

巻頭言

1 危機回避に絶対はない

大竹文雄

時論

2 女性科学者ネットワーク形成の意義と課題

女性が科学技術に参画することによって、どのような新しい価値観が生まれるか。

坂東昌子

4 学校での放射線教育を手伝う中で

福島県を中心に学校現場などで放射線の話をしてきた。

坪倉正治

6 BER2018「大阪春の陣」高校生たちに未来をみた

そこには高校生たちの真摯さとひたむきさがあった。

角山雄一

解説シリーズ

29 WEO2017と内外エネルギー情勢への示唆 第1回 持続可能な開発と長期エネルギーシナリオ

原子力は持続可能なエネルギーシステムの実現において重要な技術オプションの一つだ。しかし、エネルギー市場の将来の不確実性が高まっており、原子力への投資の予見可能性を高める政策的支援が重要となる。

小宮山涼一

Column

- | | |
|-------------------|------|
| 34 「福島のを訪ねるバスツアー」 | 井内千穂 |
| 「花が美しい理由」 | 北岡哲子 |
| 「原爆の東欧への影響」 | 妹尾優希 |
| 「飯館村の山菜が教えてくれること」 | 服部美咲 |
| 「地元」 | 渡辺真由 |
| 「現状の「受容」では済まされない」 | 渡辺 凜 |

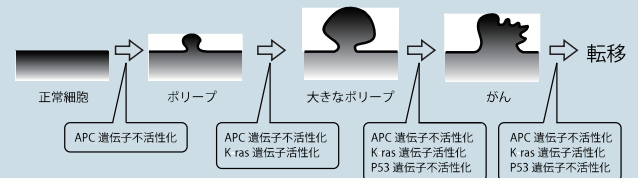
特集 甲状腺がん発症のメカニズム

がんはこれまで、正常な体細胞が、多段階の遺伝子変異を経て発症すると考えられてきた。しかし、近年、それとは異なるいくつかのメカニズムが新たに提唱されるようになってきた。

石田健二, 岩井 敏, 仙波 毅, 福地 命, 當麻秀樹

14 1. 多段階発がん説

がんは、体細胞での変異が段階的に蓄積して進展していくというのが通説だった。しかし、幹細胞の研究が進むにつれて、組織幹細胞そのものが発生母地となる新たなメカニズムが提唱されはじめた。



Fearon & Vogelstein によるヒト大腸がん多段階説

19 2. チェルノブイリ事故から導かれた甲状腺発がん説

チェルノブイリ甲状腺がんは放射線誘発による遺伝子変異ではなく、放射線による細胞死の誘導と組織微小環境の錯乱で、自然発生の遺伝子変異細胞が増殖して発症したというメカニズムが提唱された。

24 3. 芽細胞発がん説

甲状腺がん発症モデルとして、近年、「芽細胞発がん説」が提唱された。これは従来の発がんモデルとは大きく異なるメカニズムである。

From Abroad

37 Scientific Wanderlust Across The Ocean 海の向こうの研究放浪記—ノルウェー編

美しい国土をもつノルウェーに住み着いて21年になる。その間、「ハルデン炉」がある研究所で仕事をした。そこでの仕事の仕方は、日本と大きく異なる。

築城 諒

連載講座 核融合トリチウム研究最前線— 原型炉実現に向けて（第2回）

52 原型炉に向けたトリチウムバランスの 考え方

核融合炉のトリチウム燃料循環システムにおけるトリチウムバランスの基本的な考え方とモデル化について概説する。

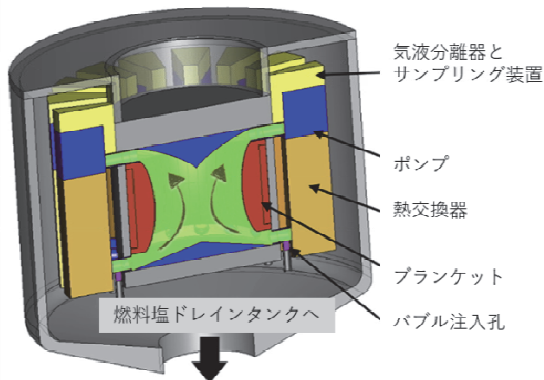
日渡良爾

連載講座 第4世代原子炉の開発動向 （第6回）

57 熔融塩炉・トリウム炉

新たな原子炉型として液体燃料を用いる熔融塩炉への関心が高まっている。その特徴と、熔融塩炉をめぐる世界の開発状況について解説する。

高木直行



熔融塩高速炉（MSFR）の炉心概念図

Short Report

63 茨城大学—IRSN 国際ワークショップ— 大気放射性セシウムとバイオエアロゾル の放出

北 和之, 五十嵐康人

科学コミュニケーション 第2回

65 ひと昔前の科学コミュニケーション

岸田一隆

理事会だより

66 「見る前に跳べ」か「見ながら跳べ」か

榎田洋一

8 NEWS

- 第5次エネ基、原子力は20～22%と明記
- 海外ニュース

解説シリーズ

43 プラントへのIoT活用と安全・セキュリティ対策 セキュリティ心理学からの考察

サイバーセキュリティ対策は技術対策と考えられるが、実際には「人間」を考えることが重要である。その「人間」の脆弱性を踏まえて考えられたのが、セキュリティ心理学だ。

内田勝也

47 ミクロ～マクロレベル現象の粒子ベース シミュレーション～課題と展望～

第1回 粒子法による大規模津波解析 と鉄道を対象とした解析への取り組み

粒子法は計算精度とコストの面で格子法に劣る。しかし、境界面が複雑に変形し合うような解析や多数の接触判定が必要となる解析では、大きな力を発揮する。ここでは粒子法が力を発揮する解析例を3例紹介する。

室谷浩平



福島第一原子力発電所沿岸部の津波遡上解析

28 From Editors

67 会報 原子力関係会議案内、平成30年度役員紹介、新入会一覧、第51回学会賞受賞候補者の推薦募集、英文論文誌(Vol.55, No.8)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/>

危機回避に絶対はない

巻頭言



大阪大学大学院経済学研究科，教授

大竹 文雄（おおたけ・ふみお）

専門は，行動経済学・労働経済学。『競争社会の歩き方』（中公新書），『医療現場の行動経済学』（東洋経済新報社）など。

あなたが地震予知の研究者で，分析していたデータから数日先の大地震発生を予知したとする。政府に知らせると，総理大臣が非常事態宣言を発して，地域住民は避難した。しかし，地震は一か月経っても起きなかったため，非常事態宣言を取り下げた。その45日後に大地震が発生し，多くの命が失われたため，あなたと総理大臣は過失致死罪で起訴された。

これは，齊藤誠氏の近著『〈危機の領域〉非ゼロリスク社会における責任と納得』（勁草書房）で紹介されている寓話である。この寓話は，2009年4月のイタリア・ラクイラ地震で，「近い将来，大地震は起きない」という安全宣言が外れてしまい，安全宣言の発表に関わった科学者や政府責任者が過失致死罪で訴えられたことをもとに作られている。

このような危機対応の問題はなぜ発生するのだろうか。齊藤氏は，「危機回避を大義名分とした大胆な対応が人々の強い支持を得やすいにもかかわらず，危機を予測し，危機を回避する手段の科学的根拠がきわめて弱い」という点に根ざしていると指摘する。「この対策によって危機は確実に回避できます」というメッセージは，多くの人に受け入れられやすい。行動経済学では，確実性効果と呼ばれているものだ。例えば，「A. 確率80%の4万円」と「B. 100%確実な3万円」であれば，多く人はBを好む。しかし，「C. 確率20%の4万円」と「D. 確率25%の3万円」であれば，Cを好む人が多い。

実は，BとCの組み合わせを選ぶ人は，伝統的な経済学における合理性の仮定と矛盾している。x万円のくじに当たったときに感じる満足度を「満足度(x万円)」と書くとしたとき，最初の選択でBのくじを選ぶ人は，「満足度(3万円) > 0.8 × 満足度(4万円)」という好みを持っていると伝統的経済学では考える。ここで，この式の両辺に0.25をかけても，この関係は変わらない。すなわち，「0.25 × 満足度(3万円) > 0.2 × 満足度(4万円)」という関係がなりたっていると予想できる。つまり，Bを好む人はDを好むはずだというのが伝統的経済学の予想なのだ。

実際にはBとCの組み合わせを選ぶ人が多いということは，確実であるということと小さな不確実が存在することに私たちは大きなギャップを感じるということの意味する。これが確実性効果である。そのため，危機対応において安全という表現が政治的には好まれる。しかし，科学的な議論の多くは，絶対ということは少なく，確率的にしか予測できないことが多い。その上，その確率についても，科学者の間で意見が一致することはそれほど多くない。

「危機は必ずしも回避できない」という前提で，民主主義的な意思決定ができるような工夫をしていく必要がある。危機の発生確率について様々な分野の専門家が議論し，その中の最悪の発生確率のもとで，最善の状況をもたらすような対策を選んでいくことが大切だ。これは何も地震対策に限らない。財政破綻のような経済問題でも同じである。多くの経済学者は，数年以内に財政破綻が生じる可能性は低いとみているが，このままの財政運営だと，数十年という単位で見ればかなりの確率で財政破綻が生じると考えている。財政破綻は発生しなければそれに越したことはないし，発生しないという前提の政策は支持されやすいことは事実である。しかし，財政破綻が発生する可能性を納得した上で，意思決定をしておかないと私たちは将来後悔することになる。

(2018年5月30日記)



女性科学者ネットワーク形成の意義と課題



坂東 昌子 (ばんどう・まさこ)

知的人材ネットワーク あいんしゅたいん

京大理・同大学院(湯川研)卒・同助手講師を経て愛知大教授・物理学会男女共同参画推進委員長・同学協会連絡会長・日本物理学会会長(2007年)・京大理博(素粒子論)

NPO あいんしゅたいんの事務所は、京都大学キャンパスに近接する民家にある。4年前のこと、「ランチ会をここでやりませんか」と声がかかった。京大の周りの女性研究者の集まり、にわとり学部の方々だった。「そりゃあ楽しそう」とすぐ話がまとまり、お昼にお弁当を持ち寄っておしゃべりする会が始まった。「今度バりに1年留学するのだけど、保育所あるかな?」と話すと、すぐに経験ある仲間がアドバイスする。シニア組(私が一番年寄りか!)と子育て中の世代が繋がって楽しいし、役にも立つ。女性が集まると、アイデアが浮かび、意気投合し、行動を開始するのは女性の特徴で、「女は度胸(男は愛嬌?)」である。

さて、きっかけは、日本学術振興会研究開発委員会等による「放射線の生体影響に関する国際会議」(BER2018: 3月19~21日@阪大中の島センター)の開催だった。発足2年目の学振委員会が国際会議を開いた例はないそうだが、賛同する科学技術者の協力で実現した。当NPOもその一端を担った。目的は、TEPCO事故以後の課題である放射線の生体影響に関する知見を交換することだが、もう一つは、放射線防護と欧州で急速に発展している医療への放射線利用との橋渡しである。事の起こりは、これに先立ち前日に開催した国際市民フォーラム「我々は福島から何を学んだか~市民と科学者の対話~」である。この主役を演じたのがランチ会の元気な女性たちだったのである。ついでだが、本会議の「高校生セッション」もユニークな企画だった。若手と女性が本会議のわき役として活躍したのである。国際的なリーダーたちが専門的な議論を深める前日に、科学者と市民とが交流し合い、お互いの意見に耳を傾けるという意図で取り組まれた「国際市民フォーラム」は、女性主導の交流で、極端に分かれた放射線の影響の評価について、忌憚のない意見交換はするが、よく見られるような喧嘩にはしたくないという思いがあった。準備の中で、福島県の子供の甲状腺検査について多くの質問が寄せられた。これに関連して、比較のためにチェルノブイリ事

故後の経緯を見直して気が付いたことがある。それは、そこで活躍した女性の存在だった。当初、扁桃腺肥大などの放射線治療による外部被ばくの影響で小児に限り甲状腺がんが発症することは、Ronたちのケースコントロール調査で明らかになっていたⁱ。チェルノブイリ事故当初、¹³¹Iと甲状腺がんの関係、特に内部被ばくと甲状腺がんの因果関係については否定的だった。しかし、徐々に報告される現実を前にして、科学者たちは本格的な調査の必要性を認識し始める。特に、「内部被ばくなどありえない」と主張していたRonは、世界中に現存する12万のデータを分析し始めた。現実を真摯に受け止め自分の誤りを正したRonに私は深い感銘を受けた。さらに、Dose response relationship(線量とリスクの数量関係)を明確にする国際的な共同作業が始まる。そのリーダーがCardisだった。事故発生後、実に30年を費やしてやっと科学者の合意が形成された。この2人、RonとCardisがどちらも女性研究者だと知った時、私は感激して、サロンでみんなに伝えた。それから放射線の影響について、女性研究者の仲間たちは猛烈に勉強し始めた。医療関係者が多かったせいもあって毎回、議論は深められ、どんどん私を追い越して様々な知見を披露してくれた。「この2人から話が聞きたいな」と交渉開始! 残念ながら、Ronは60歳代で他界されたことも知った。女性研究者の地位向上のためにも尽くした正義感の強い方だったそうだⁱⁱ。そこで、会議に参加予定のGayle WoloschackとUrlike Kulkaさんに参加をお願いしたら、この会の趣旨を理解し「大賛成」と快諾していただいた。加えて、いつも熱心にサポートいただいているWolfgang Weissも加わり、フォーラムの内容を詰める議論がメールで飛び交った。たくさん寄せられ参加者からの質問の整理をしながら、議論の焦点をどこに置くか、どう論点を整理するか、ぶっつけあった。議論が発

ⁱ 山下俊一「放射線被ばくと甲状腺癌」

ⁱⁱ <https://dceg.cancer.gov/about/organization/programs-ebp/reb/elaine-ron>

散すると、ワイズさんが「焦点はどこなのか」と警告を出す。英語・日本語、時にはドイツ語まで飛び交うやり取りは1,000通にも上った。この時翻訳ソフトが大活躍したのも面白かった。こちらで内緒に話そうと日本語だけのメールを送っても、翻訳ソフトで中身はわかってしまう。ドイツ語で書いた向こうのメールは「初めて議論に参加した人もいたので、もっと初歩から話すべきかなあ」といったワイズさんたちの議論もこちらは翻訳できる。でも、初めてこのテーマに向き合った彼女たちはどんどん理解していく。ついでに女性研究者の問題も議論が始まるといった調子だった。最も熱心で活発な鈴木和代さん(京都大学医学部附属病院先制医療・生活習慣病研究センター特定助教:糖尿病・内分泌・栄養内科)が組織委員長を引き受けてくださり、ますます盛り上がっていった。委員長だけではなく、みんながそれぞれ自分の力を出し合って協力しあうネットワークが形成された。こんなに自発的、創造的、機能的、協調的組織運営は、女性らしい周りに対する思いやりの結果だったのではないだろうかと思うと、感激の連続だった。

そうだ、こんな素晴らしいネットワークができた今、昔からずっと思いを募らせていた課題に挑戦できるのではないか。その課題とは「女性が科学技術に参画することによってどういう新しい価値観が生まれるか」である。すでに、「生きづらさ学」ⁱⁱⁱが立ち上がっており、生きづらさをマイナスとらえるのではなく、それをプラスに変える方向性を見出すのも興味深い。これまで、女性は家事育児に時間をとられ研究時間の確保に悩んできたが、逆に、住宅や家電の設計を工夫できる。男性採用優先でポストに就けないで、新設の環境講座にポストを得て、そこで環境問題のリーダーになった中西準子さんのように、分野横断の先駆者は生きづらさから生まれるかもしれない。Elsevierの調査によれば、異分野挑戦、新分野開拓に寄与した事例は、男性と比して女性に多いという報告もある。また、わが国の企業においても1985年の雇用機会均等法ができ、女性技術者の比率が増加したが、女性の感性で新商品開発が進んだのが家電部門だという例もある。

歴史を振り返ってみると、ナイチンゲールが、データの方でイギリス軍病院の衛生状態の改善を実現したことは有名だ。彼女が初めて統計グラフを描くことを始めた。今ではグラフで説得することで本質がよく見えるというのは常識だが、当時は「子供だまし」といわれたらしい。また、産業医学をハーバード大学に創設したアリス・ハミルトンは「鉛の害を調べたい」と鉛製造会社の門をたたいたが、当時は無名の彼女は門前払いされた。それでも粘り強く訴え続け、ついに、ある鉛会社の工場長(のちに社長)から調査の許可がでた。鉛被害の事実が明

確になると、工場長は即座に工場を環境を整備した。おかげでこの鉛会社だけが生き残ったという。アリスも偉いがこの工場長も偉い。かの有名なレイチェル・カーソンの警告は、ジミー・カーター大統領が着目してサポートしたからだという。勇気ある挑戦を正当に取り上げる社会的支援の例である。

この例は、企業の利益が結局社会の利益につながる見本でもあり、男性を含めたサポート体制の重要性も物語っている。これに反して1898年にアスベストの被害を初めて指摘した女性技術者ルーシー・ディーン^{iv}は、権威ある医者たちに素人扱いされ無視された。異分野や異業種からの指摘や警告が取り上げられない現状は今もなお色濃くはびこってはいないだろうか。

20世紀を個別分野の発展の時代とすれば、21世紀は医療・災害・都市計画・住宅環境、生涯教育、環境など、分野横断的統合的で多角的視点が必要な課題に挑戦する時代だ。赤松良子先生は「先人の開いた道に続こう」とよく言われる。優れた先駆者たちが築いた道の後には、もっとたくさんのごく普通に生きて頑張っているたくさんのお私たちが続いていこうではないか。それは単一の価値観や方向性をもった社会から、異なった視点をもつ人々がコミュニケーションの中で新たな価値を生み出すことにもつながる。原子力学会でも、男女共同参画委員会は2017年から「ダイバーシティ推進委員会」に名前を変えたのも、そういう広い視点からの科学技術の在り方を目指すことを意味しているのだと思う。これからはささやかでもお互いの力を出し合って、その感性を生かす協力協働が大切なのではないだろうか。これから後を引き継いでいく世代は、仲間のネットワークを通じて創造していくイノベーションの時代ともいえよう。

こんな時、産学協力総合研究連絡会議による研究開発専門委員会の新設募集が始まった。チャンス到来とばかりに、仲間呼びかけたら、すぐに意気投合、鈴木さんの原案をもとにみんなで企画を作り上げた、最終的なタイトルは「多様性をイノベーションに繋ぐ要因の研究と新たな評価法の提案」となった。男女共同参画から「多様性」へのまなざしは、原子力学会と同じ思いを表している。ちょっと冒険だが、女性委員が8割を占める委員会、若手主導を進める委員会という斬新な委員会、その活動を見守りたいと思う。原子力学会にお邪魔したとき、女性会員の皆さんが男性会員とともに生き生きと活動なさっているのを拝見してとても楽しかった。あのとき、どなたかが、「偉くなると調整型になっていくのが残念」と言われたのも忘れられない。今後、また、一緒に議論できることを楽しみにしている。

(2018年5月25日記)

ⁱⁱⁱ <https://www1.gifu.ac.jp/~sankaku/news/301.html>

^{iv} http://www.ne.jp/asahi/kagaku/pico/precautionary/late_lessons/5_asbestos.html



学校での放射線教育を手伝う中で



坪倉 正治 (つばくら・まさはる)

相馬中央病院 特任副院長

2006年3月東京大学医学部卒業。東日本大震災発生以降、相馬中央病院、南相馬市立総合病院を拠点に浜通りの医療支援を実施。血液内科が専門、被ばく関連の放射線相談にも従事。

震災からもう7年以上になる。医者として何か役立つことがあればと思い、車で相馬と南相馬の市役所に伺ったのは2011年4月の頭のこと。避難所での健康相談のついでにしていたお母さんたちとの放射線に関する会話が広がり、様々な場所で放射線の話をするようになった。そうこうするうちに1台目のホールボディーカウンターが病院にやってきたが、遮蔽が悪く結果が出なかった。その後、新しい器械がやってきてデータをまとめたのは良いけれど、一般の人にその結果を伝えるのは苦難の連続だった。実測でも内部被ばくと外部被ばくともに十分問題ないことが分かり、それを伝えようと地域での講演会や子どもたちへの授業をするようになった。

そんなこんなで生徒に授業をする機会をいただくようになって6年くらいになる。毎年お伺いする学校もあれば、3年ごと、1回だけ、福島県内、県外など様々な場所からお声がけいただく。医者であることを最大限利用し、毎度のごとく白衣を着て聴診器を持ち、授業が終わったら聴診器を一緒に使ってみようと思いを引く。いつも使う小話をして何とか気を引き、限られた時間内で理解度を高めようと「もがく」。どんなことを話しても、あっという間に時間は過ぎてしまう。何となく慣れたような気にはなっているものの、放射線および今回の原発事故のどの部分をどのような方向から伝えるかはいつも本当に難しい。本稿では私自身が生徒たちの前で放射線のことを話した際、記憶に残っている場面をいくつか紹介する。それを通して、私たちは今後も子どもたちに何をどんな風に伝えていくことが必要なのだろうか。一緒に考える時間に少しでもなれば幸いである。

一つ目は体育館で、中学校の全校生徒(恐らく300人ぐらいだったと思う)に向かってその市の放射線の状況が問題ないことを話した後のこと。とある生徒が質問のために手を上げた。立ち上がってポロポロと涙をこぼしていた。体格は少し小さめ、聞けば生まれつき少し身体が弱くて病気をしがちだとその子は言った。放射線がもし身体に影響を与えるなら、身体が弱い自分自身(その

質問をした生徒)から調子を崩すはずだと思う。最初に体調を崩してしまうだろう僕はどうしたら良いのか。怖い。といった内容の質問だった。その生徒自身、放射線によって影響が出るのは身体の弱い自分からだと思い込み、事故当初から怖くてたまらなかつたようだった。放射線の理解云々よりも、自身のもともとの健康問題を含めてしっかり話をする場が十分では無かつたのだろう。

放射線の「正しい」知識があれば、より良い判断ができる。これは全体としては正しい。けれども、大人も子どもも個々人の不安やバックグラウンドをよくよく聞かなければ、結果としてその個人が前に進んでいくための知識を伝えて身につけてもらうことは難しい。知識が欠如しているから不安なのだ。という考え方は全員には決して当てはまらないということを思い知らされた一件だった。

二つ目はとある高校の視聴覚室で生徒がずらっと並んでいる前で話をしたときのこと。最前列の女生徒が教室に入ってからずっと私のことを睨んでいる。しかも私がしゃべり始める前からである。体育会系の雰囲気だったので、そういう雰囲気の生徒なのかなと思ったが、何か明らかに怒っている(or言いたそうな)感じだったので、どうしたの?と聞いてみた。すると、「私らもう放射線のことなんて怖くなんかねーんだよ!」と吐き捨てるように言われた。私みたいなのが授業に来るから、未だに放射線が問題だと思われる(から迷惑だ)。という内容である。

これまで、今回の事故による放射線被ばくの人体への影響は不幸中の幸いながら問題ない。と話してきたことに対して、嘘つけ!とか、信用できないとか、御用学者とか言われたことはあつただけけれど、その逆の反応だった。散々問題を引き起こし、やっと落ち着いてきたかに見える放射線のことを今更ぶり返す必要も無いし、そうして欲しくもない。思えば当然の感情なのだが、かといって放射線の基礎的な知識がその子にあるかと言えば、残念ながらそうでもなかつた。学校の先生でも、寝

た子を起こしてしまう。放射線のことは触れたくない、触れてくれるな。といった感情を示される方もいる。

興味が薄れてきていることに加え、放射線を学ぶこと自体を苦々しく思っている地元の方だって当然いる。その一方で十分に知識を得ているとも言いがたい。どうして学ぶ必要があるのか、何のために放射線のことを学んでいるのか。が伝える側にもしっかり無ければいけない。けれどもニーズがこちらからの押しつけになってしまっただけだと思いたいと思われたい一件だった。

三つ目は学校の先生と放射線の授業の組み立てのための相談をしているときのこと。とある先生から、内部被ばくが低い(ほとんど無い)。ということを生徒に教える必要は無い。と言われたときのことだ。

内部被ばくが低い(ほとんど無い)、福島県内の食品汚染は十分にコントロールされている。ということが信じられない。ということでは無い。ここに生活している生徒たちにとって、内部被ばくが低い。という情報を伝えても、今後のこの場所での生活には役に立たない。というのだ。別にここの内部被ばくが低いかどうかという情報は、多くの生徒たちが今後ここに住むかどうかの選択に影響を及ぼすことは無い。そうなのであれば、交通安全教育のように、今後何かリスクのある可能性がどの場所にあるかを伝えるべきである。内部被ばくが低いなんてことは伝えず、例えば食べ物の種類として、野生のキノコや山菜、イノシシの肉といったものの方が比較として汚染される傾向がある。ということをお教えしたいというものだった。

先生の授業のニーズに合わせる必要があるとはいえ、これも放射線のことを伝える上で何を目的としているかが異なるために起こっていることだと感じた。単に放射線といえば、物理の問題かもしれないが、被ばくする、環境を汚染することでそれは健康の問題となり、生活の問題、社会の問題となる。もう少し大きな話をすればエネルギーの話でもあり、日本という国が資源の少ない中でどうやって発展しようとしたかの歴史の話でもある。自分が医師であるために、知らず知らずのうちに健康や病気といった言葉に焦点を当てて伝えることが大切だと思ってしまうことに気づかされた一件だった。

三つのエピソードを紹介してきた。私自身は放射線教育の目指す最重要課題は何か。と問われたら、子どもが被ばくや汚染によって何かしらの尊厳を奪われたり、可能性を狭められたりすることがあってはならない。そのようなことにならないための知識を持つきっかけとなること。と思っている。今回の事故に伴う線量は低く、健康影響は考えられるレベルに無いこと、広島長崎でも被ばくによる遺伝的影響は見つかっていないこと。もともと放射線は環境中にも存在し、被ばくがゼロの状況というものが有り得ないこと。などが数あるトピックの中で

優先順位が高くなる。今回の原発事故の子どもへの影響で最も大きい部分が、子どもの自尊心や将来への可能性が放射線の問題を契機として傷つけられることにあると考えるからである。

ただ、言うは易しで前に進んで行くにはまだまだ多くのハードルがあると感じる。そもそも放射線教育という科目は無い。理科なのか生活なのか、それとも総合学習なのかは学校によって異なる。7年たったとはいえ、学校の先生にとって新しく出てきた追加の負担である。線量は低い。それは科学的には事実かも知れないが、実際に家に帰れない、住む場所や社会を完全に壊されてしまった人たちがいる。そのような状況で「大丈夫」である。と子どもに伝えることをためらう方もいる。昨今の教育現場での勤務のブラック化や、他の業務に忙殺されてしまっている先生も多いだろう。失礼な言い方をすることもかもしれないが、その方向の上では放射線の細かい定義の正確性や原子力の物理学としての面白さは、正直なところあまり大事だと感じていない。放射線の勉強を通じて、原子力や宇宙などのことにも興味を持って欲しい、という気持ちは分かるのだが、そんなことを地域の子どもたちが求めているようにも思えない。

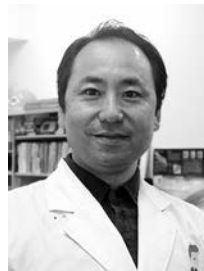
先日、福島県内のとある小学校で放射線の授業をしたときのこと。全校生徒も数十名なことに加え、毎年お声がけいただいているおかげで、生徒達とほとんどが顔なじみだ。何人かはいつも使うギャグも覚えていて、それにうまく乗ってボケさせしてくれる。おかげで授業もスムーズに進められ、少しずつ知識が定着してくれることを肌で感じ、その先の内容にも一歩踏み込んだ話をすることができた。その一方で、小学校1年生は震災当時生まれていない。震災とか避難とか、原発という言葉を使っても全くピンとこない。どうして自分たちが放射線のことを学ぶ必要があるのか、どうして放射線という言葉がこの授業で唐突に出てきたのか分からない。という反応だった。10年後や20年後の小中学校の授業はどんな感じになっているのだろうか。

こんな状況だからこそ、授業で何を伝えるか、基礎や標準的な内容がどうあるべきか何度も議論されるべきだろうと思っている。福島県内だけではなく、広く多くの子どもたちに伝える機会があればと思っている。その意味で福島県内の教育実践事例が少しずつ積み上がってきているのは本当に心強い。何かと厄介者扱いされることもある放射線だけれども、生徒のみんなが元気いっぱい、放射線を伝える側が元気をもらおう。明日も頑張らないと、という気持ちにさせられる。放射線に関係する多くの方が子どもたちへの教育について興味を持ち続けて欲しい。そんなことを思いながら今日も淡々と相談と授業を続けている。

(2018年5月7日記)



BER2018「大阪春の陣」高校生たちに未来をみた



角山 雄一 (つのやま・ゆういち)

京都大学環境安全保健機構放射性同位元素総合センター

東北大学理学部卒，京都大学大学院人間・環境学研究科修了，博士(人間・環境学)， α 線一細胞照射影響ライブイメージングや低線量放射線被ばく影響の研究，小中高における放射線学習教材の開発などに従事。

ことの発端は2016年12月11日に遡る。東京工業大学蔵前会館において白熱教室2016 in 東工大「甲状腺検査って、なんだあ？」が開催された。筆者は会場で福島県浜通りと横浜の高校生たちが真剣に討論する姿を目にした。

こと放射線に関する社会的諸課題については、科学、社会、経済、政治などが複雑に絡みあっている。つまり、その課題解決のためには多角的な視点やさまざまな知識が必要となる。だから、高校生が甲状腺検査のような難しいテーマをまともに議論することは難しいのではないかと、この取り組みを観覧するまでは少々否定的な見方をしてきた。ところが、白熱教室で自発的に議論を深めていく高校生たちの姿を見て考えが一変した。そこには高校生たちが互いのことを積極的に理解しあおうとする真摯な姿勢や、周囲の大人たちに左右されずに自らの視点でしっかりと意見を伝えようとする姿があった。とにかく彼ら彼女らの高いポテンシャルに胸をうたれた。この教室が実現した背景には、企画立案者の澤田哲生博士(東京工業大学)の豊富な人脈と経験の存在が大変大きい。この教室の成功に大いに刺激を受け、なんとか関西でもこのような場を持ってないかとの思いに至った。

2018年3月19日から21日までの三日間、大阪大学中之島センターにおいて国際ワークショップ International Workshop on the Biological Effects of Radiation - bridging the gap between radiobiology and medical use of ionizing radiation - (BER2018)が開催されることになった。国内外の研究者や医師などが大阪に参集し、放射線の生物影響や医療利用に関する様々な研究成果について発表や議論を行う。また、国内外の生物影響に関連する組織(MELODI, IDEA, PLANET, JSPSなど)のキーパーソンより、各組織における近年の動向についてのレクチャーも行われる。筆者はBER2018の実行委員のひとりとなったのだが、この機会に白熱教室よろしく福島と他の地域の高校生たちが交流する場を持ってないかと考えた。この思いつきを実行委員幹部の坂東昌子博士

(NPO法人知的人材ネットワークあいんしゅたいん代表)や米倉義晴博士(元放射線医学総合研究所理事長)、和田隆宏博士(関西大学)、長我部信行博士(日立製作所)、中野貴志博士(大阪大学核物理研究センター長)に提案したところ、快諾を得た。そしてこの際、科学者たちの議論の場を見学するなど、生徒たちが大学の先に行く世界を知ることができるような企画にしようということになった。これでBER2018会期中二日目と三日目に、高校生スペシャルセッション(HSS)を併設する運びとなった。

まずは2016年から実施している「中高生たちの手による環境放射線マッピングプロジェクト：TEAMユリカモメ」(科学技術振興機構科学技術コミュニケーション推進事業問題解決型科学技術コミュニケーション支援「ネットワーク形成型」平成28年度採択事業、<https://sites.google.com/view/yurikamome>)の協力校に声をかけた。早々にいくつかの学校から参加表明があった。これにNPOあいんしゅたいんの親子理科実験教室に参加経験のある小中学生たちや、先述の澤田博士が現在学習支援などを手がけている東京学芸大学附属国際中等教育学校の生徒たちが加わった。正直相当不安を抱えたまま募集を開始したのだが、フタを開けてみれば33名の小中高生(福島県立福島高等学校4名、福島県立安達高等学校3名、東京学芸大学附属国際中等教育学校8名、京都女子高等学校7名、京都光華高等学校2名、兵庫県立北須磨高等学校3名、洛南高等学校1名、NPO法人知的人材ネットワークあいんしゅたいんの親子理科実験教室受講生5名)が、引率教諭や保護者もあわせると総勢47名が参加することとなった。これは事前の予想をはるかに上回る人数である。とにかくこれで、東北(福島)－関東(東京)－関西(京都、兵庫)という広域的な高校生交流イベントの素地ができあがった。

HSS初日の午後、各校の生徒たちには、会場に到着するやいなやBER2018が開催されているメインホール後部の見学席に座ってもらった。生徒たちは、専門用語だらけの英語での発表や議論であったにもかかわらず、な

んとか聴き取ろうと懸命に耳を傾けていた。次いで午後6時からポスター発表の時間となり、科学者たちにまじって高校生たちも発表を行った。計10件(福島2件、安達3件、東京学芸大附1件、洛南1件、京女1件、北須磨1件、TEAMユリカモメ1件)の発表があり、史跡の岩石の放射線測定や福島県での放射線測定、除染や風評被害に関する調査など、その内容は多岐にわたっていた。もともと放射線に関心が高い生徒の集まりだったとはいえ、自主的な勉強や研究を続けてきたことが十分にうかがえる出来栄のものばかりである。不慣れた英語での発表にもかかわらず、堂々とポスターの前に立って外国の研究者に対しても果敢にプレゼンを行う姿に、ただただ感服した。この発表に際し、各校教諭たちは丁寧に時間をかけて事前学習やポスター作成指導などを行なったという。熱意溢れる教諭たちの日頃の取り組みの成果が目に見える形となって現れていた。発表時間が終わろうとする頃、気づけば会場スペースの半分近くが高校生たちの発表を見聴きする者たちで溢れていた。BER2018参加者の多くが高校生たちとの議論を楽しんでいるようであった。なかでも実行委員会チェアのひとりでもある Wolfgang Weiss 博士(元 UNSCER 議長)が、率先して高校生に質問を投げかけている姿が目についた。博士は各校教諭を掴まえて、その労をねぎらわれていた。HSS 終了後に実施した参加生徒たちへのアンケートでは、この発表がとても貴重な経験となったという声が多く寄せられている。またある教諭からは、ある生徒が発表を終えてから人前で堂々と意見を言えるようになり大変驚いた、という報告もあった。今回の取り組みが、生徒たちの学習意欲の向上や成長につながるのであれば、企画者のひとりとして大変よろこばしいことである。

HSS 二日目の午前中、「大阪春の陣」と称して生徒たちの手によるディベートが実施された。当初各校には、放射線のことについて少しでも話し合えるといいね、としか伝えておらず、議論のテーマやその方法などについてはまったく知らせていなかった。実はこれには企画者側の願いと予測があった。せっかくの機会なのだから、生徒たち自身にとって心底興味がわくテーマについて議論をして欲しいという願いと、そういうテーマであればきっと自分たちの問題として捉えて自発的に議論が始まるはずだという予測である。当日の司会進行は筆者が務めたが、議論が散漫とならないよう論点の整理のみに専念し、当方の理屈でリードすることが無いよう十分に気をつけた。また、生徒たちが大人のせいやマスコミのせいにしそうになった場合は、自分たちの問題として捉えなおすようコメントすることにした。さらに引率教諭や保護者、本会議を抜け出し臨席された専門家には、最後までぜったいに口を挟まないよう厳重に依頼した。とに

かく生徒たちには、自分たちの力で解決し得る問題について話し合っているのだ、という意識を強く持ってこのディベートに臨んで欲しかった。

しかしよいよとなると、やはり初顔合わせの面々である。少々緊張気味のぎこちない姿ばかりが目についた。互いに様子を探りあう雰囲気の中で、突如あいんしゅたいん親子理科実験教室の小学生が「自己紹介をしたい。」と口火を切った。ならば、ということでマイクを回しながらひとりひとりが名前と好きな食べ物を披露することに。これで場が一気にほぐれた。次いで、福島高校の生徒のひとりがどうしても皆に質問したいことがあるというので、ひとまずこの生徒にリードを託すことにした。「放射線について学ぶ前、放射線の何が怖かったか?」「震災の記憶を風化させないためにはどうしたらいいか?」などである。なにしろ他の地域の生徒たちの多くにとっては、生の福島の声を聞くはじめての機会でもある。皆真剣な面持ちでこの福島校生の話を聴いていたが、この生徒の発言が終わるや否や他校の生徒たちからも次々と声があがった。そしてどうやら「風化させないためにはどうしたらいいか?」が今回のテーマとしてふさわしいということが見えてきた。残念ながら福島高校の一行は都合により途中で退席することになったが、福島県の立場や意見は安達高校の生徒たちが引き継いだ。振り返れば今回のディベートの中で生徒たちから挙がった意見や鋭い指摘の数々は大人顔負けのものばかりであった。我国の未来を担う若者たちのポテンシャルの高さをあらためて認識させられた。なお、このディベートにおける生徒たちの具体的な発言内容については、日本原子力産業協会が記事にしているのでそちらを参照のこと(<http://people.jaif.or.jp/fukushima/929/>)。

ディベート終了後は、昼食を挟んで戸崎充男博士(京都大学放射線同位元素総合センター)が開発した「ドーム型霧箱」(<https://youtu.be/qM0-wc--PC0>)の工作実習や、福島のお菓子などを前にしたお茶会などが行われ、生徒たちはさらに互いの交流を深めていった。LINEのIDを交換しあうなど、今の世代らしい光景も目にした。

夕方になってセッション終了時刻を迎えると、名残を惜しみつつ皆帰途に着いた。生徒たちは互いの再会を約束することも忘れていなかった。実は、HSS 二日目に各校教諭たちと話しあい、今後もこの取り組みを可能な限り継続しようということになっていた。これを生徒たちに伝えていた。

今年7月末、京都女子高等学校に於いて二回目の高校生スペシャルセッション「おこしやす。京の夏(仮称)」を開催する。今回の経験を踏まえて、さらに熱い議論が生徒たちの視点で展開されることを期待したい。

(2018年5月25日記)



政府、第5次エネルギー基本計画を了承

政府は7月3日の閣議で、第5次エネルギー基本計画を了承した。2030年における電源構成では再生可能エネルギーを22~24%、原子力を20~22%にするという従来目標を踏襲。2050年までに温室効果ガスを80%削減する政府の長期目標の実現のためには再エネの主力電源化を進めるとともに、再エネとの共存可能性をめざし

た小型原子炉の開発についても言及した。原子力政策については福島復興・再生に向けた取組や原子力利用における安全性向上、原子力事業者の事業環境の安定化、使用済燃料問題の解決に向けた取組の抜本的強化、国民との信頼関係の構築などを求めている。

(原子力学会誌編集委員会)

原子力エネ協議会の初代理事長に門上氏が就任

原子力産業界全体で知見・リソースを活用し安全性向上を目指す新組織「原子力エネルギー協議会」(Atomic Energy Association 略称: ATENA)が7月1日に設立される。電気事業連合会と日本電機工業会が中心となって4月より設立準備を進めてきたもので、電力会社や大手メーカーなど、19の法人・団体が会員となってスタートする。

電事連の勝野哲会長(中部電力社長)は6月15日の月例会見の場で、ATENAの理事長に就任する三菱重工業特別顧問の門上英氏を紹介した。門上氏は、ATENAの役割として、(1)原子力産業界全体で共通課題に取り組む効果的な安全対策の導入を促す、(2)安全性向上という共通の目的のもと規制当局などと対話する、(3)ス

テークホルダーとコミュニケーションを行う——をあげ、「原子力の安全性をさらに高い水準に引き上げる」ため、リーダーシップを発揮していくとした。

ATENAには、会員の役員クラスが参加する「ステアリング会議」を置き、安全性向上に向け原子力産業界全体として取り組むべきテーマをここで特定する。テーマについては、専門家によるワーキンググループで技術的検討を行った上で、「ステアリング会議」を経て、「技術レポート」として取りまとめ公開し、これらの原子力事業者への導入状況が、毎年評価・公開されるといった仕組みだ。

(資料提供: 日本原子力産業協会、以下同じ)

2017年度エネルギー白書を閣議決定

政府は6月8日に、エネルギー需給について講じられた施策の概況に関する年次報告となる2017年度エネルギー白書を閣議決定した。今回の白書では第1部で福島復興の進捗について述べているほか、「明治維新後のエネルギーを巡るわが国の歴史」を振り返るとともに、2050年に向けたエネルギー情勢の変化と課題についても紹介した。

「明治維新後のエネルギーを巡るわが国の歴史」では明治維新から1900年頃、1900年以降、戦後~高度経済成長期、1970~80年代、1990年以降、東日本大震災前後と時代を4分割。各時期におけるエネルギー源の首位は石炭(1920年)、水力(1946年)、石油(1973年)、原子力(1998年)、天然ガス(2014年)と推移してきたことを紹介した。

原子力利用は1954年の初の原子力予算計上で幕を明け、1955年の原子力基本法制定、1956年の原子力委員会発足、1966年の初の商業用原子力発電の営業運転開始などと振り返っている。高度経済成長期の最中、1970年の軽水炉2基の運転開始(敦賀1号機、美浜1号機)により、「『原子力は発電に利用することのできるエネルギー』という認識が日本にも広まっていった」と述べている。

さらに白書では、エネルギー基本計画に基づく2030年のエネルギー・ミックス実現に向けた進捗状況や課題や、2050年を見据えた「エネルギー情勢懇談会」の議論を踏まえ、主要国の地球温暖化対策やエネルギー技術関連のデータなどを紹介している。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)**【米国】****上院が規制委の新委員 2 名を承認、3 年半ぶりに定員満了**

米国議会上院の J. バラッソ環境・公共事業委員会 (EPW) 委員長は 5 月 24 日、原子力規制委員会 (NRC) の新委員としてアニー・カプト氏とデビッド・ライト氏を上院が承認したと発表した。同時に、現行任期が 6 月で満了する J. バラン委員が再任されており、NRC では 3 年半ぶりに 5 名の委員ポストがすべて埋まったことになる。

トランプ大統領がこれら 2 名を委員候補として指名したのは昨年 5 月のことで、EPW はその後、両氏の指名承認公聴会などを開催して承認手続を進めていた。原子力法では、委員 5 名のうち同一政党の支持派は 3 名までの規定。2 名の新委員が共和党支持派であるため、共和党支持派は K. スピニッキ委員長も含めて 3 名になった。一方、バラン委員は民主党支持派、S. バーンズ委員は中立派となっている。

原子力エンジニアのカプト氏は、原子力関係の規制や政策策定、立法など議会と産業界で 20 年の経験を有しており、EPW ではバラッソ委員長や前任者の J. インホフ委員長の上級政策顧問として務めた。このためバラッソ委員長は、カプト氏が原子力物理を熟知している点を強調。原子力発電が課題に直面する一方で、連邦議会が適正な判断を下せば明るい未来も拓けることを同氏は認識していると述べた。バラッソ委員長はまた、カプト氏が NRC のことをよく理解しており、その改善方法についても把握していると指摘。米国民への対応や NRC の原子力規制において、同様に改善が行われることになると明言した。

ライト氏はサウスカロライナ (SC) 州の出身で、エネルギー関係の戦略的コンサルティング事業を専門とするライト・ディレクションズ社の社長。2004 年から 2013 年まで SC 州公益事業委員会 (PSC) の委員や委員長を務めたほか、2011 年から 2012 年までは、各州 PSC の利益を代表する「全米公益事業規制委員協会 (NARUC)」の理事長も務めていた。

エネ省、先進的原子炉設計開発に 2,400 万ドル提供

米エネルギー省 (DOE) は 6 月 4 日、民間セクターにおける先進的原子炉設計の開発を支援するため、10 件の技

術プロジェクトに対して最大 2,400 万ドルを支出すると発表した。

省内のエネルギー高等研究計画局 (ARPA - E) が昨年 10 月に起ち上げた新プログラム「モデリング改良型技術革新による原子力技術の先駆的再活性化 (MEITNER)」の一環として、一層低コストで安全な新型原子炉設計の実現が可能な革新的技術を特定し、開発することを目的としている。

DOE の R. ペリー長官によると、米国のエネルギー・ミックスにとって原子力は重要な一要素であり、DOE は民間セクターとの連携により、先進的な原子炉設計と技術の開発で米国が最先端の立場を維持できるよう努めていく考え。ARPA - E の次世代技術であれば、米国民 1 人 1 人に信頼性の高いベースロード電源を提供し続けるとともに、送電網のレジリエンス (一時的な機能停止から回復する力) も改善され、世界的に見ても競争力の高い、技術的優位性を保つ一助になるはずだと強調した。

ARPA - E は 2009 年に DOE 内に新設された部局で、開発リスクが高すぎて、DOE の他のプログラム部局や産業界では対応困難な革新的エネルギー技術の開発を専門に支援。基礎研究よりも応用研究を対象としており、リスクが高くても大きな成果が期待できる技術に対して最大 2,000 万ドル、最長 3 年間の資金助成を行っている。

DOE は総発電量の約 20% を供給している原子力について、国内エネルギー・ミックスの多様化を支える信頼性の高い電源だと評価している。しかし、既存の原子力発電所が近年、高額な運転・保守費に苦慮していることから、MEITNER の支援プロジェクトでは、そうしたコストの削減と競争力の強化に資する設計や新しい製造プロセス、技術を活用。安全性の改善を図りつつ、建設コストの削減や運転の自動化も可能な新型設計の開発を支援していくとした。

MEITNER のプロジェクト・チームは具体的に、それぞれの技術概念を発展させるのに必要なモデリングやシミュレーションのための資源を DOE で調達。DOE および DOE 傘下の国立研究所に所属する専門家のチームとも、定期的に連携することになる。

支援対象に選定した 10 プロジェクトのうち、DOE はバージニア州の HolosGen 社が開発中の「BOP (原子炉系統以外の部分) を除去した可搬型モジュール式原子炉」を例示した。負荷追従機能付きの輸送可能なガス冷却炉になる予定で、ガスの膨張エネルギーでタービンを回す「ブレイトン・サイクル・エンジン」に加えて、炉心に直接接続する機器を用いる方式。プラント建設工事の簡素化により、完成までのコストと時間の縮減を目指すとい

う内容で、DOE からは約 230 万ドルを提供する。

もう一つは、テネシー州のイエローストーン・エナジー社が開発している「新型原子炉用の反応制御装置」で、熔融塩炉その他の原子炉設計について、受動的安全性の強化とコストの削減を図る新しい制御技術となる。同技術では、制御棒に埋め込まれた物質が温度の上昇とともに気化。この蒸気が中性子を捕捉するため、外部から制御できない場合でも炉内の反応率を低下させることが出来るという。DOE はこの技術開発に対し、約 260 万ドルを支出する計画である。

WH 社の事故耐性燃料開発にスペインのウラン公社が協力

米エネルギー省(DOE)のプログラムの下でウェスチングハウス(WH)社が実施している事故耐性燃料(ATF)開発に、スペインのウラン公社(ENUSA)が協働で取り組むことになった。

両者が 5 月 25 日付けで発表したもので、今後進めていく様々な共同開発プログラム(JDP)を管理する枠組として「協力枠組協定(FCA)」を締結。FCA を通じて技術面や商業面における両者間のこれまでの連携を強化する考えで、最初の JDP では ATF の挙動モデル開発などを実施する。このため、2019 年にも米イリノイ州のバイロン原子力発電所(120 万 kW 級 PWR × 2 基)で、WH 社製の革新的 ATF である「EnCore」の実証用燃料棒装荷を目指すとしている。

福島第一原子力発電所事故後、米国では軽水炉燃料の事故耐性強化が注目の的となり、議会はこの目的に資する DOE の燃料・被覆材開発プログラムに、2012 会計年度から予算措置を講じた。10 年計画で始まった同プログラムでは、産官学の連携により 2022 年までに商業炉への先行燃料集合体装荷を実現する方針で、産業界からは GE 社、WH 社、および仏フラマトム社の 3 グループが協力している。

第 1 段階のフィージビリティ・スタディでは、先進的な燃料と被覆材の概念について、経済性や安全性、環境に対する影響等の分析評価、実験室規模の試験を含めて絞り込みを実施。2016 年 10 月からは第 2 段階に移行し、許認可の取得が可能な ATF の製造と大規模照射試験など、開発・認定関係の活動が始まった。2022 年以降の第 3 段階では ATF の商業化が計画されており、既存炉や将来の原子炉システムに対して ATF の装荷が商業的に行われることになる。

WH 社が開発中の ATF は、炭化ケイ素材料(SiC)製の被覆管、シリサイド(U₃Si₂)燃料ペレット——などの概念に基づいており、1F が経験した一時的な冷却材喪

失に対する耐性の大幅強化を狙っている。ENUSA と同社が実施する JDP では、燃料製造分野等における ENUSA の広範な実績や技術能力が活用される予定。ENUSA はまた、先進的 PWR 燃料等の開発・供給を目的に WH 社と結成していた「欧州燃料グループ(EFG)」の対象市場(スペインを含む西欧)で、「EnCore」の実証プログラムに参加する原子力発電事業者の合意を取り付ける計画だ。

なお、同じ DOE プログラムの下で、GE 社と日立の合弁企業であるグローバル・ニュークリア・フュエル(GNF)社は、主に BWR 用の ATF を開発している。今年 3 月には米ジョージア州の E. I. ハッチ原子力発電所 1 号機(90 万 kW 級 BWR)に試験集合体を装荷したほか、2019 年にはクリントン原子力発電所(100 万 kW 級 BWR)にも装荷予定だと発表。原子力のさらなる安全性と信頼性の向上に向け、様々な試験を実施している。

【カナダ】

廃棄物管理機関、地層処分計画を進める各国との連携強化

カナダで使用済燃料の地層処分計画を推進中の核燃料廃棄物管理機関(NWMO)は 5 月 14 日、同様に地層処分方針を取っている、または採用予定と見られている 5 か国の担当機関と新たに協力協定を締結、あるいは既存の協定を更新したと発表した。

NWMO は深地層処分場建設サイトとして最も好ましい 1 地点を 2023 年までに特定することを目指しており、受け入れに関心を表明した 22 の候補地点を 5 地点まで絞り込んだところ。連携強化を決めた国外カウンターパートのうち、フランスの放射性廃棄物管理機関(ANDRA)、英国の放射性廃棄物管理会社(RWM)、スウェーデンの核燃料・廃棄物管理会社(SKB)、スイスの放射性廃棄物管理協同組合(NAGRA)は、それぞれの地層処分場サイト選定プロセスを様々な段階に進展させている。

また、ベルギーでは放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関(ONDRAF/NIRAS)が、放射性廃棄物の長期管理方法として地層処分を政府に推奨中であり、NWMO はこれらの機関と知見や経験の交換を促進する最適なタイミングだと指摘。使用済燃料の安全かつ長期的な管理で、国際的に最良の慣行を適用していきたいと述べた。フィンランド、日本、および韓国のカウンターパートとはすでに、同様の協定を締結済みである。

使用済燃料を適切に最終処分する方法は、原子力発電を利用する各国が長年にわたって研究開発を続けた結

果、地下 500m ほどの深地層で処分することが最も有効かつ現実的であるとの認識で一致。処分場建設計画が最も進んでいるフィンランドでは、2015 年 11 月に同国政府が世界で初めて、実施主体のポシバ社に対しユーロヨキ地方のオルキオトで処分場を建設する許可を発給した。処分概念は、隣国スウェーデンの担当機関である SKB が開発した「KBS-3 方式」を採用。廃棄物を封入した 2 重構造のキャニスターを地下施設内に定置した上で、周囲をベントナイト粘土で充填することになる。

SKB がスウェーデン国内で建設する深地層処分場は、エストハンマルにあるフォルスマルク原子力発電所の近接エリアが 2009 年にサイトとして決定した。現在、同社が 2011 年に提出した立地・建設許可申請書をスウェーデン放射線安全庁(SSM)が原子力法、国土環境裁判所が環境法に照らして審査中となっている。

フランスでは ANDRA が、ムーズ県とオートマルヌ県にまたがるビュール地区も含めた 30 平方 km の圏内で、深地層処分場「CIGEO」を建設することが 2010 年に決定。2020 年代後半に操業試験を実施できるよう、ANDRA は 2019 年に設置許可(DAC)を申請する計画である。

スイスにおける全 3 段階のサイト選定プロセスは第 2 段階の終盤を迎えており、NAGRA は候補エリアをジュラ東部とチューリッヒ北東部、および北部レゲレンの 3 つに限定した。これらにおける 3 次元地震探査はすでに実施済みで、これに続くボーリング調査の実施許可を年末までに全エリアで取得、2019 年に掘削を開始する見通しである。

英国では 2008 年と 2009 年にカンブリア州で 2 つの自治体が深地層処分施設(GDF)の受け入れに関心を表明したが、州政府の反対により選定プロセスは白紙に戻った。現在の選定プロセスは政府が「2014 年白書」の中で公表したもので、受け入れ意思を持つ自治体との協働ベース・アプローチが盛り込まれた。この関連で、担当官庁のビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)はウェールズ政府とともに今年 1 月、GDF の建設に関する地域との協働プロセス案を公開協議に付している。

【英国】

政府、日立とウィルヴァ計画の最終投資判断で協議を継続

英ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)の G. クラーク大臣は 6 月 4 日、日立製作所がホライズン・ニュークリア・パワー社を通じて英国で計画しているウィルヴァ・ニューウィッド原子力発電所建設プロジェクトについて、総事業費の出資分担など最終投資判断に

向けた同社との協議を継続する方針を議会で表明した。

英政府は日立および日本の政府関係機関などとともに、同プロジェクトへの直接投資を検討していく考えを明確に示した一方、資金調達は民間部門で行うべきだとの基本姿勢を改めて強調。協議が成功裏にまとまるには、英政府全体としての承認や規制当局その他の承認が、費用対効果や国家補助要件などの点で必要になるほか、プロジェクトを進めるかについても未決定だとしたが、6 月 1 日付けでホライズン社が同プロジェクトの「開発同意命令(DCO)」を計画審査庁に申請した事実を明らかにしている。

ウェールズ地方のアングルシー島で、日立 GE ニュークリア・エナジー社製「英国版 ABWR」を 2 基(合計 290 万 kW)建設するという同プロジェクトでは、総事業費が 3 兆円規模に拡大したとの報道があり、議会説明の中でクラーク大臣は、先行するシンクリーポイント C (HPC)原子力発電所建設計画よりも低コストで電力供給を実現するため、日立と集中的に交渉していたことを認めた。未確認情報によると、英政府と日立は 2019 年の最終契約締結に向け、プロジェクトを推進することで 4 日に基本合意しており、総事業費の分担出資条件についても双方が具体案を提示している模様。しかし、日立はこの情報に関して、現段階では何もコメントできないとしている。

【ドイツ】

2011 年 8 月の早期閉鎖にともなう事業者への補償を承認

ドイツ内閣は 5 月 23 日、福島第一原子力発電所事故後の 2011 年 8 月に早期閉鎖させた原子炉 8 基の事業者に対し、相応の財政補償を行うための法案を承認したと発表した。

この法案は、カールスルーエの連邦憲法裁判所が 2016 年 12 月に下した裁定に沿って策定されたもの。2011 年の第 13 回改正原子力法に基づく脱原子力政策の一環として、これら 8 基では過去の法改正で保証されていた残余運転期間が抹消され、事業者がそのために実施した投資への補償がないことは「財産権の違法な侵害に当たる」と同裁判所は判断。その上で、2018 年 6 月末までに補償のための規則を新たに制定するよう連邦政府に命じていた。補償総額について連邦政府は、2022 年に国内すべての原子炉が閉鎖された後に市場価格等に基づいて計算・確定するため、現時点では明示できないと説明している。

ドイツでは 2001 年、原子力に反対する当時の政権が電力業界と脱原子力協定を締結し、既存の原子力発電所

はそれ以降の法定発電枠として総計約 2 兆 6,000 億 kWh の発電が許された。2009 年になると右派中道政権が発足し、原子力を再生可能エネルギーで代替可能になるまでの「橋渡し技術」とする考え方の下、年間 23 億ユーロの課税と引き替えに運転期間を平均 12 年間延長する法改正が 2010 年に行われた。しかし、翌年に福島第一原子力発電所事故が発生したため、A.メルケル首相は 1980 年以前に運転開始した古い原子炉 7 基と長期停止中だった 1 基を、安全審査のために直ちに 3 か月間暫定停止するよう地元州政府に指示。これら 8 基は再起動することなく 2011 年 8 月に早期閉鎖され、この時点で残っていた 9 基もすべて 2022 年までに段階的に閉鎖されることが決まっている。

今回承認された法案について環境大臣は、「2011 年に決定した脱原子力政策の継続的な促進を保証するものであり、2022 年末の脱原子力達成に向けて、現在残っている 7 基の最終閉鎖日程が改めて確認された」と強調。第 13 回改正原子力法が基本的に合憲であることは憲法裁判所も認めており、後は憲法上それほど重要でない部分の課題を解決するだけだと述べた。

同法案で承認された補償項目は 2 つあり、1 つ目はドイツの RWE 社とスウェーデンのバッテンフォール社がそれぞれ出資していた原子炉の残余発電枠に対するもの。2 社はこの発電枠を 2022 年までに他の事業者売却するか、その分の補償を連邦政府に求めることが可能だとした。もう一方は、これら 2 社に E.ON 社と EnBW 社を加えた合計 4 社が、2010 年 10 月から 2011 年 3 月までの間に行った投資に対するもので、事業者は適切な額の補償を請求できるとしている。

【中国】 39 基目の商業炉となる陽江 5 号機が初併入

中国広核集团有限公司(CGN)は 5 月 24 日、広東省の陽江原子力発電所で建設中の 5 号機(108 万 kW の PWR)を、23 日の夜 9 時半頃に初めて送電網に接続したと発表した。同炉は中国にとって今年初の送電開始炉となったが、江蘇省では昨年末に田湾 3 号機(106 万 kW のロシア型 PWR)が一足先に送電を開始しているため、陽江 5 号機はこれに次いで、中国で 39 基目の商業炉になる見通し。同炉の各パラメーターは現在、正常かつ安定した状態にあり、商業運転の開始に先立ち最終的な出力試験段階に入ったとしている。

陽江発電所ではすでに、フランスの技術に基づいて CGN が開発した「CPR1000」が 1~4 号機(各 108 万 kW の PWR)として稼働中である。2013 年 9 月と 12 月に本

格着工した 5 号機と 6 号機では、第 3 世代の技術特性を有するという「ACPR1000」が採用されており、計測制御(I & C)系も、CGN の子会社が独自に開発したという初の国産デジタル式 I & C 系(DCS)を初めて装備。発電所全体の中樞神経として機能する同技術をマスターした国としては、米国、仏国、日本に次いで中国が 4 か国目になったと CGN は強調している。

ロシアと 4 基分の新增設計画で枠組契約

中国核工業集团公司(CNNC)とロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は 6 月 8 日、中国の既存サイトと新規サイトで 2 基ずつ、合計 4 基のロシア型 PWR(VVER)を新たに建設するための枠組契約など、原子力平和利用分野における両国間の協力では過去最大級の大型契約を 4 件、締結したと発表した。

まず、VVER がすでに 3 基稼働中、1 基が建設中の田湾原子力発電所で、第 3 世代+(プラス)の最新 120 万 kW 級 VVER を採用した 7、8 号機を建設するほか、遼寧省沿岸に位置する徐大堡でも同型設計の 1、2 号機を建設する。また、中国の独自開発による高速実証炉として昨年 12 月に福建省の霞浦で着工した「CFR600」プロジェクトに、ロシア側から機器や燃料、関連サービスなどを供給。さらに、中国が月面探査用に必要としている機器の電源として、放射性同位体熱電気転換器(RITEG)をロシアが提供するという。

これらの枠組契約の総額は 200 億元(約 3,434 億円)ほどだが、プロジェクト全体のコストは総計 1,000 億元(約 1 兆 7,171 億円)を超えると CNNC は強調している。

中国で営業運転中の商業炉 38 基は、今のところ仏国の PWR 技術をベースに中国の原子力企業が国産化を進めた第 2 世代および第 2 世代・改良型の PWR が主流。しかし、中国企業は 1990 年代末から 2010 年代にかけて、将来的な国産化の可能性を模索するため、様々な外国メーカーの設計で建設プロジェクトを開始した。田湾発電所の VVER に加えて、カナダ型加圧重水炉「CANDU」が浙江省・秦山発電所で 2 基、稼働しているほか、米ウェスチングハウス(WH)社製「AP1000」が浙江省・三門と山東省・海陽の両発電所で合計 4 基建設中、および広東省・台山では仏フラマトム社製の「欧州加圧水型炉(EPR)」が建設中である。

北京で行われた契約書の署名式には、ロシアの V.プーチン大統領と中国の習近平国家主席が同席した。ロスアトム社の A.リハチョフ総裁は、「ロシアと中国は今や、世界の原子力産業界におけるリーダー的存在であり、今回の契約調印により両国間の戦略的連携関係が改

めて確認された」と評価。中国側のパートナーである国家原子能機構(CAEA)、国家能源局(NEA)、およびCNNCとの長年の協力を通じて、かつて無いほど高いレベルの信頼関係が中口で築き上げられたと強調した。

同総裁によると、江蘇省の田湾発電所では中口両国の専門家が共同で原子炉を設計・建設する枠組が構築されている。実際、1~4号機までは100万kW級のVVER設計(AES-91シリーズ)が採用された一方、建設中の5、6号機では、CNNCが国産化技術で開発した第3世代のPWR設計「ACP1000」を採用。IV期工事となる7、8号機をロシアの技術で建設する方針は、2016年11月に両国政府が原子力平和利用分野の協力拡大で合意した際、確認されていた。

新規立地点となる徐大堡では当初、100万kW級PWRを6基建設することが計画されており、2006年にCNNCは遼寧省政府と協力取り決めを締結した。2009年に子会社として遼寧核電有限公司を設立した後、2011年1月に国家発展改革委員会がI期工事の1、2号機について事前作業の実施を許可。基礎掘削の前段階で起工式が開催されたものの、同年3月の福島第一原子力発電所事故の影響を受けて、政府は同計画を一時凍結していた。

2014年4月になると国家核安全局(NNSA)は同計画についてサイト承認を発給。2016年10月に2基分の土木契約が結ばれた時点では、採用設計は100万kW級のWH社製「AP1000」になる予定だったが、今回の契約により、同計画は採用設計、出力ともに刷新されたことになる。

高速炉関係では、中国は2011年7月に北京南部の原子能科学研究院(CIAE)で、電気出力2.5万kW(グロス)の高速実験炉「CEFR」の送電開始に成功。これに続く実証炉計画として、ロシアから出力80万kWの「BN-800」を2基導入する計画と自主開発による建設計画を並行して進めていたが、現在は自主技術である出力60万kWの「CFR600」開発に重点が置かれている。

【国際】

仏口が原子力平和利用分野で戦略的連携を強化

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は5月25日、仏国の原子力・代替エネルギー庁(CEA)と、原子力平和利用分野における仏口間の連携を強化する戦略的合意文書に署名したと発表した。

原子力機器の設計・供給も含めて、第三国における産業プロジェクトの共同実施を両者が目指すという内容で、「ロシア版ダボス会議」と呼ばれるサンクトペテルブルク国際経済フォーラム(SPIEF)が開催されたのに合わせて結ばれた。これにともない、両国の原子力関係企業同士も複数の協力覚書や長期契約を締結しており、仏口双方が第三国で実施する原子力発電所建設プロジェクトに、双方が積極的に関わっていく方針であることが明らかになった。

ロスアトム社とCEAの戦略的合意文書は、訪ロシアした仏国のE. マクロン大統領とロシアのV. プーチン大統領による立ち会いの下、24日にロスアトム社のA. リハチョフ総裁とCEAのF. ジャック長官が署名した。エネルギーの効率化と再生可能エネルギーの両分野で、両国間の協力で新たな推進力をもたらすことを目的としており、原子力発電開発に対する一般的アプローチと、パリ協定の目標を達成する際の役割を共有するという双方の意思を明確に表明している。

原子力に対する認識として両社はまず、再生可能エネルギーと同じく温室効果ガスの排出を抑えることができる高度で近代的な技術であり、信頼性や経済的な効果も高いエネルギー源だと指摘。その上で、技術面や商業面での協力を強化する具体的範囲として、エネルギーの効率化と代替エネルギー源、エネルギー貯蔵システムの開発、高速中性子炉開発、原子力発電所のエンジニアリングと機器の供給、原子燃料の供給、使用済燃料の再処理と回収物質の再利用——などを列挙した。

同じく24日に署名されたのは、ロスアトム社の傘下で計測制御(I & C)系供給と電気工事を一括で請負っているRASU社と、仏国の大手重電機器メーカーであるシュナイダー・エレクトリック社間の協力覚書。これにより両社は原子力発電所用と送電グリッド用の電気機器について、安全性と信頼性および競争力の改善を目指した両社間の協力を強化する。

甲状腺がん発症のメカニズム

1. 多段階発がん説

原子力安全推進協会 石田 健二, 岩井 敏, 仙波 毅
日本エヌ・ユー・エス 福地 命, 當麻 秀樹

これまで甲状腺がんに限らず、一般に発がんのメカニズムは、「多段階発がん説」に基づいて説明されてきた。すなわち、正常な体細胞(機能細胞)に変異が段階的に蓄積し、正常な体細胞が良性腫瘍となり、それががん化して次に悪性のがんに進展するというものである。しかし近年、「幹細胞ⁱ」の研究が進むにつれて、組織や臓器の細胞を生み出す組織幹細胞が、がんの主な発生母地であるといわれるようになってきた。本稿では、変異蓄積による「多段階発がん説」のモデルと、それでは説明できない子供に多く発生する血液がんの発症メカニズムのモデルについて解説する。

KEYWORDS: thyroid cancer, mechanism, hematopoietic stem cell, niche, multi-stage carcinogenesis model

I. はじめに

がんは、長年、「1個の正常な体細胞に、遺伝子変化が蓄積して形成される悪性度の高い均一な細胞の集団」とみなされてきた。いわゆる、古典的な「多段階発がん説」である。しかし1997年、血液がんの一種である白血病で「がん幹細胞」が発見され¹⁾、その後も乳がん、脳腫瘍、大腸がんなどで発見が続くと、「がんは、少数の「がん幹細胞」を含む不均一な細胞の集団である」と認識が徐々に変化してきた。近年、がん幹細胞は、その特徴の類似性から、組織幹細胞を発生母地細胞(がん幹細胞が発生した基になる細胞)とする考え方が有力視されている。図1に幹細胞の種類と役割を示す²⁾。組織幹細胞は、様々な組織の細胞に分化する能力を持つ「親」といえる細胞である。例えば、赤血球や白血球などの血液細胞が子供であれば、親となる組織幹細胞は「造血幹細胞」である。このように、幹細胞研究が進むにつれて、古典的な多段階発がん説は見直しがなされ、現在では、「がんの始まりは、1個の正常な体細胞だけではなくて、組織幹細胞(あるいは前駆細胞ⁱⁱを含む)」とするように、修正がなされてきた。多段階発がん説では、「正常な1個の細胞に生じる遺伝子変異の蓄積」を主要な発がん要因としている。しかし、近年、組織幹細胞をとりまく「微小環境」の変化が、遺伝子変異の蓄積と同じように発がん

を招く可能性が示唆され、「多段階発がん説だけで、全てのがんの発症を十分に説明できるのか?」と疑問を抱く研究者が増えてきた。

本稿では、「多段階発がん説」が定着するまでの歴史を今一度、振り返ると同時に、「微小環境」の変化が重要であるとする新しい発がんモデルのはじまり(端緒)として、「放射線照射マウスへの胸腺ⁱⁱⁱ移植に伴って誘導された「胸腺リンパ腫」の発症メカニズム」が提唱された経緯を紹介する。

II. 定着した多段階発がん説

1. がんの原因は細胞分化の異常

がん細胞は、組織幹細胞から組織・臓器の細胞(成熟細胞)へと分化していく過程のどこかで、細胞周期(分裂を終えた細胞が次に細胞分裂するまでの1周期)の制御がきかなくなったり、成熟した細胞になる前に分化を停止したり、あるいはアポトーシス^{iv}の機能がうまく作動しなくなったりすることによって「無限の増殖能力」を獲得した悪性度の強い細胞である。したがって、がんはこれまで、「細胞分化の異常によって起こる病気」と考えられていた。

Cancerization mechanism of thyroid tissue: Kenji Ishida, Satoshi Iwai, Tsuyoshi Semba, Mikoto Fukuchi, Hideki Toma. (2018年5月7日 受理)

ⁱ 幹細胞とは、組織や臓器に成長する元となる細胞である。分裂して自分と同じ細胞を作る能力と、別の種類の細胞に分化する能力を持ち、際限なく増殖できる細胞と定義されている。そして、成体のさまざまな組織にある幹細胞を組織幹細胞(成体幹細胞)という。

ⁱⁱ 幹細胞から発生し体を構成する最終分化細胞へと分化する(生物の細胞が分裂増殖し、成長する間に互いに構造や機能が特殊化する現象)ことができる細胞。幹細胞は前駆細胞を経て最終分化細胞へと分化するため、前駆細胞を幹細胞と最終分化細胞の中間に位置する細胞と捉えることができる。分裂により、分化した細胞を作るが、自己複製はしない。

ⁱⁱⁱ 胸腺(きょうせん)とは、胸骨の裏側、心臓の上部の前方にあり、白血球を作り出す役割をする臓器

^{iv} 不要な細胞や有害な細胞を排除する自発的な細胞死

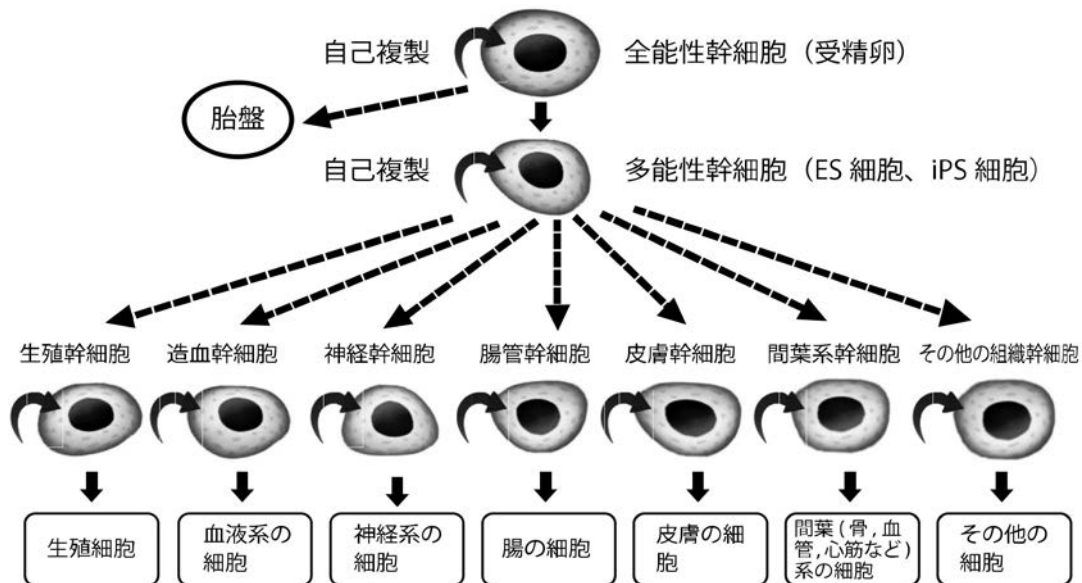


図1 幹細胞とは(出典：文献2(<https://www.skip.med.keio.ac.jp/knowledge/basic/01>)のp1の図を参考に著者作成)

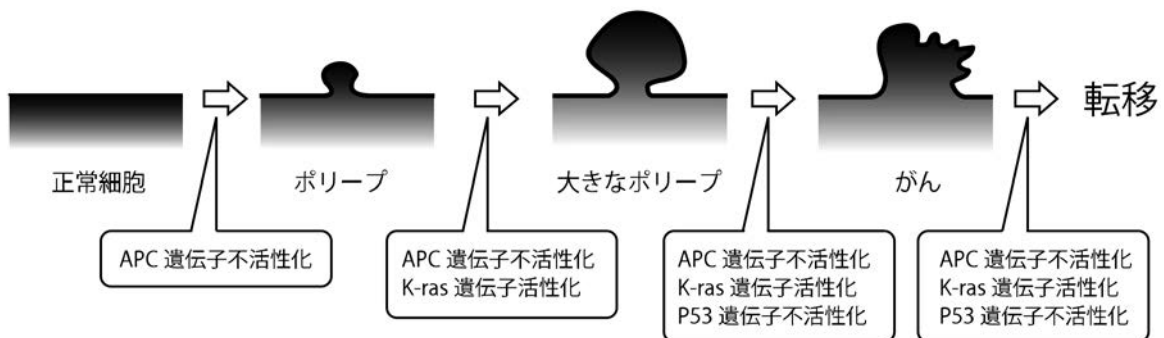


図2 Fearon&Volgelsteinによるヒト大腸がん多段階説

(出典：文献5(<http://yusukenakamura.hatenablog.com/entry/2015/10/22/052327>)の図を参考に著者作成)

APC 遺伝子：がん抑制遺伝子。この遺伝子に異変が生じると腸ポリープ、大腸がん、胃がん、膵臓がんなどの発生につながる可能性がある。

K-ras 遺伝子：がん原遺伝子。大腸がんの患者の多くに K-ras 遺伝子の変化が見られる。

P53 遺伝子：がん抑制遺伝子。多くの種類のがんで変化していることが知られている。

2. 多段階発がん説の誕生と定着

1940年代の実験動物を使った皮膚がんの研究から、がん細胞が発生する過程は、大きくイニシエーション(起 始)、プロモーション(促進)、プログレッション(進展)の 3つの段階に分けられると考えられるようになった。イニシエーションは、突然変異の誘発作用を持つ作用源(放射線もその一因)が、DNA^vに作用し、細胞のがん化に必要な最初の突然変異を起こす段階を意味する。イニシエーションされた細胞を含む組織は、細胞増殖を促進するような物質で刺激されると、突然変異を生じた1個の細胞が分裂・増殖し、細胞がん化の過程をさらに進める。この過程をプロモーションと呼ぶ。プロモーションを受けた細胞は、増殖を続けながら突然変異が蓄積してある段階に至ると、細胞分化ができなくなり、“無限の増

^v DNA は、糖(デオキシリボース)、リン酸、塩基からなる物質である。遺伝情報を保持していることから遺伝子の本体あるいは遺伝情報の本体と呼ばれている。

殖能”と“他臓器への転移能”を持った悪性の細胞(がん)へと変化する。この過程をプログレッションという。

ノルウェーの Nordling は 1953 年、欧米 4 か国の人口動態に関する疫学データに基づいて、「年齢(X)に対するがん死亡率(Y)の関係」を調査・分析し、「がん死亡率が年齢に依存して指数関数的に増大する現象」を見出した。そして、「1 個の細胞に生じた DNA の突然変異が、段階的に蓄積し、がんの発生率を高める」と考え、“多段階発がん説”を提唱した³⁾。

この理論的な取り組みに対し、Fearon と Vogelstein は実験的なアプローチとして 1990 年、家族性大腸がん^{vi}を発症した患者を調べ、「最初に、正常な大腸上皮に異常増殖する細胞の集団(腫瘍、ポリープ)が現れる。それら

^{vi} 遺伝子の異常を修復する働きを持つ遺伝子自体に異常が起こることによって発生する「遺伝性大腸がん(リンチ症候群)」と、大腸にたくさんの腺腫ができる「家族性大腸腺腫症」の 2 つが知られている。

の細胞の塊が大きくなるにつれて細胞集団中に突然変異や DNA のメチル化異常^{vii}が蓄積する。その後、近くの組織に侵入(浸潤)したり、一部が血管やリンパ管を通過して離れた臓器に転移したりする機能を備えた“悪性のがん細胞”に進展する」という“多段階発がん説”を発表した(図 2)⁴⁾。この実験的な検証により“多段階発がん説”が現在の「発がん機序のパラダイム」として定着した。

Ⅲ. がんのリスク評価にパラダイムシフトをもたらす幹細胞生物学

国際放射線防護委員会(ICRP)は 2015 年 12 月、放射線発がん研究の新しい展開を期待して、第 1 委員会に設置されたタスクグループ(TG75)が約 8 年(2009~2017 年)かけてとりまとめた「放射線発がんに関連する幹細胞生物学(ICRP Publ. 131)」を刊行した⁶⁾。TG75 の主査であった Niwa は、従前より、「疫学データにより、低線量放射線影響のリスク評価を行うことは難しく、がんの発症機序を明らかにしない限り推測の域を出ることはない」と認識していた。そして、「これまでの放射線防護体系や、その背景にあったものは、初期過程を研究する生物物理と、最終的に集団で発現する発がん頻度という、いわば“入口”と“出口”の研究だった。肝心の中身、すなわち、実際の発がんがどのようにして起こるのか、発がんの分子機構はいかなるものか、という大事な部分が足りなかった。実際に疫学は、現象論の最たるものであり、放射線発がんのメカニズムを考える上での示唆を与えはするが、メカニズムそのものを明らかにする研究ではない。今、最も欠けているのは発がん機構の理解である。これが明らかになれば、低線量放射線による発がんについて、より現実に即した放射線リスクの推定が可能になる。これからは、現象論に基づく安全評価から、機構論に基づく安全評価への転換が必要になるだろう」と述べている⁷⁾。

私たちはこれまで、「放射線は、ヒトの体を構成する約 60 兆個(最近では約 37 兆という説もある)の体細胞と相互作用し、細胞の中心にある核の中の DNA を標的として攻撃し、傷つける。傷ついた細胞の大部分は、正しく修復されるが、稀に失敗するケースもある。この修復に失敗した細胞の一部が生き残り、その後も突然変異を繰り返していきと最後にはがん化し、無限に増殖する」と教えられてきた。しかし、ICRP Publ. 131 の序文には、「放射線の真の標的は組織幹細胞(最近では前駆細胞も含む

^{vii} DNA のメチル化は、不必要な遺伝子を働かせないようにする生体防御機構のひとつである。DNA のメチル化が異常を起こすと、必要な遺伝子の働きを阻害したり、抑制されなければならない遺伝子の働きを促進したりする場合が出てくる。

と考えられている)である。これに放射線が当たって生じる“がん幹細胞”が、がん化の重要な役割を担う」とはっきり書かれている。このことから、がんの重要な発生母地は正常な体細胞ではなく、“組織幹細胞”と言えるだろう。

ここで興味を引かれるのは、「甲状腺幹細胞が成人にも存在するのか?」^{viii}ということである。長崎大学の Mitsutake は、「iPS 細胞の作製で注目された、組織や臓器を構成する細胞(体細胞)の脱分化(リプログラミング)^{viii}、という現象を考えれば、ある一定の条件下で正常な甲状腺細胞が分化の方向を逆戻りして、幹細胞や前駆細胞へと変化する可能性はある」と述べている⁸⁾。「幹細胞から発生した細胞が、分化を終えて成熟した甲状腺細胞になってから、再びリプログラミング^{ix}してその後で、腫瘍化することもあるのだろうか?」という疑問は、幹細胞生物学が多段階発がん説に対して提起した今後の重要な検討課題のひとつといえるであろう。

Ⅳ. 多段階発がん説では説明の難しいがん—胸腺リンパ腫の事例

1. 多段階発がん説の適用限界

「多段階発がん説では、“がん”が発症するためには、1 個の放射線を受けた標的細胞の DNA に突然変異やメチル化異常が、段階的に生じる必要がある」と言われている。しかし、放射線等の外部からの刺激が 1 個の標的細胞をねらって、がんの発症に必要な数の突然変異を蓄積させる確率は極めて低く、普通に考えれば、発がんまでに極めて長い時間を必要とするはずである。比較的短期間で「標的細胞のゲノム安定性^xに関わる遺伝子に突然変異が起これば、その子孫細胞が、他の細胞よりも突然変異を誘発しやすくなる」というような稀な事象が起これなければ、特に、若年層で多く見られる血液がん(胸腺リンパ腫や白血病など)や小児甲状腺がんの発症を、多段階発がん説で説明することは難しい。

2. 放射線による胸腺リンパ腫の新しい発症モデル

放射線による“細胞死”が誘導されるような高線量域では、標的細胞が、周辺細胞の死による損失を補うために細胞の増殖の必要性を認め、それ自体が分裂して突然変異発生のリスクを高める可能性がある。また、組織の

^{viii} 幹細胞の多くは成人から見つかっている(血球系細胞を生み出す骨髄幹細胞など)。しかし、Takano は、甲状腺幹細胞および一部の前期細胞は胎児性細胞で若年のうちに消失させている⁸⁾。

^{ix} 分化した状態にある細胞が、再生などの自然条件や人工的な処理により、分化前の未分化状態(組織幹細胞)に戻るこ

^x DNA に傷ができた時にこれを修復する機構、および細胞が分裂するときに染色体を分割する機構がいずれも正常に作用する状態を保つこと

損傷に続いて起こる修復の過程では、しばしば炎症反応^{xi}が発生し、標的細胞をとりまく微小環境は大きく変化する場合があります。このような微小環境の変化は、当然のことながら、標的細胞の増殖、分化および死にさまざまな影響を与える。それらの知見は、これまでの放射線発がんの理論ではほとんど考慮されていなかった新しい問題を提起する。このことは、子供に多く見られる放射線による発がんリスクを考える上で、非常に重要である。以下にその要点を「2つの胸腺リンパ腫^{xii}の研究」に基づいて紹介する。

(1)放射線による胸腺内微小環境の変化と胸腺リンパ腫発生との関係

1950年代のはじめ、Kaplanらは、生後約5週齢のマウスに1.6 GyのX線を8日おきに4回照射することにより、高い頻度で胸腺リンパ腫を発生させる実験系を確立した⁹⁾。この胸腺リンパ腫の標的となる臓器は、免疫細胞のひとつであるT細胞が作られる胸腺と、そこにT細胞のもとになる細胞(前駆細胞)を供給する骨髄である。

放射線医学総合研究所のSadoは、Kaplanらの行った分割照射実験¹⁰⁾によって誘発される胸腺リンパ腫の特徴を分類・整理し¹¹⁾、「分割照射後に、胸腺を摘出すると、胸腺リンパ腫は発生しないが、その後正常な新生児マウスの胸腺を皮下移植すると、移植した胸腺にリンパ腫が発生する。この場合、発生した胸腺リンパ腫の大部分(約75%)は、放射線に照射されていない移植胸腺に由来することが確認されている」という結果に注目した。なぜ、「分割照射された胸腺摘出マウスに、非照射の正常な新生児マウスの胸腺を移植すると、放射線照射を受けていないはずなのに胸腺リンパ腫が発生するのか?」と疑問を持ち、「放射線は、標的細胞をヒットする“直接作用”ではなく、標的細胞を取り巻く微小環境の変化が招く“間接作用”を誘導する」ことを示唆していると考えた。しかし、その解釈は難しく、当時はそのメカニズム解明までには至らなかった。

(2)照射前に自然発生していた突然変異が放射線発がんに寄与

上記のSadoの研究に関連して、新潟大学のKominamiらは、ある2つの系統間の雑種第1代のマウスを試験対象として選択し、分割照射することによって誘発された胸腺リンパ腫を分析した結果、発症に重要な役割を果たしていると思われる新しいがん抑制遺伝子(Rit1/Bcl11b)

を発見した¹²⁾。このがん抑制遺伝子の構造を詳しく調べたところ、胸腺リンパ腫を発症したマウスではこの遺伝子の内部に欠失^{xiii}のあることがわかった。そこで今度は、人為的にこのがん抑制遺伝子をノックアウト(機能欠損)したマウスをつかって同様な実験を行ったところ、この遺伝子の機能欠損が、胸腺細胞の正常な分化を停止する働きをすることが明らかになった¹³⁾。一方、この遺伝子内部に欠失を持つ突然変異は、放射線照射されたマウスの胸腺細胞だけではなく、正常な胸腺細胞にもほぼ同じ頻度で含まれていることがわかった¹⁴⁾。Kominamiらは、放射線による胸腺リンパ腫発生のメカニズムを次のように考えた。すなわち、「がん抑制遺伝子(Rit1/Bcl11b)の突然変異は、正常な胸腺細胞中に一定の頻度で自然発生している。正常な胸腺環境では、そのような突然変異を持った細胞が生存、あるいは増殖の優位性(アドバンテージ)を持つことはない。しかし、分割照射によって胸腺内微小環境が変化した条件のもとでは、それらの変異細胞は未熟な状態のまま分化を停止して生き残り、おそらくその後でいくつかの突然変異、あるいは“エピジェネティックな遺伝子の修飾^{xiv}”を蓄積することによって、無限増殖能を持った悪性の細胞(胸腺リンパ腫)へと変化する。もし、このシナリオが正しければ、分割照射による胸腺リンパ腫の系では、照射前に自然発生していたがん抑制遺伝子の突然変異を持った細胞が、照射後における微小環境の変化によって生存、あるいは増殖のアドバンテージを獲得することでがん化への第一歩を踏み出す。これはまったく新しい放射線発がんのメカニズムである」と述べている。

近年、ヒトでも白血病に特異的な染色体転座^{xv}を持つ変異細胞が、健康な胎児や成人の血液中にかなりの頻度で存在していることがわかってきた。そして、それらの細胞が何らかの理由で生存、あるいは増殖のアドバンテージを獲得することによって白血病の発生する可能性が考えられるようになってきた。放射線影響研究所のNakamuraらは、「原爆被爆者に発生した白血病も、すでにそのような変異細胞を持つヒトが、被ばくによってそれらの変異細胞を異常に増殖させることによって起こる可能性がある」と述べている¹⁵⁾。

これら2つの知見は、少なくとも放射線被ばくによって子供に多く見られる血液がん(胸腺リンパ腫や白血病)については、「被ばく前にすでに存在していた変異細胞

^{xiii} 染色体または、DNAの塩基配列の一部が失われること。原がん遺伝子やがん抑制遺伝子に起きれば、異常タンパクが多量に産生され、がんとなる。

^{xiv} DNA塩基配列の変化を伴わず、化学物質(メチル基など)が結合することによって遺伝子の働きを制御すること

^{xv} 染色体転座は、染色体異常の一つ。染色体の一部が切断され、同じ染色体の他の部分または他の染色体の一部と再結合した状態

^{xi} 炎症反応とは、生体の恒常性を構成する生理学的な応答の一つである。組織損傷などの異常が生じたとき、当該組織と体全体の相互応答によって生じる。

^{xii} 免疫に関わる「Tリンパ球」の成熟に重要な役割を担う「胸腺」に生じる悪性リンパ腫

が、照射によって生存あるいは増殖のアドバンテージを獲得し、がんへと進展していく」という新しい発がん仮説の妥当性を裏付ける。そして、「放射線による発がんは、放射線の直接的なヒットによって生じる DNA の突然変異によって起こるといった単純なメカニズム」による解釈だけでは説明できないことを強く示唆している。

V. まとめ

本稿では、多段階発がん説の誕生と発展、ならびに子供に多く発生する血液がん(胸腺リンパ腫や白血病)の発症機構を、従来の多段階説では説明が難しく、新しいモデルが提唱された経緯を紹介した。多段階発がん説についても、近年、発生母地をこれまでの“正常な体細胞”だけでなく、“組織幹細胞”を加えるという修正がなされてきた。しかし、多段階発がん説の最大の疑問点は、「幹細胞から発生した細胞が、分化を終えて組織や臓器を構成する細胞(体細胞)になってからリプログラミングし、そのあとで腫瘍化する」という大前提にある。現在、その議論は始まったばかりであるが、将来、「子どもに多く見られるがん」については、その大前提も崩れる可能性がある。その可能性については、本シリーズの別稿で甲状腺がんを対象にして論じる予定である。

— 参考文献 —

- 1) D.Bonnet et al., Nature medicine 3.7 (1997) 730-737.
- 2) 幹細胞の基礎知識.
<https://www.skip.med.keio.ac.jp/knowledge/basic/01>
- 3) C.O.Nordling, British journal of cancer 7.1 (1953) 68-72.
- 4) E.R. Fearon et al., Cell 61.5 (1990) 759-767.
- 5) 中村裕輔のシカゴ便り 1022「国立がん研究センター講演会-3」(2015).
<http://yusukenakamura.hatenablog.com/entry/2015/10/22/052327>
- 6) ICRP Publication 131: Annals of the ICRP 45.1_suppl (2016) 239-252.
- 7) 原安協プライマー No.3「放射線発がんにおける機構研究の意義」(1998).
- 8) 高野徹, 光武範吏ほか DEBATE「甲状腺癌の発癌機序」Thyroid Cancer Explore 2(1) (2016)39-49.
- 9) H.S.Kaplan, Cancer research 27.8 Part 1 (1967) 1325-1340.
- 10) H.S.Kaplan et al, Cancer research 16.5 (1956) 434.
- 11) 佐渡敏彦ほか「放射線および環境科学物質による発がん - 本当に微量でも危険なのか?」医療科学社 (2005).
- 12) Y.Wakabayashi, et al. Biochemical and biophysical research communications 301.2 (2003) 598-603.
- 13) Y.Wakabayashi, et al. ,Nat Immunol., Jun;4(6) (2003) 533-539.
- 14) J.Sakata, et al. Carcinogenesis 25.6 (2004) 1069-1075.
- 15) 中村 典ほか,放射線生物研究. 39(2) (2004) 113-122.

甲状腺がん発症のメカニズム

2. チェルノブイリ事故から導かれた甲状腺発がん説

がんは複数の遺伝子に段階的に損傷および変異が蓄積することによって起こるとする「多段階発がん説」が、唯一の発がんメカニズムとして定着していた。しかし近年、ある特定の遺伝子が一変するだけで短期間に正常細胞ががん化してしまうというメカニズムが存在する可能性があることが報告されてきている¹⁾。このような遺伝子の変異を「ドライバー変異」と呼ぶ。このタイプのがんの発生は限られており、小児がんや、白血病のような血液がんによく見られるといわれている。その一例として、チェルノブイリ事故で多発した小児甲状腺がんが注目されている。本稿ではチェルノブイリ事故後の小児甲状腺がん発症のモデル、すなわち放射線誘発による遺伝子変異した細胞が原因ではなく、放射線による細胞死の誘導と組織微小環境の攪乱により、自然発生(散発性)の遺伝子変異細胞が、増殖を開始して発がんするというモデルについて解説する。

KEYWORDS: thyroid cancer, mechanism, hematopoietic stem cell, niche, RET / PTC, Chernobyl accident

I. はじめに

国際放射線防護委員会(ICRP)が2015年12月、放射線発がん研究の新しい展開を期待して刊行した「放射線防護の発がんの側面に関連する幹細胞生物学“ICRP Publication 131”」の(61)項に次のような記載がある。すなわち、「小児期がんは、0~15歳という年齢の間で発生するがんの総称であり、成人期のがんとは対照的に、ただ2段階の発がん過程しか必要としないことが明らかとなった²⁾。この2段階の発がん過程によれば、小児期がんが、思春期前の早い段階で、比較的短い潜伏期後に発生する理由を説明できる。小児期と成人期の、がん発症に必要な突然変異数の差の理由については、未だ、完全には解明されていない。しかし、標的細胞が異なっている。すなわち、前者の小児期のがんでは、胎児段階の未分化な細胞ⁱが標的とされており、後者の成人期のがんでは成人組織幹細胞またはその前駆細胞が標的となっている。」

長崎大学のSuzukiらの研究グループは、チェルノブイリ事故後に増加が確認された小児甲状腺がんに関する研究を行い、「放射線が、胎生期の幹細胞あるいは前駆細胞を取り巻く微小環境を攪乱し、これを刺激として、被ばくする前にゲノム変異を有していた幹細胞あるいは前駆細胞が、活性化してがん化する」という新しい仮説を提唱した³⁾。甲状腺発がんにおける放射線の役割は、細胞死を誘導することによる臓器・組織の微小細胞間環境の攪乱にあると示唆したのである。以下にSuzukiらの論文の内容を紹介する。

ⁱ 胎児段階ですでに変異が発生していると考えられる。

II. 甲状腺の構造と甲状腺がんの種類

1. 甲状腺の構造と機能

甲状腺は、図1に示すように、「のどぼとけ」のすぐ下にある重さ10~20g程度の小さな臓器であり、羽を広げた蝶々のような形で、気管を取り囲むように位置している⁴⁻⁵⁾。甲状腺は、全身の新陳代謝や成長の促進に関わるホルモン(甲状腺ホルモン)を分泌する。甲状腺ホルモンの主原料はヨウ素であり、ホルモンは正常な甲状腺細胞(濾胞上皮細胞ⁱⁱ)で合成される。

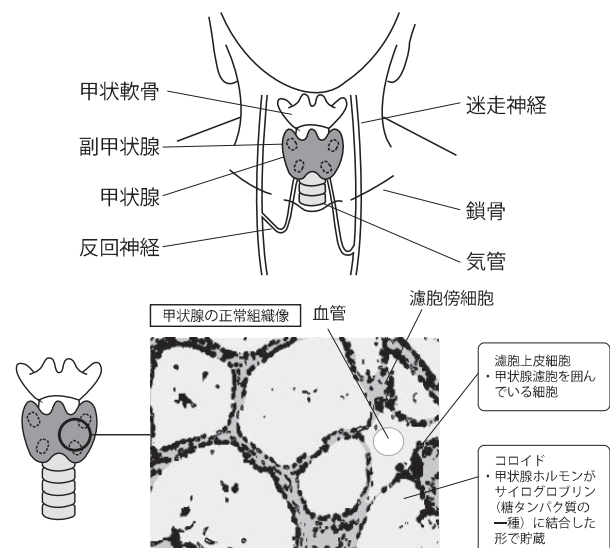


図1 甲状腺の形態と位置、ならびに組織の概要

ⁱⁱ 甲状腺の組織は、さまざまな直径の甲状腺濾胞(甲状腺小胞)と呼ばれる球状の袋がびっしりと詰まっている。濾胞の壁は濾胞上皮細胞と呼ばれる細胞が一層に並んでつくられており、この細胞が甲状腺ホルモンを分泌する。

表1 甲状腺がんの種類と特徴(出典:文献5, 9, 10)

種類	好発年齢(歳)	特徴
分化がん	30~50	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%。大半の微小な乳頭がんは、増殖能が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。
		甲状腺がんの約5%を占める。予後は比較的良好。10年生存率は85%である。
髄様がん	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 ⁱⁱⁱ の点突然変異あり。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。進行が比較的に速い。予後比較的に不良。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 ^{iv} 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。

2. 甲状腺がんの種類

甲状腺がんは、日本人全体では1年間に人口10万人あたり10人前後の割合で発症するがんであり⁶⁾、小児の場合4歳までは殆ど発生しないが、5~9歳で100万人あたり数人程度である⁷⁾。組織の特徴(組織型)により、乳頭がん、濾胞がん、髄様がん、低分化がん、未分化がん大きく分類される。また、甲状腺から発生するリンパ系のがんとして悪性リンパ腫を加えて分類される場合もある。甲状腺がんは、ほかの部位のがんと比較して若い層に多くみられ、男女比は1対5~10で圧倒的に女性に多い疾患である⁸⁾。各甲状腺がんの特性を表1に示す。

3. 甲状腺がんの予後

甲状腺がんの予後は、がんの種類によって大きく異なる。甲状腺がんの約90%を占める乳頭がんでは、10年生存率は80~95%であり、予後は良好とされている。しかし、甲状腺がんの約1%を占める未分化がんでは、10年生存率は0%であり、予後は極めて不良とされている。甲状腺がんの予後に係る最近の動向として、米国では、米がん学会(American Cancer Society)及び米甲状腺学

ⁱⁱⁱ RET 遺伝子: RET (rearranged during transfection) 遺伝子は、第10染色体に存在する。

^{iv} 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。

会(American Thyroid Association)が、これまで乳頭がんの一種と見なされてきた非侵襲性の被(ひ)嚢(のう)性乳頭がん濾胞亜型(noninvasive EFVPTC: noninvasive Encapsulated Follicular Variant of Papillary Thyroid Carcinoma)について、死亡のリスクが非常に低いため、がんの分類から除外することを2016年に学術専門誌「JAMA Oncology」で発表した^{v)}。EFVPTCの診断数は、過去30年で2倍から3倍に上り、欧米では甲状腺がん診断の10~20%を占める。この発表は、患者の不要な治療を防ぐことにより、患者の精神的負担や、治療費負担の軽減を目的としている¹¹⁾。

III. チェルノブイリ小児甲状腺がんのゲノム変異解析

チェルノブイリ原発事故後に増加した小児甲状腺がんの組織型は、大半が乳頭がんのタイプであることがわかった。これは、自然発生する甲状腺がんの大半が乳頭がんであるのと同じ結果であった。またチェルノブイリ事故後、早期に診断された小児甲状腺乳頭がんにおいては、充実型の乳頭がん^{vi)}が特徴的であるとの報告もあった¹²⁾。しかし、この様な低年齢で、短い潜伏期で発症する充実型の乳頭がんは、散発性(不特定な原因で発生する)の小児甲状腺がんでは極めて稀であり、放射線誘発甲状腺がん特有のものであるかどうかははまだ不明である。現時点においては、チェルノブイリ原発事故後に起きた小児甲状腺乳頭がん「共通した明らかな病理学的特徴」はなく、これまでの研究の結果では「放射線痕跡の存在」は認められていない。このように、チェルノブイリ原発事故後に発症した小児甲状腺がんにおいて、「病理組織学的解析からは放射線の痕跡は見いだされなかった」が、これらの症例は、放射線によるヒトでの発がんの分子機構を解明する上で極めて貴重なケースとして、その後、多くの研究が放射線の分子痕跡を求めて、小児甲状腺乳頭がん組織の遺伝子変異の解析が続けられている。

一般の甲状腺がんの発症に関連した遺伝子変異の代表的なタイプとしては、RET/PTC^{vii)}のような遺伝子の大規模な再構成によって起こる変異と、BRAF^{viii)}タンパク

^{v)} EFVPTCは、膜でおおわれて、組織同士が結合された状態で存在する。これまで乳頭がんの一種とされていた。その後、極めて緩慢なサブタイプであることがわかり、特に非侵襲性(非浸蝕性)のEFVPTCは、「がん」のカテゴリから除外することが提案されている。

^{vi)} 稀ながんの派生型の一つ。充実型乳頭がんは若年者に発生する傾向があるため、東日本大震災に伴う福島第一原発事故を契機に充実型乳頭がんについての関心が高まった。

^{vii)} RET/PTCは、小児甲状腺がん特有に見られる遺伝子変異で、DNAの二重鎖切断が引き金となってゲノム再構成が起きた結果生じる。

質を構成するアミノ酸の一部を変化させる突然変異の2つが同定された。RET/PTCの変異は、主に小児甲状腺がんのような若年齢で起こる甲状腺がんでよく見られる。一方、BRAF遺伝子の点突然変異は、成人の甲状腺がんで多く見られる。甲状腺がんは、年齢によって起こる遺伝子変異に異なる特徴のあることが明らかにされた¹³⁾。

放射線が、DNAの二本鎖切断を誘発することはよく知られた事実である。RET/PTC変異の生成には、RETとPTCの両方の遺伝子領域に別々のDNA二本鎖切断が必要であることから、チェルノブイリ放射線被ばくによる小児甲状腺がんの増加は、放射線によって直接誘発されたRET/PTCの変異がその原因になったという極めて単純明解な仮説が提唱されていた。この仮説は、LNTモデルの基盤となっている従来の発がんモデルとも合致している。また、原爆被爆者では、RET/PTCの変異が線量依存的に増加しているとの報告があり、また甲状腺由来の培養細胞に放射線を照射するとRET/PTCの変異が誘発されるというインビトロ^{ix)}での結果も示されている。1997年には、チェルノブイリ事故の放射線被ばく起因する小児甲状腺乳頭がんの中に、高頻度にRET/PTC融合遺伝子が見られることが発表された。特に、PTCの中でもPTC3遺伝子の変異が多く、放射線被ばくによる痕跡ではないかとの考察が示された。

しかしその後、多くの研究者によるチェルノブイリ事故後の小児甲状腺がんの解析結果が蓄積されると、事故後に増加した小児甲状腺乳頭がんの中でRET/PTC変異が検出される頻度は、散発性の小児甲状腺がんで見つかるRET/PTCおよびBRAFの変異頻度と差がないことが判明し、放射線被ばくとは直接関係せずに発症した小児甲状腺がんと同様のゲノム変異が同様の頻度で起きていることが示唆されるようになった。このことから、放射線被ばくによってRET/PTC変異が誘導され、それが小児甲状腺乳頭がんの発症につながったとは積極的に結論できなくなった。

IV. 放射線による細胞死の誘導と組織微小環境の攪乱

長崎大学のSuzukiらの研究グループは、甲状腺がんの発がんにつながるゲノム変異は放射線が直接もたらすのではなく、放射線被ばくより以前に既に自然に発生し

ており、放射線被ばくが誘発する細胞死、あるいは老化様増殖停止^{x)}によって、組織修復のために静止状態であったゲノム変異を有する幹細胞(または前駆細胞)が活性化してがん化するモデルを提示している³⁾。

Suzukiらの論文から引用すると、「チェルノブイリ原発事故後に発症した小児甲状腺がんで見られる発がん変異を解析することにより、従来とは異なる新たな放射線発がんモデルを提唱する必要性が出てきた。すなわち、発がんにつながるゲノム変異は、放射線が直接もたらすのではなく、放射線被ばくより以前に、既に自然に発生していたとするモデルである。それでは、このモデルの中で、放射線の役割はどう位置づければいいのか。その1つの可能性として、放射線被ばくが誘発する細胞死の役割が注目される。放射線による細胞死の誘発は、よく知られた事実であるが、最近、どのようなプロセスを経て細胞が死ぬのか、いわゆる細胞死のモードの解明が進んでいる。これまでも、放射線によるアポトーシス^{xi)}の誘導については数多くの報告があったが、実際には、アポトーシスを優位に起こす組織は極めて限られており、大半の臓器・組織では老化様の増殖停止を引き起こす。この、老化様の不可逆的細胞増殖の停止(細胞死)は、アポトーシスのように細胞そのものがなくなるので“細胞死”と定義するのに抵抗もあるが、いわゆる“増殖性細胞死”と同義であることから、細胞死のモードとして取り扱うことに問題はない」とある。

また、Suzukiらの論文から引用すると、「このような細胞死が大量放射線被ばくした臓器・組織で起こると、その程度によって臓器・組織の構造・機能に障害が出てくる。いわゆる放射線被ばくによる急性障害の発生である。このため、臓器・組織には再生の能力が備わっており、組織修復を実行する。この時には、臓器・組織内に存在するいわゆる体細胞が分裂・増殖し、細胞数を確保する。しかしながら、障害の程度があるしきい値を越えると、組織修復を大規模に行う必要が出てきて、体細胞の中でもより未分化な“前駆細胞”や、おそらく、組織内に普段はほぼ静止状態で存在する“組織幹細胞”まで動員されることになり、多くの細胞の増殖が一斉に開始される状況が生みだされると考えられる。治療による大量被ばくを受けた後、放射線による遺伝子変異が原因となり数年から数十年後、もとの病気とは別の種類のがん

^{viii} BRAF遺伝子は細胞内のシグナル伝達と細胞の増殖に関与する遺伝子であり、その遺伝子変異(BRAF(V600E))は一つの塩基が別の遺伝子に変わる点突然変異として、成人の甲状腺がんで多く見られる。

^{ix} 試験管や培養器などの中でヒトや動物の組織を用いて、体内と同様の環境を人工的に作り、薬物の反応を検出する試験のこと。

^x 分裂寿命を迎えなくても、生体細胞が、放射線などの刺激を受けてがん遺伝子が活性化すると、「DNAが損傷を受けたことを感知」して、自ら細胞増殖を停止する機能を備えていることがわかってきた。そうすると、細胞は以後どんな刺激を受けても増殖することがなく、分裂寿命による細胞老化と同様の不可逆的増殖停止を起こす。これを老化様増殖停止という。

^{xi} 多細胞生物の体を構成する細胞の死に方の一種で、個体をより良い状態に保つために積極的に引き起こされる。管理・調節された細胞の自殺すなわちプログラムされた細胞死。

(二次がん)が発症する頻度は、必ずしも高いものではない。しかし、このようなケースで、もし、自然発生由来の“発がん変異を有する幹細胞”あるいは“前駆細胞”が存在していたとすると、それらの細胞は“増殖優位性”をもって過剰に増殖するであろう」とある。

もちろん、これだけでは、いずれ臓器・組織が再構築された後で細胞増殖が停止し、発がん変異を持った細胞の集団はできるけれども“がん”としては成立しないはずである。しかし、過度の放射線被ばくは、同時に幹細胞の居所である微小環境(ニッチ)を構成するストローマ細胞^{xii}にも細胞死を誘導するため、甲状腺幹細胞が本来の dormancy^{xiii}を失うことも考えられる。さらに、老化様増殖停止を誘導した甲状腺濾胞細胞やストローマ細胞が分泌するタンパク質因子に注意する必要がある。その理由は、死滅せずに生き残った老化細胞は、炎症性サイトカイン^{xiv}(IL-6やIL-1など)といったタンパク質因子を盛んに分泌し、生体内で炎症反応を起こすことがわかってきたからである¹⁴⁾。

さらに Suzuki らの論文から引用すると、「老化した細胞の分泌するタンパク質誘導因子が、周辺の組織環境に少なからず影響を及ぼし、発がん抑制の母地を損なうというのである。つまり、老化様増殖停止細胞からの分泌因子が、臓器・組織の正常な構築を攪乱し、そのことも、自然発生由来の発がん変異を有する細胞のがん化プロセスを促進する要因になり得ることが明らかになってきた」とある。

以上に述べた通り、放射線発がんにおける放射線の役割は、細胞死を誘導することによる臓器・組織の微小細胞間環境の攪乱にもあることがわかってきた。この仮説が、次に記述するような「放射線による甲状腺の新たな発がんモデル」を生み出したのである。

V. 放射線による甲状腺の新たな発がんモデル

Suzuki らの研究グループが、チェルノブイリ事故における小児甲状腺がんに対して考えた新しい発がんモデルの概要を図2に示す。がん細胞の成立において最も重要なステップは、細胞が無限増殖能を保持あるいは獲得することである。Suzuki らの研究グループは、甲状腺がんの発生母地として一つは「発がん変異を有する幹細胞、あるいは前駆細胞」を考えている。それともう一つ、多段階発がん説で発生母地と考えられている「正常な甲状腺細胞」も候補の一つに挙げている^{xv}。ただし、正常な甲状腺細胞が、無限に増殖するときには必ず回避しな

^{xii} 間質細胞ともいう。臓器を結合する組織の細胞である。

^{xiii} 自己防衛のために休眠し細胞分裂しない状態を保つこと。

^{xiv} サイトカインは細胞どうしが連絡をとりあう信号。炎症性サイトカインは、炎症を強め機能障害や細胞・組織の崩壊をもたらす。

放射線照射

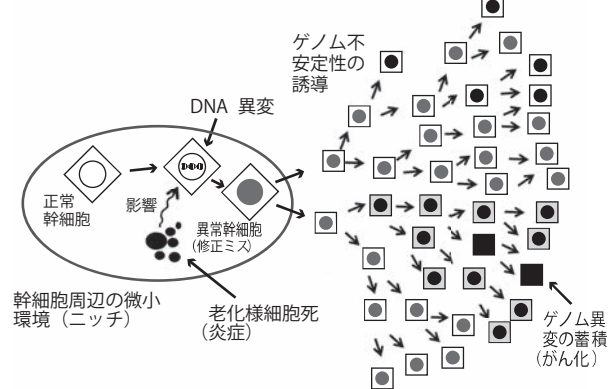


図2 チェルノブイリ事故における小児甲状腺がんに対して考えられた発がんモデル

ればならない問題として、テロメア^{xvi}短縮の問題がある。多くのがん細胞ではテロメラーゼ^{xvii}活性の亢進がみられ、これによってテロメア長の短縮が回避される。また、テロメラーゼ活性を再活性化するようなメカニズムとして、細胞の脱分化(リプログラミング)がある。これらの課題に対しては、「放射線被ばくによる微小細胞間環境の変化が、RET/PTC 変異を持つ細胞のリプログラミングを促進し、その結果テロメラーゼが再活性化し、テロメア短縮が回避される」と説明する。

集約すれば、「チェルノブイリ事故後、放射線ヨウ素の内部摂取により、甲状腺で微小環境の変化、すなわち組織障害が起きた。その障害を修復するために、発がんにつながる変異を有する幹細胞、あるいは前駆細胞、さらには甲状腺細胞がリプログラミングを経て再構成された未分化細胞(幹細胞や前駆細胞)が、増殖・活性化し、発がん過程を促進した」といえる。この考え方は新しい甲状腺発がん仮説の誕生であると考えられる。

VI. まとめ

発がんにつながる遺伝子変異は既に自然の状態で生成されており、その細胞が発がんプロセスを進めるための場を放射線被ばくによる細胞死が提供していると考えられる。放射線発がんは、むしろ確定的影響に似た線量依存性をとる可能性がある。つまり、低線量の放射線被ばくでは発がんリスクを上昇させない線量域が存在する可能性が示唆される。

^{xv} 甲状腺がんが発症するためには、正常な甲状腺細胞に何らかの異常を生じる過程が同時に起こっているものと推測される。

^{xvi} 染色体の末端部にある構造。染色体末端を保護する役目をもつ。

^{xvii} テロメアに新しい塩基配列を追加し、テロメアが短くなるのを防ぐ酵素。体細胞には存在せず、生殖細胞および腫瘍細胞のみに存在する。

また、放射線被ばくの寄与が、細胞死による組織攪乱にあるとすると、一定の線量率以下で起こる、少数の、それも組織全体に影響を及ぼさないような範囲の細胞死の誘導は、発がんプロセスを促進しない可能性も示唆される。

細胞死による組織攪乱は、「発がん変異を有する幹細胞、あるいは前駆細胞の増殖の原因となるだけでなく、甲状腺細胞のリプログラミングの誘発にも影響を及ぼしている」ことが重要である。前稿では、胸腺リンパ腫の新しいモデルを取り上げ、「がん抑制遺伝(Rit1/Bcl11b)の突然変異は、正常な胸腺細胞中に一定の頻度で自然発生している。正常な胸腺環境では、そのような突然変異を持った細胞が生存、あるいは増殖の優位性(アドバンテージ)を持つことはない。しかし、分割照射によって胸腺内微小環境が変化した条件のもとでは、それらの変異細胞は未熟な状態のまま分化を停止して生き残り、おそらくその後でいくつかの突然変異、あるいは“エピジェネティックな遺伝子の修飾”を蓄積することによって、無限増殖能を持った悪性の細胞(胸腺リンパ腫)へと変化する」と解説した。Suzukiらの小児甲状腺発がんモデルは、同モデルに近いモデルと言えるだろう。

－ 参考文献 －

- 1) 佐谷秀行「発がんのメカニズム」ドクターサロン 61 巻 7 月号 (6. 2017).
- 2) ICRP Publication 131. Annals of the ICRP 44(3/4) 2015.
- 3) 鈴木啓司ほか, 放射線生物研究, 47(3),(2012) 248-271.
- 4) 国立がん研究センター がん情報サービス 甲状腺がん.
http://ganjoho.jp/data/public/qa_links/brochure/odjrh3000000ul06-att/117.pdf
- 5) 阿部 好文ほか, 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.
- 6) 国立がん研究センター がん情報サービス がん登録・統計
https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html
- 7) K.Saika et al. Jpn. J. Clin. Oncol., 44(11) (2014) 1131-1132.
- 8) 日本診療検査医学会 診群別臨床検査のガイドライン 2003, 111-112.
<http://www.jslm.org/books/guideline/26.pdf>
- 9) 伊藤病院 甲状腺の病気について.
http://www.ito-hospital.jp/02_thyroid_disease/02_7_1about_nodle.html
- 10) 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.
- 11) Y.E Nikiforov et al., JAMA Oncol. 2(8) (2016) 1023-1029.
- 12) Y.E.Nikiforov. Cancer, 74 (1994) 748-766.
- 13) S. Yamashita et al. Nat Clin Pract Endocrinol Metab 3 (2007) 422-442.
- 14) F. Rodier et al. Nature cell biology 11(8) (2009) 973-979.

甲状腺がん発症のメカニズム

3. 芽細胞発がん説

本稿では脱分化(リプログラミング)というプロセスをとらずに、甲状腺がんの発症を説明する「芽細胞発がん説」を解説し、従来から一般的な発がんモデルとして使用されてきた脱分化に伴う甲状腺がん多段階発がんモデルとの相違性ならびに関連性について解説する。

KEYWORDS: thyroid cancer, mechanism, hematopoietic stem cell, embryonic cell, multi-stage carcinogenesis model, fetal cell carcinogenesis, blast cell carcinogenesis model

I. はじめに

どんな細胞でも発生初期に存在する幹細胞等の胎児性細胞ⁱから分化して産生される。そのような胎児性細胞は、活発に増殖すると同時にがんの転移能に相当する移動能を持っている。すなわち、がん細胞に限りなく近い細胞といえる。多段階発がん説ⁱⁱでは、「胎児性細胞が、いったん分化してさらに逆戻りし、脱分化してがんになるⁱⁱⁱ」という説である。しかし、大阪大学のTakanoらは、「脱分化という回り道をせずに、『胎児性細胞から直接がんが発生する』とした方がより簡単にがんの発生を説明できるのではないかと考えた。そして2000年にはじめて、甲状腺がんは、胎児性細胞から直接発症するという「芽細胞^{iv}発がん説」を報告した¹⁾。この新しい芽細胞発がん説が今、注目されている。

II. 甲状腺の芽細胞発がん説

1. 甲状腺がんの常識を覆す3つの重要な研究発表

甲状腺がんは、有病率^vまたは罹患率^{vi}に関するこれまでの医療データから、「甲状腺がんの最初の事象は中年に起こり、その後の遺伝子変異の蓄積によって悪性化」していく病気と単純に考えられていた。しかし、2014年、時期を同じくして発表された3つの研究発表がきっかけとなり、甲状腺がんの基本概念を大きく見直す動きが出てきた。

ⁱ 受精後最初の8週においては発育中のヒトは胎芽と呼ばれている。これは「中で育つ」という意味であり、この時期は胎生期と呼ばれ殆どの器官が形成されるのが特徴である。本稿(芽細胞発がん説)でいう「胎児性細胞」とはこの胎生期の細胞を意味する。

ⁱⁱ 旧多段階発がん説では、正常細胞の遺伝子に変異が起こり、ポリープなどの良性腫瘍が形成され、さらに変異が蓄積されていき、転移能や浸潤能といった能力を獲得し、悪性度の高いがんへと段階的に変化していくというものである。近年、がん幹細胞と言う概念が登場すると、分化した正常細胞は一定の条件下でリプログラミング(脱分化)し、未分化細胞に戻ってから悪性化するという新しいプロセスが追加された。

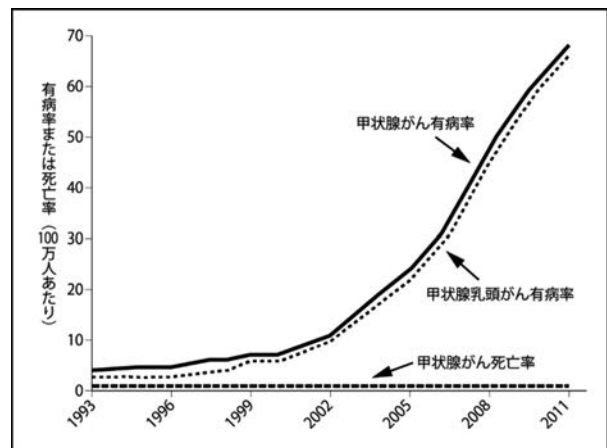


図1 韓国における甲状腺がんの増加と死亡率

(Massachusetts Medical Societyの許可を得て)

文献2 著者 A.H.Sik et al. N Engl J Med 371(19) 2014 1765-1767. p1765の図より転載)

(1) 韓国における甲状腺がんの過剰診断

韓国では、甲状腺の超音波検査の頻度が増加して2000年以降、甲状腺がん患者の数が著しく増加した^{2,3)}。それらの大部分は微小な乳頭がん(papillary microcarcinoma: PMCⁱⁱⁱ)であり、ほぼすべての患者が外科的切除を受けた。この根底には、「甲状腺がんが多段階発がん説に従って生成され、PMCは、より悪性の高い細胞に変化し、最終的には致死的ながんになる」という考え方があった。しかし、図1に示すように、甲状腺外科手術の数が増加したにもかかわらず、甲状腺がんによる死亡率は変わらなかった。甲状腺の超音波検査頻度の増加が、がんの死亡を予防することにつながったわけではなかったのである。現在、韓国では、「発見されたPMCをすべて単純に手術することは、過度の治療(過剰診断、この場合は不必要な

ⁱⁱⁱ 脱分化とは、既に分化した細胞が未分化の状態に変化すること。しかし、近年、幹細胞あるいは前駆細胞が「がんの主な発生母地」と言う研究者が多くなってきた。

^{iv} 胎児性細胞である。学術的には前甲状腺細胞を除く前期細胞のことであり、幹細胞は除かれるが「芽細胞発がん説」の「芽細胞」では幹細胞を含めて表現している。

^v ある一時点において、疾病を有している人の割合

^{vi} 一定期間にどれだけの疾病(健康障害)者が発生したかを示す指標であり、発生率の一種

甲状腺切除手術によって、日常的に甲状腺ホルモン投与等が必要になること)を招く恐れがある」と見なされている。

(2) 日本における微小乳頭がん患者の観察試験

甲状腺専門病院である隈病院の Ito らは、「直径が 10mm 以内で明らかな転移のない」微小乳頭がん(PMC)患者 1,235 名を対象として、外科的切除をせずに約 20 年間、PMC の観察試験を行った。その結果、10 年間で、「3mm 以上大きくなった人はわずかに 8%、リンパ節への転移が新たに認められた人はわずかに 3.8%」であったと学術誌(Thyroid)に発表した⁴⁾。Takano は図 1(参考文献 2 の論文)を見て、「実線で示される甲状腺がんの罹患率はうなぎ上りである。2011 年には 1993 年の実に 15 倍になっている。一方で、下の点線で示される死亡率はほとんど変化していない。罹患率が上昇しているのに死亡率が変化しないのは過剰診断を示唆するパターンである」と評価し、「微小乳頭がんが、がん死を引き起こすような悪性のがんに進捗することはないと説明している⁵⁾。Ito らの報告は、「韓国における甲状腺がんの多発は、過剰診断の結果である」ことを裏付けている。そして、「PMC の外科的切除は、甲状腺がんに関連する死亡率の低下に寄与しない」ことを示唆する。

(3) 福島県における子どもの甲状腺がん検診

福島県では原発事故直後から、当時ほぼ 18 歳以下であった子ども全てを対象として、超音波スクリーニング検査を開始し、今日に至っている。このプロジェクトを始める前には、単純に、「若年層(小児期および青年期)の甲状腺がんは非常に希な病気」と考えられていた。しかし実際には、ほぼ 2,700 人の小児のうち 1 人に乳頭がんが発見され、その有病率は 15 歳以降、急激に増加していた⁶⁾。これらのデータは研究者たちに、「微小乳頭がんは非常に成長が遅く、10 年単位でしか増大しないことから、甲状腺がんが幼児期に発症している可能性」を想起させた。この予測は、次に示す 2 つの知見によっても支持された。すなわち、①チェルノブイリ事故に伴う放射線誘発性甲状腺がんのリスクは、およそ 5 歳未満の小児では明らかであるが、成人では認められなかった^{7,8)}。また、②がん遺伝子をマウスに導入する実験では、胎児マウスに導入した場合にのみ甲状腺がんを発症させることができた⁹⁻¹¹⁾。

^{vii} PMC 患者の 60%以上に頸部リンパ節転移が見られる。したがって、PMC は前癌の状態ではなく、確かに、真のがんである。しかし、その増殖能力は限られているため、簡単に致命傷になることはない。したがって、これらの腫瘍は「自己制限癌(self-limiting cancers)」と言うことができる。韓国における研究は、甲状腺に多数の自己制御がんが存在することを証明した最初の報告であった。

Takano は、上記の福島事故、およびチェルノブイリ事故後に観察された甲状腺がん発症時期の疫学研究、およびマウスを使った甲状腺がん発症メカニズムの実験研究に基づいて、「がん遺伝子や放射線で甲状腺がんが誘導できるのは胎生期(受精後から出生までの期間)から幼少期のみであることを考えると、甲状腺がんは胎児を含む子どもにしかない何ものかが起源(発生母地)となり、最初の発生はかなり若年、おそらく 5 歳くらいまでであると考えるのが妥当である。」と考えた⁵⁾。

2. 芽細胞発がんのメカニズム

Takano は、上記の 3 つの研究発表を、矛盾なく説明できるモデルとして「芽細胞発がん説」を提唱した¹²⁾。

芽細胞発がん説の基本理論は単純である。「元々移動能・浸潤能・増殖能を持つ胎児性細胞が、何らかの原因で分化を止め、分裂・増殖を繰り返すことによって塊をつくり、がんとして認識されるだけ」と説明されている。

胎児期の甲状腺は、咽頭部で発生し、発生が進むにつれてゆっくり大きくなりながら移動する。移動の途中で、甲状腺特異的遺伝子であるサイログロブリン(Tg)^{viii}遺伝子を発現^{ix}するようになり、最終的に前頸部に落ち着く。この移動には、他の細胞間をすり抜ける能力、つまり転移能・浸潤能が必要である。すなわち、胎児の甲状腺細胞は、サイログロブリンを発現し、転移・浸潤を起こしながらゆっくり増殖するというまさしく『甲状腺分化がん』にそっくりな細胞であるという。

芽細胞発がん説では、図 2 に示すように、がんの発生母地として少なくとも 3 種類の細胞を考えている。一つ目は、サイログロブリンは未だ発現せず、胎児性フィブロネクチン^xだけが発現している未分化な細胞(甲状腺幹細胞: thyroid stem cell)である。強力な移動能力を持ち、数が少なく減多に分裂しないが、増殖サイクルに入ると分化細胞を発生させる能力がある。この細胞は未分化がんの発生母地になるという。二つ目はサイログロブリンとフィブロネクチンを共に有する細胞(甲状腺芽細胞: thyroblast)である。この細胞は、転移・浸潤能を有し、ゆっくりと増殖する。甲状腺芽細胞は乳頭がん・濾胞がんの発生母地となるという。三つ目は正常な甲状腺細胞(濾胞上皮細胞)と甲状腺芽細胞との中間段階にある細胞(前甲状腺細胞: prothyrocyte)である。サイログロブリンを発現するが、もはやフィブロネクチンは存在し

^{viii} 甲状腺正常細胞(濾胞上皮細胞)で合成されるタンパク質で甲状腺濾胞に蓄えられている。甲状腺が刺激されると Tg は細胞内に取り込まれ、タンパク質分解酵素の働きで分子がこわれ、甲状腺ホルモン(T₄, T₃)として分泌される。故に、Tg は甲状腺ホルモンの前駆物質といえる。

^{ix} 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

^x 胎児の入っている袋を子宮内膜に接着させる役目を果たすタンパク質

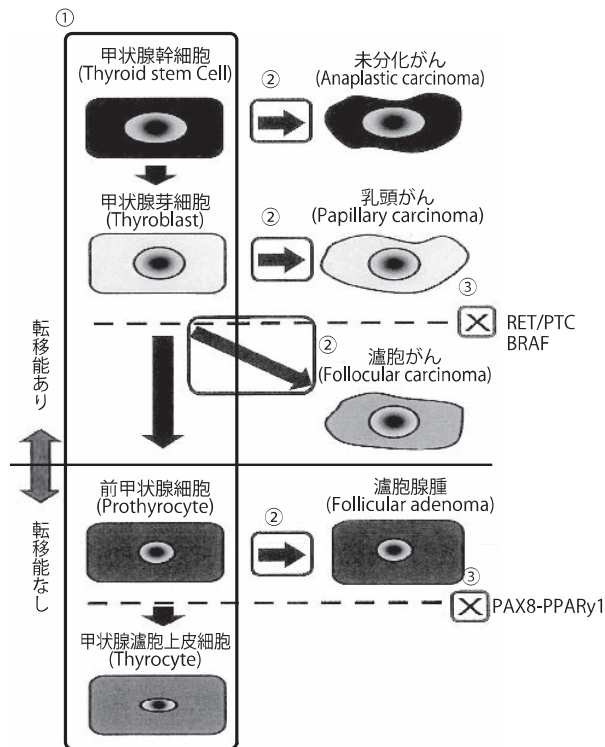


図2 甲状腺がんの芽細胞発がん説

(出典：文献12 T.Takano, Endocrine journal, 64(3), 237-244のp313のFig.2より転載)

発生初期の甲状腺には、①甲状腺幹細胞(thyroid stem cell)、②甲状腺芽細胞(thyroblast)、③前甲状腺細胞(prothyrocyte)と呼ばれる3種類の胎児性細胞が存在する。①の枠内は細胞の分化の度合いを表しており、上から下へ向かって、未分化な状態から分化した状態に並んでいる。細胞分化の過程において③の遺伝子(*RET/PTC*, *BRAF*, もしくは *PAX8-PPAR γ 1*)に変異が起ると、分化が点線の位置で停止する。その後、分化をすることなく増殖(②)してがん化する。芽細胞発がん説では、乳頭がん、濾胞がん、濾胞腺腫の起源は限定されている。分化が停止した甲状腺芽細胞が、分化なき増殖を経て、乳頭がん、もしくは濾胞がんになる。一方で、分化が停止した前甲状腺細胞が、同様にして濾胞腺腫になる。未分化がんの発生母地は、通常、5歳程度の幼児期に消滅する甲状腺幹細胞^{xii}が、何らかの原因で遺残したものと考えられており、数十年を経て突如増殖を開始し、臨床的な未分化がんに変化すると考えられている。

ない。この細胞から濾胞腺腫が発生するという。甲状腺芽細胞から正常な濾胞上皮細胞に変化する段階で、胎児性甲状腺細胞は、がん細胞の持つ転移能・浸潤能に相当する「移動能」を失うと考えられる。

従来、甲状腺がんを発生させる遺伝子と考えられてきた *BRAF*, *RET/PTC*, *PAX8/PPAR γ 1* は、「胎児性甲状腺細胞の分化をブロックする」役割を果たすと述べている。これまで謎とされてきた、「甲状腺分化がんは転移するのになぜ予後が良いのか？またなぜ女性に多いのか？」という疑問については、「甲状腺芽細胞は、女性ホルモンの上昇する時期に発生^{xi}し、増殖力は弱いが高い

^{xi} 甲状腺分化がんの発生母地である胎児性細胞である甲状腺芽細胞は、女性ホルモンの一種であるエストロゲンにばく露される環境を好む性質がある。女性の場合、乳児期早期までと思春期以降にエストロゲンは増加する¹²⁾。

移動能を持つ(舌根部から前頸部に移動する)胎児性細胞の特性を反映している」という甲状腺芽細胞の性質によって説明できる。

芽細胞発がん説の重要な点は、「すべての細胞の変化の流れが未分化→分化である」とした点にある。これは通常の発生過程と同様である。多段階発がん説では、「がん細胞は、通常の流れと逆行して分化した細胞が未分化なものに変化して異常な細胞になる」と考えられている。しかし、芽細胞発がん説では、「がん細胞は、通常の分化過程にそのまま乗っている。すなわち、がんという疾患は、広い意味での“発生異常”である」と説明されている。

3. 芽細胞発がんモデルの課題

Takano は甲状腺がんを、「根の浅いがん(主に乳頭がん)」と「根の深いがん(主に未分化がん)」という2つの部類に分けられると表現している。根の浅いがんは、幹細胞から少しだけ分化が進んだ甲状腺芽細胞から生じ、その発生後、ただちに増殖し始め、若年患者において急速な増殖を示す。しかし、中年時期にはその増殖能力が限られており、増殖が止まる傾向がある。一方、根の深いがんは、甲状腺幹細胞由来である。腫瘍化してもすぐには増殖せず、数十年、静止状態を維持する。そのため、高齢になって発症する傾向がある。しかし、いったん増殖を始めると、腫瘍は急激に増大する。

芽細胞発がんモデルは、多くの臨床的および実験的な証拠の説明に役立つ可能性があるが、根の深いがんの起源である甲状腺幹細胞が、数十年もの間、活動を休止している理由について、このモデルからだけでは説明できない。今後の重要な検討課題の一つとして、未分化がんを含めた芽細胞発がん説の発生メカニズムを、分子レベルで明らかにする研究の必要性が示唆される。

III. 多段階発がん説と芽細胞発がん説の相互比較

本シリーズの第1稿「多段階発がん説」における「はじめに」で書いた通り、がんは、長年、「1個の正常な体細胞に、遺伝子変化が蓄積して形成される、悪性度の高い均一な細胞の集団」とみなされてきた。いわゆる、古典的な「多段階発がん説」である。しかし、幹細胞研究が進むにつれて、古典的な多段階発がん説は見直しがなされ、「がんの始まりは、1個の正常な体細胞だけではなく

^{xii} 幹細胞の寿命は個体よりも長いと考えている人もいる。しかし2010年、マウスの精子幹細胞の追跡調査を行った結果が米国科学誌 *Cell・Stem Cell* に報告され、「精子幹細胞の寿命は平均して1~2週間しかもたず、次々と消滅。失われた幹細胞は、他の幹細胞から生れた細胞によって補充」されることがわかった。甲状腺幹細胞についてはこの補充がなされないひとつの事例と考えられる。

て、組織幹細胞(あるいは前駆細胞を含む)」とするように修正がなされてきた。ただし、幹細胞が、がんの主要な発生源と見なされるようになったとしても、多段階発がん説では、遺伝子変化の蓄積によって悪性化が進むことを「発がんのメカニズム」とする考え方に変化はない。

Takano は、「芽細胞発がん説」を提唱し、甲状腺がんの発生源は、正常な成人甲状腺細胞ではなく、「胎児性甲状腺細胞(甲状腺幹細胞, 甲状腺芽細胞, 前甲状腺細胞)」であるとした。そして、これらの細胞が、未分化がん、分化がん(乳頭がんあるいは濾胞がん)、および濾胞腺腫をそれぞれ誘導すると述べている。

多段階発がん説に従って遺伝子異常蓄積でがん化が起きると考えれば、分化がん(乳頭がん, 濾胞がん)から発生する未分化がんは分化がんの遺伝子異常を引き継ぐはずであるが、甲状腺がんにおける遺伝子異常はおおむねそれぞれのがんの病理型に特異的で、たとえば分化がんの特異的に高率に認める遺伝子異常である *PAX-8/PPAR γ 1* や *RET/PTC* は未分化癌では検出されない。このことは多段階発がん説では説明が困難となる。

実際に分化がん組織から未分化がんが発生するという現象があるが、これは分化がんが悪性化して未分化がんを発生させたのではなく、分化がん組織に紛れ込んでいた未分化がんが増殖することで観察できるようになったものであると芽細胞発がん説では考えている。

大阪大学甲状腺腫瘍研究チームのホームページ¹³⁾に、研究内容を紹介するコーナー「ふあつつ・にゅう」がある。2017年5月13日付記事、「多段階発がん説は過剰診断を引き起こす」を見ると、多段階発がん説と芽細胞発がん説の相互比較がなされている。Takano は、「多段階発がん説と芽細胞発がん説の違いの根本は、分化した細胞から未分化な細胞が発生することを認めるか否か、という点である。多段階発がん説では、良性の細胞から悪性の細胞が発生するとしている。これに対して甲状腺の芽細胞発がん説では、分化した細胞が先祖返り(脱分化)することを否定している。ここが多段階発がん説と芽細胞発がん説の分かれ目である。もう一度まとめると、1)多段階発がん説では、良性細胞の先祖返り(悪性化)を許容する、2)芽細胞発がん説では悪性化を許容しない、というのが基本的な違いであると説明している。

そして、ここから甲状腺癌に対する臨床上の考え方の違いが発生する。すなわち、1)多段階発がん説では、良性の腫瘍でも時間がたてば悪性になりえるからそうなる前に治療が必要である。これに対して、2)芽細胞発がん説では、良性のものは何十年たとうが良性で患者をがん死させるようながんとは全く別物であるとしている。従って、早期診断・早期治療が必要なものも当然あるが、たとえそれががん腫であっても患者に悪さをすることがはっきりするまで手を出してはいけないものもあることになる」と記述している。

このように、多段階発がん説と芽細胞発がん説を比較してみると、両者には大きな違いがあるように見える。しかし、近年「幹細胞」という概念の登場とともに、多段階発がん説を支持する専門家の間でも、この幹細胞が、がんの発生源の一つとなる可能性を示唆する声が大きくなってきた。多段階発がん説と芽細胞発がん説には相違点ばかりではなく、補いあって、より汎用性の高い「甲状腺発がんモデル」が生まれる可能性も考えられる。

IV. おわりに

放射線影響研究の分野では従来より、「疫学データによる低線量放射線の影響を、ヒトの疫学データにより評価することは難しい。『がんの発症メカニズム』を明らかにしない限り、推測の域を出ることはない」という研究者が多い。福島地域の住民が抱く甲状腺がん発症の不安に正しく答えるためには、福島県民健康調査に加えて、「甲状腺がんはどのようにして起こるのか」というメカニズム解明の研究がさらに重要性を増すであろう。

この特集では、第1稿で多段階発がん説の誕生と発展、ならびに若年者に発生するがんへの適用限界について解説した。第2稿では、チェルノブイリ事故後に発生した小児甲状腺がんの発症については、放射線によって遺伝子変異した細胞が原因ではなく、放射線による細胞死の誘導と組織微小環境の攪乱により、自然発生(散発性)の遺伝子変異細胞が、増殖を開始して発がんするというモデルについて解説した。第3稿では、甲状腺がんの発生は、「がん細胞は、通常の分化過程にそのまま乗っている。すなわち、がんは、広い意味での“発生異常”現象である」とする芽細胞発がん説を紹介し、リプログラミングを含む「多段階発がん説」との比較を行った。以上の解説で、現在、甲状腺がん発症メカニズムを説明するためのモデルについての最新の知見を解説した。

本解説が、放射線による甲状腺発がんとその影響について、機構論に基づく安全評価に道筋を開く一助となれば幸いである。

— 参考文献 —

- 1) T.Takano, "Fetal cell carcinogenesis of the thyroid: theory and practice." Seminars in cancer biology. Vol. 17. No. 3. Academic Press, 2007.
- 2) A.H. Sik et al. N Engl J Med 371(19) (2014)1765-1767.
- 3) A.H.Sik et al. New England Journal of Medicine 373(24) (2015), 2389-2390.
- 4) Ito, Yasuhiro, et al. Thyroid 24(1) (2014) 27-34.
- 5) 高野徹, 医学のあゆみ 260(9) (2017)779-784.
- 6) S.Suzuki, Clinical Oncology 28.4 (2016): 263-271.
- 7) Y. Nikiforov, The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism 81(1) (1996), 9-14.
- 8) L.E.Holm et al. New England Journal of Medicine 303(4) (1980), 188-191.

- 9) S.M.Jhiang et al. Endocrinology 137(1) (1996), 375-378.
 10) Charles, Roch-Philippe, et al. Cancer research 71.11 (2011), 3863-3871.
 11) M.Shimamura, et al. Endocrinology 154(11) (2013) 4423-4430.
 12) T.Takano, Endocrine journal, 64(3), (2017) 237-244.
 13) 大阪大学大学院医学系研究科甲状腺腫瘍研究チーム.
<http://www.med.osaka-u.ac.jp/pub/lab/wwww/CRT/CRT%20Home.html>

著者紹介

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

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

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

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

當麻秀樹 (とうま・ひでき)

日本エヌ・ユー・エス株式会社

専門/関心分野: 放射線防護, 低線量放射線リスク



From Editors 編集委員会からのお知らせ

— 最近の編集委員会の話題より —

(7月3日 第1回編集幹事会)

【学会誌編集幹事会】

- ・新理事の挨拶があった。
- ・60周年記念号記事企画の各組織への依頼状, 原稿フォーマットの最終版を確認した。一部修正を加え, 近日中に学会内の各組織へ依頼発信予定。
- ・2018年秋の大会企画セッション案から学会誌記事候補の選出。選出した

記事の執筆について事前に打診して進める。

- ・執筆要領の改定案の説明があり, 一部に修正を加え, 承認された。
- ・連載講座の新企画に向け, 担当委員より説明があった。2016年に打診した際, 回答がなかった部会を中心に再度打診を行う。
- ・巻頭言, 時論, その他記事の企画の進捗状況を確認し, 掲載予定について検討した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

WEO2017 と内外エネルギー情勢への示唆

第1回 持続可能な開発と長期エネルギーシナリオ

東京大学 小宮山 涼一

WEO2017 では、国連の持続可能な開発目標やパリ協定の発効により、地球・地域環境保全は国際社会が共有すべき重要な価値であるとされ、2℃目標と統合的なシナリオでは世界の原子力は今後も維持・増強されていることから、原子力は持続可能なエネルギーシステム実現において重要な技術オプションの一つであると示唆されている。しかし実際、革新技術普及の可能性など、エネルギー市場の将来の不確実性が高まっており、原子力への投資の意思決定は困難である可能性があり、投資の予見可能性を高める政策的支援等が重要であると考えられる。

KEYWORDS: *sustainable development, energy outlook, power generation mix, renewable energy, electrification, climate change, air pollution*

I. はじめに

持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals: SDGs)¹⁾が、2015年に国連において採択され、経済・社会・環境に関する課題に総合的に取り組み、持続可能な発展を目指した国際社会全体の開発目標が定められた。また2016年11月にはパリ協定が発効し²⁾、世界各国が温室効果ガス排出削減に取り組む国際枠組が法的に定められ、地球の平均気温上昇を産業革命前に比べ2℃未満に抑え、1.5℃への抑制を目指すとする目標が掲げられた。環境問題を解決し、持続可能な発展の実現に向けた国際社会の関心が高まっている。

地球および地域環境保全が国際社会全体が共有すべき重要な価値の一つとして位置づけられる中、世界のエネルギー市場には再生可能エネルギー技術や電気自動車などクリーンな先進技術が徐々に普及し、将来のエネルギー需給に大きな影響を与える可能性が指摘されており、社会のエネルギー利用全体の展望に不確実性が高まっている。その中で、技術や政策の不確実性を念頭にした複数のシナリオでのエネルギー需給の長期展望は、社会の持続可能性や、エネルギー関連事業のリスクとチャンスを議論する上での重要な礎となる。

国際エネルギー機関(IEA)が毎年発行する最新のWorld Energy Outlook 2017(WEO2017)では、2040年ま

Implication from WEO 2017 for energy system (1) ; Sustainable energy scenario : Ryoichi Komiyaama.

(2018年4月9日 受理)

での世界のエネルギー需給を、各国の環境政策や国連の持続可能な開発目標を反映したシナリオの下で展望している³⁾。本稿ではWEO2017での長期シナリオ分析を紹介し、原子力への示唆等について考える。

II. 持続可能なシナリオとエネルギー需給

1. シナリオ

WEO2017では、2040年までの世界のエネルギー需給の展望を複数のシナリオの下で描いている。WEOにおいて近年想定されている「新政策シナリオ(New Policy Scenario)」は、各国での既存および今後の実施が表明されているエネルギー・環境政策が、国際エネルギー需給に与える影響の分析を目的としている。WEO2017にてはじめて登場した「持続可能な開発シナリオ(Sustainable Development Scenario)」は、国連の持続可能な開発目標(SDGs)におけるエネルギー・環境関連の政策(気候変動、大気汚染問題への対応策強化、途上地域での電力化等)が国際エネルギー需給へ与える影響を分析している。持続可能な開発シナリオは、世界の平均気温上昇を2℃未満に抑制する2℃目標と統合的なシナリオとなっている。2100年を見通した場合、2℃目標では2100年にCO₂排出量の収支をゼロとする必要があり、パリ協定の努力目標である1.5℃目標では、2060年までにCO₂排出量をゼロとし、2100年にはマイナス190億トン(大気中より190億トンを正味吸収)を達成する必要があるとされている。

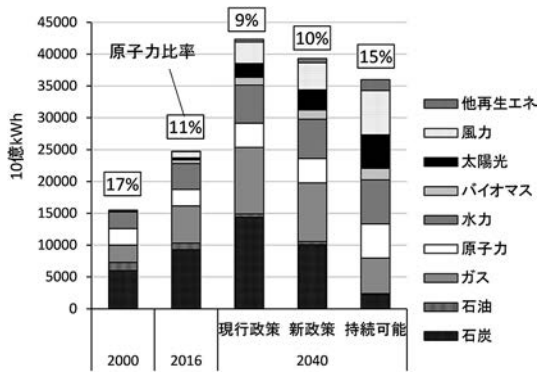


図1 電源構成の展望(～2040年, 世界)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

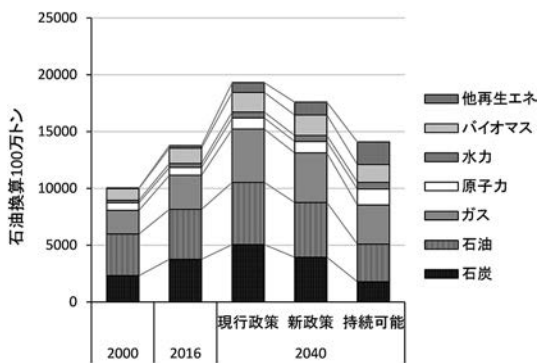


図2 一次エネルギー供給の展望(～2040年, 世界)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

2. 原子力, 再エネの展望

図1, 図2に各シナリオでの2040年までの世界の電源構成, 一次エネルギー供給の展望を示す。電力部門はエネルギー消費が最も大きい部門であり, 同部門への投資額は, 従来投資の中心であった石油・天然ガス投資を超え, その動向がエネルギー需給に与える影響は大きい。

予測では, 2℃目標の実現には2040年時点で原子力, 再エネ, 省エネが重要な役割を担うことが示唆されている。2℃目標と整合性のある持続可能な開発シナリオでは, 2040年の世界の非化石電源比率(原子力・再エネ)は約7割(71%)に達する(図1)。2040年の原子力の電源比率を見ると, 2000年の17%から2016年の11%へ低下しているが, 持続可能シナリオでは15%に達し(図1), 原子力は再エネ電源と共に, 国連が掲げる持続可能な開発目標を強化する上で重要な電源となることが示唆される。また省エネ進展, 再エネ等の急増により, 資源が豊富に存在し, 最も経済性のある石炭の電力利用がほぼ終焉を迎える(図1)。同見通しでは, 中国の原子力発電量は着実に増加し, 2030年までに中国(149GW)が米国(108GW)を抜いて世界最大の原子力発電大国となる。

持続可能な開発シナリオでは, 過去と比較すると, 世界の旺盛な一次エネルギーを充足する方策が大きく変化し, 天然ガスと急成長する再エネ, そして省エネ, 原子

力が中心的役割を担う(図2)。同シナリオでの2040年の一次エネルギー供給量は現状(2016年)と変わらないため, 省エネは供給サイドの負担軽減に大きく貢献する(図2)。世界経済が年平均3.4%で成長し, 人口が現在の74億人から2040年には90億人を超える前提条件での見通しであるため, 持続可能な開発シナリオは実態として, 3%を超える経済成長と着実な人口増加の下で, 世界全体で現状並みのエネルギー消費水準へ抑制することが必要なため, 極めて挑戦的な見通しであると考えられる。

また, 持続可能な開発シナリオでは再エネの伸びが最も大きい。世界の太陽光発電の設備量は, 2016年の3億kWから2040年には持続可能ケースで約10倍の32億kWへ急増し, 風力発電も2016年の4億kWから2040年には6倍以上の26億kWへ増加する(図3)。世界の原子力の総設備量は現状の4億kWから2040年には7億kWへ拡大し(図4), 2040年の設備量は太陽光・風力を下回るが自然変動電源は設備利用率が低いため, 発電量を単体で見れば, 原子力(7億kW)は太陽光(32億kW)を上回り, 風力, 天然ガス火力と肩を並べる世界の主力電源として位置づけられる。

そして, 持続可能な開発シナリオでは全体として, 原子力と再エネが電源構成の大部分を占めるため, 電力需給の運用面を考えた場合, 原子力と再エネのベストミックスの視点も重要な課題になると想定される。加えて, 再エネの限界発電費用はほぼゼロであるため, 再エネ拡大は電力(卸売)価格の低下をもたらし, 原子力など電源

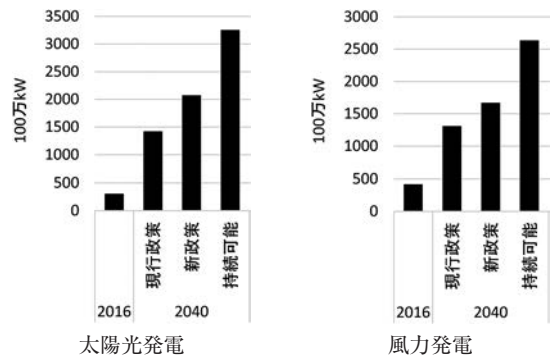


図3 自然変動電源の展望(世界)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

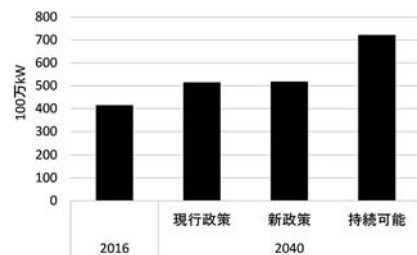


図4 原子力発電の展望(～2040年, 世界)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections (p.641～)をもとに著者作成

の採算性を悪化させる。再エネ拡大の中、低炭素化に重要な役割を果たす原子力の維持や新規投資をどのように図るかはWEO2017では解説されておらず、原子力・再エネの両立といった視点でのエネルギー政策のあり方も含めて、議論が必要な論点であると考えられる。

3. 電力化の展望

WEO2017では、いずれのシナリオでも、エネルギー消費に占める電力比率が増加する電力化の進展が見られる。電力消費はいずれのシナリオでも増加すると共に、エネルギー消費に占める電力比率が上昇し、エネルギー消費が今後減少する先進国でも、エネルギー消費が旺盛な途上国でも共に電力比率が上昇し、社会全体が徐々に電力への依存度を高める可能性が指摘されている。電力はモーターの動力など従来見られる分野ばかりではなく、モビリティや熱供給にも利用範囲が拡大すると見込まれ、最終消費の電力比率は持続可能な開発シナリオで約3割に達する(図5)。例えば、イギリス、フランスはガソリン車とディーゼル車販売の2040年までの段階的廃止を決定しているが、このような政策や技術開発の加速化をうけ、持続可能シナリオでは世界の電気自動車保有台数は、現在の200万台から2040年には2億8,000万台に到達して運輸部門の電化を後押しし、運輸部門の石

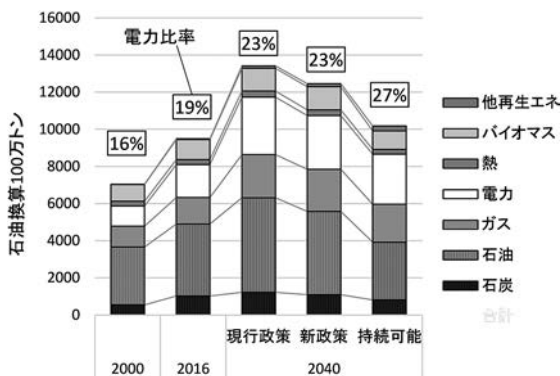


図5 最終エネルギー消費の展望(世界)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

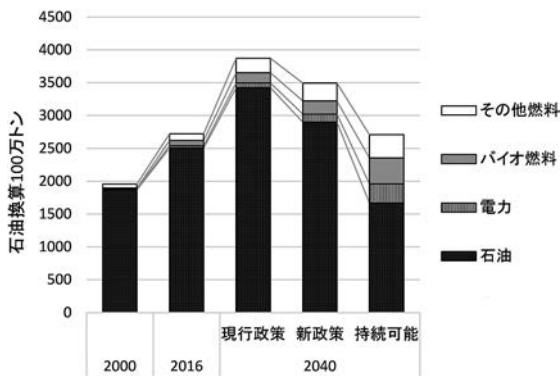


図6 運輸部門のエネルギー消費の展望(世界)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

油消費を大幅に抑制すると見込んでいる(図6)。

社会経済の電力への依存度上昇は、電力安定供給が従来以上に必須となる点を示唆している。供給面では、急速なコスト低下を踏まえ、PV(Photovoltaics)など再エネへの期待は大きく、消費面でも電気自動車やIoT・ICT技術の普及など、関連するビジネスへの期待も高く、社会で電気が広く使われるポテンシャルは大きい。また、電力分野への投資確保も課題となる。電力部門の投資はこれまで投資の中心であった石油・天然ガス投資を既に超えているが、電力消費の増加に対応するには、電源のみならず、送配電網整備に多額の投資が必要になり、電力部門の投資確保の問題は安定供給上の重要な課題になると考えられる。

4. 化石燃料の展望

持続可能な開発シナリオでは、非化石エネルギーが世界の一次エネルギー供給に占める比率が2040年には現状の2倍の4割に達するが(図2)、一方の化石燃料に注目すると、石炭消費が直ちに減少し、次いで石油消費量もピークを迎える(図7)。石油は運輸、石炭は発電部門を中心に大きく減少する(図8)。再エネが着実に増加する中、天然ガス消費はCO₂制約の厳しい持続可能な開発シナリオにおいても、2030年まで約20%増加し、2040年まで大きく減少しない(図7)。天然ガスは緩やかながらも増加するため、速やかに石炭を抜き、2030年以降に

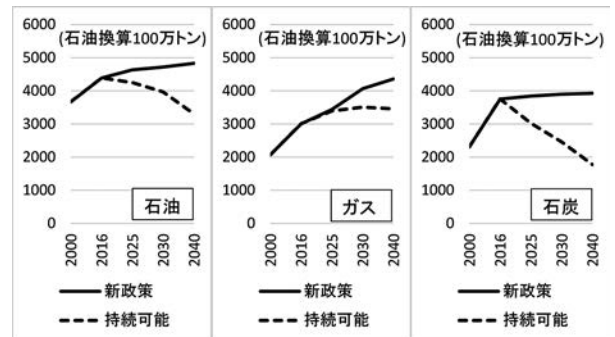


図7 化石燃料(石油、ガス、石炭)の展望(世界)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

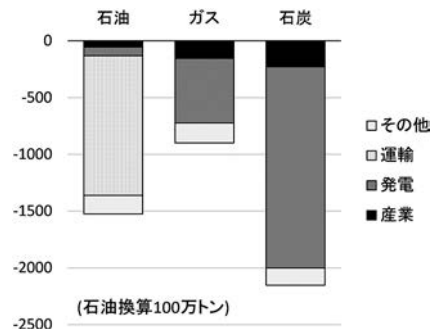


図8 持続可能な開発シナリオにおける部門別化石燃料削減量(世界)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

石油を超え、世界のエネルギー構成の中で単一の燃料としては最大比率を有する燃料となる(図2, 図7)。

一方、世界各国のエネルギー・環境政策の強化を反映し、より実現可能性の高い新政策シナリオにおいては、石油、石炭、天然ガス消費は2040年にかけて堅調に増加する(図7)。そのため、石油をはじめとする化石燃料の長期展望には、シナリオに応じて、着実な増加を見込むシナリオから、逆に大幅な減少を予想するシナリオまで存在し、見通しの差が大きく、不確実性を有する。また、エネルギー価格や経済全般へ最も影響の大きい石油は、持続開発な開発シナリオにおいて2040年には現状より消費が2割以上急減するが、既存油田の自然減退ペースは実態としてそれ以上に急速であると考えられる。石油供給の維持には相応の上流投資が必要になるため、よって、石油消費減少は、必ずしも石油の重要性の低下を意味することにはならないと思われる。また、持続開発シナリオにおいても、2040年まで天然ガスは継続的な増加が見込まれるが、パイプライン、LNG関連施設など、天然ガス利用には巨額のインフラ投資が必要になり、不確実性の大きな見通しの中で、投資の確保が一層重要になることを示唆していると考えられる。

このようにWEO2017の持続可能な開発シナリオでは、エネルギー需給構造の低炭素化が大幅に進展するが、エネルギー資源や技術への投資のあり方が問題となる可能性を示唆している。とくに電源のゼロエミッション化が不可欠になるため、電力部門の投資はエネルギー供給投資総額の3分の2を占めるが、石油と天然ガス消費は2040年においても約5割を占めるため(図2)、その上流投資は、引き続きエネルギー安定供給確保のため重要となる。エネルギー需給構造の低炭素化の進展により、化石燃料への適切な投資を、不確実性の高まる市場環境の中で適切に確保することが必須の課題となる。

5. CO₂排出量等の展望

世界のCO₂排出量を展望すると、近年は中国の経済成長の鈍化等を踏まえ横ばいで推移しているが、各国の対策強化を踏まえた新政策シナリオでは、中国の世界最大のCO₂排出量は2030年までに現在の水準をやや上回る92億トンでピークを迎えて減少に転じ、先進国でも省エネや低炭素技術の普及により減少基調で推移すると予測されている(図9)。しかし、中国と先進国を除いた地域の排出量は現状比で6割以上も増加するため、世界全体で見ると2040年まで増加し続ける(図9)。2℃目標を達成する持続可能な開発シナリオのCO₂排出量に比較すると(2040年には現状比4割減)、現状の世界各国の取り組みは気候変動の深刻な影響を回避するためには不十分であることを示唆している(図10)。先進国、中国におけるCO₂削減テンポの加速化、他の途上地域でのCO₂の伸びの抑制にむけた対策強化が必須となる。

また部門別CO₂を見ても低炭素化対策の強化のあり

方が変化する可能性がある。各国の環境政策を反映した新政策シナリオでは、2040年までの間に、電力需要は世界全体で60%増加するが、同部門の排出量は再エネ拡大で5%増に大きく抑制される一方、非電力部門の排出量はあまり抑制が行われない。例えば運輸部門では世界の自動車保有台数が倍増すると見込まれるため、運輸の石油消費に起因するCO₂排出量は、長らく世界のCO₂の主要発生源である石炭火力(世界の総排出量の3割)の排出水準と2040年までに同等となり(図11)、非電力部門での低炭素化が重要な課題となる。

また国別に見ても、世界最大の排出国である中国のCO₂もピークを打つ可能性が指摘されている(図9)。中国は国際政治や経済に加え、再エネや原子力など低炭素

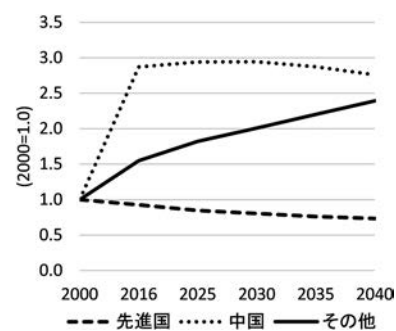


図9 世界の地域別CO₂排出量の展望

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

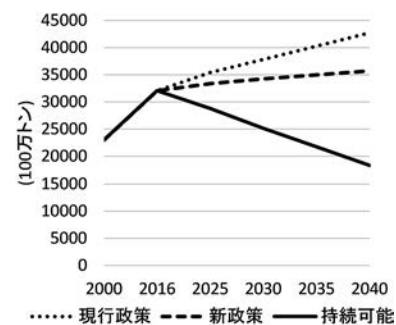


図10 世界のCO₂排出量の展望

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

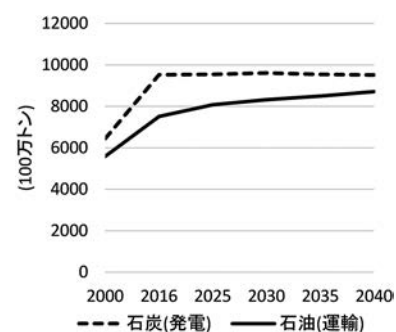


図11 石炭(発電)と石油(運輸)のCO₂排出量の展望

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

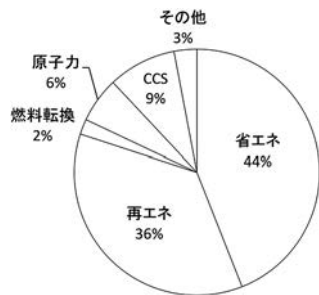


図 12 CO₂削減量の技術別内訳

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, p.139 の Figure 3.15 をもとに著者作成

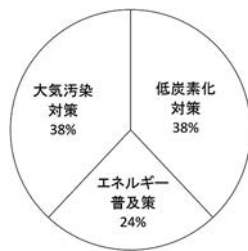


図 13 PM2.5削減量の対策別内訳

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017, p.140 の Figure 3.16 をもとに著者作成

エネルギー技術でも存在感を増してきており、そして現に、主要供給源であった石炭消費の伸びに大きくブレーキをかけ、天然ガス、再エネ、原子力など低炭素エネルギーへのシフトを国家として強力に進めている。中国政府は持続可能な発展に向け、国家としてエネルギー需給のガバナンスに主導的役割を果たしていることも、中国への国際的関心を高めていると考えられる。

図 12 は 2040 年の断面において、2°C 目標(持続可能な開発シナリオ)の CO₂排出量達成のための技術別 CO₂削減量(新政策シナリオを基準)を示している。再エネ、省エネによる CO₂削減量の比率が大きいが、原子力も 6%、量にして約 10 億トンの削減量となり、これは現在、世界第 5 位にある日本の排出量に匹敵するため、原子力の維持・増強は 2°C 目標達成の上で重要な役割を担う。

また近年、国際的な都市化の進展により、大気汚染物質への社会の脆弱性が顕在化している。温室効果ガスのみならず、大気汚染対策にも国際的な関心が高まっており、WEO2017 では主要な大気汚染物質排出量の予測も行っている。持続可能な開発シナリオでは、硫黄酸化物、窒素酸化物、PM2.5(微小粒子状物質)の排出量が世界全体で減少すると見ているが、図 13 に示すように、PM2.5 削減量(新政策シナリオを基準)のうち、原子力を含む低炭素化対策が 38% 貢献しており、原子力は大気汚染物質抑制へも大いに貢献していると考えられる。

Ⅲ. 結言

パリ協定で定められた 2°C 目標は、国際政治的合意の

上で設定されたため、気候変動とその影響に関する不確実性は現時点では依然として大きい、その目標達成に向けた対策強化が不可欠となる。

エネルギー分野の投資は、原子力を含め、長期のリードタイムを要して投資額も巨額であり、WEO2017 の見方のようにシナリオ間でエネルギー需給構造に長期的に大きな不確実性がある中では、投資の意思決定は、極めて困難となる。不確実性下での投資の確保には、不確実性を低減するための情勢分析およびシナリオ分析や、投資の予見可能性を高める政策的支援が必要となる。

不確実性が高まる中では、情勢の把握が重要となる。近年、再エネや電気自動車、IoT・ICT 技術など、革新的技術の進歩に世の中の関心、将来への期待が高まり、将来のエネルギー需給への大きなインパクトが指摘され、これが不確実性を生む大きな要因の一つとなっている。しかし、技術進歩やコスト低減のテンポ、実社会への普及には不確実性があるため、先進技術の社会実装や、エネルギー市場への影響に対してその動向を十分にフォローし冷静に分析して、将来の不確実性を可能な限り低減し、効果的な投資判断を可能にする措置が必要となる。

また、投資確保には予見可能性を高める政策支援措置も不可欠である。持続可能な開発シナリオで示されたように、低炭素化への貢献が期待される原子力への投資をいかに確保するかが重要な論点となる。電力市場における容量市場の整備や、英国での原子力も含めた低炭素電源の固定価格買取制度(FIT-CfD)など、エネルギー市場における原子力への投資の予見可能性確保を含めた政策の役割が一層重要になると想定される。

— 参考資料 —

- 1) 外務省, SDGs(持続可能な開発目標)持続可能な開発のための 2030 アジェンダ(アクセス日: 2018 年 3 月 9 日).
< http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/about/doukou/page23_000779.html >
- 2) 外務省, パリ協定-歴史的合意に至るまでの道のり(アクセス日: 2018 年 3 月 9 日).
< <http://www.mofa.go.jp/mofaj/press/pr/wakaru/topics/voll150/index.html> >
- 3) International Energy Agency (IEA) / OECD: World Energy Outlook 2017 (WEO2017). OECD/IEA, 2017

著者紹介



小宮山涼一 (こみやま・りょういち)
東京大学
(専門分野/関心分野)エネルギー需給分析, 電力システム, エネルギー安全保障

福島を訪ねるバスツアー

フリージャーナリスト 井内 千穂

年に一度、福島への日帰りバスツアーを開催している。2年前からこの企画に関わるようになった経緯はご縁の不思議というほかないが、「福島が実際どうなっているのか、今さらでもこの目で見て知りたい」という一念に導かれたのだろう。毎回「震災後の福島は初めて」という参加者もいて手応えを感じている。原発推進寄りの人たちから原発に批判的な人たち、そして、「どちらでもないが、よくわからない」という人たちまで、大型バス一台分の多様な参加者が共有する一日は、少なくとも、各々それなりの見識と人格を持った個人として顔を合わせ、同じものを見て、言葉を交わす貴重な機会には違いない。

国道6号線沿いに巡る沿岸部の町々。徐々に帰還が進みつつも、今なお目立つ無人の家々を目の当たりにした後、阿武隈山中の川内村に入り、原発からわずか15km圏内の里山で暮らすご夫婦を今年も訪ねた。樹々と花々の写真を見て、「きれいな所ですね。でも、ここも汚染されてしまったのでしょうか?」と言った知人もある。彼は決してバスツアーに参加しようとしなない。しかし、実際に足を運んでみて感じるのは、むしろ自然の偉大な生命力である。除染した敷地内の放射線量は0.4 μ Sv/h程度。低線量被ばくの健康影響には諸説あってははっきりしないが、頓着する気が失せるのは素人の直感というものか。手入れの行き届いた里山に、春は様々な山菜が芽吹き、夏にはモリアオガエルが産卵し、秋には珍しいキノコも生える。所々に見える窪みはタヌキやイノシシが掘った跡だ。

緑豊かな山林に降り注いだ放射性物質と自然の力がせめぎ合っている。そんな中で故郷の我が家に戻り、信念を持って自然と共生する里山の自己責任の営みを妨害する理由があるだろうか。一般食品の放射性物質の基準値として設けられた100ベクレル/kgという数字。山の幸に対する出荷制限や摂取制限。それらの規制は現地の実情に合っているのか? バスツアーの参加者と共に考え続ける。

Column

花が美しい理由

日本文理大学 工学部
特任教授 北岡 哲子

カンナの花が咲いた。

しかも1945年8月6日からわずか一か月半後、広島爆心地近く、75年間は草木も生えないと予想されていた場所に現れた命。奇跡すぎて一瞬の幻かと疑ってみたが、現在も原爆資料館でその花に直面できる、しかし、数多ある花の中で人気ナンバー1の薔薇でもなく、なぜカンナが選ばれたのだろう。

そもそもカンナという花は大昔、ブツダの強い霊力をねたんだ悪魔の投げた大岩が、命中せずに落下し砕け散り、破片がブツダの足指にささった。その傷から流れ落ちた血が大地に染みこみ生まれたという。

一方、ローマ神話によると、海の神が海から最も美しいビーナスを生み、陸の神が自分も美しいものを創りたいと泡から薔薇を創造した。この逸話をみても、壮絶な傷みを受容した地にふさわしい花はカンナ以外他にない。

同様の傷みを知る福島県浪江町には、林業で暮らす人々を支えてきた森がある。守りついできた樹齢100年の銘木の復活を目指し、森の健康をとり戻す術はあるのかチェルノブイリの研究者による調査が行われた。結果は森全体の放射性物質の分布は木に含まれているのが4%で91.5%が土壌にあるため、汚染されている樹を間伐しても除染にならず、線量が10分の1に下がるには100年を要し、土を全部剥ぎ取り木を植え直さなければ、林業は再開できない。報告をきく住民の表情は筆舌に尽くしがたいほど哀しかった。願わくば人々の涙が土の傷を癒し清め森が甦ってほしい。きっとそこに咲く花は浪江町民だけに微笑み、涙色に輝く光を放つに違いない。

原爆の東欧への影響

コメニウス大学
医学部英語コース 妹尾 優希

スロバキアよりこんにちは。原子力発電事故と原爆の両方を経験した日本は、2度にわたり東欧に大きな影響を与えました。今回は、日本の原爆が東欧に与えた影響についてお話しします。

スロバキアの首都ブラチスラバには、モラビア王国時代に建設された石の宮殿が、ハンガリー王国・オーストリアハンガリー帝国によって改装を重ね、様々な形に変わり続けた歴史のあるブラチスラバ城があります。このブラチスラバ城周囲には、第一次世界大戦から着工が始まり、冷戦時代にはブラチスラバ市の人口を大きく上回る760,000人が避難できる核シェルターが建設されました。このような、対核爆弾シェルターは東欧では珍しいものではなく、隣国ハンガリーには第二次世界大戦後より日本の原爆の影響を受けて建設されたHospital in the Rockという病院があります。この病院は、もともと1944年に始まったブダペスト包囲戦時に、戦傷を負った兵士の手当てに使用されていました。その後、第二次世界大戦後から1980年ごろまで、極秘の対核爆弾の設備が整った施設として訓練などに利用されていました。被爆した際には、St.John病院の関係者が72時間避難した後、外へ生存者を探す指令が出ていたそうです。現在は、美術館として一般の人も出入りでき、発令の説明、被爆者を手当てするための設備や、当時集められた原爆時の長崎に関する資料が展示されています。さて、次の投稿では日本の原発事故が東欧に与えた影響を探ってみようと思います。

Column

飯館村の山菜が教えてくれること

フリーライター 服部 美咲

福島市内の母子と共に飯館村の友人を訪ねた。飯館村などの阿武隈山系には、山菜や茸を楽しむ文化がある。この日も友人宅の裏山を散策し、母子と共に採った山菜を皆で調理して楽しんだ。大人たちは、計測した結果日本における食品の放射能濃度基準100 Bq/kgを超えないことや、国際基準が1,000 Bq/kgであることなどから合理的に判断し、裏山の山菜を食べる。そして母親や周囲の大人たちがごく自然に食べる様子を見て、子どもたちも自分で採った山菜をおいしそうに頬張る。人によって「安心」の判断基準が異なることは興味深い。

さて、一般的に抑うつ的な認知傾向を持った人は、個別の負の体験(仕事上の1度のミスなど)を過度に一般化したり過大視したりし(「自分は無能な人間である」と悩むなど)、それが抑うつ症状に繋がるとされる(Beck, 1976)。前田正治・福島県立医科大学教授らによると、福島県の妊産婦において、抑うつ傾向と放射線の遺伝的影響に対する不安が増幅しあっているという。震災や原発事故発災当時の心の傷が、ベースとなる抑うつ認知を生んでいる可能性も指摘される。

抑うつ認知は合理的思考によって補正される。放射線不安に対する合理的思考の獲得のために、自ら計測して納得することや、実際に収穫して食べるという体験は有効であるようだ。故郷の山菜の香りを再び味わい、笑顔を取り戻した住民もいる。地域の文化は人々の心の安らぎと確かに結びついている。

「地元」

東洋大学社会学部 渡辺 真由

私の地元は福島県いわき市。地元を離れて早二ヶ月が過ぎた。毎朝、地元では絶対にあり得ない程の満員電車の洗礼を受けて大学に通っている。空調の効いた車内は手元を凝視する人ばかりで、周囲の「当たり前」の景色を見渡す人などいない。私はいつも地元の景色を脳内で反芻する。「田んぼがないなあ」と流れゆくビルを眺めている。避難先で定住する友達、毎日の天気予報と共に流れる放射能測定値、高い防波堤、田んぼ。それが地元の「当たり前」の光景だ。

「地元は福島だよ」「…あ、そうなんだ」

自己紹介の際微妙な雰囲気が流れるのを、この二ヶ月間に何回も味わってきた。その度、私は現実を痛感するのだ。きっと、他の人達にとって「福島」は「フクシマ」であり、彼らの中で福島は震災当時のままなのであろう。大学の友達も原発のことを全然知らないし、どこか遠くで起きている出来事のように思っているような気がする。同じ国の中で起きたことなのに、東京にいると私自身その事を忘れてしまいそうになる。今も続いている見えない戦いや数値よりも、どこか誰かの浮世話の方を話題にするテレビ。皆疑問に思わないのだろうか。知ってもらいたいけど、腫れ物扱いされたくない。そんなモヤモヤとした気持ちが七年間私の中に棲んでいる。これも時間が経てばいつか、すっきりした気持ちになるのだろうか。

「地元は福島だよ」「行ったことあるよ！素敵だよね」

そんな会話をいつかしてみたい。

そして何より、よく分からない人達が叫ぶ内容に耳を傾けるより、「福島」に来て、見て、遊んで欲しいのだ。

Column

現状の「受容」では済まされない

東京大学大学院
工学系研究科 原子力国際専攻 渡辺 凜

「原子力のリスクが受容されていない」という文句にいつもモヤモヤする。第一、「受容」とはいったい、どのような心持ちを想定しているのだろうか。仏の御心のようなものか。

リスク一般に対する心構えがどのようなものか、自分の場合を思い返してみる。まず思いつくのは、リスクを意識していないとき。たとえば、初めて食中毒を経験するまでは、平気で生肉に触れた箸でご飯を口に運んでいた。次に、気にすると面倒だから、見て見ぬふりをするとき。たとえば、免許取りたての友達が運転する車に乗る場面などである。あとは、「気にしてたら生きてけないし…」と諦めるとき。もうひとつ、私には無縁で、原子力にも関係なさそうだが、スリルを楽しむ、という場合もある。

気にならない。面倒だから見て見ぬふり。諦め。

今まさにパニックに陥っている人を除けば、誰もがこれらの入り混じった気持ちで原子力によるリスクを「受容」しているのではないだろうか。

原子力業界ではしばしば、「原子力のリスクが受容されていない」ことが問題にされるが、原子力発電所が実在する以上、そのリスクは日本中で日々「受容」されている。現状を「受容」した上で、今後の原子力利用の継続や拡大に反対、あるいは慎重な意見を呈している人々がいるのだ。

原子力利用の賛否をめぐる議論は、現状を「受容」するか否かで片づく問題ではない。あくまで未来の話である。未来の話であるということは、ビジョンを語るということである。原子力利用にはどのようなビジョンがあるだろうか。それが答えられないうちは、議論の土俵にさえ立てないはずだ。

From Abroad

Scientific Wanderlust Across The Ocean

一海の向こうの研究放浪記, ノルウェー編一

Institutt for energiteknikk 築城 諒

北欧にノルウェーという小さな国があり、2017年に国連の調査で「世界で最も幸福な国」に、また英国のシンクタンクにより「世界で最も繁栄している国」に選ばれた(日本はそれぞれ51位と23位)。個人的見解では、この国は国土の美しさという点でも世界最高である。さらに地震も津波も火山も台風も豪雨も無い。そのノルウェーに住み着いて21年になる。その間、「ハルデン炉」として日本でも知られる研究所で仕事をした。仕事の仕方の(私が勤務した)日本企業との違いは極めて大きいですが、日本からノルウェーに転職した最大の理由がまさにこの点にある。

KEYWORDS: Norway, Halden, Institute for Energy Technology, Work Style, Daily Life, Culture, Folklore, Mythology

I. はじめに

最初のノルウェー滞在は1978年から79年にかけての13ヶ月間で、勤めていた日本の企業の海外留学制度を利用して、同国のHalden(ハルデン)という町のInstitute for Energy Technology(以下IFE)という研究所で仕事をした。「なぜノルウェーに?」というのによく訊かれる質問なのだが、この国はR.Stamm'lerの集合体燃焼コードHELIOS, S. Boerresenの軽水炉炉心シミュレータPRESTOの開発など、炉心性能計算の分野で重要な成果を上げていた。隣国のスウェーデンでは集合体燃焼コードCASMOがM.Edniusらによって開発され、またABBは軽水炉炉心シミュレータPOLCAを開発していた。さらに当時IFEでは極めて先進的な軽水炉の炉心管理システムの開発プロジェクトが始まったところで、私が勤めていた日本の企業もこのようなシステムに強い関心を持っていたために、この留学先はほとんどユニークに決まった。なおこのプロジェクトにより最終的にSCORPIOというPWR(後にVVERにも対応)の炉心管理システムが完成し、米国と欧州のいくつかのプラントに採用された。

この13か月間のハルデン滞在中、私はノルウェーに、特にIFEでの仕事の仕方に魅せられてしまい、日本に帰りたくない、ここで仕事がしたい、と強く思うように

なった。しかも留学期間の終わるころに、IFEから好条件のポジションのオファーがあった。迷いに迷ったが、結局この時は日本に帰った。企業から派遣された留学先から帰らなかったら、どれほどの人々に迷惑をかけるかを考えれば、これは仕方のない結論だった。

帰国してからもノルウェーとIFEのことが頭から離れたことは無かったが、1997年に勤めていた企業が早期退職者を募集したので、IFEに履歴書(CV)を送り転職した。以来現在まで21年間ハルデンに住んでいる。2014年にはIFEを定年退職したが、依然としてスウェーデンのリングハルス原子力発電所との仕事が残っており、現在も嘱託のような立場で仕事は続けている。

以下、本稿ではノルウェーでの仕事の仕方、生活、文化、民俗などについて日本との比較も交えて述べてみたい。ネットで検索すれば分かることはできるだけ書かない、個人的な経験であり日本では知られていないことどもを書こうと思う。

II. 仕事の仕方

あまり重要なこととは思えないかもしれないが、まず勤務時間について述べたい。というのは、これが日本とハルデンでの生活が大きく異なる原因なのだ。IFEの勤務時間は午前8時から午後3時45分で、昼食は20分で摂ることになっている(フレックスタイムなのだが、話に関係ないので固定勤務時間とした)。すなわち1日の労働時間は7時間25分。残業は例外的というか、私は同僚が残業するのを見たことが無い。自分もしたこと

Scientific Wanderlust Across The Ocean ; Norway : Makoto Tsuki.

(2018年4月22日 受理)

は無い。研究員にはタイムカードが無いので、実質的にはいつでも仕事をするかということ自分で決めていた。3時45分に終業すると、研究所と自宅は1kmほどしか離れていないので、4時前に帰宅できる。夏などは22時頃まで昼間であるから(いわゆる白夜)、ゆっくりと余暇を楽しむことができる。冬は逆に3時頃には真っ暗になるのだが、照明付きのスキートラックなどが町の郊外にいくつかあり、遊ぶことに不自由することは無い。

このような生活と、読者諸賢がご存じの日本の生活とが相当に異なることは明らかだろう。どちらが良いとか悪いとか言うことはできないが、私にはハルデンの生活の方が好ましい。

次に研究者としての仕事の仕方も、日本の私が勤務していた企業とは大きく異なる。IFEでは、研究者は基本的に成果さえ出せばその他のことはほぼ全く規制されない。このことで象徴的なのは、それ自体はどうでもいいことなのだが、服装である。日本では勤務時の服装は(多分)明示的に規制されてはいないと思うが、あたかも制服があるかのように皆同じ服装に統一されている。よくあるのは社内の売店で売っている社名入りの作業服を全員が着ている。一方IFEでは、暑いときに上半身裸でいる同僚がいたほどに制約がない。私は第二の皮膚ともいべきよれよれのジーンズとTシャツないしセーターで20年間を通した。なお服装が日本人に比べていい加減(あるいは自由)であることは、IFEだけでなく、ノルウェー全体がそうである。例えば銀行員の服装についても同様で、男性のネクタイなどは、生活していて何週間も見ないことが普通である。また同じことがノルウェーのみならず、全ノルディック地域についても言える。

測定した訳ではないが、私の生産性はIFEでは日本での二倍近かったのではないかと感じている。理由は、客先とか、開発成果を製品化する工場とかから来るクレームやら要求やらに対応していて何も生産していない時間がほとんど無く、また例の無意味な会議なども無いことである。(さらに掘り下げて、なぜそうなのかは、残念ながらここで説明する紙数がない。)また、職場の飲み会とか、カラオケとか、全社的な運動会とか、なんとか運動とか、かんとか月間の標語作りとか、企業活動にとって大変に重要なのであろうが、私にとって無意味なことが一切存在しないのも私の生産性と士気の向上に役立ったことは疑いない。

研究費については、IFEはindependent research foundationということで、日本に対応する形態の組織があるかどうかは知らないが、いわゆる親方日の丸的な組織では全く無い。研究費は自分たちでいわば市場から調達しなければならない。私は一匹オオカミ的な立場にいたので、研究費は全て自分で調達しなければならなかった。このため、欧州と日本を中心にマーケティングをして歩いた。マーケティング活動自体は、自分のやり

たいこと、やったことを他人に分かりやすく、魅力的に理解していただくということで、有意義かつ面白いことではあったが、日本で勤務していた企業に専門の営業担当者がいたことを懐かしく思い出したことを白状しなければならない。

海外で働く場合によく問題になるのは、労働許可証あるいは就労ビザの取得である。実は日本人にとってノルウェーの就労ビザを得るのは、一般にはそれほど簡単ではない。というのは、その仕事がノルウェー人でもって替えることができないことを証明しなければならないからである。知り合いの日本人で、ノルウェーの大学に留学し、卒業し、ノルウェーの企業に就職しようとして、企業もこの日本人を是非とも雇用したいと主張したにもかかわらず、就労ビザが下りなかったという例もある。幸いにも私の場合は、原子炉物理、特に炉心性能計算の専門家ということで、ノルウェーには当時ほとんど存在しないタイプの人材であったので、就労ビザは問題なく下りた。同様に日本の武道の教師とか、寿司職人なども簡単に労働ビザが獲得できると思われる。ノルウェー人に人材がほとんどいないからである。

学会組織が無いので国内の学会活動というものも当然無い。ただし隔年でノルディック各国の炉物理研究者が集まって研究発表をする“Reactor Physics in the Nordic Countries (RPNC)”という会議が開催される。デンマーク、フィンランド、ノルウェー、スウェーデンの4国が持ち回りで開催するが、第1回はスウェーデンのエーテボリで1983年に開催されている。因みに2007年にWestinghouseの主催でスウェーデンのVaesteraasで開催された第13回会議では、参加者が80名ほどで30篇の論文が発表された。参加機関はWestinghouse, Studsvik Scandpower, Vattenfall braensle, VTTなどの北欧系民間企業、Chalmers, Uppsalaなどのスウェーデンの大学、Risø, IFEなどの研究機関である。なお北欧で原子力産業がある国はスウェーデンとフィンランドだけである。ノルウェーとデンマークには研究機関しかない。ただし研究者同士は全く国境を感じない交流があり、学生も国境を越えて実習などに参加する。このような交流のツールとしての電子メールとインターネットは、いくら称賛してもし過ぎることはあるまい。

III. 生活

ノルウェーでの生活について述べよう。衣食住の衣については、上にも書いたが通常は日本よりも大幅にカジュアルで済む。これに慣れてしまったために、時に日本から来た視察団のような真っ黒な背広集団に会うと、異様な感じを覚えるようになってしまった。

ノルウェーの衣について一つだけ述べるとすれば、日本ではあまり知られていないと思うが、特別な場合(例えば憲法記念日とか結婚式など)にノルウェー人が着用

するブーナッド(Bunad)と呼ばれる男女の民族衣装がある。これはネットで画像を見るのが分かりやすい¹⁾。

ノルウェーに住んでいると言うと、寒いでしょう、と言われることが多いのだが、ノルウェーには氷点下30度(私がハルデンで経験した最低気温)に対応した衣服が完備しているので、それを着用すれば別段寒いとは感じない。東京で木枯らしに吹かれながらホームで電車を待つ方がよほど寒いですが、この場合明らかに我々の服装は状況にマッチしていない。本来は吹きさらしのホームではスキー場にいるような服装にすべきだろう。ノルウェー人ならそうする。ノルウェーには“THERE'S NO SUCH THING AS BAD WEATHER, ONLY BAD CLOTHES”ということわざがある。

次に食であるが、最大の特徴は食べるものの種類が限定されていることである。ノルウェー人は伝統的に肉(牛, 豚, 羊, それに狩猟対象獣類例えばヘラジカ, トナカイ, クジラなど), 魚(タラ, オヒョウ, 鮭, 鱒類), パン, ジャガイモ, そして根菜類を食べてきた。理由は不明だが, 動物の内臓類は好まないようである。魚は大型のもののみフィレしか食べない。チキン, 葉っぱ物の野菜(ほうれん草, レタスなど), 果物(リンゴと洋ナシだけは除く)などはこの20年で食べるようになった。最近では鮭とか味噌汁, 天ぷらなども好まれるようになった。ピザとハンバーガーは恐らくノルウェーで最も好まれる食品である。

海で獲れるものと言えば, 伝統的には海藻も貝類もウニもタコもイカも食べなかった。海岸でいくらかでも獲れる牡蠣やムール貝を食べない。多くの美味な小魚類も食べない。また上にも書いたが動物やチキンの内臓なども食べない。春になると無尽蔵に生えてくるワラビもゼンマイも食べない。最近では東洋系の移民が増え, そのため食料品店なども増えてきたので, 日本の食材や調味料なども入手できるようになったが, もちろん限られている。

日本ではあまり知られていないと思うが, ノルウェーの最も特徴的な食べ物はクリスマス・ディッシュではないだろうか。地方によって独特の料理があるが, 有名どころでは

ルーテフィスク(lutefisk): タラの肉を多量の塩とアルカリで処理したもの。塩抜きしてオープンで焼き, ベーコンとマスタードで食べる。グリーンピースのマッシュしたものとジャガイモなどを添える。lutefiskで検索すると詳細が分かるが, これが如何に食べにくいものであるかをめぐって多くのジョークがある。

ピンネショット(pinnekjoett): 羊のあばら肉を骨も一緒に塩漬(燻製にする場合もあり)にして保存したものを細く切った白樺の木質と一緒に蒸したものだ。

リッベ(ribbe): 豚のあばら肉にたれをつけて皮ごと焼いたもの。皮がカリカリになるので, 食べやすいように四角い切れ目を入れておく。厚い脂の層が付いているので物凄いカロリーではないかと思うが, 昔はそれくらい必要だったのであろう。

スマラホーヴェ(smalahove): 意味通り羊の頭を塩漬(さらに燻製にする場合も)にして蒸したもの。クリスマス・ディッシュの中でも最もグロテスクな外観の料理である。目玉と頬肉が美味しいと言われる。

リッベ以外は全て保存食である。私はスマラホーヴェ以外は食べてみたが, 正直言ってそれほど美味なものではない。これらの料理にはアクアビット(akvavit)という, 伝統的なジャガイモの焼酎を合わせる。

もちろんノルウェーにも美味なものはある。私が一番に押すのはシカのカルパッチョ, 次にライチョウ料理なのだが, これらは狩猟対象鳥獣であり, 残念ながら簡単には食べることができない。なおライチョウは日本では特別天然記念物なので, もちろん日本で食べることはできない。魚介類では天然もののサケマス類が大変高価ながら自慢できる(養殖物はリーズナブルではあるが, 脂が乗り過ぎているように感じる)。またベルゲンという西海岸の港町の埠頭でスペイン系の連中が(どうみても素人なのだが)作る疑似地中海系の屋台料理も美味。

纏めるとするならば, 有り体に言ってノルウェーの伝統的な食べ物は私にとってはあまり美味しくは無いが, この20年で食生活は驚くほど変化し, 多様になったので, 昔のようにこの分野で不満が溜まるようなことは無い。

衣食住の最後は住だが, ノルウェーの住宅の大半は木造である。冬の防寒を第一に考えて造られており, 壁には断熱材を入れ, 窓ガラスは二重ないし三重で, 電気ヒーターが十分に配置されており, 低温の時期でも家の中に限っては日本の家屋よりもはるかに暖かい。暖房は基本は電気であるが, 居間あるいは食堂に暖炉ないし薪ストーブがあることが多く, 松や白樺の薪などを燃やすのはひとつの楽しみである。私が見るところ, ノルウェー人は衣食住のうちでは住を最も重視しており, 例えば台所をきれいに保つために, どんなに美味であろうと油が撥ねるような料理はしない, というようなところがある。

ノルウェーの住居について, 日本ではあまり知られていないと思われるのがセーテル(Seter)という夏の放牧地での生活である。例えば羊などの家畜を飼っている農家では, 秋冬春は谷底の自分の農場に通常の生活をしているわけだが, 夏になると山の上のセーテルに家畜の放牧に出かけ, そこで夏を過ごす。ある意味別荘のようなものである。北欧の夏は天気が良ければ至る所天国のよ



図1 初夏のノルウェーの森林はこの上なく快適
左から2番目が筆者

うな快適さなので(図1), セーテルの暮らしはこの上なく良いものということになっている。今ではセーテルを改造して旅行者を宿泊させるところもある。

IV. 文化

画家のムンク, 作曲家のグリーグ, 劇作家のイブセンの3人は世界的に知られている。あまり知られていないが偉大な数学者のアーベルはノルウェー人である。文化のジャンルに入るかどうかは微妙だが, 人類で最初に南極点に到達したのはノルウェー人の探検家アムゼンである。世界的な芸術家, 学者, 探検家がこれだけしかいないと見るか, 人口500万人そこそこの国にこんなにいると見るか, よく分からないが, 現在, この国での文化的生活はかなり偏っているように私には見える。どう偏っているかと言うと, 音楽では, プロと呼べる演奏家の演奏を聴く機会が, 例えば東京に比べると極端に少ない。美術については, ムンクはオスロに行けば大量に見られるが, その他の美術系作品は国内ではまず見る機会が無い。日本のように海外の有名作品をまとめて借りてきて大美術展を開くようなことは, この20年間に一度も聞いたことが無い。誤解を恐れずに言えば, ノルウェー人は音楽にせよ美術にせよ, 世界で最高の演奏・最高の作品を見聞きすることを望んでいないように思える。

唐突だが, ノルウェー人は紅茶を比較的低温のお湯で淹れるため, 英国人などに“dreadful”などと酷評されている。そこで以前に研究所のノルウェー人に, 「何故あなた方はそんなにぬるいお湯で紅茶を淹れるのか? 沸騰しているお湯で淹れた方が美味しいのに」と聞いたことがある。それに対する彼の答えは, 「そういう洗練されたことは大陸の文化の進んだ人々に任せておく。我らはこれでいいのだ」というものであった。私には理解できない考え方だが, これがこの国の文化的生活すべてに共通するのかもしれない。

この「我らはこれでいいのだ」という精神が, 現在進行形ではっきり見られるのが建築の分野である。一例とし

て2008年に完成したオスロの新しいオペラハウス²⁾を挙げよう。この建物は完成の年にバルセロナの世界建築フェスティバルで文化賞を得たのだそうだが, 私は世界のオペラハウスの中で最も醜いと感じる(あのシドニーの同類と比べても, 軍配はオスロに上げたい)。そう考えるのは私だけではない³⁾。

もちろんノルウェーにも素晴らしいパフォーマンスが存在する。その大部分は私が思うに, ノルウェー独特の, あるいは伝統的な演しものであり, 例えば毎夏グドブランド地方のゴロという湖の岸で開催されるペールギュントの野外劇である。イブセンの原作にグリーグの音楽が付いた古典的なミュージカルで, 白夜の湖畔と言う背景もすばらしく, これまでに三回も見に行ってしまった。ペールギュントは難解というか, 多くの解釈が可能な演劇であるので, 何度見ても面白いという性質があるのだろうか。まあ私はグリーグが大好きなので, 曲さえついていれば舞台はどうでもいいという所もあるが。これ以外にも, 民族楽器ハルダンゲル・フィドルなどの野外演奏はとにかく背景がいいので魅力的である。

V. 民俗

ノルウェーはほぼ500年間, 福音ルーテル派の信仰を国教とするキリスト教国であったが, 2017年に国家と教会が正式に分離され, 国教会は独立法人となり, 牧師は公務員ではなくなった。私の狭い交流範囲では, 信心深いノルウェー人は一人もいない。クリスマスでさえ, 教会に行く知り合いは一人もいなかった。

西暦1000年頃にキリスト教が導入される以前には, いわゆる北欧神話の神々が信仰されていた。ワグナーの楽劇「ニーベルングの指輪」の主人公ジークフリートの妻であるブリュンヒルデはヴォータンの娘なのだが, ヴォータンとは北欧神話の主神である。ノルウェー語でこれらの名前はそれぞれシグルド, ブリュンヒル, オーディンとなる。余談だが, これらの名前は今でも使われていて, キリスト教がノルウェーに最初に導入された西暦1000年当時の王様の名前オラフ, ホーコン, ハラルなども現役の名前である。ノルウェーでは一部の日本人のように独創的な名前を作り出すという発想は無く, 伝統的なものを取って付けるようだ。

ノルウェーにキリスト教を導入するのは, 例によって血腥い事業だった訳であるが(聖オラフは改宗に抵抗する者を容赦なく拷問・殺戮した), 面白いのはこの事業の途上でクリスマスが作り出されたことである。これについては諸説あるのだろうが, 北欧の冬至の祭り「ユール」がクリスマスの起源の一つであることは確かだろう。12月25日にイエスが生まれたなどということは聖書のどこにも書いてない。ノルウェー人に抜き難く根を下ろした習慣を拷問によって止めさせるか, こじつけて取り込むかを熟慮した結果, 後者としたに違いあるまい。つい



図2 ヨートゥンハイメン(Jotunheimen)山塊の氷河に覆われた山々、神話に登場する巨人族の棲家である

でに赤い三角帽子を被ったノルウェーの妖精「ニッセ」がクリスマスの妖精「ユールニッセ」になった。少なくともニッセの赤い三角帽子がサンタクロースの衣装の一部に取り込まれたのは間違いないと信じる。ノルウェーでは今でもクリスマスはユール(Jul), サンタクロースはユールニッセ(Julenisse)と呼ばれる。

北欧神話の神々は現代の英語の曜日の名前にも残っている。Tuesday, Wednesday, Thursday, Friday はそれぞれノルウェー語では Tirsdag, Onsdag, Torsdag, Fredag となるが、これらは北欧神話の戦争の神 Ty, 主神 Odin, 雷神 Tor, Odin の妻 Frigg に由来している。これらの神々は、キリスト教が導入されると全て妖怪に格下げになった。

面白いのは、同様のことが北欧神話以前の神々についても起こったと想像できることである。北欧神話の時代には、トロールと呼ばれる妖怪がいた。

ノルウェーの民話は、1840年代にアスビョルンセンとモーによって⁴⁾収集、出版されたが、民話の中ではトロールが大活躍する。例によって古い話ほどトロールは恐ろしく、強力で人間は全く太刀打ちできないが、時代が下ると次第に人間にしてやられるようになり、最終的には無能かつ滑稽な道化になってしまう。私の想像ではトロールは自然の暴威を象徴していた古代の神々が次第に人間に征服されて行く過程を表しているように思われる。その零落の果てが日本でも人気のムーミン・トロールだろう(あれは河馬ではなくてトロールなのだ)。なお作者のトーベ・ヤンソンは、後になってムーミンはいわゆるトロールではないと言ったそうだが、もはやそのような訂正は効かないほどあれはいわゆるトロールとして流布している。

協道にそれるが、ムーミンについてももう少し。日本ではこの話はフィンランドに属すると思われるのではないだろうか。センター入試でムーミンとフィンランド語を結びつけるのが正解とした問題があっちょとし

た騒ぎになったと記憶する。しかしながらムーミンはスウェーデン語で書かれた物語である(作者のトーベ・ヤンソンは、フィンランドに住むスウェーデン人の少数民族に属する)。そうして、トロールとは本来スウェーデン、ノルウェー、デンマークなどのスカンジナビア諸国民の伝承に登場する妖怪である。フィンランドはスカンジナビアには属さない、と言うと驚く日本人は少ないが、伝承的には全く異なる国なのだ。同じことはサンタクロース(ユールニッセ)についても言える。すなわちニッセもスカンジナビアの精霊であり、フィンランドとは何の関係もないが、いつの間にかフィンランドのある寒村がサンタクロースの故郷の如く思われている。私はフィンランド人の商才に感銘を受けるものである。商才だけでなく、先の大戦においてソヴィエトの大軍に対して勇敢に立ち向かったことには深い敬意と尊敬の念を持つものである。

民俗かどうかはともかく、最後に私には理解できないノルウェー人の思考をもう一つ記しておく。ノルウェー人同士の争いの最多の原因は、木を切る切らないの対立なのだそうである。それも森林の広い面積の全面的な伐採のような大事ではなく、道端の立ち木を一本切る切らないで地方新聞に載るほどの騒ぎになる。切ろうとする理由は、木が老齢のために倒れてきていろいろ危険だからなのだが、理解できないのは、既に樹木は有り余るほど生えているのに(ノルウェーは北部を除き、市街地の周囲は無限に広がる大森林である)、その一本の危険な木を切るのに反対する連中の思考である。

VI. おわりに

ダイヤモンドという週刊誌が2015年に「北欧に学べ」という特集をしている⁵⁾。記事の中に「北欧成功の5か条」というリストがあり、その第一条は、「人口が少なく、最初から世界志向」である。IFEはノルウェー国内に原子力産業が無いので、否応なく初めから国外に市場を求めなければならないから、まさにこの条文に当て嵌まる。自国で原子力発電を行っていないということは、IFEのような組織にとっては不利なことだとは思いますが、日本のように製品がガラパゴス化することは無く、そもそも働く人間としては活動の場が世界に広がっている方が面白い。

同リストの第五条は、「カリスマ経営者は必要ない」である。これは誤解を与える表現だが、説明を読むと、「上下関係が無く、フラットな組織」ということを言いたいらしい。これは社会全体がそうなので、企業組織でもそうになっているだけだと私は考える。日本では逆に社会全体にある種のヒエラルキーが厳存しており、例えば日本語の一人称の代名詞は、対話相手との上下関係により変化する(私, 僕, 俺, 等々)。リベラルを標榜する新聞も、人名に「氏」を付けたり「さん」で済ましたりして毎日この

階層構造を確認している。ノルウェーでも、多分国王の一族とそれ以外の国民には何らかの区別があるとは思いますが、それ以外には人々の間に上下関係のようなものは全く感じられない。日本の階層構造とノルウェーのフラットな構造のどちらが良いのか私には分からないが、どちらが好きかと問われれば、私はノルウェーの方が好きと答える。

以上のような事情が、私が今のところ全然日本に帰る気がせず、ノルウェーで右往左往している所以である。

— 参考資料 —

- 1) <http://www.norskebunader.no/nb>
- 2) <https://udmovement.exblog.jp/8546106/>
- 3) <https://www.youtube.com/watch?v=2OPrS27jahc>
- 4) <https://www.britannica.com/biography/Asbjornsen-and-Moe>
- 5) <http://dw.diamond.ne.jp/list/magazine?isd=2015-03-14>

著者紹介



築城 諒 (ついき・まこと)

Institute for Energy Technology
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 特に軽水炉の炉心性能計算。最近では計算機シミュレーション全般に関心が移りつつある。



書籍販売のご案内

■ 『東日本大震災における原子力分野の事例に学ぶ技術者倫理』

一般社団法人日本原子力学会 倫理委員会編, B5 判 73 ページ, 定価 1,000 円(税別・送料別)

本事例集は、2011年3月11日に発生した東日本大震災における原子力発電所に係わる活動を事例として、今後遭遇するかもしれない事象に対してどのように向かい合ったらよいか、今、備えておくべきことは何なのかを倫理的側面から考える教材として作成したものである。

倫理問題は、ある日突然やってくるものである。そのときに冷静な判断ができなければ技術者としての責務を果たせない可

能性があり、結果として大きな災禍にみまわれることも考えられる。そのような観点から今回の事例を通じて、さらに倫理観を向上させることは重要である。事例はいずれも実際に起こったことであり、リアリティをもって読み進んでもらえるものと考えられる。そうすることで、より効果的に理解が促進されるものと思われる。(本書「事例の活用について」より抜粋)

■ 『「福島第一原子力発電所の事故に関するセミナー」報告書』

一般社団法人日本原子力学会 原子力安全部会編, A4 判 152 ページ, 定価 953 円(税別・送料別)

本書は、原子力安全部会が2012年2月17日より3日間にわたって開催した、福島第一原子力発電所事故に関するセミナーによって得られた教訓と、当部会幹事によって検討された結果をとりまとめたものである。第1回セミナーでは、事故にかかる課題全般についての討議がされた。第2回から第5回のセミナーでは、特定の課題について、当部会、学会、その他の参加者による討議がなされた。ここで取り上げられた課題は、安全設

計、シビアアクシデントマネジメント、使用済み燃料プールの安全性、および緊急時対応である。第6回、第7回セミナーでは、他のプラント、すなわち福島第一の5号機、6号機、福島第二原子力発電所の4基、女川原子力発電所の3基、東海第二原子力発電所の1基で起きた事象についての討議がなされた。〔「概要」より抜粋〕

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



プラントへのIoT活用と安全・セキュリティ対策

セキュリティ心理学からの考察

情報セキュリティ大学院大学 内田 勝也

サイバーセキュリティ対策は技術対策と考えられるが、実際には「人間」を考えることが重要である。システム/セキュリティ機器の作成も人間であり、それらの管理や利用するのも人間である。このような状況を考えれば、人間の問題として、セキュリティ対策を考えることが大切になる。このような観点から、人間の脆弱性を踏まえて考えたのが、セキュリティ心理学である。今後、ますます発展するIoTのセキュリティでも重要な要素になると考える。

KEYWORDS: *Security Psychology, Security Management, Information Assets, Omission, Crew Resource Management*

I. はじめに

1. 「情報＝風」論

「誰か風をみたことがあるでしょうか?」から始まる「風」という童謡をご存じの方も多いが、この童謡は、英国のクリスティナ・ジョージナ・ロゼッティの詩に、大正10年、西条八十が訳詞し、草川信が作曲をした。この詩では、風は感じるが見えないと詠っている。

では、情報やデータを見たことがあるだろうか?

「紙に印刷されている」とか、「コンピュータの画面に表示されている」との回答があるが、紙という媒体に印刷されている、あるいは、コンピュータのディスプレイに表示されているのであって、媒体があって始めて情報やデータであると考えられ、情報やデータそのものとは考え難い。

我々が回答しているものは、情報そのものでなく、情報が保存されている(と思われる)物理的なものを示している。

風と同じように、「見えないもの」は保護・保全できない。そのため、それが保存されている物理的に見える印刷物やコンピュータ等を保護・保全することになる。

「情報」の場合では、①関連する人間、②テクノロジー、

Applications of IoT to plants and issues of safety and security on the applications(3); Review from security psychology : Katsuya Uchida.

(2018年2月23日 受理)

■前回タイトル
セキュリティ・安全技術

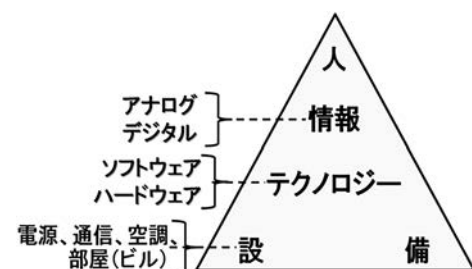
③電源や通信、空調と部屋・建物などと、④それらにある情報そのものを保護・保全する。情報を含め、関連するものを「情報資産」と定義している。

もちろん、電源や通信等は部屋・建物から更に外部に広がっており、更に広範囲で考える必要があるとの指摘もあるが、通常、その部分は、第三者の管理部分で、①から④の棄損や窃盗等から保護・保全することを、「情報セキュリティ」とか「サイバーセキュリティ」の分野と考える。

なお、第三者の管理部分は、何らかの事故などにより、供給されない状況に対して、「事業継続計画(BCP)」で、その対応を考えるが、第三者の管理部分の改良・改善には通常係わらない。

2. IoTとは?

「IoT」は、英語ではInternet of Thingsで、「モノのインターネット」と訳されるが、日本語は単数と複数の区



【人、情報、テクノロジー、設備】、ひとつ欠けてもセキュリティを確保できない可能性がある

図1 情報資産の概念図

別が曖昧で、実際は、「色々なモノのインターネット」との考えである。もちろん、単にインターネットに繋がっているだけでなく、繋がっているモノ同士の情報交換・情報共有があって始めて有効になる。

色々なモノの多くがインターネットと繋がれば、既存のソフトウェアの利用が増え、そのソフトウェアの脆弱性が見つかれば、そこを攻撃される可能性も増える。標準ソフトウェアでは脆弱性の数は少なくなるが、脆弱性が放置される可能性があり、攻撃される可能性は高い。

II. セキュリティにおける騙しの考察

1. 誰が騙すのか？

従来、「騙し」では、ギリシャ神話にある「トロイ戦争」のように、何らかの道具を利用するが、基本は人間が人間を騙すと考えてきた。

コンピュータ時代、特に、IoT や AI 技術 (Artificial Intelligence: 人工知能) の高度化を考えると、人間が人間を騙すだけでなく、①人間が機械を騙す、②機械が人間を騙すことも考える必要がある。

図2では、「人間 (People)」と「機械 (Machines)」, 「人間と機械の統合化 (People & Machines)」での騙し・騙されを考えた。

ここで、

- ①人間：人間が対面で行う場合や単純な機器 (電話, FAX, 郵便等) を利用して行う騙し (騙される側も同じ, 以下同様)
- ②機械：内蔵プログラム (Programmable/Programmed) を持つ機械/機器が行う騙しで、最近では単純なプログラムだけでなく、AI 技術を利用したものが増えている。
- ③人間・機械：上記①, ②の両方の機能を持って騙すもの

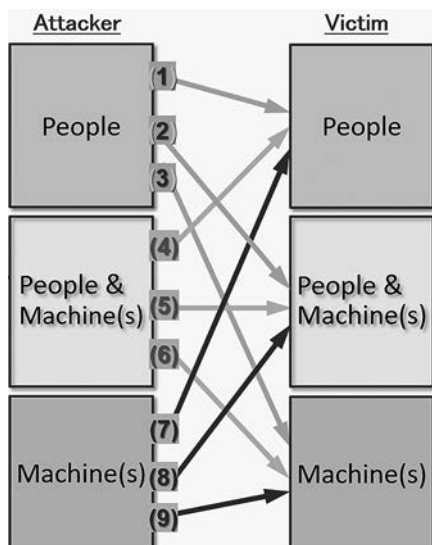


図2 攻撃者 vs 被害者

2. 騙し・騙され事例

図2の1~9までの中で、特徴的なものを説明する。

- ・「1. 人間⇒人間」(標的型電話攻撃)で、2012年に首都圏近郊自治体で発生した「ストーカー殺人事件」では、ストーカーは被害者の詳細な住所の取得を依頼し、依頼された経営者は、ソーシャルエンジニアリングの1つである「誘導質問術」を利用し、自治体職員から個人情報情報を盗取したと考えられる¹⁾。
- ・「6. 人間・機械⇒人間・機械」(標的型メール攻撃)で、メールに興味のある内容やタイトルをつけ、添付ファイルをクリックさせるものがある。

例えば、2016年6月に発生した旅行会社のグループ会社で発生した標的型メール攻撃は、送付元 (From) のメールアドレス表示は正しかったが、送付元には当該アドレスは存在せず、また、添付ファイルの内容が旅行会社に関する情報でなかった。このため、返信をしたが、「当該メールアドレスが存在しなかったため、発信メールが届かない (Delivery has failed to these recipients or groups:)」とのメッセージが返送された。標的型メール攻撃の教育・訓練を毎月実施されていたが、クリック後の対応教育・訓練が考慮されておらず、未達メール対応が放置され、情報漏えいを許した^{2,3)}。

公開された情報からの判断だが、訓練は実施されていたが、「クリック率を下げる」ことが中心だと思われる。攻撃メールを誤ってクリックした後の対応が十分でなく、「未達メール」等の対応訓練は行われていなかった。攻撃は年々進歩しており、新たな攻撃手法が採用されているため、従来の攻撃だけでなく、「想定外」への対応を考慮した教育・訓練が必要だと思われる。

情報漏えいは未達メール受信後、4日程度後から始まっており、未達メール受信時に対応ができていれば、情報漏えいを防ぐことができた。

- ・「7. 機械⇒人間」(人間になりすます)カナダの出会い系サイト「Ashley Madison (アシュレイ・マディソン)」事件では、男性利用者とチャットをしていた女性は生身の女性でなく、音声ボット (AI) が女性になりすまし、男性利用者を騙していた⁴⁾。
- ・「9. 機械⇒機械」(プログラムの脆弱性攻撃)インターネットでのTCP接続は、クライアントとサーバ間で、「Three-way handshake」(①SYN, ②SYN ACK, ③ACK)ⁱを実施した後に通信が始まるが、クライアントが③ACKパケットを送らないと、Three-way handshakeが完成せず、サーバは最後の「③ACK」パケットを待ち続ける。大量の「①SYN」パケットを送

ⁱ SYN: 同期 (synchronize の略) ACK: 肯定 (acknowledge の略)

付すれば、サーバは大量の「③ ACK」を待つことになり、サーバの処理能力が大幅にダウンする

Ⅲ. セキュリティマネジメント、セキュリティ心理学からの対応

1. 歴史に学ぶ

従来、人間の心理的な弱さを攻撃する「ソーシャルエンジニアリング」では、人間が人間を騙すと思われているが、現在は、「Ⅱ. 2 事例」からも分かるように、人間だけではなくなっている。

ドイツの「鉄血宰相」と言われた、オットー・フォン・ビスマルクの言葉の通り、「賢者は歴史から学ぶ(a wise man learns from history)」は、セキュリティの世界でも同じである。

セキュリティインシデント(事件・事故)の簡単な情報収集(データベース化)を行っているが、以下は、IoT 関連のインシデントと考えられる。

- ・1994年01月 書籍「Secrets of a Super Hacker」の「Appendix B: Common Defaults」に UNIX で利用される既知のユーザ ID、パスワード(以下、ID/PW と記す)は 50 余りの単語が利用されていると記述している⁵⁾。
- ・2004年10月 インターネット接続の DVD ビデオレコーダーの LINUX オペレーティングシステムが既知の ID/PW になっていたため、「踏み台」にされた⁶⁾。
- ・2010年11月 国内の官公庁、企業、大学等に導入されている「ネットワーク接続の複合機」に保存されているイメージファイル(コピーや FAX、印刷に利用したファイル)が、複合機の ID/PW が既知になっており、外部からのアクセスでイメージファイルが盗取され、一部が公開された。
- ・2013年11月 監視カメラの多くがインターネットに接続されるようになり、既知の ID/PW を利用しているケースでは、監視カメラの映像が丸見えになっていた⁷⁾。
- ・2015年01月 WiFi ルータの初期 ID/PW がメーカー/機種毎に一律で、ただ乗りや乗っ取りが発生した。
- ・次に来るのは？(自社製品/自社利用製品【IoT 製品】の可能性は？)



- ①脆弱性の指摘：書籍「Secret of a Super Hacker」
- ②踏み台：インターネット接続ビデオレコーダー
- ③情報漏えい：ネットワーク接続複合機
- ④無権限アクセス：WiFi ルータ
- ⑤ライブ映像のぞき見：ネットワーク接続監視カメラ

図3 同種インシデントの時系列分析

同種のインシデントを時系列的にみると、全てインターネット接続の課題で、「Internet of Things」でのインシデントとも考えられる。次は、IoT 機器の可能性も高く、自社開発/利用の IoT 機器を導入した場合、リスクを考えた対応が大切になる。

図3「同種インシデントの時系列分析」は、これらをまとめたものだが、「モグラ叩き」的セキュリティ対応では見えなかったものも時系列(歴史)的分析で、明確になることも多い。

2. 他分野の知見から学ぶ

ビスマルクの考えからは、従来の情報セキュリティや IoT 等のセキュリティ分野における過去の知見からだけでなく、他分野での知見も参考にできる。

(1) CRM (Crew Resource Management)

1976年、NASA(米国航空宇宙局)は技術や経験豊富なクルー20組を集め、シミュレータを使った実験を行い、問題点を明確にした。即ち、問題の多くは技術や技量の問題でなく、人間の問題(リソースマネジメント)であることが判明した。チーム・組織でのインシデント対応訓練が事故の未然防止や事故拡大を防止する。このことは、IoT セキュリティでも有用と考えられる。

当初、CRM は、Cockpit Resource Management と言われていたが、キャビンアテンダントや整備士等、関係者を含め、Crew Resource Management と呼ぶようになった。

また、かつて CRM では悪天候時に、格納庫(Hangar)に関係者が集まり、過去のインシデントや回避方法等の情報交換を行い、「安全文化」の構築・共有を行った。これを「Hangar Flight」と呼んでいる。

(2) Team STEPPS (Team Strategies and Tools to Enhance Performance and Patient Safety)

CRM の考えを医療分野に取り入れたもので、パイロットを頂点とした権威勾配が航空業界にあるように、病院でも、医者を頂点とした権威勾配があり、それらを越え、チームとして役割を果たすことが重要であることを学ばせる。

(3) 利用者側での対応

CRM や Team STEPPS は、利用者側からのセキュリティ対応と考えることができる。

高度で緻密な設計が行われ、それが実装され、セキュリティの技術ツールが導入されても、100%完全には防ぐ事ができない。これは、実装までの段階でも、運用段階でも脆弱性が発生する可能性があるためである。2002年7月に、米ホワイトハウスのサイバーセキュリティコーディネータ、ハワード・シュミット(Howard Schmidt)は、2001年米国防総省の調査では、97%~98%は、「パッチⁱⁱを適用していなかったか、設定ミス」だと述べている。

システム設計やシステム構築側を考えると、パッチ未適用や設定ミスのようなヒューマンエラーの除去を考える必要がある。設定ミスの多くは、単純なヒューマンエラーだと考えられ、また、パッチ未適用は、「不作為」によるヒューマンエラーと考えることもできる。これは、サイバーセキュリティでは、悪意を持った第三者が攻撃を仕掛けることもあり、何もしなかった(不作為)ことが、結果としてインシデントに繋がる可能性がある。このような不作為でのインシデントは、「窃盗」でもある。無施錠で近隣に外出したため、「空き巣」被害を受けた例を考えれば明らかであろう。

(4) 攻撃者いろいろ！

歴史から学ぶだけでなく、今後のIoTでは人間が関与する割合が低下し、機器(Smart Devices)やAI技術などの関与が高まれば、図2に示した「機械」部分が大きな割合を占めると考えられる。

騙しやソーシャルエンジニアリングは飛躍的に広範囲なものになり、それらの調査・分析も必要になる。攻撃相手が人間であるか、機械(AI等)であるかの判断をすることも困難であり、ますます巧妙になると考えている。

(5) セキュアデザイン, セキュアプログラミング

従来の情報セキュリティでは、ネットワーク構築時点や構築後の管理・運用段階での安全確保が中心と考えられがちであるが、システム全体を考慮して安全を確保することが大切である。今後、ますます増大するIoT機器では、IoTの開発・設計段階やプログラミング段階のセキュリティ対策、即ち、セキュアデザイン、セキュアプログラミングは情報セキュリティより遙かに重要になり、機器認証だけでなく、心理学や認知科学の知見を考慮した利用者目線での設計も必要だと考えている⁹⁾。

IV. まとめ

国内では、サイバーセキュリティ対策は技術的対策が中心だが、海外では、2002年、OECD(経済協力開発機構)の「情報システム及びネットワークのセキュリティのためのガイドライン～セキュリティ文化の普及に向けて～」の公表以降、「セキュリティ文化の確立」が重要なものであると考えられるようになってきた。

また、サイバーセキュリティ対策として、人間への対応、即ち、心理学や行動科学、犯罪学等の知見を取り入れるようになってきた¹⁰⁾。

このような傾向は、IoT分野でも同じであると考えている。

－ 参考資料 －

- 1) 内田勝也, 誘導質問術からみた個人情報漏えいの考察, 情報処理学会誌, Vol. 56 No. 12, pp. 2219-2229 (Dec. 2015).
- 2) (株)ジェーティービー, 個人情報流出の可能性のあるお客様へのご連絡について, 2016年6月.
<http://www.jtbcorp.jp/jp/160616.htm> (既に削除されている)
- 3) 日経コンピュータ, [詳報]JTBを襲った標的型攻撃, 2016.06.15, 日経BP.
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/column/14/346926/061500549/>
- 4) 日経テクノロジー, 男性の相手は「会話ロボット」, 不倫サイトが見せた技術力, 日経BP.
<http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/column/15/425482/092500020/>
- 5) Knightmare, Secrets of a Super Hacker, Loompanics Unlimited, 1994.01.
- 6) Internet Watch, 東芝, HDD搭載DVDレコーダ「RD」シリーズが「踏み台」になる危険性, 2004.10.06.
<http://internet.watch.impress.co.jp/cda/news/2004/10/06/4882.html>
- 7) 読売新聞, 監視カメラ覗き見? パスワード未設定が原因か, 2016.01.22.
<http://www.yomiuri.co.jp/science/goshinjuryutsu/20160122-OYT8T50085.html>
- 8) Government Technology, Security First, 2002.07.01.
<http://www.govtech.com/security/Security-First.html>
- 9) D. A. ノーマン, 野島久雄訳, 誰のためのデザイン? 増補改訂版一認知科学者のデザイン原論, 新曜社, 2015.04.
- 10) OECD, 情報システム及びネットワークのセキュリティのためのガイドラインセキュリティ文化の普及に向けて(仮訳), 外務省, 2002.07.25.

著者紹介



内田勝也 (うちだ・かつや)

情報セキュリティ大学院大学 名誉教授
セキュリティ心理学, セキュリティマネジメント, リスクマネジメント等, サイバーセキュリティ分野における人的対象の研究およびコンサルティング

ⁱⁱ プログラムの一部を更新し、バグ修正や機能変更を適用する処理のこと

ミクロ～マクロレベル現象の粒子ベース シミュレーション～課題と展望～

第1回 粒子法による大規模津波解析と 鉄道を対象とした解析への取り組み

鉄道総合技術研究所 室谷 浩平

粒子法は、計算精度と計算コストの面で格子法に劣るが、境界面が複雑に変形し合うような解析や、多数の接触判定が必要となる解析では、大きな力を発揮する。本稿では、粒子法が得意とする境界面が複雑に変形し合うような解析例として「複雑な内部構造を持つ地上構造物の津波浸水解析」と「車輪・レール間の水膜挙動解析」を紹介し、多数の接触判定が必要となる解析例として「浮遊物の挙動解析」と「着雪解析」を紹介する。

KEYWORDS: *particle method, MPS, tsunami analysis, inundation analysis, splash analysis, snow accretion analysis, large scale computing*

I. はじめに

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法や MPS (Moving Particle Simulation) 法に代表されるラグランジュ記述による粒子法は、複雑な境界条件の変化に適した計算手法であるため、大きな期待が持たれている。

粒子法は、計算点である粒子が流れに沿って移動するため、特別な処理を行うことなく大きな変形や不連続面を扱うことができる。また、粒子法は、計算アルゴリズム内で近傍粒子間の接触判定を行うため、多数の物体同士が接触判定を必要とするような解析と連携することが容易である。これらの解析は、FDM (Finite Difference Method), FVM (Finite Volume Method), FEM (Finite Element Method) に代表される格子法では、メッシュに関する幾何的操作が発生するため、格子法の苦手とする解析である。

一方で、粒子法には、格子法に比べて計算精度が低いうえ、計算コストが大きい欠点がある。計算精度が低い理由は、全ての変数を粒子の中心点のみに配置するため、境界を厳密に定義することが苦手であること、スタックカード格子を用いることができず計算の安定性が低

くなることが挙げられる。これらの粒子法の欠点は、粒子法の利点である全ての変数を移動する計算点に配置することから発生している。つまり、粒子法は、格子法では困難な解析を容易に行うことができる長所があるが、計算精度に関しては格子法に劣るという欠点もある。

さらに、現状の粒子法では、解析領域に粗密をつけることが難しいため、体積に比例した粒子数が必要となる。そのため、同程度の解像度の格子法に比べて多くの計算点が必要になる傾向にある。また、粒子法は、近傍粒子間で接触判定を行う必要があるため、同程度の計算規模の格子法に比べて10倍以上の計算時間が必要となる。このように、粒子法は、計算コストにおいて格子法よりも劣っている。なお、このことは、大規模計算による恩恵が、格子法より粒子法の方が大きいことを意味していると、筆者は考える。そこで、われわれは、粒子シミュレータをスーパーコンピュータ向けに改良することで、パソコン1台で解く場合の100倍以上の高速化と大規模化を実現している。

粒子法は、格子法に代わる解析手法ではなく、格子法が苦手とする解析を安定的に解くために用いる手法であると、筆者は考えている。本稿では、粒子法の長所を生かした解析例として、津波解析と車輪・レール間の水膜挙動解析、鉄道車両への着雪解析を紹介する。

What can be achieved with particle simulation? -challenge and foresight-(1); Large-scale tsunami simulation and challenge in railway simulation : Kohei Murotani.

(2018年1月22日 受理)

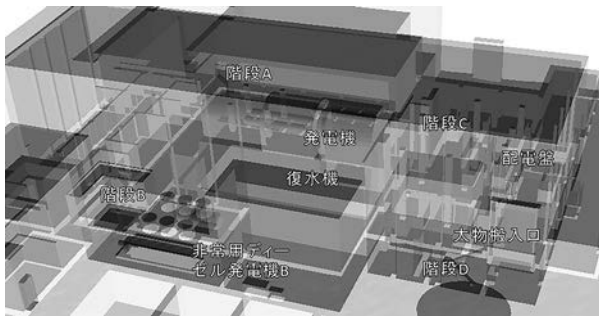


図1 1号機タービン建屋の解析モデル

II. 津波解析

1. 背景

原子力規制委員会は、平成25年3月27日から「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会」を立ち上げ、国会、政府、東電等の事故調査報告書を踏まえつつ、技術的な側面から、必要な知見を安全規制に取り入れることが重要であると、宣言した。規制委員会は、今後の安全規制に反映するために技術的に解明すべき点の一つとして、国会事故調が今後の課題とした事項の「1号機A系の非常用交流電源喪失が津波到着前に生じた可能性がある」という点に注目していた。その後、観測データの検証や現地調査を経て、1号機A系の非常用交流電源喪失の原因が津波によるものとの結論に辿り着くまでに、東日本大震災発生から3年半を要した。

本研究は、各事故調の報告書と規制委員会の報告書を元に、1号機A系の非常用交流電源喪失の原因となった1号機タービン建屋の浸水過程を再現する手法を開発し、今後の沿岸構造物の津波による浸水被害を軽減するための検討材料となる手段の構築を目指している。1号機タービン建屋の浸水過程を再現するために、図1のような、1号機タービン建屋の1階と地下1階を再現した解析モデルを作成した。報告書によると、津波は、大物搬入口から侵入し、配電盤を浸水させた後、階段から地下1階に侵入し、地下1階に配置されていた非常用ディーゼル発電機を浸水させた。複雑に入り組んだ構造物内を流れる解析は、格子法を用いて行うのは困難である反面、粒子法を用いて行うのは容易である。以上のことから、粒子法を用いて1号機タービン建屋の浸水解析を行う。

2. 3段階のズームアップ津波解析^{1,2)}

本研究では、東日本大震災の際に発生した津波が、沿岸部の地上構造物へ及ぼす影響を解析することを目的としている。実際の津波を再現する解析を行う際に問題となるのは、津波の流入流出境界条件である。実際の津波では、数km～数十kmの幅の波が数十分以上押し寄せてくる。そこで、本研究では、図2のような、1,000km

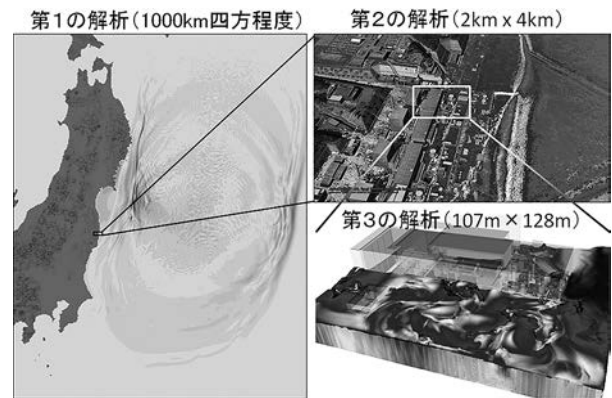


図2 3段階ズームアップ津波解析手法

四方程度、数km四方程度、100m四方程度の3つの解析領域を設定し、大きな解析領域から小さな解析領域に順次に境界条件を渡す3段階のズームアップ解析手法を開発した。

3段階のズームアップ解析の第1の解析では、震源で発生する津波波源から沿岸部までの津波伝播解析を実施する。この解析は、1,000km四方程度の広範囲な解析が必要となるため、計算コストが低い2次元の浅水長波解析を用いる。第1の解析で得られた解析結果を用いて、第2の解析のための流入流出境界条件を生成する。第2の解析では、沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解析を実施し、第3の解析のための流入流出境界条件を生成する。第3の解析では、市街地に津波が侵入する市街地浸水解析を実施する。第2第3の解析では、遡上計算が容易な3次元MPS法を用いて計算を行う。MPS法は、粒子法の一つであり、自由表面の流れや浮遊物の取り扱いが得意な手法である。本研究では、様々なMPS法の中で、大地らが開発したMPS陽解法に、粒子差分法の半離散化式を適用した改良型MPS陽解法を用いるが、本稿では単にMPS法と記述する。MPS法は、解析領域の大きさに比例する粒子数を必要とするため、第2の解析では、直径1m程度の粒子を用いて解析を行い、第3の解析では、直径10cm程度の粒子を用いて解析を行う。第3の解析では、津波がどの様に市街地に押し寄せるかを再現し、地上構造物の健全性を評価したり、浮遊物の挙動を観察したりする。

3. 第1の解析

本研究において、地震直後の初期水位を求めるために用いた断層モデルは、藤井佐竹の55小断層モデル Ver. 8.0である。本研究では、浅水長波解析を行うために、構造計画研究所が開発した津波シミュレータ TSUNAMI-Kを用いた。TSUNAMI-Kは、東北大学の今村教授が開発した2次元差分法による浅水長波解析手法を用いた津波波高・遡上計算ソフトウェアである。



図3 福島第一原子力発電所沿岸部の津波遡上解析

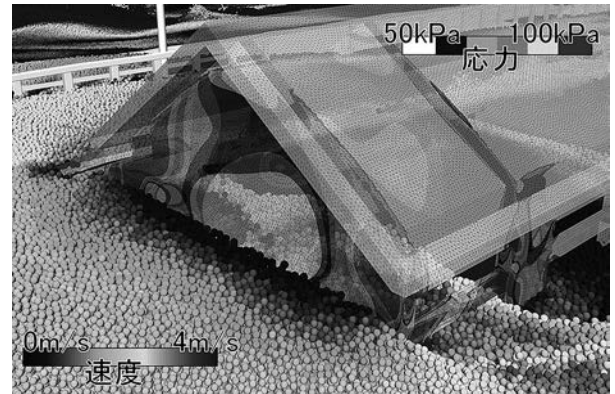
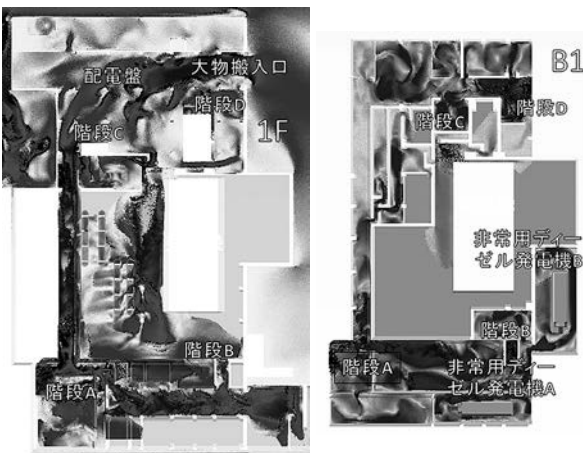


図5 MPS法による津波解析と駅舎の構造解析



(a)1F 断面図

(b)B1 断面図

図4 1号機タービン建屋の津波浸水解析

4. 第2の解析(福島第一原子力発電所)¹⁾

第2の解析では、海岸線を跨いだ沿海部分と建屋部分の両方を解析範囲に含める必要があるため、南北3.2km、東西3.6kmを解析範囲とした。直径1mの粒子を用い最大2.5億粒子の解析を行うために、京コンピュータ4,800ノードを用いて、震災当日の15時22分から1,800秒間の解析に40時間かかった。図3は、15時35分34秒の津波遡上解析の結果である。

5. 第3の解析その1(タービン建屋)¹⁾

第3の解析では、1号機タービン建屋の周辺の南北107m、東西128mを解析範囲とした。粒子サイズを10cmとし、最大1.3億粒子の解析を行うために、京コンピュータ4,800ノードを用いて、15時35分20秒から200秒間の解析に60時間かかった。図4は浸水解析結果である。本解析では、第3の解析の開始時刻を15時35分20秒とし、津波の最大の侵入経路と予想されている大物搬入口を15時36分に削除することで、1号機タービン建屋内部へ津波が侵入する現象を模擬した。図4(a)は地上一階、図4(b)は地下一階の津波浸水解析の結果である。各事故調の報告書と規制委員会の報告書を元にした観測結果と本解析結果のイベント発生時刻を比較した結果、良い一致を達成することができている¹⁾。



図6 複数の自動車が浮遊する津波遡上解析

6. 第3の解析その2(鹿折唐桑駅)²⁾

前節までは、福島第一原子力発電所に対する津波解析に関して紹介した。本節では、気仙沼市街地の鹿折唐桑駅に対する津波解析の第3の解析結果を紹介する。

津波により周辺の殆どの構造物が倒壊する中、鹿折唐桑駅の駅舎は津波による浸水被害を受けたにも関わらず、ほぼ原型を留めて倒壊を免れた。本研究では、気仙沼市街地に対して3段階のズームアップ津波解析を適用することで、駅舎が倒壊を免れた原因を考察する。

まず、駅舎の窓とドアが全て「開いている」モデルと「閉まっている」モデルを作成し、津波波圧による駅舎の構造解析を実施した。津波による水圧はほぼ同じであった。しかし、窓とドアが「閉まっている」モデルでは、駅舎内に海水が入ってこないため、水圧による駅舎内部からの支えがなく、窓とドアが「開いている」モデルに比べて5.5倍の応力が作用することが確認できた。図5は、窓とドアが「開いている」モデルの解析結果である。

次に、図6のように、鹿折唐桑駅周辺に、剛体でモデル化した多数の自動車が浮遊する津波解析を行った。その結果、今回配置した自動車は全て駅舎に衝突することなく、駅舎の前を通過して行ったことが確認できた。

これらの結果により、鹿折唐桑駅の駅舎が倒壊を免れたのは、次の2つの理由が考えられる。1つめは、鹿折唐桑駅は窓やドアが開いたオープンな構造になっており、津波が駅舎内部を通過することで、駅舎が津波の水圧に耐えたと考えられる。2つめは、鹿折唐桑駅が周辺

よりもやや高台にあり、駅舎周辺に放置された自動車などの浮遊物の直撃を受け難い立地であったことにあると考えられる。

Ⅲ. 車輪・レール間の水膜挙動解析³⁾

1. 背景

鉄道車両は、回転する車輪とレールの接触面に発生する摩擦力により推進力を得ている。鉄道車両に、加減速の制動をかけることができるのは、車輪側の接触面がレール側の接触面をしっかりとらえているからである。雨天時などでレール上に水滴が載っている場合は、車輪とレールの間に水膜が発生してしまい、車輪側の接触面がレール側の接触面をとらえることができなくなる。これが空転や滑走の発生する原因となる。空転や滑走が発生すると、加減速することができない危険な走行状態になるだけでなく、車輪とレールに甚大なダメージを受ける。このような背景から、車輪・レール間に介在する水膜が、どのような影響を与えるかを解明するための研究が行われてきているが、車輪とレール間を観測や測定することが難しいことから、未解明な点が多い。そこで、本研究では、車輪・レール間の水膜の挙動を解明するための新しい解析手法の開発を進めている。

2. 解析手法

われわれが開発している車輪・レール間の水膜挙動解析手法は、FEMによる車輪・レール間の転がり接触解析を用いた、MPS法による車輪がレール上を通過する際の水膜の挙動解析手法である。図7は車輪・レールの転がり接触解析の全体図であり、図8は図7の車輪と

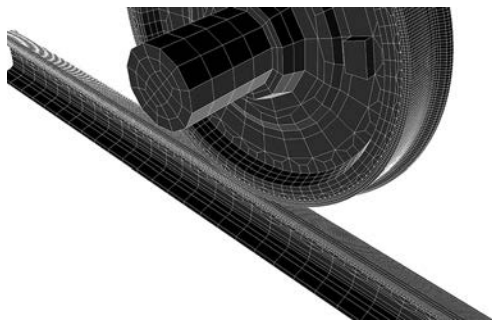


図7 FEMによる車輪・レール間の転がり接触解析

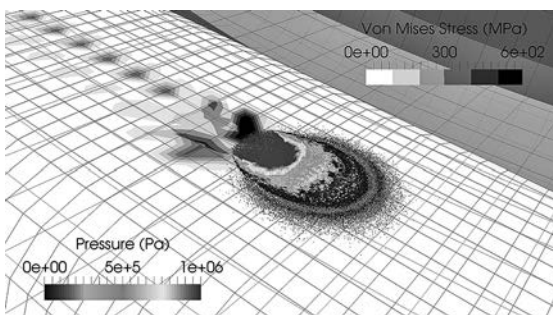


図8 MPS法による車輪・レール間の水膜挙動解析

レールの接触面に、水膜を粒子でモデル化して解析した結果である。図8のレールのメッシュに表示されているのは相当応力であり、水膜の粒子の濃淡は圧力を示している。現在のところ、FEMによる車輪・レール間の転がり接触解析を解析終了まで行い、解析終了後の変形したメッシュを、MPS法による水膜の挙動解析の固体壁として用いている。

本研究の車輪・レール間の転がり接触解析では、大規模有限要素法構造解析ソフトウェアFrontISTRを鉄道総研が車輪・レール間の転がり接触解析用にカスタマイズした鉄道総研版FrontISTRを用いている。車輪とレールは、新幹線に準拠した1車輪モデルであり、レールの長手方向のメッシュサイズを3.00mm、車輪の円周方向のメッシュサイズ6.22mmとなっている。直線区間を加速させ、輪軸中心が25.030m/sから25.102m/s(約90km/h)まで加速する物理時間6.0msの解析を行った。水膜の解析では、高さ6mm、底部の直径36mmの水膜モデルをレール上に配置し、直径0.05mmの粒子で水膜モデルを作成した。本解析は鉄道総研が所有するCray XC30の50ノード(1,200コア)を用いて16時間かかった。

本解析では、車輪とレールにより水滴が押し潰され、高い圧力が掛りながら薄い水膜に変形し、周辺へ水滴が飛散する解析を実施した。このような非常に大きな変形が伴う自由表面流れは、格子法では困難な解析であるが、粒子法では比較的容易な解析である。今後は、水膜の圧力を車輪・レール間の転がり接触解析に反映する双方向の連成解析へ改良しつつ、水膜の影響による摩擦力の変化を実現できる解析手法の開発を行う予定である。

Ⅳ. 着雪解析⁴⁾

1. 背景

積雪した線路上を列車が走行すると、線路上の雪が鉄道車両と線路の間で発生する気圧差により舞い上げられ、鉄道車両の床下部分や台車部分に雪が付着して成長する。このような現象を着雪と呼ぶ。着雪の塊が、走行時の振動や分岐器を通過するときの衝撃で落下すると、軌道のバラストが飛散して、車体の損傷、沿線家屋や鉄道設備への被害が発生したり、分岐器のレールの隙間に挟まり進路の転換を行うことができなくなったりする。このような問題を解決するために、様々な着雪に関する研究が行われてきているが、観測や実験、簡易式を用いたアプローチが多く、着雪メカニズムを解明するに至っていない。そこで、本研究では、着雪成長プロセスを再現できる着雪解析手法を開発し、着雪しにくい鉄道車両形状の開発を目指している。

2. 解析手法

本研究の着雪解析手法は、図9のようなFDMによる

気流計算と粒子法による着雪計算を連成させた解析手法である。なお、着雪計算に用いる粒子法は、津波解析や水膜挙動解析で用いた流体解析のためのMPS法ではなく、粒子が衝突すれば付着するといった離散的な手法である。

まず、流れ場を計算する。次に、雪を球形状にモデル化し、流れ場の速度分布から計算された軌道により雪粒子を移動させて、対象物に接近した場合に、着雪計算を行う。対象物に着雪すれば、着雪箇所が成長し、対象物の形状が変化するとみなし、気流計算の固体壁境界形状が更新される。このようにして、われわれの着雪解析では、気流計算は雪粒子の軌道により着雪計算に影響を与え、着雪計算は固体壁境界形状を変化させることにより気流計算に影響を与える双方向連成解析である。図10は、着雪計算と気流計算の連成解析の結果であり、着雪による固体壁境界形状の変化が気流計算に反映されていることが確認できる。

気流計算では、基礎式は非圧縮性流体に対するナビエ・ストークス方程式とし、不等間隔格子によるFDMにより空間微分離散化を行った。乱流解析はLES (Large Eddy Simulation)により実施し、フラクショナル・ステップを用いた。着雪計算では、浮遊している粒子の空間充填率が0.65以上であれば着雪するアルゴリズムを用いた。

図10の解析では、計算領域を風洞実験に合わせるために2.5m × 1m × 1mとし、気流計算の格子には、1辺15cmの立方体の周りを格子間隔1mmとした1.4億格子を用いた。着雪計算には、雪を直径1mmの粒子でモ

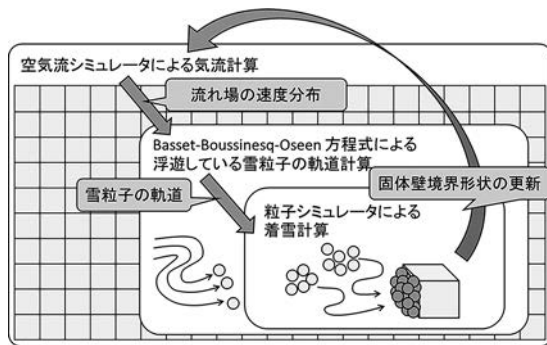


図9 着雪解析手法

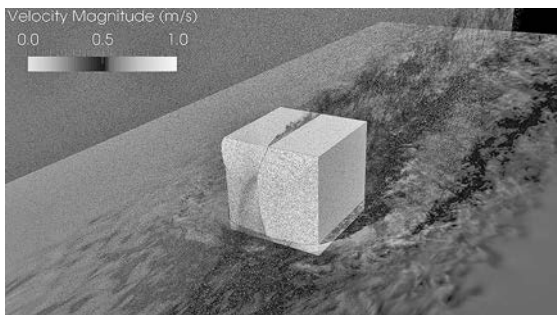
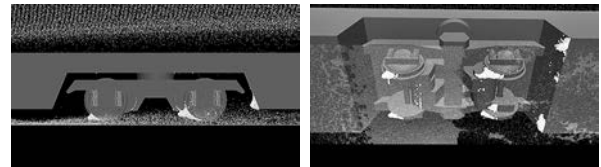


図10 立方体への着雪解析



(a)側面 (b)底部

図11 台車模型モデルへの着雪解析

デル化した。計算時間間隔は気流計算と着雪計算で同じ値を用い 10^{-4} sとした。気流計算と着雪計算は、およそ100ステップ毎に交互に行なわれ、この連成解析を1,000ステップ行った。本解析では、京コンピュータの1,200ノード(9,600コア)を用い、気流計算に6,000s、着雪計算に800sかかった。

現在、立方体形状への着雪解析と降雪風洞実験の結果の比較を行うことで、精度の良い着雪計算アルゴリズムの開発を行いつつ、図11のような台車模型モデルへの着雪解析を試行している。

V. まとめと今後の課題

単純な流体解析を解くためには、粒子法を用いるのは計算精度と計算コストの面で不向きであるが、境界面が複雑に変形し合うような解析や、多数の接触判定が必要となる解析では、粒子法は大きな力を発揮すると筆者は考える。本稿で紹介した解析例では、複雑な内部構造を持つ地上構造物の津波浸水解析と車輪・レール間の水膜挙動解析は前者の解析例であり、浮遊物の挙動解析と着雪解析は後者の解析例である。今後は、これまで困難とされてきた解析対象に粒子法を適切に適用していくことで、CAEの適用範囲を広げていきたいと考えている。

— 参考資料 —

- 1) 室谷浩平, 荻野正雄, 塩谷隆二, MPS法を用いた東日本大震災の津波による福島第一原子力発電所1号機タービン建屋の浸水解析, HPCI 利用研究成果集, HPRR_hp150189.pdf, 2017.
- 2) 室谷浩平, 高垣昌和: MPS法を用いた鉄道構造物に対する津波波圧による構造解析, 第22回計算工学講演会, 2017.
- 3) 室谷浩平, 高垣昌和, 林雅江: 車輪・レール間の流体挙動解析のためのポリゴン境界表現を用いた有限要素法と粒子法の連成手法の開発, 日本機械学会2017年度年次大会, 2017.
- 4) K.Murotani, K.Nakade, Y.Kamata, Numerical Simulation of Snow Accretion by Airflow Simulator and Particle Simulator, SC17, Regular Poster, Colorado, 2017.

著者紹介



室谷浩平 (むろたに・こうへい)

鉄道総合技術研究所
(専門分野/関心分野) 粒子シミュレーション, 津波解析, 車輪・レール間の水膜挙動解析, 着雪解析, 並列計算手法

核融合トリチウム研究最前線

——原型炉実現に向けて——

第2回 原型炉に向けたトリチウムバランスの考え方

量子科学技術研究開発機構 日渡 良爾

本稿では、核融合炉のトリチウム燃料循環システムにおけるトリチウムバランスの基本的な考え方とモデル化について概説する。また原型炉における評価例を紹介し、トリチウムインベントリの挙動、必要となる初期装荷トリチウム量、トリチウム倍増時間について説明する。その後、原型炉に向けた課題としてトリチウムバランスのモデル化に必要なトリチウム損失係数の重要性、原型炉のトリチウムインベントリ最小化に向けた燃料システム構成の提案例について紹介する。

KEYWORDS: DEMO, tritium, fuel cycle, inventory, burning ratio, process time

I. 序論

トリチウム(T)と重水素(D)を燃料とするDT核融合炉においては、トリチウムの自己充足性を満たす燃料サイクルシステムの構築は必須条件の1つである。そのため、トリチウムバランスに関する研究は古くから行われている。初期のTバランスモデル評価においては、炉心におけるT燃焼率やT損失率とブランケットに求められるT増殖率の関係を議論すると共に、Tバランスモデルに必要な時定数、損失係数、核データといった不確定性を小さくする事の重要性が指摘された¹⁻⁵⁾。日本では、実用炉に必要なトリチウム増殖率(TBR)と初期装荷T量の関係⁶⁾を議論している。実験炉ITERにおける検討が進むにつれブランケット第一壁でのT捕捉やT透過によるT損失が⁷⁾、トリチウムバランスに与える影響も考慮されるようになってきた⁸⁻¹⁰⁾。本稿では、核融合炉のトリチウム燃料循環システムに関する基本点な考え方を概説した後に、核融合原型炉に向けた検討状況と課題についてまとめる。

II. トリチウム燃料循環システムモデル

1. トリチウム燃料循環システム基本構成

トリチウム燃料循環システムの基本構成を図1に示

Research frontier of tritium for fusion reactor -toward the DEMO reactor-(2) ; Basic concept of tritium fuel balance required for DEMO : Ryoji Hiwatari.

■前回タイトル

第1回 核融合炉の安全性とトリチウム

す。炉心(真空容器)、排気システム、排ガス処理システム、ブランケットトリチウム回収システム、同位体分離システム、貯蔵・供給システム、燃料入射システムで構成される。

通常、炉心に入射されたトリチウムのうち数%が核融合反応を起こし、入射された90%以上のトリチウムは排気システムから排気される(核融合炉における炉心でのトリチウム燃料率は数%)。炉心から排気システム(クライオポンプやターボ分子ポンプを想定)にて排気されたトリチウムは、もう一つの燃料である重水素や炉心制御で注入された、もしくは、第一壁から混入した不純物と混合状態となっている。

排ガス処理システムでは、トリチウム、重水素、その他不純物の混合ガスを、水素同位体(トリチウム、重水素、軽水素)と不純物に分離する。次に水素同位体ガスは水素同位体分離システムに送られ、高純度のトリチウ

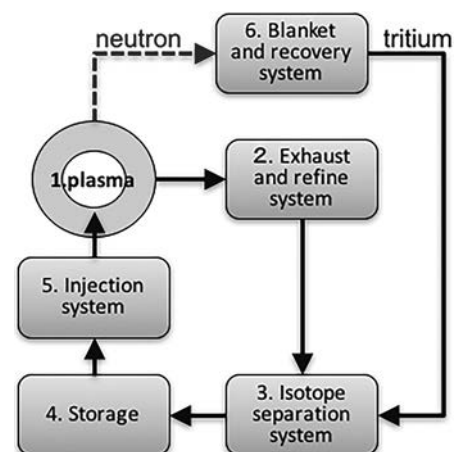


図1 トリチウム燃料循環システムの基本構成

ム・重水素それぞれもしくは、DT 混合燃料に分離される。分離された重水素、トリチウム、DT 混合燃料は、貯蔵・供給システムにて水素吸蔵合金に室温貯蔵され、必要に応じて加温され燃料入射系や中性粒子入射装置に供給される。

2. トリチウムバランスの定式化

ここでは、既往文献に基づいてトリチウム燃料循環システムにおけるトリチウムバランスを概説する。はじめに、トリチウム燃料循環システムのサブシステム毎のトリチウムバランスを考える。各サブシステムのインデックスを、図1にあるように1：炉心、2：排気システム&排ガス処理システム、3：同位体分離システム、4：貯蔵・供給システム、5：燃料入射システム、6：ブランケットトリチウム回収システムとし、それぞれのトリチウムインベントリ $N_i (g) (i=1-6)$ と単位時間あたりの処理量 $X_i (g/sec) (i=1-6)$ に関するバランスの式を考える。その際、核融合反応によるトリチウムの燃焼速度 $\alpha (g/sec)$ 、トリチウム増殖率 β 、トリチウムの崩壊定数 $\lambda (=1.783 \times 10^{-9} sec^{-1})$ とする

はじめに1：炉心におけるインベントリ N_1 に関するバランスの式は、5：燃料入射システムによる供給、トリチウムの核融合燃焼、炉心からの排気、プラズマ炉心内のトリチウムインベントリとトリチウム処理量に比例する損失、ベータ崩壊による損失によって以下のように記述される⁶⁾。

$$\frac{d}{dt} N_1 = X_5 - \alpha - X_1 - a_1 N_1 - b_1 X_1 - \lambda N_1$$

ここで、インベントリに比例して損失する割合を $a_i (sec^{-1})$ 、処理量に比例して損失する割合を b_i とする。また、炉心の処理量 X_1 はトリチウム粒子が炉心プラズマから時定数 $t_1 (sec)$ で拡散すると考えれば、

$$X_1 = N_1 / t_1$$

と定義できる⁶⁾。この考え方を2：排気システム & 排ガス処理システムから、6：ブランケットトリチウム回収システムまで適用すると、各サブシステムにおけるトリチウムバランスの式が以下のように定式化される⁶⁾。

$$\frac{d}{dt} N_2 = X_1 - X_2 - a_2 N_2 - b_2 X_2 - \lambda N_2$$

$$\frac{d}{dt} N_3 = X_2 + X_6 - X_3 - a_3 N_3 - b_3 X_3 - \lambda N_3$$

$$\frac{d}{dt} N_4 = X_3 - X_4 - a_4 N_4 - b_4 X_4 - \lambda N_4$$

$$\frac{d}{dt} N_5 = X_4 - X_5 - a_5 N_5 - b_5 X_5 - \lambda N_5$$

$$\frac{d}{dt} N_6 = \alpha \beta - X_6 - a_6 N_6 - b_6 X_6 - \lambda N_6$$

$$X_i = \frac{N_i}{t_i} (i=1, 2, 3, 5, 6)$$

ここで、トリチウム損失に関わる定数 a_i 、 b_i 、各サブシステムの処理(炉心の場合には粒子排気)に関わる時定数 t_i を定めるとともに、核融合出力から評価されるトリチウムの燃焼速度 $\alpha (g/sec)$ とトリチウム増殖率 β を与えるこ

表1 各サブシステムの処理に関わる時定数

サブシステム		時定数
1：炉心	t_1	1.5sec
2：排気・排ガス処理システム	t_2	20min.
3：同位体分離システム	t_3	60min.
5：燃料入射システム	t_5	20min.
6：ブランケット T 回収システム	t_6	5days

とで、トリチウム燃料循環システムの粒子バランスが解けることになる。各サブシステムの時定数の例を表1に示す⁶⁾。

3. トリチウム損失項の取り扱い

前述のトリチウムバランスを解くに当たって最も重要な項目がトリチウム損失項の取り扱いである。損失項については、第一壁・真空容器への付着・透過、炉内のダスト中への滞留といった効果を考慮に入れる必要がある。前述の定式化においては、トリチウム損失に関する定数 a_i 、 b_i をどのように定義するかに対応する。ここではあくまで一つの例として、核融合炉運転初期にはサブシステムのトリチウム付着・共堆積量が大きく、ある一定の時間の経過後、定常値になるケースを示す。

前述の考え方に沿って、損失項に関する定数 a_i 、 b_i を次のように定義する⁶⁾。

$$a_i = constant$$

$$b_i = (b_{i,t=0} - b_{i,t=\infty}) \exp\left(-\frac{t}{T_{bi}}\right) + b_{i,t=\infty}$$

ここで、サブシステムのトリチウムインベントリに比例するロス項は一定値としている。一方、サブシステムの処理量に比例するロス項に関しては、時間によって変化し、 $b_{i,t=0}$ 初期の損失係数から、 $b_{i,t=\infty}$ 定常状態での損失係数に時定数 T_{bi} で定常状態に到達するとする。表2に各パラメータを示す。

例えば、表1の $b_{6,t=\infty} = 2 \times 10^{-3}$ は、ブランケット中における定常状態でのトリチウム損失割合に対応する。後述する核融合出力 1.5GW クラスの原型炉の場合、1g-T/day の割合で損失することに対応する。

表2 各サブシステムの損失係数リスト⁶⁾

a_i		$b_{i,t=0}$		$b_{i,t=\infty}$		T_{bi}	
a_1		$1.0 \times 10^{-10} sec^{-1}$		1.0×10^{-4}		T_{b1}	
a_2		$1.0 \times 10^{-10} sec^{-1}$		1.0×10^{-5}		T_{b2}	
a_3		$1.0 \times 10^{-10} sec^{-1}$		1.0×10^{-5}		T_{b3}	
a_4		$1.0 \times 10^{-10} sec^{-1}$		5.0×10^{-6}		T_{b4}	
a_5		$1.0 \times 10^{-10} sec^{-1}$		1.0×10^{-5}		T_{b5}	
a_6		$1.0 \times 10^{-10} sec^{-1}$		2.0×10^{-2}		T_{b6}	
$b_{1,t=0}$	1.0×10^{-2}	$b_{1,t=\infty}$	1.0×10^{-4}	T_{b1}	15days		
$b_{2,t=0}$	1.0×10^{-3}	$b_{2,t=\infty}$	1.0×10^{-5}	T_{b2}	50days		
$b_{3,t=0}$	1.0×10^{-3}	$b_{3,t=\infty}$	1.0×10^{-5}	T_{b3}	50days		
$b_{4,t=0}$	5.0×10^{-4}	$b_{4,t=\infty}$	5.0×10^{-6}	T_{b4}	50days		
$b_{5,t=0}$	1.0×10^{-3}	$b_{5,t=\infty}$	1.0×10^{-5}	T_{b5}	50days		
$b_{6,t=0}$	2.0×10^{-2}	$b_{6,t=\infty}$	2.0×10^{-3}	T_{b6}	100days		

Ⅲ. 原型炉を想定したトリチウムバランス評価

はじめに、前述のモデル式を用いて、原型炉を想定し核融合出力 1.5GW、トリチウム増殖率 1.06、初期装荷トリチウム量 27kg を仮定した場合のトリチウム貯蔵システムにおけるインベントリの時間変化を図 2 に示す。運転開始後にインベントリが減少し、約 100 日後に最小値となった後、増加に転じている。最終的に、約 8,000 日あたりでトリチウムインベントリが初期装荷トリチウム量 27kg のちょうど倍となっている。この結果で、最小インベントリでは約 3kg 減少している。この 3kg がいわゆる核融合炉の起動に最低限必要となる初期装荷トリチウム量となる。さらに、初期のインベントリが倍になる期間(ここでは約 8,000 日)をトリチウム倍增時間(doubling time)という。トリチウム増殖率が大きいほど、このトリチウム倍增時間は短くなる。核融合炉においては、燃料であるトリチウムが自然界にはほぼ存在しないため、一般的には、次世代の核融合炉の初期装荷トリチウムは、現代の核融合炉にて生産する必要があると考えられている。そのため、例えば軽水炉のようにエネルギー市場に核融合炉を導入させるためには、このトリチウム倍增時間がある程度短くしなければ、次世代の核融合炉を次々に運用開始できないことには注意が必要である。

一方、図 2 の結果は核融合の連続運転による起動が順調にいった場合の解析例であり、実際の発電プラントの運用においてはトラブル等を想定し、例えば最低限 1ヶ月分の燃料であるトリチウムの確保が必要といったところまで考えると、必要となる初期装荷トリチウムは 10kg オーダーとなる⁶⁾。

さらに先進的な考え方として、少量の初期装荷トリチウムから、重水素プラズマ中の $D(d,n)^3He$ による中性子を用いたトリチウム増殖と $D(d,p)T$ によるトリチウム生成により徐々に DT プラズマに移行する運転も提案されている^{11~13)}。その場合、トリチウム燃料循環システムを立上げ、試運転するのに必要な数 100g のトリ

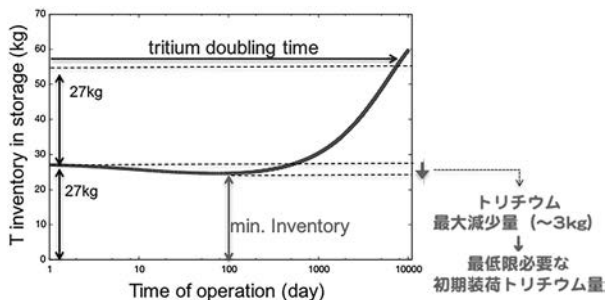


図 2 トリチウム貯蔵システム中のトリチウムインベントリの時間変化

チウムが最低限必要となる。いずれにしろ、数 100g から kg オーダーの初期装荷トリチウムが必要になると考えねばならない。数 100g のトリチウムを生成する方法としては、高温ガス炉を用いたトリチウム生成方法が提案されている。高温ガス炉におけるトリチウム生成ならびに、DD 核融合反応を利用した DT プラズマへの移行運転については、本特集記事の第 3 回にて詳述される予定である。

Ⅳ. 原型炉に向けた課題

1. 原型炉条件におけるトリチウム損失係数の実験的評価の必要性

原型炉において、トリチウムバランス評価管理技術は、燃料サイクル成立性、原型炉安全性の観点から重要な技術である。そのためには、トリチウム燃料循環システム中のトリチウム挙動を把握するために、トリチウムバランス評価を可能とするトリチウムシミュレータが重要となる。このトリチウムシミュレータを原型炉以前の段階で構築し、原型炉運転におけるトリチウム挙動予測を行った上で、初期装荷トリチウム量の予測を行うとともに、実際の原型炉の試験運転に入る必要がある。トリチウムシミュレータの構築に際しては、前章で述べたトリチウムバランスが基本となる。最大の課題は、トリチウム損失項をどのように定義するかである。

例えば、実験炉 ITER を想定した炉心の真空容器壁の種類によるトリチウム共堆積量は図 3 のように評価されている¹⁴⁾。

この評価においては、トリチウム共堆積量は時間とともに増加する結果となっている。原型炉を想定した場合、第一壁はタンゲステン(W)アーマとなる事が想定され、図 3 の中においては最も共堆積が小さいものの、時

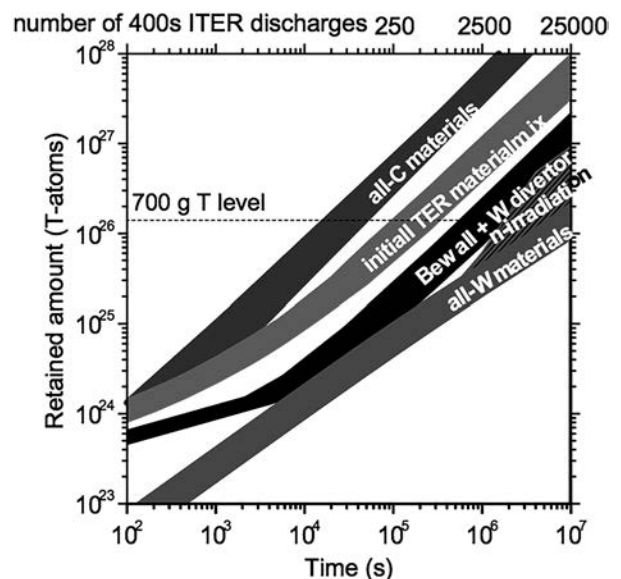


図 3 ITER を想定した真空容器中のトリチウム滞留量¹⁴⁾

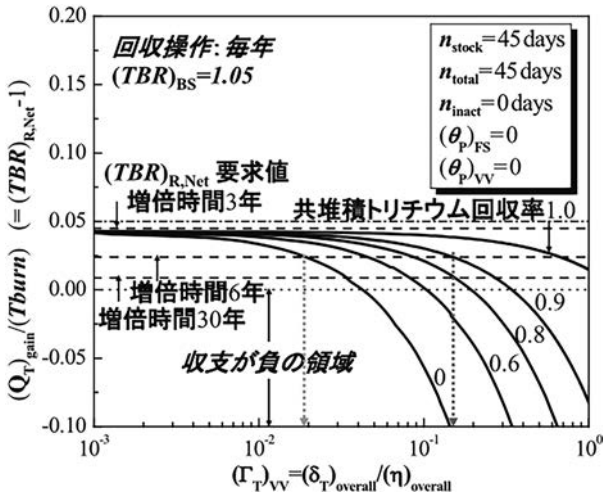


図4 実効的トリチウム増殖率((QT)gain/(Tburn))とトリチウムバランシング係数((δT)VV=(δT)overall/(η)overall: 第一壁への補足率(δT)overallと炉心でのトリチウム燃焼率(η)overallの比)の関係

間とともに増加すると予測されている。

この評価結果に基づき定常状態におけるトリチウムバランスの評価が行われており、例えば、図4に示すように、共堆積したトリチウムの回収の有効性が示されている^{10,15)}。

図4では、共堆積トリチウム回収率が0、すなわち第一壁に堆積したままの場合には、トリチウムバランシングパラメータが 10^{-1} オーダーになると実効的トリチウム増殖率が1を切ってしまう、トリチウムの自己充足性が満たされない事を示している。そのため、可能な限り第一壁の共堆積トリチウムを回収することの重要性が述べられている。また本結果からは、トリチウムの燃焼率を大きくすること(トリチウムバランシング係数($\Gamma_{i,VV}$)を小さくすること)の重要性も理解できる。

ただし、本解析では、前述のITERの共堆積予測を適用しており、原型炉と実験炉ITERの第一壁の条件としては、遮蔽ブランケットと発電ブランケットという違いがある。つまり、第一壁温度が異なる、パルス運転でなく定常運転となる、といった実験炉ITERと原型炉との条件の違いが考慮されていない。そのため、原型炉の第一壁条件における共堆積特性を反映した、トリチウム損失係数(前述の損失項に関する定数 a_i , b_i)の実験的評価が喫緊の課題と考えられる。

2. 原型炉に適したトリチウム燃料循環システム最適化の必要性

原型炉においては、実験炉ITERのトリチウムシステムを外挿するとトリチウムインベントリが大きくなると考えられる。欧州での原型炉(核融合出力1.94GW, トリチウム増殖率1.1, トリチウム燃焼率1%を仮定)を例にトリチウム燃料循環システムにおけるトリチウムインベントリを比較した場合、ITERでは769g-Tに対して原

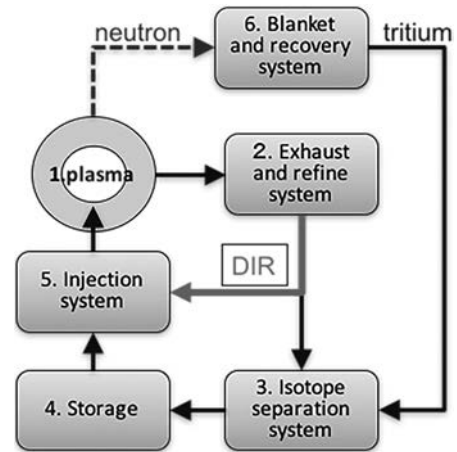


図5 DIRを考慮したトリチウム燃料循環システム¹⁶⁾

型炉では2,960g-Tと約3.8倍と試算されている¹⁶⁾。トリチウム自己充足性の維持や安全性の観点から、このインベントリを可能な限り小さくすることが重要である。

実験炉ITERから外挿した原型炉のトリチウムインベントリのうち、大きな寄与をしているのがクライオポンプ(主排気・粗挽き)の480g-Tと同位体分離システムの1,700g-Tである¹⁶⁾。これら2つのサブシステムは、バッチ処理方式をとっているため処理時間(前述のサブシステムの処理に関わる時定数 t_2 , t_3 に相当)が長くなり、その分トリチウムインベントリが大きくなる結果となっている。

原型炉の場合、実験炉ITERと異なり、その運転時間はITERの数百秒から最低でも数時間~定常と長くなる。それに対応するためには、排気システムをバッチ処理のクライオポンプでなく、連続排気が可能なターボ分子ポンプ等の適用を検討する必要がある。

さらに、同位体分離システムにおける処理量を少なくするために、図5に示すように排気システムから燃料供給システムに直接バイパス流路(DIR: Direct Internal Recycling)を設定するトリチウム燃料循環システム構成も提案されている^{16,17)}。

このDIRにおけるバイパス流路の効果と核融合出力で決まるトリチウムインベントリの評価結果を図6に示す¹⁶⁾。DIRによるバイパスする割合が大きくなることで、トリチウムインベントリが約半分程度に削減できる事が示されている。さらに、インベントリの減少によるトリチウムプラント規模の縮小も考慮に入れると原型炉においても実験炉ITER程度のインベントリでの運用の可能性も示唆されている¹⁶⁾。この概念を実現するためには、クライオポンプを使わない連続排気システムの開発が必要になる。

V. まとめ

本稿では、核融合炉におけるトリチウムバランスの基

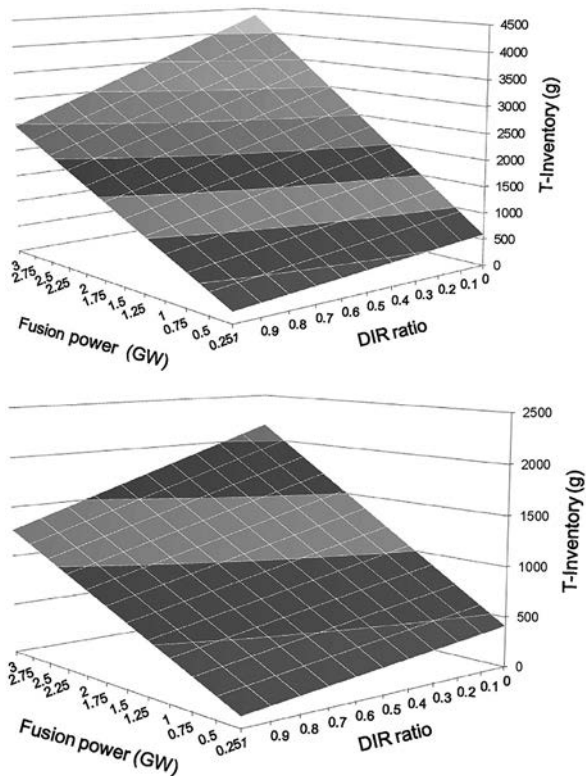


図6 DIRによるバイパス割合と核融合出力に対するトリチウムインベントリ(上図:燃焼率1%, 下図:燃焼率2.5%を仮定)¹⁶⁾

本的な考え方とその定式化の一例を概説した。また、核融合出力 1.5GW の原型炉におけるトリチウムインベントリの時系列評価例を示し、初期装荷トリチウムの必要性、トリチウム増殖時間の計算例を示した。さらに、原型炉に向けた課題として、トリチウムバランスモデルにおけるトリチウム損失項の重要性和、実験炉 ITER 条件

に基づいたトリチウム損失・トリチウム燃焼率とトリチウム自己充足性の関係、さらには原型炉においてトリチウムインベントリの減少に向けた DIR を適用したトリチウム燃料循環システム検討例を説明した。

— 参考資料 —

- 1) Abdou, M.A. et al.: Fusion Technol.9, 250-285(1986).
- 2) Gabowitsch, E. and Spannagel, G.: Fusion Technol.16, 143-148(1989).
- 3) Busgin, A. et al.: Fusion Technol.21, 915-920(1992).
- 4) Kuan, W. et al.: Fusion Eng. Design 28, 329-335(1995).
- 5) Kuan, W. et al.: Fusion Technol. 28, 664-671(1995).
- 6) Asaoka, Y. et al.: Fusion Technol. 30, 853-862(1996).
- 7) Roth, J. et al.: J. Nucl. Mater. 390-391, 1-9 (2009).
- 8) Takenaga, H. et al.: Fusion Sic. Technol. 57, 94-102(2010).
- 9) Nishikawa, M.: Fusion Sic. Technol. 57, 120-128(2010).
- 10) Nishikawa, M.: Fusion Sic. Technol. 59, 350-362(2011).
- 11) S. Konishi et al., J. Plasma Fusion Res. 76, 1309(2010).
- 12) R. Hiwatari et al., Fusion Sci. Technol. 60, 1092(2011).
- 13) R. Kasada et al., Fusion Eng. Des. 98-99, 1804(2015).
- 14) J. Roth et al. Journal of Nuclear Materials 390-391, 1-9 (2009).
- 15) M. Nishikawa and K. Katayama, J. Plasma Fusion Res. Vol. 87, No.8 (2011) 503 - 511.
- 16) C. Day and T. Giegerich, Fusion Eng. Des. 88, 661-620 (2013).
- 17) C. Day et al., Fusion Eng. and Des. 109-111, 299-308 (2016).

著者紹介



日渡良爾 (ひわたり・りょうじ)

量子科学技術研究開発機構

(専門分野/関心分野)核融合炉概念設計

第4世代原子炉の開発動向

第6回 溶融塩炉・トリウム炉

東京都市大学 高木 直行

新たな原子炉型として液体燃料を用いる溶融塩炉への関心が高まっている。これは特に、福島第一原発事故以降に顕著だが、エネルギー消費大国に成長した中国は福島事故の数ヶ月前、将来の商業化を目指した大規模な溶融塩炉開発計画を立ち上げた。日本国内とはやや温度差があるが、世界各国では中国の動きに触発されたかのようにその後溶融塩炉研究が活発化している。本稿では第4世代原子炉の一つである溶融塩炉の開発状況について解説する。

KEYWORDS: molten salt, liquid fuel, thorium, thermal/fast spectrum, breeder

I. はじめに

1. 溶融塩炉とは？

第4世代原子炉(Generation IV reactor: Gen-IV)として対象とされる6炉型の一つである溶融塩炉(Molten Salt Reactor, MSR)は、ウランやトリウムなどの核燃料物質を溶融塩に溶解させた液体燃料炉である。

燃料であり、かつ冷却材の役目を持つ燃料塩が、原子炉で発生した熱を炉容器外にある1次系熱交換器へと運び発電等に利用する炉概念が主流であるが、最近では、燃料にペブルやピン形状の固体燃料を用い、溶融塩を冷却材目的のみに利用する炉概念も検討されている。

そもそも溶融塩とはイオン結晶を主成分とした高温で溶融した塩であり、フッ化物と塩化物がある。原子炉の目的に応じて、ウラン、トリウムや超ウラン元素(TRU)が燃料としてこれらの塩に混合される。

燃料が液体のため、燃料の成形加工が不要であり、再処理との適合性に優れる。原理的にはオンライン再処理で核分裂生成物(FP)の連続除去ができるため、熱中性子スペクトルでの増殖が成立する可能性のあることが大きな特徴である。但し熱スペクトルで増殖が可能なのは、燃料にウランやプルトニウムではなくトリウム(核分裂性物質としてU-233)を用いた場合に限定される。「溶融塩炉=トリウム炉」といった認識が広く定着している主な理由はここにある。

しかしこの図式は必然でなく、溶融塩炉でも多様な燃料の利用が可能であり、またトリウム燃料を用いる原子

炉も溶融塩炉に限定されるものではない。よって本稿ではGen-IV対象である溶融塩炉を中心としながら、トリウム燃料を用いる他の炉型については分離して簡単に解説する。

2. Gen-IVの主眼「溶融塩高速炉」

溶融塩炉の技術開発は、60年以上前、米国オークリッジ研究所にてワインバーグ所長のもとで端緒が開かれた。1954年に3MWt出力の航空機用原子炉(ARE)が、1965年には8MWtの実験炉(MSRE)が建設され、後者のMSREは1969年までに13,000時間の全出力運転を行っている。これらの実証実験は黒鉛減速熱中性子スペクトル炉を対象としたものであった。

しかしGen-IVでは、特に固体燃料高速炉の代替炉としてプルトニウムまたはU-233を増殖する、もしくは長寿命のTRU元素を燃焼する高速スペクトル溶融塩炉(以下、溶融塩高速炉)を主な対象としている¹⁾。2016年時点では二つの炉概念が対象とされており、一つは仏CNRSで提案されたMSFR(Molten Salt Fast Reactor)、もう一つはロシアで開発中のMOSART(Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter)である。溶融塩炉発祥国の米ではFS-MSR(Fast Spectrum MSR)と表現されることが多い。

II. 溶融塩炉に関する会議体の動向

1. OECD主催 GIF 溶融塩炉委員会

OECDは、2001年に米国がGen-IVの国際共同開発を提唱して以来、第4世代原子炉国際フォーラム(Generation IV reactor International Forum: GIF)の事務局を務め、溶融塩炉委員会を主催している。

このGIF溶融塩炉委員会で研究に義務を負うMOU(Memorandum of Understanding)に署名している国(連

The development status of Generation IV reactor systems(6); Molten salt reactor and thorium reactor: Naoyuki Takaki.

(2018年1月31日 受理)

■前回タイトル

第5回 鉛冷却高速炉

合)は署名順でユーラトム, フランス, ロシア, スイス, アメリカ, オーストラリアである。

ロシアのクルチャトフ研究所では1976年からMSR研究を開始しており, MSFRと近いながらも異なる設計の高速炉であるMOSART (Molten-Salt Actinide Transmutation)の研究計画を進めていたため, 当初本委員会への正式参加を見送っていたが, MOSARTとMSFRの共通性を活かせるとの判断で2013年末MOUに署名した。中国は2012年に永年オブザーバーとして参加することを宣言した²⁾。日本は正式には関与しておらず, 溶融塩炉研究者が時折オブザーバーとして参加している。

2013年7月にはロシア, デミトロフグラードのRIARで第16回目のGIF溶融塩炉委員会が開催された。この委員会では欧州を中心に研究されている「溶融塩高速炉(MSFR)」の炉心設計, 材料評価などについて各国の研究状況が報告されるとともに, 中国や米国など(当初)オブザーバー参加していた国からも研究状況が紹介された。各国の取り組み度合いや方向性には大きな違いがあり, GIF対象の他5炉型に比べて, 各国とも組織的な取り組みは少ない模様である。

2. IAEA 主催溶融塩炉技術会議

IAEAは近年まで溶融塩炉に関する特別な活動を行っていなかったが, 2015年末, 世界的に関心の高まる本炉概念について技術開発状況を把握するための準備会合を開催し, その特性把握と必要な技術の研究開発項目の把握を行った。

その結果, 溶融塩炉の利点として, 1)高い冷却材温度による熱効率の改善, 2)低い冷却材圧力, 3)高レベル放射性廃棄物の減量化とその半減期の短縮, 4)高い固有安全性, 5)固体燃料棒で生じる燃料ペレットの膨張や被覆管の損傷などの工学的課題の解消, そして6)ウラン, プルトニウム, トリウムを利用し得る燃料サイクルの柔軟性などを特定した。

これを受けIAEAは, 溶融塩炉開発に取り組む様々な国や組織が集って情報の交換・共有や課題解決に向けた協力の糸口を探る場を提供する目的で, 2016年末に初の溶融塩炉技術会議を開催した。16ヶ国から35名の溶融塩炉専門家が集まりIAEAからは13名が参加した。GIFのMOU署名国以外にイギリス, 中国, インド, インドネシア, 日本の参加があった。

本会議で報告された主な事項は, EUでは11のパートナーが協力して3GWtの溶融塩高速炉安全評価プロジェクトSAMOFARを推進していること, 中国上海応用物理研究所(SINAP)は二つの実験炉(固体燃料溶融塩冷却炉, 溶融塩燃料炉)の建設に先立ち, 溶融塩試験ループを建設する計画であること, オーストラリアも本概念へ関心を示し始めていること, 本会議へは未参加ながら

政府の支援は受けずに独自の溶融塩炉概念を追求しているベンチャー企業が米国を中心として数多く存在することなどが挙げられる。ベンチャー企業には, 米にFlibe Energy, Martingale, Transatomic Power, Thoreact, 米/加にTerrestrial Energy, Elysium Industries, 英にMoltex Energy, デンマークにSeaborg Technologies, Copenhagen Atomicsなどがある。

本会議と同時期に国際コンソーシアムのMartingale社と溶融塩炉開発でMOU締結したインドネシアからは6名もの参加があった。但し, Martingale社をはじめ, ほとんどのベンチャー企業は本会議に参加していない。IAEAがコーディネートするプロジェクト(CRP)や会合は公開が前提であるため, ノウハウが唯一の資産であるベンチャーが積極参加しないのは当然であろう。特に小型の熱中性子スペクトル溶融塩炉を提唱する米国企業の場合, MSREの経験を根拠に, 長期の開発時間や巨額の費用を要しないため国際協力は不要とのスタンスを示していることも不参加の理由と考えられる。

III. 溶融塩高速炉

1. 開発の経緯と特徴

高速中性子スペクトル型溶融塩炉の研究開発は1960年代から始まり, アメリカ, スイス, チェコ, EUなどから燃料塩として NaCl/KCl/PuCl_3 , $\text{PuCl}_3/\text{NaCl}$, $\text{LiF/BeF}_2/(\text{TRU})\text{F}_3$ や $\text{LiF/NaF}/(\text{TRU})\text{F}_3$ を用いる高速炉概念が提案されている³⁾。溶融塩高速炉の特徴として, 1)燃料サイクル上の自由度が大きく, 増殖炉, 転換炉, 燃焼炉のいずれとしても設計可能, 2)燃焼炉の場合, 固体燃料では課題となる発熱や線量の高いTRU含有燃料の成形加工が不要, 3)燃料/冷却塩のボイド反応度や温度反応度が負, 4)燃料/冷却塩は透明であり可視光での点検に有利, 5)炉心は減速材が不要であり除熱可能な臨界形状であれば良いため設計の自由度が高いことなどが挙げられている。

現時点の溶融塩高速炉は, 数値解析で検討される概念レベルで技術成熟度は極めて低いものである。しかしながら, 米でのMSREの経験や乾式再処理と金属燃料高速炉を統合したIFR(Integrated Fast Reactor)プロジェクトで蓄積した知見と経験を活用することができる。また炉心は均質で構造が単純であり, 炉心や1次系統は低圧システムであるため, 溶融塩高速炉機器の製造に関わる技術の成熟度は低くないとの見方もある。

2. 除熱型式

燃料増殖を行う溶融塩高速炉には, 燃料塩が一種類のシングル塩型と, 燃料塩と増殖のためのブランケット塩を分離したデュアル塩型がある³⁾。主流はシングル塩型であり, 除熱の方式やループの構成別にさらに4種類に

分類される。

- A) ループ型(loop)：燃料塩は原子炉容器外へ運ばれ炉外の熱交換器で二次系冷却材へ伝熱。
- B) 統合型(integral)：燃料塩は原子炉容器を出ること無く、容器内に設置された熱交換器で二次系へ伝熱。
- C) 直接接触型(direct coupled)：二次系冷却材を原子炉容器内で燃料塩と直接混合。自然に分離された二次冷却材を炉容器外へ移送し熱交換器で三次系へ伝熱。
 1. 沸騰塩化物：沸点が180℃と低い塩化アルミニウムを燃料塩と混合。直接接触させて塩化アルミニウム蒸気を二次冷却材として熱回収。
 2. 液体鉛：塩化物塩と混合しにくい鉛を炉容器上部から投入。炉容器底部に鉛プールを形成し燃料塩との直接接触で炉心を冷却。鉛は炉容器底部から回収され熱交換の後、炉上部へ戻される。
- D) 凝結壁型(frozen wall)：燃料塩は炉容器内に配置された熱交換器チューブで冷却され表面に固着。防護層として働き炉心内温度の高温化を可能に。

こうした除熱形式が提案されているが、現実的なのはループ型と統合型の二種類と ORNL は報告している³⁾。

3. 核熱特性

溶融塩炉では炉内に構造物がないため通常炉に比べ熱的制限が緩和でき高出力密度化が可能である。出力密度を制限するのは熱交換器での二次冷却系への熱輸送量であり、その上限は150MW/m³程度と評価されている。

いくつかの種類燃料塩を用いた溶融塩高速炉の中性子スペクトルを図1に示す³⁾。TRU含有率をパラメー

タとした無限体系での解析結果である。フッ化物に比べて塩化物では TRU 富化度が同等でもスペクトルが硬いことや、フッ化物では数百 keV の領域で共鳴による中性子束の“くぼみ”があることが分かる。このくぼみは F-19 の散乱によるもので、Pu-239 の中性子再生率 η が 2.5 を超えて増大するエネルギー領域に重なっているため、転換性能への影響が大きい。一方、塩化物では、そうしたくぼみはなく、また TRU 富化度が 10% 程度以上になると 100eV 以下の中性子束は 100 万分の 1 以下となり、Na 冷却高速炉と同様なスペクトルとなる。但し、塩化物を用いる溶融塩炉では、半減期 30 万年の Cl-36 が大量に生成されることが大きな課題である。

溶融塩高速炉の転換比(増殖比)は、他の高速炉と同様に、燃料(塩)の組成や炉内および周辺の重元素装荷量に依存する。塩中の重元素比率を増大させると、塩による中性子減速効果が弱まってスペクトルが硬化し、1) $\sigma_c / \sigma_f (= \alpha)$ は減少、2) 中性子放出数 ν は核分裂を誘起する中性子エネルギーの増大とともにほぼ線形に増加、するため増殖性能が改善する。しかし溶融塩炉の場合、燃料塩の燃料元素モル比は半分満たないため、重元素インベントリを確保しにくい。炉心をブランケット塩で囲み中性子漏れを低減する炉心構成とする必要がある。

高速スペクトルを持つ原子炉では、燃焼に伴う核分裂生成物(FP)蓄積による反応度低下が生じにくい。そのため、溶融塩高速炉ではFPガス捕集やフィルターによる貴金属粒子回収といった方法で燃料塩を簡易に処理するだけで長期間の臨界維持が可能であり、原子炉サイトに核燃料を回収・供給するための再処理施設を持つ必要がない事が経済面や核不拡散面のメリットとなり得るとされている。

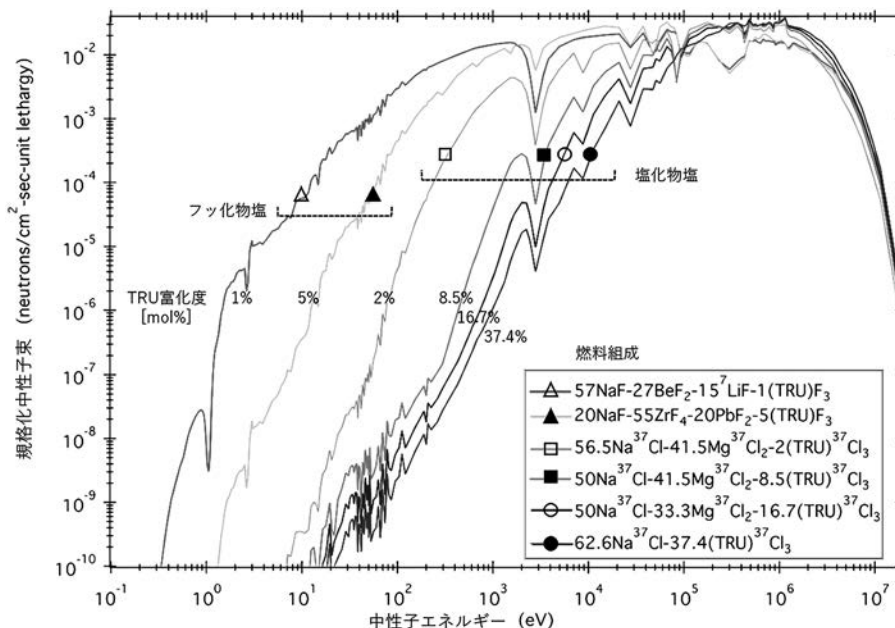


図1 燃料塩組成や TRU 富化度をパラメータとした溶融塩高速炉の中性子スペクトル

また、高速スペクトル炉では熱炉に比べ、原子炉の制御に重要な遅発中性子割合 β が元々小さいが、燃料が炉外ループを循環する溶融塩炉では遅発中性子損失があるため固体燃料炉よりさらに β が小さくなる。遅発中性子先行核の半減期は概して燃料塩循環サイクル時間より長いので、溶融塩炉の β は炉内体積/炉外体積の比から評価することができ、Pu-239 を用いる溶融塩高速炉の場合、この比を 1 以下に抑えることが望ましいとされている。

4. 溶融塩高速炉 MSFR の設計例

溶融塩高速炉の設計例として MSFR の概念図を図 2 に示す⁴⁾。現在は、本炉が Gen-IV システムとしての要件を満足するか否かを見極めるに必要な概念設計が行われている段階であり仕様は暫定的であるが、熱出力 3GW、燃料塩の全体積 18m³、最高温度は 750℃ で運転される。一般的な原子炉と異なり、炉心内に構造物は存在しないため、炉心領域は炉心キャビティと表現される。原子炉容器はその他、燃料塩出入口パイプ、バブル注入系、バブル/燃料塩分離器、そして炉心キャビティ外に設置される 16 群のポンプと熱交換器のセットから構成される。

炉心キャビティは直径/高さとも 2.2m 程度であり、燃料塩の循環サイクルは 3.9sec である。燃料塩には LiF-ThF₄-(²³³U/濃縮 U)F₄もしくは LiF を 77.5mol% 程含む LiF-ThF₄-(Pu-MA)F₃が、ブランケット燃料塩には LiF-ThF₄が想定されており、原子炉出入口温度差は 100℃、燃料塩の炉内/外体積比は約 1 となるよう構成されている。燃料と冷却材は同一の液体であるため、温度上昇に伴う体積膨張・ボイド化は常に負の反応度をもたらすドブラー係数も負であり、温度係数は -5pcm/K を示す。

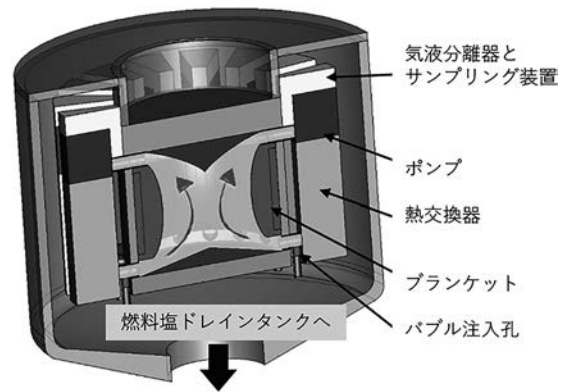


図 2 溶融塩高速炉 (MSFR) の炉心概念図

IV. その他の溶融塩炉とトリウム炉

1. Gen-IV 対象外の溶融塩炉

IAEA が新型炉に関する情報を整理し発行している ARIS (Advanced Reactors Information System)⁵⁾等をベースに、Gen-IV 対象とはなっていない溶融塩炉について簡単に整理する(表 1)。ARIS ではこれまで溶融塩炉を調査対象としていなかったが、2016 年版から含めるようになった。

溶融塩炉開発で最も進んでいるのは、実際は Gen-IV の溶融塩炉ではなく、ベンチャー企業が取り組んでいる溶融塩炉である。中でもカナダの Terrestrial Energy が提案する統合型溶融塩炉 IMSR (Integral Molten Salt Reactor) は、2019 年後半にも設計認証 (DC) 審査を NRC に申請する計画である。減速材に黒鉛、初段階の燃料に低濃縮ウランを含有したフッ化物塩を用い、熱交換器を炉容器内に配置した熱中性子溶融塩炉である。IMSR 商業用初号機を 2020 年代に建設することを目標に、オンタリオ州にあるカナダ原子力研究所 CNL のチョークリ

表 1 Gen-IV の枠組み以外で開発されている溶融塩炉^{1,6)}

原子炉名称	国	設計者	熱出力 (MWt)	電気出力 (MWe)	ユニット数	中性子スペクトル	減速材構造物	燃料	冷却材	進捗段階
IMSR	カナダ	Terrestrial Energy	400	185-192	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
MSTW	デンマーク	Seaborg Technologies	270	100-115	1	熱/熱外	金属被覆黒鉛	フッ化物塩		概念設計
ThorCon	国際コンソーシアム	Martingale	557	250	4	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
TMSR-SF TMSR-LF	SINAP	上海応用物理研究所 (SINAP)	395	168	1	熱	黒鉛	被覆粒子/ フッ化物塩	フッ化物塩	試験炉開発
FUJI 200	日本	トリウム溶融塩国際フォーラム (ITMSF)	450	200	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計完了
Stable (Static) Salt Reactor	イギリス	Moltex Energy	94	37.5	8	高速	N/A	塩化物塩	フッ化物塩	概念設計
SmAHTR ¹⁾	アメリカ	ORNL	125	NA	1	熱	熱	被覆粒子	フッ化物塩	予備的概念設計
LFTR ²⁾	アメリカ	Flibe Energy	600	250	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
Mk1 PB-FHR ³⁾	アメリカ	University of California, Berkeley	236	100	1	熱	熱	被覆粒子	フッ化物塩	予備的概念設計

1) Small Modular Advanced High Temperature Reactor, 2) Liquid Fluoride Thorium Reactor, 3) Pebble-Bed Fluoride-salt-cooled, High-temperature Reactor

バー研究所所有のサイト内で建設に適した地点を特定するためのフィージビリティ・スタディ (FS) を 2017 年の夏に開始している。

デンマークの Seaborg Technologies は、軽水炉の使用済燃料 (SF) から回収した Pu や MA を含む TRU 元素とトリウムを混合して燃焼する熱中性子溶融塩炉 MSTW (Molten Salt Thermal Waste burner) を開発中である。金属で被覆された黒鉛を減速材に用い、やや過減速となる燃料構成として負の温度/ボイド係数を確保している。初装荷燃料にはトリウム 93%、残りの半々を軽水炉 SF から回収したウラン (濃縮度 1.1%) とプルトニウムとしたフッ化物塩を燃料とする。

国際コンソーシアムである Martingale が造船技術を活用して開発するのはモジュール型の熱中性子溶融塩炉 ThorCon である。4 年以内にもプロトタイプ炉の運転開始が可能な技術レベルで建設費は \$500/KW と謳っており、積極的なビジネス展開で前述の通りインドネシアと開発に関する MOU を結んでいる。

中国では 2011 年から上海応用物理研究所 (SINAP) に設置した TMSR 研究センターを中心として TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) プロジェクトを実施している。TMSR には、被覆粒子燃料を塩で冷却する固体燃料型の TMSR-SF と液体燃料の TMSR-LF の二種類がある。両炉型とも 2MWth の試験炉、10MWth の実証炉を経て、複数ユニットで 1GWe の商業炉へと発展させる計画であるが、オンライン再処理技術開発を伴う TMSR-LF は TMSR-SF より 10 年程度遅い展開としている。近年は実験データベースの充実を理由として計画全体がスローダウンしていたが、昨年末には実験炉建設候補地としてゴビ砂漠南部中央を特定した。2015 年時点で本計画に関与する人員は 600 名でその平均年齢は 31 歳と若い。本取り組みは中国全体の原子力人材の拡充にも寄与している。

イギリスの Moltex Energy 社は燃料ピン内に塩化物燃料塩を充填し、その表面を冷却材のフッ化物塩で除熱する Stable Salt Reactor を提案している。放射能の強い燃料物質や FP がプラントを循環せずピン内に留まっていることから Stable-もしくは Static-Salt Reactor と称される (いずれも略名称は SSR)。炉心には軽水炉の様に燃料ピンを束ねた集合体のみが配置され減速材構造物を持たない。このため塩組成や燃料ピンピッチなどの変更によって中性子スペクトルを熱、高速のいずれにも調整可能で、燃焼/増殖の目的に応じた炉として設計できるとしている。但し、炉構成的に燃料塩体積比率が小さくウラン装荷量が少ないため、増殖炉とすることは容易ではない。

2. トリウム炉

冒頭に述べたとおり、トリウム燃料は溶融塩炉に限ら

ずあらゆる型式の原子炉で利用可能である。直近 10 年の間には、ハイテク製品に必要不可欠なレアアース資源生産の副産物として生じるトリウムの用途に関心が高まったこともあり、軽水炉、重水炉、溶融塩炉、ガス炉などでのトリウム利用が各国で検討されている。

固体/液体の別なく、Th-U 系燃料が炉内で示す核的特徴を整理する。Th-232 の捕獲反応から生成される核分裂性核種 U-233⁷⁾ は、増殖条件である「中性子再生率 $\eta > 2$ 」となる中性子エネルギー領域が熱～中速 (共鳴)～高速の広い範囲にまたがっているため、高速炉のみならず熱中性子炉でも増殖できる可能性がある。しかし η の大きさは (特に高速領域で) Pu-239 や Pu-241 には及ばない。従って増殖性能や燃焼度は U-Pu 系燃料に劣るが、原子炉の反応度に関わる指標の $\nu\sigma_f - \sigma_a$ (ここで ν : 核分裂あたりの放出中性子数, σ_f : 核分裂断面積, σ_a : 吸収断面積) のエネルギー依存性は Pu に比べてより平坦 (もしくはやや右下がり) であるため、冷却材ボイド化に伴う中性子スペクトル硬化時に反応度が低下しやすい。増殖炉設計の観点からは、増殖と低ボイド反応度の両立を図り易い特性がある。

熱中性子スペクトルで増殖を成立させる場合、核分裂性物質の富化度は低く抑えられるため、その炉内インベントリ (ton/GWt) は高速増殖炉に比べておおよそ一桁少なくて済む。よって現行軽水炉から増殖炉への移行をより短い期間で完了できる可能性がある。

軽水炉でのトリウム利用検討としては、1970 年代後半の米 SHIPPINGPORT での実証実験がよく知られている。燃料部が上下に可動する六角形燃料集合体で構成された加圧水型軽水増殖炉 (LWBR) で U-233 の増殖が実証された。約 10 年前からはノルウェーのハルデン炉にて (Th,Pu)O₂ 燃料の軽水炉利用の許認可取得を目的とした照射研究が実施されている。

重水炉 (CANDU or PHWR) を有するカナダ、インド、中国では燃料バンドル内の一部もしくは全ての燃料ピンを ThO₂ 燃料として利用する方策を検討している。特にインドでは、本バンドルを出力分布平坦化に活用したり、取出後に U-233 生成量の実測を行っている。カルパッカムに建設した PFBR では将来的にブランケット領域へのトリウム装荷を計画している。

溶融塩炉はトリウム利用や熱中性子増殖に適した炉型であるとされている。Th-232 から U-233 を生成する変換パスの途中にある Pa-233 は 27 日と比較的長い半減期を持ち、熱中性子捕獲断面積も 40barn と小さくないため U-233 の生産を妨げるが、燃料の連続化学処理が可能な溶融塩炉では燃焼に伴い蓄積する FP とともにこれを随時除去可能であり増殖比や資源利用率を高められることを、米の Flibe Energy や中国の TMSR は強くアピールしている。

V. おわりに

高品質な工業製品を生産する日本で生じた福島第一原発事故を目の当たりにした世界は、原子力の必要性を理解しつつも、従来型の原子炉が持つイメージを払拭できる新たな新型炉を求めているようだ。巨大津波が引き金とは言え、福島事故は、1) 従来の軽水炉の様に一次系が高圧、燃料ピン内側も高圧の炉は、2) 電源喪失し除熱不足になると炉心が溶融し、3) 水素ガスを発生させ爆発の恐れがあり、4) 放射性物質を環境へ放散させる、5) 事故後にも再臨界の可能性を持つ、との認識を世界に与えた。

これに対し溶融塩炉は、1) 低圧システムであり、2) 燃料は元々溶融状態、3) 水が無いので水素ガス発生無し、4) FP 元素はある程度塩中にトラップされ放散を軽減、5) 事故時には炉底部のドレインプラグで燃料塩を排出し未臨界達成、と定性的には上記の懸念に応える炉概念としてアピールされている。

トリウムは基本的にウランと同様に放射性物質を生む燃料であり、燃料の固体・液体の別なく、サイクルを閉じ増殖炉でこれを利用することこそが資源の有効利用と廃棄物を最小化する手段であることに違いはない。過度な誇張、期待は禁物である。

原子力に向けられる目は厳しさを増す一方、世界的には、エネルギー確保と環境保全を両立し得る原子力のポテンシャルを再認識する動きがある。原子力を“rebrand”

したいとの思いが溶融塩炉開発を活性化させ、原子力界に新潮流を生み出している。進展を注視したい。

— 参考資料 —

- 1) M. Allibert et. al, “Handbook of Generation IV Nuclear Reactors”, Pages 157-188 (2016).
- 2) OECD/NEA, “TECHNOLOGY ROADMAP UPDATE FOR GENERATION IV NUCLEAR ENERGY SYSTEMS” - JANUARY (2014).
- 3) D. E. Holcomb et.al., “FAST SPECTRUM MOLTEN SALT REACTOR OPTIONS”, ORNL/TM-2011/105 (2011).
- 4) Jérôme Serp et. al., “The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives”, Progress in Nuclear Energy, 77, pp.308-319 (2014).
- 5) IAEA Publication, “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)” 2016 Edition.
- 6) Trevor Griffiths et.al., “Feasibility of Developing a Pilot Scale Molten Salt Reactor in the UK”, MSR Review by Energy Process Developments Ltd. (2015).
- 7) 高木直行ら, 今何故トリウムか, 原子力 eye, Vol. 57, No. 4, pp. 4-25 (2011).

著者紹介

高木直行 (たかき・なおゆき)

東京都市大学 大学院共同原子力専攻
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 核設計,
革新炉, 核変換, トリウム



茨城大学-フランス放射線防護原子力安全研究所 (IRSN) 国際ワークショップ開催報告 「大気放射性セシウムとバイオエアロゾルの放出」

茨城大学 北 和之, 五十嵐 康人

I. 経緯

茨城大学では、理工学研究科、農学部、広域水圏環境科学教育研究センターなどで2011年3月に発生した福島第一原子力発電所(FDNPP)事故による放射性物質による環境汚染や影響について研究を行ってきた。そのため、本稿の著者らは日本地球惑星科学連合(JpGU)、日本放射化学会、日本地球化学会などの研究者が中心となった新学術領域研究(ISET-R)にも参画し、研究を進めてきた¹⁾。また、放射線防護、原子力安全、環境影響について世界的な研究の中心の一つ、フランス放射線防護原子力安全研究所(IRSN)の研究者も、FDNPP事故とその環境影響について深く関心を持ち、日本の研究者との連携を模索していた。2012年5月のJpGU大会FDNPP事故関係セッション(北がコンピーナー)でIRSN研究者(Oliver Masson 博士ら)が参加したことが契機となり、翌2013年4月のヨーロッパ地球科学連合年会(European Geosciences Union)でのチェルノブイリ-フクシマ事故関係セッション(北が共同コンピーナー)で交流を本格化し、相互訪問を行い、2016年度に茨城大学-IRSN間で学術交流を通じて国際的に成果を発信するとともに、研究レベルのさらなる向上や日仏間の学術を通じた親善を目的とする交流協定を締結した。

その活動の一環として、少なくとも2016年度から3年間、毎年IRSNの研究者を招き、シンポジウムあるいはワークショップを開き、茨城大学とIRSNにおける環境放射能研究に関する最先端の研究成果を互いに発表し、情報交換を行うこととした。さらに、共同研究の推進も期待している。

2016年度は11月に国際シンポジウムを開催し、双方のそれまでの様々な分野での研究成果について発表が行われ、フランス大使館からも陪席があつて多くの議論が行われた。2017年度は、特に大気中の放射性セシウム(Cs)とバイオエアロゾルとの関わりに焦点を絞り、2018年2月19日にワークショップを開催し、茨城大学、IRSN以外にも様々な研究機関からの参加者により、講演が行われた。著者の北と五十嵐(前所属:気象研究所)は、ワークショップの企画立案と当日の運営に関わった。そこで本稿では、その概要について簡単に紹介する。

II. 主な講演内容

これまで福島県浪江において実施してきたCsの再浮遊(地表汚染の一部が風などにより巻き上げられるなど、さまざまなプロセスによる大気への二次的な放出・飛散)観測で蓄積された我々の知見によれば、再浮遊には複数のプロセスが存在し、いずれのプロセスが主となるのかは季節に依存し変化する。特に夏季においては、従来知られていなかったが、Csを濃縮する真菌類の胞子や関連するバイオエアロゾルがCsの運搬体である可能性が高く²⁾、大気・森林相互作用のニューフロンティアも期待される。そこで、フランスや米国の環境放射能分野やバイオエアロゾル分野の専門家を招き知見を深め、連携の可能性を探った。仏IRSNのOlivier Masson博士とDenis Maro博士の二人に加え、米国Denver大学のAlex Huffman博士が来日され、3つのセッションに亘ってCs再浮遊とバイオエアロゾルについて議論を深めた。

最初のセッションは茨城大学尾崎副学長の挨拶で始まり、続いて仏大使館のフィリクス参事官からの祝辞が代読された。最初の講演者は茨城大学の北で、福島県内の汚染地域におけるCs再飛散観測の報告を行った。すなわち、夏季のバイオエアロゾル濃度と同期したCs濃度上昇(浪江では夏季に数~数十倍のCs濃度上昇、冬季に低)や降水時間帯と非降水時間帯とのCs濃度比較などが基調報告として述べられた。次いで仏IRSNのDenis Maro博士は、放射性物質の環境汚染における乾性沈着や再浮遊の重要性を強調し、そのフラックスにつき、傾度法、緩和渦集積法など、さまざまな観測手法があること、それらの精度、限界や応用可能な対象など³⁾について紹介した。金沢大学の牧准教授は、大気微生物学の観点から議論を進め、福島の森林域でのバイオエアロゾルの個数濃度($10^4 \sim 10^6$ 個/ m^3)変動や環境ゲノム抽出-DNA分析による群集構造解析について述べ、Cs輸送への寄与について触れた。仏IRSNのOlivier Masson博士は、霧による放射性物質の地表面沈着と植物表面への露の形成プロセスについて、野外実験による結果⁴⁾を紹介し、森林生態系や農地への沈着の重要性を論じた。

午後の最初のセッションでは、米国Denver大学の

Alex Huffman 博士が光学的な手法(レーザー散乱検出とレーザー誘起蛍光法の組み合わせによる)を用いたバイオエアロゾルの検出法について、室内実験と野外観測の経験を交えて報告し、新たな観測機器の開発についての先端的な研究成果⁵⁾も紹介した。次いで JAEA の木名瀬博士は、FDNPP 事故直後に話題となったスギ花粉の Cs による汚染状況の時間推移とその吸入による被ばく線量評価について概説した。中部大学の河村教授は、森林生態系に由来する一次有機物粒子が従来想定されていたものよりも量的に多く、それらはバイオエアロゾルであり、その有機物的な特徴を把握することで放出量などの評価が可能であることを示した。気象研究所の梶野主任研究官は、エアロゾル輸送モデルを用いて 2013 年 1 年間の避難区域内(浪江)と区域外(つくば)での大気観測結果と比較、再浮遊の領域収支を定量的に評価した。再浮遊係数 10^{-7} h^{-1} で森林生態系からの Cs 放出を仮定してはじめて、夏季 Cs 濃度上昇を説明でき、夏季における森林生態系からの Cs 再浮遊の寄与が大切であることを論じた。福島大学の渡邊教授は最近発生した汚染領域における森林火災による Cs の大気への放出の可能性を指摘し、焼け跡からの流出についても懸念と調査の必要性を強調された。

最後のセッションでは、気象研究所の関山主任研究官がエアロゾル化学輸送モデルによる沈着量の予測精度の向上を目指した、Cs の質量フラックス評価の試みについて述べた。筑波大学の羽田野教授は、Cs 再浮遊に寄与し得る真菌類胞子のミクロな放出過程の微分方程式による定式化と現象解析について論じた。このワークショップの最後には、筑波大学の古川准教授が、植物体への Cs の移行・取り込みと植物体内の分布状況の解析について論じ、森林生態系での Cs リサイクルの重要性が述べられた。

以上のようにこのワークショップでの各講演はある意味、マニアックと喻えることも出来る高度な内容を含む、極めて特徴的で学術的に興味深いものとなった。不

幸にして開催時期・場所の決定・広告から実際の開催までの間隔がほとんど無く、参加者は講演者も含めおよそ 40 名程度ではあったが、白熱した議論も行われ、新たな研究領域の構築も想定可能なほど認識が深まった意義あるワークショップだったと考えられる。今年度も引き続き同ワークショップは開催が予定されるが、この反省を活かし、十分な助走期間をおいた日程を設け、より多くの研究者が参加できるようにしたい。

— 参考資料 —

- 1) 科学研究費助成事業 2016 年度研究成果報告書 放射性物質の大気沈着・拡散過程および陸面相互作用の理解。
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PLANNED-24110003/24110003seika.pdf>
- 2) Kinase, T., Kita K., Igarashi, Y., Adachi, K., Ninomiya, K., Shinohara, A., Okochi, H., Ogata, H., Ishizuka, M., Toyoda, S., Yamada, K., Yoshida, N., Zaizen, Y., Mikami, M., Demizu, H., and Onda, Y.: The seasonal variation of atmospheric $^{134,137}\text{Cs}$ and their possible resuspension host particles at Tsushima and Yamakiya, Fukushima, Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0171-z>, pp.1-17, 5:12, 2018.
- 3) Maro, D., Calmet, I., Mestayer, P., Goriaux, M., Hébert, D., Connan, O., Letellier, B., Defenuouillère, P., Rosant, J.-M., Rodrigues, V., FLUXSAP 2010 Experimental Campaign over an Heterogeneous Urban Zone, Part 2: Quantification of Plume Vertical Dispersion During a Gas Tracer Experiment Using a Mast and a Small Tethered Balloon, 14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes - 2-6 October 2011, Kos, Greece.
- 4) Tav, J., Masson, O., Burnet, F., De Visme, A., Paulat, P., Bourrienne, T., Conil, S., and Maxime Simon, Deposition of radionuclides by fogwater on plants at Houdelaincourt, France, *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-15562, 2015.
- 5) Huffman, D. R., Swanson, B. E., & Huffman, J. A. (2016). A wavelength - dispersive instrument for characterizing fluorescence and scattering spectra of individual aerosol particles on a substrate. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(8), 3987.

Science Communication

科学とコミュニケーションを考える

ひと昔前の科学コミュニケーション

青山学院大学 岸田 一隆

今から10年以上前、日本の科学コミュニケーションの目的の一つに、子どもの理科離れを食い止めようというものがありました。すなわち、「科学を好きになってもらおう」「科学が嫌われないように工夫しよう」ということです。科学の「負のイメージ」をなんとか克服しようというわけです。

科学に「負のイメージ」を抱いている子どもは、一般に科学が苦手であることが多く、理科好きの子どもに比べて知識が劣っていると思われています。すなわち、知識量に差があることが科学に対する態度の違いになって現われているのだと思われていました。そこで第一段階として、正しい科学の知識の普及こそが大切だと考えます。

こうした、「正しい科学技術の知識を与えれば、市民は科学技術に対して肯定的になる」という考え方を科学コミュニケーションの分野では「欠如モデル」と呼びます。そして、これは今年の本誌1月号の『時論』における拙稿でも述べたことですが、このモデルは今では各種の調査研究によって否定されています。また、このモデルからは、「知識を持つ者が知識のない者に啓蒙する」という「上から目線」のコミュニケーションしか生まれられないのも問題です。このような一方的なコミュニケーションでは、「負のイメージ」はむしろ助長されるばかりです。コミュニケーションは双方向でなされなければなりません。

残念ながら原子力の分野では、未だに上記のような「ひと昔前の科学コミュニケーション」の状況に留まっていることが多いように感じます。おそらく、その理由は、原子力エネルギーにつきまとう圧倒的な「負のイメージ」にあります。

日本では、広島と長崎の2か所に原爆が投下され、福島第一原子力発電所で放射性物質の拡散を伴う事故が起きました。さらに、使用済み核燃料の捨て方が決まっていけないというのも国民は不安に感じます。また、目に見えない放射線の正体や、放射線被ばくの危険性など、あまりよくわかりません。そもそも、人間は「わからないもの」を不安視する傾向があります。

こうした「負のイメージ」を克服するために、「わかりにくいもの」を「わかりやすく」説明することが解決の一助となると考えること自体は、間違っているとは言えま

せん。ですが、これだけでは根本的な解決にはならないのです。それどころか最悪の場合には、一方的なコミュニケーションが「負のイメージ」を膨らませてしまう可能性すらあります。では、どうすればいいのでしょうか。

ここで、先月号でも取り上げた「一般市民向け公開シンポジウム」の例にしたがって、考えていくことにしましょう。この企画には、双方向のコミュニケーションを成立させる様々な工夫が施されています。

シンポジウム後半の「パネル討論」では、聴衆から募集した質問に答える「質問コーナー」を設けました。さらに、シンポジウム全体のプログラムが終了したあとに、講演者・パネリスト・聴衆が自由に話し合うことができる「フリータイム」を設けることによって、会場全体がより自由な「双方向のコミュニケーションの空間」になるように工夫しました。

ですが、それ以上に私が決定的に重要だと感じたのは、シンポジウムの冒頭のプログラム・マネージャーの挨拶でした。たしか、以下のような主旨の発言だったと記憶しています。「このシンポジウムを通じて、みなさんのご意見を伺いたい」「それらの意見を今後の計画に活かしたい」というものです。

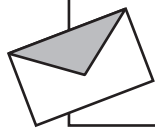
つまり、「自分の計画を説明したい」という一方的な態度ではなく、「聴衆の意見を聞きたい」という双方向の態度を始めから打ち出しています。しかも、それを「活かしたい」というわけですから、「コミュニケーションによって自らが変わる準備がある」と表明していることとなります。原子力の科学コミュニケーションに横たわる「自分が変わるつもりはない」という難点をクリアしています。

専門家と一般市民の間に、知識量において差があるのは紛れもない事実でしょう。ですが、コミュニケーションを困難にしているのは、必ずしも知識量の差だけによるものではありません。関心の差、価値観の差というのが、厚くて大きな壁を形成しています。

こうした「価値観の壁」を超えるには、内容をわかりやすく説明するといった「情報伝達のコミュニケーション」だけでは難しいのです。「共感・共有のコミュニケーション」というものが必要になってきます。

(2018年5月22日記)

理事会だより



「見る前に跳べ」か「見ながら跳べ」か

縁あって理事を務めることとなりました後、2年間の任期明けも近づき、理事会だよりの執筆も2回目となりました。理事会だよりは、現役の理事が輪番で執筆しており、最近の理事会で審議されている様々な懸案や学会全般の活動状況について、個々の自由な立場から記事を執筆できる学会らしい機会の一つとなっています。個人的には、学会活動全般について、この「学会らしい」という処にとっても惹かれてきました。一見すると多様性が溢れているように見える現代社会において、「らしさ」は、失われると取り戻せないものの一つであると感じるからであります。

私が理事を務めることとなったのは、理事選出方法が現在の方式に改革された初めての機会でしたので、選出前後に、複数の学会長経験者の方にお会いし、日本原子力学会理事の心得は如何なるものかを聞いてみました。その結果、理事を1, 2回務めても学会運営の全容は複雑で多岐にわたっていてとても理解できないので、「見る前に跳べだよ」との助言をいただきました。その助言に従って、周りを見ずに、かといって跳べもせず歩んできましたが、「学会らしさ」のような自分が良いと思っていたことが担当業務について進展することができたかどうかについては、反省しきりです。身の程を考え「見ながら跳べ」にしておくべきであったと思っています。

この2年間の主な担当業務は部会等運営委員会に係るものでした。当該委員会には、多くの部会や連絡会等の横断的な調整や情報交換を図ることに加え、年会や大会の企画・運営に責任を果たすという使命があります。

現在では、過去のプログラム編成で苦勞された関係者による事例の蓄積を踏まえて、「学会発表」のあるべき姿を見据えて、委員会での審議・決定と、理事会での承認も経て、年会や大会の「学会発表」に係る発表予稿のスクリーニングを関係者の多大な尽力によって実施しています。

個人の学術発表の自由と学術発表による学会会員全体や社会の利益を最大化することの均衡した実現のために、現在のところ、以下に該当する発表はプログラム編成の段階までにスクリーニングによって検出され、発表者に内容の改善を求めています。ただし学術論文の査読とは異なり、記載内容の再現性や論理の完備性の確認までを目的としたものではなく、「学会発表」においては、これらの点があくまでも発表者の責任となっていることにも注意をお願いします。

1. 学会の設立目的または定款に反すると判断される場合。
2. 倫理規程に反すると判断される場合。
3. 学術発表の場での発表に不適切であると判断される下記のような事例。

- 1) 原子力学会、すなわち原子力学に係る学術内容を伴っていない。
- 2) 内容の全部または主要な部分が既に公表されている。
- 3) 内容の一部に営利目的な部分や商業的宣伝が含まれている。
- 4) 内容の一部が軍事利用を目的としている。
- 5) 内容の一部に個人や団体への誹謗中傷が含まれている。
- 6) 内容の一部に公序良俗に反する記述等が含まれている。
- 7) 内容の一部に政治信条に関わる、宗教に関わる、または学術に関わらない主張が含まれている。
- 8) 目的、方法、論理的な結果あるいは結論が記載されていない。

私の理事任期は平成30年の総会までですので、この記事が掲載される頃には無事に理事職から解放され、重度身体障害の身で、車椅子を操って学会事務局会議室に通ったことを懐かしんでいるはずです。任期最後の機会に「見ながら跳ぶ」ために、部会等運営委員会担当理事として、僭越ながら年会・大会で発表される皆様へのごぞいませ。

「学会発表」につきましては、発表者や共同研究者が自ら実施した調査結果や実験結果に係る確認された事実に基づき、さらに、多面的に裏打ちされた論理的な推論によって演繹された討論を自らも行い、一定の結論に達していることを確認いただくことをお願いしたいと思います。

自由な学術と社会規範を守って、学会がさらなる発展を遂げるため、「学会発表」することを最終目的とするのではなく、「学会発表」に相応しい十分な学術性と社会的期待に応える在り方を理事会並びに学会として目指していますので皆様のますますのご理解と協力をお願いいたします。

(平成29年度理事 榎田 洋一)