

巻頭インタビュー

1 グランドデザインを もとに科学技術の推進を

有馬朗人
聞き手 澤田哲生



時論

5 科学コミュニケーションとコミュニティ形成

「分かる」という言葉には二通りの意味がある。
一つは「理解」であり、もう一つは「共感」である。
岸田一隆

7 福島高校の放射線の教育

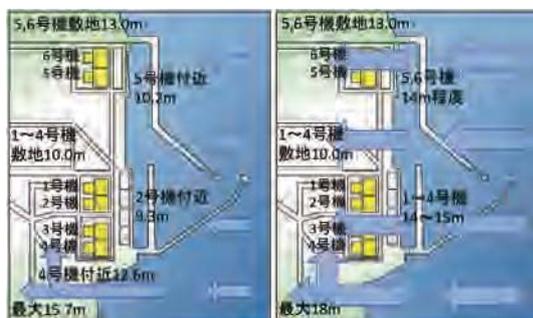
生徒はどんな不安を抱え、何を学びたいか。
原 尚志

解説

15 福島第一原発事故は従前の津波対策 で予防できたか —事故以前の想定津波高さ評価と東電の 対応の考察

4事故調（国会、政府、民間、東電）報告書をもとに、
わが国および東電の津波対応に関する事実関係をまとめ、
得られた知見を紹介する。

吉田至孝、宮野 廣



15.7m 試算結果[推定] (左) と実際の津波 (右) の比較

解説シリーズ

20 地政学的リスクとエネルギー 第4回 中東産油国の情勢と 地政学的リスク

中東は豊富な石油資源を有し、国際政治経済の
場で依然、影響力がある一方、紛争、テロ、宗派
対立など、多岐のリスクを抱える。また米国など
域外国の中東政策の影響もあり、中東情勢の展
望は大変複雑である。

小宮山涼一

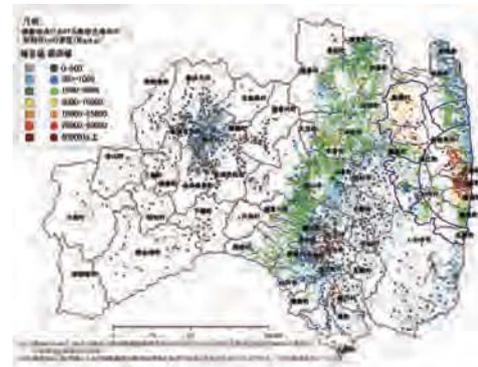
連載講座

福島の環境回復に向けた取り組み (第9回)

41 農畜産物の放射性物質対策

福島第一原子力発電所事故は農地や農畜産物にどん
な影響を与えたのか。また、放射性物質の除去、低減
や吸収抑制技術開発はどのように行われてきたのか。
福島県農業総合センターの取り組みをもとに紹介する。

鈴木芳成、佐藤 守、矢内清恭



福島県農用地土壌の放射性物質分布図

部会トピックス

46 福島第一原発事故の大気・海洋環境 科学的研究の現状 —事故の何が分かったか、事故から何が 分かったか

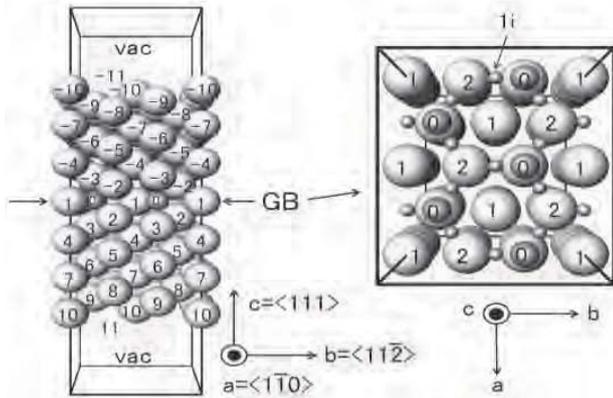
大気や海洋に放出された放射性物質は、どの核種が
どれぐらい、どこに放出され、それらはその後、どう
なったのか。研究成果の最先端を紹介する。

青山道夫、山澤弘実、永井晴康

30 粒界破壊における破壊力学試験と第一原理計算

原子力材料では粒界破壊がしばしば問題となる。粒界における原子間結合（凝集）エネルギーの低下はその有力な原因の一つであるが、それがマクロな破壊現象へとつながるメカニズムについては、未知の部分が多い。

山口正剛

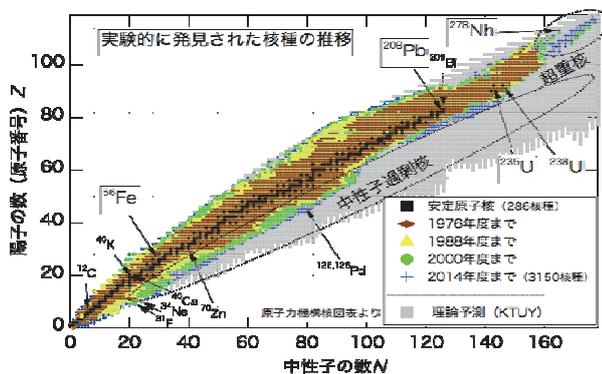


第一原理計算に用いたセル

35 核図表 ～壮大なる原子核の地形図～

陽子と中性子の複合体である原子核はその組み合わせで様々な性質を生じる。陽子の数を縦軸、中性子の数を横軸にして原子核を表現した「核図表」は原子核を俯瞰的に理解するのに広く利用されている。

小浦寛之, 湊 太志, 飯村秀紀



実験的に確認された核種の推移

59 10万年後問題

千葉 敏

報告 秋の大会からグローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント養成

東工大では全寮制の「世界原子力安全・セキュリティ道場」を基盤として、高い国際交渉能力をもち、国内外の原子力関連の産官学界で国際的リーダーとして活躍する人材「グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント」を養成している。

51 全体概要と成果

齊藤正樹

55 国内外インターンシップ

川合康太

57 東工大教育改革等への展開

井頭政之

解説

25 IAEA 低濃縮ウランバンク

～国際管理構想の実現に向けて～

IAEA が低濃縮ウランの貯蔵・供給を管理するウランバンクが、2018年に本格運用を開始する。燃料の供給を保証し、機微技術の拡散を防ぐのがその狙いである。

玉井広史, 田崎真樹子, 須田一則

部会便り

60 真夏の日立で熱い議論と久慈浜の海軟風 (材料部会夏期セミナー)

柴山環樹

40 From Editors

61 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 新入会一覧, 誤記訂正, 基金寄付者芳名一覧, 次年度会費請求お知らせ, 書籍販売のご案内, 英文論文誌 (Vol.55, No.1) 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/>

INTERVIEW

グランドデザインをもとに科学技術の推進を

有馬 朗人 氏に聞く



有馬 朗人 氏 (ありま・あきと)

東京大学理学部物理学卒業，理学博士
東大理学部教授，東大総長，理化学研究所理
事長，参議院議員・文部大臣，科学技術庁長官
などを経て，2006年から武蔵学園学園長。核
物理研究等で文化勲章。

「科学技術立国をめざしてきた日本の技術が，2005年を節目に凋落し始めている。大学進学率の上昇によって政府のサポートが十分にいきわたらなくなり，科学技術を推進する学と官とのスクラム体制も弱体化した」——東大総長，文部大臣，科学技術庁長官を務めた有馬氏は，今の日本の科学技術の水準の低下をこう憂える。そのための処方箋として同氏は，エネルギーや科学技術を進めていく司令塔を作ることと，科学技術推進のために予算措置を含めた高等教育の強化を訴える。また，原子力界に対しては未来を見据えた視点で将来を切り開いてほしいと述べた。

聞き手 澤田 哲生 (本誌，東京工業大学)

高速炉廃炉は国際的な共同研究で

—「もんじゅ」は廃炉が決まりましたが，今後の日本の高速炉開発について。

有馬 「もんじゅ」はあそこまで作っておいて，実は原子炉システムとしては，どこも悪いところはなかった。しかし，閉じることになってしまったことはとても残念なことだったと思います。まあ，ローテクで失敗したとも言える。ナトリウム漏れに炉内中継装置の落下です。

—そうですね。

かつてソ連が強かった頃から，高速炉の研究開発では西と東が競い合っていました。米国，西ドイツが降りてフランスと日本が残った。フランスに次いで日本も一旦足踏み状態にある。西側の敗北とも見られなくもない。ロシアはBN-800も順調の様だし，BN-1200という商用炉の計画もありますね。ロシア原子力界の重鎮エフゲニー・ベリホフ氏はかつて日本に協力を求めてきたこともあります。

—フランスは2010年にフェニックスの運転を終了し，その後は「もんじゅ」が研究を引き受ける態勢でした。しかし，2010年5月に運転再開したものの8月に炉内中継装置の落下により再び停止。そして3・11を迎えることになりました。

—そうです。「もんじゅ」は火を入れれば動くものでしたが，まことに惜しいことをしました。

—ポスト「もんじゅ」の見通しはいかがでしょう。

フランスとの協力のもとでASTRID計画がありますね。ただ，フランスの今の政権は原子力政策がやや不透明です。このままだとASTRIDもどこまでやれるかわからない。あれは，日本がどんどん乗り出していき，そ

れこそ主導権を握り徹底的にやるくらいの勢いで臨むべきではないかと思います。「もんじゅ」は廃炉という課題が残っていますので，ナトリウム高速炉の廃炉というこの技術開発は国際的に開放して，共同研究の場にしていくべきでしょう。

—関係筋の心意気の発現，奮起に期待したいですね。少し気になるのは，ここのところ日本の技術開発現場にはおやっと思うような話が少なくない。

国際核融合実験炉のイーター計画もどんどん先延ばしになっている。日本はかつて，イーターをなんとか日本国内に誘致しようと頑張りました。その他の技術では確かに自動車関係，製鋼，国産ジェット機，大手電機メーカーなどにあいついで問題が起っていますね。

日本の科学技術が凋落しはじめている

—日本の科学技術の研究開発に何が起っているのでしょうか。凋落の根本原因は何なのでしょう？

私は研究や教育の政策に関わってきましたので，自分の目で分析しています。節目は2005年頃と見ています。

—どういうことでしょうか。

科学技術基本法が1995年に施行されました。当時私は中央教育審議会の会長でしたが，この法律を良いものにしてと衆議院議院の尾身幸次さんと頑張ってきました。翌1996年には，橋本龍太郎総理(1996年1月11日—1998年7月30日)のもとで「科学技術基本政策」が制定されました。このような政策の基礎ができて2000年頃までは日本の科学技術力は伸びていった。その勢いは2005年頃までは確実にあったのです。一つの指標をあげれば，日本が世界に問うた科学技術論文数が世界第2位にまでなった。米国に次ぐ成果で，欧州を凌いだわ

けです。

— 2005年といえば小泉内閣の終盤ですね。選択と集中が叫ばれるようになっていたと記憶します。2002年から文科省が「21世紀COEプログラム」を開始しました。

2005年をターニングポイントとして日本の科学技術論文数は落ちていった。今は世界で5番目です。これもいつまで続くかわかりません。2000年頃から下降傾向が見え始めたのです。

— 凋落の根本原因は何でしょうか。

私は東大総長だった頃からシンガポールの元首相リークアンユーとは交流があり、2000年頃シンガポールの教育の政策顧問に請われ、シンガポールの教育全般にわたってアドバイスをしました。私が提案したのは、大学進学率を20%に抑えること。シンガポールは当時、小学校4年で4段階のランク分けをしていましたが、その時期が早すぎると、撤廃するように進言しました。その上で教育にこそ国家の将来がかかっていると、教育に徹底的に国費を投入するように勧めました。

— なるほど。シンガポールからは国際大学ランキングでアジア1位が出ていますね。シンガポール国立大学は2016年に25位(アジア1位)、南洋理工大学は2017年に11位(アジア1位)。ちなみに東大は、40位以下ですね。かつてはアジアで1位でしたが、中国の大学にも追い抜かれて今やアジアでは7番手あたりです。どうしたのでしょうか？

大学教育の「困窮」

日本はこの間、少子化で18歳人口が減ってきている一方で、大学進学率は昨今では50%にまで伸びています。私はせいぜい30%ほどまでが適正だと考えています(平成元年頃が25%)。平成4年の18歳人口が205万人でピークです。その後は常に減り続けています。平成27年には120万人です。しかしこの間、大学入学者数は約60万人ではほぼ横ばいです。30%を超える頃から日本はいわば大学教育の「困窮状態」になってきています。

— シンガポールの成功の秘訣は。

大学への進学率が30%を超えると政府がきちんとサポートできなくなるのですよ。20%程度だと手厚い支援ができます。その点、シンガポールはそこを見据えた政策をとり続けてきました。またグローバルに評価の高い大学と緊密に組んだ教育・研究プログラムを実施している。シンガポール国立大の場合は米国のイエール大など複数の大学と提携しています。また教育現場では授業を小学校から英語にした。そして、徹底的に世界から良い研究者や叢智を集めた。象徴的な事例として、一時私たちもお世話になったノーベル賞学者のシドニー・ブレナー博士(注：沖縄科学技術研究基盤整備機構初代理事長)をシンガポールはいまだに高給で雇っていますよ。

— 日本の大学の改革すべき点は何でしょうか。

すべての大学が、とりわけ旧帝大、東工大、一橋など、そしてリーダー的な研究所例えば理化学研究所などの教育研究スタッフの3割は、外国人であるべきだと考えます。これは平成元年から主唱してきましたがいまだに1割あるかないかです。グローバル化は掛け声ばかりで、実態は全くもって進んでいない。

— 何が壁になっているのでしょうか。

皆が外国人の招聘を嫌がります。Inbreeding(内部養成)なんだなあ。つまり子飼いの弟子をどうしても引き上げようとしてしまう傾向がいまだにある。私は教授時代に極力inbreedingを排した。多様性が重要です。自分のところはほとんどを外に出しましたがね(笑)。

— 今年、英国の科学雑誌のNatureが、日本の研究力の衰退傾向を予見し警鐘を鳴らす記事を載せました。これも日本の大学の困窮状態と共通要因でしょうか。

まず、なぜ論文数が減ってしまったのかです。それ以前に、20世紀に日本がなぜ伸びたかですが、そこには18歳人口の伸びとある種の相関があったとみています。平成元年頃までは伸びました。1990年頃がピークで200万人、来年2018年には119万に減ります。今年齢が50代から60代くらいの人々がこの人口の伸び世代の最終期の人たちであって、各方面でとても頑張ってくれたと思います。若者の人口が減ったことが本質的に影響している——それが根本原因であり共通要因だと考えています。

— なぜ根本原因なのですか？

18歳人口ピーク時は大学は入学定員を増やしました。18歳人口減の時期でも、大学は入学定員を増やしています。東大は入学定員数を減らしたが例外的です。京大などは人口増加期に入学定員を増やしたままです。その一方で高等教育費が増えていない。お分かりの通りです。言いにくいですが、優秀な学生は間違いなくいますが、総じて門戸が広がってレベルが下がっている一方で、高等教育費が増えていないので手厚い教育指導ができない。

— つまりNature誌の指摘は大学教育の問題であったということでしょうか。

そうです。その状態は今後も続いていくでしょう。教育先進国では高等教育費のGDP比率が1%に達しています。日本はかつて0.5%程度でしたが、少しずつ増えてきました。それでも0.6%程度です。私は政府に向かってせめて0.8%にはしてくれと言っていますが、放っておけば現状から減っていくことが危惧されます。高等教育費を増やして、進学率50%で入ってきた大学生を徹底的によく指導していくことが必要です。研究費の伸びもこの数年諸外国に比べて小さ過ぎます。

後進国！？—日本の高等教育

— 意外です。日本は高等教育に関しては後進国なので

すね。

いや、後進国ではないが、先進国でもない。それに、国立大学が法人化して以降、運営費交付金は年毎に1%ずつ減らされていきました。その結果、テニュア(教員の終身雇用)の若手が減り、任期付きポストが増えた。そのため、学生の理系大学院への指向性が低下してきています。

—国立大学の法人化の頃から大学教員の流動性がことさら叫ばれるようになりました。一方で、inbreedingはむしろより根強くなってきた。任期付きポストが流動性を促進し、結果的に大学の能力を活性化するというのは幻想だったようですね。高等教育の後進国化には、政治や政策の問題もありそうですが、政府はどう考えているのでしょうか。

安倍政権は今回の選挙で消費税の上増し分を目的税化すると言い始めました。そこでは高等教育費もぜひ視野に入れて欲しいところです。消費税が増えると、国立大学はもとより私学はもっと困る。一部を高等教育費に回してくれと私は言い続けています。大学に渡してくれれば、大学でなんとかする。せめてGDPの0.8%を大学に回して欲しい。目的税の使途に大学を加え、その使い道については大学の自主性に任せて欲しいのです。隣の韓国では5、6年前は0.6%だったのですが、今や0.9%を高等教育費に回している。日本の将来は高等教育の問題です。初等・中等では先生方がとてもがんばっており、日本はよくやっているのです。

—最近の大学では競争的資金を獲得して行くことが大きな目標になっています。

競争原理そのものはあってしかるべきですね。しかし、`グローバルゼーション`のようなスローガンに頼るようなやり方一辺倒ではいけないと考えます。また競争原理に基づく資金の集中投下は5年ほどで終わりを告げます。その先どうするかです。

—文科省が2014年に選定したスーパーグローバル大学はどうでしょうか？いわゆるトップ30。10年間で1校あたり毎年40億円ほどが集中投下されるようですが。

競争原理で各大学に競わすことは結構ですが、持続的な財政支出で大学人のボトム・アップ的自主的な考えで研究・教育を進めるべきです。革新的な研究は自主的な発想が最も大切です。じっくりと教育・研究が行えるよう高等教育と研究は予算をつけるべきです。

いずれにしても指定が終わった途端にしぼんでいって意味がない。それは何も大学だけではない。スーパーサイエンスハイスクール(SSH)プログラムも、その先への継続性が大切です。日本の将来を伸ばすには、継続的な予算措置が必須です。

ゆとり教育は創意と独創性をめざすもの

—中等教育はどうなっていますか？

最初に明言しますが日本の中等教育は世界のトップレベルを維持しています。PISA(OECD生徒の学習到達度調査)は、近年対象をOECD30ヶ国から72の国・地域に増やしました。その結果、シンガポール、香港、台湾が上位に顔を出すようになってきています。2015年の日本の順位は、科学リテラシー2位、読解力8位、数学リテラシー5位です。どの分野も1位はシンガポールです。数学では、2~4位が香港、マカオ、台湾。

—シンガポールが群を抜いていますね。「ゆとり教育」についてはいまだに批判や誤解があるようですが。

「ゆとり教育」は1970年頃に日教組が提唱し始めました。狭義には2002年から2010年頃まで初等・中等教育で実施されました。私は、その前1995年から1998年まで中央教育審議会会長としてこの問題を取り扱いました。ただ文科省は「ゆとり教育」と言ったことはありません。

1998年に小渕内閣のもとで成立した学習指導要領の理念は「生きる力」を新たな学力観として位置づけ重視するもので、総合学習の時間が導入されました。ただ、週休5日制の完全実施もセットだったため、トータルの学習時間が減り、それに応じて学習内容も減らざるを得なかった。「ゆとり」と「生きる力」はセットなんです。そのいわゆる「ゆとり」教育には、地域社会と大人が土日は時間のゆとりを持って子供たちと過ごし、子供を鍛えてほしいという意味も込めていたのです。

—拙いところがあるようには思えませんが。

一つには`ゆとり`、という言葉の持つ印象がよくなかった。当時、早速に「ゆとり教育なんだから、これからは宿題を出さないようにしましょう」というような趣旨のことを、責任ある立場の方でおっしゃった方がおられた。そういう見方が安直に広がったのかもしれない。いわゆる「ゆとり教育」の目玉の一つは、総合学習の時間の導入です。それで成果を上げた地域もあります。

—どこですか？

例えば秋田県です。秋田県では、学校と家庭が協力できる方法を編み出しました。『秋田県式家庭学習ノート』です。生徒が興味を持った身の回りのことの自由記述や苦手な漢字や計算の練習をノートに1日1ページ書く。生徒が自分の自主性でテーマを選ぶ。それに先生がコメントして返す。そういうことが総合学習の一環として取り組まれました。それが、「生きる力」を育むことになり、結果的に学習力全般を底上げすることになったのではないかと見ています。

—ちょっとした創意工夫なのですね。

そうです。ゆとりは創意であり応用なんです。「生きる力」の礎は自分で課題を発見し、それを自らが解決していくことです。そういうなかで、自分で独創性を発揮する。物事を広く見ることで広く考える。

科学技術を推進する司令塔が必要

—科学技術に話を戻しますが、「もんじゅ」はそもそも日本の原子力の黎明期に湯川秀樹氏ら物理学者の目指した国産原子力の一つの形でした。国産原子力はすなわち国産の科学技術の象徴で、その研究開発は1957年に発足した科学技術庁の本丸的政策そのものであったはずですが。「もんじゅ」の顛末を見て、日本の科学技術が今後どんどん衰退していきはしないかと危惧します。

大学の科学技術力を今こそもっと伸ばさないといいません。かつては、大学と文部省、科学技術庁、そして通産省の三者が良い具合のトライアングルを形成していました。基礎研究、その展開としての科学技術、そして工業化の役割分担があり、三者の協力体制がうまく機能していたのではないのでしょうか。

—それがなぜ今のような状況に。

橋本行革ですね。1998年6月に中央省庁等改革基本法が公布・施行されました。その中で、通産省の工業技術院はなくなった。その結果、通産つまり経産省のなかの科学技術力が弱くなった。今ある産総研は基礎研究に重点を置いており、第二の理化学研究所の様相を呈しています。かつては、工業技術院でコンピュータの将来技術やエネルギーの将来技術にしっかりと取り組んでいました。それが産総研にはできていないと見ています。私はもう一度工業技術院を作りなさいと言っています。

—エネルギーに関する技術開発は？

1970年代のオイルショックの頃に通産省はサンシャイン計画を実施して、太陽光を中心にあらゆる自然・再生可能エネルギーの技術開発に乗り出しましたが、その後をやめてしまいました。技術開発の成果はドイツなどに持って行かれたように見えます。原子力で言えば橋本行革の結果、2001年の中央省庁改編でかつての原子力委員会は内閣府に移った。それまでは科学技術庁長官が原子力委員長を兼ねていましたが、そうではなくなって、政権つまり内閣との直結パイプがなくなりました。同様に2001年に発足した総合科学技術会議も2014年に総合科学技術・イノベーション会議となりましたが、それ以前に比べて弱体化してしまいました。科学技術の研究開発の本職で最先端にいる実力者をもっと委員に配すべきです。

—エネルギー政策に関してはどうでしょう。

今や原子力に限らずエネルギー政策に真っ当に取り組む組織がない。日本には米国のエネルギー省もロシアの原子力庁のような組織もない。せめてエネルギー局を作るべきではないのでしょうか。

—経産省に資源エネルギー庁がありますが。

そうですね。資源エネルギー庁ががんばっていますが、政策に中心があり、しかし科学技術への取り組みが弱いように思います。エネ庁の技術系をもっと強くして

やらないといけません。工業技術院がなくなったのは実に惜しい。同時に科技厅もなくなって、文部科学省の「科学」の部分が弱くなった。文科省の中の「科学技術」の部分をもっと強くしなければいけない。今はエネルギーのみならず科学技術をどう進めていくかという司令塔がなくなってしまったに等しい。橋本行革によって科学技術は結果的に弱ってしまった。これを見直すべしと私は言っているのです。

—今の資源エネルギー庁では対応しきれていないのでしょうか。

エネ庁がもっと技術系を強くして、エネ庁が単に政策面だけでなく将来の科学技術そのものの推進役にもなってほしい。かたや文科省は科学技術にたいする大学の役割をもっと援助し、そのためには文科省は特に大学・大学院に対する高等教育費を増やさなければならない。教育を徹底的に見直す。単なる教育にとどまらない科学技術推進のための教育ですね。

「原子力の人たちはもっと自信を」

—日本原子力学会の会員に向けてメッセージをお願いします。

『原子力の人たち、もっと自信を持ってよ』と言いたい。

今、世界の原子力政策みれば、「もんじゅ」のような高速炉をどんどんやっつけていこうとしているロシア、インド、中国がある。特に中国はオーソドックスな原子炉に加えて、溶融塩炉や加速器駆動システム(ADS)などいろいろなものに挑んでいこうとしている。ADSについて言えば、日本はオメガ計画を相当早くからやっているのにもたついています。J-PARCにはADS研究をもっとしっかりやってほしい。中国では基礎は科学院、応用は科学技術部で着実にやってきている。両面的なんです。日本の原子力研究者は、独自の視点で今後何をやるべきかを本気で考えてほしい。今あるものを動かすのも重要だが、その次をきちんと見極めて、大学等で研究を進めて行って欲しい。

プルトニウムをどうしていくかについても、もっと発言して欲しい。使用済み核燃料をどうするのかについても同様です。

高温ガス冷却炉も相当程度までやっているのでもっと徹底的に伸ばして欲しい。また、材料研究は極めて重要ですが、今は実験炉が動いていません。これから廃炉になるものもある。関西では京大の熊取の実験炉が再起動しそうですが、関東などの大学では全くない。材料研究の関係者は危機感を感じているはずで、その点についてももっと声を大きくあげてほしい。後ろ向きではなく、誇りを持って将来を切り開いて行ってほしいと思います。(2017年11月13日 実施, 編集協力: 本誌 佐田 務)



科学コミュニケーションとコミュニティ形成



岸田 一隆 (きしだ・いったか)

青山学院大学教授
東京大学理学部助手、理化学研究所先任研究員を経て、現職。日本サイエンスコミュニケーション協会編集委員、日本生産性本部経営アカデミー・イノベーションデザインコース・プログラムコーディネーター。専門は、科学コミュニケーション、文明論。

原子力の負のイメージと欠如モデル

「分かる」という言葉には二通りの意味がある。一つは「理解」であり、科学を発展させて外界を理解することなどが、これにあたる。もう一つは「共感」である。こちらの方は、相手の気持ちを慮ったり、倫理や価値を共有したりする心の動きが、これに相当する。実は人類は、進化論的な生存戦略として、この二つの意味での「わかる」という行為を採用することによって、生存の確率を飛躍的に高めた。ゆえに、「わかる」という状態は安心感をもたらすが、「わからない」という状態は生命の危機に直結するかのとき生理的な不安感をもたらす。

近代以降、いろいろな形で科学技術の負の側面も知ってしまった私たちは、新しい科学技術の登場に遭遇すると、得体の知れないものとして拒絶反応を示す。ことに、原子力という分野に対して持つ一般市民の負のイメージはきわめて強い。核兵器のイメージとともに人類の前に登場し、原子力潜水艦などの軍事利用がなされ、平和利用と思われていた原子力発電所ですらいくつかの過酷な事故が起きてしまった。さらに、放射線が目に見えるようには「わからない」こと、科学的な説明が「わからない」ことなどが、原子力への不安感を大きくする。

これを解決するには、「わからない」状態を「わかる」状態にすればよい。それによって安心感をもたらされ、拒絶反応が収まる。すなわち、「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」というわけである。反対の言い方をすれば、「市民が科学技術に対して否定的な意見を持つのは、彼らの知識が欠如しているからだ」ということで、この考え方を科学コミュニケーション論の分野では「欠如モデル」と呼ぶ。

若者の多様性と柔軟性

だが、現実には「欠如モデル」のように単純ではない。一例として、エネルギーをテーマとした講義の機会を利用して、原子力への意識についてのアンケートをとった時

のことを紹介する。

文系も理系も含む全学部共通の1・2年生を対象にした初学者向けの講義だが、原子力に関する2回の授業では、「原子核反応の基礎知識」「原子炉の種類と構造」「リスクの定量的な議論」「核燃料サイクル」「最終処分問題」「核変換による高レベル放射性廃棄物の処理」など、重要な話題はそれなりにカバーされている。さらに、他の回の授業で、「発電コスト」「二酸化炭素排出量およびその他の環境負荷」「再生可能エネルギーの伸び率」「省エネルギーやリサイクルの効果」などについて扱っている。原子力の必要性に関する自分なりの意見を持つための材料は、十分にそろえてある。

講義の前後で、原子力に対する態度が変わった学生もいれば、変化しなかった学生もいた。しかも、原子力に対する態度が肯定的に変化した学生もいれば、むしろ否定的になった学生もいた。興味深いのは、知識が増えたがゆえに「態度保留」とする学生が少なからずいたことである。問題の複雑さを認識し、「そう簡単に結論を出せる事柄ではない」と気づいたというのだ。

2017年の新聞各紙の世論調査では、原発再稼働に反対する意見が50から60%、賛成が20から30%という数字が出ている。ここから、「世論は原発に反対なのだ」という単純な結論を導きがちだが、若い学生たちと接していると、意見は実に多様であることに気づく。「もんじゅ」の廃炉について、「私たち若者の未来の可能性の一つを、何の権利があって年寄りたちが奪うのか」という激しい怒りに似た意見をもらうこともあれば、「たとえ文明が維持できなくなって、人類が過酷な運命とともに衰退してゆくとしても、原子力から手を引くべき」という終末的な意見をもらうこともある。その幅はきわめて大きい。

原子力関係者のコミュニケーションは腰が引けているように見えることがある。その原因は、市民が悪印象を持っていると始めから思い込んでいること、説明してもわかってもらえないと諦めていること、などがあるのではないだろうか。だが実際には、市民の中でも特に若者

たちは、多様であり柔軟である。腰が引けて、大切なコミュニケーションの機会を喪失してしまうのは、人類の未来にとって大きな損失だと認識しなくてはならない。

情報伝達と共感・共有

問題は、どのようにすればコミュニケーションがうまくできるのか、ということである。そこで、先ほどの「原子力への意識についてのアンケート」で、原子力に対する態度が変わった学生にその理由を尋ねた。「知識の増加」をその理由に挙げた学生も多かったが、それと同程度以上に「先生が信用できそうだったから」というものがあった。実は、ここにコミュニケーションへのヒントが隠されている。

「分かる」という言葉に二通りの意味があったように、実はコミュニケーションには二つの機能がある。一つは、知識や情報を伝達する「情報伝達」の機能であり、もう一つは、価値観や倫理観を伝え合う「共感・共有」の機能である。「欠如モデル」の最大の問題点は、一方向に知識を「情報伝達」すれば事足りると思っていることである。しかし、後者の「共感・共有」の機能は、コミュニケーションにおいて、きわめて重要な意味を持っている。なぜなら、人間は本質的に「人の心とコミュニケーションしたがっている」からである。そして、社会的コンセンサスを形成するためには、「共感・共有」のコミュニケーションが欠かせない。

たとえば、地方創生事業などで、地域住民に大きな負担をお願いしなくてはいけないことがある。ある地域では、企画担当者が長い時間をかけて、粘り強く何度も何度も住民たちのところに足を運び、説得を続けたそうである。その結果、「私はあなたの意見にはまだ反対だが、あなたが信用できる人間だということだけは分かった」と言ってくれたそうである。本格的に話を聞いてもらえるのはそれからののだ。まずは、人格同士が通じ合う「共感・共有」のコミュニケーションが全ての出発点となる。

全体に責任を持つ

ある心理学の実験結果から、「相手が同じコミュニティに属していると認めた時、人間は生まれつき利他的にふるまう」ということがわかっている。持続可能社会を実現するための成熟した議論をして、優れた総合的判断を下すためには、まず出発点として、私たちが「同じコミュニティに属している」と感じる必要がある。「共感・共有」のコミュニケーションとは、ある意味、「コミュニティ形成」のことなのだ。

同じ運命共同体に属しているのだから、そのコミュニティの未来に対して、「ひと事」のような態度ではすまされない。全てを「自分事」としてとらえなくてはならない。コミュニティに対して、全体として責任を持つことが必要なのである。「縦割り行政」や「研究者の専門の細

分化」などといった、部分にしか責任をとらない態度では、市民の不信感を払拭することはできない。

ゆえに、「原子力の科学コミュニケーション」を考える際には、「原子力」のことだけを考えていけばいいというわけにはいかない。「コミュニティの未来像をどうすべきか」ということから考え始めなければならない。選択肢の中には、「原子力利用をやめる」どころか、先ほどの「文明を捨てる」というものまでありうるのだ。こうした議論に向き合える間口の広い態度で臨むことで、コミュニケーション成功の可能性が見えてくる。

ゼネラリストのすすめ

世の中のあらゆることを、自分の問題として責任を持つ心があれば、ごく自然に「リベラルアーツ」が身につくようになる。もちろん、全ての分野に「専門家のように」通暁する必要はない。自分の健康に気を遣ったり、医師と相談して自分の治療方法を決めたり、そうした総合的判断に必要な知識をそなえるようなもので十分である。この「リベラルアーツ」こそが、優れた総合的価値判断を下すためのベースとなる。

ところが、一般市民とのコミュニケーションや人類全体への責任を論ずる以前に、はたして原子力分野の中ですら、関係者同士が互いに十分なコミュニケーションをとれているのだろうか、という疑問が生じる。これは、各人が原子力の「総合知」を有しているか、と言い換えることができる。理学と工学で話は通じ合っているか、軽水炉の技術者と高速炉の研究者で前提となる考え方に齟齬はないか、核燃料サイクルや処分問題についての関心に温度差はないかなど、今一度振り返って考えるべきであろう。

一般市民からすれば、あらゆる「原子力関係者」は、原子力分野の全てに通じている人のように見える。医師で言えば「総合診療医」のようなものである。そして、先に挙げたように、市民とのコミュニケーションを成立させるには、原子力の全てだけではなく、エネルギー全体、さらには文明全体にまで、考えを巡らせなければならない。大変かも知れないが、原子力に携わる人には、ぜひ「優れたゼネラリスト」を目指してほしい。人類の未来を背負う覚悟で、市民と共に考える。そんなコミュニケーションを実現してほしい。

さて、「共に考える」ためには、やはりある程度の知識は一般市民にも必要になるし、さまざまな問題について関心を持ってもらわなければならないし、共に考える場としてのプラットフォームが必要になる。実はこうしたことを用意するのは、科学コミュニケーションを専門とする者の仕事である。すなわち、この時論の文章は、最後は執筆者自身に返ってくる。さまざまな仕掛けを準備中なので、ぜひ期待して待っていただきたい。

(2017年9月15日記)



福島高校の放射線の教育



原 尚志 (はら・たかし)

福島県立福島高等学校教諭
1985年より福島県立高等学校教諭(理科)。2
度目の勤務となる福島高校で東日本大地震を
経験。以後部活動で放射線計測に取り組む生
徒の指導にあたる一方、総合学習で放射線の
教育に取り組んでいる。

2017年9月日本学術会議から「子どもの放射線被ばくの影響と今後の課題」という報告が出された。福島での生活に何の不安もないことが報告されただけでなく、特に子どもたちへの健康影響を指摘する一部の論説に対して厳しい指摘もなされた。しかし残念ながらこの報告については地元紙が報じた程度で、全国紙は一部が福島版に掲載した程度でいまだに大きく報じておらず、市民生活で話題に上ることもなかった。(2017/9/29 現在)

原発事故直後から、放射線の影響を懸念するニュースは度々取り上げられたが、6年の間に様々なデータが蓄積され影響を否定する結果が公表されているのに、メディアが取り上げない。それは私たちにとって、正確な情報を獲得する機会を奪われていることを意味する。特に将来を担う若い世代に放射線や福島の状況を正しく伝え、彼らの不安を取り除くことは、福島への信頼を回復する上で大切なことではないだろうか。

福島高校は、平成19年度より文部科学省からスーパーサイエンスハイスクール(SSH)に指定され、理数教育の充実と特徴あるカリキュラム開発、生徒の課題研究、海外の高校生とのサイエンス交流などに積極的に取り組んできた。その中で、生徒が放射線や福島の現状を学び発信する場面も設けてきた。ささやかな実践であるが、参加生徒の感想とともに紹介したい。

生徒はどんな不安を抱え何を学びたいか

放射線を学ぶ授業は、学校設定科目「SSH総合」の「応用講座」の中で実施してきた。応用講座は、2年生320名が16講座から1講座を選択し、現代社会や地域の問題について、1テーマを5回計9時間の授業で体験的に学ぶというものである。今年は8名(男子4名女子4名)の生徒が放射線の講座を選択した。8名は全て一般の生徒であり、課題研究で放射線に取り組んでいる生徒や、海外の高校生に対して福島の現状を発信するために学んでいる生徒はいなかった。

放射線を学ぶ最初の授業では毎年「心配なことは何か」「学びたいことは何か」というアンケートを実施してき

た。「心配なこと」について今年の記述の一例を示すと、

- ・何十年後かに健康被害があるのか?
- ・世界の人々が福島県産を避けるようになること
- ・他の国地域から見た福島へのイメージ
- ・原発の再稼働
- ・伝えていく責任、どう伝えて良いのかわからない
- ・放射線が大量にあっても目に見えず気づかないこと

である。健康影響を心配する記述は多数の生徒からあげられたが、重複を避けて記述している。過去には結婚・出産への影響という記述も多かったが今年はなかった。代わって「伝えていく責任」という記述が初めて現れた。

そして「学びたいこと」として多くの生徒があげたのも、やはり健康影響である。この様な講座選択者の心配や学びたいことの上位が健康影響であるという傾向は、この6年間全く変わっていない。

放射線と福島を学ぶ講座の内容と感想

アンケートから今年の内容を以下のように編成した。

- ①自宅の空間線量および個人線量の相場観の育成
- ②放射線に関する基礎知識の習得
- ③地域で放射線の対策や復興に尽力を重ねてきた人々の活動と努力を知る
- ④県民健康調査結果(甲状腺検査)について

例年編成で重視していることは、放射線の計測を通して線量の相場観を育成することである。それは単なる計測体験だけではなく、自宅や自分の線量をマップなどにし友人と情報交換することを含んでいる。そこでは先輩たちのこれまでの蓄積が役立ってきた。また地域で復興のために尽力する人から直接話をお聞きすることも大切なこととして、毎年地元の方に講師をお願いしている。これらを柱にして毎年の講座を計画してきた。

今年の特徴は、②に関連してベクレルモニターを用いて生徒が持参した食材の計測体験を実施したこと、③④に関して地元の方を講師として招いた点である。

最終回にはまとめとして自由記述で「講座の良かった点」「改善点」を書いてもらった。「良かった点」として、

- ・実際に自宅の線量を自分で計測したり、食材の線量を計測したりすることで、自分の目で安全性を確認するということができ、よい経験になった。
- ・自分で放射線量を計測して、それをまとめることで放射線について身をもって感じられたこと。
- ・科学的に放射線の説明してもらえたところ。
- ・みんなと話しあう形式の授業であるところ。
- ・今も避難生活で苦しんでいる人々に対して、寄り添って話を聞いてあげなくてはならないこと、福島県民の人権と今後の世界に残しておきたいデータを取ることに境界線などを考えることができた。
- ・避難している方とかかわっている方に直接話を聞いたのも、避難地域の現状を知ることができる良い機会だった。

などがあげられた。これまでの実践により、体験的で科学的な放射線学習、関係者から直接話を聞く、学んだことをもとに互いに話し合う、が高い評価につながる事がわかってきた。

「改善点」では、「放射線について被ばくや食材などの面で不安に思っている人に話を聞けたらよかった」「反対意見も聞くべきという複数意見を聞いたほうがよかった」があげられた。この様な記述はこの2件だけであったが、この指摘は生徒の不安が簡単には払拭されないことを意味する、と解釈している。一部の生徒にすぎないかもしれないが、事故後繰り返された福島での生活への不安を煽る報道の影響が今も心の底に残存していて、不安を取り除くことは難しいのかもしれない。

フランス高校生との福島を学ぶワークショップ

フランスの高校生との放射線防護に関する交流事業は、2014年から続いている。当初 Skype を用いた交流の予定であったが、毎年3月にフランスで実施される高校生発表会に参加する形に進展し、さらに2015年夏からは、フランスの高校生が来日して東京・福島の高校生と共に福島の現状を学ぶワークショップを実施して、相互交流を実現している。昨夏の内容は以下の通りである。

- 8/1〔講義〕「福島原発事故と被害の現状」福島大学名誉教授清水修二先生
- 8/2〔見学〕三春環境創造センター→大熊食堂→小高区東部仮置場→請戸海岸→浪江町
- 8/3〔見学〕磐梯山噴火記念館→五色沼→喜多方ラーメン→飯盛山→白虎隊記念館
- 8/4〔議論 線量と避難帰還〕→〔見学〕桃農園→放射線測定→パーベキュー→飯坂町堀切邸→わらじ祭り
- 8/5〔議論 風評〕→まとめのプレゼン

計画においては、福島で放射線計測を自ら行い分析も自分たちで行うこと、できる限り事故・避難・風評の現場に近づき関係者から直接話を聞くこと、東北有数の観光県として福島の豊かな自然・歴史・食文化の一端を楽

しんでもらうこと、学び体験したことをもとに互いに議論を深め共有すること、を重視してきた。一部ではあるが以下に、参加生徒の感想を示す。

- ・福島に来る前、「福島」が原発だけでなく、県の名前であることも知らなかった。また、フランス人の多くは全てが放射線で汚染されていると考え、私がなぜ福島を訪れるのか理解できない人もいた。このワークショップを通じ、「福島」は単に原発だけでなく、美しい自然豊かな壮大な県であること、会津の観光やわらじ祭りなどを通じて、日本の原風景、歴史や文化を学ぶことができ、福島について正しく理解できるようになった。(フランス)
- ・参加する前は福島に対して「復興があまり進まず荒廃しているのか」といったイメージを持っていた。しかしそれは間違いであることが分かった。街は綺麗に洗浄され、土壌等の計測の数値を見ても高い線量は確認出来ず、放射線量が高い地域は実に限られた地域であった。福島のリアルを目にすることでその理解をぐっと大きく進めることが出来た。まさに「百聞は一見にしかず」ではないか。このような機会を多くの学生に与えてほしい。(東京)
- ・今回のワークショップでは、データに基づいて考えたり、様々な場所を訪問することで、福島の安全性や問題点について学ぶことが出来ました。特に、個人線量の変化について皆さんと議論したことが印象に残っています。また、福島の魅力に直に触れたことで、県外の方にも、また福島に来たいと感じていただけたと思います。今後も、福島の今を伝える活動を積極的に行っていきたいです。(福島)

海外はともかく東京の生徒が、荒廃した福島をイメージして参加した点は県民としては複雑だ。だが「百聞は一見にしかず」「このような機会を多くの学生に与えてほしい」との率直な感想を寄せてくれたことは嬉しい。来年はさらに参加校を増やしてワークショップを実施したいと計画している。

最後に

「福島復興についてのニュースを見てもその位置付けがどこにあるのかわからず、充分理解できない」とか、「放射線について基本から学びたい」と語る生徒は多い。しかし、福島では放射線だけの教育では足りないように思う。放射線で汚染された事で、生徒たちの郷土に対する信頼が揺らいでしまったからだ。すなわち、福島での原発事故に関わる教育において大切にしなければならないもう一つの視点は、郷土に対する信頼の回復だろう。多くの生徒たちが、「課題はあるが福島は大丈夫」と自信を持って言えるよう、そこでは福島の大人の役割が最も重要に思えてならない。(2017年9月29日記)



復興庁が東日本大震災の復興状況に関する年次報告

復興庁は東日本大震災からの復興状況に関する年次報告をまとめ、2017年11月29日に国会に提出した。2016年10月から2017年9月までの状況をまとめたもの。

報告によれば福島原子力災害被災地域のうち双葉町・大熊町を除く計9市町村で、2017年4月までに避難指示や居住制限指示がすべて解除された。放射性物質の除去については帰還困難区域を除いて、2017年3月までに除染実施計画に基づく面的除染がおおむね完了した。帰還困難区域については将来、帰還困難区域全ての避難

指示を解除するという方針の下で、5年を目途に、住民の居住を可能とすることを旨とする「特定復興再生拠点区域」の整備を進めている。また、中間貯蔵施設については用地取得、施設整備、除去土壌等の輸送を進めている。

なお、東日本大震災にともなう避難者総数は約8万人(2017年9月時点)で、うち原発事故にともなう避難指示区域からの避難者は約2万4千人(同4月)となっている。

(原子力学会誌編集委員会)

UNSCEAR 白書、福島の線量低く関連リスク低いと確認

原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)のM. クリック事務局長は2017年10月27日、堀井学外務大臣政務官を表敬し、福島第一原子力発電所事故による被ばく線量を推計して健康リスクを評価した「2013年報告書」刊行後の進展をまとめた「2017年白書」を手交した。堀井政務官はUNSCEARの同報告書およびその後の取り組みについて、国連の機関による科学的で中立的な評価として重視していると述べた。UNSCEARは10月29日、同報告書・白書についての講演を福島県いわき市で開催している。

UNSCEARが2014年4月に刊行した「2013年報告書」は、福島県においてはチェルノブイリ原子力発電所事故後に観察されたような多数の放射線誘発性甲状腺がんの発生を考慮に入れる必要はないとし、放射線による乳がん、小児白血病または他の小児がんの発生率の上昇が識別可能なレベルになるとは予測しておらず、短期間における原子力事故の最も重大かつ顕著な健康影響は、精神衛生や社会福祉に関するものであったとの考えを示している。UNSCEARは同報告書公表後も継続してフォローアップを行ってきた。

今回「2017年白書」では、2016年末までに利用可能となっていたさらなる情報の特定を続け、2013年報告書への影響を評価するために、関連する新規文献のレビューを体系的に実施。これらの新規文献の大部分は、2013年報告書の主な仮定および知見を改めて確認するもので、同報告書の主要な知見に実質的に影響をおよぼしたり、主な仮定に異議を唱えたりする文献はなかったとまとめている。UNSCEARでは、資料のレビューに基づき、現

時点で2013年報告書の評価や結論に何ら変更を加える必要はないと判断。一方で他のいくつかの文献については、さらなる解析や研究の追加によって、より確実な証拠を得ることが必要であるとしている。

なお、2016年に「18歳未満の甲状腺がん発症率が福島県では日本全国平均と比べ約20~50倍高かった」とする論文が発表されたことに関し、高感度超音波検診の影響への考慮が不十分であるなど、調査の計画と方法についてあまりにも偏りが生じやすいものとして、今回の白書では「重大な欠陥があることが判明した」と述べている。さらに、超音波による感度の高い甲状腺検査による過剰診断や小さな甲状腺がんへの積極的な治療に対する懸念について触れ、「甲状腺スクリーニングは複雑な問題であり、福島第一原発事故後において、スクリーニングの範囲、性質、そして継続を判断するためには、純粋な科学的課題の範疇を超える要素(社会経済的要素、公衆衛生、法律、倫理、人権に関するものなど)を考慮する必要がある」としている。

一方、10月23日に開催された第28回「県民健康調査」検討委員会では、鈴木元国際医療福祉大学クリニック院長が、新たな情報を取り込んで福島県内の1歳児の外部被ばくおよび内部被ばくからの甲状腺等価線量の平均値を再評価した結果、全ての地域で40mSv未満であり、2013年のUNSCEAR報告書の7~69%の値となったことを報告。今後さらにデータの不確実性を低減して2018年度に線量再評価をまとめる。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

WANO, 原子力産業界若手の国際 NGO との協力強化

世界原子力発電事業者協会(WANO)は2017年10月16日、世界の原子力産業界の若手技術者や研究者有志による国際 NGO「原子力青年国際会議(IYNC)」との協力を一層強化するため、了解覚書を締結したと発表した。両者間の協力を促進することで、共有課題である原子力発電所の安全確保で一層の向上を図るとともに、原子力産業界の将来を担う若者世代としての自発的な戦略や目標の達成に役立てることになる。

WANO はチェルノブイリ事故を契機に、世界中で440基以上の商業炉を保有する原子力発電事業者が、原子力発電所の安全性と信頼性を最高レベルまで高めるために設立した非営利団体。今回の覚書を通じて、IYNCの若手技術者達がWANOとその活動に親しめるよう緊密に連携するだけでなく、IYNCの目標の1つである「熟練作業員の知識を若手技術者や専門家に継承」を一層加速し、若手技術者同士のネットワーク構築にも貢献する考えだ。また、同覚書によって、必要なスキルや知識を身につけるための指導・助言プログラム、ワークショップ、セミナー、実務研修制度などを若手技術者らに提供。専門能力をさらに高めるための機会としてほしいと強調した。

IYNCでは、世界45か国を代表する原則35才以下の若手原子力技術者らが、原子力の平和利用促進や世代と国境を越えた知識の継承を目的とする国際会議を、2年に1度のペースで開催している。2000年にスロバキアのブラチスラバで初の会議を開催したのが皮切りで、プログラムの策定や講師の招聘、参加者の募集、資金調達と言った運営のすべてを、IYNCの有志が担っているのが主な特徴。論文発表や質疑応答を通じて専門情報を交換するほか、参加型プログラムを数多く取り入れて参加者同士の親睦が深まるよう工夫している。また、世界各地の「原子力青年ネットワーク連絡会(YGN)」、およびその他の若手組織とも連携しており、効果的な人的ネットワーク作りの場を提供。2016年7月に中国・杭州で開催した第9回会議には、日本を含む32か国から400名以上が参加した。次回会議は、2018年3月にアルゼンチン・バリロチェでの開催が予定されている。

【南ア】

新設候補サイトが環境影響評価をクリア

南アフリカで原子力発電設備の調達を担当する南アフリカ電力公社(ESKOM)は2017年10月13日、政府の原子力発電所新設方針に沿ってサイト許可(NISL)を申請していた2サイトのうち、西ケープ州のドイネフォンテインに対して、環境問題省(DEA)が環境影響面の許可を発給したと発表した。「ニュークリア1原子力発電所」と仮称される新設計画で、発電所設備と付帯インフラがドイネフォンテインの環境に及ぼす影響に関する報告書の最終版(F-EIR)を承認した。これによりESKOM社は、南ア唯一の原子力発電設備であるクバーク発電所に隣接する同サイトで、新たな原子力発電所の建設に向けた手続をさらに進めることができる。

南ア政府は2010年の統合資源計画(IRP)に基づき、2030年までに960万kW分の原子力発電設備を新たに建設することを計画。ESKOM社は2016年3月、候補に上がっていた5サイトをドイネフォンテインと東ケープ州タイスブントの2か所に絞り込んでNISLを国家原子力規制当局(NNR)に申請した。中立的立場の環境影響関係コンサルタントであるGIBB社が取りまとめたF-EIRによると、タイスブントの方が原子力発電所立地点として好ましいと考えられるものの、ESKOM社としてはこれまで、両サイトに同等の適性があると認識しており、NISLの取得手続は両サイトで継続的に進めていく考えを明らかにした。

【ロシア】

バラコボ2号機の運転期間を26年延長、合計56年間に

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は2017年10月17日、連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)が東部のサラトフ州で稼働するバラコボ原子力発電所2号機(100万kW級PWR)の運転期間を、2043年まで26年間延長することを許可したと発表した。これにより、1987年に送電開始した同炉の運転期間は、合計で56年間に延長されることになる。

ロシアでは、第3世代プラスのロシア型PWR(VVER)設計として開発した「AES-2006」の耐用年数を当初から60年に設定している一方、それ以前のVVERにおける設計上の運転期間は最大30年としてい

る。そのため、国内では連邦政府の原子力発電所開発プログラム、および民生用原子力発電公社であるロスエネルゴアトム社の「2013年～2023年までの運転期間延長プログラム」に基づき、運転開始後30年が経過しつつある原子炉から適宜、10～25年ほど運転期間を延長する対策を進めている。ロシアはまた、輸出したVVERに対しても、運転期間延長や機器の最新化プロジェクトを含めたあらゆる保守・改修サービスを提供。2016年だけでロスアトム社傘下の担当企業、ルスアトム・サービス社の国外契約による収益が対前年比33%増の7,100万ドルに増加するなど、ロスアトム社において最も成長著しい事業の1つだとしている。

専門家による原子炉の状態調査も含め、バラコボ2号機で運転期間の延長に向けた準備作業が始まったのは2012年。同発電所では、運転期間延長の正当性を示す文書の作成や大規模な改修作業を開始した。追加される運転期間に備えて機器類の技術的コンディションを整える作業など、原子炉の物理的パラメーターや設計特性を最新の基準や要件に適合させる必要があり、同発電所が提出した関連文書はボルガ地域間行政原子力・放射線安全監督機関の専門家が審査。2017年7月には準備作業の最終ステージとして、専門家チームが直接同発電所を視察し、2号機が運転継続できる状態であるか注意深く調査したとしている。

国外のVVERに関してはルスアトム・サービス社が現在、10か国で稼働中の22基と建設中の8基に対して、顧客のニーズと原子炉毎の特徴に合わせた包括的ソリューションを供給している。現時点の契約総額は4億6,000万ドルを超えており、複雑なプロジェクトが進行中の国としては、アルメニア、イラン、ブルガリア、中国、ハンガリー、スロバキアを挙げた。

その中でも、運転期間延長プロジェクトはロスアトム社にとって重要分野と位置付けられており、同社は2015年6月、アルメニア唯一の商業炉であるアルメニア2号機(40万kW級VVER)の運転期間を、2026年まで10年延長する総額3億ドルのサービス契約に調印した。また、ブルガリアでは2014年9月にコズロドイ5号機(100万kW級VVER)、2016年1月には同6号機(100万kW級VVER)について、それぞれの運転期間を合計60年に延長するための実行可能性調査実施契約を同国企業と締結。両炉は同国の総電力需要の33%を賄う重要電源であることから、国民に価格の適正な電力供給を保証するとともに、国家経済の競争力を強化する目的で、長期的に利用していく方針と見られている。

【韓国】

公論化委、新古里5・6号機の建設再開を政府に勧告

韓国の文在寅政権による脱原子力政策を受けて、建設工事と建設準備作業が一時停止されていた新古里原子力発電所5、6号機について、3か月にわたって国民の意見集約を進めていた「公論化委員会」は2017年10月20日、「建設再開を政府に勧告することを決定した」と発表した。

アンケート調査や総合討論会などを経た最後の4次調査で、471人の市民参加団に最終的な選択を行わせた結果、「建設再開」を選択した人の割合が59.5%に高まったと指摘。「中止」を選択した40.5%とは、誤差の範囲を超える19ポイントの有意な相違があった点を理由として説明した。ただし、今後は原子力発電の割合を縮小していくこと、新古里5、6号機の建設再開にともなう補完措置について、詳細な計画を早急に準備することなども併せて勧告している。

文政権の脱原子力政策では、2080年頃までに原子力発電をゼロとするため、新規原子力発電所建設計画を全面白紙化、既存炉の運転期間延長を禁止、期間延長して運転中の月城1号機を出来るだけ早期に閉鎖、などが盛り込まれた。2016年6月に建設許可がおりていた新古里5、6号機の処遇については、投入済みのコストや補償費、電力設備予備率などを総合的に考慮する必要があることから、民主的な議論の過程を経た世論調査方式で社会的合意を導き出すことを内閣が決定。事業者の韓国水力・原子力会社(KHNP)はその間、準備工事を停止すると7月に発表していた。

調査を担当する公論化委員会は、関係分野の専門機関や団体から選出された中立的立場の委員によって厳正に運営され、まず1次調査として電話調査を実施。回答した2万6人の市民の中から500人の市民参加団が選定され、このうち471人が2次調査を経て2泊3日の総合討論会(3次調査)と最終選択(4次調査)に参加していた。結果として、同委員会が政府への提言を決めた事項は以下の通りである。

(1)最後の4次調査で「建設再開」の選択割合が59.5%と有意に高くなったことから、最終的に新古里5、6号機の建設工事を再開するよう勧告する。1次調査時から比べて、「中止」との差は回数を重ねる毎に大きくなった。

(2)委員会としては、原子力発電の割合を縮小する方向でエネルギー政策を推進するよう勧める。これは、最終調査で「原子力発電の縮小」を選択した人の割合が53.2%となり、「原子力発電の維持(35.5%)」や「拡大(9.7%)」を

大きく上回ったことによる。

(3)委員会としては、建設再開にともなう補完措置として、市民参加団が提案した事項について詳細な実行計画を早急に準備・推進することを勧告する。具体的な補完措置は、「原子力発電所の安全基準を強化する(33.1%)」、「再生可能エネルギーの割合を増やすための投資を拡大する(27.6%)」、「使用済燃料の処分対策を出来るだけ早急に策定する(25.3%)」、などである。

(4)委員会としては、今後の社会的な論争案件においても軋轢を減じ、共存の道を模索できるよう以下の点を追加でコメントする。すなわち、新古里5,6号機について行われた公論化は、エネルギー消費者である市民の参加と合意に基づく政策決定過程として大きな意味を持つ。また、高度に専門的分野であるがために、これまで専門家や地域住民など直接の利害関係者を中心に議論されてきた原子力発電所関連の問題を、すべての市民の問題とした点にも大きな意味がある。さらに今回の公論化は、代議制民主主義を補完することが可能な、民主的な意見収斂手続きを本格的に推進する契機となった。新古里5,6号機の公論化における経験や資料が、民主的な共存手段として韓国民社会の様々な場面で活用できるよう、政府レベルでの支援を要請したい。

一方、韓国大統領府は、「公論化委員会」からの勧告を受け、10月22日、「新古里原子力発電所5,6号機の処遇に関する公論化委員会の審議結果に基づき、政府は両炉の建設を再開したい」とする文大統領の見解を公表した。また10月25日には、新古里原子力発電所5,6号機の建設再開方針に加えて、原子力発電所の段階的削減と再生可能エネルギーの拡大を中心とする「エネルギー転換政策」を継続推進するため、ロードマップを確定したと発表した。

建設再開にともなう補完的措置としては、「使用済燃料の処分対策を早急に策定」、「再生可能エネルギーの割合を増やすための投資拡大」なども公論化委から提案されたが、政府はまず、原子力発電所の安全基準強化対策を確立し、安全管理システムを全面的に強化するとした。2019年6月までにすべての原子力発電所に対し、設計基準事故や重大事故も含めて事故管理計画書の提出を義務付ける。

また、同一敷地内の複数の原子炉で同時に事故が発生した際の安全性を総合的に評価できるよう、確率論的安全評価に基づく規制方法を早期に開発して、2020年から古里発電所敷地内で試験的に適用。その後は他の原子力発電所にも拡大適用していく。さらに、25年以上稼働している原子炉で安全確保のための投資を拡大するほか、すべての原子炉についてマグニチュード7.0規模の地震に耐えられることを目標に、2018年6月までに耐震補強

を完了させるとしている。

これらの措置とともに推進するエネルギー転換ロードマップでは、原子力発電所の運転期間延長を認めず、段階的に削減していく代わりに、再生可能エネルギーによる発電量の割合を、現在の7%から2030年までに20%に拡大する計画。期間延長して運転継続中の月城1号機は、電力需給などの安定性を考慮した上で早期に閉鎖するほか、新ハンウル3,4号機と天地1,2号機、およびサイトと呼称が未定の2基を加えた合計6基の新規建設計画を白紙化する。これにより、現在24基の原子炉基数は、建設中原子炉の運転開始により2022年時点で28基に増加するが、それ以降は2031年に18基、2038年には14基まで減少。このような段階的削減案を2031年までの第8次電力需給基本計画と、2038年までの第3次エネルギー基本計画に反映させると説明した。

【トルコ】

原子力庁、アックユ建設計画に部分的建設許可発給

トルコ原子力庁(TAEK)はこのほど、同国初の原子力発電設備となるアックユ発電所(120万kW級ロシア型PWR×4基)の建設計画に対し、部分的建設許可(LCP)を発給した。

同計画を受注したロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社が2017年10月20日付けで公表したもので、全面的な建設許可取得に向けた第1段階に相当。これにより、同社がトルコで設立したプロジェクト企業のアックユ原子力発電会社(ANPP)は、安全系統関係の建屋や構造物を除いて、タービン系統や補助建屋などすべての非原子力設備で建設・据付作業の開始を許されたことになる。

ANPPは2018年前半に全面的な建設許可を取得できると見込んでおり、初号機の運転開始は2023年を目指す考え。同計画に対するロシア側からの総投資額は200億ドルを超える見通しで、資金調達からエンジニアリング、建設、燃料供給、発電所の運転、運転員の訓練、放射性廃棄物管理および廃止措置サービスまで提供する。一方、トルコ側は建設サイトと必要文書を手配するほか、国内送電網への接続、発電電力の購入保証などを約束している。

トルコとロシアは2010年にアックユ発電所の建設と運転に関する政府間協力協定(IGA)を締結しており、これに基づきTAEKは、翌2011年10月にサイト許可をANPP社に発給した。同建設計画の環境影響声明書は、書式の変更等により複数回の提出を余儀なくされたものの、2014年にトルコ環境都市計画省が最終的に承認。翌

2015年4月に起工式が執り行われたのに続き、6月にエネルギー市場規制庁(EPDK)が発電予備認可をANPP社に発給した。しかし、シリア内戦を巡る両国関係の悪化や天然ガスパイプラインの建設交渉などにより、同建設計画は一時停滞。2016年8月にトルコのエルドアン大統領がロシアに謝罪したことで関係修復に至っており、TAEKは2017年2月、地中海沿岸メルシン地区のアックユ発電所建設予定地について設計パラメーターを承認。6月には、EPDKが2066年まで49年間有効な発電許可をANPP社に発給していた。

【ナイジェリア】

導入初号機の建設プロジェクトでロシアと協力協定

原子力発電の導入を計画しているナイジェリアの原子力委員会は2017年10月30日、初号機および多目的研究炉を有する原子力研究センターの建設・操業プロジェクトについて、ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社と協力協定を締結した。

ロスアトム社が同日付けで明らかにしたもので、両者は原子力の平和利用分野における協力ロードマップについても調印。同プロジェクトの実行可能性調査を実施する計画で、その中で候補サイトの適正調査を行うほか、開発容量や段階ごとの実施作業工程と開発スケジュール、機器リスト、資金調達計画といった主要パラメーターを確定することになる。

ナイジェリアとロシアは、2009年に結んだ政府間協定に基づいて原子力平和利用分野の協力を開始。その後、原子力発電所と原子力研究センターの設計・建設、運転、廃止措置に関する協力についても、政府間で合意していた。今回の協定では、ナイジェリア原子力委員長とロスアトム社の国際事業部門であるルスアトム・オーバースーズ社の副総裁が協力文書に調印。在ウィーン国際機関ナイジェリア政府常駐代表とロスアトム社総裁が立ち会った。ロシア側の認識によると、戦略上、重要な意味を持つ大規模な原子力技術の開発プロジェクトを通じて、ナイジェリアは深刻な電力不足を解消するとともに、アフリカ大陸におけるリーダー的立場を強化できるとしている。

1億7,000万人以上の人口を抱えるナイジェリアでは、2000年～2010年に年間経済成長率が6～11%で推移。現在では1%程度に低下したものの、エネルギー事情は非常に逼迫している。発電可能な設備容量は600～800万kWで、石油資源は2035年以降、天然ガス資源については2055年以降、国内の需要分しか産出できなくなる見通し。水力の発電能力には限界があると見ているた

め、将来のベースロード電源として原子力に期待している。2014年の原産年次大会で講演したナイジェリア原子力委員長(当時)は、原子力発電所建設に向けた事前サイト選定作業の結果、コギ州ゲルグ地区とアクワ・イボム州のイトゥ地区を望ましい地点に選定したことを紹介。2022年までにまず100万kW、2030年までには400万kWまで拡大する計画を明らかにしていた。

【スイス】

世論調査、CO₂を排出する火力での原子力代替は75%が望まず

2034年までに段階的に脱原子力を達成すると決めたスイスにおいて、国民の75%がCO₂を排出する石炭火力発電所からの輸入電力でクリーンな原子力を代替することを否定していることが2017年10月26日に判明した。ベツナウ原子力発電所を所有・運転するAXPO社が、世論調査機関のgfsベルンに委託した調査の結果を公表したもので、脱原子力を盛り込んだ「2050年までのエネルギー戦略」は国民の59%がこれまで通り支持しているものの、「短期間での達成」を望んでいるわけではないとした。また、少なくとも再生可能エネルギーで十分な電力供給が確保されるまでは、原子力発電所の運転継続に「強く同意」する人と、「どちらかと言えば同意」する人の割合が74%に達しており、エネルギー戦略の遂行におけるスイス国民の実用主義的な側面が明らかになったとしている。

スイスではこの「エネルギー戦略」を反映する改正エネルギー法の是非について、2017年5月に国民投票が行われ、過半数の58.2%が賛成票を投じた。これを受けて、同法案は2018年初頭に発効する見通しとなり、スイスの商業炉5基は約50年の平均的運転期間を終えたものから順次閉鎖。化石燃料の輸入量削減や国産再生可能エネルギーの開発促進といった具体策が実行されることになった。ただし、ミュレレベルク原子力発電所を所有するBKW社は、同発電所の運転継続にともなう様々な影響を考慮し、同発電所を運転開始後47年目の2019年12月で閉鎖する方針を2016年3月に公表している。

国民投票の実施後、約半年が経過した時点の国民世論を探るため、gfsベルンは10月11日～20日までの期間、約1,000人の国民に対し、同エネルギー戦略に関する電話インタビューを実施した。それによると、7割以上の回答者が石炭火力で原子力を代替すべきでないとしたのに加え、49%は「ガス火力発電所をスイスで新たに建設すると、温室効果ガスの排出量抑制で目標の達成が危うくなる」と回答した。また、半数を超える54%が「輸入電力量を減らせるのであれば、国内の発電電力に今以

上の料金を支払ってもよい」との見解を提示。「少なくともエネルギー源の移行期間中は、政府が水力と原子力に補助金を出さねばならない」とした人の割合も、64%にのぼったことが判明した。

gfs ベルンの分析では、発電用エネルギー源の転換に対するスイス国民の態度は極めて実用主義的で、明らかに過半数を超える回答者が「長期的に見て、国内の発電量だけで需要量の大部分をカバーしていくことはできない」と見越していた。その一方で、「スイス国内の発電量を増やしたい」とする国民の数も半数以上に到達。冬場には輸入電力への依存度が一層高まり、停電の機会も多くなると理解していることも明らかになっている。

【英国】

ロールス・ロイス社、ヨルダンでの SMR 建設で FS 実施覚書

英国で小型モジュール炉(SMR)開発の企業連合を率いるロールス・ロイス社は2017年11月9日、ヨルダンで同社製 SMR を建設するための技術的実行可能性調査(FS)実施に向けて、ヨルダン原子力委員会(JAEC)と了解覚書を締結したと発表した。

同社によると、世界では電気自動車などの新技術の導入により、一層のエネルギーが必要になる見通しであるのに加え、地域冷房や脱塩などでも需要が高まっていることから、ロールス・ロイス社が開発する SMR 技術に国際的な関心が集まっている。大型炉よりも低コストで低炭素エネルギーを供給できる SMR により、英国が CO₂排出量の削減目標を達成する一助とするほか、重要な輸出チャンスを創出する考えた。

一方ヨルダンは、ロシアとの協力により、2基の100万kW級PWRを2023年以降に導入する計画を進めつつ、2016年12月に熱出力0.5万kWの韓国製多目的研究炉を、同国初の原子力発電設備としてヨルダン科学技術大学内で完成させた。SMRであれば、水不足や容量の小さい送電網といったヨルダン特有の課題を、数多く解決することができるとの期待を示している。

今回の覚書は、パリの英国大使館で両者の幹部が調印した。同覚書に基づき両者は今後、発電と脱塩を目的とした SMR をヨルダン国内で建設する上で必要な要件を、技術面や安全面、経済面、資金調達面などで特定していく方針。このような FS を通じて得られた結果は、

JAEC が建設計画を次の段階に進める投資判断を下す際の、資料として活用されることになる。

高級車メーカーとして知られるロールス・ロイス社は、英国海軍の原子力潜水艦用原子炉製造プログラム等に携わってきたが、「世界の民生用原子力市場は今後、年間500億ポンドの規模に成長する」との見通しの下、2008年に本格参入用の専門事業ユニットを社内に設置した。すでに中国の原子力発電所に対し、安全関連のデジタル計測制御(I & C)系を多数納入。英国内では、原子力サプライ・チェーンの再開・強化を図るために政府が2012年に設置した産官学の連携組織「先進的原子力機器製造研究センター(N-AMRC)」で、産業界の取りまとめ役を担っている。

【米国】

エネ省、低コストで安全な先進的原子力発電所の設計開発を促進

米エネルギー省(DOE)は2017年10月20日、既存炉よりも一層低コストで安全な先進的原子炉設計を可能にする革新的技術の特定・開発プロジェクトに、省内のエネルギー高等研究計画局(ARPA-E)から最大2,000万ドルの予算を確保したと発表した。

ARPA-Eの新しいプロジェクトとして、「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)」を起ち上げるというもので、機器のモジュール化といった製造技術開発により建設コストを削減するとともに、高度な自動制御性や受動的安全性を発電所全体に組み込んで運転コストも抑えることが目的。この分野においては省内の原子力局(ONE)で培われた知識と資源の活用が有効であることから、将来を見据えた同プロジェクトを成功に導くために、ONEとARPA-EのMEITNERプロジェクト・チームが緊密に連携することが重要との見方を示した。

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開発を専門に支援。基礎研究ではなく応用研究を対象としており、「エネルギー貯蔵」や「バイオ・エネルギー」など、リスクは高くても大きな成果が期待できるものに対し最大2,000万ドル、最長3年間の資金助成を行っている。

福島第一原発事故は従前の津波対策で予防できたか —事故以前の想定津波高さ評価と東電の対応の考察—

福井大学 吉田 至孝,
法政大学 宮野 廣

東京電力福島第一原子力発電所の津波対策が不十分であったことが指摘され、裁判でその責任の有無が争われている。本検討では、裁判の中での議論には関与せず、純学術的観点から主に4事故調(国会、政府、民間、東電)報告書の内容を精査し、わが国および東電の津波対応に関する事実関係をまとめ、考察した。加えて、話題となっている国土庁と気象協会が作成した津波浸水予測図、津波高さ15.7mの試算とその予防効果、地震本部の長期評価などについても検討するとともに、得られた知見を紹介する。

KEYWORDS: *Fukushima Dai-ich nuclear accident, Tohoku region Pacific coast earthquake, Tsunami height, flooding, defense in depth*

I. はじめに

原子力発電所の新設時は、津波が容易に敷地に到達しないよう、十分に余裕をもって敷地高さが定められて来た。既設発電所に対しても、新知見を反映しながら、津波対策が十分であるかどうか再三、確認されてきた。しかし、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波は、その想定を大きく超え、十分な対応となっていたはずである福島第一原発は、特に甚大な被害を受け、原子力災害を引き起こした。このような事態は、従前の津波対策では防ぐことはできなかったのか、何が不足していたのか、未だ明確な結論が出されていない。

本報告は、主として4事故調(国会、政府、民間、東電)報告書^{1~4)}を比較するとともに、新たに公表された事実を踏まえ、純学術的な立場から福島第一原発事故以前における津波高さの検討経緯を時系列で整理^{5,6)}し、わが国では津波評価をどのように実施してきたのか、わが国では地震・津波の調査研究はどこまで進んでいたのか、東京電力(東電)の津波評価は、わが国の他の方法とどの

ように異なっていたのか、東電の津波対策は、規制要求に従ったものであったか、過去のトラブル事例等から浸水リスクをどのように認識していたのかの観点から考察するとともに、いくつか話題となった地震本部の見解や東電の試算などについても検討結果を示す。

II. わが国および東電の津波対応の分析

1. わが国の津波評価

わが国の津波評価の経緯は、次のようにまとめられる。1970年原子力安全委員会は、安全設計審査指針において過去の記録から最も過酷と思われる自然力に耐えることを要求した。原子力発電所の設置高さは、津波の来ない十分な高さであること、ドライサイトの考え方が導入され、求められていた。1983年に入り津波常襲地域総合防災対策指針において、過去の記録に基づく最大津波が評価対象となった。1997年の農水省津波対策の手引きでは、信頼できる資料の数多く得られる既往最大津波と現在の知見に基づいて想定される最大地震により起こされる津波の大きい方を対象とした。1999年国土庁と気象協会は津波対策強化の手引きを作成し、翌年、自治体に津波浸水予測図作成を促した。2002年に土木学会は原子力発電所の津波評価技術を策定し、概ね信頼性があると判断される痕跡高記録が残されている津波を対象とするよう求めた。2006年中央防災会議は、日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震専門調査会報告を取りまとめ、データが不足する貞観津波や、地震本部が2002年に示

Could Fukushima Dai-ich nuclear accident be prevented by a previous Tsunami countermeasure? ; The evaluation of assumption Tsunami height before the accident, and the discussion of TEPCO's countermeasure : Yoshitaka Yoshida, Hiroshi Miyano.

(2017年10月20日 受理)

した「明治三陸沖地震と同様の地震が、三陸沖北部海溝寄りから房総沖海溝寄りにかけてどこでも発生すると考えた」とする見解は除外された。2007年福島県と茨城県は、津波浸水予測図を作成した。

以上より、わが国では、現在の知見で発生すると想定される最大地震により起こされる津波を対象に不確かさを含めて評価し、信頼できる資料の数多く得られる既往最大津波と比較して大きい方が採用されてきた。このため、中央防災会議においてもデータが不足する貞観津波や単純な推察である地震本部の見解については取り入れられることはなかった。自治体で作成した津波浸水予測図においても同様に扱われ、自治体の計算結果は、東電が土木学会の原子力発電所の津波評価技術を用いて計算した津波高さを下回ったものと考えられる。よって、わが国の津波評価は、既往の知見が十分にあり、信頼できる津波評価が可能なものを対象としていたと認められ、研究段階や知見不足のものは評価から除外されていたものと推察される。

2. 津波浸水予測図

1999年に国土庁と日本気象協会が津波災害予測マニュアル策定時に津波浸水予測図を作成したものを、福島事故後にこれを拡大して敷地内配置を重ねると福島第一原発1~4号機が浸水レベルにあったことが指摘されている。一方、自治体は津波災害予測マニュアルに従い独自に津波浸水予測図を作成しており、両者の関係を考察する。国土庁と日本気象協会は、各自治体が津波浸水予測図を作成できるよう「地域防災計画における津波対策強化の手引き」と「津波災害予測マニュアル」の策定を進め、2000年3月に正式に発表し、自治体に津波浸水予測図の作成を促した。これを受け、2007年に福島県と茨城県は津波浸水予測図を作成している。よって、国土庁と日本気象協会の津波浸水予測図は、自治体向けにどのようなものを作成するかをわかりやすく解説するためのガイダンスとして単に計算事例を示し、各自治体では、所管する地域において最大となる津波高さの評価を行ったものと考えられる。

茨城県と福島県の津波浸水予測図と東海第二原発と福島第一原発の想定津波高さについての関係を考察する。自治体は「津波災害予測マニュアル」、原子力発電所は「原子力発電所の津波評価技術」を用いて津波高さを計算しており、それぞれの基本的な評価手順はわが国の津波評価の考え方に従い同一と考えられる。自治体は当該県の海岸線、原発は当該敷地を対象として、最大となる津波高さが予測されている。自治体の予測は原発立地点が必ずしも最大とはならず、既往波源を対象としたパラメータの感度解析を行った場合、原発立地点で両者を比較すると、原子力発電所の最大津波高さの予測結果の方が自治体の予測結果より大きな値が算出される傾向を示すは

ずである。

2007年に福島県と茨城県が作成した津波浸水予測図では、福島第一原発の津波高さはO.P.(Onahama Peil;小名浜港工事基準面)+5m程度(福島県)、O.P.+4.7m(茨城県)、東海第二原発はT.P.(Tokyo Peil;東京湾平均海面)+5.72m(茨城県)であった。一方、当時の各原発の想定津波高さは、福島第一原発でO.P.+5.7m、東海第二原発でT.P.+4.86mとされていた。福島第一原発の想定津波高さは福島県や茨城県の予測より大きな値であったが、東海第二原発は茨城県の予測を下回った。このため、東海第二原発は、想定津波高さの計算をやり直し、T.P.+6.1mに変更して対策工事を実施したのと考えられる。

3. わが国の地震・津波研究

1995年文科省は、阪神・淡路大震災を契機として、わが国の地震調査研究を一元的に推進するため、地震調査研究推進本部(地震本部)を設置した。以後、地震本部は長期評価を公表し、三陸沖北部から房総沖でマグニチュード8.2程度の地震を予想していた。2002年の三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価で、三陸沖北部海溝寄りから房総沖海溝寄りでも発生する可能性を指摘したが、評価に必要な波源情報などを示さず、2009年から着手した改訂作業においても、可能性の指摘に対して何ら研究成果や最新知見は加えられなかった。

以上より、わが国の地震・津波に関する調査研究は、阪神淡路大震災を契機に地震本部に一元化されていたが、地震本部は海溝型地震に関する長期評価において地震動を過小評価するとともに、三陸沖北部海溝寄りから房総沖海溝寄りでも発生する可能性があるとしていたことに対し、地震・津波評価のための研究成果や手順などは示されず、指摘から15年経過した2017年になって津波レシピが策定された。よって、わが国の地震・津波調査研究は、東北地方太平洋沖地震を想定できるほど成熟しておらず、当時は可能性の指摘に対して評価手法を確立できるような状況ではなかったと推察される。

4. 東京電力の津波評価

東電は、1965年にチリ地震津波観測値(O.P.+3.122m)を用いて設置許可を取得した。その後、津波評価技術の進展に伴い、わが国の津波評価の考え方に従い想定津波高さの見直しを行っている。具体的には、1994年の北海道南西沖地震に伴う見直し(O.P.+3.5m)、1998年の太平洋沿岸部地震津波防災計画手法調査に基づく見直し(O.P.+4.7~4.8m)、2002年の土木学会原子力発電所の津波評価技術策定に伴う見直し(O.P.+5.7m)、2009年の耐震バックチェック随伴事象の再評価に伴う見直し

(O.P.+6.1m)を行い、想定津波高さを変更してきた。その間、福島県と茨城県の防災上の津波計算結果(O.P.+5m程度、O.P.+4.7m)を入手し、現状の想定津波高さを超えないことを確認している。一方、仮定に基づく検討も実施しており、1997年に通産省より解析値の2倍の津波高さの評価を求められ、2000年に2倍(O.P.+10m)を仮定すると海水ポンプが停止すると報告した。2006年に原子力安全基盤機構(JNES)が主催した溢水勉強会で、福島第一5号機敷地高さ+1mの水位を仮定(O.P.+14m)した場合、電源設備が水没すると報告した。さらに、東電は、地震本部の見解を踏まえ、独自に明治三陸沖地震の波源モデルを福島県沖海溝沿いに移動させて試算し、O.P.+15.7mの結果を得るとともに、佐竹氏らから提供を受けた貞観津波論文に基づく試算を行い、O.P.+8.9~9.2mの結果を得ていた。2009年には貞観津波堆積物調査の必要性を認識し、福島県沿岸部の堆積物調査を実施していた。

以上より、東電は、わが国の津波評価の考え方に従い、常に最新知見を用いて津波高さを計算しており、規制側からの要求に従い、仮定に基づくプラントへの影響を評価し、規制側へ報告していた。さらに、地震本部の見解や貞観津波の投稿予定の論文を踏まえ、独自に仮定を置いて津波高さを試算するとともに、福島県内での堆積物調査結果を公表していた。

5. 東京電力による津波高さの試算

地震本部の見解に対する東電の試算結果は、国会事故調報告書の内容によれば、「福島第一原発2号機付近でO.P.+9.3m、福島第一原発5号機付近でO.P.+10.2m、敷地南部でO.P.+15.7mといった想定波高の数値を得た。4号機原子炉建屋周辺は2.6mの高さで浸水すると予想された。」と記述されている。以上より、試算結果は、図1左に示すように防潮堤のある1~6号機正面では津波高さは敷地高さを超えず、防潮堤の無い4号機南側を遡上して、最大浸水高がO.P.+15.7mとなり、4号機原子炉建屋周辺ではO.P.+12.6mであったことがわかる。一方、貞観津波論文の試算では、佐竹らの投稿予定の論文に示

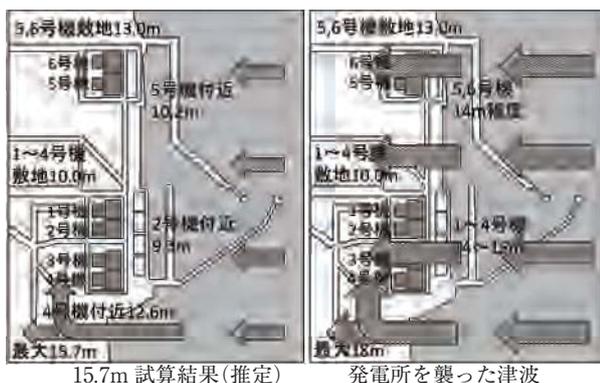


図1 15.7m 試算結果と実際の津波の比較

された波源モデルを使用して試算した結果、福島第一及び第二原子力発電所取水口前面で、O.P.+8.9~9.2m程度の津波高さを算出、敷地高さまで至らなかった。

東電は、地震本部の見解に基づく試算と貞観津波論文の試算を同じ年(2008年)に実施している。佐竹らの貞観津波の波源モデルは過去に発生した津波に対する研究成果である。一方、地震本部の見解は波源モデルが示されておらず、東電が明治三陸沖地震の波源モデルを福島沖にスライドさせたものであった。これは学術的に確立されたものではなく、東電が土木学会に手法の検討を依頼したことは妥当と考えられる。土木学会の津波評価技術策定時における議論の中では、解析で得られる不確かさを含む想定津波高さは、既往津波高さ(痕跡高)に対して平均的に2倍程度大きな値が得られるとされていた。

6. 東京電力の津波対策

東電は、1965年福島第一1号機をチリ地震津波の観測値より十分に高い、敷地高さO.P.+10mに建設した。その後のわが国の津波評価の考え方に従い想定津波高さの評価結果に基づき、対策要否を判断して必要な対策を実施している。具体的には、1994年津波高さをO.P.+3.5mと評価、1998年にO.P.+4.7~4.8mに変更したが、何れも浸水防止対策は不要と判断した。2002年にO.P.+5.7mに見直した際は、ポンプ嵩上げや浸水防止対策等を実施した。福島県と茨城県の防災上の津波計算結果(O.P.+5m程度、O.P.+4.7m)を入手し、対策不要と判断した。2009年にO.P.+6.1mに変更した際は、海水ポンプモータシール処理対策等を実施した。

一方、仮定に基づく評価に対する対応も実施されている。通産省から解析値の2倍を仮定した場合の評価では、海水ポンプが停止すると報告し、JNES溢水勉強会における敷地高さ+1mの水位での評価では、電源設備が水没すると報告した。地震本部の見解を踏まえた試算(O.P.+15.7m)結果を受け、土木学会に波源モデルの策定を依頼するとともに、貞観津波投稿予定論文に基づく試算(O.P.+8.9~9.2m)および福島県沿岸部の堆積物調査を実施し、それぞれ結果を国へ報告していた。2010年には福島地点津波対策ワーキングを設置し、地震本部の見解を踏まえた試算結果への対策について検討を開始していた。

以上より、津波対策においても東電は、わが国の津波評価の考え方に従い、必要な津波浸水防止対策を実施するとともに、自治体が評価した防災上の津波計算結果を把握し、対策が不要であることを確認していた。東電は、地震本部の見解や貞観津波に対して独自に試算を行い、結果を規制側へ報告するとともに、地震本部の見解については波源情報の重要性から土木学会に検討を依頼し、津波浸水防止対策の検討を行っていた。

7. 試算結果による対策の予防効果

当時の原子力規制では、津波に対して安全機能が喪失しないように浸水防止(ドライサイト)対策を要求しており、防潮堤の強化や機器の高上げ、水密性の確保が求められていた。東電の試算では、4号機周辺でO.P.+12.6mの想定波高であったが、防潮堤のある1~6号機正面では敷地高さを下回っていた(図1左参照)。東電は、この試算結果を参照して福島第一原発の浸水防止(ドライサイト)対策を検討していた。もし、東電がこの知見に基づき浸水防止対策を実施したならば、東北地方太平洋沖地震による津波被害を防げたであろうか。東北地方太平洋沖地震で福島第一原子力発電所を襲った津波は、1~4号機を正面から襲い4~5m水没(O.P.+15m前後)させ、敷地南部では6m以上(O.P.+16~17m)水没させた(図1右参照)。発電所構内における遡上高はO.P.+18mとされている。すなわち、今回の津波はこれまで経験したことがない未曾有の災害であり、原子力規制が要求してきた浸水防止(ドライサイト)対策では十分に対処できず、浸水した場合の対策である洪水(溢水)対策(代替電源などの可搬型設備等)を検討すべきであったと考えられる。

8. 原子力発電所の洪水リスクの認識

福島第一原発事故以前に経験した洪水/溢水事象には次のようなものがある。

福島第一1号機は定格出力運転中のところ、1991年(平成3年)10月30日17時55分頃パトロール中の運転員が湧水(補機冷却海水水管からの漏えい)を発見し、同日18時30分に原子炉を手動停止した。点検の結果、1-2号機共通DG(2号機空冷DGが設置される前は1号機DGの1つが2号機と共用されていた)及び機関の一部に浸水が確認された。

1999年12月27日から28日にかけて仏ルブレイエ原子力発電所(PWR4基)の近くで暴風雨が発生、付近を流れるジロンド川河口水位が上昇し、原子炉が停止した。その際、1、2号機の地下に浸水して、電源系統と工学的安全設備の一部が機能喪失した。浸水は、扉や開口部を通じて拡大、電気室、海水ポンプ室、周辺建屋、燃料建屋の地下レベルで発生し、低圧注水系と格納容器スプレイ系の両系列、電気系統などが機能を喪失。原子炉は蒸気発生器で冷却され、12月29日に侵入水は排出された。

2004年印マドラス原子力発電所(PHWR2基)でスマトラ沖地震の大津波により海水ポンプ室が浸水して原子炉が停止した。

このような事例を踏まえ、2006年に原子力安全・保安院と原子力安全基盤機構(JNES)は、溢水勉強会を開催し、代表プラントを選定して敷地高さ+1mの水位となった場合の影響を検討した際に、東電より、浸水により電源設備が機能喪失するとの報告を受け、敷地高さ+1mを仮定した場合、浸水の可能性を否定できないこ

とを確認していた。2007年にJNESは、「安全情報に関する分析・評価報告書=前兆事象の適用=」の中で、国内PWRおよびBWRプラントの前兆事象として、仏ルブレイエ原子力発電所の事例を含む16件の事象を解析した。JNESの前兆事象評価は、評価対象プラントの通常運転時の確率的リスク評価(PRA)結果を用いて、ある事故故障事例が発生した場合の条件付炉心損傷確率を算出する方法で、事故故障事例で発生した内容を吟味し、機能喪失範囲を設定して解析するものである。その結果、16件の前兆事象評価中、ルブレイエ原子力発電所の溢水事象(地下が浸水し、外部電源は8~24時間で回復すると仮定)のみ条件付炉心損傷確率が高いと評価された。得られた条件付炉心損傷確率は、沸騰型軽水炉では、BWR3で 1.5×10^{-3} 、BWR4で 3.5×10^{-2} 、BWR5で 2.4×10^{-2} 、ABWRで 5.0×10^{-3} 、加圧水型軽水炉では、ドライ型3ループPWRで 7.8×10^{-5} となり、他の15件の事象は 1.0×10^{-8} 未満であった。結論として、ルブレイエ原子力発電所の事象1件のみが安全上重要な事象であるとされ、その対策として浸水防止対策が有効であるとされた。

以上より、東電は、福島第一1号機で溢水事象を経験し、JNES溢水勉強会において津波が敷地高さを超えた場合は電源が喪失して極めて深刻な事態となる可能性があることを把握していた。原子力安全・保安院は、JNES溢水勉強会において津波が敷地高さを超えた場合は深刻な事態となることを把握するとともに、JNESより仏ルブレイエ原子力発電所の溢水事象をBWRプラントに適用した結果、リスクが非常に高くなると報告を受けていた。これらの事実関係から、原子力安全・保安院と東電は、津波に限らず何等かの原因で洪水(溢水)が発生した場合のリスクの大きさを認識していながら、建屋内に浸水した場合の対応策の検討を怠っていたと考える。

9. 深層防護の変遷

原子力安全・保安院や東電が、原子力発電所の洪水リスクの大きさを認識していながら、何故、浸水した場合への対応策の思考が停止してしまったのであろうか。深層防護の考え方は定着していたのか疑問が残る。想定を超える自然現象は起こり得ることを踏まえ、設計を超えるような場合への対応策を合理的な手段によって準備しておくことが重要である。

原子力技術協会(JANTI)は、2005年8月のハリケーンカトリーナが米国南東部を襲った際に対応を行ったウォーターフォード原発の訪問調査結果を踏まえ、2007年に原子力施設における風水害対策の考え方⁷⁾を公表し、最新の知見に基づき想定される災害に対して原子力発電所の備えに不足が無いこと、および津波を含む想定を超える事態への対応を考慮することを技術コラムに掲載した。もし、この考え方に基づき原子力発電所で対応

表1 原子力安全白書での深層防護の記述の変遷

期(年)	深層防護に関連する記載の概要
第1期 (1961～1994年)	深層防護の第3層までの記述。
第2期 (1995～2004年)	深層防護の説明が毎年変化。
1995年:	過酷事故の可能性は現実的に考えられないほど低い。
1997年:	事業者の自主的対応で過酷事故対策を実施と記述。
1998年:	事故発生があるものとして対策を講ずべきと記述。
2000年:	初めて深層防護の第4層と第5層を記述。
2002年:	深層防護第4層、第5層と過酷事故対策の必要性を記述。
2003～2004年:	再び深層防護の第3層までの説明に戻る。
第3期 (2005年以降)	深層防護の記述自体が消滅。

が行われていたならば、事態は改善されたかもしれない。

そこで、わが国の深層防護への関心度を原子力安全白書の記述⁸⁾で振り返ってみると、表1に示すように全体が3期に分けられ、第1期(1961～1994年)は深層防護の第3層までの記述があったが、第2期(1995～2002年)では深層防護の説明が毎年変化しており、第3期(2005以降)に至っては、深層防護の記述自体が消滅していた。すなわち、浸水した場合の対策への思考が停止してしまった原因の1つに、原子力関係者の安全に対する慢心と想像力の欠如によって、深層防護への意識の不足/低下があったのではないかと考えられる。

Ⅲ. まとめと得られた知見

津波に関する過去の経緯を調査した結果、わが国の津波評価は、信頼できる資料が数多く得られる過去の津波に基づく方法が定着しており、明治三陸沖地震津波に対する地震本部の見解は、信頼性のある波源情報を提示していないことから、わが国の防災対策において評価対象から除外されたものと推察される。

一方、東電は、わが国の津波評価の考え方に従い津波高さを評価するとともに、規制要求に従って必要な対策を実施しており、中央防災会議では取り入れられなかった、研究段階にある貞観津波の知見や地震本部の「三陸沖北部海溝寄りから房総沖海溝寄りで、どこでも発生する可能性がある」との指摘に対して試算を行っていた。

しかし、規制機関と東電は、洪水事象によるリスクの大きさを認識しながら、浸水した場合の対応策(浸水防止対策ではない)の検討を怠っていたと考える。

東電が試算した津波高さ15.7mの内容を、国会事故調報告書の内容に基づき分析した結果、規制が要求する従

前の津波対策(浸水防止対策)を実施したとしても、津波被害を防ぐことは困難であったと推察され、浸水した場合の対策を準備しておくべきであったと考える。

以上より得られた知見は、以下の3点である。

- ① わが国の地震・津波などの自然現象の評価研究機関は、可能性を指摘するだけでなく、事象の影響評価に必要な情報を含めて提示し、わが国の防災対策を促すよう努力すべきであること。
- ② 事業者は、研究段階にあり一般的に認知された知見ではない情報に基づく評価であっても、そこから得られた知見に対して深刻な影響を受ける可能性がある場合は、合理的な対策によって深層防護の各レベルの厚みを増しておくべきであること。
- ③ 規制機関は、前兆事象の評価や最新知見に基づき、環境に与えるリスクが高いと認識される事例が発見された場合、時期を失することなく適切に指導・監督すべきであること。

上記は何れも、原子力規制委員会の規制基準によって既に取り組みが開始されていることであるが、原子力関係者は、慢心と想像力の欠如から脱却し、不断の努力によって、安全と深層防護への意識を高めていかなければならないと考える。

－ 参考資料 －

- 1) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会、国会事故調報告書、2012年7月5日。
- 2) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会、政府事故調報告書、中間報告：2011年12月26日、最終報告：2012年7月23日。
- 3) 福島原発事故独立検証委員会、調査・検証報告書、2012年3月11日。
- 4) 東京電力、福島事故調査報告書、2012年6月20日。
- 5) <http://www.scj.go.jp/ja/event/pdf2/170801-1.pdf>
- 6) <http://www.scj.go.jp/ja/event/pdf2/170801-2.pdf>
- 7) 原子力技術協会：原子炉施設における台風等風水害対策の考え方について、平成19年7月。
- 8) 日本原子力学会、福島第一原子力発電所事故「その全貌と明日に向けた提言－学会事故調最終報告書－」、丸善、(2014)。

著者紹介



吉田至孝 (よしだ・よしたか)

福井大学附属国際原子力工学研究所
(専門分野/関心分野)
原子力防災、シビアアクシデント



宮野 廣 (みやの・ひろし)

法政大学
(専門分野/関心分野)
システム設計、設計工学

地政学的リスクとエネルギー

第4回 中東産油国の情勢と地政学的リスク

東京大学 小宮山 涼一

中東は豊富な石油資源を有し、国際政治経済の場で依然、影響力がある一方、紛争や内戦、テロ、宗派対立など、多岐のリスクを抱える。また米国など域外国の中東政策の影響もあり、中東情勢の展望は大変複雑である。日本はエネルギー安全保障を考える際、中東を単なる資源輸入相手国と見るのではなく、省エネ技術や原子力の導入支援等、中東と多層的な協力関係を作り、中東・日本全体でエネルギー安全保障強化を総合的に考える視点がより重要となる。

KEYWORDS: *Middle East, oil export revenue, Resource Curse, national security, international security, finance reform, Saudi Arabia, United States*

I. はじめに

日本の一次エネルギー供給の化石燃料比率は、再エネ普及が進む中でも、2016年現在、依然9割を上回り、その太宗を輸入し、化石燃料の安定供給確保は不可欠である。石油、天然ガスは中東からの輸入がそれぞれ8割、2割強に達し、日本の石油比率、ガス比率は現在4割、2割のため、日本はエネルギー供給全体の約4割を中東に依存する状況にある。また日本は2030年に石油・天然ガス自主開発比率を40%以上にする目標を掲げており(2016年度27.4%)、中東との関係強化は重要となる。

しかし中東湾岸情勢は慢性的に不安定であり、中東への高水準での石油・ガス依存度は、エネルギー安全保障上、好ましくない。中東の地政学はこれまで、その時々々の各国の体制、政治経済情勢、イデオロギー、石油政策、国際情勢等を背景に複雑な国家関係により形成され、問題は多岐にわたる。2003年イラク戦争、2010年末の「アラブの春」での民主化運動の他、テロの脅威、イエメンやシリアの内戦問題、イランとサウジアラビアの緊張関係の高まり、サウジ等のイランやカタールとの断交問題など、不安定要素が存在する。また国際政治では、米国トランプ政権の中東の安全保障への関与の行方など、中東情勢は不確実性を増し、中東の地政学的リスクが国際政

治に与える影響が注目されている。そして現在、中東情勢に影響を与えている要因の一つが国際的な原油価格の低迷である。油価低迷で、石油収入に依拠する中東産油国の財政収入が減少しており、原油価格の趨勢に変化が無ければ、国家の統治機能が低下し、中東の不安定化が進む可能性もある。

本稿では低油価が長期化する中、財政の多くを石油輸出収入に依存する中東産油国の情勢について説明する。

II. 原油価格と中東産油国

1. 「資源の呪い」

中東産油国は石油輸出収入で国家財政の大半を補い、豊富な石油資源を基に福祉、医療、教育など手厚い公共サービスを国民に提供してきた。しかしオイル・マネーに歳入を依拠するため、原油価格の水準次第で歳入確保が不安定となり、また、枯渇資源である原油への経済の依存は、国家の持続性からみても脆弱化の懸念がある。

産油国にとって、原油は富の源である一方、過度な依存は持続可能な国民経済の形成を阻害する。石油への過度な依存で経済構造の転換が進まなければ、「資源の呪い」(Resource Curse)に陥るリスクがある。すなわち、石油依存の経済構造は、経済の脆弱化の他、労働集約性・生産性の高い産業の発展の遅延など、産業化を阻害する。そのため中東全般で、急増する若年層に対して十分な雇用の確保が進まず、失業が社会問題化している。失業は貧困や格差をもたらし、社会の安定が維持できなくなる。また、大半の国民が公務員という中東産油国の雇用のあり方では、持続可能な経済成長は難しい。

Geopolitical risk in energy market (4) ; Geopolitical risk in Middle East : Ryoichi Komiya.

(2017年10月5日 受理)

■前回のタイトル

第3回 中国のエネルギー情勢と地政学的影響

また、アジア新興国の安定した石油需要を見込み、中東産油国はアジアとの相互依存関係を深めて、「石油需要のセキュリティ」、すなわち、安定した石油の販路を確保できるとする見方もある。しかし電気自動車など環境対応車の普及や国際的な燃費規制の強化により、石油資源の枯渇よりも、石油が利用されなくなる点へ世の中の関心が集まっており、「石油需要ピーク」の可能性など、石油に過度に依存する経済は持続可能ではない。サウジ等の産油国も既に将来の石油時代の終焉を意識していると考えられる。エネルギー市場の新たな変化に適応するためにも、経済構造の高度化、石油収入依存の低減が中東の重要な課題となる。

2. 原油価格と中東経済

原油価格低迷の長期化は、経済統計からみても、中東産油国の経済に影響を及ぼしている。最近の経済成長率をみると、イラン以外で低迷している(図1)。中東経済は2008年のリーマン・ショック時に停滞し、イラン核問題等での油価高騰で回復したが、その後、シェール革命で油価が下落し、現在まで経済成長に勢いが無い。

また中東産油国は油価低迷で一般的に財政難であるが、その影響の程度は、各国の資産規模や歳入・歳出構造にも依存し、財政均衡原油価格は各国で異なる。IMFの推計²⁾では、主要産油国の財政均衡油価(表1)は、2014年以降低下している。財政均衡油価は歳出額を石油輸出量で除して算出するが、各国とも石油輸出が増加基調に

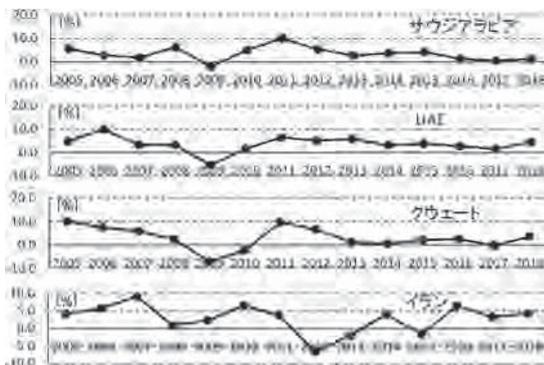


図1 中東産油国の経済成長率の推移と短期見通し
(出所)文献¹⁾を基に筆者作成

表1 中東産油国の財政均衡原油価格

国(バレル)	00=10	実績				
		2014	2015	2016	2017	2018
サウジアラビア	-	108	94	94	84	74
アラブ首長国連邦	36	79	69	62	67	59
クウェート	-	64	47	46	49	60
バーレーン	69	103	119	106	101	98
カタール	43	56	54	56	63	55
オマーン	-	94	100	110	78	79
イラン	64	100	60	73	61	69
イラク	-	101	60	46	54	57

(出所)文献²⁾を基に筆者作成

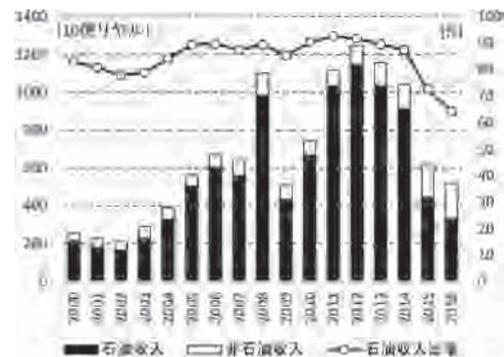


図2 サウジアラビアの財政収入の推移
(出所)文献³⁾を基に筆者作成

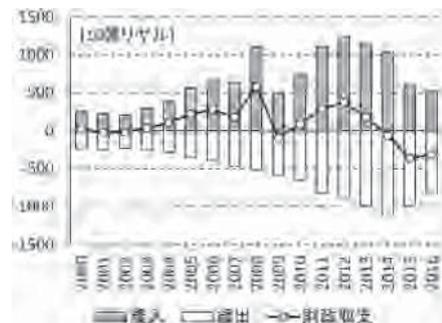


図3 サウジアラビアの財政収支の推移
(出所)文献³⁾を基に筆者作成

あるためである。イランは核合意後、経済制裁解除で、原油生産量が伸び、均衡油価が低下している。しかし依然、財政均衡油価と2017年8月の原油価格(52ドル/バレル、ブレント原油)を比較すると、多くの産油国が財政赤字に陥る。財政均衡油価が相対的に低水準のクウェート、イラクは低油価でもプライマリーバランス維持の観点から財政の耐久性があるが、サウジアラビア、バーレーン、オマーンは耐久性が低く、原油価格の変動に脆弱である。特にオマーンは原油の可採年数が短く(約15年)、経済多角化、歳出削減が重要な課題である。

中東で影響力のあるサウジアラビア経済は伝統的に石油輸出収入への依存度が高い(8~9割)(図2)。そのため、最近の油価低迷で財政収支も赤字へ転じた(図3)。また2010年末のアラブの春での民主化運動を受け、サウジ等では国民の不満抑制のため、社会保障充実化や賃金上げ、失業対策等を実施して歳出が増加したことも、財政難の原因となっている。

3. 油価低迷による財政改革問題

油価低迷で産油国の歳入が歳出を下回り、財政赤字が続けば、資産取崩しや歳出削減が不可欠となる。また歳入が不足すれば、民心掌握のためのバラマキができず、政治への信頼が低下する。例えばサウジアラビアは、アラブ諸国の中でも人口が大きく(3千2百万人)、石油収入を広く社会で享受することは難しい。サウジでは他の

表2 Saudi Vision 2030の主な数値目標

項目	現在	目標
経済規模	世界10位	世界16位以内
人口はGDPに占める比率	10%	30%
GDPに占める民間部門比率	40%	85%
失業率	12%	7%
GDPに占める海外直接投資比率	3.00%	5.70%
政府の石油収入	1,650億リヤル	750億リヤル
女性労働者比率	22%	30%

(出所)文献⁵⁾を基に筆者作成

中東諸国と同様、光熱費等への補助金付与が行われ、民心掌握に貢献した。しかし光熱費への補助金は、エネルギー消費拡大やそれに伴う石油輸出余力の抑制、そして財政負担をもたらした。サウジでは石油消費が生産の3割まで拡大し、石油生産量は増えているが、輸出余力は90年代以降あまり伸びていない。補助金負担、石油輸出余力の低迷が、財政ひっ迫を引起している。

石油輸出収入減少に伴い、中東産油国は経済構造の改革が必要となっており、歳出抑制など財政改革や、脱石油依存に向けた経済構造の高度化を目指している。財政対策としては歳出削減、付加価値税導入や補助金・公共サービス削減、投資見直し等がある。サウジは歳入減少の中、対外資産や外貨準備高を取崩しているが、IMF⁴⁾は2015年、サウジが現状の歳出を維持する場合、資産を5年以内に使いきる懸念があると指摘し、補助金削減や経済の多角化を推奨している。既に中東諸国の多くはガソリン、軽油等の燃料価格引上げ等を実施している。

このような中、中東産油国は、経済構造高度化に向けた経済改革構想を作成している。サウジアラビアの「サウジ・ビジョン2030(Saudi Vision 2030⁵⁾)」や、それ以外の産油国でも類似の改革が進められている(Qatar National Vision 2030(2008), UAE Vision 2021(2010))。いずれも財政収入の多角化、民間企業活動の拡大など、石油依存脱却を目指す方向では共通している。サウジのビジョン2030(表2)では、経済改革実現のための数値目標が具体的に示されている。サウジは低油価に対応する取組みを強化し、公共料金引上げや歳出削減、非石油収入増加で、石油収入比率は2016年現在、64%まで低下している(図2)。またアラブ首長国連邦(UAE)では、油価低迷の他、イエメン内戦への軍事介入による財政負担や、政府保証による建設中の原子力発電所の会計上の負担が、財政難をもたらすとの指摘もある。潤沢な資産があり、経済の多角化が進むUAEでも、財政難へのリスクがあり、経済改革の必要性が増している。

Ⅲ. 中東の地政学的リスク

中東は特にアラブの春以降、国内の騒乱、紛争やテロなど安全保障問題に直面し、世界最大の産油地域として内外の政治、経済への影響度が大きい。安全保障に関する問題は、国家への信頼低下という政治的リスクや、海

外からの投資減退という経済的リスクをもたらす。

そして現代の中東の地政学的リスクの中心的要因は、サウジアラビアとイランの中東での影響力拡大を狙う対立である。シリアやイエメンの紛争ではそれぞれ対抗勢力を支援し、各地域での影響力を巡る代理戦争と称される。またサウジは、豊富な天然ガス輸出で経済力を持ち、イランとも関係が近いとされるカタールが中東各国と敵対する組織を支援したとの理由で、カタールとの国交を断絶し、中東の緊張関係が高まった。

1. 国内の騒乱・暴動リスク

2010年末のアラブの春により、中東の政治環境は変容し、特に一部国家のガバナンス機能が低下している。豊かな福祉国家である中東産油国でもアラブ首長国連邦やカタール以外の国々でデモ、騒乱により政情が不安定になり、オマーンやバーレーンなど財政基盤が弱くオイル・マネーへの依存度が大きい国で暴動が発生した。中東産油国の政治体制はクウェートを除き議会が存在しないか、議会が機能せず名目化しており、国民の意見を政策に反映するシステムが脆弱である。政治プロセスがトップダウンのため、国民の不満が蓄積すれば、騒乱が一挙に拡大するリスクがあり、暴動等が起きて漸く対応する場当たりの対応も多い。

2. イエメン情勢、シリア情勢

アラブの春以降、イエメンやシリアの内戦は解決の糸口が見えない状況にある。イエメンは、アラブ諸国の中でも複雑な宗教・歴史的背景があり、それらがイエメンの国内情勢や近隣諸国との関係を複雑化している。現在、イエメンは、イランが支援する組織が首都などを支配し、サウジが支援する政権派と内戦状態にあり、国連の仲介による解決にも期待が集まるが、当事者間での和解協議は難航し、政治合意には至っていない。また、イエメン情勢へのオマーンを除くサウジ等のアラブ諸国の軍事介入も長期化し、石油収入低迷下での軍事費負担や犠牲者が増加するリスクもあり、各国で国民の不満が生じる懸念もある。軍事介入によるサウジアラブ首長国連邦等の負担は厳しい状況にあるともいわれている。

シリア情勢に関しても、アラブの春がシリアに波及した2011年時点では、中東の大半は、シリア政府支持の姿勢を示していたが、軍事情勢の混迷化や犠牲者の増加を受け、中東諸国は反政権側にまわり、解決の方向性が不透明な状況が続く。またシリアの内戦は宗派対立を巻き込み、親アサド政権のイランとサウジの代理戦争になっているとも言われ、加えてロシアがシリアへ軍事介入して存在感を示し、シリア情勢は一段と複雑化し、解決の不確実性を増している。そしてシリアやイエメン等での紛争の長期化は、ガバナンスの空白地域が生まれることでテロ組織が活発化し、中東の安全保障面での脅威にも

なると考えられる。

3. イラン情勢

2002年に発覚した核開発問題をめぐり、イランは国際社会から非難をうけ、中東の緊張が高まった。2012年に制裁が強化され、イラン産原油の輸入規制が始まり、イランの原油輸出量は6割も減少して経済が低迷した。

しかし2013年に誕生したイラン新政権は国際融和を重視して核問題解決への交渉が進み、イランとEU3+3間で包括的共同作業計画(JCPOA)が2015年に締結され、イラン核合意が実現した。イランの核開発制限により、国際社会がイランへの経済制裁を解除する合意である。なお核合意をイランに促した最大の要因は油価低迷であると考えられている。核合意の結果、貿易や投資が再開し、イラン経済を支える原油輸出量が拡大した。

一方、イランへの経済制裁解除について、中東の盟主であるサウジ等は制裁解除で、イランの中東での影響力拡大を不安視しており、イラン制裁解除が中東の緊張を再度高めるとの懸念もある。また制裁解除でイランが石油生産を拡大し、OPEC内の主導権争いをめぐり緊張が高まることも予想される。

核合意でイラン制裁解除が進展すると予期されたが、2017年の米国トランプ政権の誕生で、イランの国際協調の流れが変わった。核合意履行後やトランプ政権発足後にも、イランは弾道ミサイル発射実験を実施し、中東の脅威としてトランプ政権はイランの軍事行動に対してイスラエルやサウジ等中東諸国を支援する姿勢を明確にしている。なお核合意後も、米国はミサイル開発等を続けるイランに対して、金融取引等で独自制裁を継続している。トランプ政権は当面イランへの圧力強化を行うと考えられるが、イランは逆に自衛への軍事的取組みを強化し、中東の軍事的緊張を再び高めるリスクもある。

4. サウジアラビア情勢

サウジアラビアは、中東湾岸諸国の中でも、その経済力や宗教的役割を背景に、盟主的立場にある。日本もサウジから石油の3割を輸入しており、政治情勢、経済改革、石油政策、財政政策は重要な関心事項である。

サウジ国王は、政治や社会経済、石油政策、宗教など全ての局面で最高レベルの決定権を有し、後継者の選任は内外から注目される。サウジの政治では王族が重要な役割を果たし、国王が首相、皇太子が副首相に就任し、軍事や治安を担う重要閣僚は王族で占められる。サウジでは近年、ムハンマド皇太子が副皇太子から昇格して国防相も兼任し影響力を増し、権力の集中化が見られ、イエメン内戦介入やカタール断交を主導したとされている。加えて、経済開発会議のトップや国営石油企業の最高評議会トップに就任し、石油政策を含む経済改革を主導し、権力構造に変化が見られる。ビジョン2030もム

ハンマド皇太子主導で策定された。

一方、王位の世代交代に係る人事が、王族内での不満を高めるリスクもある。サウジでの王位継承を巡る王族内の対立が過去にも発生しており、権力構造の変化は内部の権力闘争を生み、政情が不安定となる可能性もある。中東の安全保障を考える上で、指導者の世代交代などサウジの国家体制の動向にも注視が必要となる。

IV. 中東情勢と国際社会

1. 米国の中東政策

歴史的に米国の中東情勢への関与の目的は、石油利権確保、イスラエル支援、冷戦期の旧ソ連の影響力拡大の阻止にあった。特にサウジアラビアとは石油と安全保障を基盤とする外交関係を構築し、伝統的に中東の安全保障の要とされ、現在はテロ対策上の重要な同盟国とみなされている。サウジにとっても米国は自国の安全保障上の最重要国であり、武器購入や軍事訓練を通じ関係が深い。

そして地政学上の要衝である中東湾岸での米軍の駐留、展開は、米国と同盟国や世界に対するリスクに対処し、安全保障に不可欠であると考えられている。米軍は国際的に問題視される国家への包囲網を築く形で中東に戦略的に展開されている。「悪の枢軸」(北朝鮮、イラン、イラク+シリア)、「不安定の孤」(中央アジアと中東を結ぶライン)、「シーア派の三日月地帯」(イランとイラク、シリアを結ぶシーア派の多数派地域)を包囲し、また海洋 choke point であるホルムズ海峡、スエズ運河、ボスポラス海峡、バブ・エル・マンデブ海峡等を戦略的に押さえ込む形で米軍拠点が中東へ配置されている。

また近年の米国の中東への関与にも一時、変化が見られた。オバマ前政権はアラブの春以降、中東への関与を控える姿勢を見せ、米国の中東への関心が低下した印象を世界に与えた。例えば中東諸国への影響を十分に踏まえずに、米国はイランと核合意を成立させイラン制裁解除の方針を示し、イランと友好関係にないサウジ等アラブ諸国との緊張を高めた。この中東関与の変化には、シェール革命による米国の石油自給率改善を受けての石油の中東依存度低下、それに伴う中東の重要性低下といった考えもあったと推察される。現トランプ政権下でも、財政上の制約や米国内の内向的な世論を背景に、中東での安全保障上の役割縮小など中東政策が変化する可能性も指摘された。

しかし米国の中東への関心は、エネルギー問題のみではなく、核不拡散問題やテロ対策など、依然として安全保障問題にある。中東の安全保障に対する米国の関与は、中東の親米国家と米国にとって地政学上、依然として不可欠であると考えられている。オバマ前政権が中東諸国の安全保障政策についてただ乗りと批判したが、トランプ政権は現在、イラン情勢を踏まえ、核合意の破棄

などイランとの関係見直しを示唆しており、米国の中東の安全保障への関与のあり方は不変と見られている。

2. 中国の中東政策

中国は自国の広域経済圏構想「一帯一路」の発展への中東地域の戦略的関与、貢献に関心を持っていると考えられる。中央アジア、南アジアに加え、中国から欧州をカバーする対象地域の中で、中東は地政学上、重要となる。一帯一路構想の実現には、中東を含めた安全保障確保が不可欠となるため、中国は資源外交を始め、積極的に外交交渉を展開している。中国の経済成長率は以前に比べ緩やかにはなっているが、中長期的にエネルギー需要は引き続き増加する見込みであり、中東の上流資源開発投資へ積極的関与のほか、中東産油国から需要の旺盛な中国国内の精製部門など下流部門への投資を奨励することで、中東と中国の相互関係の強化が進んでいる。

V. まとめ

中東は豊富な石油、天然ガス資源を保有し、国際政治や経済に依然として影響力がある一方、紛争、テロ、ガバナンス問題、宗派対立、和平問題など、多様なリスクを抱える。経済面では、オイル・マネーに依存する経済構造と失業問題などを抱え、社会面では人口増加、難民問題などが深刻化している。中東諸国の持続可能性は、原油安がいつまで続くのかに依存する。原油安で財政がひっ迫すれば、公務員の賃金抑制、補助金削減、税率引上げ等が実施され、民心掌握が困難になり、政治経済が不安定になるリスクもある。現状を資源に依存した国家のあり方の転機と考え、経済構造改革が重要である。他方、米国や中国、ロシアといった域外国が中東に与える影響もあり、中東情勢の展望は大変複雑である。

石油の中東依存度の高い日本にとって、中東の政治経済の安定と相互関係の強化、中東からのエネルギー資源の安定調達是不可欠である。その中で、中東では人口増加や補助金による安価な電気料金により、電力需要が伸びており、過去10年で約70%増加し、アラブ首長国連邦では2倍に急増し(図4)⁶⁾、今後も着実に拡大すると見込まれる⁷⁾。しかし電力需要がさらに増加すれば、電気料金への補助金は政府に一層の負担となるので、電力需要抑制や、原子力など経済優位性のある電源の建設が重要な課題とされている。省エネや原子力は中東にとって、石油・ガス輸出余力の確保に貢献するメリットもある。それらの分野に強みをもつ日本は、中東の省エネ技術や原子力等の普及に協力することで、中東を単なる日

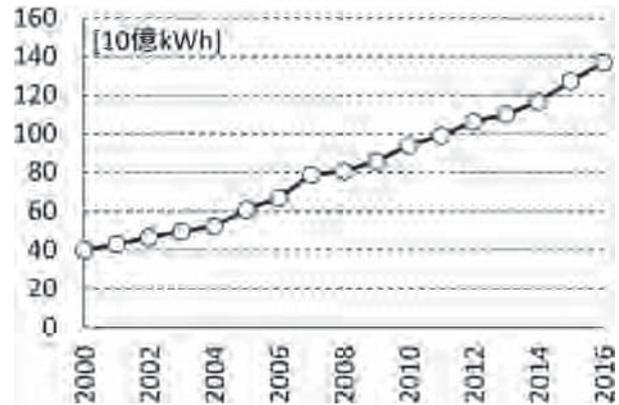


図4 アラブ首長国連邦での総発電量の推移
(出所)文献³⁾を基に筆者作成

本の資源輸入相手国として捉えるのではなく、中東と多層的な協力関係を構築し、中東と日本全体でエネルギー安全保障の向上を総合的に考える視点がより重要であると考えられる。

— 参考資料 —

- 1) IMF, World Economic Outlook, April 2017 (2017) < <http://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2017/04/04/world-economic-outlook-april-2017> > (アクセス日: 2017年9月12日).
- 2) IMF, Regional Economic Outlook - Statistical Appendix, April 2017 (2017) < <https://www.imf.org/en/Publications/REO/MECA/Issues/2017/04/18/mreo0517> > (アクセス日: 2017年9月12日).
- 3) Saudi Arabian Monetary Authority, Annual Statistics 2016, June 2017 (2017).
- 4) IMF, Regional Economic Outlook: Middle East and Central Asia, October 2015 (2015) < <http://www.imf.org/en/Publications/REO/MECA/Issues/2017/01/07/Middle-East-and-Central-Asia1> > (アクセス日: 2017年9月12日).
- 5) Saudi Vision 2030, Kingdom of Saudi Arabia < <http://vision2030.gov.sa/en/> > (アクセス日: 2017年9月1日).
- 6) BP, Statistical review of world energy 2017, 2017 < <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> > (アクセス日: 2017年7月25日).
- 7) 小宮山涼一, 惣福脇学, 松尾雄司, 2035年までの中東諸国のエネルギー需給予測分析, エネルギー・資源, Vol.33, No.2, pp.44-53(2012).

著者紹介

小宮山涼一 (こみやま・りょういち)

本誌, 59[7], p.57(2017)参照.

IAEA 低濃縮ウランバンク ～国際管理構想の実現に向けて～

日本原子力研究開発機構 玉井 広史, 田崎 真樹子, 須田 一則

IAEA が低濃縮ウランの貯蔵・供給を管理する構想が実現の運びとなった。この IAEA 低濃縮ウランバンクは、機微技術の拡散に加え今世紀に入ってテロリストによる悪用の懸念の増大を受け、核燃料の供給保証によって濃縮・再処理に係る技術開発のインセンティブを下げることを目指した様々な構想の一つであり、IAEA の場における議論を通じて核燃料供給及びバンクサイトの要件が規定され、2018 年には正式に運用を開始する予定である。本構想の経緯、意義、今後の動向を紹介する。

KEYWORDS: IAEA LEU Bank, Assurance of Supply, International Management, Sensitive Nuclear Technology, Host state Agreement, Supply Agreement, Supply Criteria, Peaceful Use, Compliance to 3S

I. はじめに

原子力の平和利用を推進する上で、核兵器や核兵器級の核物質あるいはその製造技術の世界的な拡散を防止する核不拡散は極めて重要な施策であり、核兵器の拡散を防止する条約(NPT)において平和利用と核不拡散はそれぞれ重要な柱とされており、それらの総合的な推進は国際社会が取り組んでいくべき重要な課題である。

今世紀に入り、アジアや中東地域等、原子力発電の新規導入を計画する国々が増加する一方で、北朝鮮やイランの核開発計画など世界的な核拡散の懸念が高まり、核燃料の製造のためのウラン濃縮や再処理など機微技術の管理の重要性が目立つようになった。こうした時代背景の中で、核燃料サイクルの国際管理構想が検討され、IAEA 加盟国並びに関係機関から、国際管理のメカニズムについていくつかの提案がなされた。これらの提案は、既にウラン濃縮技術を有している国々から低濃縮ウランを提供することにより原子炉等への燃料供給を保証し、濃縮技術を有していない国々が新たに濃縮技術を獲得するインセンティブを減じようとするものであり、国際的な核不拡散の強化につながるものとして期待された。

各国が提案した構想のうち、現在、実現しているもの

IAEA Low Enriched Uranium Bank ; Towards the Realization of International Management Initiatives : Hiroshi TAMAI, Makiko TAZAKI, Kazunori Suda.

(2017年9月29日 受理)

は、米国が提案した核兵器を解体して取り出された高濃縮ウランを希釈し低濃縮ウランを準備する「米国燃料供給保証」、ロシアが提案した参加国から資金を募って「国際ウラン濃縮センター」を設立し、ウラン濃縮・貯蔵を行い参加国からの要請に応じて核燃料提供を行う構想、そして、IAEA の管理のもとで低濃縮ウランバンクを設立・運営する「IAEA 低濃縮ウランバンク(以後、LEU バンクと略記)」の3つである。何れの構想においても、受領国に対しては低濃縮ウランが供給され、機微技術の移転はなされないことから、核不拡散の目的が達成されることになる。

このうち、LEU バンクは、IAEA が主体となって LEU の貯蔵と供給に当たる構想で、IAEA 加盟国による長年の議論を通じて実現に至ったものである。施設の建設が進み 2017 年 8 月 29 日に竣工式典を行うなど、現在、世界的に注目が高まっていることから、本稿では、LEU バンクについて、経緯、バンクの形態、意義、今後の動向について解説を行う。

II. 核燃料供給保証構想の経緯

2000 年代初頭は、北朝鮮及びイランの核開発問題が顕在化し、原子力平和利用の観点からの懸念事項として地域及び国際的な解決が模索されていた。一方で、この時期はアジアや中東地域等において原子力発電の新規導入を計画する国々が増え、いわゆる原子力カルネサンスと称される潮流の中で、「第二の」イランや北朝鮮の出現を防ぐために核不拡散、つまり機微な原子力技術(濃縮、再処

理)の拡散防止の重要性が認識されていた。既に、2001年の同時多発テロを契機とした国際的なテロへの懸念が増大し、テロ組織による核物質の入手を防止する手立ても必要とされていた。こうした背景の中で2003年10月、当時のエルバラダイ IAEA 事務局長が“Towards a Safer World”と題するエコノミスト誌への寄稿¹⁾の中で、「民生用原子力計画における兵器級核物質の生産・取扱いを制限するために、これらを適切な透明性のもとで多国間管理すべきであり、使用済燃料や放射性廃棄物の管理・処分に関する多国間アプローチを検討すべきである」との提案を行った。

翌2004年3月のIAEA理事会においてエルバラダイ事務局長は、核燃料サイクルの多国間アプローチについて専門家グループによる検討を呼びかけ、世界の主要な原子力利用国から招聘された専門家30名が同年8月から翌2005年2月まで4回の会合を行い、「核燃料サイクルの多国間アプローチ」と題する報告書²⁾をまとめた。報告書はフロントエンドからバックエンドについて、既存の施設・組織の活用や新たな枠組みの創設まで幅広い選択肢を挙げたものであるが、その中でウラン濃縮については多国間管理の中心的な存在と考えられるIAEAが供給を保証する機関として機能すべきであること、そのため実際の供給国とIAEAとの間で供給保証のための取り決めを結ぶ必要があること、商業的以外の理由によって通常の供給契約が破綻した場合のみ供給が発動するメカニズムとすべきこと、提供される保証はIAEA理事会の承認を経て行うべきであること、等が提言されていた。

この報告書の提言を踏まえて、多国間管理の枠組みを創設する構想が核燃料の主要供給国を中心いくつか提案された。これらの提案では、核燃料供給は現実の商業市場に影響を与えない規模のものとし、かつ、受領国が商業的な理由以外の事情に起因してウラン燃料が調達できない場合に限り、最後の手段としてこの核燃料供給保証を利用できるものとされた。そして、この保証により、受給国が自前の濃縮・再処理技術を持つとするインセンティブを抑制しようということが目的となっていた。

これらの提案の一つがLEUバンクの構想であり、2006年9月にIAEA本部で開催された「21世紀における原子力利用の新しい枠組み：核燃料供給保証と核不拡散」と題する特別イベントにおいて、米国に本部を置く核脅威イニシアティブ(NTI：Nuclear Threat Initiative)から提案された。提案内容は、独自の核燃料サイクルの機能を持たないことを決定した国に対する支援を目的としてIAEAが所有し管理する供給保証用のLEU備蓄(核燃料バンク)を創設するために、以下の2条件が満足されればNTIが5,000万ドルを拠出するというものである³⁾。

条件1：IAEAが2年以内(2008年9月まで)に核燃料バンク創設の承認に必要な行動を起こすこと

条件2：IAEA加盟国から合計1億ドルまたはそれに相当するLEUの拠出があること

提案の中で、条件2は米国、ノルウェー、UAE、EU及びクウェートからそれぞれ拠出の表明があり、2009年3月に合わせて1億700万ドルに達した。一方、条件1については、承認に至るプロセスが難航を極めた。

NTI提案では、核燃料バンクの具体的な構成、設置場所、供給条件等の決定はIAEA及び加盟国に一任されていたため、これらの議論がIAEA理事会の場で展開されたが、特に、構想の最大の目的である濃縮・再処理のための機微技術へのアクセス制限を核燃料バンクからのLEUの供給条件とすることは、NPTで謳われている原子力平和利用の権利を侵害するものであるとの反対が途上国を中心にあり、期限とされた2008年9月までにバンク設立の承認が得られなかった。

このため、IAEA事務局長の要請により期限を2度にわたり延長して議論を継続し、供給条件を見直した「核燃料供給保証」と題するLEUバンクの設立に係る決議案が日本を含む十数ヶ国の共同提案により2010年12月のIAEA理事会に上程され、賛成多数で漸く承認に漕ぎつけた。この際、途上国の反対を緩和するため、バンクを利用しても自国の核燃料サイクルの確立あるいは開発の権利放棄は求めないことが確認されたとされている⁴⁾。

III. バンクサイトの決定

IAEA理事会においてLEUバンクの設立が承認されたことを受けて、2011年1月、中央アジアのカザフスタン共和国がLEUバンク施設の入入れを表明した⁵⁾。この時点で、カザフスタンは自国内の候補地として、国内の原子力施設のインフラが整備されている同国東部ウルバのウラン燃料加工工場、またはセミパラチンスクの核実験場跡地を想定していた。

LEUバンクの誘致表明国は他になかったためカザフスタンが候補地として最有力となり、サイト候補地に対する安全及び核セキュリティ、保障措置を含む様々なインフラの整備状況に対する技術評価が行われるとともに、LEUバンクの施設・資機材に対する保障措置、安全及び核物質防護上の措置等を規定するホスト国協定及び技術支援協定の締結交渉が、IAEAとカザフスタン政府との間で進められた⁶⁾。

サイト候補地とされたカザフスタン東部は地震活動が活発であるため、数次にわたりIAEA調査団が現地に派遣され、IAEA安全基準等に照らして原子力施設の設置サイトとしての適格性を有するか否かが慎重に評価・検討された。その結果、ウルバをサイト地とすることがIAEA理事会において承認され、2015年8月、ホスト国



図1 カザフスタン国内の主要都市

協定の署名を以て LEU バンクをカザフスタンに設置することが正式に決定された⁷⁾。

その後、バンクサイトに新設される LEU の貯蔵施設・設備の設計が IAEA 安全基準及びセキュリティ指針に規定されている条項に合致している旨の確認を経て、これらの施設の建設が進められ、2017 年 6 月の IAEA 理事会において「2017 年 8 月 29 日に施設の竣工式典を挙げる予定であること、低濃縮ウランの調達計画に基づいて獲得契約を 2017 年末までに完了させること、獲得した低濃縮ウランを 2018 年に貯蔵施設へ輸送すること」が表明された⁸⁾ (竣工式は予定どおり 8 月 29 日にカザフスタンの首都アスタナにおいて、天野 IAEA 事務局長、ナザルバエフ同国大統領など関係者の列席のもとで行われた⁹⁾)。

なお、カザフスタンは中央アジアの内陸国であり(カザフスタンの地理位置は図1参照)、濃縮ウランの調達や LEU の供給を要請した国への輸送に当たって、ロシアや中国等、近隣国の港湾を利用することが想定されるため、それらの国と予め国際輸送について取り決めておく必要があることから、IAEA はその準備を進めた。そして、2015 年 6 月、IAEA とロシアは、ロシア領内と LEU バンク間における LEU 及び機材の輸送に関する協定に署名した¹⁰⁾。この協定は、ロシアが当該物資の同国領内における安全な輸送を保証するものとされている。現在、中国国内においても LEU の輸送を行えるよう、上述のロシアとの輸送協定と同様の協定を IAEA-中国間で締結する準備をしている模様である¹¹⁾。

IV. LEU バンクに関する規定

LEU バンクの設立と LEU バンクからの核燃料供給を行うための要件は、長年の IAEA 理事会における議論を反映して、LEU バンクの位置づけ、核燃料供給の発動要件として現在、以下のように定められている¹²⁾。

- ・ボランティアの拠出金 1 億 5 千万ドルは、LEU バンクの設立(LEU の当初の調達を含む)と最低 10 年間の運転のための費用に充てられ、IAEA の予算や他の活動

には一切支障がない。

- ・ LEU バンクは、現在、発電炉として世界的に使用されている典型的な軽水炉の燃料製造に充てるため 90 トンの LEU(濃縮度 4.95%以下)の備蓄を行うもので、大都市に 3 年分の電力を供給するのに十分な量である(著者注:具体的な言及はされていないが、“90 トンの LEU で 3 年分の電力”という数字から推計すると、例えば典型的な軽水炉として 100 万 kW 級を想定した場合、100 万世帯の消費電力を 3 年間賅える量に匹敵する)。
- ・ IAEA 加盟国が国際的な商業市場、その他の既存の調達手段からは LEU を調達できない場合(例外的な状況による核燃料供給途絶の場合とされている¹³⁾)、IAEA 理事会が認める条件を満たすならば、当該受領国からの要求により最後の手段として LEU バンクから燃料を購入できる。但し、これにより既存の商業市場に影響を与えてはならない。
- ・ 核燃料供給に先立ち、IAEA 事務局長は以下の IAEA 理事会が認める条件が満足されていることを確認する。
 - －当該国の発電炉への LEU 供給途絶の事実
 - －商業市場、国家間の協定等、あらゆる手段での LEU 確保が困難であること
 - －受領国が IAEA と包括的保障措置を締結し、遵守していること

なお、供給を受けても、受領国は自国の核燃料サイクルを推進する上で何らの制約を受けない。

- ・ また、受領国は IAEA と核燃料供給協定を締結するとともに LEU バンクに LEU を再ストックするための全コストを負担しなければならない。この支払いと契約締結の後、LEU は国際基準に合致した輸送用シリンダーに詰められ、列車で LEU バンクから核燃料加工工場に輸送される。
- ・ 核燃料供給協定では、供給された LEU は発電炉の燃料製造にのみ使用し、いかなる核兵器、核爆発装置の製造、または軍事目的に利用してはならないこと、再濃縮、再処理、再移転、再輸出には IAEA の同意が必要であり、IAEA 保障措置、安全基準、核物質防護措置の適用を受けることがそれぞれ規定される。

一方、LEU バンクサイトのカザフスタンと IAEA との間で締結されたホスト国協定¹⁴⁾は、LEU バンクの円滑な管理・運営を目的に両者の責任分担、権利と義務、財政、LEU バンクに常駐する IAEA 査察官等への便宜供与、権利保証等が規定されており、主な要件は次のとおりである。

3S 確保の責任

- ・ IAEA 原子力安全指針、核セキュリティ実施指針、技術指針を、カザフスタンの適切な法規を通じて LEU

バンクへ適用

- ・LEUバンクの施設及びLEUはIAEA保障措置(包括的保障措置及び追加議定書)の対象であり、カザフスタンが締結している保障措置の適用を受ける。

緊急事態への対応

- ・貯蔵施設、LEUバンクに影響を与える原子力安全・核セキュリティに関する緊急事象に対する対応計画を作成(輸送時を含む)

原子力賠償責任

- ・カザフスタンが加盟している原子力損害の民事責任に関するウィーン条約に基づいて対応

費用分担

- ・IAEAの負担は、LEUの購入・輸送、施設・設備の取得・運転等、LEUバンクの機能維持に必要な技術、シリンドラーの監視・査察、IAEAの要請によるLEUバンクの移設
- ・ホスト国であるカザフスタンの負担は、サイトの提供、LEUの保管、電気等の施設のユーティリティ、スタッフに係るコスト、カザフスタンの要請によるLEUバンクの移設、カザフスタンの保障措置義務の実施

協定の有効期間

- ・協定の有効期間は10年で、その後は10年ごとに自動延長。

協定の終了

- ・有効期限の1年以上前に、どちらかが本協定の延長を行わない旨を書面により通告を行った場合、書面による終了通告を受け取った日から1年後
- ・書面により両者が合意した場合

なお、LEUバンクの原子力安全と核セキュリティ管理はカザフスタンが国の責任において行い、IAEAの原子力安全基準及び核セキュリティ指針の規定に合致したカザフスタンの国内法規が適用されることとなっている。上記の緊急事態への対応計画については、前述のようにLEUバンクサイトは地震の発生頻度が比較的高いことから安全の施策として重要である。更に、協定は、放射性物質に加えて化学物質やその他の危険物等でLEUバンクから発生するだけでなくLEUバンク外からもたらされるものを、LEUバンクの安全とセキュリティに重大な影響を与える事象ととらえて綿密な緊急事態対応計画の策定を求めており、昨今の国際的なテロの懸念の高まりの中で、時宜を得たものと考えられる。場合によっては、LEUバンクをカザフスタン国内の別の場所に移設することを許容していることも、そうしたことを想定したものと言えよう。

V. 今後の展望

カザフスタンは、現在、有数のウラン供給国(2009年より世界第1位)で、カナダに替わってトップの座につ

いて以来、年々増産を続け2016年には23,800トンを記録し、世界のウラン需要の約40%を賄うまでの成長を遂げている¹⁵⁾。豊富なウラン資源を背景にカザフスタンは、今後、ウランの生産国としてだけでなく、核燃料サイクル全般にわたって世界で主要な地位を目指すとの戦略を持っている。その一環として、上記のようにホスト国として様々な負担が必要となるLEUバンクの設立に敢えて参画することにより、核不拡散のプロセスへの貢献を示したいとの意図と考えられる。

LEUバンクを実際に運用するウルバの燃料加工工場(UMP)は、国営原子力企業KAZATOMPROM社の傘下においてウラン燃料の加工や原子力資機材の製造を行う合同ベンチャー企業で、旧ソ連時代から60年以上も原子力関連製品を生産しており¹⁶⁾、インフラ基盤が充実していると同時に非核兵器国として独立後20年以上IAEA保障措置を受入れてきた実績を有している。国内に濃縮施設を持たないカザフスタンでは、濃縮ウランを国外から調達しなければならず、原則的に国際入札による調達とされている。しかし、UMPはロシアのアンガルス濃縮センターに比較的近く既存の鉄道網を利用した輸送が可能であることから、本LEUバンクで貯蔵される濃縮ウランの調達に際し、仮にカザフスタンで原料ウランを産出し、それをアンガルスで濃縮し、UMPにて貯蔵するというシナリオを描けるならば、途中の核物質の輸送経路、輸送回数の極小化を通じて核物質防護上も一定の効果が期待できよう。

一方、本LEUバンクは本格運用まであとわずかというところまで漕ぎ着けたものの、核燃料供給の発動要件である「例外的な状況による核燃料供給途絶」とはいかなる状況であるのか、果たして本LEUバンクからの核燃料供給を要請する国が現れるのか、現状では予想が困難である。2013年5月に発行された米国会計検査院(GAO)のレポート¹⁷⁾では、複数の専門家がLEUバンクの存在価値について疑問を投げかけている旨を指摘しており、その理由として、現在、国際的にウラン市場が安定していること、LEUバンクの長期的な運転及び資金計画が示されていないこと、同様の核燃料バンクを既に米・露が設立していることを挙げていることが紹介されている。GAOが紹介しているようなLEUバンク設立後の運用の在り方に加えて、前述の本LEUバンクからの燃料供給の発動条件等については、IAEA等における今後の議論に委ねられよう。

なお、2015年7月にイランの核開発問題の解決を目指して包括的共同作業計画(JCPOA)が合意されたが¹⁸⁾、その付属書の中で、JCPOAで認められた上限量を超えてイランが保有する低濃縮ウランの一部を、本格運用後の本LEUバンクに売却できる旨が記述されており¹⁹⁾、2018年から運用を開始するLEUバンクに核不拡散上の新たな存在意義が見出されつつあると言えよう。

－ 参考資料 －

- 1) "Towards a Safer World", Dr. Mohamed ElBaradei, 16 October 2003, Op-Ed, published in The Economist, <http://www.iaea.org/NewsCenter/Statements/2003/ebTE20031016.html>.
- 2) "Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle: Expert Group Report submitted to the Director General of the International Atomic Energy Agency" (INFCIRC/640, 22 February 2005): <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infircs/2005/infirc640.pdf>.
- 3) "Nuclear Threat Initiative Commits \$50 Million to Create IAEA Nuclear Fuel Bank", <http://www.iaea.org/NewsCenter/PressReleases/2006/prn200616.html>.
- 4) "IAEA FUEL BANK" ARMS CONTROL WONK: <http://www.armscontrolwonk.com/archive/203469/iaea-fuel-bank/>
- 5) Communication dated 11 January 2010 received from the Permanent Mission of the Republic of Kazakhstan to the Agency enclosing a position regarding the establishment of IAEA nuclear fuel banks (INFCIRC/782): <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infircs/2010/infirc782.pdf>.
- 6) Introductory Statement to Board of Governors (September 2013): <http://www.iaea.org/newscenter/statements/2013/amsp2013n17.html>.
- 7) IAEA NEWS: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-kazakhstan-sign-agreement-establish-low-enriched-uranium-bank>.
- 8) IAEA Introductory Statement to the Board of Governors: <https://www.iaea.org/newscenter/statements/introductory-statement-to-the-board-of-governors-12-june-2017>.
- 9) IAEA Press Release: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-leu-bank-reaches-milestone-with-storage-facility-inauguration-in-kazakhstan>.
- 10) IAEA: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-russia-sign-transit-agreement-for-iaea-fuel-bank>.
- 11) IAEA Introductory Statement to the Board of Governors: <https://www.iaea.org/newscenter/statements/introductory-statement-to-the-board-of-governors-6-march-2017>.
- 12) IAEA FACTSHEET: <https://www.iaea.org/sites/default/files/the-iaea-leu-bank.pdf>.
- 13) IAEA Low Enriched Uranium Bank: <https://www.iaea.org/topics/iaea-low-enriched-uranium-bank>.
- 14) Agreement between IAEA and Kazakhstan regarding the establishment of the LEU bank of IAEA in Kazakhstan (INFCIRC/916): <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infircs/2017/infirc916.pdf>.
- 15) KAZATOMPROM News: <http://www.kazatomprom.kz/en/#!/article/4350>.
- 16) History JSC UMP: <http://www.ulba.kz/en/company3.htm>.
- 17) GAO Highlights (May 2013): <http://www.gao.gov/assets/660/654715.pdf>.
- 18) Joint Comprehensive Plan of Action: <https://www.state.gov/e/eb/tfs/spi/iran/jcpoa/>.
- 19) JCPOA Annex I - Nuclear-related measures, Para- 57: <http://www.state.gov/documents/organization/245318.pdf>.

著者紹介

玉井広史 (たまい・ひろし)

日本原子力研究開発機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター
(専門分野/関心分野)核不拡散, 核セキュリティ, 多国間アプローチ

田崎真樹子 (たざき・まきこ)

日本原子力研究開発機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター
(専門分野/関心分野)核不拡散, 多国間管理, 二国間原子力協力協定

須田一則 (すだ・かずのり)

日本原子力研究開発機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター
(専門分野/関心分野)核不拡散, 核セキュリティ, 二国間原子力協力協定

材料挙動と計算機シミュレーションの接点

第3回 粒界破壊における破壊力学試験と第一原理計算

日本原子力研究開発機構 山口 正剛

原子炉压力容器鋼における照射誘起リン偏析による粒界脆化、炉内構造物の(照射誘起)応力腐食割れ、高速炉及び核融合炉材料におけるヘリウム脆化など、原子力材料では粒界破壊がしばしば問題となる。粒界破壊の原因を探るための電子論計算が多数行われ、粒界における原子間結合(凝集)エネルギーの低下はその有力な原因の一つであるが、それがマクロな破壊現象へとつながるメカニズムについては、未知の部分が多い。本稿では、粒界の原子間結合とマクロな粒界破壊現象との関係を、第一原理計算結果と破壊試験データを交えながら考察する。

KEYWORDS: *intergranular embrittlement, grain boundary, segregation, iron, ductile-to-brittle transition, fracture toughness*

I. はじめに

高純度鉄(bcc Fe)を使った粒界脆化の研究が、1980年代に木村らにより行われた¹⁾。粒界脆化をもたらす硫黄(S)、リン(P)の粒界偏析は高純度鉄の延性脆性遷移温度(Ductile-to-Brittle Transition Temperature, DBTT)を上昇させ、逆に粒界を強化するとされるホウ素(B)、炭素(C)の偏析はDBTTを下降させることが示された。そしてDBTTの変化は、これらの元素の偏析による「粒界結合力」の変化に起因すると考えられた。1993年のレビュー¹⁾には、化学結合論的立場からの研究の必要性や、そう遠くない将来に電子論から粒界脆化の問題が解決されることへの期待が述べられている。

1990年代後半に、原子力材料の機械的性質に対して第一原理計算を使った研究ができないものかと考えていた筆者にとって、上記の記述は興味深いものであった。しかしながら結晶粒界の第一原理計算は、その当時の大型計算機をもってしても困難であった。ところが計算機の並列化が進むことにより、5年で10倍、10年で100倍という計算機性能の長足の進歩が続き、それに加えて第一原理計算手法の進歩と使いやすいコードの普及が進んだ。2000年以降、徐々に金属粒界の計算ができるようになったが、価電子数が多くかつ大きな磁性を持つため計

算時間のかかる体心立方晶の鉄粒界の計算はまだ困難であった。そしてようやく、2005年に原子力機構の大型計算機が更新され能力が旧機種の10倍以上になったとき、「これで鉄粒界の計算ができる」と思ったことを憶えている。

その後、鉄粒界におけるいくつかの元素がもたらす効果(脆化か強化か)が、第一原理計算から得られる粒界における原子間結合の強さと密接に関連している様子が明らかになり始めた。計算結果は木村らによる実験結果とよく相関しており、粒界の原子間結合の強弱がマクロな粒界脆化現象(ここではDBTT)をよくコントロールしていることが示唆された²⁾。

ひとまずは良い結果が得られたと思ったが、実は簡単に納得してよい問題ではないとも思われた。なぜなら、粒界の原子間結合のエネルギー変化はせいぜい1 J/m²のオーダーしかないが、巨視的な亀裂の進展抵抗としての破壊靱性値 K_{Ic} から換算される鉄鋼の破壊エネルギーは、粒界脆性破壊が生じる場合でも数千から数万 J/m²以上に達する場合があるからである。高々数 J/m²のエネルギーの何分の一かの変化が、その千倍以上の大きなエネルギー変化に影響を与えるものなのだろうか。マクロに見られる破壊現象と原子間結合の強さの間に、何か因果があるとすれば、それはどのような原子論的なメカニズムから成り立っているのだろうか。

そのメカニズムはまだ明らかではないが、破壊力学試験データと第一原理計算結果を組み合わせることにより、マクロな粒界破壊挙動と粒界の原子間結合の間には、確かに因果はあるように思える結果を得ている³⁾。本稿ではそれらの結果について概説していきたい。

Computational modeling of the behavior of nuclear materials (3) ; Combined analysis with first-principles calculations and fracture mechanics experiment on intergranular fracture : Masatake Yamaguchi.

(2017年8月28日 受理)

■前回タイトル

第2回 原子力材料の分子シミュレーション、現状と展望

II. 粒界凝集エネルギー ($2\gamma_{\text{int}}$) の第一原理計算

1. 結晶粒界構造の原子モデリング

結晶粒界とは方位の違う結晶粒同士が接する界面であり、そこでは原子配置に乱れが生じている。しかしながらその乱れは、粒界面から高々2, 3原子層以内に収まると言われている。粒界面におけるオージェ電子分光及びスパッタリングによる観察によれば、偏析原子の粒界面に垂直な方向への広がり、単原子層程度とされる。そのため、対称性が高く粒界面に平行な方向の構造単位(ユニットセル)を小さくできる対応粒界ならば、第一原理計算が可能なサイズのセル(数十原子/cell)内で粒界構造を表すことができる。また表面における原子配置の乱れも高々2, 3原子層以内であるため、同様にして粒界破壊表面を扱うこともできる。実際に粒界と破面を含むセルを用いて第一原理計算を行うと、原子位置の乱れは粒界、表面ともに2, 3原子層以内で収まっている。

ランダム粒界の方が対応粒界よりもエネルギーが高いために壊れやすいと言われている。残念ながらランダム粒界は粒界面に平行な方向の構造単位を小さくすることができないので、第一原理から計算することはできない。そこで、図1に示すような $\Sigma 3(111)$ 対称傾角粒界を用いた。この $\Sigma 3(111)$ 粒界の粒界エネルギーは1.52 J/m²であり、(111)表面エネルギー2.69 J/m²の半分以上あり比較的高い。そのため、ランダム粒界ほど壊れやすくないかもしれないが、それに次いで壊れやすい粒界ではないかと推察される。そして、この $\Sigma 3(111)$ 粒界を用いた計算により脆化効果が現れれば、ランダム粒界ではもっと顕著に脆化効果が現れると考えられる。このようなセルを用い、溶質元素の粒界/表面偏析エネルギーを計算した。その後の予備的結果であるが、幾つかの異なる Σ 値の粒界でも計算した結果、定量的には最大50%程度のばらつきはあるものの、偏析しやすい元素の偏析

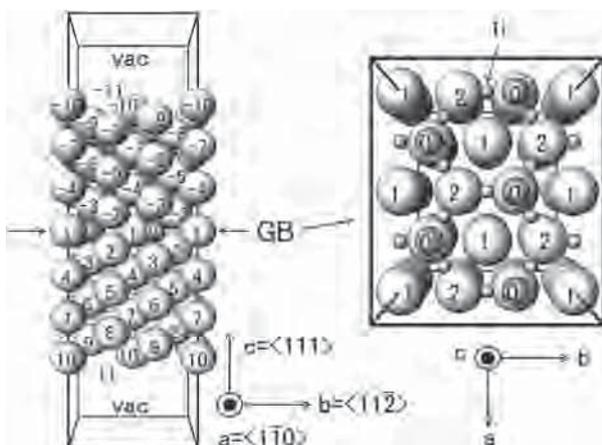


図1 第一原理計算に用いたセル[2]

エネルギーは大きく、しにくい元素の偏析エネルギーは小さいという傾向は変わっていない。

2. $2\gamma_{\text{int}}$ の計算方法

粒内に固溶している溶質原子が拡散により粒界へ移動したときに系のエネルギーが低下すれば、その溶質原子は粒界にトラップされ、粒界偏析した状態になる。溶質原子1 molあたりのエネルギー低下(負の値)が粒界偏析エネルギー $\Delta E_{\text{seg}}^{\text{gb}}$ (kJ/mol)であり、偏析濃度が Γ (m⁻²) の場合には、粒界エネルギー γ_{gb} が $\Delta E_{\text{seg}}^{\text{gb}} \Gamma$ (J/m²) だけ下がったと見なすことができる。次に粒界が割れて2つの破壊表面が生じると、粒界偏析していた溶質原子は表面偏析した状態になる。このとき、溶質原子の粒内固溶状態から見たエネルギーの低下(負の値)が表面偏析エネルギー $\Delta E_{\text{seg}}^{\text{s}}$ (kJ/mol)である。

ある面積内で粒界偏析していた複数の溶質原子の1つ1つが2つの破壊表面のどちらかに偏析するにしても、全体では $\Delta E_{\text{seg}}^{\text{s}} \Gamma$ (J/m²) だけ表面エネルギー $2\gamma_{\text{s}}$ が低下するとみなすことができる。そこで、粒界偏析がある場合の $2\gamma_{\text{int}}$ (偏析がない場合は $2\gamma_{\text{int}}^0 = 2\gamma_{\text{s}} - \gamma_{\text{gb}}$) は、次の式で表わされる。

$$\begin{aligned} 2\gamma_{\text{int}} &= (2\gamma_{\text{s}} + \Delta E_{\text{seg}}^{\text{s}} \Gamma) - (\gamma_{\text{gb}} + \Delta E_{\text{seg}}^{\text{gb}} \Gamma) \\ &= 2\gamma_{\text{int}}^0 - (\Delta E_{\text{seg}}^{\text{gb}} - \Delta E_{\text{seg}}^{\text{s}}) \Gamma \end{aligned} \quad (1)$$

固溶濃度が極めて低い場合(例えば鉄中水素)など、固溶元素の化学ポテンシャル μ_{b} が偏析エネルギーに比べて無視できない場合には、元素の固溶から偏析への移動による粒界及び表面のエネルギー変化は $\Delta E_{\text{seg}}^{\text{gb/s}} - \mu_{\text{b}}$ と表すべきだが、割れる前後で Γ が同一の(1)式では μ_{b} は相殺される。この(1)式から、粒界偏析エネルギーよりも表面偏析エネルギーの方が(負の方向に)大きい元素、すなわち粒界よりも表面でエネルギー的に安定化する元素は $2\gamma_{\text{int}}$ を低下させるので粒界脆化効果を持ち、逆は強化元素ということになる。

III. 延性脆性遷移温度 (DBTT) と $2\gamma_{\text{int}}$

1. Rice-Wang モデル

(1)式にあるように、 $2\gamma_{\text{int}}$ の変化は結局のところ、溶質元素の粒界と表面における偏析エネルギー差に起因している。 $2\gamma_{\text{int}}$ の変化が粒界破壊を支配する重要な鍵の1つであるという考え方は、Rice-Wang モデル⁴⁾と呼ばれる。Rice と Wang は1989年の論文の中で、実験的に得られている様々な偏析元素の粒界偏析エネルギーと表面偏析エネルギーの差を求め、それが鉄系材料の粒界破壊の延性脆性遷移温度(DBTT)のシフトとよく相関していることを示した。Rice-Wang モデルの理論的枠組みとしては、単にDBTTが $2\gamma_{\text{int}}$ の関数であると仮定している(文献⁴⁾の(32)式)にすぎないが、DBTTの変化が(1)

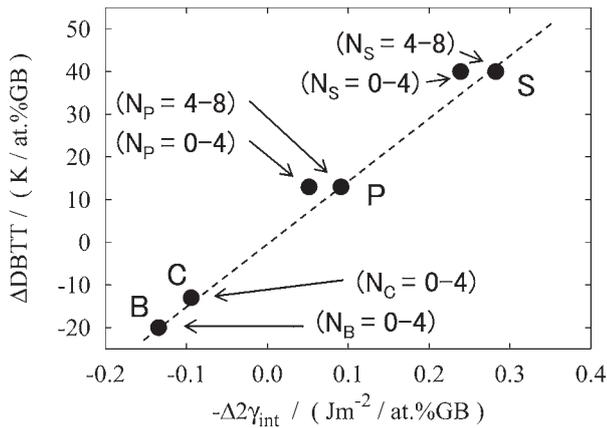


図2 DBTT(実験)と $2\gamma_{\text{int}}$ (計算)の関係[2]

式の偏析量 Γ に比例しているという実験事実は広範に報告されており、それを根拠としている。

2. DBTTと $2\gamma_{\text{int}}$ の相関

Rice-Wangが実験データから求めた粒界と表面における偏析エネルギー差を、II.で説明した第一原理計算によって求め、それを高純度鉄の粒界破壊におけるDBTT変化(シャルピー衝撃試験による)と対応させて表示したのが図2である。両者は非常によく相関しており、DBTTが $2\gamma_{\text{int}}$ によってよくコントロールされていることが示唆される。つまり、ホウ素や炭素のように $2\gamma_{\text{int}}$ を大きくする(原子間結合を強くする)元素はDBTTを下降させ、リンや硫黄のように $2\gamma_{\text{int}}$ を小さくする元素ほどDBTTを上昇させることが示されている。未発表だが、その後いくつかの他の Σ 値の粒界で計算した限りでは、大まかな傾向は変わらないようである。

図2の結果は、DBTTと $2\gamma_{\text{int}}$ の間のよい相関を示している。その相関を生み出すメカニズムについては、まだよく理解されていないが、いくつかの物理モデルによる検討が行われている。東田と田中によるモデル⁵⁾は、原子レベルで鋭い微視亀裂先端において外力による引張応力集中が、そこから射出される転位が作る圧縮応力場によって遮蔽されることに注目している。応力集中の増大に比べてその遮蔽が間に合わず、原子間結合を切断するための応力拡大係数に達したときに微視亀裂進展が生じると彼らは考えた。このモデルによれば、温度一定の場合微視亀裂先端の原子間結合が強いほど、その先端からの転位射出量が増すことになる。それは温度上昇による転位射出量の増加と同じ効果をもたらすため、原子間結合が強くなることはより延性的になることを意味し、すなわちDBTTの下降をもたらす。つまりこのモデルは、定性的に図2の結果を説明可能である。

IV. 破壊靱性値(K_{Ic})と $2\gamma_{\text{int}}$

1. 微視亀裂進展と $2\gamma_{\text{int}}$

原子レベルで鋭い微視亀裂先端における原子間結合切断と転位射出による集中応力の緩和との競合という点で、基本的な考え方は東田-田中モデルと同一であるが、固体中音速に近い高速な微視亀裂進展を対象として構築されているのがJokl-Vitek-McMahonモデル⁶⁾である。このモデルのより詳細な説明は文献³⁾に記したが、そのユニークな点は、他のモデルのように微視亀裂の存在を仮定してから応力負荷を始めるのではないところにある。高い応力下で微視亀裂が発生し、その先端では原子間結合を容易に切断する高い応力がかかると仮定し、それから結合切断に必要な時間内の転位射出とそれによる応力緩和に着目するのである。つまり、原子間結合が強いということはその切断にかかる時間が長いということであり、その時間内の転位射出量が増えるため、破壊靱性が増すことになる。一方、結合切断に必要な時間内で十分な応力緩和が行われる場合には、結合切断による脆性破壊は生じず、延性的になると捉えている。

このモデル及び東田-田中モデルでは、微視亀裂先端における原子間結合の切断と、先端あるいはその周辺における転位射出が同時に生じるという仮定をおくことで、小規模降伏条件のようにある程度の塑性変形を伴いつつも原子間結合切断による脆性破壊が進行するという状況を考えている。これは、亀裂先端で原子間結合切断と転位射出が同時には起こらないとして二者択一で捉えるRice-Thomsonモデル⁷⁾とはその拠って立つ仮定が異なる。モデルの出発点は異なるが、Rice-Thomsonモデルでも物質ごとの延性・脆性的性質の違いを定性的には捉えている。以上のように、これまで見てきた物理モデルは組み立て方が異なるものの、どのモデルも現象の一面を正しく捉えているようであり、その妥当性検証は今後の課題である。

2. 破壊の有効表面エネルギーと $2\gamma_{\text{int}}$

1970-80年代にペンシルバニア大学のC. J. McMahonグループにおいて、鉄鋼の焼戻し脆性や水素脆性の研究が精力的に行われた。彼らは粒界破壊しやすいNi-Cr鋼を用い、ノッチ材の曲げ試験から一つの微視亀裂進展の挙動に注目した試験を行っている。詳細は文献³⁾に記したが、粒界面上の析出物のサイズを発生微視亀裂サイズと仮定し、その微視亀裂が進展を始める応力(局所破壊応力)を利用して、粒界面上で一つの微視亀裂進展が始まる応力拡大係数を求めている。これを通常のCT試験から求まるマクロな破壊靱性値 K_{Ic} と区別し、ミクロな破壊靱性値 k_{Ic} と定義する。そこからミクロな微視亀裂進展の破壊エネルギー $w_f = (1-\nu^2)k_{\text{Ic}}^2/E$ 、 ν : ポアソン

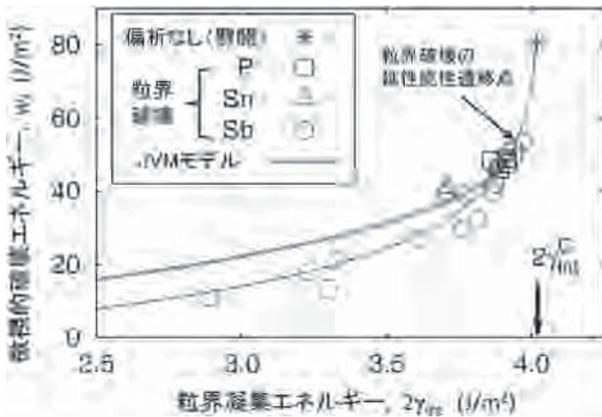


図3 w_f (実験)と $2\gamma_{int}$ (計算)の関係[3]

比, E : ヤング率)が求まるが, これは通常, 微視亀裂進展の有効表面エネルギーと言われるものに相当する。

Ni-Cr 鋼に粒界脆化元素として知られるアンチモン(Sb), スズ(Sn), P を添加して偏析させると粒界破壊が生じる。上記の試験方法から脆化元素の偏析濃度と微視的破壊エネルギー w_f の関係が求められる。そして, 脆化元素の偏析濃度から $2\gamma_{int}$ を第一原理計算により求め, w_f のデータを整理したのが図3である。Sb, Sn, P という脆化元素の種類によらず, w_f は $2\gamma_{int}$ とよく相関していることが示されている。そしてその相関を物理的によく説明するのが Joki-Vitek-McMahon モデル⁷⁾であり, パラメータを適当に選ぶと, 図3にあるようによく似たモデル曲線を描くことができる。しかも, $2\gamma_{int}$ が大きくなると数式の解がなくなることで曲線が途切れ, 粒界破壊が生じなくなる(延性脆性遷移)ことも表している。

以上のようにして, 破壊試験データに第一原理計算結果を組み合わせることにより, 微視亀裂進展の有効表面エネルギー(微視的な破壊エネルギー)が粒界の原子間結合の強さに依存する, ということが示唆された。そしてこの結果は, Joki-Vitek-McMahon モデルや東田-田中モデルと主張は同じであり, これらのモデルの根拠となるデータが初めて得られたのではないと思われる。

3. 微視的亀裂と巨視的亀裂の関係

図3で示された結果は, ある粒界面上で生じた一つの(原子レベルで鋭い)微視亀裂進展に着目した結果であった。一方, CT 試験片から求まる通常のマクロな破壊靱性値 K_{Ic} は, 原子レベルで鋭くはない疲労予亀裂の進展に関する抵抗である。そのような巨視的な亀裂の先端に破壊のプロセスゾーンと呼ばれる塑性域が生じ, その中で微視亀裂が生じて破壊が進行していくと考えられるが, そのマイクロな様相はよく分かっていない。

亀田はそのマクロな破壊靱性値 K_{Ic} と前述のマイクロな破壊靱性値 k_{Ic} の間により相関があることを見出した⁸⁾。図4にその結果を示す。この結果は Ni-Cr 鋼において Sb, Sn, P 偏析による粒界破壊を起こし, そのときの粒

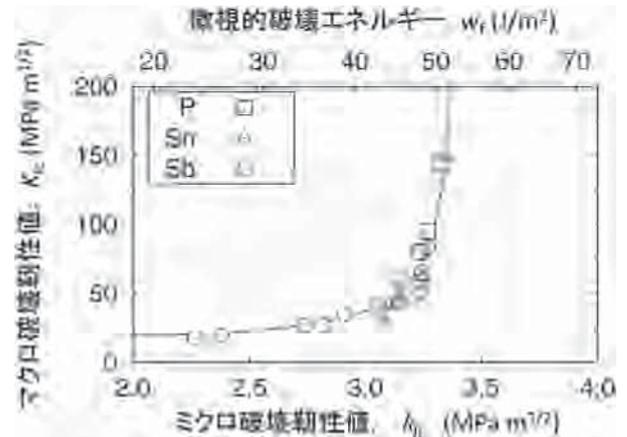


図4 K_{Ic} (実験)と k_{Ic} (実験)の関係[3]

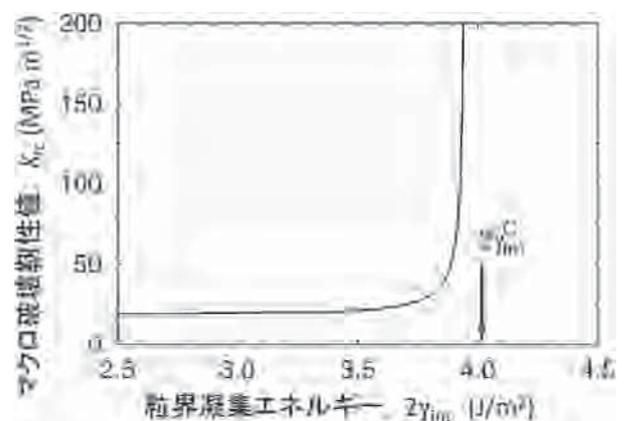


図5 K_{Ic} (実験)と $2\gamma_{int}$ (計算)の関係[3]

界偏析濃度を介して, CT 試験による K_{Ic} とノッチ材による k_{Ic} とのデータの相関を取ったものであり, 両者はよく相関していると言える。つまりこの結果は, 一つの粒界面における微視的亀裂が進展しやすくなるほど, マクロな巨視的亀裂も, その詳しい様相は分からないながらも同じように進展しやすくなっている, ということを意味するようになる。亀田は巨視的な亀裂先端応力場中の微視亀裂進展のエネルギーバランス条件式を解き, K_{Ic} と k_{Ic} を結ぶ数式を得ている⁸⁾。図4における実線はその式を用いて描いており, K_{Ic} と k_{Ic} 間の相関の振る舞いをよく再現しているように思われる。

図4によるとマクロな K_{Ic} には約 $20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ほどの最小値があるように見える。これは, 巨視的な亀裂先端において, 微視的な亀裂の発生と進展が生じるための十分な大きさの塑性域を形成するために必要な最小のエネルギーを意味しているのではないかとも思われるが, 筆者はマクロな破壊の様相については研究経験がないため, これ以上の言及は控えたい。

4. 巨視的亀裂進展と $2\gamma_{int}$

図3と図4の結果を組み合わせると, 図5に示すような, マクロな破壊靱性値 K_{Ic} と $2\gamma_{int}$ の間の関係が得られ

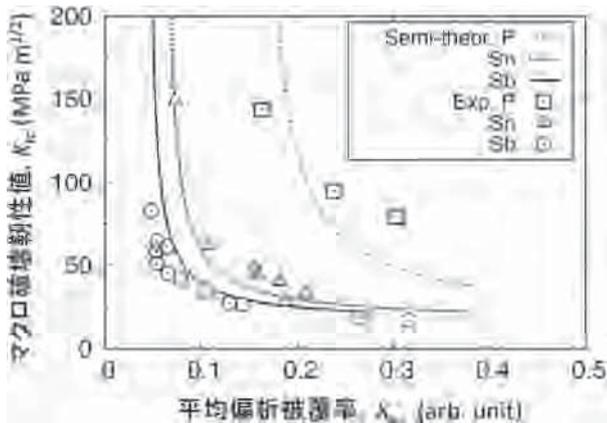


図6 K_{Ic} (実験)と被覆率 X_{av} (実験)の関係[3]

る。非常に急峻な曲線となっており、簡単にいえば、 $2\gamma_{int}$ のある閾値以下で、マクロな破壊靱性値の急激な低下が始まる、ということである。この振る舞いの意味するところは、ある閾値以下の $2\gamma_{int}$ で微視亀裂進展が始まるため、それに伴い巨視的な亀裂進展も生じ、マクロな K_{Ic} の低下が急激に始まる、ということなのではないかと思われる。

この図5のマルチスケール関係(K_{Ic} vs. $2\gamma_{int}$)を, Sn, Sb, Pなどの脆化元素の偏析による $2\gamma_{int}$ 低下の第一原理計算結果を用いて分解し、偏析濃度と対応させてプロットすると図6のSemi-theoretical curveのようになり、実験の K_{Ic} の振る舞いとよく一致する。つまり、粒界破壊のマクロな K_{Ic} が脆化元素の偏析濃度増大に伴い低下していく程度は元素の種類によって異なるが、それは脆化元素がもたらす $2\gamma_{int}$ の低下によって支配されていることが示唆されている。そして、破壊靱性を生み出している微視及び巨視的亀裂先端の転位の活動は、 $2\gamma_{int}$ に依存しており、 $2\gamma_{int}$ のある閾値を境にしてその様子が大きく異なる、ということである。

この結果は冒頭でも問題提起したように、粒界におけるわずかに 1 J/m^2 以下の原子間凝集エネルギーの変化が、桁違いに大きな破壊エネルギー変化を生み出す可能性を示唆している。その仕組みは、巨視的亀裂先端の破壊のプロセスゾーンの中で、微視亀裂進展のエネルギーバランス条件が満たされるか否かで脆性的か延性的かが決定され、それはごく小さなエネルギー差に依存する、ということなのかもしれない。しかしこれは単なる想像でしかなく、今後明らかにしていきたいところである。

解析に用いたNi-Cr鋼は、脆化元素の粒界偏析が始まると、破壊前にあまり塑性変形せずに破面率の高い粒界破壊が生じる。そのため、このようによく整理できた結果になったのかもしれない。延性の強い材料で破壊前の塑性変形が多い時は、様相はより複雑になると予想される。

V. おわりに

粒界偏析とそれによる脆化という現象は、結晶粒界面から数原子層以内の変化が引き起こす現象であるため、本稿で示したように粒界凝集エネルギー($2\gamma_{int}$)の偏析による変化を第一原理から計算でき、マクロな粒界破壊を決定づける特性(DBTT及び K_{Ic})との相関を示すことができたように思う。また、第一原理によって計算できる原子間結合の性質(凝集エネルギー)は、場合によってはマクロな材料特性にまで直接的に影響を与えているらしい、ということが示唆されたのであり、それは材料挙動と計算機シミュレーションの接点の一つなのだろう。

巨視的な亀裂進展挙動を示す K_{Ic} と偏析濃度の関係を示す破壊試験データは豊富にあると思われるが、微視亀裂進展に着目した図3を作るために必要な実験データが、他には見当たらない。加えて図4のようなミクロとマクロをつなぐ実験も、他に類を見ない結果である。そのため、他の材料で同じ解析をすることは今のところできず、本研究手法の妥当性も、これ以上は検証できない。

実験が困難な部分については、計算からアプローチすべきなのだろう。原子間結合の性質からマクロな材料特性までを、様々な階層のモデリング手法を駆使することで解明しようとする、いわゆるマルチスケールモデリングに期待がかかる。微視亀裂先端の原子間結合切断と転位射出の競合は、分子動力学による解明が望まれる。さらに巨視的亀裂と微視的亀裂の相関の問題には、塑性論を含むシミュレーションも必要だろう。本研究の試みが、破壊現象のマルチスケールモデリングを構築する際の、一つの道標となればと思っている。

— 参考資料 —

- 1) 木村宏, 鉄と鋼, 79, N754, 1993.
- 2) 山口正剛, ふえらむ, 15, 755, 2010.
- 3) 山口正剛, まてりあ, 54, 2015, 110.
- 4) J. R. Rice, J.-S. Wang, Mater. Sci. Eng., A107, 23, 1989.
- 5) 東田賢二, 田中將己, 鉄と鋼, 97, 195, 2011.
- 6) M. L. Jokl, V. Vitek, C. J. McMahon, Jr., Acta Metall. 37, 1989, 87.
- 7) J. R. Rice, R. Thomson, Phil. Mag. 29, 1974, 73.
- 8) J. Kameda, Metall. Trans. 12A, 1981, 2039.

著者紹介

山口正剛 (やまぐち・まさたけ)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野) 固体電子論(第一原理計算), 計算材料科学



核データ研究の最前線

～たゆまざる真値の追求,そして新たなニーズへ応える為に～

第4回 核図表 ～壮大なる原子核の地形図～

日本原子力研究開発機構 小浦 寛之, 湊 太志, 飯村 秀紀

陽子と中性子の複合体である原子核はその組み合わせで様々な性質を生じる。陽子の数を縦軸, 中性子の数を横軸にして原子核を表現した「核図表」は原子核を俯瞰的に理解するのに広く利用されている。本稿では原子核を核図表の観点で捉え, 特に原子核構造・崩壊の話題を中心に近年の核データの現状について紹介する。

KEYWORDS: *nuclear chart, nuclear decay modes, nuclear structure, ENSDF, atomic mass evaluation, super heavy element, geo neutrino, new magic number of nuclei, nuclear education*

I. はじめに

我々の身の回りにある物質は全て原子でできているが, 原子はその中心にある正電荷の原子核と, それを取り巻く負電荷の電子によって構成されている。原子核は, 強い相互作用が起源である核力によって強く結びつけられた陽子と中性子の複合体であり, その組み合わせで原子核の性質が定まる。原子力とは原子核の変換や核反応に伴って放出されるエネルギーのことであり, 我々はそのエネルギーを, 原子力発電や核医療・診断, 物性研究(たとえば中性子利用)など幅広い分野で利用している。そして核データでは, このさまざまな原子核の性質を扱うわけであるが, その中性子と陽子の組み合わせは膨大であるので, 原子核全体を見通しよくする方法があれば便利である。その一つとして, 縦軸を陽子の数(原子番号), 横軸を中性子の数として原子核を2次元の地図上に表す方法があり, 原子核の性質を俯瞰的に, そして系統的に把握することができる。これを『核図表』とよぶ。本稿では核図表をもとに原子核の“世界”を概観し, 原子核研究の近年のトピックを核構造・核崩壊を中心に紹介する。

II. 核図表を俯瞰する

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need(4) ; Nuclear Chart - Magnificent landscape of nuclei - : Hiroyuki Koura, Futoshi Minato, Hideki Iimura.

(2017年10月16日 受理)

■前回タイトル

第3回 核分裂データの最前線: 実験と理論

1. 核図表でみる核種の発見の推移

まずは核図表を用いて, 我々がどこまで原子核の種類(核種)を把握しているかを見てみよう。図1はこれまで実験的に同定された核種を, 縦軸に陽子の数(原子番号), 横軸に中性子の数にとった核図表に示したものである。図の左下から右上の方向に弓の弧状に分布している黒四角が自然界に“安定”に存在している核種であり, 全部で286核種存在する(ここでは5億年以上の半減期の核種とした)。なお, 核力のみを考慮すると“安定な”核種は陽子数と中性子数が等しい位置に分布するはずである。しかし, 実際にこのような弓の弧状に分布しているのは, 陽子間に働くクーロン斥力が存在し, 結果的に中性子が陽子より多い方がより安定になるためである。炭素(原子番号6), カルシウム(原子番号20)では陽子の数と中性子の数が等しい安定核種(^{12}C , ^{40}Ca , 左肩の数字は質量数(陽子数と中性子数の総数))が存在するのに対して, ウラン(原子番号92)では中性子の数が143(^{235}U)または146(^{238}U)と, 陽子より中性子が多い核種が長寿命になるのはこのためである。

図では, 核種が同定された年代ごとにおおむね12年ごとに(1976年から)区分している。“安定”核種を中心に右下方向, 左上方向, そして右上方向に領域が広がっているのが見て取れる。1976年までは2,000核種を下回っていたが, 2014年時点で3,150核種となっている。

一方, 理論的にはその倍又は倍以上の核種が存在すると予想されている(図全体を楕円の歯状で囲んでいる領域)。図に示しているように, 特に中性子過剰核(安定に存在している核種と比べてとき, 中性子数が大きい核種)側に多く予想されている。

中性子過剰核の性質の研究は, 原子核物理としての興味(原子核構造, 原子核の存在限界の探索など)だけでなく, 原子炉における遅発中性子放出, 崩壊熱にも関連

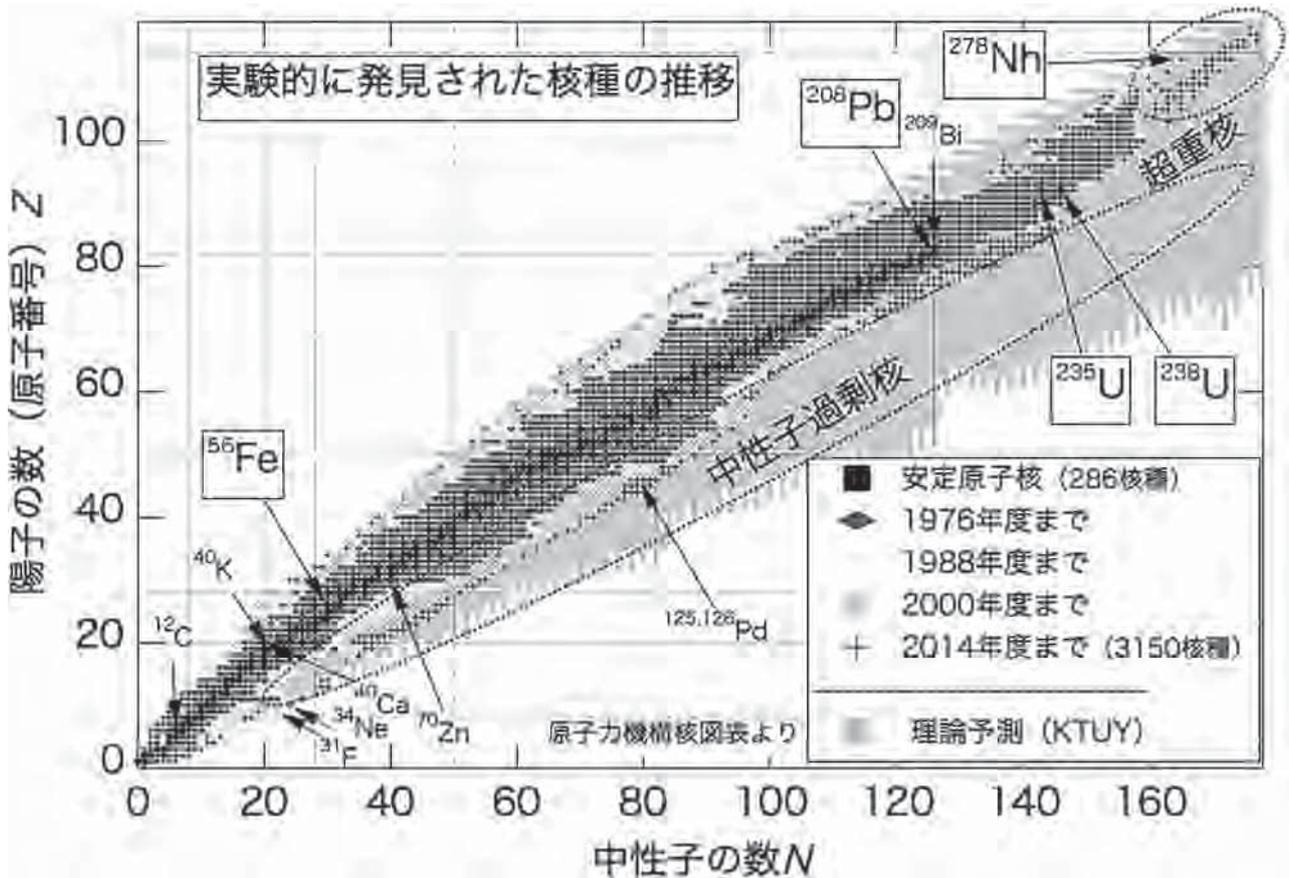


図1 実験的に確認された核種の推移

原子力機構発行の核図表¹⁾をもとに構成。図中の理論予測(KTUY 質量計算による²⁾)は陽子、中性子分離エネルギーが正となる核種とした。⁵⁶Fe, ²⁰⁸Pb, ^{235,238}U, ²⁷⁸Nh などいくつかの代表的な核種や、記事内で言及する核種も示した。

する。たとえば原子炉からの廃棄物が強い放射能を持つのはウランを含むアクチノイドの核分裂直後の短時間の崩壊に関わっているが、これは生成物の多くが中性子過剰核として生成するためである(中性子過剰の原子核になるほど半減期が短くなる)。中性子過剰核は β 崩壊を起こし、それに伴って原子炉から多くの反ニュートリノが発生する。最近の研究では、原子炉の運転状態や燃料組成を遠隔地からモニターする手法として反ニュートリノの観測が注目されているが、原子炉から離れた場所で測定される反ニュートリノの数が理論の予測値より小さいことが指摘されており、素粒子の性質に関する議論に発展している。原子力は意外なところで最新の物理ともつながっており、これらの理解のためには核分裂生成物の性質のより詳細な解明、すなわちより高精度かつ包括的な(核図表の観点で網羅的な)核データが必要とされている。

2. 核種合成の手法と歴史

さて、原子核を新たに生成する方法として、原子核同士を“そっと”くっつける方法(付随現象として α 粒子や陽子、中性子を放出する場合が多い)があり、これを融合反応と呼ぶ。一方で原子核同士を強くぶつけて原子核を

壊す方法があり、これを核破砕反応と呼ぶ。この2つの反応を足がかりに原子核合成・同定実験の歴史に簡単に触れてみよう。

1976年からの12年間は中性子数100以下の中性子過剰核および中性子数が安定核種に比べて少ない中性子欠損核(陽子過剰核)の合成、発見が顕著であった。これは、以前ではCERNのISOLDEに代表されるオンライン同位体分離装置(ISOL)が中心であった同位体合成が、1980年中頃から始まった高エネルギー重イオンを用いた核破砕法を用いることにより中性子過剰核・欠損核を従来に比べて多量に合成することが可能になった事が大きい。その結果、軽核のフッ素(原子番号9、安定同位体は¹⁹F)同位体では中性子数が陽子数よりも2倍以上ある³¹Fまで、ネオン(原子番号10、安定同位体は²⁰⁻²²Ne)同位体では³⁴Neまで発見されるなど、これらの同位体ではほぼ中性子過剰核の限界まで実験的に到達したとされている。

次に1988年以後の12年間をみると、さらに質量数を大きくした中性子過剰・欠損核に加えて、中性子数150以上のいわゆる“超重核”領域の新同位体が顕著に増えていることがわかる。これは1980-1990年中頃から重イオン融合核反応の反跳核直接分離装置が活躍し始め、超重

核領域の融合反応による原子核合成を可能にしたためと見ることができる。2000年以降には、日本のニホニウム²⁷⁸Nhをはじめ、ロシアと米国の共同チームを中心に新元素合成実験もまた精力的に取り組まれている。

2000年以降のもう一つ重要な流れとして、理化学研究所 RI Beam Factory (RIBF) の稼働がある。これは、大強度ウラン²³⁵U ビームを標的核に当て、核破碎反応(+核分裂)により不安定核種を多量に生成させるものであり、2006年から稼働した。中性子過剰核を中心とした不安定原子核の探索およびその原子核の性質の研究を主目的として、2008年のパラジウム新同位体合成(^{125,126}Pd)を皮切りに、2010年には大きな成果として1度に45核種の新同位体合成の成功が報告されるなど、核図表の既知核種拡大に大きく貢献している。取得データも核異性体(Isomer)の系統的同定や、 β 崩壊半減期、遅発中性子放出割合、ガンマ線測定による核構造データなど、幅広く成果を出している。また最近では、長寿命核分裂生成物の効率的な核変換の達成を目的とした核データ取得のために、RIBFを利用した核破碎反応の測定も行われている。

原子核を新たに生成する方法として、融合反応と核破碎反応があると紹介したが、その中間として(実際には後者に近いが)、原子核同士をぶつける際に複数の核子の移行を起こさせる方法があり(中性子を多く移行すれば中性子過剰核、陽子を多く移行すれば中性子欠損核)、これを核子移行反応と呼ぶ。例えば高エネルギー加速器研究機構(KEK)では現在 KISS(KEK Isotope Separation System)を理研 RIBF に設置し、質量数195付近の中性子過剰新同位体合成(天体における元素合成に関連)のプロジェクトを進めている。また日本原子力研究開発機構でもアクチノイド核を標的とした核子移行反応により、従来の方法では取得できなかった核種の核分裂片分布データの系統的測定に成功するなど、近年での大きな展開が見られている。米国、フランス、ドイツでも理研の RIBF と類似の施設が建設中であり、この分野の国際的な競争は広がっていきそうである。

III 原子核構造・核崩壊データ

前節のように世界中で様々な原子核の実験報告がされているが、それらの結果を収集し、評価する事で広く利用し得るデータを提供するのが核データの役割である。ここでは、核構造崩壊データと原子(核)質量データの現状について触れる。

1. 核構造崩壊データファイル

Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) は、全ての核種について核構造・崩壊に関わる様々なデータを集めた計算機ベースのファイル群である。ENSDFで

は崩壊半減期、崩壊遷移強度、準位エネルギーなどの実験データに対して評価を行い、推奨値とその不確定性を与えている。これらはアイソトープ利用や後述の天体核物理、原子核構造研究などといった分野において不可欠な網羅的基礎データとなっている。

ENSDFの維持管理は米国の National Nuclear Data Center (NNDC) でされている。1950年代に最初に作成されて以来、約10年のサイクルで現在も更新が続けられている。この評価作業は、質量数ごとに各国で分担しており、日本も担当している。

ENSDFはテキストファイル群であるので、プログラムコードに直接入力する目的などにおいては便利であるが、視覚的には分かりづらい面がある。このENSDFを準位図式や放射線の表などの形に翻訳したものが Nuclear Data Sheets (NDS) である。NDSは、Elsevier社から年に8冊ほど出版され、1冊に1-2個の新たに更新された質量数の核構造・崩壊データが掲載されている。NDSは印刷版以外に、インターネットにより Elsevier 社のページ³⁾からダウンロードもできる。また、同じ内容を NNDC のページ⁴⁾から無料で閲覧できる。これらにより、ENSDFは日本を含め世界中からよく利用されている。

2. 原子(核)質量ファイル

原子質量は原子核のもつ最も基本的な物理量である。原子質量は、原子核の質量と電子質量および電子の結合エネルギーの和で与えられ、質量とエネルギーの同等性を示す有名な式 $E=mc^2$ から導出される原子のもつ全静止エネルギーである。その大部分は原子核の質量である。そのため、核子当たりの原子質量が小さいほど原子核は安定である。崩壊の過程では原子核の周りの電子の質量も含め(つまり中性の原子として)安定性を議論するが、その意味で全原子の中で鉄56(⁵⁶Fe)が最も安定な原子(核)になる。一方で、たとえばコバルト56(⁵⁶Co)は鉄56に比べて原子質量が大きいため、コバルト56はベータ崩壊(電子捕獲)を通して、鉄56に崩壊する。このようにして原子質量は原子核の崩壊を支配し、反応の起こりやすさに決定的な影響をもつ。そして原子質量の実験値を“評価”し、データとしてまとめたのが Atomic Mass Evaluation (AME) プロジェクトである。1950年代初期からこのプロジェクトが進められ、その後事実上唯一のグループとして評価済みデータの公開を継続している。概ね10年以内に更新され、多くの研究者に利用されている。A. H. Wapstra(オランダ, 1922-2006)を中心に進められたプロジェクトは彼の逝去後、中国に拠点を移して現在も進められている。現在は AME2016⁵⁾がその最新版であり、これには2,498核種の質量データが収録されており、核データ評価には欠かすことができない。

IV. 原子核フロンティア

1. 超重元素の新元素探索, 特に 113 番元素ニホニウム

2015年12月31日に日本に飛びこんだ、「113番元素の命名権獲得」のニュースは、その日の午後7時のNHKニュースのトップニュースとして紹介され、放送時間の半分以上の時間が割かれた。このビッグニュースは、日本におけるこの分野の研究を広く知らしめる結果となった。これは世界の超重元素領域の新核種の合成・同定の競争の中で獲得した成果である。新元素(陽子の数として初めて)の探索研究はその元素の命名とも絡み、原子核加速器研究分野で世界的にしのぎを削る争いとなっていた。

ドイツ重イオン科学研究所(GSI)では鉛、ビスマスを標的としてクロムから亜鉛までの重イオンを照射する方法で、1980年代-1990年代に107番元素から112番元素までの元素を次々に新たに合成することに成功した。そして順にBh(ボーリウム), Mt(マイトネリウム), Hs(ハッシウム), Ds(ダームスタチウム), Rg(レントゲニウム), Cn(コペルニシウム)の6つの新元素を命名するに至った。一方、2000年前後からロシアのドゥブナ合同原子核研究所(JINR)では米国との共同研究の元、プルトニウムからカリホルニウムまで様々なアクチノイド標的にカルシウム $48(^{48}\text{Ca})$ ビームを長時間照射する方法で実験を行い、最終的に114番から118番までのFl(フレロビウム), Mc(モスコビウム), Lv(リバモリウム), Ts(テネシン), Og(オガネソン)の5つの新元素の合成に成功した。

日本では理化学研究所で超重元素探索実験に取り組み、2003年にビスマス $209(^{209}\text{Bi})$ 標的に亜鉛 $70(^{70}\text{Zn})$ ビームを照射する実験を開始し、2004年に113番元素の合成に初成功⁶⁾、その後2012年までの9年間に及ぶ実験の結果が認められ、日本の名称にちなんだNh(ニホニウム)の命名権を得るに至った(2016年11月)。アジアにとって初めての元素の命名である。

現在、ロシア、ドイツ、そして日本などの各研究機関では、119番元素以降の新元素探索に向け、実験を開始している。10年後にはまた新たな元素名が命名されているかもしれない。

2. 地球ニュートリノ

地球から発する地熱は火山や温泉といった形で我々の身近な現象として理解されている。この地熱は一体どこから生まれてくるのであろうか。その起源の解明に原子核の崩壊データが利用されている。

地熱は地球全体でおよそ44.2兆ワットと見積もられている。地球科学の考察から概ね地球の重力エネルギー

(地球形成の位置エネルギー由来)と、原子核の崩壊エネルギーがそれぞれ半分程度であると考えられている。しかし地球の内部を直接測定することは困難である。これを地球の内部から放出される反ニュートリノを直接測定することにより解明することが可能となった。崩壊エネルギーの主要な源は、カリウム40及びウラン、トリウム同位体からの β 崩壊と α 崩壊による崩壊熱である。この中で β 崩壊で放出される反ニュートリノが捕らえられれば、崩壊エネルギーの総量を見積もることができる。なお、崩壊熱の値は前述した原子質量から求められるものである。

神岡鉱山に設置したカムランド(KamLAND)を用いた測定により地球ニュートリノの観測を初報告したのが2005年であり、その後2011年までの測定により、カリウム、ウランとトリウムの崩壊熱の合計が約20兆ワットであると判明し、放射性物質の崩壊熱(放射性発熱)が地熱の概ね半分程度であることがわかった⁷⁾。このように原子核のデータが思わぬところで地球科学の謎の解明の一端を担うことになった。

3. 新しい原子核魔法数

原子は原子番号2(ヘリウム)、10(ネオン)、18(アルゴン)、36(クリプトン)、54(キセノン)、86(ラドン)といった閉殻構造が存在する。これは元素の周期表を成す周期性の現れである。一方、原子核にも陽子数、中性子数に応じた閉核数(魔法数)が存在する。2, 8, 20, 28, 50, 82(ここまで陽子, 中性子共通), 126(中性子のみ)は現在まで知られている魔法数である。これらは結合エネルギー(または原子核質量)の変化、原子核反応断面積の系統性からの変化、励起状態準位間の γ 崩壊の解析などの安定核種の実験結果から得られる事実である。図2に例として原子核質量から得られる魔法数の様子を示す。

ところが2000年以降、陽子数、中性子数を大きく変えた場合に、これらの閉核性の変化、つまり魔法数の変化が観測されている。原子核は通常、核力により強く束縛

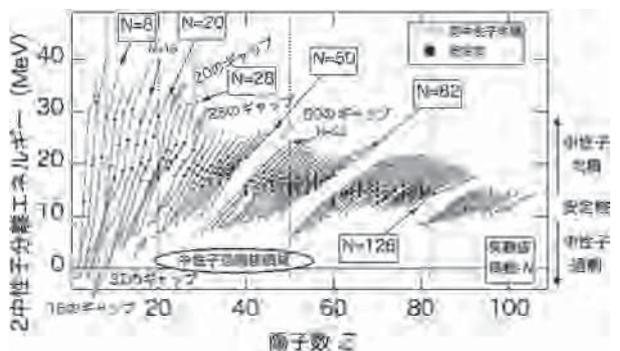


図2 二中性子分離エネルギーの同中性子体
(中性子数が等しい核種)

線の間が開いているのが閉核性を表す。例えば $N=50$ と 52 の線の間が開いており、このギャップが中性子数 $N=50$ の閉核に相当する。既知の実験質量値(AME2016⁵⁾)より作成。

されているが、中性子(または陽子)だけを一方的に増やしていくと、今にも中性子(陽子)が原子核からこぼれ落ちそうになる状態になる。そして中性子過剰核側ではこれらの魔法数が増える現象が報告されている。中性子数 16, 32 および 34^8 などは、最近新たに観測された中性子過剰領域での中性子魔法数である(図2からも 16, 32 についてはその魔法数性が確認できる)。これらの魔法数は、核力に含まれるテンソル力による効果や、原子核から中性子がこぼれ落ちそうになった結果、原子核中の核子の軌道の相対的位置が変化して現れる効果など、いくつかの理論的立場から説明がなされている。

4. 天体核物理

我々の身の回りにある酸素、炭素、金、ウランといった元素は 138 億年前の宇宙の始まりからあったのではない。水素、ヘリウム、リチウムといった軽い元素は宇宙初期のビッグバンの段階で作られたが、それより重い元素は星の進化の過程で作られていったと考えられている。太陽の 8 倍程度以上の質量を持つ星では元素合成の過程は鉄 $56(^{56}\text{Fe})$ 付近までは核融合反応により行われ、鉄より原子番号の大きい元素はほぼ中性子捕獲反応によってのみ合成される。中性子捕獲反応はその反応の経過時間から遅中性子捕獲過程(s 過程)、速中性子捕獲過程(r 過程)の 2 種類に分けられる。これらの反応過程で前者は“安定”核種近傍を反応経路として進み、後者は中性子過剰核を反応経路として進む。核データの観点から言えば、前者は安定核種近傍の励起状態を含めた核構造データがこの分野で不可欠なものとして利用されている。一方、後者はそのほとんどが実験的に合成・測定がなされていない(又は不十分)と言える。加えて r 過程を引き起こす天体現象自身も、その候補である超新星爆発や、中性子星の合体は現時点でも不明な点が多い。(その直接観測となりうる重力波検出はブラックホール同士の合体に対して成功し、2017 年度のノーベル物理学賞を受賞した。また中性子星の合体についても 2017 年秋に初観測のニュースがもたらされた)。原子力において利用されているウランは r 過程によってのみ合成しようと考えられており、その仕組みの解明は天体核物理だけでなく原子力分野としても興味深い。ともあれ前述の理研や KEK の実験計画はまさにこのような r 過程に関わる中性子過剰核の性質を明らかにすることを目標にしており、現在でもフロンティア研究となっている。

V. 核図表を通じた教育

核図表は原子核の性質を俯瞰するのに便利な表現方法である。しかし元素の性質を説明する元素の周期表に比べて核図表は一般になじみが薄い。日本では原子力機構が定期的に核図表を作成、配布しているが、より一般の



図3 3次元ブロック核図表

高さ軸を 1 核子あたりの原子質量とした。例えば軽い核(^1H など)から ^{56}Fe に向かう下り坂で核融合のエネルギー利得を表現し、重い核($^{235,238}\text{U}$ など)から ^{56}Fe に向かう下り坂で核分裂のエネルギー利得を表現している。

方々に親しんでもらうように工夫をすることで、原子核の世界をより近いものとしていきたい。そのような普及の取り組みの一つとして 3 次元核図表(図 3)を紹介する⁹⁾。

これは縦軸陽子数、横軸中性子数の 2 次元の核図表上に対して、高さ軸に核種の 1 核子あたりの原子質量や半減期といった物理量をあてたものである。このようにオブジェを利用して視覚的に表すことにより、原子核にまつわる様々な話題をより分かりやすく理解してもらうことができる。その一つが、宇宙における星の元素合成における原子核の役割の紹介である。地球に鉄が豊富である理由や、ウランがなぜ天然に存在するのかを元素合成の観点から紹介し、解説するサイエンスカフェを 3 次元核図表を用いて行っている。今後、放射性同位元素や超重元素に関連した解説など、様々な関連テーマを広く紹介するために利用していきたい。

— 参考資料 —

- 1) JAERI 核図表 1976, 1988, 2000, 日本原子力研究所核データセンター, JAEA 核図表 2014, 日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター.
- 2) H. Koura et al., Prog. Theo. Phys. 113, 305-325 (2005).
- 3) <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00903752>
- 4) <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>
- 5) M. Wang et al., Chinese Physics C 41, 03003 (2017).
- 6) K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73, 2593 (2004).
- 7) T. Araki et al. (KamLAND Collaboration), Nature 436, 499-503 (2005), A. Gando et al. (KamLAND Collaboration) Nature geoscience 4, 647-651 (2011).
- 8) D. Steppenbeck et al., Nature 502, 207-210 (2013).
- 9) H. Koura, Phys. Educ. 49, 215-220 (2014).

著者紹介



小浦寛之 (こうら・ひろゆき)
日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター
(専門分野/関心分野)原子核理論, 超重原子核, 天体核物理, 核データ, 物理教育



飯村秀紀 (いいむら・ひでき)
日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)原子核実験, レーザー分光, 核データ



湊 太志 (みなと・ふとし)
日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)原子核理論, 核データ, 医療用 RI 製造



From Editors 編集委員会からのお知らせ

ー最近の編集委員会の話題よりー

(12月5日第5回論文誌編集幹事会, 第6回学会誌編集幹事会)

【論文誌編集幹事会】

- ・平成29年10月16日～11月15日に英文誌へ21論文, 和文誌へ1論文の投稿があった。
- ・平成29年度後期予算見込みと平成30年度予算案が説明され, 一部修正の上, 了承された。
- ・東電福島第一事故関連和文論文及びアトモス掲載解説記事の英訳出版WGの事業計画が報告され, 承認された。目次案を付けて, 総務財務委員会に諮ることとした。
- ・編集委員会運営細則の改定案を承認した。
- ・第2分野の副責任者の交代を了承した。

【学会誌編集幹事会】

- ・H29年度見込み・H30年度予算案の提出・説明があり, 承認された。
- ・委員長から理事会の報告があった。60周年記念に向けての準備会が設置され, 近日中に第一回目が開催予定である。
- ・巻頭言, 時論, 他の記事企画の進捗状況について検討した。2月号から新設のコラムを開始する予定。
- ・編集委員会細則案の説明があり, 承認された。メール審議を経て, 理事会に報告する。
- ・事務局よりH30年度表紙案の説明があり, 承認された。H30年度の表紙テーマは原子力発電所のある都道府県の山とした。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

福島環境回復に向けた取り組み

第9回 農畜産物の放射性物質対策

福島県農業総合センター 鈴木 芳成, 佐藤 守, 矢内 清恭

本稿(第9回)では、東京電力福島第一原子力発電所事故の農地及び農畜産物への影響の解明や、放射性物質の除去、低減及び吸収抑制技術の開発に関する福島県農業総合センターの取り組みを、米等、果樹、畜産の各分野毎に紹介する。

KEYWORDS: *distribution of radioactive cesium, decontamination, technology for the control of absorption of radioactive material, bark washing with a high-pressure washer, stemflow, pruning, pasture renovation, muscle for beef cattle*

I. はじめに

東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所(以下、1F)の事故により、福島県を中心に広い範囲に放射性物質が飛散し、農林水産業へ甚大な被害をもたらした。福島県農業総合センターでは、事故発生直後から、農林水産業に対する影響を軽減し、本県農業の復興のため、農地及び農畜産物への影響を明らかにするとともに、放射性物質の除去・低減及び吸収抑制に関する研究に取り組み、一定の成果を得ることができた。

本稿では、農業分野における主な研究成果を紹介する。

II. 放射性物質の除去・低減技術の開発

福島県農業総合センターは、1F事故により拡散した放射性物質の具体的な影響を把握し対策を立てるため、平成23年度より各部及び各研究所の研究員を構成員とする放射性物質対策チームを設置した。対策チームの各研究員は、それまでの知識や経験、人脈を活用し、所属の専門分野を越えて、関係機関との連絡調整、放射性物質等に関する情報収集、農地及び農畜産物における放射性物質汚染対策等の試験研究に取り組んだ。

また、放射性物質に関する試験研究や技術対策を進めるにあたり、福島県内には専門的知識を有する機関がなかったため、(独)農業・食品産業技術総合研究機構や

(独)農業環境技術研究所(現農研機構 農業環境変動研究センター)等の国の研究機関、さらには、学習院大学や東京大学、東北大学を始めとする大学の専門家からのアドバイスをもち、「放射性物質の除去・低減技術の開発」に関する新たな課題を設定した。

研究課題の設定に当たっては、本県が全国有数の農業県であり、拡散した放射性物質が農畜産物の生産に大きな影響を与えることから、放射性物質の除去、低減および吸収抑制対策技術を開発するため、①放射性物質の分布状況の把握、②放射性物質の簡易測定法の開発、③放射性物質の吸収量の把握、④放射性物質の除去・低減技術の開発、⑤放射性物質吸収抑制技術の開発、⑥農産物における放射性物質の除去技術の開発、⑦農作業における放射線被ばく低減技術の開発、の7本の柱により研究を進めることとした。

III. 福島県内の放射性物質の分布状況及び経年変化

1. 放射性物質の分布状況

福島県では「今後の農作業の進め方(農林水産部)」(平成23年3月30日に福島県災害対策本部決定)により県内の農地土壌調査を行うことを発表し、翌日から(独)農業環境技術研究所と連携し、避難指示区域を含めた県内農地について土壌調査を実施した。平成23年度は9回の調査で、水田1,485地点、畑地等1,133地点の土壌を採取し放射性物質の分析を行なった。この土壌調査結果と文部科学省が実施した航空機モニタリングの空間線量率等のデータをもとに、農林水産省は農用地土壌の放射性物質濃度分布図を作成し公表している(図1)¹⁾。

放射性物質濃度分布図からは、1Fから北西方向の地域および中通り地方の西寄りの地域が周辺より放射性物質濃度が高く、1Fからの距離にかかわらず土壌の放射

Challengers for enhancing Fukushima environmental resilience (9) ; Measures against radioactive material of agricultural and livestock products : Yoshinari Suzuki, Mamoru Satou, Kiyotaka Yanai.

(2018年9月29日 受理)

■前回タイトル

第8回 森林・流域圏内のセシウムの動態



図1 福島県農用地土壌の放射性物質分布図
(平成24年3月23日(独)農業環境技術研究所作成, 農林水産省HP公表)

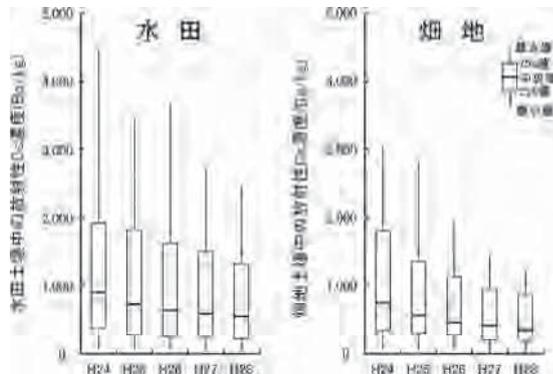


図2 平成24~28年の土壌中放射性セシウムの推移(平成28年度福島県農業総合センター研究成果(放射線対策)より抜粋)

物質濃度の高い地域が帯状に分布することが明らかになった。

2. 放射性物質及び放射線量率の経年変化

平成24年度以降は、農林水産省の放射性物質測定調査委託事業により、平成23年度に土壌調査を実施した地点の内、避難指示区域を除く県内のは場107地点について、毎年、土壌中放射性セシウム(以下Cs)濃度の経年変化を調査している。その結果、水田および畑地では物理的減衰並〜それ以上に低下していることが確認された(図2)。

IV 米等における放射性物質対策

1. 表土除去や反転耕による農地除染

農地に降下した放射性物質の大部分は放射性Csであるが、一般にCsは土壌中に存在する粘土粒子等に強く吸着されることが知られており、1F事故後の調査でも、大半が土壌表面から概ね5cmのごく表層に分布していることが報告されている。

そこで、放射性Csを含む表層の土壌を効率的に剥ぎ

取るため、レーザーレベル装置付きレーザーブルドーザ(以下、レーザーブルという)およびレーザーレベル装置付きバックホウ(以下、レーザーバックホウという)による水田表土の剥ぎ取り試験(ブロック試験:約25㎡)を行った。その結果、土壌の放射性物質濃度減少率は、レーザーブルでは剥ぎ取り厚4cm以上で60%以上、レーザーバックホウでは剥ぎ取り厚3cm以上で80%前後であり、小面積(25~50㎡)の剥ぎ取り試験から算出した作業能率は、レーザーブルで1.0時間/10a、レーザーバックホウで2.3時間/10a程度であった²⁾。

また、汚染された表層土壌を汚染されていない下層土壌と反転する反転耕は、作土層の放射性Cs濃度の低減や空間線量率の低減が期待でき、さらに、表土除去で問題となる排土が発生しない利点がある。しかし、一般的なプラウ(土壌の上層と下層の土を反転させる農業機械)では、表土の一部が浅い層に残り、十分な埋却ができない場合があるため、(独)農研機構中央農業総合研究センターやスガノ農機(株)、井関農機(株)と共同でプラウの開発に取り組み、水田用として耕深30cmの二段耕プラウとジョイント付きプラウ、畑地用として耕深45cmの二段耕プラウを開発した。開発したプラウを用いて耕深30cmで作業する場合、反転した水田表層土の最小埋没深は、市販プラウより10cm程度深くすることが可能であり、プラウによる反転耕と縦軸回転式駆動ハローによる整地を実施したところ、空間線量率は実施前と比較して、水田で約4~8割、畑で約5~9割低減した³⁾。

2. カリウム施用による放射性セシウム吸収抑制対策

福島県の一部地域で生産された平成23年産玄米において、当時の暫定規制値であった500Bq/kgを超える玄米が検出され大きな問題となった。そのため、平成24年に福島県内432地点で土壌中及び玄米の放射性Cs濃度を調査した結果、土壌中の放射性Cs濃度は高いものの玄米中の濃度が低い検体、あるいは土壌中の濃度が低いものの玄米中の濃度が高い検体があり、土壌と玄米の放射性Cs濃度には明確な相関は見られなかった。一方で、玄米中の放射性Cs濃度と土壌のカリウム濃度の間には一定程度相関が見られており、平成23年度の研究成果では、土壌中の交換性カリウム含量が玄米への放射性Csの移行に与える影響が大きいことを明らかにし、交換性カリウム含量25mg/100gを目標とした土壌改良を行うことを提案した⁴⁾。

平成23~24年度に土壌の異なる3地区のは場で栽培した水稲について調査したところ、いずれの地区においても玄米中の放射性Cs濃度が基準値以下となるのは、土壌中の交換性カリウム含量が25mg/100g以上のほ場であることを確認した(図3)⁵⁾。

これらのことから、福島県では作付前の水田土壌にお

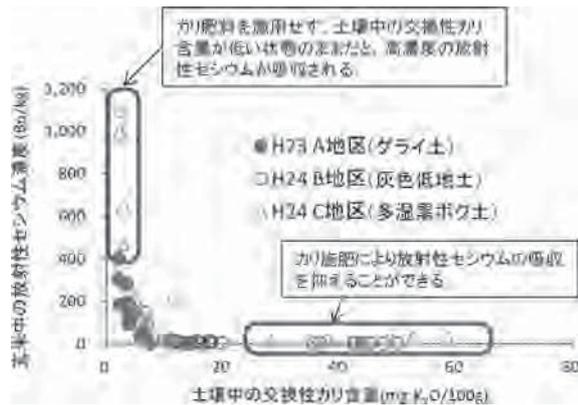


図3 土壌中の交換性カリ含有と玄米中の放射性セシウム濃度の関係(「放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について(H26.3 農林水産省, 福島県, (独)農業・食品産業技術総合研究機構, (独)農業環境研究所)より抜粋)

ける交換性カリ含量が25mg/乾土100g以上となるよう土壌改良を行い, その上で地域慣行の施肥を行うことを指導した⁶⁾。

また, 水田土壌(細粒グライ土, セシウム137濃度2,000Bq/kg)を用いて, 塩化カリ及びけい酸カリの吸収抑制効果を検討した結果, カリ成分の施用量が同じであれば, 塩化カリがけい酸カリよりも効果が高かった⁵⁾。

さらに, 塩化カリの施用時期を検討した結果, 栽培中の総施用量(基肥+追肥)が同じであれば, 基肥として施用の方が吸収抑制効果が高く, 中干し期を過ぎてからの施用では効果が低く, 減数分裂期の施用では効果がほとんどなかった⁵⁾。

3. ゼオライト等吸収抑制資材の施用

ゼオライトやパーミキュライトなどの粘土鉱物は放射性Csの吸着能が高いことが知られていることから, カリウムが不足している水田にゼオライト等を施用し, 放射性Csの吸収抑制効果を検討した。その結果, ①ゼオライトには放射性Csを吸着・固定する能力があるが, 土壌重量の1%以上の添加がなければ効果が明確でないこと(10%の添加で効果が顕著となる), ②ゼオライトを添加した土壌には玄米への放射性Cs吸収抑制効果が確認されたが, これはゼオライトに含まれるカリウムの効果と推定した²⁾。

V 果樹における放射性物質対策

1. 果実から放射性セシウムが検出される要因

1Fの事故が発生した平成23年に実施された緊急モニタリングにおいて果実から高濃度の放射性Cs濃度が検出された。汚染は, 葉の直接汚染(常緑果樹), 果実または花の直接汚染(イチジク, ウメ), 胚や多種子等の果実形態的な放射性Csの集積(クリ, キウイフルーツ, ザク

表1 2011年福島県産主要落葉果樹果実の緊急モニタリング調査結果

樹種	分析 点数	果実中のRCs濃度割合(%)			
		ND	ND-100	100-500	500以上
モモ	247	31	68	1	0
カキ	185	38	54	7	1
オウトウ	25	32	68	0	0
ウメ	240	1	26	63	10
キウイフルーツ	40	19	58	18	5
ブルーベリー	40	27	65	8	0
リンゴ	225	53	47	0	0
ブドウ	84	56	43	1	0
ニホンナシ	106	68	32	0	0

(2011年11月15日現在)

ロ), 果実水分が少ないことによる高濃度(クリ, クルミ), 屋敷林等の常緑樹の周辺林からの2次的汚染等, 先行研究から要因が想定されるものばかりでなく, モモ, リンゴ等の福島県で生産されている主要落葉果樹の果実においても, 検出限界以上の放射性Csが検出された(表1)。

ウメを除く落葉果樹はフォールアウトがあった3月15日は発芽前であった。4月15日に深さ30cmまでの土壌中放射性Csの垂直分布を確認した結果では表層3cmに95%以上の放射性Csが存在していた。果樹の吸収根は主として15cm以下に分布することや果樹園では草生栽培による土壌管理が行われており表層の放射性Csは下草に吸収されるため, 果樹の根からの吸収の可能性は極めて低いと考えられた。それまでの先行研究では放射性Csは葉または根から吸収され, 特に葉から吸収されやすいとされていた⁷⁾が, 葉からの移行の少ない幼果の段階で100Bqkg⁻¹FWを超える放射性Csが検出された。これは先行研究の事例を超えた想定外の事実であった。

そこで土壌以外の移行源として樹皮上の放射性Csに焦点を絞り, 果樹園の除染対策として粗皮削りと高圧洗浄機による樹皮洗浄を徹底した。平成23年秋期以降樹皮からの移行を検証する研究を本格化し, モモ非汚染苗を用いた発芽直前の放射性Cs液添加試験, カキ, モモ, リンゴの露地植栽樹の堀上げ解体調査, ブドウ, カキの非汚染苗の汚染土を用いた鉢植え栽培樹の解体調査等を実施した。その結果, 樹皮から直接放射性Csが樹体内に移行することが確認されるとともに⁸⁾, 露地栽培の根の放射性Csは汚染土を用いた鉢栽培樹の根の100分の1以下であったことから, 休眠期に汚染された落葉果樹では主として樹皮から樹内へ移行したのと考えられた。これは樹皮上に分布する皮目に通じる放射組織が師部と木部を横断していることから, 放射組織が樹皮から樹内への主要な移行組織と考えられた。即ち, 樹皮から樹液流動期の維管束器官(師部)に移行し, まず芽への移行が優先的に起こり, その後, 葉から果実への転流が起きたのと考えられた。

2. 樹皮洗浄による果実への移行低減

平成 23 年夏期にモモで、落葉後の晩秋から冬期にカキおよびモモで高圧洗浄機にて樹皮洗浄を行い、処理後の成熟果の放射性 Cs 濃度を無洗浄樹と比較した。その結果、モモの夏洗浄では明瞭な効果は認められなかったが、落葉後の洗浄処理ではモモ、カキともに洗浄樹の果実で有意に放射性 Cs 濃度が低下した。モモでは処理後 2 作目果実では洗浄効果は認められなかったが、カキでは洗浄効果が数年間にわたり認められた⁹⁾。カキの樹皮は形成後 3 年が経過すると短冊状に割裂が走り、割裂痕には水滴が滞留する。そのため着生ゴケが繁茂しやすい。そこで、着生ゴケから溶出する放射性 Cs 量を測定したところ降水量に比例して放射性 Cs が溶出することが確認された¹⁰⁾。また、幹流水中の放射性 Cs 濃度は洗浄樹で有意に低下していた¹¹⁾。このことから洗浄により、洗浄翌年の幹流水からの葉を介した追加的汚染を抑制する効果があったものと推察された。モモの夏洗浄で効果がなかったのは樹皮の洗浄液が葉に付着し放射性 Cs が葉から吸収されたためと考えられた。

3. せん定や主幹切断による果実への移行低減

汚染翌年以降は初年度に樹体内に貯蔵された放射性 Cs が新器官への移行源となる。そこで、貯蔵放射性 Cs を削減し、果実へ移行する放射性 Cs を削減することを目的として樹高を切り下げる強せん定や主幹を切断して仕立て直す実証試験を継続中である。現在までのところ果実中放射性 Cs 濃度のバラツキはせん定や主幹切断により無せん定樹より減少する傾向が認められるが、果実中放射性 Cs 濃度では無せん定樹及びせん定樹間での有意差は認められていない。樹高 4.5m のカキ樹での 2011 年冬期の解体試験ではせん定の対象とならない部位である地上 1.5m の主幹部に 60% 以上の放射性 Cs が存在しており、皮部を除いた木部でも 24%、根幹と主幹から発生した下部の骨格枝木部を含めると 50% がせん定対象外となる⁸⁾。このことが低減効果の不十分な一因と考えられるが、せん定により果実中放射性 Cs 濃度が低下する傾向は認められるため、引き続き検証を継続する必要がある。

VI 畜産における放射性物質対策

1. 牧草地における吸収抑制対策

牧草地の垂直構造は、地上層(牧草)、リター(枯葉等堆積)層、ルートマット(密集した植物根と土壌粒子)層、土壌層となっており(図 4)、1kg 当たりの放射性 Cs 濃度はリター層が圧倒的に高かった。また、リター層以下の各層 1m²当たりの放射性 Cs の垂直分布を見るとリター層とルートマット層で全体(リター層(厚さ数mm程度)、ルートマット層(厚さ 3cm程度)、土壌層(ルートマット下



図 4 牧草地の垂直構造

部～6cmまで)の 94%を超えていた。

これらのことから、牧草地における吸収抑制対策として表土(リター層、ルートマット層)除去が効果の高い手法と考えられたが、表土除去は、大量の汚染土壌が発生してしまうことから、全てのほ場で実施することは現実的ではないと考えられた。

そこで、吸収抑制効果が確認できた深耕プラウを用い汚染の少ない下層土壌と入れ替える反転耕あるいは深耕ロータリーによる丁寧な攪拌を行う耕うん法と通常の 3 倍量のカリ肥料施用を組み合わせた草地更新を吸収抑制対策として推進を図った。

その後、吸収抑制対策を目的とした草地更新を実施したほ場において、牛用飼料の暫定許容値(100Bq/kg、水分 80%換算)を超過する事例が出てきたため超過要因調査を行ったところ、土壌断面調査から放射性 Cs を高濃度に含むリター及びルートマット層が土壌中に存在しておりそこへ牧草の根が到達している事例が確認されている。また、暫定許容値超過ほ場は非超過ほ場に比べ交換性カリ含量が低い傾向にあり、交換性カリ含量あたりの土壌放射性 Cs 濃度と牧草の放射性 Cs 濃度には高い相関を確認した。

リター・ルートマット塊をなくすには、プラウ耕前にロータリー耕(深度 7～10cm)による表層破碎が有効であることが確認された。もう一つの主要な要因である交換性カリ含量の低下は、牧草の収穫により土壌中の交換性カリが収奪されることによるものであり、各番草の収穫ごとにカリを増量した追肥を継続する必要があることがわかった。

2. ロールベールサイレージⁱの安全確保技術

更新後の牧草地の利用可否を判定にはモニタリング検査の結果が暫定許容値を下回る必要がある。草地更新済みほ場において、生草、予乾後(機械集草後)及びサイレージ(梱包密封による発酵飼料)の放射性Cs濃度を比較すると予乾後やサイレージが生草時よりも高いことを確認した。未更新ほ場で牧草収穫の機械作業前と収穫作業中の空間線量率(地上高1m, および地上高1cm)を比較したところ、作業前に牧草地表面1cmより低かった高さ1mの空間線量率が収穫作業中は牧草地表面と同等まで上昇していたことから、機械作業により牧草地表面のリターや土壌が舞い上げられていることが推測された。

これらのことから、収穫は刈取高を少し高めにし、過度の反転を行わない等の慎重な作業により放射性Cs濃度の上昇を抑制する必要があることが分かった。

3. 肉牛(生体)の安全確保技術

迅速かつ正確に繁殖和牛の出荷時期を特定することを目的に、生体外部から「と体」筋肉中の放射性Cs濃度を可搬式で簡易に推定する技術及び装置を開発した。開発した装置は牛の保定枡場をモデルに作成し、鉛の遮蔽体及び可動式コリメーター付き検出器が一体となっている。和牛の体形に近い口径52.1cm全高88cmのポリドラム缶を牛体に見立て、バックグラウンド測定用に水のみを満たしたもの及び検量線作成用として放射性Cs濃度25, 50, 100, 120Bq/kgに調整したものを用意し口径5インチのNaI検出器を用いて測定を行った。データの解析は、Gamma Studio DS-P600(SEIKO EG&G)及びCode Fukushima(仁木工芸株式会社・株式会社スカラベ・コーポレーション)にてピーク面積解析を実施する。本装置で各牛体模型の放射性Csを測定した値とGe半導体検出器で測定した値から作成した検量線は非常に高い相関($R^2=0.99$)を持つ。本装置により測定した汚染飼料を給与した繁殖和牛の筋肉中放射性Cs濃度推定値と、Ge半導体検出器で測定した筋肉の実測値とは高い精度で一致した。50Bq/kg未満のスクリーニングであれば、本装置において1分間で測定が可能であり、県内限定の成牛セリ開催時に活用するに至った。現在は、自動データ解析・推定システムを導入するとともに、保定枡場をスタンション方式の一方通行型に改良し、さらに作業時間を短縮し活用している。

VII おわりに

福島県農業総合センターでは、国や大学等と連携しな

ⁱ 牧草を円筒形に圧縮整形し、ビニールフィルムで被覆して発酵させたもの。

が放射性物質対策に関する試験研究に取り組み、得られた情報や成果については、成果説明会の開催や技術情報の発行等により、リアルタイムに情報発信するように努めてきた。今回、研究成果の一部を紹介したが、これら以外にも得られた知見が多く蓄積されており、詳細は農業総合センターホームページ(<http://www.pref.fukushima.lg.jp/w4/nogyou-centre/index.htm>)をご覧ください。

－ 参考資料 －

- 1) 農林水産省ホームページ：農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成について <http://www.affrc.maff.go.jp/docs/map/index.htm> (2017年7月閲覧)。
- 2) 福島県農林水産部：農作物の放射性セシウム対策に係る除染及び技術対策の指針第3版(2014.4.25) <http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36021a/nogyonousin-gijyutu05.html> (2017年7月閲覧)。
- 3) 福島県農業総合センター研究報告放射性物質対策特集号(2014)。
- 4) (独)農業・食品産業技術総合研究機構プレスリリース(2012.2.24)。
- 5) 農林水産省, 福島県, (独)農業・食産業技術総合研究機構, (独)農業環境技術研究所：放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について(概要第2版)(2014.3) <http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/kome.pdf> (2017年7月閲覧)。
- 6) 福島県農林水産部：「がんばろう ふくしま！」農業技術情報(第24号)水稲の放射性セシウム対策としてのカリ施用(2012.4.10)。
- 7) Carini, F.: J. Environ. Radioact. 100, 752-756 (2009)。
- 8) 佐藤守ら：福島農総セ研報. 放射性物質特集号: 70-73 (2014)。
- 9) Sato, et al.: Hort. J., 84: 295-304 (2015)。
- 10) Sato, et al.: J. Agri. Meteorol. 73: 82-87 (2017)。
- 11) Sato, et al.: J. Environ. Radioact. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.07.012> (2017)。

著者紹介



鈴木芳成(すずき・よしなり)
福島県農業総合センター生産環境部
(専門分野/関心分野)植物組織培養, 営農再開



佐藤 守(さとう・まもる)
福島県農業総合センター果樹研究所
(専門分野/関心分野)果樹の栽培・育種



矢内清恭(やない・きよたか)
福島県農業総合センター畜産研究所
(専門分野/関心分野)畜産全般

福島第一原発事故の大気・海洋環境科学的研究の現状

事故の何が分かったか，事故から何が分かったか

福島大学 青山 道夫，
名古屋大学 山澤 弘実，
日本原子力研究開発機構 永井 晴康

福島第一原発事故により大気および海洋に放出された放射性物質の観測された核種，推定された放出量，放出の時間経過について，現在明らかになっていることを概観した。また，放出された核種について，その大気中，陸域および北太平洋での挙動についても纏めた。さらに，今後の研究課題として，良くわかっていないことを，1から3号炉の放出の配分と核種組成および海洋内部での中央モード水の挙動の観点で整理した。

KEYWORDS: *Fukushima Daiichi nuclear accident, ocean, atmosphere, land, release scenario, transport processes*

I. はじめに

福島第一原発事故により大気・海洋に放出された放射性物質は事故サイト周辺での高いレベルの汚染を形成したに加えて，広域にわたり環境中にその痕跡を残した。これらを対象とした大気科学・海洋科学分野の研究により，環境中への放出核種，放出量，その時間経緯等が，不確かさが残るものの明らかにされてきており，事故進展の解明のための環境側の境界条件を与える重要な知見となっている。また，事故初期ブルームに起因する吸入による内部被ばく評価も重要課題として残されており，事故当時の大気中濃度を再現するために大気科学の知見が生かされている。一方，大気・海洋中の放射性物質の追跡により，これまで知られていなかった環境中での物質移行についての知見も得られつつある。本記事では，保健物理・環境科学部会に関係するこれらの研究活動とそれらから得られた知見を概観する。

Current state of atmospheric and oceanic environmental researches on the Fukushima Daiichi nuclear accident ; What is known about / from the accident : Michio Aoyama, Hiromi Yamazawa, Haruyasu Nagai.

(2017年9月30日受理)

II. 環境への放出核種，放出量，その時間経緯

1. 環境への放出核種(観測されたもの)

事故サイト近傍で採取された各種の環境試料(海水，雨水，大気浮遊塵埃，土壌，動物プランクトンおよび海底堆積物)中で検出された福島第一原発事故由来と判断された核種は， ^3H ， ^{54}Mn ， ^{58}Co ， ^{60}Co ， ^{90}Sr ， ^{95}Nb ， ^{103}Ru ， $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ， $^{114\text{m}}\text{In}$ ， ^{125}Sb ， $^{129\text{m}}\text{Te}$ ， ^{129}I ， ^{131}I ， ^{132}Te ， ^{133}I ， ^{134}Cs ， ^{136}Cs ， ^{137}Cs ， $^{140}\text{Ba-La}$ ， ^{141}Ce ， ^{144}Ce である。

2. 環境への放出量

この事故による環境への人工放射性核種の放出量については，総量としては，さまざまな手法による研究の結果，比較的良くわかってきたと言える。原子炉での発電による核分裂で生成した長寿命の放射性核種の一つで，環境影響が大きい放射性セシウム(^{137}Cs)のマスバランスについて，著者の一人である青山らの研究結果およびすでに出版されている研究成果から，ほぼ合意が得られるであろう数値の範囲でデータを整理すると，表1のようになる。

福島第一原発の1号炉から3号炉までの3つの炉心の中に2011年3月の地震で停止した時点で700PBq($\text{PBq}=10^{15}\text{Bq}$)の ^{137}Cs (とほぼ同量の ^{134}Cs)が存在し，そ

表1 ^{137}Cs のマスバランス

存在場所	^{137}Cs の量 (単位: PBq)
炉心内量(事故時)	700
汚染水(事故時)	140
回収量	230 以上
大気への漏洩量	15-20
海洋への漏洩量	$3.5 \pm 0.7 (3.6 \pm 0.7)$
事故サイト内残存量	約 450

注: 事故時の汚染水は炉心内の量の内数であるので残存量 = 炉心 - (回収量 + 大気への漏洩量 + 海洋への漏洩量) となる。海洋への直接漏洩は継続しているため、事故直後の約 2 か月間では $3.5 \pm 0.7\text{PBq}$ であるが、期間を延長すると $3.6 \pm 0.7\text{PBq}$ となる。

のうち 140PBq は溶けて壊れた原子炉の下に滞留水としてたまっていたことがわかっている。今は注ぎ込んでいる冷却水で燃料から ^{137}Cs を洗い出し、回収された ^{137}Cs の総量はこの滞留水分の 140PBq を超え、既に 230PBq を超えている状態であると推察できる。

外洋への放出量として今までの筆者と共同研究者等による観測と解析の結果、 ^{137}Cs については、1) 直接原子炉から水に溶けた状態で海へ出たのは 140PBq あった滞留水の 3% 程度(炉心総量に対しては 0.5%) に相当する $3.6 \pm 0.7\text{PBq}$ であり、2) 地震で停止した時点で 3 つの原子炉中に合わせて 700PBq あり、内その 2% から 3% の 15~20PBq の ^{137}Cs が大気に放出され、そのうち 80% 程度に相当する 12~15PBq が西部北太平洋に降下したと推定されている¹⁾。航空機サーベイの結果を福島県内について積分し、その他の都道府県の降下量を足し合わせると日本の陸上には 2.5PBq が降下している。

3. 環境への放出の時間経過

大気中への放出の時間経過は、主に環境中で測定された線量率、大気中濃度、沈着量(降下量)の時間変化から推定され、国内外の研究者・機関により 10 編程度の論文あるいは報告書として公開されている。最も情報量が多いのは ^{137}Cs 及び ^{131}I についてであり、これらの核種との環境中での濃度比の変動が比較的小さい核種 (^{134}Cs 等) についても同程度の確からしきで把握できていると考えることができる。これらの時間変化の積分量は、初期の推定においては表 1 の大気漏洩量の半分程度であったが、より多くの環境中データを用いた当部会員らの最近の推定²⁾では表 1 の値と整合的になっている。従って、数割程度の不確かさを容認すれば放出総量あるいは 1 日単位程度の時間的に粗い放出量についての議論は概ね収束したものと考えられるが、1 時間毎等の詳細な推移については推定値間で未だに桁で異なる部分も存在する。以下では、放出の時間経過の推定状況を概観する。

現時点で放出率時間推移について推定間の差異が最も大きいのは、3 月 14 日午後から 16 日未明にかけてであ

り、20 日深夜から 22 日午前についても比較的大きな不確かさがある。何れの期間もプルームが内陸に向かった期間であり、陸上での大気中濃度等が他の期間に比べて多数得られているものの、放出率時間推移を詳細に推定する上で時間・空間的密度が不十分であることと、推定に用いる大気拡散モデルの不確かさが推定間の差異の主な要因となっている。前者の期間については、現在で最も包括的と考えられて多数の大気拡散計算で参照されている ^{137}Cs の推定値²⁾では、14 日夜にそれ以前の 1TBq/h (TBq=10¹²Bq) 程度から 10TBq/h 以上に増加し、その後 1 桁を超える増減を繰り返して翌未明に約 200TBq/h に達したと推定されている。しかし、この放出に対応したプルームが通過した茨城県内モニタリングポストデータの解析から最近明らかになった大気中の ^{131}I 、 ^{133}Xe 等の大気中濃度³⁾や、大気環境局のフィルター分析で得られた ^{137}Cs 濃度⁴⁾を説明するためには、上述の 1 桁程度の放出率増大は少なくとも数時間早めに起こっている可能性が最近指摘され、また放出率の大きな増減がなかった可能性について議論が継続されている。また、時刻毎の放出率には 15 日中でファクター 3~5 程度(3~5 分の 1 程度から 3~5 倍程度まで)、21 日には最大ファクター 10 程度(10 分の 1 程度から 10 倍程度まで)の不確かさがあると考えられる。

また、上記以外の期間の放出率についても不確かさが必要となく、放出率の詳細な時間経緯を議論するため基礎となる測定データが少ないために十分議論できていないのが現状である。

III. 放出された放射性核種の環境中挙動

1. 大気中および陸域での輸送過程

福島第一原発から大気放出された放射性物質が、どのような大気拡散と沈着のプロセスを経て陸域の汚染をもたらしたかについては、本誌の平成 29 年 6 月号連載講座「福島県の環境回復に向けた取り組み 第 2 回 事故進展と放射性物質の放出・沈着分布の特徴」でも解説している。その詳細については連載講座を参照していただくとして、ここでは、これらのプロセスを解明する研究を行う過程で得られた知見や課題を整理する。

福島第一原発事故による放射性物質の大気放出の特徴として、環境影響が大きいレベルでの放出が 1 か月以上の長期にわたり、様々な原子炉事象に伴い放出率、核種組成、核種形状、放出形態などが大きく変動していた。具体的には、1 号炉から 3 号炉の状態、水素爆発、ベント、格納容器の損傷など、いまだ未解明ではあるが放出過程と経路の違いにより、放出率は前節に記載した通り 3 月中でも 2 桁(1TBq/h 程度から約 200TBq/h)、核種組成として $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比が 1~100 程度の間で変動したと推定されている。また、福島第一原発事故後にはじめて存在が確認された不溶性セシウム含有粒子(いわゆるセ

シウムボール)など、これまで想定されていた水溶性のエアロゾルだけでなく、多様な物理・化学的特性を持つ放射性物質がその組成を変えながら放出されている。このような放出状態の変動に対して、大気拡散と沈着を経た結果としての特徴を示すと考えられる測定データも存在する。しかしながら、時空間的な変動を把握するのに十分なデータは得られておらず、大気拡散シミュレーションによる定性的な説明が試みられている程度である。不溶性セシウム含有粒子については、2011年3月15日に関東へ到来した放射性プルームを捉えた試料から1~数 μm の球状のものと、福島第一原発周辺で数十 μm 以上の不定形粒子が見つかった。前者は2号炉から放出、後者は1号炉の水素爆発時に飛散したと考えられている⁵⁾。これらの粒子は特徴的な元素組成を持ち、不溶性のため生成時の状態が保持されていることから、その情報に基づき形成過程の解明が進められている。今後、炉内事象の詳細な解析と組み合わせることで、放出状態の解明の進展が期待される。

大気拡散と沈着過程については、これまでは大気拡散シミュレーションにより地表沈着した放射性核種の測定データとモニタリングポストで測定された空間線量率の時系列データを再現することにより解析が進められてきた。この解析においては、航空機モニタリングによる沈着分布測定データが現象解明の進展に大きく寄与した。航空機モニタリングで得られた沈着分布を再現するには、詳細な湿性沈着挙動を考慮する必要があった。特に、最も放出量が増加し、重大な陸面汚染がもたらされた期間と考えられている3月14~16日の湿性沈着は、降雨と降雪、雲内部と雲の下での取り込みなど様々なパターンでの湿性沈着過程を再現する必要があった。さらに、これまでは考慮されていなかった霧水沈着(霧または雲に取り込まれ、降水という形態ではなく霧水または雲水の状態のまま地表面に沈着)によると考えられる事例についての報告もある。最新の放出量データと沈着過程を精緻化した大気拡散モデルを用いたシミュレーションにより、 ^{137}Cs 沈着分布を良好に再現できるようになってきたが、個々の沈着事象の再現性や大気中濃度も同時に再現できていないなどの課題があり、湿性沈着過程についてさらに解明を進める必要がある。一方、大気中濃度の時空間分布を正確に再現するためには、現在解析が進められている大気環境常時測定網のSPM捕集用紙の分析による大気中核種(^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{129}I)濃度の時系列データ⁴⁾が有効であり、大気中の核種組成の時空間的な変動など、このデータを用いた定量的な大気拡散解析が期待される。

上記の大気拡散過程により陸域に沈着した放射性核種の分布と移行については、主に事故後3か月経過した2011年6月から開始された大規模環境調査⁶⁾により解明が進められてきた。空間線量率に対する放射性セシウム

(^{134}Cs および ^{137}Cs)の寄与が、調査開始時点ですでに99%以上となっており、陸域でのセシウムの移行挙動の解明が精力的に行われている。都市域や道路などの人工物以外の陸域に沈着したセシウムは、地面あるいは森林域であれば樹冠部や落葉層表面に付着する。その後、葉内に取り込まれていないものは、降水により洗い流されて土壤中に浸透し、粘土鉱物に吸着して移動しにくくなるが、調査開始時点で初期の降水洗浄過程を経た各層への分配はおおむね完了していたと考えられる。その時点で土壤中の深度分布は形成されており、その後の各層の存在量と土壤中分布の変化はゆっくりであった。また、落葉に伴う樹冠部から落葉層および落葉の分解に伴う落葉層から土壌への移行も進み、現在は大部分が落葉層あるいは土壌表層に存在している状況である。さらに、土壌表層に存在する溶存態セシウムが植物に吸い上げられ、葉に移行して落葉するという植生層内循環も見られているが、粘土鉱物への吸着の進行とともに、循環量は減衰していく。一方、水平方向への移動については、傾斜地での落葉の移動や土壌流出、河川への流出が観測されているが、沈着総量に占めるその移動量はわずかであり、沈着した際の水平分布の状況がほぼそのまま保持されている。地表に沈着した放射性核種の再飛散については、初期段階では揮発性の高いヨウ素の再放出とみられる測定データがあり、大気拡散解析においても考慮する必要があるが、汚染分布が変化するような飛散量ではない。

2. 海洋中での放射性セシウムの輸送過程

外洋に出た放射性セシウムの輸送過程については、観測およびモデル研究によって、1)表層輸送、2)中央モード水形成にともなう長い時間スケールの内部輸送、3)亜熱帯モード水形成にともなう相対的に早い内部輸送の3つの輸送経路がある程度明らかになってきた¹⁾。(ここで海洋学になじみの薄い読者のために、モード水の説明をする。海洋学的には、表層水塊の一つとしてモード水と呼ばれる水塊があり、ある海域の表層の海面から水深500m程度までに、海域に固有の水温や塩分などで特徴づけられる海水が広く分布している。このモード水は太平洋を含む各大洋の中緯度において、冬季に混合層が周りに比べて深くまで発達する海域で形成される。代表的なものに黒潮流域で生成する中央モード水や黒潮の南側で生成する亜熱帯モード水がある。また、亜熱帯モード水形成域は、大気中から多くの二酸化炭素を吸収・蓄積している海域であり亜熱帯モード水は二酸化炭素の輸送過程に重要な役割を果していると考えられ、注目されている。)

まず、放射性セシウムの最も速い経路は、北太平洋の黒潮および黒潮続流の速度からも容易に類推されるように、表面輸送であった。大気からの降下は、主に北東に

移動した低気圧とともに事故サイトから主に北東側に広がった。北太平洋中部での黒潮および黒潮続流域では、大気から降下した放射性セシウムと海洋に直接漏洩した放射性セシウムは、海流によって北太平洋中緯度域を、およそ一日当たり7kmの速度で東に輸送され、事故後1年で太平洋中央部日付変更線に達した。事故から約1年半後の2012年夏季には日付変更線を中心とした海域にその濃度の極大値(～10Bq/m³)が観測された。黒潮続流南側の亜熱帯域における亜表層極大の濃度は1/5以下に低下した。北向き輸送では、北極海カナダ海盆では、2012年および2013年には事故起源放射性セシウムは観測されなかったが、2014年にはわずかではあるが深度150m付近の太平洋(ベーリング海)起源水中に事故起源¹³⁴Csが検出された。南向き輸送では、東経165度線では、2015年では放射性セシウムの亜表層極大は北緯2度まで到達した。表層輸送に関しては、モデルシミュレーションによる再現計算でも、北太平洋で観測された放射性セシウムの輸送の様相と良好な一致を示し、ほぼ3年で太平洋を横断し、北米大陸西海岸に到達した⁷⁾。北米大陸西海岸での表層海水中放射性セシウム放射能は2017年でも上昇傾向にある。

第二の経路は、中央モード水の形成である。2012年6月/7月の放射性セシウム放射能の最大値は、東経165度線上では北緯34～39度の密度26.1～26.3の領域で観測された。これは約400mの深さに対応する。この密度は中央モード水の密度の範囲にあり、放射性セシウムの放射能は亜熱帯モード水を含むすべての周囲の海水の放射能よりも高かった。2015年では中央モード水に相当する水塊では事故起源放射性セシウムは観測されず、東方に輸送されてしまっていた。

第三の経路は亜熱帯モード水の形成である。事故直後に黒潮・黒潮続流のすぐ南側に大気沈着した放射性セシウムは、2011年3月に同海域で形成されていた亜熱帯モード水の沈み込みに伴って亜熱帯域の亜表層(深度約200～400m)を南に運ばれ、2012年1月には北緯20度まで到達した。2012年10～11月の東経147度および東経155度における鉛直断面観測で得られた放射性セシウム濃度と他の物理パラメータを総合すると、福島第一原発事故から19ヶ月後の西部北太平洋においては亜表層に福島第一原発事故由来の放射性セシウムのピークが確認され、これらは亜熱帯モード水ならびに中央モード水に捉えられたと判断された。

さらに、亜熱帯循環域内北部から東シナ海に短い時間で再循環し、その後東シナ海から日本海沿岸に広がるとみられる現象も観測している。この再循環は、2014年はシグナルが見え始め、東シナ海北部から対馬海峡を抜け、さらに津軽海峡を抜けて太平洋側の青森県沖、あるいは北海道沿岸まで2015年、2016年もゆっくり増加を続けており、事故直前の濃度の倍に上昇していることが

解っている⁸⁾。

3. 海洋内部での配分

黒潮の北側で大気から降下した放射性セシウムと直接漏洩した放射性セシウムは、効果的に冬季の冷却により海洋内部に運ばれたことが観測から明らかになっている。2012年10～11月当時における亜熱帯モード水に存在する福島第一原発事故由来の放射性セシウムの総量は、2011年3月に減衰補正した¹³⁴Csで 4.2 ± 1.1 PBqと推定され、これは海洋への総放出量の22～28%に相当した。最近の放射性セシウムの収支研究からは、海洋に入った放射性セシウムの約50%は海洋内部へと効果的に輸送されたことが解っている。また50%程度は表層にとどまり、東向きに輸送されている。堆積物中へはおよそ 130 ± 60 TBqの¹³⁷Csが蓄積している。

4. 他の核種(³H, ⁹⁰Sr, ¹²⁹I, Pu 同位体)の分布

福島第一原発から海洋へのPu同位体の放出は、大気圏内核実験やビキニ水爆実験による現存量に比較して無視しうるほど小さく、海洋環境における福島原発事故由来プルトニウムの有意の汚染は検出されなかった。

福島沖を中心とした北太平洋の海域で表層海水を採取してその³H濃度の分布や経年変化を調査した結果では、最大値は2011年4月に宮城沖で観測され、それを除くとほとんどは0.3Bq/L以下であった。事故後17～18ヶ月の北太平洋北緯47度、東経160度～西経170度において、表層100mまでの海水では¹²⁹Iは全海域でバックグラウンドレベルであったが、¹²⁹I-¹³⁷Csのプロットから、東経160度～西経170度において¹²⁹I/¹³⁷Cs=0.62-1.1x10⁻⁶Bq/Bqの関係が成り立つので、この海域には事故起源の¹²⁹Iの影響が表れていると考えられた。また、Core Inventoryの比(0.29x10⁻⁶Bq/Bq)より高い値であるので、大気経由で沈着した¹²⁹I、¹³⁷Csの寄与が観測されたものと考えられる。

2013年5月と2014年5月の福島沖での⁹⁰Srと¹³⁴Cs・¹³⁷Cs観測の結果、2013年5月に福島第一原子力発電所に最も近い観測点(5km地点)において最も高い濃度18mBq/Lの⁹⁰Srが観測された。同様の観測を2015年10月および2016年11月に実施した。しかし、⁹⁰Sr濃度は著しく減少しており、原子炉滞留水の漏洩を示す⁹⁰Sr/¹³⁷Cs比を捉えることはできていない。

(Ⅱ-2, 3, 4で述べた研究成果は、新学術研究領域福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究 ISET-Rの研究項目 A02 放射性物質の海洋への影響により得られたものが主である。個々の論文は下記 URL を参照されたい)

<http://www.ied.tsukuba.ac.jp/hydrogeo/isetr/ISETRen/PaperENA02.html>

IV. 良くわかっていないこと

1. 1 から 3 号炉の放出の配分と核種組成

放射性物質の大気放出量を推定する解析では、事故進展に関する情報を参照し、原子炉事象と大気放出の関連を考慮しながら、放出率の時間変動を求めている。これにより、放出率の変動をもたらしたと考えられる原子炉事象から、主としてその期間の放出に寄与した原子炉をある程度特定している。また、沈着量分布測定で得られた ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比を、1号炉から3号炉の炉内インベントリ解析による放射能比と比較することで、地表汚染への各原子炉からの放出の寄与を評価し、大気拡散シミュレーションによる放出期間と沈着エリアの関係から、各汚染地域の形成にいつどの炉からの放出が寄与したかの解析も行われている。しかしながら、これらの解析では放出に主に寄与した原子炉を定性的に説明しているだけで、各号炉からの放出割合を定量的に評価するには至っていない。

放出された核種組成については、 ^{131}I と ^{137}Cs の放出率が推定されているだけで、その他の核種については、数少ない環境データや炉内インベントリから得られた ^{131}I または ^{137}Cs との相関関係から暫定的な放出率が求められているだけである。また、 ^{131}I と ^{137}Cs の比率の変動については、各原子炉の放出過程や経路の違いが要因と考えられているが、その実態は解明されていない。さらに、 ^{131}I については、ガス状(I_2 , CH_3I)と粒子状の存在形態があり、この化学形の違いは被ばく評価に大きく影響するとともに、沈着過程も異なるため大気拡散解析の不確かさの要因となっている。

現在、原子炉からの放出状態を解明するために、過酷事故解析コードによる炉内事象進展解析と大気拡散シミュレーションによる環境データからの逆解析を融合する研究が進められている。今後、この融合研究の進展、および不溶性セシウム含有粒子、SPM 捕集用ろ紙の分析による大気中核種濃度の時系列データなどの新規環境データを活用した解析により、上記の課題が解明されることが期待される。

2. 中央モード水内部での総量とその長期挙動

中央モード水内部での観測が行われていないため、垂熱帯モード水内部での挙動が比較的解っているのに対し、中央モード水内部での挙動は不明である。また総量は引き算でしか与えられていない。過去の知見では中央モード水に取り込まれた核実験起源放射性セシウムは、

30年程度の時間スケールにより海盆規模で再循環することが知られている。したがって、今回の事故で海洋環境に放出され、中央モード水内部に取り込まれたと考えられる数PBq分は25年程度後に再循環として日本沿岸で信号として見えると思われるので、継続した観測研究が必要である。

— 参考資料 —

- 1) Aoyama, M., Hamajima, Y., Hult, M., Uematsu, M., Oka, E., Tsumune, D., Kumamoto, Y.: Journal of Oceanography, 72 (1), 53-65 (2016).
- 2) Katata, G., Chino, M., Kobayashi, T., Terada, H., Ota, M., Nagai, H., Kajino, M., Draxler, R., Hort, M.C., Malo, A., Torii, T., Sanada, Y.: Atmos. Chem. Phys., 15 1029-1070 (2015).
- 3) Terasaka, Y., Yamazawa, H., Hirouchi, J., Hirao, S., Sugiura, H., Moriizumi, J., Kuwahara, Y.: J. Nucl. Sci. Technol., 53, 1919-1932 (2016).
- 4) Oura, Y., Ebihara, M., Tsuruta, H., Nakajima, T., Ohara, T., Ishimoto, M., Sawahata, H., Katsumura, Y., Nitta, W.: J. Nucl. Radiochem. Sci., 15, 15-26 (2015).
- 5) 小野貴大, 飯澤勇信, 阿部善也, 中井泉, 寺田靖子, 佐藤志彦, 末木啓介, 足立光司, 五十嵐康人: 分析化学, 66, 251-261 (2017).
- 6) K. Saito, Y. Onda: J. Environ. Radioactiv. 139, 240-249 (2015).
- 7) Tsubono, T., Misumi, K., Tsumune, D., Bryan, F. O., Hirose, K., Aoyama, M.: Deep Sea Research I, 115, 10-21 (2016).
- 8) Aoyama, M., Hamajima, Y., Inomata, Y., Oka, E.: Applied Radiation and Isotopes, (2016) DOI: 10.1016/j.apradiso.2016.12.003.

著者紹介



青山道夫 (あおやま・みちお)

福島大学

(専門分野/関心分野)地球化学, 環境放射能, 海水中栄養塩測定, 極微量放射能測定



山澤弘実 (やまざわ・ひろみ)

名古屋大学

(専門分野/関心分野)環境放射能, 大気拡散, 数値モデル解析



永井晴康 (ながい・はるやす)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)環境中物質動態/緊急時対応

報 告

グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント養成 (1)全体概要と成果

東京工業大学 齊藤 正樹

東京工業大学では、全寮制の「世界原子力安全・セキュリティ道場」を基盤として、演習・実習を含むコースワークや国内外インターンシップ等を重視した修士・博士一貫型の学位プログラムによって、「人類の生存基盤を脅かす核拡散、核テロ、大規模な原子力災害や緊急被ばく問題等のグローバルな原子力危機」の分野において、高い国際交渉能力を有し、国内外の原子力関連の産官学界で国際的リーダーとして活躍する人材「グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント」を養成している。本稿では本学位プログラムの概要と成果について述べる。

KEYWORDS: *Doctoral program, Global leader, Nuclear safety, Nuclear security, Nuclear safeguards, Nuclear dojo, Course work, Training, Exercises, Nuclear 3s symposium and seminar*

I. はじめに

本学位プログラムは、文部科学省「博士課程教育リーディングプログラム」¹⁾のオンリーワン型として平成23年11月末に採択された修士・博士一貫型である。本学位プログラムの目的は、「人類の生存基盤を脅かす核拡散、核テロ、大規模な原子力災害や緊急被ばく問題等のグローバルな原子力危機」の分野において、高い国際交渉能力を有し、国内外の原子力関連の産官学界で国際的リーダーとして活躍する人材「グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント」を養成することである。

本学位プログラムでは、深い専門性はもとより、幅広い社会性や国際性を備え、さらに豊かな人間性を養い、時代の流れを俯瞰しながら「高い志を持って、人々のために、社会のために、世界のために、貢献する原子力リーダー」を育成することを教育目標としている。

本学位プログラムでは、平成24年10月から学生を受け入れ、平成29年3月に最初の修了生3名を輩出し、現在は17名が所属している。

本稿では、本学位プログラムの特徴を中心とした全体概要および成果について述べ、国内外インターンシップと今後の展望の詳細は引き続き別稿で述べられる。

II. 学位プログラムの特徴

1. 世界原子力安全・セキュリティ道場

全寮制の「世界原子力安全・セキュリティ道場」を、お

Global Human Resource Development Program for Nuclear Safety and Security(1); Overview and Achievements : Masaki Saito.

(2017年10月30日 受理)

台場にある日本学生支援機構「東京国際交流館」の一部を借り上げて平成24年10月に開設した。

東京工業大学・原子核工学専攻(平成28年度からは原子核工学コース)修士課程に入学し、3カ月間のラボ・ローテーションを経て研究室に所属した1年生で本学位プログラム所属を希望する者に対して1次選抜試験を行い、合格者を道場に入門させた。道場には教員も住み込み、また、後述の道場自主ゼミには他のプログラム担当教員が輪番制で参加した。

道場では、原則英語による「道場自主ゼミ」を毎週夜(20:00~22:00)に開催し、教員はファシリテーターの役割を適宜演じた。自主ゼミのテーマは原子力以外の答えのない時事問題を中心に、例えば、シリアの難民問題や2016年の米国大統領選挙等を学生が選んだ。また、道場学生は東京国際交流館のレジデント・アシスタントとして、同館に入居している一般の留学生や海外からの研究者およびその家族の生活の支援をする役目を果たす。また、他のレジデント・アシスタントと一緒に種々のイベントを企画・実施する。さらに、所属学生独自で、教員も協力し、原子力や放射線に関するサイエンス・カフェを毎年開催している。自主ゼミやこれらの活動によって、所属学生のディベート能力、社会コミュニケーション能力の向上や国際力の強化を行っている。

2. 充実したコースワーク

本学位プログラムではグローバル原子力リーダーの育成を目的としているため、所属学生は、通常課程の「原子力基礎・専門科目群」(16単位以上)に加えて、本学位プログラム独自の演習・実習を含む授業科目(26単位以上)を履修することが修了要件として求められている。以下

に本学位プログラム独自の授業科目について簡単に述べる。

(1) 原子力道場科目群(6 単位)

原子力道場第一～第六の6 科目(各1 単位)で、修士1 年生から博士3 年生までに順次履修する。各科目の主な内容は、

- 第一：原子力・放射線最先端研究
- 第二：種々のグローバルセキュリティ課題
- 第三：種々のリスク、リスク評価、リスク管理
- 第四：緊急時対応、危機管理、リスク管理
- 第五：原子力利用のあり方
- 第六：グローバルリーダー論

である。第六は博士3 年後学期に履修し、授業の中で各学生は各自のグローバルリーダー像を発表し、履修生全員での議論を行う。

(2) 原子力安全・セキュリティ科目群(8 単位)

演習・実習を含む下記の4 科目(各2 単位)である。

- 環境放射線計測フィールドワーク：福島地域でのフィールドワーク実習を含む。
- 原子炉過酷事故シミュレーション：電力会社のシミュレーターを用いた実習を含む。
- 放射性物質環境動態：日本原子力研究開発機構が開発した計算コード WSPEEDI-II を用いた実習を含む。
- 核セキュリティ実習：研究機関の施設を用いた実習を含む。

(3) 社会・コミュニケーション科目群(3 単位)

本科目群は下記の3 科目から構成される。

- リスクコミュニケーション I および II (各1 単位)
- 原子核工学ボランティア活動第一(前学期)あるいは第二(後学期)(各1 単位)：実習としては福島地域等でのボランティア活動を含む。

(4) 高度国際教養科目群(9 単位)

本科目群は下記の9 科目(各1 単位)から構成される。

- グローバル世界における英語
- 原子力国際関係論
- 国際政治経済とエネルギー戦略
- フランス語とフランス文化
- 国際法の基礎と外交
- 原子力研究・開発・利用の歴史
- 哲学基礎
- 文化・文明論基礎
- 芸術と人間

3. 国内外インターンシップ

所属学生は博士課程において国内インターンシップ(3～6 カ月)と国際インターンシップ(6 カ月～1 年)を実施することが義務付けられており、このため、必修の授業科目として「グローバル原子力インターンシップ(2 単位)」と「グローバル原子力国際インターンシップ第一、

第二(各2 単位)」が用意されている。この国内外インターンシップについては別稿で詳しく述べられるので本稿でのこれ以上の記述は割愛するが、国際インターンシップを通して国際交渉力の強化等が行われている。

4. 国際シンポジウム・セミナー

所属学生の原子力 3S(Safety, Security, Safeguards)に関する知識を広め深化させるため、また、所属学生の国際化とリーダー教育を兼ねて、原子力 3S に関する国際シンポジウム・セミナーを毎年度、合計7 回開催した。

国際シンポジウム・セミナーは通常2 週間にわたり、最初の2～3 日間は一般公開のシンポジウムとし、続く週末を含む3～4 日間は受講生(所属学生、国内外から招聘した20～30 名の学生・若手研究者・技術者・行政官等)による国内研修(東京電力福島第一原子力発電所を含む国内の原子力施設見学や広島・長崎の原爆関連施設見学からなり、東北地方の原子力施設見学の場合は、福島地域での放射線計測フィールドワークも行った。)、最後の4 日間程度は非公開の受講生セミナーとした。

受講生をあらかじめ各5～6 名のグループに分け、各グループのリーダーには所属学生を当てた。各グループはシンポジウム・セミナーのみならず、夕食や夜の活動等を団体行動で行うようにさせた。このことによって、グループリーダーとなった所属学生およびリーダーをサポートする所属学生の国際力とリーダーシップ等の強化が意識的に行われた。

シンポジウムとセミナーには国際機関や国内外の大学および研究機関等の第一級の専門家を講師として招聘した。セミナーでは、受講生が招聘講師等による講演を数件聴講し、グループ内で講演内容についてディスカッションを行い、グループとしての質問事項等を纏めた後に、講師との質疑応答を行った。

最終日には、あらかじめ与えられたテーマに対して、各グループで纏めた内容を発表させた。発表内容の纏めや発表資料の作成は主に夜の活動として行われた。

5. 国内外研修

国外研修は各1～2 週間で毎年度数回、これまで合計12 回行った。訪問国は米国、フランス、オーストリア、スイス、スウェーデン、リトアニア、ロシア、マレーシア、韓国等である。国外研修では国際機関等訪問(IAEA, CTBTO, 世界銀行, 日本大使館, 等)、原子力施設見学、訪問国の大学(UC バークレー, テキサス A&M, KAIST, ウィーン工科大学, カウナス工科大学, 等)の原子力専攻学生とのグループ・ディスカッションや研究発表会を行った。グループ・ディスカッションのテーマは所属学生が相手大学の学生と予め相談して決めた。

国内研修は数日～1 週間で、広島・長崎の原爆関連施

設見学,「もんじゅ」や幌延の深地層研究施設等の原子力施設見学等からなり,毎年度数回,これまで合計6回行った。

原爆の捉え方は日本と米国では大きく異なる。そのため,米国研修前には,「広島平和記念資料館」および「長崎原爆資料館」を訪問し,米国ラスベガスの「National Atomic Testing Museum」の展示の仕方と比較し,同じ歴史的出来事でも国によって評価が違うことを所属生に学ばせ,国際力の強化を行っている。

6. 道場講話

これまで30回開催した道場講話の講師として,IAEA,世界原子力大学,フランス原子力庁,UCバークレー,在日フランス大使館,資源エネルギー庁,日本原子力研究開発機構,国立病院機構災害医療センター,日本原燃株式会社,原子力環境整備促進・資金管理センター,テレビ朝日,国際石油開発帝石,笹川平和財団,日立製作所,東京電力,原燃輸送株式会社等の各界のリーダー等30名(海外講師11名,国内講師19名)を招聘した。講演終了後には,就職やキャリアパス等について,講師と所属学生との意見交換の場を設けた。

7. 独自の博士論文審査

博士論文審査においては,通常課程の審査員5名とは別に,学外審査員として国外(2名),国内(1名)の著名な専門家による「初期審査」,「中間審査」および「最終審査」を受ける。

初期審査は博士課程進学後のなるべく早い時期に行い,博士論文研究の方向性が妥当か否かを審査し,助言を指導教員経由で学生に伝える。中間審査は博士2年の中頃に博士論文研究の進捗について,最終審査は博士3年の中頃に研究成果等について行い,助言を指導教員経由で学生に伝える。助言は博士論文研究および論文執筆にフィードバックさせることになる。

これらの審査では,当該学生は英語による資料を用いて英語で発表・質疑応答を行う。

Ⅲ. 学位プログラムの成果

1. 教育体制の構築²⁾

(1) 学内規則等の整備

本学位プログラムを実施するために,東京工業大学の組織運営規則を改訂し,部局としての「グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント教育院」を設置し,また,大学院学則を改定して「グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント教育課程」を設置した。そして,教育院の規則と教育課程の規程を制定した。

規則には,教育院長,道場主,メンター,プログラム担当者等を教育院に置くことが明記され,また,運営委員会,企画委員会,実施委員会,自己点検評価委員会,

外部評価委員会の設置と各委員会の運営が明記された。

規程には,所属の時期,所属学生の選考,寄宿舎(道場),教育課程修了の要件等が明記された。

(2) 世界原子力安全・セキュリティ道場の整備

東京工業大学には本学位プログラムの全寮制道場として利用できる寮がないので,まずは,民間アパートや社員寮等を探した。道場には自主ゼミのための20名程度入れる部屋が必要であるが,民間アパートには大部屋は皆無であった。また,社員寮等についても道場として利用できる物件は皆無であった。

お台場にある日本学生支援機構「東京国際交流館」の利用可能性の情報を入手した。日本人学生としては入居できないが,レジデント・アシスタントとしては入居できる可能性がある。館長に本学位プログラムについて説明したところ,館長の特別な計らいでレジデント・アシスタントとしての入居が許可された。また,プログラムコーディネーターと道場主の入居も許可された。

交流館の共用スペースで自主ゼミを行えるが,共用スペースの定期利用予約はできない。そこで,プログラムコーディネーターを家族部屋(100㎡)に入居させて貰い,食堂と居間を合わせて自主ゼミのスペースに当てた。この家族部屋に道場用の什器,OA機器,書籍等を持ち込むことで道場の整備が行われた。その結果,子供部屋がプログラムコーディネーターの寝室となってしまった。

(3) 独自授業科目の開発と実施

前述の本学位プログラム独自の演習・実習を含む授業科目(26単位以上)の全てを一挙に開講するのは現実的ではない。そこで,まず,各科目の効果的・効率的な履修順番を考慮して,標準履修スケジュールを作成した。そして,所属学生の学年進行に沿って平成24年度の後学期から順次開講し,平成28年度後学期で完了させることとした。

授業開発も開講スケジュールに基づいて行うこととした。開発する授業科目関連分野に専門性を有する特任教員を採用し,プログラム担当者と協同で授業開発を行った。非常勤講師による授業実施が必要な高度国際教養科目等の一部については,授業内容の骨子を作成し,骨子内容に沿った非常勤講師の選定を行った。選定に当たっては,他大学の教員のみならず,官庁,在日大使館,研究機関,民間企業等の職員も対象とした。

東京工業大学の授業時間割は月～金曜日の1・2時限(09:00開始)～7・8時限(16:35終了)であり(水曜日は原則午前中のみ),原子核工学専攻(コース)の通常授業科目で殆ど全ての枠が埋まっている。そこで,独自授業科目には水曜日午後を含む僅かな空き枠と9時限以降を利用するしかない。学生に過度な負担を科さないよう9時限以降は原則禁止されているので,特別許可を貰って9時限以降にも独自科目を開講した。このため,道場自主ゼミの開始時刻を20:00としている。

2. 修了生の輩出

本学位プログラムの修了要件は、原子核工学専攻(コース)の修了要件に加えて、次の(1)~(6)に対する学生の取り組みと成果を総合的に判定する書面と面接による審査に合格することとした。(1)全寮制の道場で切磋琢磨すること。(2)修士課程修了時に2次選抜試験を受けて合格すること。(3)独自の演習・実習を含む授業科目を履修すること。(4)国内外インターンシップを行うこと。(5)博士論文審査において、本学位プログラム独自の初期審査、中間審査、最終審査に合格すること。(6)原子力3Sに関する国際シンポジウム・セミナー、海外研修、国内研修、道場講話、サイエンス・カフェ等に参加して各自の役割を果たすこと。

修了要件から分かるように、所属学生はコースワーク、学位論文研究、国内外インターンシップ、種々のイベントでとにかく忙しい。コースワークは、修了迄に80単位程度の取得となる。国内外のインターンシップ期間の合計が9カ月~1.5年であることを考えると、すさまじい単位数であり、タフでないとやっていけない。

このような厳しい修了要件であったが、平成29年3月に最初の修了生3名が産業界と研究機関に巣立っていった。現在は修士1年生~博士3年生の17名が所属している。本学位プログラム修了者が将来、我が国のみならず世界の原子力界でグローバルリーダーとして活躍し貢献することが大いに期待される。

3. 東工大・教育改革への波及

東京工業大学は平成28年4月に教育改革を断行した。改革では教育組織と教育体系を抜本的に見直し³⁾、「卓越した専門性に加えてリーダーシップを備えた理工系人材を育成し、より良い世界を創る。」という理念に基づき、学生の主体的な学びを後押しする教育を開始している。こうした教育改革の理念は、本学位プログラムを含む東京工業大学で実施されてきた4つの博士課程教育リーディングプログラムの実績と経験に基づくものである。

新しい教育体系において、学士課程から博士課程までにわたる「教養コア学修」がリベラルアーツ教育の1つとして実施されている。この科目群は、学生が自身の専門性を背景に、他の学生の能力を最大限に活かしながら目標に向かってチームを導くリーダーシップを身に付けることを目指しており、博士課程教育リーディングプログ

ラムの理念が全学に共有され、教育体系に反映された結果であるといえる。

また改革によって、教養科目群から修士課程で5単位以上、博士課程で6単位以上が修了要件に加わった。改革以前は修士課程での2単位以上のみであったので、リーダーシップを備えた理工系人材の育成には教養科目の重要性が認識された結果である。これも、本学位プログラムを含む4つの博士課程教育リーディングプログラムの実績と経験に基づくものである。

教育改革による所属学生の負担増を最小限に抑える必要があるが、それについては別稿で詳しく述べられる。

IV. おわりに

本学位プログラムは文部科学省の経済的支援で立ち上がったが、この支援は平成29年度で終了する。平成30年度以降も本学位プログラムを継続し定着させる必要がある。現在、どのように継続するかについて大学内で議論されており、それについても別稿で詳しく述べられる。

本学位プログラムを継続・定着させ、わが国のみならず世界の原子力界でグローバルリーダーとして活躍し貢献する修了生を継続的に輩出することがわれわれの使命であると考えている。

— 参考資料 —

- 1) <http://www.jsps.go.jp/j-hakasekatei/index.html> 本学位プログラムは、平成23年度採択、オンリーワン型、F03東京工業大学。
- 2) 東京工業大学・大学院理工学研究科・原子核工学専攻、全寮制「グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント養成」学位プログラムの構築による大学院教育改革と国際的リーダー人材育成、第18回工学教育賞業績部門(公益社団法人日本工学教育協会)、平成26年8月28日。
- 3) <http://www.titech.ac.jp/education/>

著者紹介



齊藤正樹 (さいとう・まさき)

東京工業大学 グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント教育院
(専門分野/関心分野)原子炉安全、核不拡散、核セキュリティ

報告

グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント養成 (2) 国内外インターンシップ

東京工業大学 川合 康太

本学位プログラムでは、幅広い社会性、強い国際力と交渉力を養うことを目的として、国内および国際インターンシップの実施が博士課程で義務づけられている。本稿では、プログラム所属学生として、実際の自己体験を通して得たことも含めて、これらのインターンシップについて述べる。

KEYWORDS: *Doctoral program, Global nuclear leader, Domestic internship, International internship*

I. はじめに

本学位プログラム所属学生は、原子力関連科目の履修や修士・博士論文研究により深い専門性を養うだけでなく、社会性や国際性を養うための多様で特色のあるカリキュラムで学ぶことにより、学位プログラムで掲げた人材像を目標に邁進している。

その中で、幅広い社会性、強い国際力と交渉力を養うことを目的として、国内インターンシップ(3~6カ月)、国際インターンシップ(6カ月~1年)が博士課程で義務づけられている。インターンシップは産業界等での就業経験が原則だが、東京工業大学では海外の研究機関や大学、国内の研究機関でのインターンシップを認めている。

本学位プログラムの国内外インターンシップは合計9カ月~18カ月の長期間になるため、インターンシップの成果を博士論文研究へと反映させることが推奨されている。実際に国内では産業界や研究機関、国外では大学や研究機関への派遣が主である。本稿では、筆者が学生として実際に国内外インターンシップを行った経験から、インターンシップの準備と成果について述べる。

II. インターンシップ準備

国内外インターンシップでは、前述したように、インターンシップの成果を博士論文研究へと反映させることが推奨されており、通常のインターンシップ実施先での業務を経験するのとは異なり、実施先の設備等を利用していただき、博士論文研究を進めることが主となる。そのため、実施先の選定や、知的財産権や事故等の責任範

囲等を明確にした契約書の取り交わしが非常に重要であり、これには当初の予想をはるかに超えた期間を要することが常態化している。

国内外インターンシップでは、実施先の選定や交渉も学生自身が行うことによって、リーダーとして必要な問題設定能力、交渉能力を培うことを教育効果の狙いとしており、学生が自らの博士論文研究を分析した上で博士論文研究の充実化に資する実施先の選定を行い、指導教員やプログラム担当者の支援を受けながら実施先との受入交渉を自身で行う必要がある。国内インターンシップ、国際インターンシップでは準備時期が若干異なってくるが、両者とも6カ月~1年前から実施先を選定し、契約書や覚書の取り交わしを始めることが推奨されている。

主なインターンシップ準備は下記の4項目である。

- 実施先の選定
- 実施期間や知的財産権に関する契約書・覚書の締結
- 滞在先の決定
- 長期滞在ビザ取得(国際インターンシップの場合)

また昨今頻発するテロも国際インターンシップの実施に大きく影響する。外務省の公表する危険レベルが2以上になると安全確保の観点から当該国への学生派遣が中止となる。そのため、学生および教員は渡航まで定期的に外務省の危険情報の収集に努め、また、可能な限り潜在的リスクの低減に努める必要がある。

実際に筆者はベルギー原子力研究所で国際インターンシップを行ったが、当初は平成28年4月10日に渡航予定であったにもかかわらず、平成28年3月22日に発生したブリュッセル国際空港および地下鉄マルベーク駅連続テロ事件を受け、出発を一時保留した経緯がある。その後、ブリュッセル国際空港の運航再開や地下鉄の全面再開等の現地の情報収集に努めた。また、リスク低減策としてオランダ・スキポール空港から陸路でベルギーへ

Global Human Resource Development Program for Nuclear Safety and Security(2) ; Domestic and International Internships :
Kota Kawai.

(2017年10月30日 受理)



図1 国際インターンシップ実施先のモル市の様子

入国することを提案し、1カ月遅れで国際インターンシップを無事に開始することができた。(図1)

筆者はビザ取得において手続きの遅延はなかったが、大半のケースにおいてビザ取得には予想以上の時間がかかることから、十分に時間に余裕を持って取り組む必要がある。実際にビザ取得や知的財産権の契約書締結が期限内に完了せず、渡航が遅れた学生も多々存在している。

このように、特に国際インターンシップでは準備の段階から、学生自身のスケジュール管理能力や、大使館や受け入れ先との交渉能力が養われる。

III. インターンシップ実施の成果

前節で述べたように、国際インターンシップの準備段階で、他国の人々の働き方の違いや慣習の違いを理解した上で交渉にあたる能力が養われる。インターンシップ後の成果としては、国内インターンシップと国際インターンシップでは得るものが多少異なってくる。

国内インターンシップでは、自身の博士論文研究内容に沿った業務を行うために、受入れ担当者との報告・連絡・相談を密にする必要があり、本経験からリーダーに必要な計画・交渉能力を養う。また、主に産業界や研究機関での実施が多いことから、大学で研究活動を進めている上では体感しがたい社会とのつながりをこれまで以上に意識するようになり、学位プログラム修了後の自身のキャリアパスについて具体的に考えることが可能になる点も特筆すべき成果である。

国際インターンシップにおいても、新たな環境や異なる文化の下で、(指導教員等との緊密な電子メールでのやりとりはあるものの)孤軍奮闘していく中で、自らの研究内容をいかに英語で相手に伝えるか、どのように協

力を得て研究を進めていくかが重要である。さらには、日本とは全く異なる環境に長期間滞在することで、働き方や暮らし方の日本との差異を感じ、多様な価値観に触れる機会を得る。これらにより、計画能力や交渉能力に加えて、宗教への理解、各国民の政治観に対する理解、異文化の受容性の向上等、グローバルに活躍するために必要な資質を、実体験を通じて養うことができる。さらに、筆者はベルギー原子力研究所で国際インターンシップを行ったことから、将来、自らが海外で働く際に留意すべき点について事前に把握できたとともに、自身の海外で働く適性を判断できたことも成果となった。

IV. おわりに

国内外インターンシップは修士課程修了後の博士課程で行われるが、本学位プログラムで用意されている多彩なカリキュラムの中でも、集大成と呼ぶべき科目と筆者は感じている。

本学位プログラムに所属すると、国際性を養成する機会として、「国際シンポジウム・セミナー」、「海外研修(欧州、米国、ロシア、アジア)」や「サイエンス・カフェ」が用意されており、国際インターンシップ実施前までに国際性を養う機会が十分に与えられている。また、全寮制の「世界原子力安全・セキュリティ道場」において、原子力以外の答えのない時事問題を中心とした様々な課題について学生同士が英語で議論し、海外に出ても英語で自らの意見をしっかりと伝える教育がされている。その他にも、本学位プログラムで用意されている様々な科目による教育効果が、国内外インターンシップ中に遭遇するあらゆる課題に対して、解決する原動力をもたらしたと感じた。国内外インターンシップ中で生じた課題は、自身で解決していく必要があり、限られた派遣期間で博士論文研究に資する研究成果を出すことを求められている環境も、学生を大きく成長させる要因と考えている。

最後に、本学位プログラムにおける特色のある国内外インターンシップは、実施受入先、大学事務、プログラム支援員、指導教員、プログラム担当教員等の非常に様々な方々の手厚い支援があってこそ実現できるものであり、心より御礼を申し上げる。

著者紹介



川合康太 (かわい・こうた)

東京工業大学 原子核工学専攻
(専門分野/関心分野)核燃料サイクル、放射
性廃棄物処理・処分、ガラス固化技術

報告

グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント養成 (3) 東工大教育改革等への展開

東京工業大学 井頭 政之

本学位プログラムでは、高度国際教養科目群を含むコースワークと国内および国際インターンシップを重視しているが、この考えは平成 28 年度から開始された東京工業大学の教育改革に反映された。本稿では、本学位プログラムの教育改革への対応および今後の展開について簡潔に述べる。

KEYWORDS: *Doctoral program, Global leader, Nuclear safety, Nuclear security, Nuclear safeguards, Course work reform, Program continuation and fixing*

I. はじめに

東京工業大学では、教育組織と教育体系を抜本的に見直した教育改革により、「卓越した専門性に加えてリーダーシップを備えた理工系人材を育成し、より良い世界を創る。」という理念に基づき、学生の主体的な学びを後押しする教育を平成 28 年度から開始している。

修士・博士一貫型の本学位プログラム「グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェント養成」では充実したコースワークが特長の一つであり、修了生は修士および博士課程で 80 単位程度を取得する。

一方、東京工業大学の教育改革によって、修士および博士課程において文系教養科目とキャリア科目(合計 11 単位)が必修となった。本学位プログラムに所属する学生の修了要件は、原子核工学専攻(平成 28 年度からは原子核工学コース)の修了要件を満たし、かつ、本学位プログラム独自の修了要件を満たすことである。そのため、本学位プログラムの修了要件を教育改革に巧く適合させないと、所属学生に過度な負荷を科することになる。

また、文科省の本学位プログラムに対する経済的支援は平成 29 年度で終了するが、大学独自で本学位プログラムを継続・定着させる必要がある。

このような状況を踏まえて現在、履修科目の見直しや本学位プログラムの受け皿となる組織の検討等を行っているので以下に簡潔に報告する。

II. 東京工業大学の教育改革¹⁾

東京工業大学では学部卒業生の 90% 以上が修士課程

Global Human Resource Development Program for Nuclear Safety and Security(3); Development to the Education Reform at Tokyo Tech : Masayuki Igashira.

(2017 年 10 月 30 日 受理)

に進学する。そこで、従来の学部と大学院を廃止し、学部と大学院を統一した「学院」を設置した。また、大学院の 45 専攻を学術的に大括りにして 26 コースに改組した。

教員は学院に所属し、教育を「担当」する。学生は、類系、コースに順次所属する。20 の各コースは各系に直結しているが、他の 6 つのコースは複数の系と繋がっている。原子核工学コースは、工学院の機械系と電気電子系、物質理工学院の材料系と応用化学系、環境・社会理工学院の融合理工学系の合計 5 つの系と繋がっている。

学生定員は学院ごとに管理され、系・コースといった分野ごとの教育課程の学生数は、学生の希望や社会の要請に基づいて柔軟に変更されることとなっている。平成 29 年 4 月に一般入試で原子核工学コース修士課程に入学した学生 32 名の系別の内訳は、機械系 3 名、電気電子系 6 名、材料系 3 名、応用化学系 8 名、融合理工学系 12 名である。なお、他大学から原子核工学コース修士課程に入学した学生も、希望する指導教員の関係する系に所属することになっている。

新教育体系では、学生の体系的履修計画を支援するために、100 番台の学士課程 1 年次科目から 600 番台の博士課程科目まで、全ての科目には科目コードが付されている。原子核工学コースでは、修士課程および博士課程とともに、科目体系図および標準的履修例を学生に対して示し、科目履修を支援している。

学事暦の観点では、クォーター制を導入することで、集中的な学びを通じた学修効果の向上と、留学やインターンシップなどへの柔軟な対応を可能にしている。なお、大学院の授業は英語で実施される。

学士課程入学時から博士課程修了にいたるまでの期間を通してリベラルアーツ教育を必修とし、学院で学ぶ学術を適切に社会課題の解決に適用するための知性と人間

力を身に付けることとしている。具体的には、大学院生も博士課程修了までに文系教養科目5単位以上を取得する必要がある。また、自らのキャリアプランを明確に描き、その実現に必要な能力を、社会との関係を含めて認識し、その能力を自己修習することを目的とするキャリア科目6単位の履修が修了要件に加わった。

Ⅲ. 教育改革等への展開

1. 授業科目の見直し

所属学生は、本学位プログラム独自の高度国際教養科目9科目(9単位)を履修する必要がある。これに加えて、必修となった文系教養科目5単位以上を取得することは、所属学生に過度な負荷を科することになる。

そこで、文系教養科目と高度国際教養科目の各科目の教授要目を比較し、類似した科目については読み替えることができるようにした。例えば、文系教養科目のA科目と高度国際教養科目の α 科目の内容が類似している場合、A科目を単位取得することによって α 科目を単位取得したものと見なす。このため、本学位プログラムを運営・実施する教育院で文系教養科目と高度国際教養科目の読み替え表を作成し、所属学生に示している。

キャリア科目については、キャリア科目を担当する組織と調整を行い、本学位プログラムの国内インターンシップ(3~6ヶ月)と国際インターンシップ(6ヶ月~1年)を博士課程のキャリア科目として読み替えることができるようにした。

これらの科目読み替えによって、所属学生の負荷の増加を極力抑えて、教育の質を維持しながら、本学位プログラムの教育改革への適合ができたと考えている。

2. 本学位プログラムの今後

本学位プログラムの教育内容は、専門分野教育とグローバルリーダー教育に大別できる。このうち、専門分野教育については、文部科学省の本学位プログラムに対する経済的支援終了後は、原子核工学コース教員の多くが所属する環境・社会理工学院が責任部局として行うことが学内で合意されている。実態としては、原子核工学コースで専門分野教育を行うことになる。

また、グローバルリーダー教育については、特に優秀な大学院学生を、俯瞰力と独創力を備え広く産学官にわたりグローバルに活躍するリーダーへと導くため、修士および博士課程学生向けの新たな学位プログラムを実施する組織である「リーダーシップ教育院」が平成30年4月1日に設置され、この教育院が担当する。リーダーシップ教育院は、本学位プログラムを含む東京工業大学

の4つの博士課程教育リーディングプログラムで実施してきた教育体系を受け継ぐものであり、選抜された大学院学生を対象に、社会課題の認知とリーダーシップ、合意形成力、コミュニケーション力に加えて、幅広い教養を身に付けるためのカリキュラムを提供する。

本学位プログラムでは演習・実習等をとまなう原子力安全・セキュリティ科目群の4科目(各科目2単位)を必修としている。これらの科目の演習・実習部分は電力会社や研究機関等の施設等を借用して実施するため経費が必要となる。したがって、これまでと同様にこれらの科目を継続実施するために、種々の機会を利用して外部資金獲得を目指している。

また、本学位プログラムを実施した結果、さらに、昨今の核開発やテロの世界情勢から、今後の原子力による社会イノベーションを担う技術者・研究者等、すなわち通常課程の原子核工学コース修了者も、本学位プログラムのコア部分(原子力3S: Safety, Security, Safeguards)を修得することが必須であると考えているにいたった。そのため、これらの教育については広く原子核工学コース学生の教育にも組み込んでいくつもりである。

Ⅳ. おわりに

東京電力福島第一原子力発電所事故後のわが国の原子力政策がどのようになるだろうとも、世界の原子力利用は活発になり、原子力グローバルリーダーが必要となると考えて、本学位プログラムを開始した。

本学位プログラムに最初の学生8名を平成24年10月に受け入れ、この内の3名を最初の修了生として平成29年3月に輩出することができた。2名が産業界、1名が研究機関に正規職員として就職した。現在の所属学生は修士1年生~博士3年生の17名である。

所属学生は、わが国と世界のエネルギー・環境問題の解決にグローバル原子力リーダーとして貢献しようとする強い意志を持っており、彼らを大きく強く育てることが本学位プログラムの使命であると考えている。

— 参考資料 —

1) <http://www.titech.ac.jp/education/>

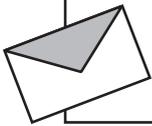
著者紹介



井頭政之 (いがしら・まさゆき)

東京工業大学 グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェンツ教育院
(専門分野/関心分野)核データ, 原子力学,
原子力人材育成

理事会だより



10 万年後問題

日本原子力学会理事会のメンバーにさせていただいていろいろな分野の方々と話をする機会が増え、これまで分野外であった原子力のいろいろな問題に触れるようになり、門外漢ながらかねてから気になっていた「10 万年後問題」について改めて考えてみた。というのも、私には地層処分の安全性を心配する友人がいて、『そこに放射性物質が埋まっていることを 10 万年後の人類にどう伝えるのか?』と聞かれる。地層処分問題は原子力にとって最重要課題の一つであるし、同じ質問を他の人がしているのをテレビで複数回見たことがあるのでほど多くの人がこのことを心配しているものと思われる。

ここで参考になるのが有名なオズマ問題である。ガードナーの名著『自然界における左と右』やファインマンの随想集でも紹介されているのでご存じの方も多いと思うが、それは「他の星に知的生物がおり、我々と電波でのみ通信できるとして、その生物に“左”と“右”の違いをどう説明するか」という問題である。箸を持つ方が右である、と言ったって人間にも左利きの人がいるからダメ。心臓のある方が左である、と説明してもあちらの生物がそうとは限らない。しかし、この問題は弱い相互作用のパリティ非保存を用いるとうまく解決できる。ただし、相手が反物質でできている場合は左右が逆になる。これについても CP 対称性の破れを使えば決着するのだが、「右手」で握手するまでにこれだけの準備が必要となると宇宙人と仲良くするのはなかなか大変のようだ。

10 万年後問題では通信が一方通行であるため、上の「左右問題」より状況は悪い。問題は大きく 2 つの場合に分類できる。一つは 10 万年後に放射性物質が生命体の活動圏まで到達していない場合、もう一つは到達している場合である。第一の場合、放射性物質の有無を彼らの生活圏から判断することはかなり難しい。唯一の方法はおそらく非常に微弱な反ニュートリノを計ることであろう。第二の場合は通常の放射能を測定できれば良いのでずっと簡単だが、線源の放射能が天然ウランの放射能レベルまで下がっているため、その全量でも出てこない限り極微量放射能測定技術を伝える必要がある。いずれにせよ、これらの方法を絵だけで示せるほど現在の人類が賢いのであれば、そこに放射性物質があることを示す絵を残せるのではないだろうか。一方、埋設した高レベル放射性廃棄物の全量が自然現象によって地表に出ている状況になった場合は、地下数百メートルの地層が地表に移動するような大きな天変地異が起きたことを意味す

るので、そこに知的生物が生存していることは困難と思われる。

もっと現実的に憂慮すべきシナリオとしては、核兵器またはダーティーボム保有を目指すテロリスト集団が、地下の処分場に埋設された放射性物質を盗取し、生活圏に保管したまま滅亡し忘却されることである。これは十分なセキュリティや核検認技術を開発し、盗取を防止し、盗取されたとしても所在を検知する技術を開発しておくことで解決可能である。もちろん、既に存在する核兵器も適切に保管または処理・廃棄しないとイケないが、世界の全ての核兵器と製造施設を同時に漏れなく、検証可能な形で破壊し、かつ再開発不可能な状況にしないとイケない。これは技術だけで解決できる問題ではない。

結局のところ、私の乏しい能力では「10 万年後問題」にオズマ問題のような明快な答えを見つけ切れておらず、このままでは原子力技術に携わる者としての説明責任を果たしていないことになる。言語学者に活躍していただいて、ポイジャー探査機に乗せたレコードのような、知的生物ならどのような種族でも理解できるように編集された文法書を作り、それとともに放射性物質の所在を文字で伝達する“ソフト”な方法も現実的なやり方として可能なのではないだろうか?あるいは分離・核変換で放射性物質質量を大幅に減らすことができれば「10 万年後問題」が「1000 年後問題」程度に低減される。

「10 万年後問題」もそうだが、今後運転が再開されたり、新規に建設される原子力施設が重大な事故を起こす確率は、現在では大変低いものと考えられる。確率的には希事象という分類に入る。しかし、一旦起きてしまうと莫大な被害につながる可能性があるため、希事象を、技術的・経済的に合理的なやり方で防ぐ手段を講じる必要がある。それには大いに想像力を働かせ、自由な雰囲気の下で初見では突飛に思えるようなアイデアも良く議論し、有効に活用することが必要ではないかと思う。その意味で、希事象をことさら好み、その解明に心血を注ぐ基礎系の方々の考え方や手法は個人的には大いに参考になる。基本現象をしっかりと理解し、それを演繹することで、例えば宇宙の始まりを手にとってきたように解明する想像力とそれを科学にまで高める論理能力には驚嘆すべきものがある。ぜひ原子力分野の聡明な皆様にも想像力を大いに発揮して「10 万年後問題」を考えて浅学の筆者に答えを教えてください。

(理事 千葉 敏)



部会便り

夏期セミナー報告

-真夏の日立で熱い議論と久慈浜の海軟風-

今回、部会便りを執筆する機会を頂き、夏期セミナーの内容や参加者の声をまとめ材料部会便りとします。

材料部会では、毎年夏期セミナーを開催しており、一昨年は北海道地区国立大学の合宿研修施設の大滝セミナーハウスで開催しました。大滝セミナーハウスは、新千歳空港から支笏湖を經由して車で1時間ほどの山間部の溪流沿いのため、朝夕は半袖では寒いくらいです。昨年は、山から海へ場所を移し、茨城県日立市の海水浴場で有名な久慈浜近くの久慈サンピア日立で2017年7月12日(水)から14日(金)まで3日間にわたって開催しました。全国から高専の専攻科学生や大学生、大学院生を含む58名の方が参加し、国内の大学や企業などの研究機関で原子力材料の研究開発に携わっている研究者から講義を熱心に拝聴しました。

基調講演では、軽水炉の水化学管理に係る取組みについて日本原子力発電株式会社の久宗健志氏より講演頂きました。これまでの日本の軽水炉の炉内構造材料の腐食抑制についての取り組みを多くの事例を交えてご説明頂き、研究者は理解を深めるとともに水化学の重要性を再認識し、学生や大学院生にとっては座学での勉強では体験できない実際に軽水炉運転当初から水化学に取り組んだ方の直接の実体験などを交えた講義を聴くことが出来て大変有意義だったと思います。続いて、昨年のテーマである原子力材料における「腐食と照射」の基礎科学について、軽水炉の高経年化や腐食研究と基礎研究などの各論について研究所や企業からそれぞれの分野の中心的な研究者に講義をお願いしていたため、時には若手研究者からの熱い議論が投げかけられ、学生や大学院生も多くの刺激を受けるとともに積極的に質疑に参加していました。各講義の内容は、基礎を重点的にその応用や最新のトピックスまで、大変興味深い内容で、講義後も熱心な質疑応答が会場で繰り広げられました。

また、一昨年に引き続き学生や35歳以下の若手研究者を中心としたポスター発表も行いました。講義後の懇親会で自己紹介やお互いの将来の夢を語ったりしたせいも、普段学会では緊張気味の質疑応答が多いのですが、すっかり打ち解けた雰囲気の中で、活発な議論がなされて、大盛況の内に終了しました。各ポスター発表の内容は、甲乙付け難く、採点者の頭を悩ませましたが、厳正な審査の結果、最優秀賞1名と優秀賞4名が決定し、全

ての講義が終了後、賞状と副賞の図書券が授与されました。

例年、最終日は施設見学を行っており、一昨年は株式会社日本製鋼所室蘭製鋼所にて原子炉压力容器の鍛錬行程や日本刀を製作している刀鍛所の見学を、昨年は日本原子力発電株式会社東海第二発電所とJAEAのJ-PARCとADSの実験施設を見学しました。東海第二発電所では、2011年の大震災により被災した建物や津波対策で建設が進められている防潮堤の建設現場を見学しました。使用済み燃料を乾式キャスクに閉じ込めて保管している建屋に今回特別に立ち入ることを許可して頂き、あらためて関係各位に感謝いたします。ここでは、直接乾式キャスク表面での崩壊熱による暖かさを感じることができ、これを何かに利用できないかと参加者の皆さんは思いをめぐらせていました。また、大震災でも被害を全く受けなかったことを聞き、今後大震災で被災した東京電力福島第一原子力発電所の使用済燃料プールで継続して冷却している使用済燃料の将来の保管やデブリの保管に向けた研究も進められていることから、乾式キャスクによる中間貯蔵の重要性について理解することが出来ました。

日中の熱い議論を交わした後は、一昨年に引き続き昨年も温泉で汗を流し講師の方を交えて最近の研究に関する情報交換や講義では聞けなかったよもやま話などで盛り上がりました。また、時間が無く質問できなかったことやよくわからなかった内容に対しても講師の方から親切にわかりやすく解説して頂き、合宿形式で行うことの重要性を再認識しました。懇親会の帰り道、熱い議論やお酒のせいで火照った頬を、海水浴場のある久慈浜から吹く海軟風が心地よくクールダウンしてくれました。ちょうど海開きが行われたのですが、サメも夏期セミナーを聴講したかったのかやってきて泳ぐことは出来ませんでした。

今年は、核燃料部会、水化学部会と共に3年に1度実施している3部会合同夏期セミナーが静岡県掛川市で開催されることが決定しております。若い心を持ち続ける皆さんと学生諸君の積極的な参加をお待ちしております。

(北海道大学 柴山環樹, 2017年10月31日記)