器設置完了

中国核工業集团公司(CNNC)は9月6日、パキスタンのカラチ原子力発電所3号機の圧力容器据え付けが5日に完了したと発表した。圧力容器は、CNNC傘下の中国核動力研究設計院(NPIC)によって独自に設計され、中国第一重型機械集团公司が製造したもの。今回の据え付け作業は、蒸気発生器と圧力容器の合計4基が対象で、CNNCは圧力容器を吊り下げるための新たな「e型」と呼ばれるフリップ・ブラケットを採用した。これによって、効率的かつ安全に作業が進み、すべての据え付け工事は19日間と短期で終了したとしている。

華龍1号は、CNNCと中国広核集团公司(CGN)が双方の第3世代原子炉設計を統合して開発したもので、2016年には華龍1号の国際展開促進を目的とする合弁事業体「華龍国際核電技術公司(華龍公司)」を発足させている。

同炉は現在、中国国内の福建省福清5、6号機(各115万kW)と広西省防城港3、4号機(各115万kW)の2か所で4基が建設中である。

海外輸出ではパキスタンのカラチ2号機が初の例で2015年に、また3号機(各110万kW)は翌2016年に着工した。今後アルゼンチンと英国での採用が決まっている。

なおパキスタンでは運転中5基の原子炉のうち、カラチ1号機のみがカナダ型重水炉(PHWR)で、そのほかのチャシュマ1~4号機では、中国の秦山原子力発電所と同じCNP-300という30万kW級の中国自主設計の原子炉が導入されている。

「一帯一路」の経済圏構想を掲げる習近平政権にとって、高速鉄道と原子力の輸出は、中国の国家戦略となっており、特に英国で包括的設計審査(GDA)が進展中のブラッドウェルBプロジェクトは、華龍1号のブランド化の点で重要な意味を持っており、2017年4月に中国国内で「華龍1号標準化プロジェクト」がスタートした。さらに今年8月10日には、この標準化を中国国産の全PWRに拡大する方針が示されている。

【中国】

先進研究炉(CARR)が連続安定運転を達成

中国核工業集团公司(CNNC)は8月14日、中国原子

能科学研究院(CIAE)と共同開発してきた中国先進研究炉(CARR)が7月25日から8月7日の期間、安全上の何らの問題もなく、連続運転を達成したと発表した。この事業で一連の放射線に関するタスクを完了し、建設以来最も高い30MWレベルでの安定運転を生み出し、さらに2週間にわたる高出力運転により、高温、多湿下におけるCARRの装置と運転の信頼性が確認されたとしている。

CARRは、北京市房山区のCIAE敷地内に立地。重水反射材を使った軽水タンク型の炉で、CIAEは、アジアのみならず全世界でも最も先進的な炉の一つであると表現している。設計および建設の段階でCIAEは、燃料、原子炉格納容器のようなコンポーネント、制御棒メカニズム、デジタル管理システムなどに携わり、それら機器の国産化率は90%にのぼる。

CARR計画は、1997年7月に政府により認可、2002年8月に着工。2010年5月13日の初臨界後、2012年3月13日に72時間のフルパワー運転に至った。

関係する中国中性子散乱学会(CNSS)のウェブサイトによると、現在CARRは正規の運転認可待ちの段階で、取得後には年間12サイクル(1サイクルあたり10日から20日の稼働)での運転が予定されている。

CARRは、核物理、化学、中性子散乱実験、原子炉材料や燃料試験、中性子放射化分析などの分野での研究、ならびにラジオアイソトープや中性子照射によるシリコン半導体製造などに利用される。

AP1000が新たなマイルストーンへ

中国で建設中のウェスチングハウス社製AP1000は、8月17日に三門原子力発電所2号機が初臨界、海陽原子力発電所1号機では送電網への併入という新たな段階へとその歩みを進めた。

中国核工業集团公司(CNNC)と国家核電技術公司(SNTPC)は、三門2号機(浙江省)が8月17日の午前12時07分に臨界に達したと発表。低出力運転でのテスト完了後に、原子力蒸気によってタービンを稼働させる。次のステップでは徐々に出力を上昇させ、全てのテストが全出力でも安全に完了したことが確認された後、送電網へ併入される。

さらに海陽1号機(山東省)は、同日の午前9時50分に送電網へ繋げられ、発電を開始したことも発表された。

SNTPCによると、同1号機は現在、出力上昇試験運転段階にあり、並行して5%出力から開始して、50%、90%と出力を上げていく各種テストを行う。これらのテスト完了後、CNNCは営業運転の許可取得を行う。

福島第一発電所事故後の福島県における 小児・青年期の甲状腺がん疫学調査研究について

1. 過去の甲状腺がん疫学研究情報

原子力安全推進協会 岩井 敏, 他

小児および未成年者に放射線被ばくによって甲状腺がんが誘発されることは、広島・長崎の原爆被爆者、X線を用いた白癬治療、胸腺肥大治療などの医療被ばく者、ならびにチェルノブイリ原子力発電所事故からの¹³¹I取込による内部被ばく者の疫学データから知られている。本稿では、甲状腺がんの種類と特徴ならびに、これまでに知られていた未成年者の甲状腺がん疫学情報の知見を中心に記述する。

KEYWORDS: thyroid cancer, childhood, papillary carcinoma, external exposure, internal exposure, radiation therapy, atomic bomb survivors, Chernobyl accident

I. 甲状腺と甲状腺がん

1. 甲状腺の機能と構造

甲状腺は図1に示すように、“のどぼとけ(甲状軟骨先端)”のすぐ下にある器官である。出生児では約15mgであるが5歳児では5g程度まで成長し、成人では10~20g程度になる。甲状腺は幼児期には増殖が盛んであり、放射線感受性は高いと言われている。

甲状腺は甲状腺ホルモンという物質を作り、それを貯蔵して必要に応じて血液中に分泌する。甲状腺ホルモンは子供の頃は主に成長を促進し、大人になってからは全身の新陳代謝を調節する機能がある。甲状腺ホルモンは性別や年齢に拘わらず、一定の量が分泌され続ける。甲状腺ホルモンとはトリヨードチロニン(Triiodothyronine)とチロキシシン(Thyroxine)というヨウ素を含む2種類のアミノ酸である。甲状腺の組織は図2に示すように多数の濾胞¹からなり、濾胞を囲む濾胞上皮細胞、濾胞の外にある少数の濾胞傍細胞(C細胞)、濾胞間結合組織などで構成されている。濾胞間結合組織のなかには毛細血管が分布している。濾胞上皮細胞は甲状腺ホルモンの原料であるサイログロブリン(thyroglobulin)を、またC細胞はカルシトニン(calcitonin)というカルシウム代謝ホルモンを産生している。濾胞上皮細胞に包まれた袋の内部(濾胞腔内)はコロイドと呼ばれるゼラチン状の物質が蓄積されている。コロイドの主成分は甲状腺ホルモンの原料であるサイログロブリンという巨大タンパク質分子であり、血液中に

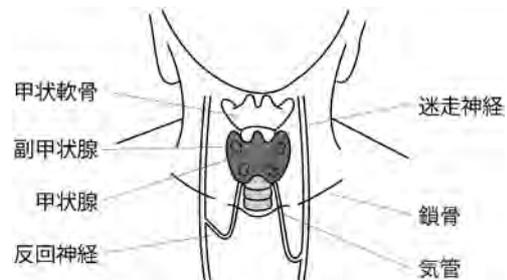


図1 甲状腺の位置(出典：石田健二他：日本原子力学会誌60(8)p19, 図1(2018)より転載)

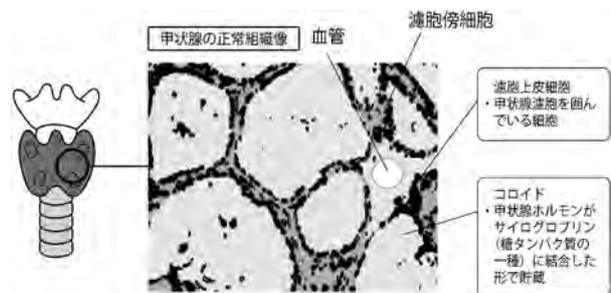


図2 甲状腺の組織(出典：石田健二他：日本原子力学会誌60(8)p19, 図1(2018)より転載)

分泌されるときにアミノ酸分子に加水分解されて上記2種類の甲状腺ホルモンとなる。

2. 甲状腺がんの種類と特性

甲状腺がんとは、それ自身が大きくなり、別の臓器に広がる可能性を持つ悪性の性質を示す腫瘍である。国立がん研究センターがん情報サービスによれば、1年間に人口10万人あたり、7人前後の割合で発生すると言われ

¹ 動物の組織、主に内分泌腺にある多数の細胞から成る完全に閉じた袋状の構造物。卵巣・甲状腺・脳下垂体中葉等に見られる。

ている。小児での発症はきわめて稀であるが、他の部位で発生するがん比べると、比較的若い年齢から発生しⁱⁱ、性別は女性が圧倒的に多く、男性の5倍以上である。2004年のWHOの分類を受け入れて2005年に改訂された甲状腺がん取扱い規約¹⁾によれば、組織の特徴(組織型)によって、甲状腺悪性腫瘍は濾胞性上皮細胞から発生する乳頭がん、濾胞がん、低分化がん、未分化がん、濾胞傍細胞から発生する髓様がん、甲状腺から発生するがリンパ組織に由来する悪性リンパ腫の6種類のがんに分類される。各甲状腺がんの特性は表1に示すとおりである。

表1に示すように、甲状腺がんの90%以上は乳頭がんであり、このがんはほとんどの場合、超音波診断と細胞診で診断がつく。乳頭がんは、「がん」という名称は付いているが、治癒する確率が極めて高く、予後(手術後の回復後)10年生存率が80~95%とされている。近年、乳頭がんは致死性の心配のない「低危険度乳頭がん」と生命に係わる可能性のある「高危険度乳頭がん」に区別され、前者は全乳頭がんの80~90%、後者は10~20%とされている。一般的には、発症年齢が高く、腫瘍が大きく、気管、食道、声帯を動かす神経(反回神経)への浸潤や、血液経路で肺、骨への遠隔転移しているものが、高危険度乳頭がん分類される。がん研究会有明病院では、遠隔転移(血液を経由する転移)がある人、年齢50歳以上で甲状腺外への明らかな浸潤があるもの、年齢50歳以上で3cm以上の大きなリンパ節転移があるものを高がん死危険度群に、それ以外のは低がん死危険群に分類している³⁾。一般のがんの場合、リンパ節への転移は生死に影響するものである。しかし、低危険度乳頭がん非常に小さい腫瘍でもリンパ節転移は起こす場合があるものの、リンパ節転移自体が生死に直接関与しないことが特徴の一つである。低危険度乳頭がんは放置しておくと同危険度乳頭がんに変化するとは考えられておらず、同じ乳頭がんであっても種類が異なるという概念で捉えられている³⁾。

とくに腫瘍の大きさが1cm以下の乳頭がんは微小乳頭がんと呼ばれ、転移や浸潤の無い無症候性の微小乳頭

ⁱⁱ 日本のがん登録(主として視診・触診で1~2cm以上のがんと診断された患者)の統計による甲状腺がんの頻度(年間に発生するがん患者の数)は、0~4歳の患者は0人で、その後年齢とともに増加し、5~9歳の患者は100万人に数人程度、さらに急速に増加して15~19歳の患者は、100万人で20人(女性)と5人(男性)程度になる。その後成人になってからも年齢とともに増加して、最高の頻度は300人(女性、60~64歳)と100人(男性、75~79歳)程度になる²⁾。したがって、甲状腺がんは小児では希であると考えられているが、15~30歳前後では必ずしも希ながんとは言えない。

ⁱⁱⁱ 死亡後の解剖で初めて見つかるがんのことを「ラテントがん」という。甲状腺がんの場合、1.0cm以下の微小乳頭がんが多く、前立腺がんにも見られる。一方、原発巣が小さく、転移巣で先に発見されるがんを「オカルトがん」という。

表1 甲状腺がんの種類と特徴(出典:文献6, 7, 8より作成)

種類	好発年齢(歳)	特徴
分化がん	30~50	乳頭がん 甲状腺がんの約90%を占める。頸部リンパ節への転移多い。予後(手術後の回復の程度)は良く、10年生存率80~95%。大半の微小乳頭がんは、増殖能に限られているため成長が止まるがんであり、リンパ節への転移があっても、致死性のがんにはならない。
		濾胞がん 甲状腺がんの約5%を占める。予後は比較的良い。10年生存率は85%である。
髓様がん	30~50	甲状腺がんの約1%を占める。突然発症または遺伝性発症。RET 遺伝子点変異 ^v あり。10年生存率は80%である。
低分化がん	55~63	甲状腺がんの約0.3%を占める。分化がん(乳頭がん、濾胞がん)の中に低分化細胞成分(分化がんと未分化がんの中間的な形態像)を含むもの。予後は分化がんより不良、未分化がんより良好。5年生存率は47~72%である。
未分化がん	60以上	甲状腺がんの約1%を占める。進行が非常に速い。予後不良。10年生存率は0%である。
悪性リンパ腫	60以上	甲状腺がんの約2~4%を占める。進行が比較的速い。予後比較的不良。10年生存率は50~70%である。リンパ組織由来のがんであり、橋本病 ^{vi} などにより浸潤したリンパ球から生じると考えられている。

がんは低危険度乳頭がんの典型である。甲状腺がん以外で死亡した様々な年齢、性別の人を調べると、その人が生涯気づいていなかった無症候性微小乳頭がんⁱⁱⁱが発見される割合は8~36%というデータがある。このことから少なくとも約10%程度の人が無症候性微小乳頭がんを潜在的に持っていると考えられる。このことは臨床的に診断される乳頭がんの罹患率0.1%以下とはかけ離れた値である³⁾。がん研究会有明病院⁴⁾と神戸の隈病院⁵⁾の手術を行わない経過観察の臨床試験結果から、甲状腺腫瘍診断ガイドライン2010年版では、無症候性微小乳頭がんに対しては、患者に対する十分な説明と同意のもとに非手術経過観察が容認されることとなり^{iv}、米国甲状腺学会(ATA: American Thyroid Association)の2015年改訂ガイドラインも、微小乳頭がん明らかな転移と浸潤がない場合、非手術経過観察が容認された。し

^{iv} 微小乳頭がんでもまれに大きなリンパ節転移や遠隔転移があり予後不良の症例があること、乳頭がんは微小がんであってもリンパ節転移率が高いことを理由に、偶然に見つかった微小乳頭がんに対して積極的に治療を行う施設も多い⁴⁾。

^v RET 遺伝子はヒト10番染色体にある遺伝子である。この遺伝子に通常の遺伝子配列とは異なる配列の変化(変異)があると、この遺伝子でコードされているタンパク質に異常をきたし、遺伝性の病気が発症する。

^{vi} 甲状腺に慢性的炎症が起きている病気であるが、細菌が入り込んで化膿するといった炎症ではなく、自分の甲状腺組織を外敵と間違えて攻撃する「自己免疫」の異常が原因で起きる炎症である。橋本病はある種のリンパ球が甲状腺組織を攻撃して起こるらしいといわれている。

かし、例えばがん研究会有明病院と隈病院の経過観察事例に20歳未満は含まれておらず、小児・若年者では非手術経過観察はまだ必ずしも奨励されている訳ではない。

II. これまでの小児甲状腺がんの情報

福島事故以前に小児および未成年者に放射線被ばくによって甲状腺がんが誘発されることは、広島・長崎の原爆被爆者、X線を用いた白癬治療、胸腺肥大治療などの医療被ばく者、ならびにチェルノブイリ原子力発電所事故で拡散された¹³¹I取込による内部被ばく者の疫学データから知られている。このような放射線被ばくにより誘発される甲状腺がんは大半が乳頭がんである。

1. 外部被ばく

Ronらは15歳未満の子供に対する外部被ばくによる甲状腺がんに関する7つの疫学研究を調査、解析した結果を1995年に発表した⁹⁾。そのうち1件は原爆被爆者の疫学解析であり、他の6件は頭部白癬症、扁桃腺肥大、胸腺肥大のため医療X線による照射治療を受けて、甲状腺の線量評価が行われた者の疫学解析であった。7つの疫学研究のうち、5件はコホート研究^{vii}、2件は症例対照研究^{viii}であった。このうち5つのコホート研究の統合解析として15歳未満の約300万人・年を対象としたプール解析^{ix}が行われた。個別の解析およびプール解析結果から、100mGy程度から甲状腺がんの有意な発がんリスクの増加が見られ、10Gyまで直線的増加が見られた。照射時年齢で見ると5歳未満で発症リスクは最も高く、年齢が増加するにつれて低下し20歳では極めて小さく、40歳以上では全く認められなかった。発症時期は照射後5年未満では殆どないが、5~9年後に増加が始まり、15~29年後で最も多くなり、40年後は減少するものの、なお発がんリスクが残存している。発症の過剰相対リスク(ERR)^xはプール解析では女性の方が男性より高いが、個別の研究では男性の方が高いものも見られた。

Veigaらは外部被ばくによる甲状腺がんに関する12の医療照射を中心とする疫学研究を調査、解析した結果

^{vii} ある特定の疾患の起こる可能性がある要因・特性を考え、対象集団(コホート)を決め、その要因・特性を持った群(暴露群)と持たない群(非暴露群)に分け、疾患の罹患や改善・悪化の有無などを一定期間観察し、その要因・特性と疾患との関連性を明らかにする疫学研究方法。

^{viii} 研究対象となる疾患や病態を有する者(症例)と、非常に似た集団であるが対象となる疾患や病態を有していない者(対照)の2つの集団を比較し、各群の病歴や生活歴から疾患または病態に関連する要因を調べる疫学研究方法

^{ix} 疫学研究等で複数の研究の元データを集めて再解析する方法。

^x 過剰相対リスク(Excess relative risk) = 暴露群の発症率(または死亡率)/非暴露群の発症率(または死亡率)-1

を2016年に発表した¹⁰⁾。これらのうち、4件はRonらが扱ったコホートの更新情報を含むものであった。12件の疫学研究の20歳未満のデータを用いた約530万人・年を対象としたプール解析が行われた。これらの個別の解析およびプール解析結果から、90mGy程度から甲状腺がんの有意な発がんリスクの直線的増加が見られた。甲状腺がん発症最少潜伏期間は5~10年の間であり、発症リスクは50年後もなお残留することが示された。照射年齢は1歳未満で発症リスクは最も高く、1~5歳でも発症リスクは高いが、それ以降は年齢増加につれて低下する。プール解析の結果、男性が女性より30%程度発症の相対リスクは高かったが信頼区間が表示されていないため、有意性は明らかでない。

Lubinらは外部被ばくによる甲状腺がんに関する原爆被爆コホート研究と8つの医療照射を中心とする疫学研究を200mGy未満と100mGy未満を対象を絞って調査、解析した結果を2017年に発表した¹¹⁾。甲状腺の吸収線量が200mGy未満と100mGy未満について、それぞれ約260万人・年と210万人・年を対象とするプール解析が行われた。その結果、甲状腺がん発症リスクは200mGyまで直線的な増加傾向を示し、とくに80mGy程度から有意な発がんリスク増加が見られた。200mGy未満のプール解析から照射年齢が1~4歳で発がんリスクは最も高く、年齢増加とともに減少した。100mGy未満のプール解析では5~9歳がもっとも高く、この年齢群以外では年齢の減少および増加とともにリスクが減少している。発症時期は照射後20年未満が最も高いが、45年以上でも発がんリスクは残存している。プール解析の結果、男性が女性より発症相対リスクは高い傾向を示した。

2. 内部被ばく

1986年4月16日のチェルノブイリ4号機の事故により、ベラルーシ共和国、ロシア連邦共和国の汚染が最も高かったブリヤンスタ州、オリョール州、カルーガ州、トゥーラ州の4州、およびウクライナ共和国の小児と未成年者に著しい甲状腺がんの増加が見られた。しかし、1986年以後に生まれた者ならびに成人で被ばくした一般住民については甲状腺がん発生率の増加は見られていない¹²⁾。UNSCEAR2008報告書附属書Dによれば、1991~2005年までに事故発生時14歳未満で5,127例、事故発生時18歳未満では6,848例が報告されている¹³⁾。UNSCEAR2017年白書では1991~2015年に登録された事故発生時18歳未満の甲状腺がんの総症例数は19,233であると報告された。チェルノブイリ事故では食品等の摂取制限がかけられなかったため、事故後数週間以内での牛乳や乳製品の摂取による¹³¹Iの甲状腺内部被ばくと主な関連があると考えられている。汚染地域から避難した小児、未成年者の甲状腺平均吸収線量は約900mGy、

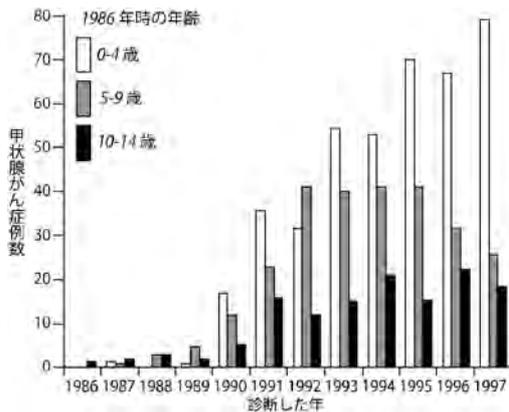


図3 ベラルーシにおける小児甲状腺がんの診断者数(出典:文献14(A.Kofler et al., Factors related to latency period in post Chernobyl carcinogenesis)のp127のFig.4より転載, Copuright©1999, World Scientific Publishing)

避難していない小児, 未成年者の場合は170mGyと推定されている。2001～2008年における18歳未満の事故の放射線被ばくに起因するとされる甲状腺がんの割合は避難者で甲状腺がんを診断された人の60%, 非避難者では25%と推定されている¹²⁾。UNSCEAR2000報告書附属書Jによれば, 図3に示すように事故後4年目の1990年からベラルーシの小児甲状腺がんの診断数は増加を始めた¹⁴⁾。とくに事故時4歳以下の小児は著しく, 次が事故時5歳～9歳が高く, 事故時年齢が高いほど発症率は低くなった。Cardisらは, 図4に示すように, 事故時ではなく各年のベラルーシの小児(14歳以下), 青年(15～18歳), 若い成人(18～34歳)の罹患率を調査したが, 甲状腺がんの発症年齢層は, 事故後4～10年後頃までは4歳以下が多いが, 次第に未成年に移行し, 2001年をピークとして青年期の発症は減少したが, 成人期の発症は上昇を続けている¹⁵⁾。光武らは「小児期甲状腺がんの増加」から「小児期被ばくによる成人期甲状腺がんの増加」へと認識を変える必要があると述べている¹⁶⁾。ただし, チェルノブイリ事故以後に受胎した子供には甲状腺がんの過剰発生は認められていない¹⁷⁾。

3. 放射線に関連する甲状腺がんの特異性

鈴木は, 現時点では放射線被ばくに関連する甲状腺がんの特徴は見つかっていないとしている。放射線被ばくは線量に応じて甲状腺がんの罹患頻度は高くなるが, 放射線被ばくに関連性を持つ甲状腺がんの組織型, 性比, 遺伝子変異が存在するか否かは確立していないと記載している¹⁸⁾。チェルノブイリ事故後多発した小児甲状腺がんは乳頭がんとして組織亜型は充実型^{xi)}であり,

^{xi)} 充実型乳頭がんは充実性構造を呈して増殖する乳頭がんの一亜型(サブタイプ)で, 成人発生の甲状腺がん比べて小児の甲状腺がん頻度が高いことが知られている。福島事故後, 福島県の実施した甲状腺検査で発見された乳頭がんの大半は古典型(通常型)乳頭がんであった。

RET/PTC 遺伝子変異^{xii)}が多く見つかったため, これらは被ばくと関連を持つと考えられていた。しかし, チェルノブイリ周辺地域の被ばく症例だけでなく, 非被ばく症例でも同じ割合で発見されているため¹⁹⁾, 現在では被ばく以外の地理的条件, 食生活(ヨード摂取量など)が影響すると考えられている²⁰⁾。UNSCEAR2017白書では, ドイツの研究グループがCLIP2 遺伝子^{xiii)}の過剰な発現^{xiv)}が未成年で発生する放射線に関連する甲状腺がんにおいて統計的に有意に識別できると報告している。しかし, まだ他の研究グループによる再現はなされていない¹⁸⁾。

III. まとめ

チェルノブイリ事故以前から, 原爆被爆ならびに医療被ばくによる外部被ばくに関連して小児に対して甲状腺がん発症の増加があることは知られていた。そして1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故で放出された¹³¹Iを含む牛乳などの乳製品摂取により, 甲状腺が内部被ばくを受けたことによる未成年者の甲状腺がん発症増加が確認された。しかし UNSCEAR2017年白書では, 2001～2008年の期間にチェルノブイリ事故による汚染地区で18歳未満の未成年者に発症した甲状腺がんは, すべてが放射線被ばくに起因するものではなく, 被ばく線量の高いグループ(汚染地区からの避難者)で約60%, 低いグループ(汚染地区からの非避難者)で約25%と推定評価している。

過去の事例調査から, 放射線被ばくに起因する甲状腺がん発症には以下の特徴があることが明らかになった。

- ・甲状腺吸収線量がおおよそ100mGy以上の範囲では, 発症率は甲状腺吸収線量と有意な関連性がある。
- ・発症率は被ばく時年齢依存性があり, 特に5歳未満は発症リスクの増加が顕著であるが, 年齢増加とともに低くなり, 20歳以上では殆ど増加しない。
- ・発症率の過剰相対リスクの男女差は有意でない。
- ・発がんリスクは被ばく後数十年以降でも存在する。
- ・放射線被ばくに起因する組織型, 性比, 遺伝子変異の特徴は明らかになっていない。

— 参考資料 —

- 1) 甲状腺外科研究会編, 甲状腺癌取扱規約, 第6版, 金原出版, 東京, (2005)。
- 2) 世界の甲状腺がんの現状:

^{xii)} DNA二重鎖切断により, 他の遺伝子と再構成で生じる融合遺伝子変異の一種である。現在までに少なくとも15種類の報告がある。RET/PTC 遺伝子転写産物は細胞増殖を刺激することでがん化につながるとも言われている。

^{xiii)} 細胞小器官と微小管(細胞の運動や形の保持に関与する細胞骨格の一つ)を接合するタンパク質の合成に関連する遺伝子

^{xiv)} 遺伝子もっている遺伝情報が, さまざまな生体機能をもつタンパク質の合成を通じて具体的に現れること

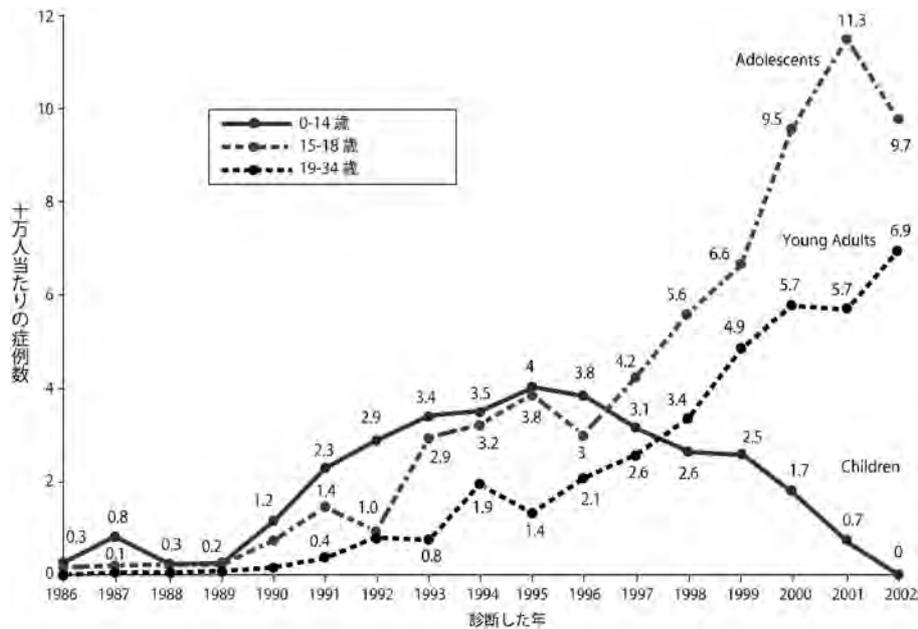


図4 ベラルーシにおける小児、青年期、成人の甲状腺がんの年間罹患率(出典：文献15(E.Cardis et al. Consequences of the Chernobyl Accident)のp132のFigure1より転載)

https://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g78.html

3) 日本医科大学内分泌外科 甲状腺の病気について～甲状腺がんを中心に～
<http://www2.nms.ac.jp/nms/surgery2/sinryo/data/kaisetsu.pdf>

4) 杉谷巖他, 頭頸部腫瘍, 27(1),102-106,(2001).

5) Y.Ito et al, Thyroid, 13(4),381-387, (2003).

6) 医療情報科学研究所(編),病気がみえる「vol.3 糖尿病・代謝・内分泌」, メディックメディア, 2014年9月.

7) 伊藤病院 甲状腺の病気について
http://www.ito-hospital.jp/02_thyroid_disease/02_7_labout_nodle.html

8) 千葉 知宏ほか, 日本内分泌・甲状腺外科学会雑誌 33(2) (2016) 78-82.

9) E.Ron et al., Radiation Research 141(3), 259-277 (1985).

10) L. H.Veiga et al., Radiation Research 185,473-484 (2016).

11) J.H.Lubin et al., J.Clin Endocrinol.Metab. 102(7), 2575-2583 (2017).

12) UNSCEAR 2017 white paper, Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by Chernobyl accident (2018).

13) UNSCEAR 2008 Report Vol. II. Scientific Annex D (2011).

14) A.Kofler et al., Factors related to latency period in post Chernobyl carcinogenesis. Radiation and Thyroid Cancers, Proc. Of internal seminar held at St. john's college, Cambridge, UK, 2-23 July 1998 (G. Thomas et al, Ed.) World Scientific, Singapore, 123-129(1999).

15) E.Cardis et al.,J. Radiat. Prot. 26,127-140 (2006).

16) 光武範吏他, 日本内科学会雑誌, 99(4), 786-791(2010).

17) Y.Shibata et al., Lancet 358(9297) 1965-1966 (2001).

18) 鈴木元, 県民健康調査検討委員会, 第9回甲状腺検査評価部会_資料8 (2018)
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/250466.pdf>

19) Y.E.Nikov, Endocrine Pathology 17(4), 307-317 (2006).

20) 近藤哲夫他, 内分泌甲状腺外会誌 30(4), 276-280 (2013).

福島第一発電所事故後の福島県における 小児・青年期の甲状腺がん疫学調査研究について

2. 福島県県民健康調査における甲状腺検査結果

2011年3月の福島第一原子力発電所事故で、周辺環境に¹³¹Iを含むプルームが拡散した。2011年10月から、事故時に福島県在住の18歳以下の未成年者の健康を長期的に見守る目的で、約37万人を対象として超音波検査装置を用いた甲状腺検査が、2018年6月現在までに先行検査、2回の本格検査の計3回の検査が実施されてきた。本稿では甲状腺検査の手順、実施計画ならびに検査結果について記述し、チェルノブイリ事故後に発生した小児甲状腺がんと病理診断、遺伝子変異、被ばく時年齢、発生時期の観点から比較する。

KEYWORDS: Fukushima Nuclear Power Accident, Fukushima health management survey, thyroid ultrasound examination, nodule, cyst, sporadic childhood thyroid cancer

I. 甲状腺検査の手順と実施計画

福島県が行っている県民健康調査は、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故による放射性物質の拡散や避難等を踏まえ、県民の被ばく線量の評価を行うとともに、県民の健康状態を把握し、疾病の予防、早期発見、早期治療につなげ、もって、将来にわたる県民の健康の維持、増進を図ること」¹⁾を目的として実施されている。この調査には、基本調査と詳細調査があり、さらに詳細調査には甲状腺検査、健康診査、こころの健康度・生活習慣に関する調査および妊産婦に関する調査の4項目がある。

県民健康調査の一項目である甲状腺検査は、チェルノブイリ原子力発電所事故の後に認められた放射性ヨウ素の摂取による小児甲状腺がんの発生を踏まえ、「子どもたちの甲状腺の状態を把握し、健康を長期的に見守ること」²⁾を目的とし、実施されている。

県民健康調査について、専門的な見地からの助言等を得ることを目的として、様々な分野の有識者から成る検討委員会が設置されており、年間4~5回の頻度で調査の手法や結果等について議論が行われている³⁾。

また、甲状腺検査について、病理、臨床、疫学等の観点から専門的知見を背景とした議論を深め、適切な評価を行っていくために、同委員会の下に「甲状腺検査評価部会」が設置されており、年間数回の頻度で議論が行われている⁴⁾。

甲状腺検査では、先行検査と本格検査が実施されている。前者の先行検査は、放射線影響の出る前の時期状況と、後者の本格検査の結果を比較することを目的に、2011年10月から実施された。対象者は県外避難者を含む福島県全県民のうち、福島第一原子力発電所の事故が起きた2011年3月11日時点で概ね18歳以下であった約37万人としている。一方、本格検査は2014年4月よ

り第1回の検査(正式名称は「本格検査(検査2回目)」であり、以後正式名称を用いる)が開始された。ここでは先行検査の対象者に加え、平成2011年4月2日から2012年4月1日までに生まれた子供を追加している。これに続く本格検査(検査3回目)は2016年5月1日より開始されている。対象者は本格検査(検査2回目)と同じである。20歳を超えるまでの対象者に、2016・2017年度の2ヶ年で市町村順に検査を実施し、それ以降は市町村順の枠組みをなくし、受診者に対し受診時期を分かりやすくするため、25歳、30歳等の5年ごとの節目の検査を実施することとしている。ただし、25歳時の検査までは5年以上空けないことにしている。

検査手順を図1に示すが、先行検査および本格検査の手順は共通である。まず一次検査として超音波画像診断装置を用いた甲状腺の超音波検査を実施し、複数の専門医で画像の判定を行う。一次検査の結果は、結節またはのう胞ⁱが認められなかったものをA1判定、通常の診療で正常範囲内の変化とみなされる5.0mm以下の結節や20.0mm以下ののう胞が認められたものをA2判定としている。5.1mm以上の結節、20.1mm以上ののう胞が認められたもの、および、A2判定であっても二次検査の必要性が認められるものはB判定、甲状腺の状態から直ちに二次検査を要すると認められるものはC判定という区分をしている。一次検査でA1またはA2判定とされた者は、次の検査となる。二次検査は、一次検査

ⁱ 「のう胞」とは甲状腺にできた体液の貯まった袋状のものであり、健康者でも見つかることが多い良性のものである。中には、のう胞の内部に結節を伴うものがあり、このような場合、通常、のう胞と診断されることが多い。しかし、福島県の甲状腺調査では、結節を見つけることが目的であるため、結節と判定している。「結節」とは甲状腺の一部にできる充実性の塊であり、良性のもの、悪性のもの(がん)がある。最近では、超音波検査機器の精度が上がったことで、かなり小さいものでも、見つかることが多い。

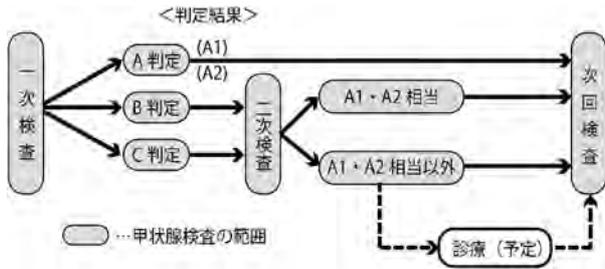


図1 甲状腺検査の手順(出典：文献5のp②-2の図をもとに著者作成)



図2 福島県「県民健康調査」甲状腺検査実施実績および計画

でB判定またはC判定とされた者を対象とし、問診、詳細な超音波検査や血液検査、尿検査が実施され、必要があれば穿刺吸引細胞診ⁱⁱ(せんしきゅういんさいぼうしん)が実施される。早期に診察が必要と判断された者は優先的に二次検査が実施される。なお、二次検査の結果によっては、診療(予定)となる場合がある。

2018年6月現在までの甲状腺検査の実施実績ならびに計画については図2に示すとおりであり、2018年6月時点では、本格検査(検査第3回目)は実施中である。

II. 検査結果

1.3回の検査結果

先行検査、本格検査(検査2回目)、および本格検査(検査3回目)の結果をそれぞれ表1~3に示す。これらの表の数値は、第30回福島県「県民健康調査」検討委員会(2018年3月5日、2017年10月23日、2017年6月5日)資料に基づくものである。一次検査でB判定であった被験者が2次判定でA判定となっている場合が、先行検査で34%、本格検査(検査2回目)で24%、本格検査(検査3回目)で10%存在する。この理由として、1次検査と2次検査では使用している超音波画像診断装置の精度が異なること、のう胞およびのう胞内の結節は、のう胞内の液量に変化する場合があるため、判定結果が変化する場合が生じたことが考えられる。

2018年3月5日の時点で、細胞診で悪性または悪性の疑いのある被験者は197人(男77人、女120人)であり、そのうち手術を受けたのは159人で157人は乳頭がん、

ⁱⁱ 注射と同じ細い針で結節から細胞を吸い取り、顕微鏡で細胞の形や核の形を見て、良性か悪性かなど性質を調べる検査である。高い確率で良性、悪性などの性質が判る。

表1 先行検査結果(出典：文献6のデータより著者作成)

検査対象者	対象人数[人]
受診者	受診人数[人] (対象人数に対する割合[%])
結果確定者	結果確定数[人] (受診人数に対する割合[%])
判定区分	判定人数[人] (結果確定数に対する割合[%])
一次検査対象者	367,649
受診者	300,473 (81.7%)
結果確定者	300,473 (100.0%)
A1	154,605 (51.5%)
A2	143,574 (47.8%)
B	2,293 (0.8%)
C	1 (0.0%)
二次検査対象者	2,293
受診者	2,130 (92.9%)
結果確定数	2,090 (98.1%)
A1	132 (6.3%)
A2	579 (27.7%)
A1・A2相当以外	1,379 (66.0%)
A1・A2相当以外のうち 穿刺吸引細胞診の受診者	547
悪性ないし悪性疑い	116 (21.2%)
手術実施	102 (70.4%)
乳頭がん	100 (98.0%)
低分化がん	1 (1.0%)
良性結節	1 (1.0%)

1名は低分化がん、そして1名は良性結節であった。現時点の甲状腺がんの分類はWHO分類等に基づく甲状腺癌取扱い規約(第7版)ⁱⁱⁱに従うものである。

細胞診で悪性または悪性の疑いのある被験者の事故時の年齢分布は、先行検査で14.9 ± 2.6歳(6~18歳)、本格検査(検査2回目)では12.6 ± 3.2歳(5~18歳)、本格検査(検査3回目)では10.7 ± 2.7歳(6~16歳)であり、検査で発見された被験者の年齢分布はそれぞれ17.3 ± 2.7歳(8~22歳)、16.9 ± 3.2歳(9~23歳)、16.4 ± 2.8歳(12~22歳)のように、ほぼ16~17歳が平均であった。平均腫瘍径は、先行検査で13.9 ± 7.8mm(5.1~45.0mm)、本格検査(検査2回目)では11.1 ±

ⁱⁱⁱ 甲状腺癌取扱い規約(第7版)ではWHOの診断基準に合わせ、低分化成分が腫瘍全体の50%以上を占め乳頭がんに典型的な核所見が見られない腫瘍を低分化がんとして定義した。その結果、第6版に従って低分化がんとして分類された2例が乳頭がん充実型に再分類された(日本甲状腺外科学会編：甲状腺取扱い規約第7版、金原出版、東京、2015)

表2 本格検査(検査2回目)(出典:文献6のデータより著者作成)

検査対象者	対象人数[人]
受診者	受診人数[人] (対象人数に対する割合[%])
結果確定者	結果確定数[人] (受診人数に対する割合[%])
判定区分	判定人数[人] (結果確定数に対する割合[%])
一次検査対象者	381,256
受診者	270,516 (71.0%)
結果確定者	270,515 (100.0%)
A1	108,710 (40.2%)
A2	159,578 (59.0%)
B	2,227 (0.8%)
C	0 (0.0%)
二次検査対象者	2,227
受診者	1,844 (82.8%)
結果確定数	1,788 (97.0%)
A1	63 (3.5%)
A2	360 (20.1%)
A1・A2相当以外	1,365 (76.3%)
A1・A2相当以外のうち 穿刺吸引細胞診の受診者	205
悪性ないし悪性疑い	71 (34.6%)
手術実施	50 (70.4%)
乳頭がん	49 (98.0%)
その他の甲状腺がん	1 (2.0%)

表3 本格検査(検査3回目)(出典:文献6のデータより著者作成)

検査対象者	対象人数[人]
受診者	受診人数[人] (対象人数に対する割合[%])
結果確定者	結果確定数[人] (受診人数に対する割合[%])
判定区分	判定人数[人] (結果確定数に対する割合[%])
一次検査対象者	336,640
受診者	191,669 (56.9%)
結果確定者	179,038 (93.4%)
A1	63,314 (35.4%)
A2	114,525 (64.0%)
B	1,197 (0.7%)
C	0 (0.0%)
二次検査対象者	1,199
受診者	659 (55.0%)
結果確定数	573 (86.9%)
A1	5 (0.9%)
A2	52 (9.1%)
A1・A2相当以外	516 (90.1%)
A1・A2相当以外のうち 穿刺吸引細胞診の受診者	31
悪性ないし悪性疑い	10 (32.2%)
手術実施	7 (100.0%)
乳頭がん	7 (100.0%)
その他の甲状腺がん	0 (0.0%)

5.6mm(5.3~35.6mm), 本格検査(検査3回目)では14.0 ± 7.2mm(8.7~33.0mm)であった。

2. 福島で発見された甲状腺がんの特徴

福島の検査で発見された甲状腺がんは、1症例の低分化がん以外はすべて乳頭がんであった。Yamashitaらは、福島医大で手術が行われた125の症例について以下の様に記載している⁷⁾。手術を受けた甲状腺がんの平均腫瘍径(14mm)と遠隔転移^{iv}率(2%)は日本における過去の小児甲状腺がんの症例と対照的であり、過去の研究では平均腫瘍径40mm, 肺転移率19%であった。このことは事故以前、小児甲状腺がんは、福島の甲状腺検査に比べ、より進行した段階になってから見つけれられていたよ

^{iv} がんが発生した場所から離れた臓器に転移することを遠隔転移という。遠隔転移はおおむね血行性転移によって発生する。一方、リンパ節転移の特徴は、がんの発生場所から最も近いリンパ節に転移し、順々に隣のリンパ節に転移していくことである。遠隔のリンパ節にいきなり転移する可能性は少ない。

うに考えられると記載している。しかし、福島の検査で発見された甲状腺がんの病理的所見としては、リンパ節転移率と甲状腺外腫瘍拡張率は高く、特にリンパ節転移率は70%を超えていたが、これは一般の小児の乳頭がんにもよく見られる症状であると説明している。手術前に浸潤も転移も認められなかった微小甲状腺がんが44症例発見されたが、そのうち11人は経過観察でなく手術を選択した^v。

福島の検査で発見された甲状腺がんの遺伝子変異は、表4に示すように「1種類の遺伝子(BRAF)の異常として発現し」、チェルノブイリ事故で被ばくした小児に多く発生した「2種類の遺伝子(RETとPTC)の配列の再構成(遺伝子再構成と呼ぶ)に起因する」乳頭がんとは大きく異なっている。それは、表5に示すように日本人の成人に多く見られる「遺伝子再構成に基づく」乳頭がんの遺伝子変異に近いと言える。ちなみにチェルノブイリ事故

^v 大学進学や就職等で福島県を離れる場合に経過観察(6か月に1回、超音波検査と血液検査)ではなく、手術を選択する場合がある。

表4 福島事故とチェルノブイリ事故における乳頭がんの遺伝子変異

(出典：文献7のp313のTable1および文献8の数値データから著者作成)

遺伝子変異	自然発生 *3 7) (全世代)	自然発生 *3 7) (小児)	チェルノブイリ被ばく者 ⁷⁾	福島の甲状腺検査 ⁸⁾
BRAF	40-45%	3-6%	0* ¹ 4-16%* ²	63.2%
RAS	10-15%	0	0	0
RET/PTC	20-30%	50-60	64-86%* ¹ 50-60%* ²	10.3%
AKA β -BRAF	1%	—	11%* ¹ 0* ²	0
TRK	0-10%	—	3-7%	5.9%

*1：短潜伏期(被ばく後<7-10年)*2：長潜伏期(被ばく後*9-10年)*3自然発生は主にチェルノブイリ周辺の非被ばく者の症例に基づく

表5 日本人の乳頭がんの遺伝子変異
(出典：文献9のp14のFig.2から著者作成)

遺伝子変異の種類	自然発生 (日本人成人) 13-87(51)*	福島の甲状腺検査 9-23(18)*
点変異	75%	68%
遺伝子再構成	15%	25%
その他	10%	7%

*年齢範囲(平均年齢)

被ばく者の小児甲状腺がん遺伝子変異の種類は、成人を中心とする全世代で自然発生する甲状腺がんの遺伝子変異とも異なっており、チェルノブイリ周辺の小児で事故被ばくをしていない者(自然発生の小児甲状腺がん)の変異の種類に近い。

甲状腺がん発生患者の事故発生時の年齢分布を比べると、チェルノブイリでは4歳以下が最も多いが¹⁰⁾、福島ではほぼすべて5歳以上であり、平均年齢は3回の検査はそれぞれ、14.9歳、12.6歳、10.7歳であり、どれも10歳を超えている。発生時期もチェルノブイリでは4年後から増加が始まったが、福島では半年後に始まった先行検査の段階ですでに検出されている。

III. まとめ

福島県では子供たちの甲状腺の状態を把握し、健康を長期的に見守ることを目的として、福島事故時18歳以下であった福島県民約37万人(県外避難者を含む)に対して、2011年10月から超音波画像診断装置等を用いて、甲状腺検査を開始した。2018年3月5日の時点で、細胞診で悪性または悪性の疑いがある者は197名で、手術を受けた159名中、乳頭がんが157名、低分化がんが1名見つかった。この数値は19歳以下の国立がんセンターの甲状腺がん平均年間罹患率¹¹⁾(2人/100万人/年)と事故発生から健診で見つかるまでの最長期間7年間として求めた発症数と比較すると数十倍の値となる。しかし一方で、遺伝子変異のタイプ、被ばく時年齢、被ばく後の発生時期は、チェルノブイリ事故後被ばくした未成年者に発生した小児甲状腺がんとはかなり異なっており、遺伝子変異は、日本人の自然発生の成人甲状腺がんに近い。このような現状を踏まえ、放射線の影響の観点から福島の甲状腺検査結果の解釈について様々な議論が開始された。

— 参考資料 —

- 1) Fukushima International Medical Science Center. Fukushima Prefecture Health Management Center. Fukushima Prefecture Health Survey. Summary and Current Status.
<http://fukushima-mimamori.jp/outline/report/index02.html>.
- 2) Fukushima International Medical Science Center. Fukushima Prefecture Health Management Center. Thyroid Examination.
<http://fukushima-mimamori.jp/outline/report/index04.html>.
- 3) Fukushima Prefecture Health Survey Committee. Fukushima Revitalization Station Revitalization Information Portal Site.
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/kenkocoyosa-kentoinkai.html>.
- 4) Fukushima Prefecture Health Survey Committee. Fukushima Prefecture Health Survey Committee. Fukushima Revitalization Station Revitalization Information Portal Site.
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/kenkocoyosa-kentoinkai-b.html>.
- 5) Fukushima Prefecture. 8th Thyroid Examination Evaluation Committee. Material 2-1
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/kenkocoyosa-kentoinkai-b8.html>.
- 6) Fukushima Prefecture Health Survey Committee. 30th Reference Material 3
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/255429.pdf>
- 7) Y.E.Nikiforov et al., Endocrine Pathology 17 (4), 307-318 (2006).
- 8) N.Mitsutake et al., Scientific reports 5 (2015): 16976.
- 9) S.Yamashita et al., Thyroid 28(1) 11-22 (2018).
- 10) UNSCEAR 2000 report Vol. II. Scientific Annex J (2000).
- 11) A.Matsuda et al., JPN.J. Clin. Oncol. 43, 328-336 (2013).

福島第一発電所事故後の福島県における 小児・青年期の甲状腺がん疫学調査研究について

3. 甲状腺検査結果に対する見解

福島県県民健康調査の一環で実施された福島県の未成年者に対する甲状腺検査結果では従来の未成年者の甲状腺がん罹患率の数十倍の値が出た。しかし高性能の超音波画像診断装置を用いたことによる影響、チェルノブイリ事故との被ばく線量、発生数増倍年齢、発生時期、遺伝子変異型の違い等を踏まえ、福島の甲状腺検査の結果の解釈については2種類の相異なる見解が発表されている。本稿ではそれらの見解と UNSCEAR (原子放射線の影響に関する国連科学委員会) の見解の概要を解説する。

KEYWORDS: screening effect, overdiagnosis, prevalence of thyroid cancer, papillary carcinomas, Korean's thyroid cancer epidemic, Japanese national cancer Center, UNSCEAR report

I. 甲状腺線量の再構築

福島での甲状腺検査結果を検討評価する場合、甲状腺の吸収線量(または等価線量)はきわめて重要な指標である。2012年 WHO は日本政府の公表した暫定的な環境中の放射性物質の測定値と環境モデルに基づいて外部被ばくおよび内部被ばくにより、福島県内で最も影響を受けた地域の幼児の事故後1年間の甲状腺等価線量を122mSvと評価した。そして県内の他の地域の幼児の甲状腺等価線量を31~73mSvの幅にあると評価した。そして、これらの評価値は保守的な仮定をもとに評価しており、過大評価の可能性があることも認識していると記載している¹⁾。UNSCEAR2013年レポートでは、計画的避難区域および予防的避難区域の1歳児の事故後1年間の甲状腺吸収線量の推定平均値の範囲は47~83mGyと評価した。この値は事故後数日間および避難中、大気中の¹³¹I等の放射性物質吸入摂取による内部被ばくと避難後の飲料水、食品からの経口摂取による内部被ばくを合算して評価している。福島県の避難区域外の1歳児は33~52mGyと評価した²⁾。

Unnoらは2011年4月24日~5月31日に福島第一原子力発電所から250km以内にいた119人の授乳婦から124の母乳試料を採取して、¹³¹I濃度を測定し、7人の試料から¹³¹Iを検出した³⁾。環境省が主催する「東京電力福島第一発電所事故に伴う健康管理に関する専門家会議」(第6回2014年5月20日)では、この実測値に基づいて授乳婦の¹³¹Iの摂取量を3通りのシナリオで評価し、乳児の甲状腺等価線量を評価した結果を発表している。授乳婦が3月15日にすべて急性経口摂取したと仮定した場合、乳児の甲状腺等価線量は350~1,200mSv、授乳婦が慢性的に1日1Bqで経口摂取したと仮定した場合は0.25~1mSvとしている。授乳婦が¹³¹Iの物理的半減期で減衰する量に応じて毎日経口摂取した場合は2~

8mSvになるとしており、この数値が最も現実的であるとしている⁴⁾。

Nagatakiらは、15歳以下の飯館村の315人、川俣町の631人、いわき市の137人の合計1,080人の子供の甲状腺をNaI(Tl)シンチレーションサーベイで2011年3月26~30日にモニタリングしたデータと2011年3月12日摂取という仮定を用いて、甲状腺等価線量が10mSv未満となるのは95.7%で、最大でも35mSvであると2013年に発表した⁵⁾。その後、Nagatakiらは2011年3月12日から測定前日まで摂取があったと仮定すれば、14歳以下の子供1080人の調査データから、99%の甲状腺等価線量は15mSv未満であると発表した⁶⁾。2016年、KimらはNagatakiらと同じ1,080人の子供の甲状腺モニタリングデータ、約3,000人の成人の¹³⁴Cs、¹³⁷CsのWBC測定データ、¹³¹IとCsの摂取比データ、WSPEEDI-IIコードⁱを用いた放射性物質の大気拡散シミュレーションデータを用いて、1歳児の甲状腺等価線量の90%タイル値ⁱⁱを求めた。その結果、双葉町、飯館村、いわき市では30mSv、大熊町、広野町、浪江町、葛城町、南相馬市では20mSv、富岡町、楡葉町、川俣村では10mSvでそれ以外の福島県の地域では10mSv未満となった⁷⁾。

鈴木は、環境省の実施する「東京電力福島第一原子力発電所事故における住民の線量評価に関する包括研究」の経過報告を2017年10月23日の第28回福島県「県民

ⁱ WSPEEDY-IIとは世界版緊急時環境線量情報予測システム第2版のことであり、原子力事故時に大気中に放出される放射性物質の局地域~半球域での拡散を迅速に予測する数値シミュレーションコードシステムである

ⁱⁱ 計測値の分布(ばらつき)を小さい数字から大きい数字に並べ替え、パーセント表示することによって、小さい数字から大きな数字に並べ変えた計測値においてどこに位置するかを示す方法であり、90パーセントイルであれば小さい方から数えて90番目に位置する値である。

健康調査]検討委員会で行っている⁸⁾。この報告では UNSCEAR2013 年レポートで評価された飲料水、食品からの¹³¹I は大きく見積られている可能性があるとして、住民の行動パターン、食品、飲料水の流通実態、¹³¹I の空間分布の詳細化、家屋中の滞在時間、遮蔽係数の詳細化を行った結果、1 歳児の甲状腺等価線量の地区平均値は、飯館村、浪江町で 40mSv 未満、富岡町、大熊町、双葉町、橋本町、広野町、南相馬市、田村市、川内村で 18mSv 未満、川俣町、葛尾村で 12mSv 未満となり、UNSCEAR2013 レポートの値の 7~69% となった。しかしこれらの線量値は個人毎の甲状腺の吸収線量を評価したものではなく、一部の測定値と様々なモデルに基づく代表的な値という位置付けである。これらの値はチェルノブイリ事故に関して評価されたチェルノブイリ周辺の小児・未成年者の甲状腺吸収線量ⁱⁱⁱに比べるとはるかに小さい。

II. 甲状腺検査結果に対する見解

1. スクリーニング効果と過剰診断

従来の罹患率以上に甲状腺がんが発見されたため、臨床症状をもたらす疾患を前倒して発見する早期発見であるのか、それとも、将来的にも、自覚症状や死亡原因とならない疾患を発見する過剰診断であるのかということが問題となった^{iv}。検査をして早期発見する選別手法を狭義でスクリーニングと言うが、早期発見だけでなく過剰診断ももたらす選別手法を広義のスクリーニングと言う。スクリーニングにより疾患の発見数が増加する影響をスクリーニング効果という。福島県「県民健康調査」の甲状腺検査で発見される未成年者の甲状腺がんが、原発事故由来の¹³¹I による放射線被ばくから起因するか否かが問題となった。一次検査では超音波検査を、スクリーニングとしての位置付けで 36 万人を超える福島県の未成年者に対して実施して 80% を超える人々が受診した。このような大規模な甲状腺検査は国内外で初めてのことであった。この検査結果を分析して、検査で発見された甲状腺がんの発症と原発事故による¹³¹I 等の放射線被ばくとの関係性を検討している論文が発表されている。以下にそれらの論文等を紹介する。

ⁱⁱⁱ UNSCEAR2017 白書によれば、事故後避難した小児および未成年者の甲状腺吸収線量は平均的に 900mGy、避難していない場合は 170mGy と推定している。

^{iv} 前稿(1. 甲状腺がんの種類ならびに福島事故以外の情報)の 2 章に詳細なことは記載されているが、自覚症状が無く放置しておいても生死に関与しない“低危険度乳頭がん”というものが、全世代で少なくとも 10% の人が無症候性微小乳頭がんを潜在的に持っている可能性があると言われている。

2. 放射線による影響の可能性を否定できないと見なす見解

Tsuda らは福島県の実施した甲状腺検査で先行検査(検査 1 回目)および本格検査(検査 2 回目)の 2015 年 3 月 31 日までのデータを、福島県全体を 8 つの地区に分けて解析し、各地区の甲状腺がんの罹患率(または有病率)の比を評価している⁹⁾。外部比較の基準値となる甲状腺がん罹患率は、国立がんセンターによる年間平均罹患率から導出した値^vを使用している。一方、内部比較としては、罹患患者数がゼロでないが受診結果確定者に対する割合が最も少ない県東南地区(須賀川市など)を基準にとった数値比(オッズ比^{vi})を用いており、このオッズ比を、有病率^{vii}オッズ比と表記している。

内部比較では、有病率オッズ比が最大の地区である中通り中央地区(本宮市、二本松市など)でも 2.6 (0.99 - 7.1)^{viii}であり、95%信頼区間を考慮すれば有意な差異はない。しかし外部比較では国立がんセンターの示す罹患率値に比べると、罹患率比は、最も高い中通り中央地区で 50(25-90)、最も低い県東南地区でも 20(7.9-40)である。これらは、20~50 倍高い値となっており、Tsuda らはこれをスクリーニング効果(広義)だけで説明するにはあまりにも大きすぎると判断した。そして以下の 4 つの理由、①福島医大で手術を受けた 54 症例のうち、40 症例にリンパ節転移が見られた。このことは甲状腺がんが早期のステージではない。②先行検査ではがんが発見されなかった 8 人に次の検査で甲状腺がんが発見されており、このことは潜在的ながんを発見した訳ではない。③チェルノブイリ事故後 3 年以内に小さな過剰発生が観察されている。④米国疾病予防管理センター (US Center for Disease Control and Prevention) によれば小児甲状腺がんの被ばくから発症までの期間は経験上最短で 1 年である。以上の理由から 2011 年度において、福島事故に

^v 国立がんセンターによる甲状腺がんの 2001~2008 年の平均年間罹患率は 19 歳以下で 2 人/100 万人/年、5-24 歳で 6.5 人/100 万人/年であり、これらの数値をもとに Tsuda らは、福島県の検査対象者の年齢構成を考慮して、3 人/100 万人/年を設定した。そして先行検査(検査第 1 回目)に対しては、福島事故発生から甲状腺がん検出までの期間を参考にして長めの切れの良い数値である 4 年とし、2 巡目の本格検査(第 2 回検査)に対しては 3 年としている。この論文では、発見された甲状腺がんはすべて事故後に発生し健診で見つかるまで進行したと仮定していると考えられる。

^{vi} 過去を振り返って、2 つの集団にどのくらい特定の要因(この場合は甲状腺がん有病率)があったかを比較する数値であり、未来を見据えてある要因が 2 つの集団に及ぼす影響を評価するリスク比とは別の概念である。疫学研究では一般的に症例対照研究でオッズ比を用い、コホート研究ではリスク比を用いる。

^{vii} 有病率は調査期間中に疾患(この場合は甲状腺がん)に罹っている人の割合を示すものであり、期間中の発症率を示す罹患率とは異なる。

^{viii} 括弧内は 95%信頼区間を表す。

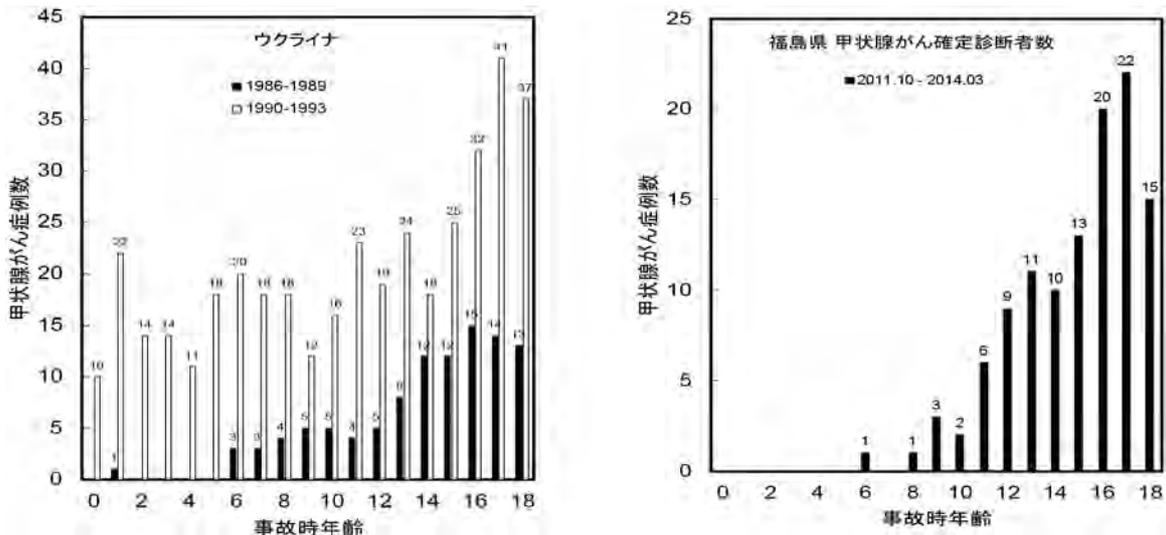


図1 チェルノブイリ事故後のウクライナの甲状腺がん症例数と福島の甲状腺がん確定診断者数の事故時年齢分布(出典：ウクライナは文献11，福島は文献12のそれぞれの数値データから著者作成)

関連する甲状腺がんが超音波画像診断装置を用いたスクリーニング検査で発見されたとした。

3. 放射線による影響の可能性の積極的証拠はないとする見解

Takamuraらは、福島県の検査結果は高感度の超音波画像診断装置を用いたためのスクリーニング効果(広義)の可能性が高いとしている¹⁰⁾。Takamuraらは、チェルノブイリ事故後の甲状腺がんとは比べ、甲状腺の受けた線量、事故後甲状腺がんが多発した時期、および発症例が多い年齢層を比較して、福島での甲状腺がんはチェルノブイリ事故後に多発した小児甲状腺がんとは異なった様相であるとして、上記の結論を出している。Takamuraらが実施した比較をまとめて表1に示す。

ウクライナにおける18歳以下の小児甲状腺がんの症例数と福島県の検査で発見された症例数を図1に示す。この図からチェルノブイリでは事故の4年後から甲状腺がん症例数が増加している。事故当時の5歳未満の年齢群では、事故後4年以内の発症例はほとんど見られないが、4年後以降は急増しており、この年齢群での発症と発症時期がチェルノブイリ小児甲状腺がんの特徴と考えられている。一方、5歳を超えた年齢群では事故直後から発症しており、事故当時10歳以上の年齢群で発症例が多い。この発症者数の年齢分布は福島の事例に類似している。2018年3月までの福島県の県民健康調査の検討委員会資料によれば2017年度までに福島では5歳未満での発症例は見られない^{ix}。

図1から福島の甲状腺がんの年齢分布は、図2に示す

^{ix} 第10回甲状腺検査評価部会(2018年7月8日)の資料3「甲状腺検査集計外症例の調査結果の速報」によれば、2011年10月9日～2017年6月30日の検査の集計漏れ11名の甲状腺がん症例のうち、事故時に4歳以下が1名存在した。

表1 チェルノブイリと福島の甲状腺がんに関する比較(出典：文献10から著者作成)

	チェルノブイリ	福島
甲状腺等価線量(mSv)	ベラルーシ 560 ± 1180mSv ウクライナ 770 ± 260mSv	99%は15mSv未満 ⁶⁾
多発した時期	事故後4～10年 (10年後がピークであり、その後減少)	事故直後から発生
症例数が大きく増倍した年齢群	事故当時0～5歳の年齢群	事故当時10歳以上の年齢群

英国(イングランドとウェールズ)における1963～1992年の0～14歳までの甲状腺がん発生登録者の年齢分布に近い¹¹⁾。この登録者の誕生年は1954～1978年であるため、チェルノブイリ事故(1986年)時の年齢は6歳以上であり、チェルノブイリで小児甲状腺がんが増倍した5歳未満の年齢群は含まれていない^x。福島の甲状腺検査で、対象者の約半数がA2判定(5.0mm以下の結節または20.0mm以下のう胞あり)との結果が出たが、この結果を比較できる既知のデータが無かったため、検査開始当初は、A2判定を「異常」または「疾患」の一種と捉えられて混乱が生じた。そのため環境省は2012年度に福島事故の有意な影響がないと考えられる青森県、山梨県、長崎県の3～18歳の住人に対して、甲状腺結節性疾患有所見率調査(以下「三県調査」)を実施した¹⁵⁾。表2に三県調査と先行検査および本格検査(検査2回目)の結果を示す。

^x 英国においてもイングランドとウェールズの北西部にはチェルノブイリ事故の放射性降下物があり、15歳未満の小児甲状腺がんの有意な増加の有無が調査されたが、症例が少なく明確な結論が出ていない¹⁴⁾。

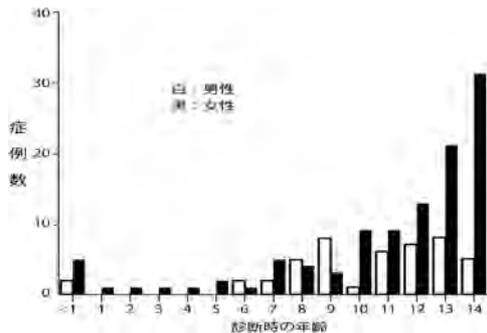


図2 英国の小児甲状腺がん(1962～1992年)の登録者の年齢分布(出典：文献13のp778のFigure1から転載)

専門家会議では、調査対象者の年齢構成や超音波検査の特性を考慮すれば、判定結果の分布は福島県による甲状腺検査は三県調査の結果と大きく異なるものではなくほぼ同様の結果と評価している。三県調査は受診者数が福島県の甲状腺検査の受診者数に比べると1.5%程度の規模に過ぎず不確かさが大きいと明確な評価は困難であるが、検査結果確定者数に対するがん確定者数の割合、すなわち三県調査0.022% $(=1/4,365) \times 100$ 、先行調査0.034% $(=101/300,473) \times 100$ 、本格検査0.018% $(=50/270,516) \times 100$ とも整合性がある。以上のことから、福島での甲状腺検査結果は事故の有意な影響がないと考えられる三県調査と比べて大きな相異は認められないと考えられる。

福島県の甲状腺検査で診断された甲状腺がん患者の甲状腺被ばく線量は現時点では評価困難である。事故による被ばくと甲状腺がん有病率の関連性を見る第一歩として、事故後4か月間に受けた住民の外部被ばく線量が高い地域(5mSv以上受けた者が1%以上)、中程度の地域(5mSv以上の者は1%未満で、1mSv以下の者が99.9%未満)、低い地域(1mSv未満の者が99.9%以上)に3分類して^{xi}、各地域での甲状腺がんの有病率との関係を調査した研究がOhiraらによって2016年に発表された¹⁶⁾。線量評価は個々人の4か月間の行動のアンケート調査と毎日の各場所の γ 線量率から推計している。性別、検査を受けた年齢、事故から検査までの期間で調整して甲状腺がん有病率を95%の信頼区間を付けたオッズ比で評価した。その結果、甲状腺がん有病率には有意な地域差は見られず、事故による被ばくとの関連性は見つからないと分析している。Wakefordらは最も汚染が高い地域と低い地域での有病率に有意差はないと分析しており、測定された甲状腺中の放射能レベルは文献9で主張する甲状腺がん罹患率を高めることに必要となる量に比べてはるかに低いと評価している¹⁷⁾。

^{xi} 高い地域は浪江町と飯館村、低い地域はいわき市と会津地区、それ以外は中程度の地域に分類されている。

表2 環境省の三県調査と福島の甲状腺検査結果
(出典：文献15および福島県「健康県民調査第30回 参考資料3の数値データから著者作成」)

	三県調査	先行調査	本格検査 (検査第2回目)
年齢	3～18歳	事故当時 0～18歳	事故当時 0～18歳 ^{*1}
検査結果 確定者数	4,365	300,473	270,516
受診率	8.2% ^{*2}	87.1%	71.0%
A1	1,853 (42.5%)	154,605 (51.5%)	108,710 (40.2%)
A2	2,468 (56.5%)	143,574 (47.8%)	159,578 (59.0%)
B	44(1.0%)	2,293 (0.8%)	2,227 (0.8%)
C	0 (0.0%)	1 (0.0%)	0 (0.0%)
がん確定者	1	101 ^{*3}	50 ^{*4}

*1 本格検査は事故当時0～18歳者に事故後の誕生者も含める。

*2 三県の0～18歳の人口合計は535,520人(2010年度国勢調査)

*3 悪性ないし悪性の疑いの有る者は116人で手術実施者は102人

*4 悪性ないし悪性の疑いの有る者は71人で手術実施者は50人

4. スクリーニング効果による影響

福島県の未成年者に対する甲状腺検査で発見された甲状腺がんは、チェルノブイリ事故後発生した小児甲状腺がんと比較すると発生時期、多発年齢群、甲状腺線量が異なっているため被ばくに起因すると考える積極的証拠は明らかではない。30万人を超える受診者を高感度の超音波画像検査装置で診断したため、臨床的症状が無いために従来なら発見されない甲状腺がん(殆ど乳頭がん)を発見したとすれば、それはスクリーニング効果(広義)に相当する。

米国国立がん研究所のSEERプログラム¹⁸⁾で収集された全年齢層の甲状腺がんの罹患率と死亡率データを図3に示す。

図3に示されるように、甲状腺がん罹患率は4.8人/10万人(1975年)から15.0人/10万人(2015年)と3倍まで増加しており、とくに1990年代後半からの増加が顕著である。一方で死亡率は毎年0.5人/10万人で殆ど変化がない。Davisらは米国における甲状腺がん罹患率の急増を検査方法の高度化によるスクリーニング効果(広義)と見なしている。そして生涯、臨床的症状を引き起こさない種類の甲状腺がんを過剰に診断して発見したためであろうと分析している¹⁹⁾。

韓国ではAhnらが、成人を対象にした甲状腺がんの罹患率と死亡率の推移を2014年に発表した。その結果

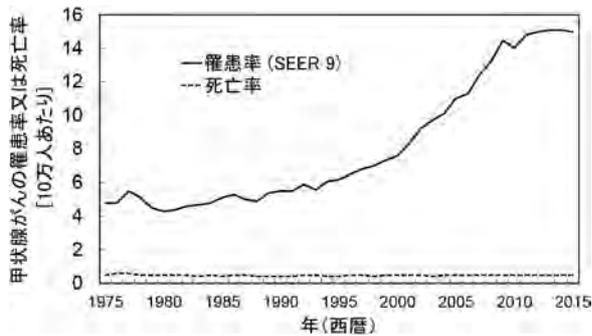


図3 米国における甲状腺がんの罹患率と死亡率の推移
(文献18の数値データから著者作成)

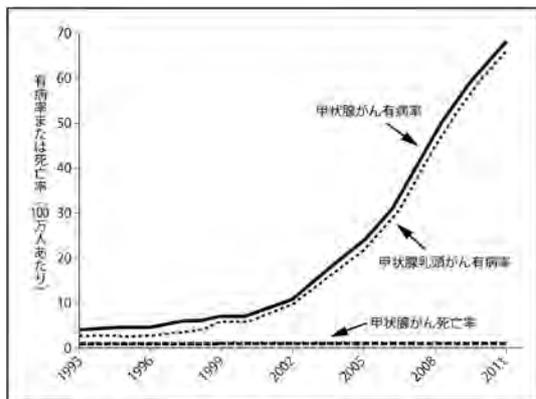


図4 韓国における甲状腺がんの増加と死亡率
(Massachusetts Medical Societyの許可を得て、著者H.S.Ahn et al. N Engl J Med 371(19) 2014 1765-176720)のp1765の図より転載)

を図4に示す。米国と同様に罹患率は上昇しているが、死亡率には殆ど変化が見られない²⁰⁾。罹患率増加の原因は乳頭がん検出の増加であり、1990年代の上昇はわずかであったが、1999年に政府が国家スクリーニングがん検査プログラムを開始して超音波検査装置による安価な検査料の甲状腺がん検査を導入して以来、急激に上昇し、2011年の罹患率は1993年の罹患率の約15倍に増加した。Ahnらは過剰診断の結果であろうと分析している。

我国では環境省が2004～2009年の人間ドック受診者(20～93歳)の甲状腺がん発見率²¹⁾と2010年の国立がんセンターの甲状腺がんの全国罹患率推計値から、成人に対して甲状腺超音波検査を行うと従来の罹患率の10～50倍甲状腺がんが発見されることを示した¹⁵⁾。

韓国、日本のデータは成人に対するデータであり、米国は全年齢層を対象としたものである。どれも未成年の甲状腺がんを対象を絞ったデータではないが、高感度超音波検査画像診断装置を用いて自覚症状の無い極めて多数の未成年者を対象に甲状腺検査を実施することにより、従来のがん罹患率よりも最大数十倍の甲状腺がんが発見されることは十分に考えられることである。

5. UNSCEAR2016の見解

国連に設置された原子放射線に関する科学委員会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR)は2013年の報告書であるUNSCEAR2013 附属書A²²⁾で、福島事故で幼少期および小児期に甲状腺被ばくをした人において識別可能な程度に甲状腺がんの発生率が上昇する可能性がどうかについては確固たる結論を導くことはできないが、チェルノブイリ原発事故で観察されたような多数の放射線誘発甲状腺がんの発生を考慮に入れる必要性はないと記載している。UNSCEARはその後、11篇の査読付き論文とIAEA報告書の詳細なレビューを実施した。この中で1篇の論文(本稿の文献9)のみがUNSCEAR2013 附属書Aの見解に異議を唱えているが、他はすべてUNSCEAR2013 附属書Aの知見を強化するか補足するものであったことを記載している。そして文献9は高感度超音波検査によるスクリーニング効果を十分に考慮に入れていないとしており、UNSCEAR2013 附属書Aの知見は引き続き有効であるとの結論に達したとUNSCEAR2016白書に記載している²³⁾。

Ⅲ. まとめ

以前から、原爆被爆ならびにX線を用いた放射線治療による医療被ばくによる外部被ばくで、小児・未成年者に対して甲状腺がん発症の増加があることは知られていた。チェルノブイリ事故以後、事故で拡散した¹³¹Iを飲食物から多量に摂取した5歳未満の小児を中心に、事故数年後から2005年までに事故時18歳未満者の甲状腺がん罹患率が約7,000人弱の規模で発生した。このような事例があるため、福島事故の半年後から事故当時18歳以下であった未成年者を対象として甲状腺検査が行われた。第1回目である先行検査では、ほとんどが臨床的に自覚症状のないと考えられる30万人程度が受診し、従来の国立がんセンターによる甲状腺がんの年間平均罹患率から推計した有病者の20～50倍が検出された。このことは事故による放射線被ばくの影響が否かを巡って多くの議論を引き起こした。現時点でも放射線被ばくに起因する証拠となる遺伝子変異は明らかにはなっていないが、福島で発見された甲状腺がんの遺伝子変異が調査され、チェルノブイリ事故に関連する遺伝子変異と比べられ、変異の種類が異なっていることが示された。しかし、甲状腺がんの遺伝子変異の種類割合はヨード摂取量などの食生活の違いに影響することが考えられるため、遺伝子変異の種類だけでは被ばくの影響の有無を明確にすることは困難であった。そして、現時点でも放射線被ばくに特有の甲状腺がん遺伝子変異は明らかになっていない。しかし以下の6項目を考慮すれば、福島で発見された小児・未成年者の甲状腺がんは福島事

故由来のものであることを積極的に示唆する根拠を現時点で認めることは困難であり、自然発生の甲状腺がんをスクリーニング効果の結果として見つけている可能性があると考えられる。

- ・福島甲状腺被ばく線量は、チェルノブイリ事故後の線量に比べて低いと推定される。
- ・チェルノブイリ事故後で甲状腺がんの増加が報告されたのは、4～5年後からであるが、福島の「先行検査」ではもっと早い時期からである。
- ・チェルノブイリ事故では、甲状腺がんが増倍する年齢層は事故当時5歳未満の乳幼児であるが、福島では主に10歳以上である。
- ・福島の甲状腺検査結果は、事故の有意な影響がないと考えられる三県調査の結果と比べても大きく異なるものではない。
- ・甲状腺がんの有病率と地域の汚染レベルとの相関が見られない。
- ・高感度超音波画像診断装置を用いた甲状腺検査を行うと、従来の罹患率の10～50倍程度の甲状腺がんが発見される。

事故後すでに7年の歳月が経過した2018年3月に、福島県県民健康調査検討委員会では評価・今後の方向性として、総合的に判断して放射線の影響は考えにくい、現段階では完全に否定できないため、今後も甲状腺検査を継続していくべきとしている²⁴⁾。

－ 参考資料 －

- 1) WHO, Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation (2012).
- 2) UNSCEAR 2013 report Vol. I Annex A (2014).
- 3) N. Unno et al., Journal of Obstetrics and Gynaecology Research, 38(5), 772-779 (2012).
- 4) 環境省 東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う住民の健康管理のあり方に関する専門会議 第6回議事録および資料1-2-3.
<http://www.env.go.jp/chemi/rhm/conf/conf01-06b.html>
- 5) S. Nagataki, et al., Radiation research, 180 (5), 439- 447 (2013).
- 6) S. Nagataki et al., Clinical Oncology, 28(4), 245-254 (2016).
- 7) E. Kim, et al., Journal of radiation research, 57(S1), i118-i126 (2016).
- 8) 第28回福島県「県民健康調査検討委員会」資料6.
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/238778.pdf>
- 9) T. Tsuda et al., Epidemiology 27, 316-322, (2016) および eAppendix (<http://links.lww.com?EDE/A968>).
- 10) N. Takamura et al., The Lancet Diabetes & Endocrinology, 4(8), 647 (2016).
- 11) M.D. Tronko, et al., Thyroid, 24(10), 1547-1548 (2014).
- 12) S. Suzuki et al., Clinical Oncology 28, 263-271 (2016).
- 13) H.R. Harach et al., British Journal of Cancer ,72,777-783 (1995).
- 14) S.J. Cotterill et al., European Journal of Cancer ,37,1020-1026 (2001).
- 15) 環境省 東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う住民の健康管理のあり方に関する専門会議中間取りまとめ 2014年12月.
<http://www.env.go.jp/chemi/rhm/conf/torimatome1412/index.html>
- 16) T. Ohira et al., Medicine, 95(35) (2016).
- 17) R. Wakeford et al., Epidemiology, 27(3) e20-21 (2016).
- 18) NIH, Cancer Stat Facts: Thyroid cancer, <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/thyro.html>
- 19) L. Davis et al., JAMA, 295, 2164-2167 (2006).
- 20) H.S. Ahn et al., N Engl J Med. 371(19), 1765-1767 (2014).
- 21) 志村浩己. 日本甲状腺学会雑誌, 1(2): 109-113 (2010).
- 22) UNSCEAR 2013 Report Vol.1 Scientific Annex A (2014).
- 23) UNSCEAR 2016 white paper to guide the Scientific Committee's future program of work (2016).
- 24) 福島県県民健康調査検討委員会, 県民健康調査における中間取りまとめ 2016年3月.
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/kenkocoyosa-kenkotoiinkai-chukantorimatome.html>

著者紹介

岩井 敏 (いわい・さとし)

原子力安全推進協会
(専門分野/関心分野)放射線防護, 線量評価
放射線リスク

石田健二 (いしだ・けんじ)

原子力安全推進協会
(専門分野/関心分野)保健物理, 低線量放射線影響, 幹細胞生物学

仙波 毅 (せんば・つよし)

原子力安全推進協会
(専門分野/関心分野)原子力施設の放射線管理, 水化学管理, 放射線影響と防護体系

高木俊治 (たかぎ・しゅんじ)

三菱総合研究所
(専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線防護

猪狩貴史 (いがり・たかふみ)

エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社(専門分野/関心分野)線量評価, 遮へい解析

福地 命 (ふくち・みこと)

日本エヌ・ユー・エス株式会社
専門/関心分野:放射線分子生物学, 幹細胞, DNA 修復機構

BAATARKHUU・Undarmaa (ばーたふる・うんだるまー)

日本エヌ・ユー・エス株式会社
専門関心分野:エネルギー政策, 放射線防護

地層処分概念における人の関与に関する議論の系譜

原子力安全研究協会 原田 亜紀, 増田 純男
原子力発電環境整備機構 梅木 博之

地層処分の基本概念は、地表に比べ人間活動や自然現象の影響を受けにくく安定的に存在する地下深部の岩盤を利用して、注意深く設計された受動的な隔離・閉じ込め機能を有するシステムを構築することにより、長寿命の放射性廃棄物をその潜在的危険性が有意な期間を超えて安全に処分するというものである。しかし、人が積極的に関与する必要のない受動的なシステムによって安全を確保するという考え方は、それが超長期の安全性を論ずるうえで重要な視点を与え、科学的な合理性をもつものだとしても、経験や通常感覚からは容易に理解できるものではなく、このことが、地層処分の社会的受容性を難しくしている理由の一つになっていると考えられる。本稿では、様々な側面から積み重ねられてきた国際的な議論の系譜を概観することを試み、地層処分概念における人の関与のあり方について理解するための一助とする。

KEYWORDS: *Geological disposal, Passive systems, Perpetual care, Institutional control, Reversibility, Retrievability, Public acceptance*

I. はじめに

地層処分は、長寿命の放射性廃棄物の処分対策として、技術的に実現可能で長期間の安全性を確保する最も確実な方法であるということが国際的に広く認識されており、各国に固有の条件を反映した具体的なシステムが開発され、処分場の建設を開始している国もある。わが国においても、地層処分の実現性や安全性を裏付ける研究開発成果に基づき2000年6月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(最終処分法)が制定され、手続き上は国民の総意によって地層処分を実施する状況に至っている。2002年には最終処分法に基づき設立された実施主体である原子力発電環境整備機構(NUMO)によって、文献調査の受け入れに関する公募が開始されたものの最終処分地の選定プロセスは殆ど進んでおらず、地層処分についての理解が国民の間で広く共有されているとはいえない状況にある。

地層処分の安全性は原子炉や核燃料施設の安全確保の考え方とは大きく異なることが理解を難しくしている理由の一つと考えられる。原子炉等の安全は原子力利用の恩恵を受けている現世代の安全確保の観点から、施設の安全設計や建設・操業中の施設検査と保安規定に基づ

き、人が何らかの形で関与(監視)し続けることによって確保される。一方、地層処分では、閉鎖による施設の供用期間終了後の万年オーダーという時間スケールの安全性が問題となり、こうした時間スケールにわたる安全の確保を人による関与を続けることによって達成するためには、少なくとも現在のような社会が安定して存在することが必要である。しかし、人類の歴史を振り返っても、安定な社会が遠い将来まで存続するという前提には大きな不確実性を伴う。そこで、人が関与しなくても、このような長期間にわたって放射性廃棄物の潜在的危険性から人間や環境を防護する方法として、人間社会に比して圧倒的に長い期間にわたって安定的に存在する地下深部の岩盤を利用するという地層処分が発想された。

また、通常の工学システムでは、人が何らかの関与を行い実際に問題なく作動していることによって、安全が確保されていることが「実証」される。こうした「実証」に基づく構図は、詳細な科学技術的原理を理解しなくても認知することができる。一方、自然の岩盤を利用し、極めて長い時間を対象として構築される地層処システムの安全機能については、考慮すべき時空間の全てにわたって「実証」することはできない。このため、予測される将来の状態を考慮して設計したシステムが、予測に伴う不確実性を考慮しても求められる機能を発揮し安全を確保できることを科学的論拠に基づいて説明するセーフティケースが作成される。地層処分による安全確保については、セーフティケースを理解し信頼し得るものかどうか

Genealogies of discussion on human involvement in the geological disposal concept: Aki Harada, Sumio Masuda, Hiroyuki Umeki.

(2018年5月18日 受理)

を判断することが必要である。このような地層処分に特異な認知プロセスが社会に受け入れられるのは容易なことではない。

地層処分は、「人の関与に頼ることができないがそれでも安全は確保できる」というシステムであるが、その認知プロセスには人の関与が必然であり、この係わり方が最終的に人の関与を前提としない安全確保という地層処分状態へ移行することに重要な意味を持つ。本稿では、こうした地層処分における人の関与のあり方に焦点をあて、これまでに重ねられてきた国際的な議論の「系譜」としての整理を試みた。

II. 地層処分の基礎となる考え方の形成

歴史上最も早く放射性廃棄物の一般公衆への潜在的危険性と対策の必要性を公に指摘したのは米国であり、1950年代にその対策に関する本格的な検討が開始された。1970年代には国際的な議論が加速し、安定な地質環境に人工バリアを組み合わせた、現在考えられている地層処分システム概念の骨格が示された。

1977年に、経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)の放射性廃棄物管理委員会(RWMC: Radioactive Waste Management Committee)と放射線防護公衆保健委員会(CRPPH: Committee on Radiological Protection and Public Health)のもとに設けられた共同作業グループにより、放射性廃棄物の処理、貯蔵、輸送、処分に関する技術的側面およびサイト選定、許認可、行政および経済的問題などを包括的に取りまとめた報告書¹⁾が公表された。この報告書においては、「現世代は、長寿命の放射性廃棄物を必要な程度に長期間隔離するための技術的回答を見出さなければならない。しかも、その回答は、われわれ自らが受け入れられないような状況に将来世代を直面させるものであってはならない。放射線防護と環境防護の目標を実現するのは非常に複雑であり、技術的観点ばかりでなく、社会的あるいは倫理的な判断も必要とする。およそすべての人間の活動は、技術的、経済的資源をどれほどつぎこんだとしてもゼロまで減ずることのできない危険性を内包しているものである。」と社会的・倫理的側面について言及したうえで、「放射性廃棄物管理の目的は、監視の信頼度が完全に失われるような時間の長さを超えても人間からの隔離を確保することである。」として、陸地の安定地層への封じ込めが最も優れていると結論している。

1982年には、放射性廃棄物処分についての技術的側面だけではなく、取るべき措置を決定する動機について検討するため、OECD/NEAのもとに設けられた専門家グループにおいて、放射性廃棄物の処分に関する基本原則がとりまとめられた²⁾。「廃棄物処分の目的は、人間の健康や環境を保護するような方法で廃棄物対策を完結させ、将来世代の負担を極力少なくすると同時に、社会的

経済的要素を考慮することである。」という廃棄物処分の目標を踏まえ、実際の処分方法を選定する選択肢として、分散処分と閉じ込め処分(Dispersal and Containment)、受動的なシステムと永久的なケア(Passive Systems and Perpetual Care)、および回収可能性(Retrievability)を概観している。最初の選択として、分散処分か閉じ込め処分かを議論した後に、固体廃棄物に対しては長期間人間の関与に依存しない方法と人間の継続的な制度的管理が必要とされる方法のどちらを取るか、について両方の長所短所を説明したうえで「制度的な管理の継続性とその有効性がどの程度まで信頼できるかがこの処分方法の重要な要素である。受動的な処分方法とともに制度的管理を採用することにした場合であっても、もともと施設の安全確保に制度的管理は必要な要素ではなかったのであるから、この管理を将来世代の負担にすることを考えるべきではない。」としている。受動的とは、水が高いところから低い方に流れる機構のように人間の行為に拘らず自然にあるいは自発的に働くということであり、廃棄物対策における受動的な方法は、「核種の溶解が制限される」、「岩石に収着される」等、人間の関与を必要とせず自然の機能に委ねるシステムを構築することである。これらの機能は、「受身の文体」で表されることから日本語では「受動的」と訳されている。

回収可能性については、「処分の定義から明らかなように、閉鎖後段階では処分場に必要設備要件にはならないが、それは必ずしも回収ができないことを意味するものではない」とされた。これらの考え方を検討されている処分方法(浅地中処分、深地層処分、海洋投棄)にどのように適用するかの議論を経て、「細心の注意を払って立地した処分場では、地質バリアは非常に長期にわたり廃棄物を閉じ込めることができる。また、深地層処分システムは、一度閉鎖されると人間による関与はできないので、完全に受動的なシステムである。」と結論している。

これら2つの報告書に示されている「処分場として地下深部の岩盤は潜在的危険性を考慮すべき時間スケールをはるかに超える期間にわたって安定的に存在し、地表に比べ人間活動や自然現象の影響を受けにくく、受動的な安全系により隔離・閉じ込め機能を有する」という考え方が地層処分概念の基礎として共有され、各国における処分計画の方向を示すこととなった。

1989年には、国際原子力機関(IAEA)が安全シリーズNo.99「高レベル放射性廃棄物の地下処分のための安全原則と技術規準」³⁾を定めた。この規準には、8つの原則があり、人間の関与という観点から、「原則1: 将来の世代に処分システムの健全性の保持を依存することや処分場が存在することによる重大な束縛を課してはならない。」「原則2: 閉鎖後の高レベル放射性廃棄物処分場の安全性は、モニタリング、監視あるいはその他の制度的

管理(institutional control)や修復活動の必要性に依存したものであってはならない。」ことが明記された。その後IAEAは、2006年に原子力安全に関するSF-1「基本安全原則(Fundamental Safety Principles)」を、2011年に安全原則の下位文書にあたる個別安全要件SSR-5「放射性廃棄物の処分」を策定しており、上記原則はこれらの文書に再編されている。

制度的管理については、2007年のIAEA安全用語集に記載されている「法律に基づいて指定された当局または公的機関による放射性廃棄物サイトの管理」ということに留まらず、「継続する管理に頼るべきでない」という考え方には、より広い意味合いが含まれていると思われる。放射性廃棄物対策のように対策の有効期間が世代を超える長期にわたる安全管理、すなわち人による監視と是正措置を継続して行うには、将来にわたって必要な人、技術、知識、資金等を確保できる制度が維持される社会の存在が前提であり、そのような管理には頼ることが出来ないという文脈で用いられている。また「Control」と「Management」については、どちらも「管理」と訳されているが、前者は主として人間が直接介入して行う比較的単純な活動であり、後者は行政的、法的、経済的対策が含まれる組織的な活動の全体を意味しており、管理(control)は管理(management)の一部として包含されるものと考えられる。

Ⅲ．地層処分の社会的受容の問題

1970年代に確立した「人による管理に依存しないという地層処分の基本的考え方」に基づき、地層処分概念に関する研究開発が積み重ねられて、専門家コミュニティでは、地層処分が科学的・技術的に実現可能であるという国際的合意が得られたが、多くの国において地層処分計画の実施が必ずしも順調には進まないという事態に直面することとなった。こうした事態は、地層処分が社会的受容の問題に係わるものであることから、社会による地層処分の認知において重要となる以下のような観点からの国際的議論が進められた。

1. 環境および倫理的側面に関する議論の再燃

1992年にリオデジャネイロで開催された「環境と開発に関する国連会議」において「持続可能な開発(sustainable development)」の概念が主題として選ばれ、オゾン層破壊や気候変動などの長期的な影響に係る地球の自然環境問題に強い関心が向けられるようになった。この流れから倫理的問題が環境の議論に組み込まれるようになり、1995年にOECD/NEAのRWMCが地層処分方策に関する倫理的側面を再評価するためのワークショップを開催し、地層処分を選択した理由に焦点をあてたRWMCの集約意見を「長寿命放射性廃棄物の地層処分の環境的および倫理的基礎」⁴⁾として取りまとめた。

この報告書においては、最終処分という対策を選択することの合理性を、世代間および世代内の公平性の観点から論じている。世代間の公平性については、「放射性廃棄物を発生させた世代がその管理について責任を持つこと。将来世代の健康や環境へのリスクを、少なくとも今日と同レベルに維持すること。放射性廃棄物の管理にあたって、将来世代に不当な負担をかけないこと、およびできる限り将来世代の選択肢を残しておくこと」を倫理的な規範として掲げている。また世代内の公平性については、「放射性廃棄物の管理は人間の健康と環境の保護のための種々の活動の一つであり、他の活動との関係において資源の配分に留意すること、および関連する種々の社会層が意思決定プロセスへ参加できるようにすることが倫理的に求められる。」としている。これらの倫理的規範に照らして、放射性廃棄物対策として、期限を定めずに貯蔵し監視する方策(制度的管理)か処分かが論じられている。「制度的管理を継続し、将来の世代に現在と同じ状態を順送りに引き渡す“rolling present”という考え方は、将来世代に選択肢を残すという観点から一見倫理的と受け取ることができるかもしれないが、結局、現世代はこの問題に対して何も行動を起こさないと理由で非倫理的である。」とみなされている。また、処分場からの廃棄物の回収については、「原則的に処分概念は初期の不注意な侵入を防ぐための制度的管理期間の後、廃棄物の存在が完全に忘れられるということを前提としているため、周到的な準備は必要としないが、たとえ閉鎖後であっても費用はかかるものの回収は不可能ではない」としている。「回収可能性は地層処分が将来の政策変更の可能性を完全に閉ざすような、全く不可逆的な過程として必ずしもみなされるものではないために、1つの重要な倫理的考慮事項である。」としている。

2. 社会的・技術的課題への継続的取り組みの必要性

2001年に、米国科学アカデミー(NAS)において、地層処分は安全に実施可能との科学的合意があるにも関わらず、多くの国で地層処分計画が進まないことに鑑み、なぜ地層処分は進展しないのかについて技術的側面と社会的観点からの議論が行われ、「高レベル放射性廃棄物と使用済燃料の定置－社会的・技術的課題に対する継続的な挑戦－」⁵⁾がまとめられた。本報告書では、「どのように高レベル廃棄物の地層処分を実施するか」というよりも、「高レベル廃棄物の地質媒体による隔離(地層処分)を行うべきか否か、いつ行うべきか」という命題に対して、定置を意味する“disposition”という言葉を用いて地層処分における「定置」と「処分」の意味合いを整理するとともに、次のような勧告を行った。

「単に技術的専門家からみて適切なオプションを取るだけでなく、広く公衆の支持が得られた意思決定プロ

セスと放射性廃棄物管理技術の選択を確保することが肝要であるとしたうえで、廃棄物管理(management)のオプションとして可能なのは、監視付貯蔵、浅地層処分および深地層処分であり、過去数十年の経験や、十分な資源(資金やマンパワー)を投入し、貯蔵施設を維持拡大できる政治的な注目を確保できれば、地表貯蔵は技術的に実行可能なオプションである。しかし、未来社会もこのような施設を継続的に維持管理し続けることができるかという最大の不確定要素がある。このため貯蔵施設の維持が恒久的に確実であると考えられない以上、地層処分オプションを抜きにして貯蔵オプションのみを追求することは賢明であるとは言いがたい。そのうえで、深地層処分は今あるオプションの中で、唯一実施可能な長期的な解決策である。」と結論している。とはいえ、「意思決定とは最低でも2つのオプションからの選択であり、常に選択が可能でなくてはならないので、放射性廃棄物管理計画の策定にあたり、代替(追加的)オプションを策定維持すべきである。地層処分の代替オプションとなりうるものは、今のところ(中間)貯蔵期間の長期化しかないため、放射性廃棄物管理計画を策定するにあたり、必要とされる限り十分な貯蔵能力を確保したうえで、地層処分を追求すべきである。」とされた。

また、「社会的・科学的な理由から、各国の廃棄物管理計画は公衆との対話と科学的分析を通じた段階的なアプローチを取るべきである。段階的な計画を実施するために、技術的アクションとしては、現実性のある代替オプションを客観的に比較検討する準備をし、現時点において受動的で固有の安全システムを有する唯一のオプションである地層処分の開発を進めるべき。」としている。また、「社会的アクションとしては、公衆が変更不能な措置を受容することに対して拒否反応を示すことを理解し、モニタリングと処分した放射性廃棄物の回収可能性を強調すべきである。」ことを勧告している。「回収可能性の備えは予期しない事態に対応できるという安心感を公衆に与えることができ、また予期しない事態を警戒する証としてのモニタリングも望まれるものである。」と指摘している。

地層処分の技術的側面とともに社会的あるいは倫理的側面への配慮の重要性については、1977年のOECD/NEAの報告書¹⁾以来指摘されてきた課題であるが、本報告書において初めて、放射性廃棄物対策における社会的・技術的な課題が総合的に扱われることとなった。本報告書で示された内容が、受動的な安全機能を有する地層処分の開発を技術課題とすると共に、長期的な安全確保に人の関与を必要としないことを前提としながらも、社会的受容性の観点から、モニタリング、廃棄物の回収可能性、段階的なアプローチの概念を取り入れる、という現在各国が進めている放射性廃棄物管理政策の基礎を与えたといえよう。

3. 貯蔵と処分の関係

貯蔵は、放射性廃棄物の中間的な管理ステップとして組み込まれているが、OECDに加盟している一部の国では、貯蔵の役割を廃棄物のより長期間の管理手段に拡大すべきかどうかを検討する傾向が見られるようになり、さらに、一部のステークホルダーは長期間にわたる貯蔵それ自体が妥当な終結点の一つであると考えようになった。このような背景から、2000年にIAEAがスペインのコルドバで開催した「放射性廃棄物管理の安全性に関する国際会議」において、暫定貯蔵の期間を引き延ばす長期貯蔵について注目が集まり、特別国際グループを設置して「放射性廃棄物貯蔵の持続可能性」について検討が行われ、2003年に長期貯蔵に関するポジションペーパーを取りまとめた。ここでの主要な結論は、「長期貯蔵の安全性を確保するためには、様々なインフラの整備が必要であり、将来世代がこれらについて能動的な管理を実行し、責任、知識および情報を代々引き継ぐことができることが不可欠である。将来社会がこれらの責任を維持することができる場合にのみ、長期貯蔵は持続可能なものとなる。」というものであった。また、「貯蔵と処分は互いに競合するというよりは補完的なものであり、両者とも必要な活動である。」との見解を示している。

また2004年にOECD/NEAのRWMCと原子力開発委員会(NDC)により、貯蔵と処分の関係について検討する場として「貯蔵の役割に関するワーキンググループ」が設立され、使用済み燃料と放射性廃棄物の長期管理のための代替戦略について、貯蔵の役割拡大の実行可能性、より長期間に拡大する動機とその意味合いについての検討が行われた。諸外国における廃棄物戦略の選択肢としての貯蔵の取り組み状況を概観しながら、議論の結果が2006年に「長寿命放射性廃棄物の管理における貯蔵の役割」報告書⁶⁾として取りまとめられ、次のような見解を示した。

「従来の貯蔵は、それ自体を目的としたものではなく、戦略面でのいくつかの要件によって生じる理由で実施されるものである。それには例えば廃棄物の放射能レベルや発熱量を低減させるための貯蔵(放射性崩壊貯蔵)、処分する廃棄物を備蓄するための貯蔵(緩衝貯蔵)、次のステップが決定されるまでの待機のための貯蔵(中間貯蔵)、将来の利用価値が見込まれており廃棄物として宣言されていない物質のための貯蔵(戦略的な貯蔵)があり、現在までの数十年間にわたって、安全性および安全保障が確保された状態で行われてきた。しかし近年では一部の国で、従来検討されてきた役割を超えて貯蔵を利用するか、そうした役割を担う貯蔵を検討する傾向が見られるようになった。

長期貯蔵の政策が、起り得る将来の展開、例えば新たな技術開発に、あるいは多国間施設に基づく解決策を念頭に置いて採用されたものである場合、この種の政策

を採用した国は、こうした解決法に関する調査を実施し、開発するための活動を活発に進めなければならない。したがってただ単に待つだけでは十分ではない。その定義からして、貯蔵を放射性廃棄物管理に関する終結点とすることはできない。さらに、貯蔵施設の複数回の更新を伴うようなきわめて長期間にわたる貯蔵計画は非現実的であり、現世代の管理の及ばない著しい不確実性が組み込まれるものと考えられる。責任が将来の世代に手渡されるのであれば、いずれかの時点でその将来世代がその責任を取り除くことができるように、その責任に対処する手段も一緒に引き継がなければならない。これは、財政面および知識面での責任の問題である。この問題について理解して、われわれの現時点での理解に従って解決策をもたらすことは、われわれの責務である。必要な決定を先延ばしにすることによって廃棄物を際限なく貯蔵し続けることは安全性の観点から最も多くの不確実性を伴う最悪のオプションであり、貯蔵管理は決して放射性廃棄物管理にとっての終結点となることはできない。」と結論している。この結論はIAEAが示した見解と適合するものである。

貯蔵の役割に関するRWMCとNDCの共同ワーキンググループが設置された背景は、NDCから、「なぜ貯蔵管理では不十分なのか、地層処分による受動的な隔離が可能である理由は理解しにくい」という問いかけがRWMCになされたことがきっかけであった。OECD/NEAという原子力の専門家コミュニティにおいてさえ、共通認識に至るまでに報告書作成のための2年にわたる議論が必要であった。このことから、「永続的な管理か受動的機能による隔離か」という意思決定は、認識ギャップが埋まりにくい要素を潜在する課題であることが伺える。

4. 可逆性・回収可能性に関する議論

可逆性と回収可能性(Reversibility and Retrievability: R&R)への関心は、処分事業が実施段階に近づくに連れて高まり、1970年代後半から多くの国においてR&Rに関する考え方が示されるようになった。

1980年代には、スウェーデン核燃料・廃棄物会社(SKB)の研究によると、当初は廃棄物の回収については安全上の理由からではなく、有用物質の回収に関する選択の自由を将来世代に残すことが理由になっていた。回収可能性は特別な技術的措置を必要とするものではなく、処分場の事業段階のすべてにおいて本質的に存在する機能であり、情報保存措置によって支援する必要がある特性として示されている。また、米国環境保護庁(EPA)は、1983年の規則(40 CFR part 191)で規定された閉じ込め要件への適合への信頼性を高めるために回収可能性が必須であると説明している。ただし、回収可能性は安全性の保証レベルを高めるための万が一の役割を

果たすことが目的とされているため、回収が実現可能である必要はあるものの、準備をする必要はないと述べている。

1990年代には、回収可能性をめぐる議論は、施設の立地から閉鎖に至る事業の様々な段階で、最新の科学技術的な知見あるいは政策や社会経済的な理由によって処分計画の修正・変更を柔軟に行うという観点から、段階的に処分事業を進めるというアプローチにR&Rを組み合わせる考え方が注目されるようになってきた。例えば、1991年のフランス放射性廃棄物法では、地層処分場の実現可能性に関する研究について、可逆性の措置がある場合とない場合についての検討を行うように求めている。

IAEAは1999年に「高レベル放射性廃棄物と使用済み燃料の回収に関する国際セミナー」を開催し、パブリックアクセプタンス、倫理的側面、モニタリングとコスト、安全性と保障措置等に関するトピックスが議論された⁷⁾。特筆的なトピックスとして、回収可能性を備える場合の安全性と保障措置に関する課題がある。処分空洞を長期間開けたままの状態となる「完全回収可能性(“full retrievability”)」を備える場合、温度上昇による空洞の力学的安定性と化学的耐久性の劣化対策、汚染されたまたは漏洩した廃棄物パッケージからの放射性核種の放出対策等が必要である。また、保障措置に関しては、(特に使用済み核燃料の)開放型処分場は査察の対象であり、閉鎖までは弾性波探査または他の遠隔制御手段によって閉鎖監視されることになる。さらに、今後の課題として、回収された廃棄物をどうすべきかということ等が指摘された。

また、2001年のOECD/NEAの報告書「放射性廃棄物の地層処分における可逆性と回収可能性：国際レベルでの省察(Reflection)」では、回収可能性に有利に働く要因(例えば、処分システムが予期する性能を発揮しない場合の対策や資源としての利用可能性が見出された場合など)と不利に働くと思われる要因(例えば、操業安全性や長期安全性に対するマイナス効果の不確実性、処分場への無責任な立ち入りや干渉の機会の増大など)の整理が行われている。

過去30年間の可逆性および回収可能性に関する概念の進展については、2011年にOECD/NEAが公表した「高レベル放射性廃棄物および使用済み燃料の深地層処分のための可逆性と回収可能性」⁸⁾に詳しく記述されている。この報告書は、OECD/NEAが2001年の可逆性・回収可能性に関する検討に引き続き、2007年にプロジェクト(R&Rプロジェクト)を立ち上げて、過去数十年にわたって可逆性・回収可能性に関する経緯と時間的な変遷を整理し、可逆性・回収可能性が適用される様々な条件を考慮し、それがいかんして各国のプログラムに、あるいは廃棄物処分に関する様々な利害関係者の考え方に組み込まれたのか、あるいは、組み込まれなかったのか

に関する研究成果をまとめたものである。

地層処分における可逆性については、「処分の段階的意思決定プロセスに組み込むことが最善の方法であり、そのようなプロセスをとることで、安全要件への適合を常に確保しつつ、計画を遂行している間に得られる情報を勘案して、計画の方向性をその新しい情報に適応させたり、変更したりすることができるようになる。」としている。また、「処分プログラムの柔軟性を高める大きな要素であり、継続的な意見交換、調整、協同での意思決定を行う機会も提供することになる。」としている。これらの考え方は、すでに諸外国の処分計画の中で支持され、取り入れられている。

回収可能性に関する考え方については、次のように示している。

- ・ 回収可能性の目標は、将来社会が、廃棄物の回収を実施する、あるいは回収したい意思を持つことを想定して、回収の実行可能性を保証することである。
- ・ 廃棄物処分の基本的安全特性として閉鎖後の回収可能性を求めている処分プログラムはなく、また、規制は回収可能性を実証することまでは求めている。規制が求めているのは、原理的に回収を実施できるようにしておく、ということだけである。
- ・ 技術的なレベルでは、どのような回収可能性の対策をとるかは、母岩、人工バリアの概念、および回収可能性を維持すべき処分場の事業段階によって変わってくる。回収可能性を処分場の設計段階で考慮する場合には、計画されているバリアや建設材料・配置が回収に対して必要以上の障害とならないように注意すべきである。同時に、選択したものが施設の健全性を損なう恐れのないものでなければならない。
- ・ 処分場閉鎖後の長期間を対象としたセーフティケースは操業期間後の制度的管理がなくても成立するものでなければならない、すなわち、受動的安全性を確保しなければならないが、モニタリングや記録保存などの特定の監視措置を行うことは可能である。これらの措置は、操業後の回収に関する意思決定に、また、将来世代に選択の自由を与えることに貢献する。

さらに本報告書では、「放射性廃棄物の地層処分場は、人の能動的な関与を必要としない長期安全性に基づいて設計され、許可が出される。意思決定の後戻り(可逆性)と廃棄物の回収は設計の目標ではないが、可逆性と回収可能性は、安全で社会的に受け容れられる地層処分という最終的な目標に向けた長い工程を円滑に進めることのできる意思決定と設計プロセスに役立つものである」と結論している。

処分プログラムにおいて、可逆性や回収可能性が政策

や法律上の側面から重要であるとする国が増加しており、今やほとんどの国において規制基準などで規制されている。2007年のR&Rプロジェクトが開始された時点では、安全規制に回収可能性に関する記載のなかったスウェーデン、フィンランド、カナダ、英国も現在では制度上、回収可能性の確保を要求している。日本においても、2015年に最終処分法に関する基本方針が改定され、処分事業を進めるうえで、可逆性と回収可能性を維持することが明記された。

廃棄物処分の基本原則において、回収可能性に関する考え方が示されてから50年が経過したが、地層処分場の閉鎖後の安全性は人の能動的な関与を必要としない受動的なシステムによって確保する、という基本的考え方は変わらない。しかし、社会的受容性の観点から、将来世代への過剰な負担を軽減するという基本理念を維持しつつ、処分概念に回収可能性を取り入れるという考え方が国際的なトレンドになってきている。ただし、具体的な処分プログラムは、技術的、政治的、社会的要因に左右され、国によってそれぞれ異なっているのが現状である。

5. 記録の保存に関する議論

処分事業はサイト選定から建設、操業、閉鎖まで約100年以上にもわたる事業であり、この間に得られる膨大な記録を具体的に誰が、どのように、何を、どうやって、どのくらいの間保存するのかという具体的な検討が国内外で行われてきた⁹⁾。

1999年に公表されたIAEAのTECDOC-1097「放射性廃棄物処分のための記録の維持管理(maintenance)」において、監視員の配置やフェンスの設置・保守、各種のモニタリング等、人の関与の必要な能動的な管理と、人の関与の必要のない受動的な管理に分類された。能動的な制度的措置については、地層処分概念の研究開発段階では、将来世代の処分場への接近・侵入の抑制効果を期待してモニメントやマーカーの設置などの議論があった。記録保存などの受動的な制度的措置は、操業後の回収に関する意思決定、あるいは、将来世代に選択の自由を与えるといった世代間倫理に貢献し、将来世代の処分場への接近・侵入の抑制や地層処分に対する社会的な信頼性の向上に有効であるということが国際的にも認識され、すでにいくつかの国で具体的な記録保存の方策が実行または計画されている。例えば米国は、将来世代が処分場に侵入する可能性を低減するという観点から、処分の実施者に対してマーカーや文書による記録の保存を義務付けている(EPA 40 CFR 194,1998)。日本でも最終処分法において、事業者が処分場に関する記録を国に提出し、国はこれを永久に管理することが定められている。

OECD/NEAのRWMCでは、2010年3月から「世代を超えた記録、知識、記憶(RK&M)の保存」国際プロ

ジェクトが始動しており、規制、政策、マネジメントおよび技術の側面から多面的な検討が行われ、2014年に報告書¹⁰⁾が取りまとめられている。現在、本プロジェクトは進行中であり、「単一のメカニズムや技術だけで、知識、記憶を数百年、数千年といった長期の保存を行うことは不可能であり、様々な時間軸に対応するために、複数のメカニズムや技術を統合し、相互に補完することが必要」との観点から、各国の地層処分実施機関、研究機関、公文書保存機関等が協力して課題に取り組んでいる。

以上のように、事業の実施段階に移行するにつれ、段階的アプローチや回収可能性の議論が深化する過程とともに、地層処分に関する記録保存が、世代間倫理や回収可能性の意思決定の観点から、重要な意味を持つことが認識されるようになった。

IV. 放射性廃棄物対策の最終目標

前節で述べた様々な観点からの議論は、放射性廃棄物対策の最終目標として、人が関与しない受動的な安全系による地層処分へ至る過程において、社会が地層処分をどのように認知すべきか、換言すれば、その過程に人が如何に関与すべきかを明らかにすることを目的としたものである。人が関与しないシステムを受容するための、人の関与のあり方を論じている。

多くの国において、社会的受容性の観点から意思決定の可逆性とそれを維持する期間の廃棄物の回収可能性を処分概念に取り入れるようになってきているが、これは地層処分に着手する段階の措置であって最終的な措置ではない。人が関与しない完全な受動的な安全概念に不安を感じ、後戻りできない段階を避ける、あるいは将来の意思決定に柔軟性を持たせるという社会的な要請により、各国で法律や政策レベルで導入されるようになってきた。

回収可能性をめぐる議論の多くは、将来世代への過剰な負担を軽減するという基本理念と、彼らにオプションを残すという倫理的側面との間のトレードオフに起因している。では、何が「過剰な負担」と考えられるのか。またオプションはどのように残すべきか、これらのオプションを残す期間はどのくらいが妥当なのか。これらの疑問は、地層処分の基礎となる考え方が形成された当初から常に提示されてきたものであり、1982年のOECD/NEAの報告書²⁾においても長期間人間の関与に依存しない方法と人間の継続的な管理が必要とされる方法の両方の長所・短所が示されている。また1995年のOECD/NEAの国際的意見集約書³⁾においても、世代間の公平性について、「持続的な技術の発展によって現在と将来の世代が享受する利益と、長期にわたって将来世代に課せられるであろう責任との間のバランスが慎重に吟味されなければならない。」と見解が示されている。

これまでの国際的な議論の経緯を振り返ると、放射性

廃棄物管理問題は技術的な問題だけではなく、併せて倫理的、社会的、政策的、経済的といった多面的な検討が必要であることが改めて認識される。地層処分の「人による管理に依存しない」という基本的考え方は変わらないが、事業を進めるにあたって社会的受容性の観点から、「人の関与」の在り方を柔軟に考えるようになってきたといえる。

また、回収可能な期間すなわち貯蔵状態にある放射性廃棄物については、処分場が閉鎖されて、再取り出しが最早不可能であることが保証されない限り、IEAEの保障措置(核兵器不拡散条約や核物質防護条約)が適用される可能性がある。処分場の回収可能性を維持する期間を設けるためには、保障措置と核物質防護対策がその期間に地表施設と地下施設に継続的に維持されていることが必要になり、将来世代の負担を極力少なくするという地層処分の倫理的原則とのバランスが必要となる。核兵器不拡散条約や核物質防護条約の最終的な目標は、核物質を回収するためだけではなく、核物質を人のアクセスや接触と環境から継続して隔離することであり、このことは処分の最終目標と一致しているが、その対策には人の関与が継続的に必要であり、その保証措置をいつ終了するかについても議論がある。IAEAはTECDOC-909「放射性廃棄物処分における問題」において、保障措置と放射性廃棄物管理の接点について見解を示しており、「深地層処分における保障措置の監視期間を定義することはできないが、使用済み燃料の組成を踏まえると何千年も続く可能性がある。処分場を開放して監視し続ける要件を受け容れた場合には、将来世代に負担を課さないという放射性廃棄物管理の目的に合わない。また、未知の期間にわたって見積りも不能な資金提供をさせるという厄介な側面が伴う。」としている。

V. おわりに

本稿では、地層処分概念における人の関与のあり方に関する国際的な議論を振り返り、幾つかの主要な論点について系譜を整理した。地層処分概念が進展していく過程において、技術的側面とともに、常に社会的・倫理的な側面が認識されて繰り返し議論がなされており、こうした議論は、地層処分の「人による管理に依存しない」という基本的考え方は変わらないものの、社会を取り巻く状況に応じて、社会がそれを受容するための準備として、人の関与のあり方を検討しておくためのものであるということが出来る。例えば、ステークホルダーから安全確認のため廃棄物埋設後もいつでも状態を確認できるようにしておいてほしい、という強い要望があれば、そうすることを含めて対話を行い、合意を形成していくための枠組みを整えることが重要であり、上述した議論がその指針を与える。

地層処分計画は国情や国民性、文化、法律のしくみ、

過去の経緯などに左右され、その進捗は一様ではない。サイトが選定され、許認可申請へと事業が進捗しているフィンランドやスウェーデンでもこれまでに多くの失敗を重ねて今日に至っており、これらの取り組みを学ぶことは重要であるが、それがそのまま日本に適用できるわけではない。日本の国情に合わせた取り組みが創出されなければならない。各意思決定段階において地層処分が最良な選択かという問いについて社会の意思決定としての確認を行い、事業を進めていくことが必要である。そして、各意思決定の段階に応じて、一般公衆、ステークホルダー、実施主体や専門家が協働しつつ、技術や制度の中からそれぞれの価値観に合うものは何かを主体的に選択しながら合意を作り上げていく必要がある。

こうしたプロセスに、本稿で述べた地層処分における人の関与に係わる議論の系譜が十分に理解されることが不可欠である。

－ 参考資料 －

- 1) OECD/NEA (1977), Objectives, Concepts and Strategies for The Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes.
- 2) OECD/NEA (1982), Disposal of Radioactive Waste: An Overview of Principle Involved, Board of Radioactive Waste Management.
- 3) IAEA (1989), Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes, IAEA Safety Series No.99.
- 4) OECD/NEA (1995), The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes.
- 5) NAS (2001), Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel - The Continuing Social and Technical Challenge.
- 6) OECD/NEA (2006), The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste.
- 7) IAEA (2000), Retrievability of high level waste and spent nuclear fuel. IAEA-TECDOC-1187.
- 8) OECD/NEA (2011), Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste.
- 9) 杉山知稔 他 (2002), 地層処分にかかわる記録保存の研究 -位置付けと方策-, RWMC-TRJ 02001.
- 10) OECD/NEA (2014), Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M).

著者紹介



原田亜紀 (はらだ・あき)
(公財)原子力安全研究協会
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分



増田純男 (ますだ・すみお)
(公財)原子力安全研究協会
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分



梅木博之 (うめき・ひろゆき)
原子力発電環境整備機構
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分

マルチユニット PRA に関する国際動向について

電力中央研究所 三浦 弘道, 猪股 亮, 神田 憲一

福島第一原子力発電所事故以降, サイト全体でのリスクの把握や複数ユニット同時発災時の安全性への影響について, 国際的な関心が高まっている。サイトリスクの把握には, 複数のハザードやサイト内の複数の放射線源に対する総合的なリスク評価が必要である。サイトリスクの把握において重要な評価基盤の一つである, マルチユニット PRA 評価手法の開発について, 現在, 国際的に活発な議論がなされている。本稿では, マルチユニット PRA を取り巻く現状と, 国際的な研究・開発動向について紹介する。

KEYWORDS: Site Risk, Multi-unit Site, PRA, Multi-unit PRA

I. はじめに

現在, 多くの原子力発電所では, 単一の原子炉に限定したリスク評価しか実施されていないが, 実際には複数の原子力施設を有するサイトが多く, 特に, 福島第一原子力発電所事故(以下, 1F 事故という)以降, 同一サイト内の複数の原子炉が関与する事象に対する安全性やサイトリスク評価に対して関心が高まっている。

2011 年の東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波により, 福島第一原子力発電所では, 複数のユニットが同時に被災し, 安全システムが深刻な損害を被る厳しい状況により, 3 基の原子炉で炉心損傷に至った。その過程で, 複数ユニット同時発災における事故管理能力の脆弱性が露呈した。しかしながら, 現在一般的に行われている単一の原子炉を対象としたリスク評価では, 1F 事故で見られた複数のユニットに関連する様々な問題の全てを説明できない。

ここで, 国内外における複数ユニットを有するサイトの状況を見てみたい。少し古い情報であるが, IAEA の PRIS データベースによると, 2013 年 3 月 10 日時点では全世界で, 2 つ以上のユニット(建設中, 長期間停止を含む)を有するサイトの割合は約 81% であり, 3 ユニットのを超えるマルチユニットサイトは約 32% である(図 1)。

図 2 に示すとおり, 我が国でも同様の傾向が見られ, 1F 事故後, いくつかの原子炉が廃炉(あるいは廃炉決

定)となったものの, 依然として半数以上のサイトで複数のユニットを有している。このような状況の中, 複数のユニットの事故進展の相互作用を考慮するマルチユニット PRA (MUPRA) については, 評価事例が限定されており, また, 未だコンセンサスの得られた評価手法がないというのが現状である。現在, 国際的に MUPRA

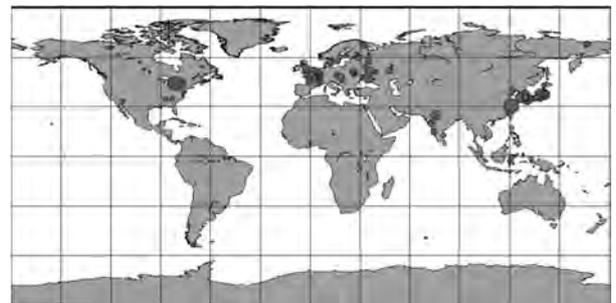


図 1 3 ユニット以上有するマルチユニットサイト¹⁾

(出典)Sujit Samaddar ら, Technical Approach for Safety Assessment of Multi-Unit NPP Sites - Subject To External Events, Fig.1 より引用

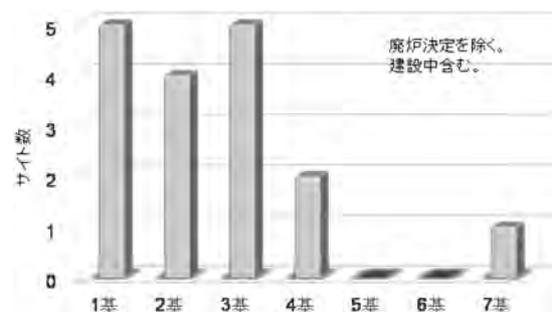


図 2 サイト内のユニット数の分布(2018年3月23日現在)
http://www.genanshin.jp/を元に作成

International trend on MUPRA: Hiromichi Miura, Ryuu Inomata, Kenichi Kanda.

(2018年6月6日 受理)

評価手法の確立に向けた研究・開発，ケーススタディ，ガイダンスの整備等が活発に行われている。

本稿では，複数のユニットの安全性に影響を及ぼしうるマルチユニット事象とそれを考慮したリスク評価である MUPRA について概説するとともに，国際的な MUPRA を取り巻く状況や研究開発動向について紹介する。

II. マルチユニット事象

MUPRA の概念について示す前に，複数のユニットの安全性に影響を及ぼすマルチユニット事象と，その発生状況について見ていきたい。

1. 近年の米国でのマルチユニット事象

MUPRA の評価モデルを検討する際の第一段階として，Suzanne ら²⁾により 2000 年から 2011 年までの米国での異常事象報告書(LER: Licensee Event Report)の事象について，レビュー・分類がなされた。LER に記載されている 4,207 件の事象のうち，マルチユニットに関するものは 392 件であり，これらの事象を起回事象(Initiating Event)，共有接続(Shared Connection)，同一の設備(Identical Component)，近接性(Proximity)，人的要因(Human)及び組織要因(Organization)の 6 つの要素(図 3)に整理できるとしている。

・起回事象

潜在的にマルチユニットに影響を及ぼす可能性のある起回事象に関する分類。常にマルチユニットに影響を及ぼす「確定(definite/direct)」事象と，ある特定の条件下においてマルチユニットに影響を及ぼす「条件付(conditional)」事象に分けられる。

・共有接続

マルチユニットにおける物理的な接続(共用設備，電源融通等)に関する分類。マルチユニットが単一の構築物，系統及び機器(SSC)を同時に使用している

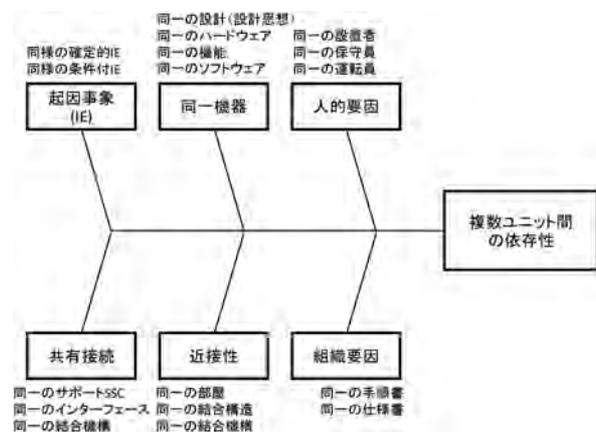


図3 マルチユニット事象分類³⁾

(出典) Mohammad Modarres ら, Advances in multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment, Fig.1 より引用

表1 LERにおけるマルチユニット事象の分類³⁾

分類	割合	LERの例
起回事象	6.91%	
確定的	3.84%	過酷な天候により外部電源喪失事象が発生し、3ユニットが自動スクラムした。
条件付	3.07%	ユニット2で作業中のダイバーとの交信不能により、ダイバーの安全確保のためユニット1をトリップした。
共有接続	34.27%	
単一	27.62%	共有の取水口での大規模なファウリングにより、2ユニットがシャットダウンした。
時系列	5.88%	補助給水系(AFW)が各ユニットで1つの専用トレインと1つのスイングリトレインを有する構成であった。ユニット間で共有する補助給水ポンプが作動不能であった。
スタンバイ	0.77%	運転員が試験中の非常用DGのアライメントを確認しておらず、試験中の自動起動防止となっていた非常用サービス水ポンプを正しく始動しなかった。
同一設備	10.49%	2ユニットでの中性子束モニタチャンネルの不正確な接合
近接性	4.60%	2ユニットでの安全停止能力を阻む可能性のあるケーブル処理室での火災被害。
人的要因	3.07%	
起回事象前事象	2.81%	同一のメンテナンスチームによるイグナイターの不適切な設置
起回事象後事象	0.26%	電氣的過渡事象後、運転員が適切に遮断器を閉としなかったため、外部電源喪失事象時に各ユニットで4つのうち2つの非常用母線でそれぞれの非常用DGから自動的に給電できない状況となっていた。
組織要因	40.66%	複数のユニットにおいて、高エネルギー配管破断の計算でエラーがあることが判明した。

(出典) Suzanne Schroer ら, An event classification schema for evaluating site risk in a multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment, Table 5 より引用

「単一の SSC」, マルチユニットが相互接続の関係にある「相互接続 SSC」, 予備の SSC がシングルユニットに対する機能しか有さない「予備 SSC」の 3 つに分類される。

・同一設備

マルチユニットにおいて同一の設計及び運用環境にある構築物に関する分類。

・近接性

近接した位置にあることから，単一の現象によってマルチユニットが影響を受けることに関する分類。

・人的要因

対応要員，運転や保守の作業員等の人間行動に関する分類。同一の作業チームがマルチユニットで同一の作業を行うケースだけでなく，例えば一人の運転員が複数の原子炉を担当する場合に，事象発生時に運転員がひとつのユニットに対応をしていることにより，他のユニットにおける事象の進展に対応できないというケースも含む。

・組織要因

マルチユニットにおける組織全体の方針に関する分類。マルチユニットにおいて，例えば運転手順書や緊急時対応手順書，サーベイランス手順，シミュレータ訓練は，組織として整備されたものである。

近年の米国におけるマルチユニットに関わる事象は，全 LER に対し 1 割弱であり，また，その多くは組織依存性に関わるものであった(表 1)。このことは，毎年ある程度の件数でマルチユニット事象が発生していることを示しており，必ずしも稀有な事象とは言えない。

2. 福島第一原子力発電所事故における複数ユニット発災による緩和策への影響

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に

より、福島第一原子力発電所は、地震とそれを起因とした津波の襲来、複数ユニットの同時発災、シビアアクシデントといった稀有で過酷な状況に晒された。一連の出来事は、様々な機関により広く検討され、多くの教訓が得られている。

ここでは、「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 最終報告」(以下、政府事故調という)及び「東京電力福島原子力発電所 事故調査委員会 報告書」(以下、国会事故調という)を基に、複数ユニット同時発災による事故収束対応への影響の観点から事故を振り返る。

(1)保安監督者の不足

1F事故のような複数ユニットの同時多発事故において、急速な事故進展が見られる場合には、1人で複数のユニットを保安監督することが困難であったと国会事故調は指摘している。

(2)対処プラントの優先付け・対応手段の制約

福島第二原子力発電所において、より深刻なユニットの対応に水源(純水タンク)を優先的に使用するため、他のユニットにおいてCSTを温存するためにS/Cを水源とするHPCSによる原子炉注水を選択した。

(3)他ユニットへの傾注・注意の欠如

福島第一原子力発電所において、当初、最も厳しいと判断された2号機のRCICに注意が引き付けられたために、1号機における重大な状況の変化が十分に共有されなかった。

(4)復旧作業への影響

福島第一発電所において、1号機原子炉建屋爆発による敷設途中の2号機のSLCポンプへのケーブルの損傷や、3号機の爆発による、2号機原子炉への注水用ホースの損傷、また、高レベルの放射線源となった瓦礫の飛散による作業場所・作業時間の制限等、復旧作業・計画の変更や中断が余儀なくされた。

III. マルチユニットPRAの概要

ここまで、マルチユニット事象について見てきたが、MUPRAを端的に言うとは、他の原子炉や放射線源の安全性が確保されているとの暗黙の前提のもとに評価される単一の原子炉を対象としたリスク評価(以下、シングルユニット評価という)では説明できない、これらマルチユニット事象・マルチユニット相互作用をPRAモデルにて表現することで、複数ユニットを有するサイトのサイトリスクを評価し、同一サイトに複数ユニットが存在することの影響(良い面と悪い面)を定量的に説明することと言えよう。

IAEAにて提示されているMUPRAのフレームワークを図4に示す。はじめに、MUPRAでは、複数のユニットを対象とすることから、単一のユニットを対象としたリスク指標から変更する必要がある、評価対象とす

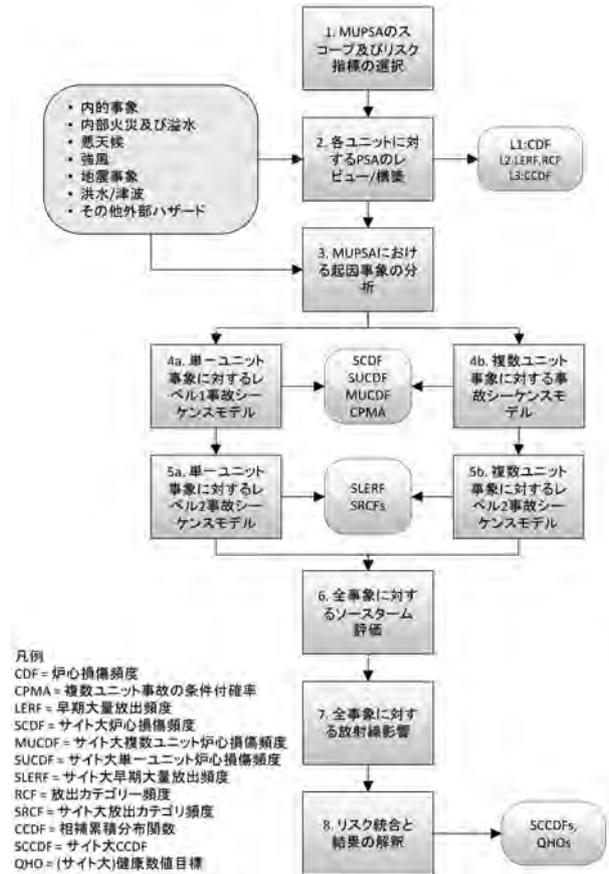


図4 MUPRAのフレームワーク

(出典)Sujit Samaddar ら、Technical Approach for Safety Assessment of Multi-Unit NPP Sites - Subject To External Events, Fig.2より引用¹⁾

るリスク指標を新たに設定する必要がある。一つの選択肢としては、1基以上の炉心損傷頻度を表すサイト大の炉心損傷頻度(SCDF)やサイト大の早期放出頻度(SLERF)を示すこと。もう一つは、公衆への健康影響や財産への影響に対する相補的累積分布関数(SCCDF)のようなリスク指標を設定することである。

続いて、サイト内の複数のユニットに同時に影響を及ぼす事象を分析し、MUPRAで対象とする起因事象を同定する。同定された起因事象に対して、事故シナリオを展開してPRAモデルを作成し、SCDFやSLERFといった所要のリスク指標を算定する。この際、サイト内での設備の共用や依存性だけでなく、他ユニットの事故進展に伴うマルチユニット相互作用や複数ユニット同時発災時の人的行動等をいかに適切にPRAモデル上で表現するかが肝要であり、現在、研究・開発が進められている。

MUPRAの要点は、SCDFやSLERFといったサイトリスクは、シングルユニット評価から算出されるCDF, LERFを単純に足し合わせた値にならない、すなわちシングルユニット評価結果からのリスク値を単純に操作することではサイトリスクは評価できないということである。

表2 Seabrook 発電所におけるレベル1 MUPRA 評価結果

Risk Metric	Mean Value
Single Reactor Unit CDF	2.3×10^{-4} /reactor-year
Two Unit Station CDF	
- Core damage to one reactor	4.0×10^{-4} /station-year
- Core damage to both reactors	3.2×10^{-5} /station-year
- Total	4.3×10^{-4} /station-year

(出典)Karl N. Fleming, On The Issue of Integrated Risk - A PRA Practitioners Perspective, Table 2 より引用

ここで、1983年に実施されたSeabrook原子力発電所におけるレベル3 MUPRA 評価での経験を示す。この評価は、増設計画のあった2号機の許認可に際して実施されたものであり、1号機をクローニングして2号機のモデルを想定し、開閉所や取水口等の限られた施設の共有を仮定したものである。Seabrookの評価は古く、その値自体は重要ではないが、ここから得られる知見は未だ多い。Seabrookでは、共有性があまり高く無いにもかかわらず、2ユニット同時損傷の割合が比較的高く、同時損傷の全CDFがシングルユニット評価結果の2倍を下回るという結果が得られている(表2)。また、レベル3評価においては、早期死亡における被ばくモデルには線量閾値が存在するため、シングルユニット評価結果の単純な拡張では得られないとの知見が得られている。

IV. マルチユニットPRAに関わる動向

サイトリスク、MUPRAに関する関心の高まりを受け、国際原子力機関(IAEA)をはじめ、OECD/NEAや多くの国・機関で、MUPRAの技術的評価手法の開発だけでなく、公衆への健康影響や安全目標、リスクアグリゲーション、サイトリスク、規制要件としてのMUPRAの検討がなされている。ここでは、近年特に活発な議論のなされている、カナダ、フランス、米国及びIAEAの取り組みを紹介する。

1. カナダの取り組み

全てのカナダの原子力発電所はCANDU炉であり、比較的多くの設備を共用しているという特徴がある。そのため、カナダでは、PRAの更新ごとにそのマルチユニット効果の取り扱い度合いを向上させてきた。

カナダにおけるMUPRAは、1987年のDarlington原子力発電所での内的レベル1MUPRAにはじまる。2005年にカナダ原子力委員会(CNCS)が規制基準S-294を発行し、MUPRAへの変更を推進するための多くの要求がなされ、2008年から2014年にかけて、事業者によりMUPRAへのアップデートが図られた。福島事故後、その教訓を踏まえ、CNCSでは、規制基準S-294を、原子炉以外の放射線源の影響やマルチユニットの影響に関する要求を含んだRegulatory Document 2.4.2に改定した。

近年、許認可審査の場で、異なるハザード、複数の原子炉、種々の運転状態及び原子炉以外の放射線源のリスクを統合した「サイト大リスク(whole-site risk)」が議論になっており、サイトリスクの評価手法だけでなく、リスクアグリゲーションの妥当性やサイトリスクの許容基準の設定が重要なトピックとなっている。

CANDU炉オーナグループでは、サイトPRAに関する概念レベルのレポート(COG 13-9034)を発行し(2014年)、CNCS主催の国際ワークショップを開催している。また、現在、Pickering原子力発電所におけるサイト大リスク評価を実施している。

カナダにおけるMUPRAでは、ユニット間の相違が小さいことから、評価を容易にするためにリファレンスユニットを設定し、イベントツリー・フォールトツリーにおいてマルチユニットの依存性を考慮することにより評価をしている。

2. フランスの取り組み

フランスでは、2009年のCruas原子力発電所での、植物による取水口の閉塞、1999年のLe Blayais原子力発電所の洪水等、外的事象によるサイト大事故が発生している。

フランス放射線防護原子力安全研究所(IRSN)は、2019年末までに、サイト全体に影響を及ぼすヒートシンク喪失及び電源喪失事象についての知見を得ることを目的として、MUPRAの研究を進めている。最初のステップとして、起因事象やユニット間共通原因故障(CCF)、ユニット共有設計や運転上の脆弱点、人的要素等、MUPRA上の重要な側面を把握するための運用経験の分析を実施している。

さらに、IRSNはフランス電力(EDF)に対して、2000年初めよりサイト大事故の考慮を要求しており、更に、原子炉と燃料貯蔵プール間の相互作用の考慮も要求している。

IRSNのレビュー下にある900MWe級PWRプラントの第4回定期安全レビューの枠組みにおいて、現在技術的議論が継続されており、2018年末にレビュー結果が出される見込みである。

3. 米国の取り組み

米国では、米国原子力規制委員会(NRC)の前身のAECの時代からMUPRAに関して整備を進めてきた。1979年のTMI事故の経験から、NRCはマルチユニットに対する事故時の影響緩和に関する規制の必要性を議論してきた。

近年では、小規模モジュール型原子炉(SMR)が現在設計段階にあり、許認可取得に向けてプロジェクトが動いている。SMRの特徴として多くの共有システムを有している点が挙げられる。こういった背景から、同一サイ

ト内のマルチユニットに関するリスク評価の重要性が高まっている。そこで、II.1項で示した分析・検討をはじめ、オークリッジ国立研究所等、多くの学術機関でMUPRAに関わるさまざまな研究活動がなされている。

NRCでは、NUREG-1150後の技術的發展を反映したレベル3 PRAの評価技術を確立し、また規制上の新しいリスクインサイトを得るため、2010年より商用原子力発電所での、MUPRAを含む、サイトレベル3PSAプロジェクトを実施している。

また、現在MUPRA手法として検討されている手法のほとんどは、従来の静的なPRA評価手法(ET/FT)を拡張することによるアプローチであるが、アイダホ国立研究所では、安全性解析コードと確率論的評価コードとを組合せ、事象進展や発生タイミングを考慮できるダイナミックPRAによるマルチユニットサイトのリスク評価の研究に取り組んでいる。

4. IAEAの取り組み

2012年以来、IAEAでは、複数のハザードの影響を受けた複数ユニットの安全評価に関する枠組みと方法の開発を目的とした活動をしており、以下の文書を発行している。

- ・ Technical approach for Multiunit Probabilistic Safety Assessment Multiunit Probabilistic Safety Assessment(MUPSA)SR-8.5
- ・ External hazard considerations for single and multiunit probabilistic safety assessment SR-8.4

上記プロジェクトでは、MUPRAにかかわるハイレベルなガイダンスを提供しており、IAEAは加盟国の要請に応じて、2016年12月に外部事象セーフティセクション(EESS)追加予算プロジェクト(EBP)フェーズ2の枠組みの中で、MUPRAの方法論を開発し、MUPRA実施方法に関する文書を作成することを目的とした、3カ年の新たなMUPRAプロジェクトを開始した。

フェーズ1(2017)では、将来的なレベル2・レベル3評価に繋げるためのレベル1PRA手法の確立、様々な炉型、運転モード、ハザードへの適用、マルチユニットリスクへの支配的な寄与因子の特定、妥当な定量結果の提供、実用性を目標とした実践的なMUPRAモデルリングガイダンス、MUPRAの実施方法を提供する文書を作成することとしており、フェーズ2(2018年)では、ケーススタディを実施し、手法の適用性の確認と改善点を抽出することとし、その経験を踏まえ、フェーズ3(2019

年)に手法の改善を図ることとしている。

V. まとめ

公衆のリスクを考える際、ユニット単位だけでなく、サイト全体で何が起こるか、サイト内の全ての放射線源からリスクを考える統合サイトリスク評価が必要である。現実的なサイトリスク評価の技術的基盤としてのMUPRAの評価技術の確立は、現在、国際的に活発になされている。

MUPRA評価技術の向上、サイトリスク評価の確立により、新たなリスクインサイトが得られ、原子力発電所のさらなる安全性向上に繋がることが期待される。

— 参考文献 —

- 1) Sujit Samaddar et al. "Technical Approach for Safety Assessment of Multi-Unit NPP Sites - Subject To External Events", PSAM 12, 2014.
- 2) Suzanne Schroer et al., "INITIAL CLASSIFICATION OF EVENTS TO CONSIDER IN A MULTI- UNIT PRA", ICON20, 2012.
- 3) Mohammad Modarres et al. "Advances in multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment", Reliability Engineering and System Safety, 2016.
- 4) Karl N. Fleming, On The Issue of Integrated Risk - A PRA Practitioners Perspective.

著者紹介



三浦弘道 (みうら・ひろみち)

電力中央研究所 原子力リスク研究センター
(専門分野/関心分野)原子力安全工学, 確率論的リスク評価



猪股 亮 (いのまた・りょう)

電力中央研究所 原子力リスク研究センター
(専門分野/関心分野)原子力安全工学, 熱流動評価, 確率論的リスク評価



神田憲一 (かんだ・けんいち)

電力中央研究所 原子力リスク研究センター
(専門分野/関心分野)原子力安全工学, 確率論的リスク評価, マルチエージェントシステム

映画『日本と原発4年後』を観て

フリージャーナリスト 井内 千穂

脱原発関連訴訟をリードし、原発ゼロ・自然エネルギー推進連盟(原自連)の幹事長・事務局長を務める河合弘之弁護士が製作したドキュメンタリー映画『日本と原発4年後』を観た。

『日本と原発 私たちは原発で幸せですか?』(2014年)の改訂版として2015年に公開された作品である。前作と合わせて約2,000回の自主上映会が開催され、延べ15万人が観たという。

原発の始まりとその歴史、福島第一原発の事故の経過、被災地の有り様から東電の責任追及、原子力ムラ相関図、新規制基準の問題点、地震大国日本における浜岡原発の危機予測、原発テロの恐怖、使用済み燃料の行方まで、脱原発の論客のみならず元原子力委員会のメンバーへのインタビューも含む充実した内容である。大飯原発差止訴訟の勝訴、高浜原発差止仮処分決定、川内原発仮処分却下など、原発関連訴訟の動向も踏まえ、弁護士視点であらゆる論点を盛り込まれると、素人の観客には相当な説得力があると言わざるを得ない。今年の6月から全編YouTubeで無料公開されているので、原発推進派の方々にもぜひ観ていただき、各論点について反論を聞いてみたいものである。

最も印象に残ったのは、原発だけは科学・技術の進歩の一般論に当てはまらないという主張だった。原理の発見から実用化され、事故や失敗の原因究明や検証によって改善していくのが一般的な科学・技術の進歩だが、原発は被害が過大で不可逆であり、放射能のため原因究明が困難で検証不能だから改善していくことができないというのである。原発だけ?この特別な忌避感の有無こそは、経済面や技術的な理屈を超えて、原発への賛否を分けるのではないかと改めて感じた。

しかし、原発をゼロにして自然エネルギーに転換すればすべては解決するものなのか?河合弁護士製作の最新作『日本と再生 光と風のギガワット作戦』では何と言っているのか、観てみよう。

Column

「表情は嘘をつかない」

日本文理大学 工学部 北岡 哲子
特任教授

トルストイの「アンナ・カレーニナ」に、幸福な家庭は似ているが、不幸な家庭は不幸のおもむきが異なるとあった。確かに世間の諸問題と無縁な幸せとは違い、不幸の形は多種多様である。

通常、幸福などの感情は、表情として表出される。感情と表情の先駆的研究で著名なポール・エクマン博士は、パプアニューギニアの部族民、先天的盲目の幼児等の調査から、人間の基本6感情:幸福・悲しみ・恐れ・怒り・嫌悪・驚きに対応する基本6表情は万国共通で普遍的であり、後天的な学習によるものではないと結論づけた。

貴族も、発展途上国の原住民も、笑顔や悲しむ表情は生まれながら同じであり、その証明は、博士が提唱した表情記述法(表情の公式)に基づく。博士は顔表情の動きを目視できる最小の単位(AU)に分解し44まで番号をつけ、表情の変化をAUの組み合わせで表現した。例えば、悲しみの表情はAU1「眉の内側を上げる」、AU4「眉を下げる」、AU15「口角を下げる」を合成して(AU1+4+15)出来上がる。このAUの動きが顔に現れれば感情は悲しみと判定される。

筆者も表情は重要な研究テーマの一つであり、基本6表情以外(憂鬱や癒し)の様々な表情や、原因は数多ある不幸の表情の公式化に興味がある。例えば震災被害による避難生活や救助・修復活動で陥る極限のストレス状態や、其々の立場に対する中傷・批判で生じる絶望等、各場面で感じる感情に対応する表情の法則性を見つけない。もし、反目する相手の表情に厳しい発言とは真逆の本心を確認できれば、両者の軋轢は共感や受容の心境へと転じていくかもしれない。疑いなく「表情」は、良好な人間関係構築に貢献できる貴重なツールである。

モロッコの原子力発電事情(上)

コメニウス大学
医学部英語コース 妹尾 優希

モロッコよりこんにちは。今回は、病院実習の訪問先モロッコで注目を浴びている、太陽光を集めタービンを回し発電する巨大太陽熱発電所「ノア」についてお話しさせていただきました。このノアプロジェクトの第一段階である、大きさ450ヘクタール、発電量160MWもの「ノア1」が2016年2月16日に稼働を始めて以来、モロッコでは「ノア2」「ノア3」「ノア4」…というように太陽熱発電所の建設がされてきました。90億ドル近い資金調達は世界銀行やドイツを中心にまかなわれています。一方で、この再生利用可能エネルギーの水面下では、様々な国との共同開発による原子力発電所の建設が計画されています。まず、1986年に米国の支援により首都ラバトより40キロ北部に位置する、マーモラという森林地帯にCNESTEN(原子力技術電力科学センター／Centre National de l'Energie des Sciences et Techniques Nucléaires)が設置されました。2008年より、こちらのセンターでは、General Atomics社のTRIGA Mk IIという小型の研究用原子炉が導入されており、モロッコでの原子炉建設や原子力研究者、原子力発電所の技術者の養成のための施設として機能しています。他方で、近年のロシアのアフリカ諸国への原子力発電所建設の積極的な関与を受けて、モロッコも2016年3月に「戦略的パートナーシップ宣言」に署名しています。この二国間戦略的パートナーシップでは、モロッコのエネルギー政策と対テロ対策にロシアが関与する代わりに、ロシアからモロッコへの観光客を年間20万人に増やすことが条件となったと報道されています。外部からは断片的かつ無軌道な内容の記事が多く、混迷しているようにみえます。

Column

脱・プラスチックストローを考える

国際環境経済研究所
理事・主席研究員 竹内 純子

いま世の中で急速に「脱・プラスチックストロー」が進んでいる。プラスチックごみによる海洋汚染の深刻化を受けて、アメリカやイギリスなどでプラスチック製のストローやマドラーなどの使用が禁止されたり、大手コーヒーショップなどが使用を取りやめ、日本でも追随する動きが加速している。

しかし世の中にプラスチック製品は数多くある。アメリカだけでも日々5億本のストローが消費されるとはいえ、海洋汚染への寄与度においてストローが突出して高いということでもない。なぜ「ストロー」だったのだろうか。

思いつく理由は、ストローはどうしても使わなければならないものでもないし、使わない人もいるのに自動的についてくることも多い。要は心がけ一つで節約できるということ。加えて「1回使ったらそれで終わり」といったこともあるだろうか。しかしそのようなプラスチック製品は他にも多くある。要は、ストローという身近な存在を「象徴」として、広くプラスチック製品の利用そのものを見直すことにつなげていくということなのだろう。回収システムなどを確立するには社会のコンセンサスが必要であり、そのためにも「象徴」は必要だ。

しかし得てして象徴はスケープゴートにされ、活動はそこから広がりを見せることなく終わる。スケープゴートを叩くうち、自身の正義感に酔いしれてしまい、本来の目的を見失ってしまう人が多いといったら言い過ぎだろうか。ストローをきっかけとして本質的な広がりを持つ活動となるか、あるいは、悪者を退治し終わると飽きてしまうということになるか。夏の終わりの海を眺めながら、脱・プラスチックストローを考えている。

県民の日

東洋大学社会学部 渡辺 真由

お盆の時期に地元「いわき」に帰省した。涼しい風が豊かな緑を走り抜け、懐かしい匂いを運んでくる。近所の子供が外で遊ぶ声も聞こえてくる。震災直後は外で遊ばなかったなあと思い出した。

震災後から駅前では毎週「反原発」を唱える方達がいる。安全神話が崩壊した原発は、使わないに越したことはない。でも今まで、経済面・エネルギー面で多大な恩恵を受けてきたのも事実だ。ただひたすらに「反原発」とだけ叫ぶのを見ると、嫌悪感を抱いてしまう。複雑で触れにくい話題は、どうしても距離を置きがちだ。

偉い人、有識者の一声で世論や私たちの生活は簡単に変わってしまう。無知故にその声を信じ、生活を託すしかない。健康被害や環境汚染も勿論大事だが、生物学的な「ヒト」ではなく、そこにいる心が通い合う「人」を考えたことはあるのだろうか。

いわき市は被災地域でもあり、避難者の受け入れ地域でもある。避難者の苦しい生活、やり切れない心情や、仮設住宅が新興住宅に変わりゆくのを私達は目の当たりにしてきた。その一方、巨額な賠償金の記事が目の中の景色と繋がる。賠償金も何もない自分たちとの差が浮き彫りになる。小さな違いが大きな溝を作っていく。理屈では分かっている、感情的に飲み込めない。そう思う度に、羞恥心や罪悪感に苛まれる。

自分達も、未だ戻れない人達も、デモを行う人達も、いつか同じ県民として肩を並べ、心の底から笑える時が来るだろうか。県民の日を迎え、ふと考えた。

Column

原子力事故は許されているのか

東京大学大学院
工学系研究科 原子力国際専攻 渡辺 凜

カズオイシグロの *The Buried Giant* を読んだ。老夫婦の間の葛藤と壮大な冒険を通じて、「許しと忘却」というテーマが浮かび上がる。物語に登場する一見幸せな世界では、ある人が犠牲となる代わりに、社会全体が辛い過去の記憶を奪われている。人々はこのことを知らされていない。「平和」は、辛い記憶を許容することではなく、忘却することで成り立っている。このことに気がついてしまい、奪われた記憶を探るべきか悩む人たちの葛藤が描かれている。

現実の世界でも、当事者が出来事を許すと許すまいと、忘却は知らぬ間に(ときには何世代もかけて)否応なく進んでゆく。許されないまま忘れられていくことは、許されるチャンスを失う過程でもある。

福島第一の事故は、その被害者に許されているのか。そうは思えないが、このさき世間で徐々に風化が進むことは避けられない。ここで社会として考えるべき問題は、「許されないまま事故のことを忘れても大丈夫か」「原子力事故は日本にとって許せない存在でよいのか」である。

たとえば原爆や戦争の被害は許せないと判断された結果、「ゼロリスク」を目指す方針が選ばれた。

原子力発電も、過去の事故が許されないままでは、今後の事故リスクを一切許容してもらえない。「ゼロリスク」を求められて当然である。しかし、原子力発電所を使い続けるならば、ゼロリスクはありえない。次に何かあったら、一層厳しい立場に立たされるのは自明である。明らかにねじれた現状を意図的に看過する、あるいは改善する力量を欠いているならば、原子力業界はもはや一人前の社会の構成員ではない。

WEO2017 と内外エネルギー情勢への示唆

第4回 低炭素化に向う世界の電力需給

東京大学 小宮山 涼一

WEO2017 の世界の電力需給見通しでは、需要面では国際的な電力消費の拡大、供給面では太陽光・風力発電と天然ガス火力の増加が見込まれ、低炭素化が進む。特に風力・太陽光発電の普及により、世界の再エネ電力比率は現状の2割から2040年には4割まで拡大し、風力発電は2040年までに原子力発電の電力比率を超えるなど、供給構造の大きな変化が予想されている。しかし再エネ普及は卸電力価格低下を介して電源への投資リスクを高めるため、安定供給確保に貢献する仕組みである容量市場の創設など、電力市場政策の役割がより重要になると考えられる。

KEYWORDS: *electricity market, carbon regulation, renewable energy, nuclear energy, electrification*

I. はじめに

電力需要は近年、世界の最終エネルギー消費の中でも高い伸びを見せており、背景には新興国における所得水準の向上や旺盛な生産活動、熱供給等での化石燃料から電力消費へのシフトといった電力化が背景にある。また長期的に見ても、電気自動車やIoT技術の普及進展など、社会全体の電力需要が引き続き増加する余地が大きいと考えられる。一方、電力供給では近年、コスト低下や政策支援をうけて、再生可能エネルギー(再エネ)が国際的に急増している。2016年には、火力発電の新増設量と太陽光・風力発電の新増設量がほぼ同水準となり¹⁾、国際エネルギー市場での再エネの存在感が高まっている。同時に、リチウムイオン電池などバッテリー技術の価格低下も進んでおり、再エネと共に普及拡大が進めば、将来の電力システムの構造に大きな影響を与える可能性がある。また2016年現在、世界の電力供給の1割を占める原子力発電は、電力安定供給確保や環境対策強化を背景に中国やインドなど新興国を中心として新設が進む一方、米国ではシェールガス拡大による市場環境の変化をうけて、閉鎖に追込まれる原子炉が現れるなど、原子力

は採算性確保が容易ではない状況となっている。

本稿ではWEO2017¹⁾での電力需給の長期展望を紹介し、電力システムの長期的なトレンドと新たな課題について考える。

II. 電力需給の長期展望

1. 世界の電力需要

電力は世界全体のエネルギー消費の中でも急速に消費量が増えており、2040年までの最終エネルギー消費全体の伸びの4割を占め、国際的に社会の経済活動を支える上で不可欠なエネルギーとなる。過去25年間では、石油が世界のエネルギー消費の伸びの4割を占めていたが、石油に代わり電力が中長期的に社会における重要性を高めると見られる。WEO2017において、世界各国のエネルギー環境政策を反映した実現可能性の高い新政策シナリオでは、世界の電力需要は2040年までにさらに6割も増加し(図1)、この伸びの8割強が新興国での旺盛な電力需要の伸びに由来するため、世界の電源も新興国を中心に新増設が進むと見られる。また今後の電力需要の伸びを部門別に見ると、産業用動力、空調機器、情報機器での電力需要の伸びが7割以上を占め、残りは電気自動車の普及による輸送用需要での電化に起因する。先進国では産業用動力に次いでIoT関連機器の電力消費の割合が拡大する一方、新興国では経済発展を受けて特に産業用動力での電力消費が2040年には現状比2倍まで急拡大し、空調等でも電力消費が増加する。

Implication from WEO 2017 for energy system (4) ; Decarbonization of electricity market : Ryoichi Komiyama.

(2018年7月9日 受理)

■前回のタイトル

第3回 天然ガス・LNG需給の長期展望

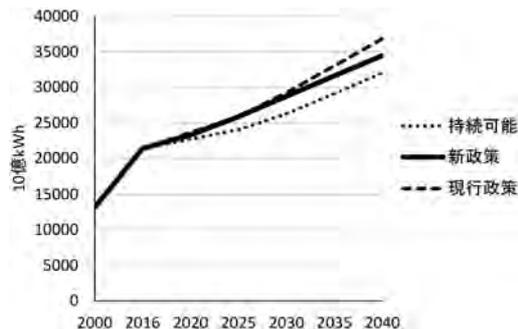


図1 世界の電力需要の展望

(出典) IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

このように世界の電力需要は、先進国・新興国を問わず伸びる見込みであるが、WEO2017では、経済成長との関係は、従来より変化すると想定されている。特に省エネ進展により、経済成長率に比べ、電力需要の伸びは抑制される見方となっている。例えば、2008年の米国金融危機以前までは、世界の経済成長の伸びに対して、世界の電力需要の伸び率も同じ水準で成長してきたが(所得弾力性はほぼ1に等しい)、長期的には省エネの影響により、電力需要の伸びは経済成長率に対して緩やかになると見込まれている。新政策シナリオでは、GDPは2040年に現状比で倍増するのに対して、電力需要の伸びは経済成長の伸びの半分にとどまる(所得弾力性は0.5程度)。飛躍的な経済発展を遂げる新興国でも同様にGDPが180%も伸びるが、電力需要の伸びは100%にとどまり(所得弾力性は0.6程度)、従来の経済成長と電力需要の関係に変化が現れ、社会全体で電力の省エネの影響が広く波及すると予測されている。

また、WEO2017では3シナリオで分析が行われているが、特徴として、全シナリオにおいて電力需要は2040年にかけて順調に増加すると予測されている(図1)。特に、2℃目標と整合性のある持続可能な開発シナリオにおいても電力需要は大きく伸びる。これは化石燃料系の2次エネルギーとは異なり、電力消費が増えても、電力供給源を低炭素化できれば、CO₂排出量を抑制できるためである。そのため、環境制約の厳しいシナリオでも、2040年まで電力需要は増加する可能性があり、特に電源を再エネ、原子力、CCSによりゼロエミッション化できれば、最終消費に占める電力比率を高めるほど、CO₂排出量の大幅削減が可能となる。

2. 世界の電力供給

WEO2017の2040年までの電力供給の展望においては、中長期的に、天然ガス火力と、太陽光・風力発電を中心とした再エネ電源が増加すると見込んでいる(図2, 図3)。また各国の電力政策にも近年、大きな変化が現れていると指摘し、特に石炭火力の依存度低減、再エネへのシフトを促す政策が進められているとしている。これ

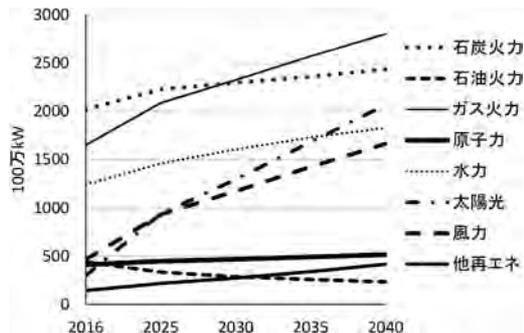


図2 世界の電源設備量の展望(新政策シナリオ)

(出典) IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

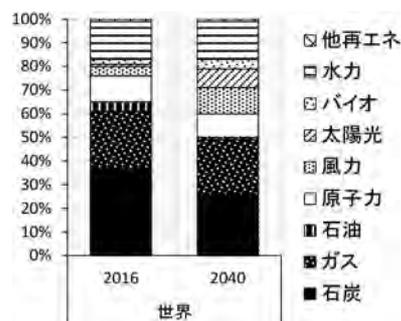


図3 世界の2040年までの発電量構成(新政策シナリオ)

(出典) IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

らを反映して、蓋然性の高い新政策シナリオでは、電源設備容量に着目すると、世界の石炭火力導入が長期的に緩やかになる中、世界の天然ガス火力の設備量は2030年までに石炭火力を超える(図2)。石炭火力はアジアを中心に依然として設備量自体は伸びるが(図2)、過去に比べ伸びは鈍化する。発電量でも、世界の電源構成には大きな変化が現れる(図3)。2040年までの世界の発電量は風力、ガス、太陽光を中心とした増加が鮮明となり、それぞれ世界の総発電量の伸びの2割、この3種類で計6割の電力供給量増加を担う。風力・太陽光発電の普及により、火力の電力比率は2040年までに現在の6割から5割まで減少する一方(図3)、再エネ比率は2割から4割まで拡大し、中でも風力発電は2040年までに原子力の電力比率を超えて水力に次ぐ第2位の発電量を有する低炭素電源となる(図3)。

世界の太陽光発電の設備量は2025年までに風力、2040年までに水力を超え、急速に導入量が拡大し(図2)、電源の中で最大の増加量となる(図4)。再エネ電源は国際的に普及が進み、2040年までの設備量の伸びの6割が再エネとなり、再エネ電源への投資が活発化すると見込まれる。欧州では2040年までの電源新增設量の8割を陸上・洋上風力が占め、中国では過去5年間で世界最大の再エネ導入量を記録しているが、2040年までの同国の7割以上の電源の伸びが再エネとなり、世界の再エネ市場拡大を主導する。特に太陽光発電の世界の電力比

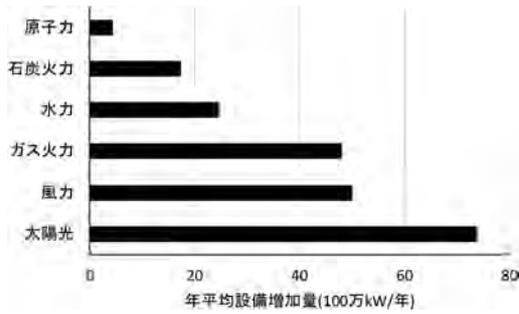


図4 世界の2040年までの電源年平均設備増加量 (新政策シナリオ)

(出典) IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641~) をもとに著者作成

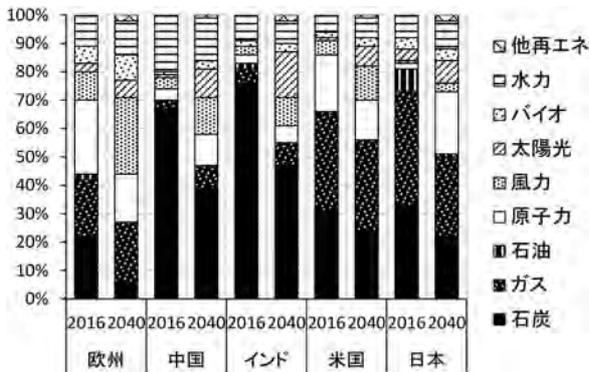


図5 2040年までの各国の発電量構成 (新政策シナリオ)

(出典) IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641~) をもとに著者作成

率は現状の1%から2040年には8%へ大きく上昇する(図3)。欧州では風力の電力比率は2040年には3割に達し、最大の電力供給源となり、主力電源化する(図5)。

原子力開発は国際的には中国、インド、ロシアなど一部の国で積極的に行われ、世界全体での導入拡大は緩やかに進む(図2)。原子力の電力比率は2040年まで1割で安定的に推移する(図3)。天然ガス火力の発電量は6割増加するが、電力比率は2割程度で2040年まで推移する。石炭火力の発電量は過去25年間で2倍に増加したが、2040年までの伸びは1割以下となり、石炭火力の比率は2016年の37%から2040年には26%まで低下する。すでに2014年の41%から見ても大きく低下しており、長期的に石炭依存度は減少基調で推移する。CCS付火力導入は進まず、電力比率は2040年で1%以下にとどまる。

天然ガスはCO₂排出量が相対的に小さく、ガス火力は中長期的に見ても重要な役割を担うが、地域別に発電量構成を見ると、資源量や政策の特徴を反映した形で推移する(図5)。米国ではガス火力が2040年まで最大の比率を占めるが、再エネ拡大により比率は徐々に減少し、大幅な拡大の可能性は低い。日本は原子力再稼働により、天然ガス火力比率は減少する見込みであり、2016年の4割から2040年には3割まで低下する。

欧州でも低炭素化政策の推進の中でも2040年までガス火力比率は2割を占める。中国やインドでは急速にガ

ス火力発電量が増加の見込みであり、中国の天然ガス発電量は2040年には世界第3位となるが、両国でのガス火力比率は1割程度にとどまる。中東ではガス火力の電力比率が6割以上を占め、世界で2番目の天然ガス発電量を誇り、北アフリカも天然ガス火力に大半を依存し、メキシコやカスピ海沿岸の東欧諸国も半分を占める。

石炭火力は、中国、インドを中心に、国際的に依存度が着実に低下する見込みである(図5)。特に欧州で石炭比率が大きく低下し、現状の2割を上回る比率から2040年には6%まで低下し、日本でも33%から22%へ低下、韓国でも現状の40%を上回る比率から15%以下まで低下する。米国では、石炭火力発電量自体の減少量は比較的小さいが、石炭火力比率は2016年の31%から2040年には24%へ低下する。米国の石炭火力比率はピークの2005年の40%から既に大きく低下している。中国とインドでは石炭中心の電力供給から電源多様化が進められ、インドでは、太陽光は100倍、風力は9倍も発電量が増加する一方、石炭の電力比率が現在の76%から2040年には半分になるが、2040年まで石炭発電量は年平均3%で増加し、石炭火力が最大比率を占める主力電源となる。中国、インド両国の2040年の石炭火力発電量は世界の6割以上を占め、東南アジアでも石炭火力の発電量は3倍増加し、石炭比率は5%上昇する。

3. 電力インフラ投資の展望

世界的な電力供給能力の増強に伴い、電力インフラへの設備投資が必要になる。2040年までの電力部門への総投資額は19兆ドル、年平均8,000億ドルにのぼり、エネルギー供給全体での総投資額の半分に達する。電力インフラの老朽化を踏まえ、2015年、2016年の世界の電力部門の投資額は年間7,000億ドルをすでに超えている。2040年までの電力部門の総投資額の内訳を見ると、6割が発電部門で、残り4割が送配電部門への投資となる(図6)。特に、再エネ普及拡大を反映して、発電部門への投資額の6割以上が再エネとなる。また電力消費が大きく伸びる新興国での電力部門投資額が世界の6割以上

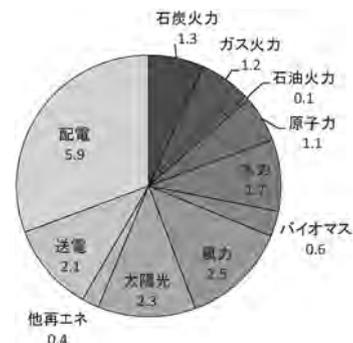


図6 2040年までの電力部門での総投資額の内訳 (新政策シナリオ), 単位: 兆ドル(2016年)

(出典) IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Figure 6.10 (p.251) をもとに著者作成

を占める。電力インフラの新增設、老朽インフラの維持、再エネ電源拡大に対応するための電力インフラ高度化投資など、先進国や新興国でニーズは異なるものの、効率的に投資を確保するための電力市場ルールの制度設計が国際的に重要な課題になると考えられる。

4. 原子力発電の展望

新政策シナリオでは、世界の原子力発電は2016年の4億1,300万kWから2040年には5億1,600万kWまで増加する。原子力市場全体で見ると、欧州、日本、韓国で長期的に原子力設備量が徐々に減少するものの、中国、インドでの新增設量が先進国での設備量減少を相殺して、世界全体で2040年まで増加する。WEO2017では、原子力は2040年まで世界で1割程度の電力比率を維持し、日本、ロシア、韓国、欧州、米国、東欧で重要な役割を担うと指摘されている。

2016年現在、原子力導入量は欧州で1億2,700万kW導入され、ついで米国で1億500万kW、ついで日本、中国、ロシアの順となっている(図7)。中国では2040年まで世界最大規模での原発新設が進み(図8)、原発設備量は現状の4倍まで拡大し、2030年には、米国、欧州を抜いて、世界最大の原子力発電導入国となる(図7)。欧州の原子力は、再エネ普及拡大の影響により、ベルギー、フランス、ドイツ、スイスで減少し、2040年までに欧州全体で廃止が大きく進み(図8)、現状比約3割減少する。米国でも、シェール革命によるガス火力の競争力向上、

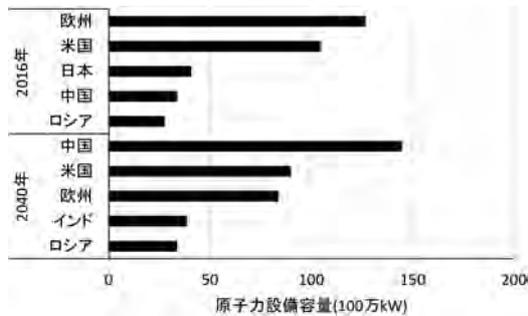


図7 原子力発電導入量上位5カ国(新政策シナリオ)

(出典)IEA,World Energy Outlook 2017), Figure 6.9(p.250)をもとに著者作成

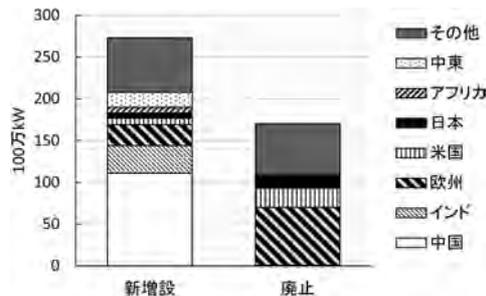


図8 原子力の新增設と廃止設備容量(新政策シナリオ)

(出典)IEA,World Energy Outlook 2017), Table 6.3, Table 6.4 (p.248~249)をもとに著者作成

再エネ普及により、採算性確保の問題から、原子力閉鎖が進むと見込まれている(図8)。インドは、2032年までに6,300万kWの原子力発電導入目標を掲げており、2040年には世界の原発導入国上位5カ国に入ると予測されている(図7)。ロシアも政府の後押しで、2040年に3,400万kWまで増加するが、電力需要の伸びが緩やかなため、拡大は限定的となる。日本の原発設備量も福島第一原発等で廃止が進み(図8)、2040年には現状比3割減の約3,000万kWへ縮小すると見込まれている。

5. 再生可能エネルギーの展望

(1)再エネ電源のコスト低下

近年、再エネ電力のコスト低下が顕著であり、WEO2017では、将来の電源構成を見る上で重要な要因として位置づけられている。太陽光発電は2010年から2016年までに7割もコスト低下が進み、2030年までさらに5割のコスト低下が予測されている。風力発電のコスト低下も進み、2010年から2016年まで25%低下し、陸上風力は大型化などにより2030年までにさらに15%低下、洋上風力も30%低下すると見込まれている。現にドイツやデンマークでの浅瀬域での洋上風力発電事業では記録的な低コスト化が進んでいる。

新政策シナリオでは、陸上風力、太陽光発電の発電コストは多くの地域において、石炭火力、ガス複合火力の発電コストを下回ると見通している。中国やインドでは、既に陸上風力の発電コストはガス複合火力を下回り、欧州では2025年、米国では2030年までに陸上風力がガス複合火力の発電コストを下回るとしている。太陽光の発電コストでは、インドで既にガス複合火力を下回り、中国も2020年までに下回るとしているが、米国、欧州では2040年までに太陽光の発電コストがガス火力を下回ることはないと見込まれている。

石炭火力の発電コストは大半の地域でガス複合火力を下回るが、米国では既に風力の発電コストが石炭火力よりも安く、欧州や中国でも2030年までには風力が石炭火力を下回る見込みである。太陽光の発電コストもインドで2025年、中国や米国で2030年、欧州で2040年までに石炭火力を下回ると見られている。バッテリーのコスト低下も顕著であり、2040年までに現状比6割以上もコストが低下し、2016年の700ドル/kWhから中長期的に300ドル/kWh以下まで低下すると見込まれ、再エネの普及を後押しすると見られている。

(2)再生可能エネルギーへの政策的支援

WEO2017によれば、2016年の世界の再エネへの政策的な支援額は固定価格買取制度(FIT)を中心に1,400億ドルにのぼり、ドイツ、米国、中国、日本、イタリアの上位5ヶ国が総支援額の6割以上を占め、欧州全体では同4割以上を占める。再エネ支援額は2015年に比べ2割も増加しており、この伸びの7割以上を中国、日本、

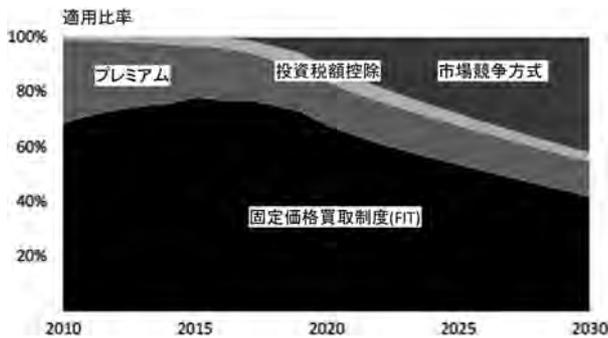


図9 風力発電・太陽光発電量の経済支援別内訳(新政策シナリオ)
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017), Figure 6.24(p.275)を翻訳、
転載

米国の3カ国で占める。背景には太陽光、風力の普及拡大があり、風力、太陽光で総支援額の8割を占める。中国は風力発電への支援が大半であるが、他の国々では太陽光発電が最大の支援額を受けている。新政策シナリオでは、2030年までに再エネ支援額は6割増加し、2040年には年間2,000億ドルに達し、大部分が風力、太陽光の導入支援に利用される。

2016年現在、風力、太陽光発電量の7割が固定価格買取制度(FIT)、3割が卸市場価格にプレミアムを上乗せする方式等による政策的支援を受けている(図9)。しかし今後、コスト低下による再エネの経済的自立化が見込まれるため、固定価格買取制度を受ける風力、太陽光発電は減少し、2030年には全体の4割まで低下するが、依然としてFITの役割は大きい。また再エネのコスト低下を受け、2030年には太陽光、風力発電の4割が競争原理に基づく支援(グリーン証書、オークションに基づくプレミアム方式やFIT)を受け、2030年には太陽光、風力発電の2割が支援無しで導入されると予測されている。このように今後は競争原理を活用した支援が主流となり、2030年までに太陽光の支援額は7割削減、風力は4割減少する見込みとなっている。

Ⅲ. 結語

WEO2017の電力需給見通しのハイライトの一つとして、再エネの普及拡大が挙げられる。しかし、WEO2017では政策支援を受けた再エネ普及がもたらす問題点として、電力市場の競争化ともあいまって、卸電力価格の低下により、電源への投資リスクが高まり、電力の安定供

給の不確実性が高まる可能性を指摘している。

この電力安定供給確保策として、WEO2017では、容量市場の創設を挙げている。わが国でも再エネ普及による卸電力価格低下で電源の収入の不確実性が高まり、事業者の発電投資意欲を減退させ、中長期的に国全体で必要となる供給力・調整力確保が困難になることが懸念されており²⁾、将来の供給力を確実に確保するための実効性のある仕組みとして容量市場の導入が検討されている³⁾。容量市場は、米国北東部や英国等で導入されており、市場管理者が最大電力供給能力(kW)をあらかじめ確保し、実需給時の発電能力に応じて発電事業者に一定の報酬を支払う仕組みである。容量市場を通じ、競争的市場での再エネ普及下にあっても、供給能力確保を確実に行うことで、需給ひっ迫や卸市場価格の高騰を回避して電気料金の安定化に貢献し、消費者にもメリットがあると考えられる。

電力の低炭素化を実現するためには、火力への依存度低減が必要であるが、再エネ電源とともにゼロエミッション電源である原子力の活用も不可欠となる。しかし再エネ大量導入により卸電力価格低下の影響が顕在化すれば、原子力の新增設、維持が困難になる可能性もあり、容量市場など、電力市場政策の役割がより重要になると考えられる。

－ 参考資料 －

- 1) International Energy Agency(IEA)/OECD: World Energy Outlook 2017(WEO2017), OECD/IEA, 2017.
- 2) 経済産業省;総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会資料 中間とりまとめ(案), 平成30年5月.
< http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/denryoku_gas_kihon/seido_kento/pdf/023_04_01.pdf >
- 3) 電力広域的運営推進機関;平成30年度供給計画の取りまとめ, 2018年3月.
< https://www.occto.or.jp/kyoukei/torimatome/files/180330_kyoukei_torimatome.pdf >

著者紹介

小宮山涼一 (こみやま・りょういち)
本誌, 60[8], P29(2018)参照.

核融合トリチウム研究最前線
—原型炉実現に向けて—

第5回 液体増殖材開発の最前線

東京工業大学 近藤 正聡,
核融合科学研究所 田中 照也

核融合炉の燃料増殖ブランケットに不可欠な機能を全て兼ね備えている液体増殖材の開発研究が着実に進展している。液体増殖材の実用上の課題として、材料共存性の改善やトリチウム輸送制御法の確立が挙げられるが、これらは液体増殖材の流動性をもたらす特殊な界面反応や輸送の性質によるものである。しかし、高度な純度制御技術が開発された事により、材料共存性改善の糸口が見える状況になってきた。また、斬新な発想に基づくトリチウムの輸送制御技術も開発されている。一方で、設計研究の進展により液体ブランケットのデザインウインドウも絞りこまれてきた。本稿では液体増殖材研究の最前線を紹介する。

KEYWORDS: Fusion, Blanket, Tritium breeder, Neutron multiplier, Liquid metal, Molten salt,

I. はじめに

核融合炉の燃料自己充足性を総合的に満足するブランケットシステムを設計する上で、優れた性能を有する燃料増殖材の開発が不可欠である。燃料増殖材には、固体増殖材と液体増殖材の2種類があり、これらの違いは燃料であるトリチウム(T)生成に必要なリチウム(Li)という金属元素を内含する形態にある。固体増殖材はリチウム酸化物を加工した微小球である。一方、液体増殖材はリチウムを含む高温融体である。燃料増殖材が燃料や熱エネルギーを輸送する冷媒としての機能を備えた事により、冷却系や燃料回収系などをブランケット内に別途設置する必要がなくなり、構造の単純化が期待できる。また、核融合炉稼働中における増殖材組成の連続的な調整も可能となり、運用上の観点からも利点がある。液体増殖材を用いたブランケット“液体ブランケット”は、燃料増殖やエネルギー変換、放射線の遮蔽という核融合炉に不可欠な機能を単純構造で達成しうる先進的な燃料増殖システムである。

液体増殖材を原型炉に実装するまでに克服すべき課題として、構造材料との共存性の改善やトリチウムの移行制御技術の確立などが挙げられる。原型炉開発総合戦略

Research frontier of tritium for fusion reactor-toward the DEMO reactor-(5) ; Research frontiers of liquid breeders for fusion reactors : Masatoshi Kondo, Teruya Tanaka.

(2018年6月4日 受理)

■前回タイトル

第4回 固体増殖材開発の最前線

タスクフォースがとりまとめたアクションプランでは、液体ブランケット開発は、要素技術開発と設計に資するデータベースの整備を進めながら、実環境下を模擬する条件で技術統合型試験を実施し、原型炉テストブランケットモジュール(TBM)の設計検討へと繋げていく計画が提案されている。約15年にわたる長期の開発計画である。本稿では、原型炉における実環境下試験を目指して展開される研究の最前線を紹介する。

II. 液体増殖材の特徴と従来の課題

液体ブランケットとして、自らが冷媒を兼ねる自己冷却方式、Heを冷媒とするHe冷却方式、液体増殖材に加えて加圧水等の冷媒を併用する二重冷却方式の3つの方式が提案されている。液体増殖材の性能を最も有効に活かせるのは、図1に示す自己冷却方式である。液体増殖材は真空容器を横断するように設置されたブランケットループ内を循環し、中性子との核反応により生成したトリチウムや熱エネルギーを回収系まで輸送する。液体増殖材の温度は、中性子照射領域の出口付近で約550℃であり、熱交換器を通過したあたりで約400℃となる。液体ブランケットは常圧のシステムである。

表1に、液体増殖材として期待されている液体金属リチウム、液体鉛リチウム(Pb-Li)合金、フッ化物溶融塩(FLiBe, FLiNaBe)の特徴を示す。それぞれが固有の性質を有する一方で、克服すべき課題も異なる。液体Liは融点が180℃と低く、優れた伝熱性能を有する流体である。しかし、化学的に活性な事に加え、水素(同位体)との親和性が高いためトリチウム回収が困難である事が

表1 液体増殖材の特性と課題

	長所	課題
液体金属リチウム (Li)	優れた熱輸送特性(低 Pr 数) 低融点(180°C), 高沸点	化学的活性, 純度管理(C, N, O) MHD 効果(圧力損失), トリチウム回収
液体鉛リチウム合金 (Pb-Li)	Li よりも不活性, T 回収の容易さ 優れた伝熱性能 (低 Pr 数), 高沸点	高比重, 材料共存性, MHD 効果(圧力損失), トリチウム透過漏洩
フッ化物溶融塩 (FLiBe, FLiNaBe)	低 MHD 効果, 化学的安定性, 高沸点	高粘性, 高融点, 材料共存性

課題とされてきた。また、材料共存性を左右する純度管理技術の開発も重要である。

液体鉛リチウム合金は、共晶組成 (Li 濃度: 約 15.4mol%) 付近の条件で使用される事が想定されている。この時の融点は 235°C である。鉛は高エネルギー中性子に対して中性子増倍材として機能するため、合金中のリチウム濃度が低い割には高い燃料増殖性能を維持することができる。更に、鉛と合金化した事により、課題とされてきたリチウムの化学的活性度が上手く抑えられている。しかし、水の半分程度の比重しかないリチウムに、水の 10 倍近い比重の鉛を合金化した事で、比重が大きくなってしまふ点が欠点である。鉛合金特有の材料共存性の悪さが課題である事に加え、水素(同位体)溶解度が低い事が原因で生じるトリチウムの透過漏洩対策も必要となる。また、磁場下で MHD 効果のために大きな圧力損失が発生する事も課題とされてきた。欧州が国際熱核融合炉 (ITER) の TBM 試験や原型炉での採用を念頭に研究を展開している。

フッ化物溶融塩に関しては、FLiBe (LiF:BeF₂=66:34 (モル比)、融点は 458.4°C、もしくは LiF:BeF₂=55:45 (モル比)、融点約 400°C) を燃料増殖材とする液体ブランケットの設計が進められている。一方で、融点が 305°C と比較的低い FLiNaBe (LiF:NaF:BeF₂=31:31:38 (モル比)) の使用も検討されている。鉛リチウム合金と同様に、構造材料との共存性や水素溶解度が低い事が課題とされている。しかし、電気伝導率が小さい溶融塩を用いれば、MHD 効果の影響を受けづらいという利点がある。

これらの高温融体に共通して、常圧条件でも沸点が高いという特徴があり、現在想定されている条件以上にブランケット稼働温度を引き上げる事も可能である。構造材料等の高度化により更なる高温条件での稼働が可能になれば、電力供給に加えバイオマス起源の燃料生成や水素製造などを同時に行う先進的なエネルギー変換構想も実現できる¹⁾。

III. 液体増殖材と放射線との相互作用： 核的性能評価^{2,3)}

液体ブランケットにおける燃料の生産は、核融合反応により生成された中性子と液体増殖材による核反応を利用して行う。リチウムは、⁶Li と ⁷Li という二つの同位体から構成されている (⁶Li:⁷Li=7.5:92.5 モル比)。⁶Li によ

る ⁶Li(n,α)T 反応は低エネルギー中性子との反応確率が大きい。⁷Li による ⁷Li(n,n'α)T 反応は 2.8MeV 以上の中性子で生じる閾値反応であるが、トリチウム生成と同時に中性子が放出されるため、これを再度トリチウムの生成に利用できる利点がある。

核融合炉設計では、粒子排気や加熱、計測等のために設けられる開口部からの中性子漏洩、またリチウム以外の材料元素による中性子吸収をすべて考慮したうえで、炉心プラズマで消費される以上の燃料を生産し燃料の自己充足性を達成する事、すなわちトリチウム増殖比 (Tritium Breeding Ratio (TBR)) が 1 以上となる設計が必須となる。磁場閉じ込め核融合炉では、炉心プラズマと超伝導マグネットの間の空間厚みを概ね 100cm-180cm とする設計例が多い。この空間内に液体ブランケットに加え、超伝導マグネットの放射線損傷と核発熱の低減を目的とした放射線遮蔽体、真空容器壁等を配置する必要がある、ブランケットを設置可能なスペースは、概ね 35cm-90cm 程度の厚さしかない。この条件でトリチウム増殖比を 1 以上とする事が液体ブランケット成立の鍵を握る。

液体リチウムを燃料増殖材とした場合、ブランケットの厚さが 50cm 程度あれば ⁶Li を濃縮しなくても TBR > 1.0 が成立する見通しが示されている。また、⁶Li を濃縮することで TBR はさらに増加し、⁶Li の割合が 35% 程度の時に最大となることが示されている。更に、中性子増倍材 (ベリリウム) をブランケット前方に設置して (n, 2n) 反応を利用することにより、燃料増殖性能を大きく向上させる事も可能である。中性子増倍材を使用する場合には、⁶Li の濃縮比をさらに上げることで (ほぼ全ての設計例で、増殖材の ⁶Li 濃縮比の最大値は 90%)、より厚みが薄いブランケットが設計可能となる。

液体鉛リチウム合金は、リチウムの原子数割合が小さいものの、鉛による (n, 2n) 中性子増倍反応を利用したトリチウム燃料の増殖が見込まれている。この (n, 2n) 反応のエネルギー閾値は 6.8MeV でありベリリウムの閾値 (1.8MeV) よりも高い。また低エネルギー中性子に対する吸収断面積もベリリウムよりも大きいため、中性子増倍材としての核特性はベリリウムの方が優れている。磁場閉じ込め核融合炉では、⁶Li を 90mol% に濃縮した鉛リチウム合金を使用することで、ブランケットの厚さをおよそ 60cm とする設計がなされている。また、液体鉛リチウム合金はレーザー核融合炉の燃料増殖材としても

期待されている。レーザー核融合炉では、プラズマの閉じ込めに必要な超電導コイルを配置しないため、ブランケット設置空間の制限を受けない。構造材料の割合を低く抑えることで、 ${}^6\text{Li}$ 濃縮をせずに燃料の自己充足性が達成可能である見通しが示されている。

フッ化物溶融塩増殖材 (FLiBe, FLiNaBe) についても、中性子増倍材としてベリリウムをブランケット前方に配置したり、 ${}^6\text{Li}$ を90%まで濃縮したりする事で、35cm程度の比較的薄いブランケットが設計可能であるとされている。例えば、中性子増倍材と組み合わせ使用し、ブランケット中の構造材料の割合を11%程度に抑えることにより、天然同位体比のFLiBeを用いたブランケットが設計可能である。

図2に使用後の各液体増殖材の接触線量率、及び崩壊熱の減衰を示す。ここでは中性子壁負荷 $1.5\text{MW}/\text{m}^2$ とし、5年間連続で運転(中性子照射)した事を想定して評価した。フッ化物溶融塩では、運転停止後の線量率、崩壊熱ともに、半減期110分の ${}^{18}\text{F}$ が ${}^{19}\text{F}(n,2n){}^{18}\text{F}$ 反応(閾エネルギー:11MeV)で生成した事により、液体金属と比較して高い値となっている。Naを含むFLiNaBeでは、 ${}^{24}\text{Na}$ (半減期:15時間, ${}^{23}\text{Na}(n,\gamma){}^{24}\text{Na}$ 反応), ${}^{22}\text{Na}$ (半減期:2.6年, ${}^{23}\text{Na}(n,2n){}^{22}\text{Na}$ 反応, 閾エネルギー:13MeV)が生成されるためにさらに減衰が遅くなる。FLiNaBeはFLiBeと比較して融点が約 100°C 低く、十分なTBRを確保できる見通しがあることが魅力的であるが、Naの放射化がブランケット交換作業や漏洩時にもたらす影響について、今後の設計研究において詳細に検討を進める必要がある。ここでは、増殖材中で生産されるトリチウムは運転中に燃料として回収されるため、崩壊熱の計算では考慮していない。また、自己冷却方式の液体ブランケットを有する核融合炉を想定すると、液体増殖材はトリチウム・熱回収のために炉外まで循環し希釈されるため、実際の線量率、崩壊熱の大きさは図2の値よりも小さな値となる。

IV. 液体増殖材の流動性^{4,5)}

液体金属の伝熱特性は優れている。しかし、磁場下を直交して流れる際にMHD効果により大きな圧力損失を発生してしまう。このMHD圧力損失を抑制するために、流路内を電気絶縁性被覆で覆う技術や、構造材料と液体増殖材の間に炭化ケイ素材料を絶縁材料として挟み込む構造が検討されている。また、最近になり矩形流路内の三方向を複層コーティングにより電氣的に絶縁する技術も開発された。鉛リチウム合金の伝熱特性に関しては、信頼性の高いデータが乏しい状況であった。しかし、ブローダーアプローチ活動における共同研究を通じて、世界最高純度レベルの合金が開発され、鉛リチウム合金本来の優れた伝熱特性が明らかになりつつある。ま

た、低融点の溶融塩型燃料増殖材として期待されているFLiNaBeに関しては、シミュレーション研究により熱流動特性のデータベースが拡張されている。

V. 液体増殖材における気・液界面の課題：トリチウムの輸送制御^{6~8)}

液体リチウムや液体鉛リチウム合金は、中性子との核反応により生成したトリチウムを原子の状態内で内包し輸送する。液体リチウムはトリチウムとの化学的親和性が高く、平衡溶解度が高い。そのため、ブランケットループからのトリチウム透過漏洩量は小さくなると想定されている。一方で、液体鉛リチウム合金は液体リチウムの100万分の1程度の平衡溶解度しか示さない。そのため、鉛リチウム合金からのトリチウム放出量が多くなり、透過漏洩対策をしなければならない。フッ化物溶融塩では、生成したトリチウムは近傍に存在する遊離フッ素と結合してフッ化トリチウムとして溶存する。熱力学的に不安定なフッ化トリチウムは構造材料と化学的に反応し腐食を促進してしまう。最終的にトリチウムは分子状態で溶存し、その溶解度は液体鉛リチウム合金と同程度である事が報告されている。最近になり、水素(同位体)溶解度の高い金属の微粒子を用いてトリチウムの透過漏洩を抑制する技術が開発された。直径が数十ミクロン程度のチタン微粒子を溶融塩中に分散させてトリチウムをチタン微粒子内に溶解させる事により、見かけ上の水素(同位体)溶解度を上昇させる事ができる。溶解したトリチウムは、マイクロ波加熱により溶融塩中に分散するチタン微粒子だけを選択的に加熱する事により放出させて回収する事が可能である。液体ブランケットにおけるトリチウム回収方法として、ガス対流方式や金属壁透過回収方式、落下液滴方式等に関する研究が活発に実施されている。また、液体増殖材中のトリチウム濃度を監視する手法として、プロトン導電性固体電解質センサーや金属透過窓方式が提案されている。今後は、核融合科学研究所に建設された「熱・物質流動ループ装置 Oroshhi-2」等の施設を利用して、模擬環境下における水素(同位体)の連続回収試験等が行われる計画である。

VI. 液体増殖材における固・液界面の課題：材料共存性の改善^{9~11)}

液体リチウムの材料共存性は、液体内に溶存する窒素、酸素、炭素により大きく左右される。例えば、Li中に溶存する窒素の濃度が数十wppm程度と微量であったとしても、鋼材表面においてリチウムと共に鋼材構成元素と化学的に結合する事により不安定な化合物を形成し、腐食を促進してしまう。また、溶存酸素も同様の腐食促進機構があると推察されている。一方で、窒素や酸

素の溶存濃度を低く抑える事ができれば共存性を大幅に改善する事ができる。国際熱核融合炉材料照射施設の工学実証・工学設計活動(IFMIF/EVEDA)を通じて、様々な非金属不純物の制御方法が開発された。窒素はFe-Ti合金を用いたホットトラップにより回収可能である事がわかった。また、酸素はコールドトラップ技術により溶存濃度を10wppm以下程度にまで低下させられる事が分かった。また水素(同位体)に関しては、イットリウムを用いたホットトラップが開発され、1wppm以下という極めて低い溶存水素濃度に維持する事が可能となった。溶存炭素濃度が極端に低くなりすぎると鋼材の脱炭現象を起こしてしまう。そのため、溶存炭素濃度は低くなりすぎないように適正に制御する事が要求される。

液体鉛リチウム合金の材料共存性は、鉛とリチウムの両方の傾向を併せ持つ。鉛成分は、鋼材構成元素の鉄やクロムに対して一定の溶解度を有し、鋼材成分溶出型の腐食を促してしまう。これに加えてリチウム成分は、前述のような非金属不純物加速型の腐食を引き起こすことが最近の研究から明らかになった。また、図3に示すように、腐食(コロージョン)により材料表面に形成されたポーラス層が流動する液体金属により僅かずつ削り取られて発生する珍しいエロージョン現象が発見された。この現象はコロージョン・エロージョン(Corrosion-erosion)と呼ばれ、腐食による材料の減肉速度を大きくしてしまう。同様の現象は、流動鉛リチウム合金中だけでなく流動リチウム中でも生じる事が確認されている。最近の研究結果から、材料の組成や微細組織等の様々な条件により発生しやすさや規模が異なる事がわかった。図4は、酸化物の標準自由生成エネルギーや各種液体金属の想定される酸素ポテンシャルを示す。第4世代原子炉の候補冷却材である液体鉛ビスマス共晶合金(LBE)の共存性改善を図った場合には、材料表面をアルミナ等の緻密な酸化被膜で保護する事によりエロージョン発生の原因となる腐食を抑制する事ができた。しかし、液体リチウムや液体鉛リチウム合金の酸素ポテンシャルは極めて低いため、液体増殖材中で構造材料表面を保護できる酸化物の種類は限定されてしまう。極めて安定な熱力学的特性を有する ZrO_2 や Al_2O_3 、 Y_2O_3 、 Er_2O_3 などであれば持ちこたえられる事がわかってきた。

フッ化物溶融塩は液体金属とは異なる腐食性を持っている。トリチウム生成に伴い溶融塩中に化学的に不安定なフッ化トリチウムが発生してしまうため、鋼材表面のフッ化反応を介した腐食を促進してしまう。一方で、水分が溶存した条件では鋼材表面の酸化腐食も生じるが、これはベーキング処理や電析により溶存水分を除去する事により十分に抑制可能である。また、トリチウム溶解度を改善するために添加するチタン微粒子がフッ化トリチウムによる腐食を抑制する効果もある事がわかった。

VII. まとめ：原型炉における液体ブランケットテストモジュール試験に向けて

このように液体増殖材の開発研究が進み、課題とされてきた材料共存性やトリチウム透過漏洩対策・回収技術に関して見通しが得られる状況となった。今後は、これまでに開発されてきた要素技術を統合し、実環境に近い条件で液体ブランケットの性能や安全性を検証する試験を実施するステージを迎える。高エネルギー中性子環境における液体ブランケットの性能を明らかにするには、国内外の様々な研究機関と一層の連携が必要である。日本は液体ブランケットに関して代表的な統合試験であるITER-TBM計画を提案していない。しかし、核融合科学研究所のOroshi-2に代表されるような統合試験装置や、それらによる研究計画を見る限り、国内研究機関は原型炉テストブランケットモジュール試験実施に必要な技術的ポテンシャルを備えつつあるように思える。一方で、日本政府が提唱する“Society5.0”のような未来社会においてもエネルギー源としての役割をしっかりと果たせるように、水素製造などの様々な技術的可能性を開拓する事も欠かせない。核融合原型炉試験に向けて、放射線、材料、機械、化学等の異分野融合を得意とする液体ブランケット分野の研究者の更なる活躍にご期待頂きたい。

－ 参考資料 －

- 1) S. Konishi, Fusion Science and Technology, 47, 4 (2005) 1205-1209.
- 2) A. Sagara et al., Fusion Engineering and Design, 87 (2012) 594-602.
- 3) T. Tanaka et al., Plasma and Fusion Research, 7 (2012) 2405132.
- 4) H. Shishido et al., Fusion Science and Technology, 72, 3 (2017) 382-388.
- 5) M. Aoyagi et al., Fusion Engineering and Design, 85 (2016) 1181-1184.
- 6) 片山一成, 興野文人, プラズマ・核融合学会誌, 92, No.2 (2016) 136-141.
- 7) J. Yagi et al., Fusion Engineering and Design, Fusion Engineering and Design, 124 (2017) 748-751.
- 8) T. Watanabe et al., Fusion Engineering and Design, article in press (2018).
- 9) M. Kondo et al., Fusion Engineering and Design, article in press. (2018). (DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.05.062)
- 10) K. Hiyane et al., Fusion Eng. Des. 109-111 (2016) 1340-1344.
- 11) G. Yamazaki et al., Fusion Engineering and Design. Article in press (2018). (DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.05.062)

著者紹介



近藤正聡 (こんどう・まさとし)
東京工業大学科学技術創成研究院先端原子力研究所
(専門分野/関心分野)核融合炉や次世代型高速炉における液体金属技術や材料共存性に関する研究を実施している



田中照也 (たなか・てるや)
核融合科学研究所 ヘリカル研究部核融合システム研究系
(専門分野/関心分野)ヘリカル型核融合炉の中性子工学設計, 機能材料研究

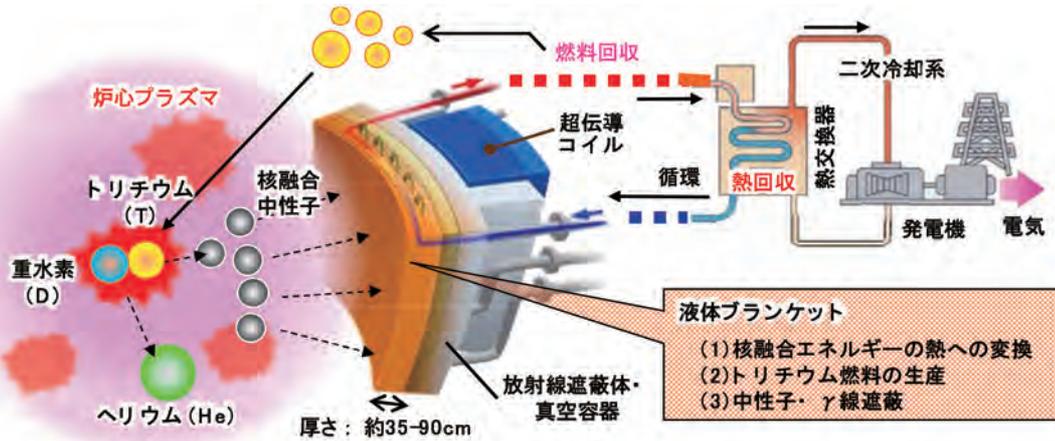


図1 自己冷却方式の液体ブランケットシステムの概略

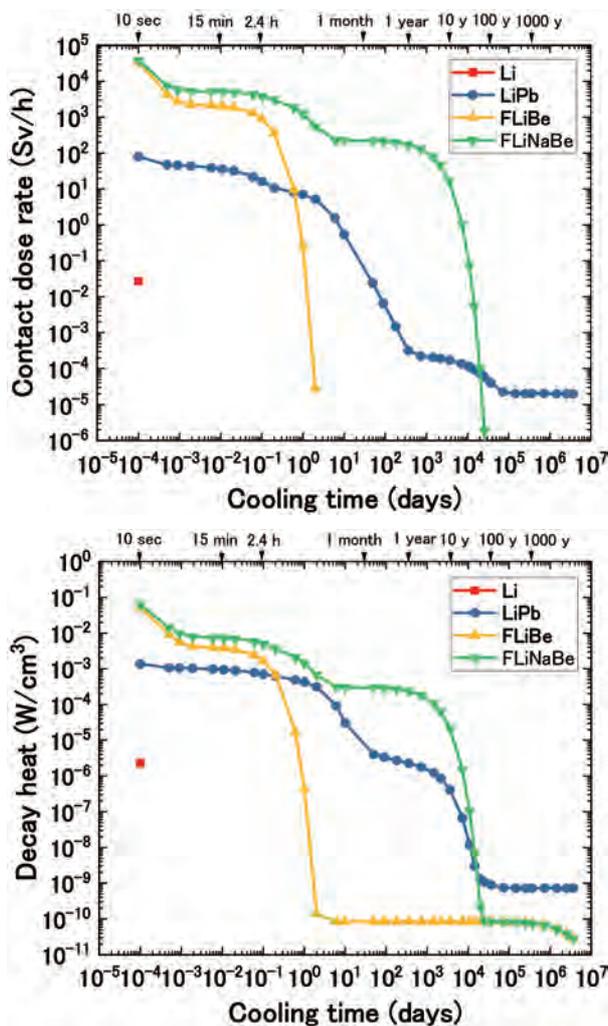


図2 液体増殖材の(上)接触線量率, 及び(下)崩壊熱の減衰

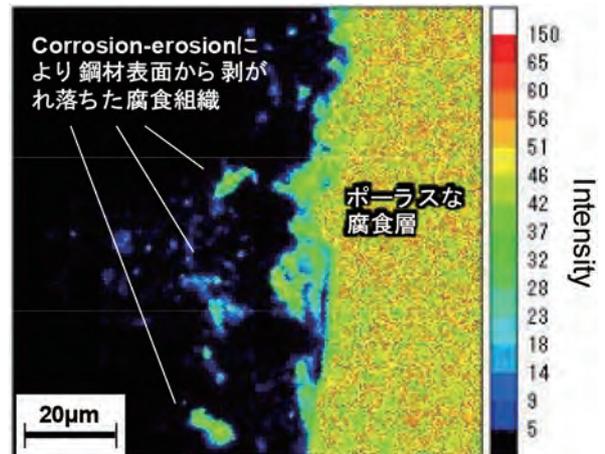


図3 EPMA分析による低放射化フェライト鋼表面腐食層断面(Fe)マッピング像; 鉛リチウム流動場で生じたコロージョン・エロージョン現象の様子を表す⁹⁾

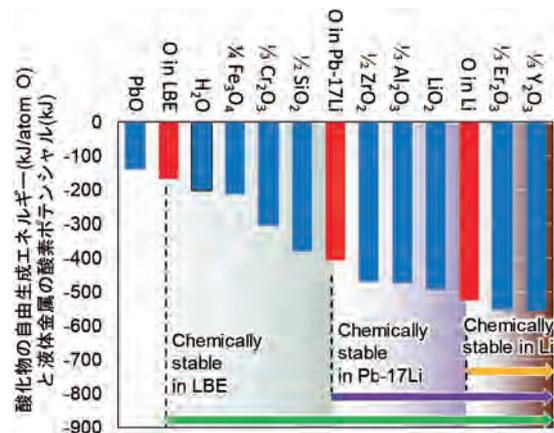


図4 液体増殖材の溶存酸素ポテンシャルと代表的な酸化物の標準自由生成エネルギー(液体金属中の溶存酸素濃度は溶解度の1/100程度と仮定した。)

報告

福島風評被害払拭への新たな鍵 —海のイベントを通じて—

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

一般社団法人 AFW は 3・11 後に福島第一原発で働く作業員の支援のために立ち上げられた。しかし、事故から 7 年のうちに様々な経験と変遷を経て、より地域の住民の目線と心に軸足を移した活動を行うようになってきている。これまでに、地域との廃炉コミュニケーションや車座対話などから得たものは多い。それらを糧として、ごく最近では地域の復興から風評被害の払拭のためにはどのようなアプローチでどのようなエッセンスを盛り込むのが効果的に腐心し、その成果を徐々に上げている。AFW の理念と実践の変遷から見えてきた福島の未来を報告する。

KEYWORDS: *harmful rumor, Fukushima Daiichi nuclear disaster, Appreciate Fukushima Workers, social contribution activities, communication, dialogue, engagement, nuclear decommissioning, disaster area reconstruction, fishing fun*

I. 東京電力社員から身を転じて

東京電力福島第一原子力発電所の事故(以下原発事故)から 7 年 7 ヶ月が過ぎた。AFW (Appreciate Fukushima Workers) は元東京電力の職員を中心に設立された組織である。代表の私は、事故当時、福島第二原子力発電所で災害対応にあっていた。わずか 10km ほど北に離れた福島第一原子力発電所(以下福島第一原発)の状況に恐怖を抱いていた。そして長年暮らしてきた双葉郡地域が大津波で被災した上に、原発事故により避難を強いられることに、とてつもない罪悪感に駆られていた。それから約 1 年 2 ヶ月後、事故収束なくして地域再建はないと、社会からのバッシングから原発事故の源となった場所で働く人達を守ろうと東京電力を辞して AFW を設立した。

それからというもの、原発事故被災地域で暮らす一人の人間となり、AFW として社会貢献活動を開始し、現在その活動は 6 年目に入った。この間、目標や実践内容が少しずつ変わってきた。当初は、現場を守ろうという考えのみで活動していたが、やがて地域に目を向け、人との出会いの中で AFW の理念も少しずつ変わっていった。何年も「なぜ自分は東京電力を辞め、活動を続けていくのか」自問自答を続けた。活動を通じて、原発事故前の当たり前の日常を取り戻したいと思う多くの人に

会った。今 AFW の活動の根幹にはその思いを広く共有し実践していくことにある。その中で、大切にしているキーワードが生まれた。それは「暮らし」だ。震災・原発事故が壊したものは数知れないが、だれもが当たり前にもっている暮らしというものを破壊したと言える。その暮らしは多様な要素で成り立っている。その暮らしをどの様に取り戻し、そして次の世代にどの様に委ねていくのか。それは内省として、今も日々悩み考え続けるものとなっている。

II. 地元から教わった—対話と役割分担—

AFW の活動の中でも、原発事故被災地域を隈なく歩き、被災された方々との出会いの中で教わったものに「対話」と「役割分担」がある。5 年程前のことだ、いわき市に拠点を置く未来会議という団体と関与するようになった。未来会議は様々な立場の方の話を聞こう・話合おうという対話に力点を置いている。そこでは被災された方々が複雑な心情を共有し、ではそこから何が出来るかを模索していた。そこで学んだ対話への姿勢、理解しようと心掛け、人と向き合う姿勢はその後の活動の大きな転機となった。

対話はコミュニケーションの一つの手段でしかないことも気づき、この人と繋がりたいと求め、そして他人だとしても共有できる思いがあることに気づき、震災・原発事故時と事故後の体験だけではない、何気ない日常の喜びや悩みを同じ目線で話せるようになっていた。

そういった経験をしながら、AFW は地元で復興活動

New keys to dispel harmful rumors of Fukushima products ; A challenge through events at sea : Akihiro Yoshikawa.

(2018 年 7 月 29 日 受理)

に取り組む方から「役割分担」という考えを教わることになる。被災地域で暮らす人達とご縁の中で、自らも何かできないかと様々な支援団体のお手伝いをするようになっていた。そこで出会った方に「吉川君はAFWを拠点にして何が本当に一番出来るか考えてみたらどうか。お手伝いも立派だけどAFWにしか出来ないことがあるはずだ」と問いを投げられた。深く衝撃を受けたことを覚えている。AFWはその間を突き詰めていくことが地元への貢献の第一歩だと認識した。本当に持ち得ているものは一体何で、それを何に活かしていくのかを。

Ⅲ. 廃炉と社会を繋ぐ一対話型『廃炉講座』

AFWの代表である筆者は元東電職員である。福島第一原発・第二原発の保全に長年勤めていた知識と経験がある。それは内情に通じていると言える。そして自分自身も被災者でもある。震災前の双葉郡の暮らし・文化を知っている、この二つの人生経験を活かさないか、原発事故後の社会に自分にしか出来ない役割はきっとそこに見つかるはずと。

そこで行き着いたのが、福島第一原発の廃炉と被災した地域を一つの枠のなかで扱い、かつ社会と隔絶してしまった状態を繋ぎとめる役割をしようと考えた。

福島第一原発の廃炉を社会に伝える、そして誰もがそれを知ることが出来る環境作りを始めた。だがこれが、東京電力の広報と同じでは辞めた意味がない。一次情報を持つ東京電力の広報だけでは読み解けないものを伝えることがAFWの新しい大きな目的となった。

地域で廃炉との向き合い方を模索する講座を開いている。ここで対話の意味を学んだ経験が活きた。当初の廃炉講座は、正にエンジニアが「知のこん棒」を振りかざすような一方的な内容になってしまい、参加者は難しさに顔をゆがめていた。そこで対話を取り入れることで、相手が知りたいことを聞く様になり、それに応えていく。いわばキャッチボールをすることが出来るようになっていた。伝わるに重きをおけたのは、被災された方々の不安を少しでも解消したいという思いがあったことだ。



写真1 廃炉講座の様子

その不安に応えることが先決であって、エンジニアとして伝えたい・知って欲しいは、実は後回しにすべきなのだ気づいた。AFWが行う廃炉講座は対話型になり、参加者の不安や思いを第一にした内容へと変わっていき、どの様にしたら廃炉と向き合えるのかを共有していく。それを東電社員ではない一般人の目線で行い、一般人に分かる言葉や表現がどこにあるのかを見出す努力も積み重ねてきたことで、一皮むけたと思う。

廃炉講座には課題があった。福島第一原発を見たこともない住民に、廃炉への理解を求めていたが、それでは本当に廃炉とは何かを知れる環境が整っていないと思った。直ぐに東京電力に協力を要請した、それは2013年のこと、まだまだ一般人が福島第一の現場を視察するのは時期尚早と取られていた時代だ。東京電力の協力もあり、地域で暮らす誰もが自分の目で見れる環境として、AFWは定期的な福島第一原発視察会を開くこととなった。これは現在でも続いている、延べ34回、700人を超える方々と一緒に視察した。そして自分の目で福島第一原発を捉えた人達へ、自分の言葉を持って説明できるようアフターフォローも始めた。振り返りである、その振り返りを効果的にするため、“手製のジオラマ”を作製し利用している。

Ⅳ. 本質的課題解決の為の双方向性—『車座』

そうした中、廃炉で働く人達と地域の住民とを繋ぐことはできないかと考えた。ハードルは高かった、加害者・被害者という構図、被災地域の復興は現在進行形の中にある。その難しさを誰もが知っているが故に、繋ぎ手の役目を負おうという人間は社会に皆無だった。その状況は福島第一原発の廃炉というものをよりブラックボックス化することになっていた。つまり地域住民自身が自らの思いの中で廃炉を自分事として再構築できないのである。

それでは誰のための廃炉か分からない。何とかしようと、福島第一原発に関わる側・地域住民を訪ねて歩いた。私は双方の気持ちがる、そういう人生を送ってきたからだ。ポジショントークを必要としない相手として扱われる人生が役立っている。本音で繋がるのが何故難しいかも話し合っていた。私は廃炉と地域が結びあっているからこそ、対話が必要だと説いた。原発事故後の社会をより良いものにしたという思いは、双方にとって同じゴールだとも説いた。

2年程前から、東京電力HD、経済産業省資源エネルギー庁、原子力損害賠償廃炉等支援機構、地域住民を交えた「車座」をAFW主催で行うようになった。幾度ものトライ&エラーを繰り返しながら。本音で話し合え、距離感をつめ、組織として語るのではなく、個として向き合える、そんな場作りが始められるようになった。

その双方向のコミュニケーションが生み出すものがあ



写真2 廃炉関係者と住民との車座

る、一次情報を持つ側が伝える相手と初めて対話することで、伝わるために必要な要素を見つけられたことだ。それは双方向に立場や思いへの理解があって初めて生まれるものだ。地域参加者の中には、そこで生まれた関係から AFW との取組とは別に、参加者同士の勉強会や対話の場を開くといった広がりも生まれている。AFW では現場との対話により関係を築き上げ、現在の廃炉の姿をよりリアルに捉えた新しいジオラマの製作に取り組んでいる。このジオラマ作成は経済産業省資源エネルギー庁の支援のもと、株式会社大和工藝をパートナーとして進行中である。廃炉の今を伝えるジオラマは未だ世にない。ありそうでなかったものは、こうして生まれていくということも実感している。

今、AFW は福島第一原発の廃炉を誰もが知りたいと思った時に、廃炉とは何かを多角的に知る事ができる環境作りに努めている。知る事ができるとは奥が深い。伝い手の意思と聞き手の意思が一致するには様々な要素がある。それを民間として実践し学び、共有することを行っている。廃炉を題材としながら、AFW はコミュニケーションの在り方を世の中に問いかけている。現在は廃炉現場と社会とを繋ぐコミュニケーション者として、また繋ぐで終わらずコーディネーターをも行いながら、人と人を繋ぎ、そこに化学反応を生み出そうと考えている。廃炉で働く人とそれを見守る人が繋がった瞬間、各人に自分にはないアイデアが生まれるからだ。それが双方の理解に繋がれば何よりであるし、廃炉現場それ自体がより社会が同意出来る状態に進んで行く事へと繋がると信じている。

そうした廃炉現場と社会を繋ぐうちに新しい役目も生まれた。福島県浜通り地方に暮らし続けて約 20 年、被災者としての立場もある。その二つの属性は廃炉と地域は一体であるという概念に必要な地域への精通度合いへと活き、本質の問題に辿り着くために幅広く当事者の声を引き出すことが出来ることへと繋がっていった。それを学び行く中で、地域を伝えるということも出来るようになってきた。地域ガイドや講演という形で地域を伝えている。これまで案内した個人・団体・組織・企業の延べ人数は 5,000 人は越えている。今や原発事故被災地

域は、広島や長崎の様に、過去の出来事から学び、人生を豊かにするという意味で、様々な立場の方が訪れる場所として扱われるようになった。企業研修しかり、中高生の修学旅行しかりである。

ここでも廃炉現場と社会を繋ぐ中で実践し覚えた、伝わることへのテクニックを AFW は活かしている。そして学ぼうとする人達が主体的でいられるよう心への働き掛けをいつも考えている。それを「関心のフック」と呼んでいる。関心のフックがどういったものか、人それぞれだ、どのフックに言葉が刺さるかは分からない、だからこそバラエティ豊かにこちらの知の引き出しを開放していく。言葉遣いや立ち振る舞いも気をつけている。言葉が届くようにするためだ。

V. これからの風評被害払拭の鍵

1. 協働して何かをなすために

伝わるためのコミュニケーションとはと悩み試行錯誤を重ねる中、暮らしの当事者の一人として風評被害払拭について日々考えている。原発事故から 8 年目、普段の日常の中で、原発事故に関わることを考えているという人はほとんどいないのではないだろうか。大分、無意識下に捉えられるようになってはいるはずだ。一つの根拠として原発事故の一丁目一番地と言える福島県双葉郡地域で AFW は活動をしているが、原発事故や福島第一原発を日常の中で話しのネタとして聞くことはない。

だが、Bad ニュースは忘れたころにやってくる、他県で暮らす人達も全国ニュースレベルのことをたまたま見かけた際に、無意識下に落とし込んでいたものが呼び起こされるのではなからうか。

だが、考えずとも思わなくとも、福島第一原発に伴う避難区域は解除が進み、双葉郡浪江町や富岡町では 10km 圏内で暮らすということが始まっている。その暮らしは放射性物質による汚染という過去の上に築かれている。何事もない毎日を迎えていくなかでその過去は忘れられてもだ。ふと思出すのだ。一例を挙げる、私は一昨年から「木戸の交民家」なる古民家の運営に携わっている。その古民家は旧警戒区域である楡葉町にある。昨年、友人たちと田んぼを一反借りた。津波で傷つき壊れた畦の修復・瓦礫拾いから始まり、田植え、稲刈り、脱穀と行った。全量全袋検査と呼ばれる放射性物質の量を計る検査が無事終わる時のドキドキは忘れられない。農業者の方の思いが、初めて身に染みる瞬間であった。そして AFW スタッフやその仲間がそれまで培った知識・データはそんな時、気休めにはなるが本質的ではないと肌で感じた。データを軽んじるつもりはない、大切なことだ。証明の在り方だからだ。だがその時に、気持ち乗り越えられなかったのも事実だと記したい。

暮らしが疑われることへの処方箋はどうしたら良いのか。変わりゆく日常を取り戻している姿と、自分自身で



写真3 後方に見える煙突は福島県双葉郡広野町にある東京電力広野火力発電所

すら恐怖を感じることもあることと、目の間に無視出来ぬ存在があること、現実の中で疑いを晴らすには伝えないとならないものがある。そこで社会との対話というものを考えてみた。相手側に立つという事だ。どうしたら耳を傾け、信じてみようと思えるのかと。心の問題なのだ。その根底にあるのは信頼ではないのか、信じるに値する、それが第一なのだ。その時、浮かんだのが経験だった。自分が経験したこと、目にしたことそれは裏切りようのない真実だ。当たり前前の日常の体験こそ腑に落ちるのでは…日常の中に、本来いない人がいることが出来れば。そして訪れた人達が関わり続けたいと思える体験も生まなければ。それは協働して何かを生み出すという事かもしれない。原発事故被災地域は過程の中にある。帰還困難区域がある。除染の仮置き場もある。今のみを切り取りそれを今後も語られ続けることは、それこそ風評被害になりかねない。アップデート出来るのは本人たちのみである。

訪れたいと思える人を増やすには、信用を得る姿を見せるには、どうしたら良いのか。そこで行き着いたのは「fun」という感情だ。データや画像で伝える。ただ現地を見るは風評被害払拭に限界を生んでいる。それはもうやり方を変えるしかない。何かを力を合わせて行う——そういう協働の中に楽しさ、つまり fun があってほしい。

誰もが気軽に訪れられる拠点で fun なる要素を盛り込み、そしてそれが新しい風評払拭の方法になり得るのか。風評被害の代名詞ともなっている、福島県産の魚をテーマに、それを先述した古民家(木戸の交民家)と福島県沖の海を舞台にチャレンジした。

2. 「海の日」の fun

AFW の主催で7月16日(海の日)に福島県双葉郡の海を楽しみ尽くすイベントを開いた。主催者側がどの様

な考えで、fun なる要素をイベントに盛り込んでいったのかを綴りたい。

福島を学びつつも楽しむ体感してもらおう、これは中々難しい。そこで思いついたのが釣りだ、AFW はいわき海洋調べ隊「うみラボ」という取組に協力している、福島第一原発沖まで行き、海洋調査として釣りをしている。福島第一原発を眺める参加者に向けて、廃炉の進捗を説明している。難しい内容故か、参加者に楽しそうな顔は当然ない。だが、その後の釣りは真面目な調査とは裏腹に、皆が釣り上げる行為に笑顔になっている。これこそがと思った。「うみラボ」はサイエンスと楽しみを上手く繋ぎ、向き合うに難しい題材を気が付けば学んでいるという取組を行っている。そこで釣り舟と協力しているのが長栄丸の船長「石井宏和氏」だ。彼と連絡を取り、海の日には双葉郡の海を楽しみ尽くすイベントをやらうと持ち掛けた。

風評払拭への新しい試み(楽しむを起点)に向けて、企画する側が起点とすることに楽しむことを主に置いた。企画側も参加側もとことん海の日を楽しめるように考えた。

ふるさとの海を大切に扱って欲しいし、楽しみ尽くせばそれは海を守りたいという思いを生み、海への関心が生まれ、それは福島第一原発廃炉の海への対策への関心にも繋がる。“廃炉への取組を学び、福島県沖の環境回復を学ぼう・守ろう”では、人は関わり合いを控えてしまう。海を楽しむことが実は忌避したものへの関心に繋がることが重要なのだ。それは必ず風評払拭に寄与する。そして海と隣り合って暮らしている私達自身楽しめなければ、福島を否定してしまうことになる。その姿は信用を得ることにもならない。楽しんでいる様こそが最大の信用を生むのではなからうか。

では企画し実行ともなると、この舞台を整えるのには拘りを要所に詰め込む必要があった。そもそも論の話し

もだ。海釣りはハードルが高い、道具がないと出来ない、面白さの価値を知らない人には乗船料金も高いと感じるはずだ。海釣りをする人・しない人も楽しめる状態を目指した。石井船長と一緒に釣具屋めぐり、道具を揃えた。そしてまったくの初心者が参加出来るようにサポーター役も準備した、子供も女性も気軽に参加できるように、初めての参加者には長時間の釣りに疲れ飽きることをないよう二人セットにし、料金も低めに設定をした。間口を広げたわけである。広がりを持たせるためには、知識・経験がない人への手軽さが必要だ。

狙う魚も一種類ではなく、色々釣れることで沢山の魚がいることを知ってもらおうと五目釣りと言われる、海底から1mほどを狙う落とし釣りを採用した。これであればメバル、ソイ、アイナメ、ヒラメなどが狙えるからだ。巻き上げている最中にはサバもかかる。

多くの人にその日の日常を届けるため、ドローンによる撮影を依頼。幸いにも当日は天候にも恵まれ、漁港から出航する様子や釣りをしている最中を上空から捉えることが出来た。

海を楽しみ尽くす、そんなお題目で企画を練り始めると釣だけで終わらず、魚の捌き方教室と皆で食べるころまでやることにした。私達の生活の中で海は身近そうでそうでない、普段、身近な海との繋がりは魚だが、その魚は手に入れる段階で切り身になっている。それが当たり前だ。その当たり前は、せつかく釣った魚を自ら捌けず、振舞うことに繋がっている。そのふるまい先も捌けずお断りすることに繋がっている。これは海を活かす文化を持ち得ていないとも言える。その文化が生まれていない要素は魚を捌けないという点が大きく作用しているのは事実だ。捌き方教室を開き、捌き方を学び、食べる、これも楽しみに繋がっていくに違いないと内容に組み込むことにした。

その第二部と言える「食べる場」にも仕掛けを用意した。皆で楽しく食卓を囲むそんな雰囲気にもこだわった。大夕食会のイメージだ。訪れた人達が楽しめるように、木戸の交民家(古民家)の大きな庭にテントを張り、ビールサーバーも用意した。地元の小料理屋「結のはじまり」に協力を仰ぎ、地元の野菜を使った料理も準備し



写真4 釣った魚たちのさばき方を学ぶ様子

た。余談だが子供が楽しめるよう花火も準備している。

VI. これから——AFWのチャレンジ

双葉郡の海を楽しみ尽くす為の様々な仕掛けを終え、風評被害払拭には何が効果的なのかを改めて考えてみる。データが全てではなく、数多ある日常を伝え、体感できる出来る場を作るには「誰もが楽しめる」に拘る空間設計が必要だ、そして循環していくことを織り交ぜていかななくてはならない。それは相手ありきでどこまで深められるか、社会との対話出来るかということになる。人と人がどうしたら関わり合い続けられるかだ。福島に誰もが関わり続けたいと思える日常を生めるか、地場の人間が心底楽しめている状態が基礎にあり、それを共有できる仕組みを、地場の人間と共に企画者が作っていくことが肝要だ。原発事故の被害にあった場所を舞台としても、関わり続けたいという文化が作られることが風評被害払拭の根幹にあると筆者は強く思う。

AFWは常に「暮らし」に軸足を置いている。それは暮らしという言葉やカテゴリーの中に、世にある様々な課題や楽しみが包括されているからだ。原発事故も福島第一原発の廃炉も、子育てや仕事も、趣味も、生活の悩みも、あらゆる暮らしの要素を再度見つめ直してみると、そこには人が必ず介在している。人の性、人性なるものを深く考察し、どうすれば誰もが暮らしやすい世の中になるのかを考えていく。ことはシンプルだ、福島で生きている・暮らしている人達がいる、その人達が穏やかに楽しく暮らしていければいい。その暮らしが原発事故後、避難区域となった場所でも創られていく、その進展の中で、そこに人が訪れようと思える仕掛けを作り、訪れた人が体感し持ち帰るものが素晴らしければ広まっていき、また人が訪れる。そうした循環が作られていく中で文化として初めて定着が生まれる。それが新たな風評となるはずだ。だからこそ、暮らしという視点から物事を考えていきたい。

そして原発事故・廃炉を題材とし、被災地域をフィールドとしながら、根本的課題解決に繋がるコミュニケーションとはどういった方法があるのかを見つけ、社会共有することを目指していきたい。今、手にしている知見や経験は、それは復興知と呼ばれるものの一つだ。その「知」が共有できた先に、社会とこの地とを繋ぎとめるものが生まれ、震災・原発事故を乗り越え、新たな誰もが豊と思える社会の在り方に繋がっていくと信じている。

著者紹介

吉川彰浩 (よしかわ・あきひろ)

一般社団法人 AFW 代表

(専門分野/関心分野) 公民連携による社会課題解決方とコミュニケーション研究



談話室

双葉の海を喰らう—常磐ものの豊穡—

東京工業大学 澤田 哲生

I. 海の日

海の日。双葉郡は広野火力沖合いに釣行。目指すは“常磐もの”といわれるいわき市の沖合いで揚がる魚である。黒潮(暖流)と親潮(寒流)が交わる海域の根魚である。黒潮と親潮の交わる海域はプランクトンが湧くので餌が豊富である。根魚とは、メバル、カサゴ、ソイ、アイナメ、ヒラメ、カレイなどである。吉川彰浩さんの『一般社団法人 AFW』が主催する海の日イベントに参加した。2018年7月16日午前6時、久之浜漁港にて長栄丸に乗り込んだ。連日の酷暑で気温が急上昇。漁港から遠望すれば海霧が海面から横断幕のように立ちあがり広範に架かる。壮麗な風景だ。

II. 入れ食い

この日の釣り人は12名。うち女性が5名。女性の中には初めての方もいる模様。船長は長栄丸を小一時間走らせて、広野火力の沖合いに場所を定めて船を潮の流れに任せた。今日のエサは冷凍のシコイワシ。全員が糸を垂れて程なく隣の女性陣から歓声が上がった。型の良いメバルが揚った。そうこうするうち私もヒット！リールを慎重に巻き上げると紺青の海から白いウチワのような魚体をくねらせながら上がってきた。30cm級のムシガレイだ。吉川さんがすかさず寄ってきて今日初ゲットの個体と記念撮影。「刺身にするとうまいですよ」と。虫に噛まれたような斑点が側線を挟んで3対あることから“虫鱈”というのだという。私は右舷の船首から2番目に構えていたが、私の真後ろの元魚屋さんが「おおーっ、オレにもヒット。ハンパない引き、ハンパない引き…」と歓声をあげながら、リールを手繰る。釣り上



写真1 久之浜漁港—釣り人と長栄丸

げられたのはこれも型の良いソイである。ソイはメバルやカサゴの仲間であり、いわゆる“ロックフィッシュ”の一種。焼いても煮付けでもよし、もちろん刺身も美味。

私にもソイが来た。そして35cmはあろうかという丸々太った沖メバルも掛かった。ソイ、メバル、ソイ、メバル—入れ食い状態。しかし、本命のヒラメが来ない。ヒラメのあたりは独特だという。“ヒラメ40”といい、最初のあたりから、40数えて待てという。ヒラメは餌食いが下手で、確実に針掛りするまで時間がかかる。

釣りも中盤にさしかかった頃。隣の女子連からひととき大きな歓声とガンバレという声が上がった。やがて体長70cmは優にある大きなヒラメが姿を現した。これがいわゆる“ザブトン”だ。ヒラメとともにカメラにVサインでパチリ。

10時40分納竿。この日の全釣果は100匹以上。私はといえば、ムシガレイ1、メバル10、ソイ6、カサゴ1になぜか鯖が1。

今日の釣りは調査目的ではない。リアルな遊釣行。釣った魚は持って帰って食べる。福島第一原発から20km圏外で釣った魚はこのように食べて楽しめる。しかし、そのことはまだまだ一般には知れ渡っていない。この日も終始私の視界に他の遊漁船は一隻も入ってくることはなかった。大海原にたった一隻。

III. Co-minka(交民家)の宴

いわき駅から北上すること6つ目の木戸駅から徒歩5



写真2 交民家「Co-minka」

分に、築70年の古民家がある。3・11後被災家屋の多くが解体されていく中で、古民家を未来に残し地域で暮らす人々、働く人、支援する人の交流の場にと交民家(Co-minka)が発想された。災害を乗り越えた古民家を再生し、地域の再出発・発信の拠点としたのだ。

同日夕刻。木戸駅から交民家に向けて歩みを進めた。ここはかなりの高台だ。津波の難は免れたと思しき壮麗なる民家が連なる。程なくして交民家についた。吉川さんはじめ関係者が忙しなく準備に勤しむ。ここでこれから、今日釣った魚を中心に大宴会だ。昨年木戸に開店した小料理屋『結のはじまり』の女将も、特製手料理(肉じゃが、ポテトサラダ、今日釣れたメバルの煮付け)を持参した。イモは交民家の畑で採れたものとか。

吉川さんのモットーは、『常磐の海を楽しんで、常磐の海を味わう』。午前中は海で釣り三昧。そして夜は釣れた魚をとことん味わうという至れり尽せりのエンターテイメントだ。釣った魚は、まっとうに成仏していただき、人々の腹に収まる。そのためには、魚を上手に捌くことが必須。本日乗船の元魚屋さんが、『魚のさばき方講座』を開講するのだという。元魚屋さんの適切な指導の下、型の良いイサキ、ソイがわか板前さん達の手によって手順良く捌かれていく。今日の竿頭——一番大きい50cm級のソイを釣った小学生も参戦した。

刺身になったソイ、メバル、カレイ、ヒラメ、どれもこれも“美味すぎる”と箸が次々伸び出してくる。刺身には川内村で自生する野生のワサビが添えられた。どんどんさばいてどんどん食べても、大型クーラーに満杯あった釣果はなかなか底をつく心配がない。そんな中船長に歩み寄って色々話を聞いた。船長が熱く語ったのは次の3点だ。『釣り人にプライドを持ってほしい』『サステイナブルな釣りを一緒に考えたい』『いわきに来て初めて体験できることを広めたい』

今日は型の良いソイやメバルが一人あたり軽く10本は上がっていた。しかし、船長の目には“これはもう乱獲ですよ”と。遊漁船も少しずつ増えているようであ

る。例えば東京湾では満足しきれないお客さんが来る。船宿もそれに応えようとする。なかには一つの仕掛けに沢山針をつけて魚が鈴なりに釣れるようなものも。そこまでする必要があるのであるのかというのだ。釣り人に矜持を持ってほしいという。

「3・11前は1日船を出して50cm級のソイが1匹でも上がったら船中で万々歳でした。それが今日は5、6本上がった。自分が持ち帰って食べられる分に自制する——取り過ぎない。それがプライドでありサステイナブルな釣りにもつながるのではないのでしょうか。今からもう“サステイナブルな釣り”とは何かを考え始めて実践しないと手遅れになると思います。いわきの海に来て釣って食べる楽しさを満喫する。その体験は風評被害とは何かを感じ考えることに繋がっていくとおもいます。」

そうこうするうち、結のはじまりの女将が味付けしたアラ汁が大鍋で登場。地元の炭焼き師謹製の炭火にかけられる。その汁を吸れば、まさに双葉の沖の海の豊穡なスープが口いっぱい広がった。

IV. これからの課題

帰路、交民家から木戸駅まで歩く宵。道中夏虫の羽音やカエルの合唱が耳に心地よい。楽しい釣り、充実した釣果、大物の造り、煮付け、アラ汁…美味極まり双葉の海の幸。至福の1日があつという間に過ぎていった。見上げれば濃紺の宇宙に三日月が掛かる。これからどのようにしてこの体験を多くの人々とともに共有していくことができるだろうか。それが課題だと思った。

三日月の水面に揺らぐ木戸の川

双葉沖の夢ぞはろけし

長栄丸の釣りの模様は下記 URL をご覧ください。

<https://www.youtube.com/watch?v=0t2Vg-2cNHg&feature=youtu.be>

(2018年8月1日記)



写真3 さばき方講習会



写真4 刺身になった50cm級高級魚クロソイ

I. 創立 90 周年を迎えた国際放射線防護委員会

国際放射線防護委員会(ICRP: International Commission on Radiological Protection)は、1928年の第2回国際放射線医学会において、電離放射線による健康影響を検討するため、国際X線・ラジウム防護委員会(IXRPC)として設立された。1950年にICRPに名称を変更し、今年で創立90周年を迎えた。国際という名前が付いているが、英国の慈善団体(UK Registered Charity 1166304)である。非政府(NGO)団体でありながら、世界保健機関(WHO)や国際原子力機関(IAEA)等の政府間国際機関と公的関係にある。

2018年3月末現在、33カ国、238名の専門家から構成される。委員長は英国のClaire Cousins氏で、科学事務局はカナダに置かれている。主委員会(Main Commission)の下に、4つの専門委員会(Committee)がテーマ別(影響、線量、医療、勧告の適用)に設けられ、放射線防護体系について検討している。ICRP勧告はIAEA安全基準や世界各国の放射線障害防止に関する法令の基礎とされ、日本においても放射線審議会がICRP2007年勧告の国内法令取入れに向けた検討を行っている。

II. ICRP 科学秘書官補佐としての主な経験

筆者は、第10代ICRP科学秘書官であるChristopher Clement氏の補佐(Assistant Scientific Secretary)として、2016年3月から2年間、オタワにあるカナダ原子力安全委員会ビル内に置かれたICRP事務局に勤務し、①ICRP刊行物の編集、②ICRP会合の運営、③福島における地域住民による対話集会の継続、等の事務局運営をサポートした。全くの余談であるが、ICRP創立90周年となる2018年は、日本とカナダにとっても国交樹立90周年という記念すべき年である。

以下に、ICRP科学秘書官補佐としての主な経験を紹介する。

1. ICRP 刊行物の編集

ICRP勧告は、Annals of the ICRPというジャーナルに発表される。各勧告には通し番号が付けられており、現在の国内法令の基礎となっている1990年勧告は

Publication 60、最新の主勧告である2007年勧告はPublication 103である。

筆者は、同ジャーナルのAssociate Editorとして編集を担当し、Publication 133から139までの7つの勧告の出版に携わった。これらの勧告では、作業者の内部被ばく評価に用いる線量係数、医療診断における参考レベル、環境動植物の防護のための線量換算係数、放射線防護体系の根底にある倫理的価値など、放射線防護に関わる幅広い領域を扱っている。

ICRPの検討が勧告として世に出るまでには多くのプロセスがある。主委員会におけるタスクグループ設置の提案と承認、タスクグループでの検討とドラフト作成、専門委員会での審議、公衆審査開始のための主委員会における承認(投票)、公衆審査(90日間が基本で、内容によってはそれ以上)、公衆審査の結果を踏まえた最終ドラフトの作成、主委員会における出版承認(投票)、出版社との原稿のやり取り、主著者とのプルーフ確認を経て、最終的な出版を迎えることになる。

2. ICRP 会合の運営

年に二回、春と秋にそれぞれ5日間開催される主委員会会合(ケープタウン、深セン、リマ、パリ)に出席し、事務局運営をサポートした。主委員会委員13名と科学事務局が参加し、非公開で行われ、開催後に会合のサマリーレポートが公開される。2020年までの基本方針の策定や次期ICRP主勧告に向けたブレインストーミングの議論に触れることができたことは貴重な経験となった。議論の内容によっては、Cousins委員長から発言を求められる機会もあり、公式の議事録に名前入りで記録されることもあった。2017年春の主委員会会合では、委員長や副委員長をはじめ、全てのICRP委員の改選(任期は2017年7月から4年間)の開票集計作業を担当し、こちらも通常では得難い経験となった。

主委員会以外では、第4専門委員会(勧告の適用)やタスクグループ93(原子力事故後の緊急事態と復興期に適用する放射線防護)の会合等にも事務局として参加し、運営をサポートした。日本でICRP会合が開催された際には、関係省庁との調整を担当し、福島第一原子力発電所や避難指示区域、除染土壌の中間貯蔵施設への搬送、

帰還後の生活再建に向けた住民の取り組み等を視察するICRPメンバーに同行した。

2018年3月、更田原子力規制委員長の規制庁職員に向けた訓示の中で、事故から何年ということではなく、事故は現在も続いているという認識を持って復興に係る判断を下していくことが重要との発言があった。被害の大きさを左右する判断が今後も続くためである。筆者が出会った世界の放射線防護の専門家は現在でも日本の状況に高い関心を持ち続けており、生物としての「ヒト」ではなく、社会生活を営む「人間」を防護するという視点から、より良い放射線防護体系を構築するための活動を続けている。これらの活動をサポートするため、カナダから福島を訪れた回数は2年間で七回に及んだ。

3. 福島における地域住民による対話集会の継続

ICRPでは、2011年11月より、福島第一原子力発電所事故の影響を受けた地域における生活環境を改善するための対話集会(ダイアログ)を継続しており、参加者は延べ1,000名余りに及んでいる。筆者がICRP事務局にいた2年間では、6回の対話集会が飯館村、川内村、双葉町・楡葉町、伊達市、川俣町、南相馬市において日本財団の支援を受けて開催された。2015年には対話集会の内容を世界と共有するためのICRP主催の国際ワークショップが伊達市で開催されており、赴任後すぐに抄録集の取りまとめを担当した。日本保健物理学会の若手有志によって日本語訳も用意され、同学会ウェブサイト(<http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/report/page.cgi?id=47>)より公開されている。

福島での一連の対話集会に対するICRPの貢献が評価され、2018年2月には、環境大臣と福島県知事からICRPに感謝状が贈呈されたことも特筆しておきたい。

Ⅲ. 経験から学んだこと

筆者にとって、これまで「ICRP勧告」と言えば、既に完成されたものを購入し、それを読み解くことで勧告の内容を理解するという受動的なものであった。しかし、今回の経験を通じて、ICRP勧告の出版に係る一連のプ

ロセスに関わることができた。ICRPの通常のメンバーであってもここまでの範囲の活動に関わることはなく、ICRP勧告の成り立ちの全体像を把握することができた。

ICRPが勧告する放射線防護体系は、科学、倫理、経験を三つの柱としており、最終的な勧告ではたった一行の記述になったとしても、その裏には多くのストーリーがある場合が多い。ICRP勧告を利用するものは、そのストーリーをできるだけ正確に理解した上で適用する必要があり、「ICRPが勧告しているから」ということだけを根拠にしてはならないと感じた。同時に、ICRP刊行物を作成する側は、Publicationの発刊は一つの通過点であって、勧告の根拠を丁寧に説明する努力を続けなければならないと考える。Clement科学秘書官ともこの点について共有しており、今後のICRPの活動に期待しているところである。

ICRPでは、「独立は孤立を意味しない(*Independence does not mean isolation*)」というスローガンのもと、放射線防護の専門家や政策決定者、公衆との関与をより一層深めるために、関係機関との連携拡大、ICRPシンポジウム等を通じた積極的な関与、ユーザーとの直接的な関係強化、ソーシャルメディアを活用した放射線防護体系の普及等の試みを展開している。一例として、ICRPの勧告する放射線防護体系を分かりやすく発信することを目的として、ICRPædia(<http://www.icrpaedia.org/>)という新しいウェブコンテンツの運用を開始したところである。Publicationの発刊は一つの通過点であり、放射線防護体系の普及のための努力を重ねていくという方向性の一つの現われだと理解している。より一層の内容の充実に期待している。

2年間という限られた期間ではあったが、多くのことを学んだ。今後は、ICRPでの経験と世界の放射線防護コミュニティに構築したネットワークを活用し、日本の放射線防護レベルの向上に貢献していきたいと考えている。

(2018年6月26日記)

談話室

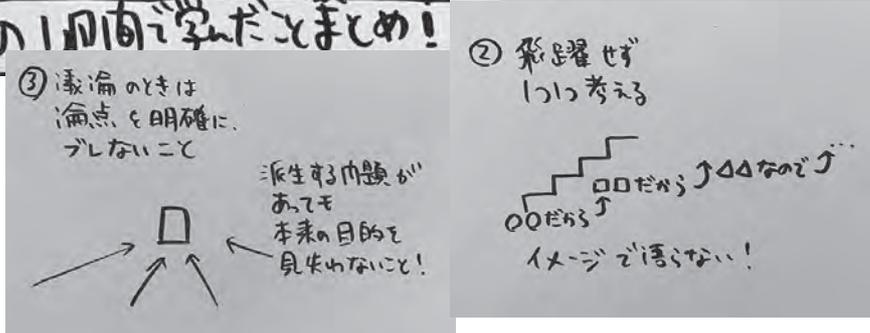
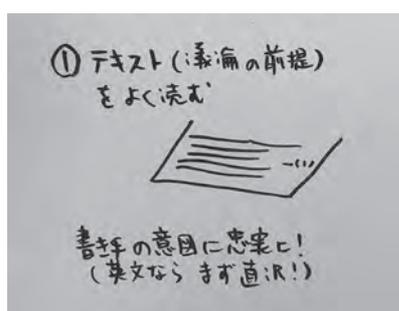
リケジョの思い(1) 記号以前の「私」

大学に進学してから、周囲の人から「リケジョだね」と言われることが増えました。その度に私もついにリケジョになったか、がんばったな、と思います。同時になんだかしっくりこない感じもします。それは、私が私自身でなくなってしまったような感じがするからです。

では、どうしたらよいのか。大切なのはリケジョ以前、記号以前の「私」をその人自身が忘れないことです。リケジョという記号には便利さもありますし、周囲からすれば私は確かに理系にいる女子学生なのです。私にできることはそのようにラベルされる側であることを自覚し、ラベルを自分の意志で使っていくことです。

ですから、ある人がリケジョとして発言の機会を得るときには、「私」として考えたことを発信することが大切です。それは周囲からみるといわゆるリケジョ的な考え方ではないかもしれませんが。その場合には、リケジョにもいろいろな人がいる、というリケジョの一事実を伝えることができます。それはとても有意義な事だと思うのです。

社会はラベルや記号にあふれています。そのほうが生活しやすいのでしょうか。しかし、ラベルは道具にすぎません。道具は使うもの。リケジョであっても「私」を見失うことなく、一人間として生きていけたらと思っています。



それはさておき、今回は私が研究室生活1週目を終了した時のことを紹介します。学んだことは左に書きました←。けど、まだ身につけてない。最後に私の自己紹介。名前は口町和香(くちまち・わか)。北海道大学物理学専攻で、統計物理学やパターン形成の物理学、科学技術コミュニケーションを手がけてます。



共同体の形成

青山学院大学 岸田 一隆

災害社会学の研究から、以下のことが明らかになっています。それは「人間は命の危機に関わるほどの緊急事態に遭遇した時、ほとんどパニックを起こすことはなく、むしろ自分を犠牲にしてまで利他的で協力的な行動を選択する」ということです。

これは意外な事実です。私たちは様々な小説やテレビドラマや映画などで、危機に見舞われた民衆がパニックに陥って、逃げ惑うシーンに数多く接してきました。「人は危機に見舞われるとパニックになる」というのは、一種の常識のように根付いているのではないのでしょうか。しかし、これはフィクションの中でしか存在しないことなのです。

私たちは普段の生活の中では、すなわち生きるか死ぬかの差し迫った状況に置かれていない状態では、必ずしも利他的な行動を選択しているとは言えません。この状況が変わるのが、命の危機に関わるほどの緊急事態に遭遇した時です。これは、人類が進化の過程において集団で生き残ることを選択したためです。生き残るために、強い共感力で共感・共有のコミュニケーションを働かせ、固い絆で結ばれた共同体を形成し、生存の危機をみんなで乗り切ろうとします。

ところが、災害社会学の研究からは、もう一つの残念な事実が明らかになっています。それは「エリートパニックは必ず起きる」ということです。エリートパニックというのは、「重大な緊急事態に遭遇した時、エリートたちは社会秩序の混乱を過度に恐れ、自らの持つ情報を秘匿する」というものです。フィクションの中にしか存在しない民衆のパニックを、エリートが恐れて機能不全に陥る現象です。

危機によって生まれた市民たちの共同体。彼らに対する最大の裏切り行為とは何でしょうか。それは、「共同体のメンバーとコミュニケーションしない」「共同体のメンバーに真実を話さない」「共同体のメンバーを信用しない」ということです。エリートパニックに陥ったエリートたちは、新しく生まれた共同体にとっての最大の裏切り者です。この不信感がやがて、緊急事態が去ったあとまで根強く残っていくのです。

共感・共有のコミュニケーションをうまく機能させるというのは、ある種の共同体を形成するということと同

じことです。したがって、コミュニケーションの最初の心構えとして、「共同体の一員として認められているのか」「そうでないならば、これから一員になれるのか」というところから、自問しなければいけません。

原子力に関するテーマで、市民とのコミュニケーションを活発に行おうとすると、それまで静かだった市民の中に波風を立てるように感じ、「寝た子を起すな」と思う原子力関係者がいるかもしれません。

ですが、残念なことに、福島第一原子力発電所の事故によって、そして、その時に現れた「エリートパニック的現象」によって、市民は原子力エネルギーに対して負のイメージを抱いており、関係者に対する信頼も大きく失っています。このような状況にあって、市民を「寝た子」のままにさせようとするのは、完全にやぶ蛇です。エリートパニックを二重に重ねたことになってしまい、その結果、長期的に見れば、待っているのは原子力分野の安楽死ともなりかねません。

メンバーを信用して、粘り強くコミュニケーションを続けることが肝要です。同じ共同体の一員であると認識して、愛情をもって語り合うことが大切です。

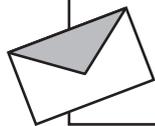
確かに科学技術の話は難しいです。全てを理解してもらうことは、ほぼ不可能でしょう。それどころか、専門家と自認している人たちですら、科学技術の全体像を熟知している人は、ほとんどいないでしょう。ましてや、市民と語り合うためには科学技術の話だけでは不十分なのです。生活の話、未来の話、心の話。ここでは、広い意味での哲学が必要になってきます。

たとえ、科学技術についての理解が完全ではなくても、人間は人類にとって不利な選択をするほど愚かではないと信頼するべきです。ただ、市民が選択をするためには、専門家と呼ばれる人々にはあらゆる選択肢を提示しなくてはなりません。どのような技術があるのか。どのような科学的知見があるのか。その結果、どのような未来がありえるのか。他の道を選択した場合はどうか。考えることはたくさんあります。言うまでもないことですが、選択肢自体を示さないのは裏切り行為です。

誰が世界を決めるのか。それは、共同体の成員の全てです。そして、最終的には市民です。

(2018年8月24日記)

理事会だより



学会としての情報発信

本会は、学会内部の情報伝達および社会への情報発信を適切に行うために、「広報、情報伝達に関する規程」を以下のように定めています。

- 第1条 目的
- 第2条 基本方針
- 第3条 少数意見の尊重
- 第4条 本会内の情報伝達
- 第5条 社会への情報発信
- 第6条 社会への直接的情報発信
- 第7条 緊急時や異常事象発生時の情報発信
- 第8条 社会への情報発信体制

基本方針では、「学会は、会員に対して、より正確なデータと情報をできるだけ速やかに伝達するサービスを行う義務がある」とするとともに、「社会に対しては、さまざまな局面において専門家個人または専門家集団として正しい情報を発信する社会的責任を有する」としています。また、第3条では、少数意見の尊重がうたわれており、討論の場の提供が肝要であり、合意形成を急いではならないとしています。

第6条では、会長記者会見、プレスリリース、ポジション・ステートメント等を通じた社会への直接的情報発信を積極的に行うとされておりこれらを広報情報委員会が実施しています。

会長記者会見は、主に本会の活動状況の報告などを定期的に行っており、新会長就任会見、春の年会・秋の大会での見どころや専門委員会の活動状況などを紹介します。

プレスリリースは、当会主催のシンポジウム等の開催案内や本会の活動紹介(委員会等の設立、報告書の公表等)、声明・提言・見解などをマスメディアに発表するものです。シンポジウム等の開催をお知らせすることで、当会の活動を知っていただくことができます。また、実際にシンポジウム等が取材され、マスメディアを通じた情報発信が行われています。

ポジション・ステートメントは、社会が関心をもつ原子力の平和利用に関する重要事項を、本会の見解や提言、解説としてホームページを通じて発信しています。ポジション・ステートメント発信の目的は、①本会としての見解等をわかりやすく説明し、原子力技術への社会の理解向上に寄与すること、②会員が平易に説明するためのツールを提供すること、③本会のホームページに掲載、公開し、学会活動の透明性を高め、社会に対するオピニオンリーダーとしての責任を果たすこと、であり、

当委員会の下に設置されているポジションステートメントワーキンググループが、部会等のご協力を得て作成に当たっています。

また、原子力施設でトラブルが発生した場合などの、緊急時や異常事象発生時の情報発信には、会長記者会見やプレスリリースを実施するほかに、異常事象解説チーム(チーム110)が設置されており、「原子力施設における異常事象について専門家の見解が求められた場合に、国や事業者から独立した立場で、速やかにわかりやすい解説をする」という任務を担うこととしています。現在、各部会から約50名のメンバーが登録されています。

学会としての社会への直接的情報発信については、適時性や正確さ、公平性をどのように担保していくかが重要とであると考えますが、現在のしくみでは、あまり明確になっておりません。特に、声明・提言・見解は、プレスリリースとポジション・ステートメントの両方から発信することができるため、短期間の調整で発信しているプレスリリースと、会員へパブリックコメントを求めるなどじっくり時間をかけ作成し発信しているポジション・ステートメントのあり方について、当委員会としても議論を重ねてきています。

9月の「秋の大会」の当委員会の企画セッションにおいて、プレスリリース、ポジション・ステートメント、チーム110の現状と課題について報告するとともに、今後の対応として、プレスリリースは、学会のイベント案内や活動状況等の発信のツールとし、声明・提言・見解はポジション・ステートメントとして、現在ポジション・ステートメントの大半を占めている解説と区別して扱うという考え方を示しました。

ご参加いただいた会員の皆さまからは、

- ・プレスリリース、ポジション・ステートメント等に対して、会員が意見を述べる場がある場であっても良いのでは
- ・本会が発信するポジション・ステートメントや解説においても内容によっては他学会との連携も視野に入れるべき
- ・情報発信におけるクレジットに留意する必要があるなどのご意見をいただきました。

当委員会は、より良い情報発信を行うために、これらの意見も反映したしくみを検討し、取り組んでいきます。

(理事(広報情報委員長) 布目 礼子)