

巻頭言

1 知識社会における技術

武田 徹

座談会

10 廃炉関連の人材育成には戦略的な連携を一若手指導者，学会の情報共有と発信に期待

30年以上もかかる1Fの廃炉。その行く手には多くの技術的な課題がたちはだかる。そのためには人材育成が欠かせない。若手の指導者がこの問題を議論した。

阿部博志，兼子信吾，川崎大介，鈴木茂和
塚原剛彦，渡邊保貴，木藤啓子（司会）

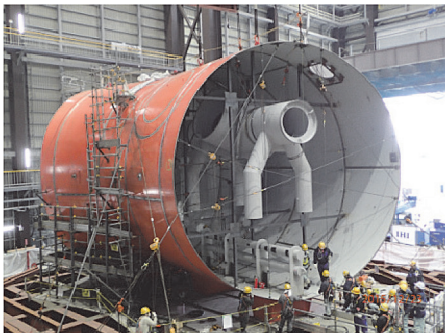


解説

39 廃止措置に挑む JAEA 櫛葉遠隔技術開発センター

1Fの廃止措置ではロボットなどの遠隔技術の活用が期待されている。それらの技術の研究開発や人材の教育訓練などを行っているのが，JAEA 櫛葉遠隔技術開発センターだ。

山田大地



原子炉格納容器下部の実規模試験体（写真提供：IRID）

時論

2 「都市」「郷土」の中のドイツ・シュタットベルケ

高松平藏

特集 1 原子力関連施設の作業者の放射線疫学調査研究

17 INWORKS 疫学調査研究

仏英米3カ国の原子力関連施設の中性子被ばく者と内部被ばく者を含む放射線作業者に関する放射線疫学調査研究 INWORKS の結果が，2015年に発表された。低線量，低線量率の遷延被ばく状況での光子による外部被ばく線量とがん死亡率増加の統計的有意性を示すデータが得られたとされた。しかし，線量評価でいくつかの課題が残された。

25 IARC15 カ国合同コホート疫学調査研究（15カ国研究）

INWORKS よりも10年前の2005年，15カ国の原子力産業に従事する放射線作業者の放射線疫学研究結果が発表された。

28 15カ国研究から INWORKS までの放射線疫学研究の流れ

ここでは15カ国研究，それ以降に実施された仏英米の国別の疫学研究，および INWORKS までの一連の研究成果を俯瞰して，原子力関連施設の放射線作業者の疫学研究の全体像を解説する。

岩井 敏，仙波 毅，石田健二，高木俊治，猪狩貴史

解説シリーズ 「世界の原子力事情」(1)

49 原子力推進姿勢を堅持する英仏

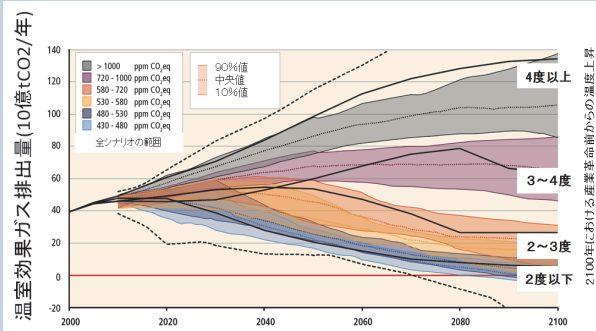
福島原発事故後，原子力政策をめぐる各国の対応は分かれた。今回紹介する英仏はともに原子力推進姿勢を堅持している。

内山軍蔵

特集 2

31 地球温暖化対策におけるイノベーションのような期待があるのか、如何なる技術が想定されているか

諸国は地球平均の温度上昇を2度以下に抑制する野心的な目標に政治的に合意している。しかし、それを達成するためには、温暖化対策技術のイノベーションが必要だ。 杉山大志



IPCC がまとめた温室効果ガス排出量シナリオ

連載講座 福島環境回復に向けた取り組み (第3回)

58 環境放射線モニタリング調査・評価技術の開発

事故後に行われてきた環境放射線モニタリングについて概説する。また、航空機モニタリングと地上モニタリングについて紹介し、相互比較を行う。さらには新たな技術開発例として無人機の活用例と課題について概説する。 眞田幸尚

解説

44 火山現象に対する原子力発電所の安全確保について—JEAG4625 改定版の背景とその技術的根拠(その2)

火山現象から重大事故等対処施設を防護するための基本的考え方や対応方針及び火山現象により発電所が停止した後の施設の点検に関する留意事項について解説する。 中村隆夫, 岩田吉左

4 NEWS

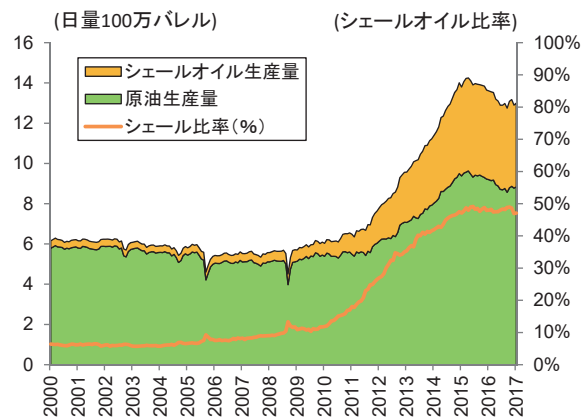
- 原子力機構で作業員が内部被ばく
- 高浜3, 4号機が再稼働
- 核融合研がヘリカル装置で1億度超達成
- 岡山大中性子医療研究センターが開所
- 海外ニュース

解説シリーズ

53 地政学的リスクとエネルギー 第1回 シェール革命と変貌する石油地政学

近年の米国におけるシェールオイル増産と世界の石油需給の緩和により、国際的に原油価格は大きく下落した。中長期的な原油安定供給に影響が及び、石油を巡る地政学的リスクが再び高まる可能性がある。

小宮山涼一



米国原油・シェールオイル生産量の推移

理事会だより

63 監事の立場から

梅澤成光, 水田 仁

38 From Editors

64 会報 原子力関係会議案内, 共催行事, 新入会一覧, 英文論文誌目次, (Vol.54, No.7) 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧
後付 第7回総会資料

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/>



専修大学

武田 徹 (たけだ・とある)

1958年生まれ。ジャーナリスト、評論家、専修大学文学部人文ジャーナリズム学科教授。著書に『私たちはなぜ原発大国を選んだのか』(中央公論新社)などがある。

4月から始まる新学期で新しく受け持った科目のひとつに「インターネット史」がある。最初の授業では核技術の黎明期を扱った。オット・ハーンによる核分裂の発見、核連鎖反応の可能性に対する気づいたレオ・シラードはアメリカに亡命後、ナチスドイツが核分裂爆弾製造に先んじることを懸念し、アインシュタインを通じてドイツよりも先に原爆開発を進める必要性をローズベルトに進言した……。

インターネットなど影も形も出てこない内容に学生は怪訝な表情を浮かべ始める。やがてマンハッタン計画が始動し、ノイマンが原爆設計のためにデジタル・コンピュータの開発を急がせたエピソードに触れる。ここでコンピュータと原爆が双子の技術だったことを学生は理解するが、インターネットの登場はそれから更に十年以上待たねばならない。大陸間弾道弾が開発され、アメリカ本土が核攻撃を受けた時にも情報網を生き残らせる方法として電信ネットワークを用いてメッセージを小分けにして送るパケット通信が提案され、このサバイバル・ネットのアイデアが紆余曲折を経てインターネットに繋がってゆく。

しかし、コンピュータだけでなく、インターネットも軍事技術から派生したものだとは指摘することが講義の目的ではない。実はマンハッタン計画はシラードの進言で実現したわけではなく、ローズベルトに原爆開発は可能だと進言したもう一人の人物がいた。その名をヴァネヴァー・ブッシュ。1923～32年の間、MITに教授として在職し、アナログコンピュータを開発。1939年にワシントン・カーネギー研究機構の総長に転じると政治家と親しく交わり、政府の科学顧問となった。そんなブッシュのお墨付きを得てマンハッタン計画は実施されるに至ったのだ。

とはいえブッシュはただ核の時代の幕を開けたのではない。米国の科学雑誌『アトランティック・マンズリー』の、最初の原爆実験が行われたのと同じ月に発行された号に彼は「As We May Think(思うがままに)」と題したエッセーを寄稿。そこにはEXtension of MEMory(記憶の拡張)の意味を含んでMEMEXと命名された架空の装置のアイデアが示されていた。MEMEXは個人が所有する全ての本、記録、通信内容などをマイクロフィルム化して格納するデバイスで、情報を高速で検索し、組み合わせることで「知識増幅装置」になると謳われていた。

このMEMEXのアイデアは若い研究者に大きな影響を与えた。たとえばダグラス・エンゲルバートは終戦直後にたまたま立ち寄った赤十字病院で「As We May Think」を再録したLife誌を読んでコンピュータ研究を志し、NLS(oN Line System)を作り上げる。NLSは時分割使用するコンピュータの力で動員してMEMEXの実現を目指すものだった。そしてこのNLSがインターネットのもう一つのルーツとなり、そこに巨大な知の収蔵庫、議論を交わすアリーナとしての性格を育ててゆく――。

大量殺戮兵器が科学者の協力によって作られてきた歴史への反省から日本学術会議は1950年、67年の二度、「科学者は戦争、軍事目的の科学研究を行わない」との声明を出し、先の3月にも過去2回の声明の継承を決定している。しかし軍事研究とそれ以外との線引きは難しいし、軍事技術でも自衛のために用いるか、侵略に使うかで評価は分かれよう。ただ、そこで本質を見誤ってはならない。科学技術はそれ自体に目的を宿しているわけでもなく、いかようにも使える。軍民両用の意味でデュアルユースの語がしばしばひかれるが、科学技術はデュアルどころか本質的にマルチユースなのだ。

そこで肝腎なのは科学技術を人類のため正しく使う知恵をいかに正しく保つかだろ。インターネットの歴史を教えつつ、筆者はマンハッタン計画を進めたブッシュが同時に知識の増幅装置であるMEMEXのアイデアを温めていたことの意味について(もしかしたら実在のブッシュの限界をも超えて)考える必要を学生に訴えたいと思っているのだ。

(2017年4月28日記)



「都市」「郷土」の中のドイツ・シュタットベルケ



高松 平藏 (たかまつ・へいそう)

ドイツ在住ジャーナリスト
拠点であるエアランゲン市(バイエルン州)を中心に取材・調査・観察。社会システムの比較などをベースに地方都市のビジョンを探る。著書に「ドイツの地方都市はなぜクリエイティブなのか」(2016年 学芸出版)など。帰国のたびに講演活動を行っている。

I. はじめに

電気をはじめ、水やガスなどを供給するドイツの地域公益会社「シュタットベルケ」が、近年日本で注目されている。地方創生という課題に対する1つの方策としての期待などがその理由だ。

ドイツにおけるシュタットベルケの存在は、各地域に強くある「郷土(Heimat)」の自覚といった精神面と、モジュールとしての都市の発達とともにある。本稿ではこういったことを勘案しながら、地方都市におけるシュタットベルケがどのような存在なのかを見てみたい。

II. シュタットベルケとは何か

ドイツの電力供給は、ビッグ4と呼ばれる4大電力会社の存在が大きい。元々大手電力会社は8社あったが、1998年に電気事業の全面自由化。結果的に4社に統合された。ところが、一時はその存在を危ぶまれたシュタットベルケが各地にあり、健闘している。

特に2011年の「フクシマ」以来、地域エネルギーをより支持する動きがドイツ国内で活発化する。これを受けて、「シュタットベルケがビッグ4にアタック」(ベルリーナーモルゲンポスト紙電子版 2011年10月17日付)といった報道なども散見される。さらに2016年から利用者が自由に電力会社を選択できるようになったが、これに伴い必要となってくるのが、価格比較や発電の資源は何かといった利用者向けの情報だ。そのための情報サイトがいくつかあるが、「Stadtwerke in Deutschland」(ドイツのシュタットベルケ)のデータベースには1,093のシュタットベルケが掲載されている。また電力情報サイト「1-Stromvergleich.com」(1-電気比較コム)によると4大電力会社の市場シェアは2007年には85%を占めていたが、2015年には62%にまで下がっている。

さて、昨今シュタットベルケは日本で注目を浴びているものの、一般的には馴染みが薄い。また、専門知識を持つ人にとっても、どのように地域のなかで営業されているのかイメージしづらいだろう。

まず言葉尻から見ると、シュタットベルケのシュタットは「都市」「市(シ)」という意味で、ベルケは英語のworksである。ほかにも Kommunalwerke/自治体ベルケという言い方もある。

注意しなければいけないのは、シュタットベルケは電力のみを扱っているわけではないという点だ。各シュタットベルケによって異なるが、電気のほかに水、ガス、バス・トラムなどの近郊公共交通などもあわせて供給しているケースが多い。昨今は高速ネットワークの整備に力を入れているところもある。また地元雇用も生み出すなどの経済効果もある。日本では電力供給という側面から注目されがちだが、都市の「インフラ供給会社」という理解をしたほうが実情に近いだろう。

III. 都市というモジュールの質を高める

地域のインフラ供給会社としてのシュタットベルケを理解するには、ドイツの「都市」に対する認識や歴史をひと通り見ておく必要がある。

ドイツの自治体は日本とは異なり相対的に規模が小さい。最も人口が多いのがベルリンで347万人。以下、ハンブルク(176万人)、ミュンヘン(143万人)、ケルン(105万人)と続くが、そのあとは100万人以下である。このような自治体規模の構成なので、10万人クラスで「大規模都市」と呼ばれるが、これもまた日本の感覚からいえば、違和感のあるスケールだろう。相対的に規模が小さい自治体構成になるのは、規模を第一に追求するものではなく、各都市がクオリティをアップデートしながら高めていくという方向性が背景にあるからといえよう。

ドイツの都市の原型は、中世の市壁に囲まれた都市だ。市壁は防護のためだったが、巨大な建造物は人の精神的な部分に影響し、「壁の中がわれわれの町」という人々の思いを高めることになる。まさに都市のアイデンティティの象徴のようなものだった。また都市は、都市法などの特権を持ち、市場が開かれ、交換が行われる場だったのだ¹⁾。

ユルゲン・ロイレッケ²⁾によると、近代にはいると工

業化が進み、都市人口が急増し、密集地帯が増えるという都市化(Verstädterung)が始まる。そして必要になってくるのが、都市の人間集団としての社会秩序や文化を整えていく都市社会化(Urbanisierung)のプロセスである。

こういう状況では、都市の運営の方法も新しいものにせねばならない。近代以前は名望家たちが都市を切り盛りしていたが、19世紀の後半には都市官吏がそれにかわる。いわば、プロの手による都市のパワーマネジメント化とでもいうようなことがおこった。都市全体をマネジメントしていくのに必要なことは幅広い。公衆衛生、上下水道、屠畜場、食肉検査場、道路清掃など人口空間としての都市のインフラ整備にはじまり、より長期的スパンの都市運営を指向する。そしてこの中に含まれていたのが電力供給だった。

たとえば1908年の人口10万人以上の41の都市を見てみると³⁾、これらのインフラを提供する公益企業がかなり増えている。水道(92%)、ガス(80.4%)、市街鉄道(43.9%)、屠畜場(95.1%)、そして電力に関しても80.4%に及ぶ。電力のみに着目すると、人口5,000-2万人の自治体(602)でも半分以上が電力供給会社を持っている。

IV. 「市のもの＝市民のもの」という感覚

その後、ドイツ国内では電力会社の大規模化などもおこるが⁴⁾、全体像でいえば中世以来、「都市」というモジュールが発展し、シュタットベルケはモジュールとしての都市の性能を上げるために登場してきたという解釈ができるだろう。

同時に留意しなければならないのは、この頃、中世都市の市壁は壊されたり、無意味化したが、「郷土」という考え方が概念化され、強くなっていく時期でもあることだ。これは「市民の精神性」ともつながり、モジュールとしての都市を成り立たせるのに重要な要素であると思われる。郷土という概念は現在でも「郷土保護」「愛郷心」といった言葉で、環境保護や文化、政治といった文脈のなかでも取り込まれている。

さてここで、筆者が継続的に取材・観察・調査を行っているエアランゲン市(人口約10万人、バイエルン州)のエアランガー・シュタットベルケ(Erlanger Stadtwerke: 略称ESTW)を見てみたい⁵⁾。はじめは1858年のガス供給から。現在は電気、ガス、水、公共交通やプールの運営、高速ネットワークの敷設などを行っている。株式会社になっているが、市が100%出資しており、500人以上を雇用している。地域の文化や教育、福祉、スポーツといった分野のスポンサーになることもよくあり、地域の生活の質そのものを高めることも行っている。同市の環境政策などにも積極的に関わっており、同社の代表などは市の「エネルギー長官」のような存

在だ。

同シュタットベルケも20世紀の終わりには、民営化を図る動きが出てきたが、電力が市場に左右されることに反対する声が市民側からあがる。結局、市民投票になり74.7%が売却反対に投じた(1998年7月26日)。イニシアティブをとった市民グループの代表は、「シュタットベルケは100%市のもので、市民のものになった」と報道陣に対して表明している。この言葉からも「市営のもの＝市民のもの」という感覚が読み取れるが、郷土の自覚やシビックプライドといった精神面がシュタットベルケの存在とつながっているのが透けて見える。

今後、電力は持続可能なエネルギーを増やしていく必要があるが、そのためにシュタットベルケも投資が必要だ。国内シュタットベルケの団体VKU(自治体企業連盟: Verband kommunaler Unternehmen e.V.)はドイツ都市会議らと共同で、市民による投資を勧めている⁶⁾。エアランゲンのシュタットベルケも地元銀行からの融資で2011年に風力発電を導入した。融資された資金は銀行が「気候定期預金」という一種の有価証券を設置して集めたものだが、あっという間に必要額が集まったという。いくなれば市民の小口の投資で実現したかたちだ。

V. おわりに

以上を鑑みると、シュタットベルケはドイツの地方都市の経済や政策に加え、都市発展経緯で培われた「信頼関係」「郷土」といった市民の精神性が備わって、はじめで成立するモデルといえるだろう。

日本で、特に地方創生の文脈で地域エネルギーの議論を展開するとき、シュタットベルケのシステムそのもの以上にこういった部分をよく考えてみるべきだと思う。

－ 参考文献 －

- 1) 河原温(2009)『都市の創造力』, 岩波書店, p4.
 - 2) ユルゲン・ロイレッケ著, 辻英史訳(2004)「都市化から都市社会化へ ドイツにおける近代『社会都市』の成立と発展」, 今井勝人・馬場哲編, 『都市化の比較史 日本とドイツ』, 日本経済評論社, p3-25.
 - 3) 関野満夫(1997)『ドイツ都市経営の財政史』, 中央大学出版部, p15.
 - 4) 森宜人(2009)『ドイツ近代都市社会経済史』, 日本経済評論社, p155.
 - 5) 高松平藏(2016)『ドイツの地方都市はなぜクリエイティブなのか 質を高めるメカニズム』, 学芸出版, p125-128.
 - 6) Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU) (2016) “Stadtwerke und Bürgerbeteiligung Energieprojekte gemeinsam umsetzen” VKU Verlag GmbH.
- ※ウェブ上の記事などは2017年5月2日閲覧

(2017年5月5日記)



原子力機構大洗研究所で作業員が内部被ばく

茨城県にある日本原子力研究開発機構の大洗研究開発センターの燃料研究棟で6月6日、作業員5人が放射性物質で汚染される事故が起きた。核燃料物質を収めた貯蔵容器を点検作業していた際に、核燃料物質が入った容器を封入していたビニールバックが破裂し、作業員が被ばくした。検査した結果、作業員の一人の肺から2万2千ベクレルのプルトニウムが検出された。作業員には、体内からの放射性物質の排泄を促進するためのキレート剤を投与された。また、事故が起きた部屋を検査した結果、最大で平方センチあたり55ベクレルの α 線

を検知した。外部への影響はない。

5人の作業員は7日に量子科学技術研究開発機構の放射線医学総合研究所に移送され、同研究所でさらに再除染を行った後に測定を行ったが、5人の肺からプルトニウムは検出されなかった。これをうけて原子力機構は9日、当初の数値は、除染の際に皮膚に付着したプルトニウムを除染で完全に除去できないままに測定したために、内部被ばくを過大に評価した誤検知の可能性があると説明した。

(原子力学会誌編集委員会)

高浜3, 4号機が再稼働

関西電力の高浜原子力発電所4号機が5月22日に送電を開始した。また同3号機は6月6日に原子炉を起動した。両機は昨年3月の大津地裁仮処分決定により運転が差し止められていたが、大阪高裁は今年3月にこれを

取り消し、運転が可能となった。新規制基準に合格した原発はこれまで九州電力の川内1, 2号機、四国電力の伊方3号機の3基だったが、両機はこれに続く4, 5基目の再稼働となる。

(同)

核融合科学研、大型ヘリカル装置で1億度超を達成

核融合科学研究所は4月21日、将来の核融合炉実現に向け進めている大型ヘリカル装置(LHD)計画の重水素ガスを用いたプラズマ実験(重水素実験)で、1億度超の温度を達成したと発表した。プラズマとは電子と原子核がバラバラになった高温の状態で、原子核同士が衝突することで核融合反応が起こるが、核融合反応を持続させるには高温で密度が高いプラズマを炉心に閉じ込める必要がある。LHD計画では、核融合炉の設計条件として必要な1億2,000万度の実現を最終目標としており、これに向け大きく前進したこととなる。

同研究所が3月7日から行っている重水素実験は、高性能プラズマを実証する軸となるもので、これまでの軽

水素ガスによる実験で得られていた最高温度9,400万度をしのぐ成果となった。

重水素実験は2024年にかけて実施され、超高温プラズマの性質や、高エネルギー粒子の学術的解明などを進め、将来の核融合炉の実現に向けた研究につなげていく。

また、LHD計画では、重水素実験で発生する中性子を用いたコンクリート遮蔽壁の性能検査を実施したほか、防災訓練なども行われており、安全管理機器、体制ともに十分機能していることを確認している。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

岡山大学中性子医療研究センターが開所

岡山大学中性子医療研究センター(NTRC)の開所セレモニーが5月9日、同大鹿田キャンパスで行われた。同センターでは、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)に技術革新を起こして中性子医療という新規分野を創出し、がん治療に新たな世界標準治療を切り開くことを目指すとし

ている。BNCTは、ホウ素原子 ^{10}B をがん細胞に導入した後、中性子線を照射してがん細胞内部で核分裂を起こし、正常細胞にはほとんど影響を与えずにがん組織を細胞単位で殺すことができ、切らずに治す治療法として注目されている。

岡山大学は2012年より、放射性廃棄物に関し国際原子力機関(IAEA)との連携交流を深め、2016年10月にIAEAと岡山大学との間でBNCTについての協定を調印している。さらに文部科学省の予算措置のもと、今回の中性子医療研究センター発足につながった。

また岡山大学NTRCでは、多種のがん細胞へ確実に

ホウ素を届けることのできる薬剤を開発しており、名古屋大学では、新たな仕組みで適切な中性子線を作り出す装置の開発を進めている。このことから両者は、放射線治療の指針を定めるIAEAと連携してBNCTのガイドライン作りに参加し、日本の意見を世界に発信していくとしている。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【南ア】

高裁、政府の原子力新設計画を違法と裁定

南アフリカ共和国の高等裁判所・西ケープ州支部は4月26日、環境保護団体による訴えを支持し、政府の原子力新設計画についてエネルギー大臣が2013年と2016年に下した2つの決定は違法・違憲であり、無効とするよう指示する裁定を下した。この新設計画を進めるために政府が米国、韓国、ロシアと締結していた原子力協力関係の政府間協定(IGA)についても同様の裁定を下しており、すべて無効であると言いつつ、2030年までに960万kWの原子力発電設備建設を目指して、南ア政府は昨年12月、入札提案依頼書(RFP)の前段階にあたる情報提供依頼書(RFI)を世界の原子力産業界に発出していたが、今回の裁定により新設計画の先行きは一転して不透明になった。4月、着任したばかりのM. クバイ・エネ相は同日の声明で、判決文の内容を精査するよう省内に指示したとしており、この件に関する見解は改めて表明すると述べた。新設計画について南ア政府は、まだ、いかなる取引も始めておらず調達契約も結んでいないが、米国、韓国、ロシア、中国、およびフランスと結んだIGAが存在することは事実だと強調している。

今回の訴訟で2つの環境保護団体から訴えられていたのは、エネ相(当時)と大統領のほか、南ア国家エネルギー規制局(NERSA)、南ア電力公社(ESKOM)、および議会の上下両院議長である。異議を申し立てられた2つの決定のうち1つ目はエネ相が2013年11月に署名したもので、2010年～2030年までの「統合資源計画(IRP)」に基づき、南アでは960万kW分の原子力発電設備が必要だとする内容。原告らの求めに応じて、これが官報に掲載されたのは2015年12月だが、調達担当者であるエネ相には新規設備の調達プロセスを開始する前に、NERSAとともに公正な国民参加手続を踏む必要があった。2つ目はエネ相が2016年12月8日に公表した決定

で、内容は最初のものとはほぼ同じだが、新規設備の調達担当者としてESKOM社が特定されていた。これも同年12月14日付けの官報に掲載されるまで数か月間延期されるなど、過度の遅れが問題視されたほか、NERSAはこれら2つの決定を不公正な手順で承認したと糾弾された。また、南ア政府は原子力協力に関するIGAを1995年8月に米国と、2010年10月に韓国と、2014年9月にロシアと締結したが、これら3つのIGAがエネ相により議会に提出されたのは2015年6月のこと。最初のエネ相決定が官報に掲載される前であったことから、憲法との整合性が問われていた。

南アではクバーク原子力発電所の2基(各97万kWのPWR)が1980年代半ばから稼働中だが、これらに新たな設備を加えることで、南アは総発電量における原子力シェアを14%まで倍増。同様に再生可能エネルギーのシェアも16%まで拡大し、温室効果ガスを排出する石炭火力への依存度を削減する計画だが、原子力機器の国産化も南ア全体を工業化する広範なプロセスの一部として進める考えた。新設計画のサイトとしては、東ケープ州タイスブントと西ケープ州ドイネフォンテインの2箇所が特定されており、昨年12月に発出したRFIに対しては世界中の27社が情報提供の意志があると回答。この中には、中国国家核電技術公司(SNPTC)、フランス電力(EDF)、ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社、韓国電力公社(KEPCO)が含まれていた。

【国際】

IAEAの技術WG、研究炉運転継続で加盟国への支援を勧告

国際原子力機関(IAEA)の研究炉技術ワーキング・グループ(TWGR)は4月26日、研究炉の安全かつ持続可能な運転に向けた支援の重要性に鑑み、加盟国における新たな研究炉開発プロジェクトの支援、および研究炉を持たない加盟国が国外の施設を利用可能になる取り組みを継続的に行うべきだとIAEAに勧告した。世界では

現在、55 か国で約 250 基の研究炉が稼働しているが、近年は経年化が進んだ設備の管理や効果的な活用といった課題が浮上している。研究炉は原子力関係の研究、教育・訓練の面で大きな役割を担うとともに、医療用・工業用の放射性同位体生産にも使われることから、レベルの高い安全性の維持は、その社会的恩恵を最大化するとともに、有効活用を保証する上で非常に重要と IAEA は認識。効果的な規制や高経年化という課題への対処という点では特に、IAEA の安全基準を厳格に適用することが一助になるとしている。

IAEA の技術ワーキング・グループには、事務局や加盟国政府が指名した専門家が所属しており、原子力発電エンジニアリング・セクションのプログラムを実行する際に助言や支援を提供するほか、原子力常設諮問グループの議論において重要課題を特定する。TWGRR は研究炉を保有する加盟国の原子力関係規制者や上級管理職など約 20 名の専門家で構成。ウィーンの IAEA 本部で毎年、加盟国が研究炉を合理的に運転するために必要な勧告を IAEA のために協議している。TWGRR 議長を務める米アイダホ国立研究所・新型試験炉総合施設の S. オケリー副所長によると、世界の研究炉のうち約半数が 40 年以上稼働しており、安全で効率的な運転を続けるには設備の最新化が中心的な課題であり、既存の研究炉の中には、今以上の利用者を受け入れる余裕があるため、研究炉を持たない加盟国の研究者に活用してもらうことができるとの考えを述べた。

この関連で、IAEA はすでに複数の支援イニシアチブを開始しており、その一つが 2014 年に持ち上げた「国際研究炉センター(ICERR)」構想である。フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)がカダラッシュで建設中のジュール・ホロピッツ研究炉(タンクプール型、熱出力 10 万 kW)を 2015 年 9 月に初めて、ICERR 施設に認定しており、完成後は研究炉のない加盟国が将来的な専門家を効率的かつ低コストで確実に育成するために利用できることになった。また 2016 年 9 月には、ロシアのウリヤノフスク州ディミトロフグラードにある国立原子炉科学研究所(RIAR)を ICERR 施設として指定。RIAR 内の研究炉 6 基で、炉心機器や照射済み材料などの照射後試験が可能になった。なお、RIAR では 2015 年 9 月に鉛や鉛ビスマス、ナトリウムなどによる冷却が可能など目的高速中性子研究炉(MBIR)が本格着工した。同炉が完成した後、「MBIR 国際センター」に出資参加する国は、IAEA が革新的原子炉の導入環境整備を支援するために設置した国際フォーラム「INPRO」の枠内で、MBIR の中性子束/燃料チャンネルを分割・利用できることになっている。

【米国】

2 つの原子力発電所増設計画、完成までの追加経費は計 40 億ドル

米国で 30 年ぶりの新規原子力発電所建設計画であるジョージア州の A. W. ボーグル 3, 4 号機とサウスカロライナ州の V. C. サマー 2, 3 号機のプロジェクトについて、建設工事を請け負ったウェスチングハウス(WH)社が両プロジェクト(WH 社製 AP1000, 各 2 基ずつ)を完成させるための追加経費が合計で約 40 億ドルにのぼると見積もっていることが明らかになった。サマー増設プロジェクトに 55% 出資するサウスカロライナ・エレクトリック&ガス(SCE & G)社と親会社のスキャナ社が 4 月 12 日にサウスカロライナ州公益事業委員会(PSC)に報告したもので、スキャナ社としては 2, 3 号機両方の完成を望んでいるものの、どちらか 1 基を完成させるか、2 基とも断念して関連法に基づく資金回収を模索するか、などの選択肢も同等に検討している。WH 社が 3 月 29 日に再建型の倒産法適用を申請したのにもない、両プロジェクトの出資者達と WH 社は「中間評価協定」を締結。現在は同協定の下で建設工事が続けられている。しかし、4 月 28 日に同協定が期限切れとなる前にプロジェクトの今後に関する選択肢や追加経費の評価・確認作業が完了しなかった場合、スキャナ社としては協定の延長を要請する可能性もあるとした。同社はまた、WH 社がエンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約に基づく損害賠償を支払えない場合は、親会社保証として東芝に請求できるとしている。

スキャナ社の発表によると、追加で必要となる 40 億ドルのうち、約 15 億ドルがサマー増設プロジェクトの分。SCE & G 社が同プロジェクトに 55% 出資していることから、同社の負担分は 8 億 2,500 万ドルという計算だが、これらは主に、EPC 契約における固定価格オプションに関係していると説明した。同社は昨年 5 月の段階で、2 基を完成させるため、WH 社との EPC 契約で同オプションを行使すると PSC に申請。追加コストとして SCE & G 社が支払わねばならない額は 8 億 5,200 万ドルだが、このうち 5 億 500 万ドルが固定価格オプションに直接関係する経費だとしていた。PSC はその後、11 月にこの申請を承認しており、この時点で計算された SCE & G 社の追加負担額は 8 億 3,100 万ドル。共同出資者であるサンティー・クーパー社の正式な同意が得られれば、WH 社との EPC 契約が修正され、それ以降の超過コストは WH 社側の負担になると見られている。

また、PSC への報告の中でスキャナ社幹部は、2 つの原子力発電所建設プロジェクトにおける契約責任を回避

するために WH 社は破産法を申請したと指摘。40 億ドルという追加経費はあくまで WH 社が見積もった額であり、両プロジェクトの出資企業としてはまだ、この額の確認作業を終えていない。倒産法の適用により、WH 社は固定価格オプションにともなう義務から逃れる機会を得たが、サマー増設プロジェクトの出資企業は中間評価協定に基づく作業継続経費を、WH 社の主要受託業者のフルアー社等に直接支払っており、この額は毎週約 3,000 万ドル(SCE & G 社の負担分は 1,650 万ドル)、月額で 1 億 2,000 万ドル(SCE & G 社は 6,600 万ドル)にのぼる。一方で、出資企業は損害賠償を請求する権利も、中間評価協定に基づいて持っているトスカナ社は主張。一般的に出資企業は、WH 社が EPC 契約に違反した時点までに支払った金額の 25% まで賠償請求できるが、この場合の上限は約 17 億ドルであり、SCE & G 社の取り分は 9 億 4,000 万ドルになる。WH 社が支払えなければ東芝がこれを支援する立場にあり、東芝に直接、支払を求めることができるとの認識を明らかにした。

現在、サマー増設プロジェクト全体の建設進捗率は 63.4% で、物理的な建設作業は両機平均で 33.7% が完了。昨年 11 月現在のスケジュールで、2 号機は 2019 年 8 月、3 号機は 2020 年 8 月の完成が予定されていた。

ハンフォード・サイトで陥没したトンネルの埋め戻しが完了

米ワシントン州のハンフォード・サイトで汚染機器貯蔵用トンネルの一部が陥没した事象について、エネルギー省(DOE)の R. ペリー長官は 5 月 11 日、影響の拡大を防止するために実施した埋め戻し作業が安全かつ迅速に完了したと宣言した。次のステップとしては、さらなるリスクを軽減するための長期的方策を特定し、実行に移したいとしている。

同サイトでは 9 日朝、かつてのプルトニウム生産に使われた汚染機器の貯蔵用トンネルが約 20 フィート(約 6m)四方にわたって陥没しているのが発見されたが、汚染物質の漏洩および人が発生していない。職員は 9 日夜から、サイト中央部の「プルトニウム・ウラン抽出プラント(PUREX)」の東側、深さ約 8 フィート(約 2.4m)のトンネル天井部の陥没を埋め戻す準備を始め、10 日夕刻まで作業を継続。この間、約 500 立方メートルの土砂を 53 回にわたってトラック輸送しており、11 日には大方の職員が通常業務に戻る見通しになったという。今後は短期的に、長さ約 360 フィート(約 110m)のトンネル全体にカバーをかけるなどの追加措置を検討中である。

【英国】 議会、SMR 開発含め政府に原子力政策の策定を勧告

英国議会上院の科学技術委員会は 5 月 2 日に新たな報告書「原子力研究と技術：優柔不断の輪を断ち切る」を発表し、本格的な原子力利用国としての英国の将来を見据えた場合、欧州連合(EU)からの離脱問題や幅広い原子力産業戦略との関係上、総選挙後に発足する新政権には小型モジュール炉(SMR)の開発戦略も含めて確固たる原子力政策を打ち出す必要があると表明した。T. メイ首相は次回の総選挙を 3 年前倒して 6 月 8 日に実施する意向を表明したが、同委員会は歴代政権の優柔不断によって、英国の民生用原子力部門が有する潜在的な可能性は台無しにされてきたと指摘。2 年間の EU 離脱交渉期限が満了するまでに欧州原子力共同体(ユーラトム)に代わるものを準備できなければ、英国の原子力部門はリスクにさらされるとの危惧を表明したほか、原子力発電所の新設に必要な技術的スキルや既存炉の運転継続に必要な核燃市場との接点、および核融合研究における主導的立場を失うことになると警告した。また、英国では原子力関係の研究開発および技術革新に対する公的予算の割当レベルが米国やフランス、日本よりもかなり低いことが判明したと明言。英国が原子力研究開発のあらゆる分野で能動的でありたいのなら、新たな技術開発に多額の投資を行う必要があると強調している。

＜政府が取るべき緊急アクション＞

報告書によると、英国は長年にわたって原子力の民生利用を続けており、放射性廃棄物の管理や本格的な廃止措置でプロジェクトが進行中。経年化した民生用原子力発電所をリプレースする判断が下された一方、英国政府は原子力利用国としての将来に向けた重要局面を迎えている。SMR 開発も含めて、英国は今後到来する好機を捕らえる上で戦略的に重要な立場にあるが、こうした機会を最大限に活かすには政府が原子力産業を支えるアクションを取らねばならない。民生用原子力部門において、これまでの政権による政策決定の遅れは、国内原子力産業がそうした政策に効果的かつ短期・長期的に寄与していく能力に深刻なダメージを及ぼしたと科学技術委員会は指摘。政府が決断しなければならない点としては、英国が原子力発電所の設計者や製造業者、事業者になるべきなのか、あるいは外国製機器の使用となるのを抑えるべきかということになるが、いずれにしても政府に対しては明確かつ確固たる見解を持つことを強く要請。時宜にかなった判断が出来なければ深刻な影響が出てくると述べた。

政府がいったん、包括的な決定を下せば、明確な目標設定や時間枠の特定といった他の戦略的な判断は自ずと付いてくるというのが科学技術委員会の見解。英国が仮に、原子力発電所の設計者や製造業者になる道を選んだ場合、以下のステップが最小限、必要になるとした。すなわち、(1)英国内外で原子力発電所の新設を支援する新たな技術開発において、英国を魅力的なパートナーにするのに十分な規模と領域を持った国内研究プログラムの策定、(2)「第4世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF)」のような国際プログラムへの参加と貢献である。また、2050年まで安全・確実な原子力エネルギー供給を保証するために設置した原子力技術革新調査・諮問委員会(NIRAB)が大きな役割を果たしたことから、その継承組織を緊急に設置して原子力研究開発への投資から最高の価値を引き出していく必要があると指摘。以前、公表された5年間の民生用原子力研究プログラムに2億5,000万ポンドという割当は、適切なクオリティと妥当な適用可能性があるかと判断された研究プログラムに宛てるべきだとしている。

< SMR の開発戦略 >

科学技術委員会の見方では、将来の原子力産業にとってSMRは世界規模で重要なものになる見通したが、英国は現在、SMRの軍事利用分野において技術的優位にある。世界市場で明確なリーダーが不在ななか、英国にはSMRの設計・製造業者として市場に再び加わるだけの経験と専門的知見があるものの、国内SMR市場の規模が限られていることや、コスト削減の可能性があるとこの点から、同委員会としては外国パートナーとの合併事業を進めることが望ましいと認識。こうしたことを念頭に、政府は英国にとって最適なSMR設計の特定や開発ロードマップ作成のために2016年に実施したSMRコンペの結果を早めに公表すべきだとした。SMR戦略の決定が遅れば英国は二度と無い好機を再び棒に振ることになると警告しており、こうした遅れは民生用原子力部門における政府怠慢の最たる例だとも指摘。公的なコンペの日程表を管理しなかったことで原子力部門には悪影響が及んでいるとしたほか、政府が直ちに動かなければ、産業界においても必要な高い関心を維持できなくなると訴えている。

【フランス】

マクロン大統領、新首相に元アレバ社幹部のフィリップ議員指名

フランスのE. マクロン新大統領は就任した翌日の5月15日、北西部ルアーブル市の現市長でアレバ社幹部としての経歴を持つ共和党のE. フィリップ下院議員

(46)を首相に任命した。中道系無所属として当選したマクロン大統領は社会党のオランド前政権で経済・産業・デジタル大臣を一時期務めており、前政権のエネルギー政策を踏襲することを公約。原子力発電シェアを現在の75%から2025年までに50%へ削減することを目指した「エネルギー移行法」に沿った政策を進める見通したが、中道右派系の共和党から首相を迎えることで、左派と右派の両方から支持を得る狙いがあると見られている。

フィリップ氏は、マクロン大統領と同じくフランス屈指のエリート養成校として知られるパリ政治学院(ENA)卒。2002年から2004年まで共和党の前身である国民運動連合(UMP)で幹部を務めたほか、弁護士事務所勤務を経て2007年から2010年まで原子力総合メーカーのアレバ社で広報部長を務めた。2001年から2010年までルアーブル市の副市長、2010年10月からは市長に就任していた。フィリップ氏が首相としてマクロン政権に加わることにについて共和党は同日、これを遺憾とする声明文を発表した。「個人としての判断によるもの」としており、同党がマクロン大統領と連立政権を組む考えはない点を強調している。フランスでは6月11日と18日に国民議会(下院)選挙が行われる予定で、定数の577議席中、マクロン大統領の設立した新政党「前進」がどれだけ議席を獲得するか注目されている。

【ドイツ】

GNS社、使用済燃料の中間貯蔵事業を連邦政府に移管

ドイツ国内3つの使用済燃料集中中間貯蔵施設のうち2つを操業する原子力サービス会社(GNS)は5月8日、これらの施設と事業を連邦政府の環境・自然保護・建設・原子炉安全省(BMUB)に引き渡すことで両者が合意したと発表した。GNS社はドイツの原子力発電事業者などが出資する民間の放射性廃棄物処理・原子力施設設計・建設・廃止措置企業だが、昨年12月に成立した法案により、廃棄物の中間貯蔵と最終処分に関する経費を事業者が負担する一方、処分場の建設や操業といった事業は連邦政府に移管することが決定。今回の合意により、アーハウスとゴアレーベンにあるGNS社の中間貯蔵施設と従業員約80名、およびエッセンにあるGNS本社の従業員中、約70名は、8月1日から中間貯蔵の事業責任とともに連邦政府の新会社「連邦中間貯蔵会社(BGZ)」に移されることになった。GNS本社の運営および、同社で他の放射性廃棄物事業に携わる約450名の従業員はこれまでどおり、GNS社の管理下に置かれる予定である。

昨年未だに成立した「放射性廃棄物管理のための責任分

担刷新法]においては、中間貯蔵と最終処分事業に要する経費合計 235 億 5,600 万ユーロ(約 2 兆 9,200 億円)を原子力発電事業者 4 社が支払うことが定められた。内訳としては、中間貯蔵施設とキャニスターの製造、最終処分場の建設・操業に必要な費用 173 億 8,900 万ユーロ(約 2 兆 1,600 億円)を、法案成立後 7 か月以内に政府の新設基金に払い込む。次いで 2022 年までにこの額の約 35.5%にあたる 61 億 6,700 万ユーロ(約 7,650 億円)を、利子などで経費が超過した場合の「リスク保険料」として支払うとされた。

ドイツではまた、「放射性廃棄物管理組織の再編法」と「高レベル放射性廃棄物最終処分場のサイト選定法」に従って、廃棄物管理体制の改革も進行中。BMUB の下に関連の許認可発給・監督機能を持った連邦放射性廃棄物処分安全庁(BfE)が新たに設置されたほか、これまで BMUB の監督下で処分場の建設・操業責任を担っていた連邦放射線防護庁(BfS)が今年 4 月、連邦放射性廃棄物機関(BGE)社として再編された。BfS 従業員と廃棄物処分業務を BGE 社が引き継ぐことになったのに加え、実際の処分場建設・操業業務を請け負っていた民間の DBE 社も、数か月以内に BGE 社に統合される予定である。BGE 社は 100%国有の廃棄物管理実施主体として、放射性廃棄物処分場の候補地選定手続から設置・操業まですべてを担当。低中レベル廃棄物の試験的処分が行われたアッセ II 研究鉱山と東独時代に操業されていたモルスレーベン低中レベル廃棄物処分場(現在は廃止措置準備中)の管理、コンラッド低中レベル廃棄物処分場の建設計画も受け持つことになっている。

【EU】

フォーラム、「クリーン・エネルギー目標達成に原子力は不可欠」

フォーラム(欧州原子力産業会議連合)は 4 月 18 日、欧州委員会(EC)が昨年 11 月に提案した政策パッケージ「すべての欧州市民にクリーン・エネルギーを」に対する意見書を公表し、2050 年までに EU 経済の 80%以上を低炭素化するという EU 目標の達成に原子力発電は欠かせないとの見解を明らかにした。

EC の政策パッケージでは、クリーン・エネルギーへの移行が未来の成長分野である点を指摘しており、これを EU 域内における具体的な産業強化の機会とするため、(1)エネルギーの効率化を最優先とする、(2)再生可

能エネルギー分野で世界のリーダーとなる、(3)立場の弱い消費者にとっても公正な取り決めを提供する一などの政策を提示。これらに基づいて 2021 年から年間最大 1,770 億ユーロ(約 20 兆 6,300 億円)の官民投資資金を活用することで、今後 10 年間に域内総生産が最大 1%拡大し、90 万人分の雇用を新たに創出できるとしていた。フォーラムは「EU が 2030 年までの気候変動・エネルギー政策の目標を達成する際、これらの政策により首尾一貫した最適なアプローチが保証される」と評価した一方、これには原子力産業界の見解を考慮することが条件になると強調している。

フォーラムはまず、EC の政策パッケージにおける狙いとして以下の点に言及。すなわち、エネルギー市場の機能を改善し、気候変動対策やエネルギー関係の目標達成努力を脅かすことなく、全エネルギー技術間で公平な競争の場を保証することである。そのためには、費用対効果の高い低炭素化や、最終消費者に適正価格の電力を供給できる効率的な電力市場、および低炭素技術に対する投資の促進が必要だとフォーラムは強調。また、EU 排出権取引制度(ETS)の重要性を強調するとともに、ETS と矛盾する政策が取られないよう配慮すること、特にエネルギー消費量の 30%削減という法的拘束力のある EU 目標については重要であるとの認識を示した。

フォーラムとしては、法的拘束力のあるシステム(ガバナンス)や電力市場の設計、エネルギーの効率化、技術革新、およびエネルギー価格とコストといった課題について、EU 加盟国に対する提案の策定に重点的に取り組む方針。ガバナンス関係では、炭素強度を定量化することや、気候変動・エネルギー政策の EU 目標達成における原子力の現在および将来的な貢献について明確に説明することを各国に要請すべきだとした。また、市場の価格シグナル(動勢)に基づいて低炭素電源への大規模投資が長期的に行われるような EU 枠組の設定を訴えていく。エネルギーの効率化については、温室効果ガスの削減努力を損なわない 1 次エネルギー消費量を計算するという効率的アプローチを取る考え。技術革新関連では、原子力部門で EU が技術的、産業的なリーダーシップを維持するための戦略を勧告する。エネルギー価格とコスト面については、フォーラムが 2015 年に提出した勧告に沿って、新規建設コストなど原子力関係の数値を改訂するよう EC に求めるとしている。

座談会

廃炉関連の人材育成には戦略的な連携を 若手指導者、学会の情報共有と発信に期待



東北大学	阿部 博志
福島大学	兼子 信吾
福井大学	川崎 大介
福島高専	鈴木 茂和
東京工業大学	塚原 剛彦
電力中央研究所	渡邊 保貴
(司会)原産協会	木藤 啓子

これから30年以上もかかる福島第一原子力発電所の廃炉。その実施には多くの技術的な課題がたちはだかる。長期にわたるこれらの課題を克服するために、人材育成は欠かせない。ここでは文部科学省が実施している廃止措置研究・人材育成等強化プログラムに関わっている大学や高専の中堅あるいは若手の指導者に集まっていただき、この問題を議論した。

各拠点での取り組みを共通化できないか

木藤 本日は皆様が手がけられているプロジェクトの概要やお互いの連携状況、かかえている課題、さらには原子力学会などへの期待をお願いします。

塚原 文部科学省は福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた研究と人材育成を推進するため、平成26年度より廃止措置研究・人材育成等強化プログラムを実施していますが、東工大はこのプログラムの第1期で採択されている大学の一つです。

東工大は昨年、大きな組織改革を行いました。我々は新たに先導原子力研究所として発足し、「原子力」という名前を残すことができました。東工大における廃止措置プログラムでは、研究と人材育成を平行で行っています。研究においては、核種分析や除染から遠隔計測、臨界安全に至るまで、廃止措置において重要な全ての課題を対象としており、東京都市大・芝浦工大・東海大等の近隣の大学と連携して総力戦で進めています。

また、研究に合わせた教育も行っています。具体的には、廃止措置工学に係る実践的な教育専門コースを専攻内に設置し、専攻の学生であれば、誰でも履修できるようにしました。廃止措置に関する講義だけでなく、核燃料物質・放射性物質を用いたデブリ化学・材料工学実験やシビアアクシデントに関するロボット遠隔計測実験も

実施しています。また、東京電力やアトックスでのインターンシップを適宜実施しており、これらをすべて修了した優秀な学生には奨励賞を授与しています。

先日、この第2期生の修了者が出ました。受講した学生は原子力分野に就職する人がかなりいます。人材育成をしながら研究成果を出すというサイクルはできつつあるという状態です。

今後については、このプログラムが終了した後、この内容を、どう継続していくかが、重要な問題だと思っています。そこでは、マンパワーだけでなく、実験実習やインターンシップ等に係るコストの問題も関わります。

一方、大学でやっていることや教えていることと、実際の廃炉の現場で役に立つものとは、まだ乖離があるように感じています。例えば日本原子力研究開発機構(JAEA)や国際廃炉研究開発機構(IRID)に就職した後も、そこで鍛え直していただかなければならない。この乖離を埋めることも、廃止措置においては必要な課題だと思っています。

木藤 コースを修了したのはこれまで、何人ぐらいですか。

塚原 10人程度です。修士の卒業生は毎年30人から40人程で、そのうち廃止措置にかかわるコースに所属するのは5~10人くらいです。

木藤 現場の方とこのコースとの交流のようなものはあるのですか。

塚原 プログラムによるフォーラムや大学ごとのフォーラムを行っているほか、東芝を始めとする企業の方に講義をしてもらっていますので、交流はあります。ただし、実技という意味ではまだ足りないという気がしています。

阿部 私は東北大学の量子エネルギー工学専攻(旧原子核工学科)に所属しています。本事業では、東北大学の伝統的な強みである材料分野の研究ポテンシャルと廃止措置の現場ニーズを踏まえて、「格納容器・建屋等の健全性確保のための基礎・基盤研究」と「燃料デブリの処理と放射性廃棄物の処分に関する基礎・基盤研究」の2本柱で研究を推進しています。

人材育成では「原子炉廃止措置工学プログラム」を構築し、例えば集中講義「原子炉廃止措置工学概論」や「産学連携セミナー」において IRID や東電、あるいは海外の方から、福島の実状や研究ニーズなどについて講義をして頂いたり、原子炉施設の現地調査を実施しています。

東北大学では福島第一原子力発電所(1F)事故対応について、総長のリーダーシップの下で全学横断的に取り組んでいます。原子力の専攻に加え、材料や機械、土木・建築などを含めており、福島大学、福島高専の研究者にも協力頂いています。そして昨年12月に東北大学の全学組織として立ち上げた原子炉廃止措置基盤研究センターは、現在は文科省の当該プログラム推進を主体としていますが、『通常炉の廃止措置に資する研究開発も含め、長期にわたる廃止措置に対して全学を挙げて継続的に貢献する』という強い決意が具現化したものと理解しています。

また、文科省プログラム実施者の情報交換の場である次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC)は東北大学の提案から始まったもので、本プログラム実施拠点全体の活性の高さをアピールできる場として根付いています。

一方、東北大も含め各拠点では、インターンシップや集中講義、施設現地調査などのさまざまな取り組みを行っています。しかし、こうした取り組みは限られたリソースで賄わなければいけないので、学生も含めて本事業推進メンバーの負担を極力軽減する仕組みが必要と考えています。また IRID や東電の方々に講演頂くにしても、各大学がそれぞれ依頼すれば、先方の負担も決して小さくないと思います。

人材育成は投資ですから、効率的に運用して大きなベネフィットを得ることを志向すべきです。そのためには、各拠点で共通できるところは共通にして、効率化を図ることができればと思っています。

木藤 今の話には、頷かれている方も多かったです。

廃止措置には多くの分野の連携が必須

川崎 私は福井大学の原子力・エネルギー安全工学専攻で講師をしています。

福井大学の原子力教育は最近まで大学院にしかなかったのですが、2016年の工学部の改組に伴って、学部での原子力教育を意欲的に起ち上げました。複数の学科が統合されて、機械工学コース、ロボティクスコース、新たに加わった原子力安全工学コースからなる機械・システム工学科が生まれました。さらには学修一貫教育、つまり学部での専門教育と修士課程をまとめた一貫教育の準備を進めており、より高度な原子力人材育成を模索している状況です。

私たちが参画している文科省のプログラムは阪大、京大、九大、大阪府立大学、福井工大と JAEA、若狭湾エネルギー研究センターの連合で行っており、福井大学が取りまとめを行っています。

その中で、廃炉のマネジメントとシナリオの検討や燃料デブリの分析、ロボット開発、非破壊検査や放射線管理・計測等に関する研究と人材育成をやっています。

廃止措置は様々な専門家が集まる総合的な分野です。このため、機械やロボティクス、建築などの先生方にも参画していただいております。こうした多分野間の連携も重視しています。

阿部 その廃止措置は1Fのみですか。それとも通常炉の廃止措置も含めているのですか。

川崎 福井大学ではその両方を手がけています。福井県内にある多くの原子力発電もゆくゆくは廃炉を迎えますから。

鈴木 福島高専はいわき市にあります。高専は高校と短大が一緒になったようなもので、5年間の一貫教育をしています。その本科の上に2年間の専攻科があり、そこを終えると大卒と同じく22歳で大学院につながります。

福島県の浜通りにある高等教育機関で工学系は、福島高専だけしかなく、文部科学省のプログラムには福島高専が中心となって複数の高専との連携で申請しました。そのために連携協議会を作り、その協議会には現在、31の高専が参画しています。この枠組みを使って福島高専がハブ機能を果たしながら、廃止措置に関する研究や開発、人材育成を進めています。

一方、福島高専はビジネスコミュニケーション学科という全国の高専でも珍しい文系の学科を持っています。そこでは経済や英語、経営に関する教育が行われていますが、文系の特徴を持たせて作業安全性にモチベーションがどう影響を与えるかというリスク評価や、SNS やツイッターでどういう情報が発信されているかなどを、ビッグデータをもとに解析するような研究もしています。

人材育成面では原子力発電基礎、放射線基礎、廃炉口

ボット概論、廃炉と社会、廃炉工学、原子力事故総論と合計で6つの講義を立ち上げました。平成28年度には1,000人いる学生のうち延べ約300人が、これらの講義を受講しました。1Fの地元なので、学生の興味は高いようです。将来の進路とは無関係に、福島は今どうなっているのかを自分で説明できるようになりたい、もっと勉強したいということで授業を受ける学生が多いです。

去年から1Fの廃止措置に特化したロボコンも始めました。JAEA 橋葉遠隔技術開発センターの場所を借り、一定の課題を与えてそれをクリアできるロボットを学生に作ってもらい、全国から集まった13校15チームでコンテストを行いました。廃炉が技術的に興味深いと思ってもらえれば、将来の人材確保につながると期待しています。

参加した学生に対しては1Fの視察とJAEA 橋葉遠隔技術開発センターでの廃炉に関する研修も、同時に行いました。

西日本の学生にはいまだに福島は怖いというイメージが残っていたようですが、実際に現場を見てもらうと「普通に暮らしている」という印象が変わりました。

塚原 他県から入学して来る学生はいるのですか。

鈴木 福島高専の場合は1学年が定員200人で、その8割がいわき市から来ており、それに相双地区や中通りからの学生が加わります。他県からは北茨城から20人ぐらい来ています。

渡邊 志望者の人数は事故前後で変わりましたか？

鈴木 あまり変わっていません。避難者の方々の中には、子供もなるべく近くの学校に行かせたいという思いもあったようです。ただし事故直後は海外からの留学生は激減しましたが、去年ぐらいから少しずつ増える傾向にあります。

兼子 福島の学生さんは、地元志向が強いですよね

鈴木 1学年200人中100人が進学し、その中の70人位が国立の大学3年次に編入し、30人は専攻科に残ります。一方で就職する学生も100人ほどで、そのうちの1割が原子力関係の職場に就職します。自治体に就職する学生もいます。学生にはネットなどの情報だけに頼るのではなく、事前に自分で現場を見ることを勧めています。インターンシップの場合も、原子力関連だけでなく、民間企業や自治体などにも複数に行かせるようにしています。原子力の知識をもつことに加え、そうした複眼的な経験が、いろいろなところで役に立つのかなと思っています。

放射線に対する不安払しょくをめざす

兼子 福島大学が手がけているテーマは「マルチフェーズ型研究教育による分析技術者人材育成と廃炉措置を加速する難分析核種の即応的計測法の実用化に関する

研究開発」というもので、これは大きく二つに分けられます。

一つはリーダーの高貝先生による化学分析で、包括的に核種を分析すること、これができる技術者の育成をすることです。もう一つはピラミッド型の人材育成で、最前線に関わるような仕事や、市役所などの自治体や学校で将来、働く可能性がある人たちを対象としたものを行っています。また、これらの授業はシステム理工学類だけでなく、文系や教育系に所属する学生に対しても行っています。

僕は事故後に福島県に来ました。もともとはDNAのミューテーション(突然変異)を研究していたので、当初は原子力のことはわからないし煩雑な問題があるので、放射線の問題には関わるまいと思っていました。

けれども地元の人とお話をしたときに、放射線に対して非常に不安だと言われたことがあります。同時に、誤解にもとづく風評がすごいこともわかりました。これは、是正する必要があるということで、関わり始めました。

私の専門である生物に関して言うと、放射線による影響と人が避難したことによる影響とが混在しています。本来放射線とは関係ない影響までも放射線による影響というように思われてしまうことも多々あります。放射線の影響やそれ以外の影響を研究することで、そういうものを峻別することを研究しています。そういう研究を積み重ねることによって、今の福島県で市民の方々が冷静に暮らしていけるようになることや、将来的に廃炉に貢献できる人材の育成をめざしています。

1Fでは今も数千人もの人たちが働いています。現場で頑張っている人たちが不利益をこうむらないようにすること、むしろ応援してあげるようなことがこのプログラムから育ってくれるとうれしいと思っています。

阿部 福島にいて、科学者として見過ごせない問題がたくさんある、そして福島の人たちから本当に必要とされているということですね。

兼子 その研究の過程で、興味深いことがらも発見しました。生物の進化で見るとDNAの変異の蓄積というのは根源的なことなのです。突然変異というと、多くの人は悪い印象を持ちますが、突然変異とは、進化を形づくる非常に重要なことなのです。生物学ではそうした側面をも研究対象としています。

木藤 DNAの変異の蓄積が進化にかかわるのですか。

兼子 非常に長い時間的スケールですが、生物にDNAの変異が蓄積しなければ、僕たち人間も生まれていません。福島の野生生物では放射線の影響でDNAの突然変異が蓄積していると思っている人がいますが、おそらく蓄積はしていません。実際に突然変異が蓄積したということをDNAの配列ベースで示した確固たる研究はまだありません。福島県内の放射線のレベルではそれ

は起こらないだろうと確信しているのですが、それを実証しなければならないと思っています。

とはいえ、ないことを証明することは難しい。ないことをひたすら実証していくことを積み重ねるという作業なのです。ともあれ、学生を巻き込んだこのプログラムを通じて、福島に住む人たちにより影響がもたらされることができればと思っています。学生にとっては、自分で手がけたデータが世間で言われている誤解を払拭できることにつながれば、喜びになると思います。

木藤 社会貢献に直接つながりますね。

鈴木 福島大学の卒業生には、県内では教員になる先生が多い。彼らに原子力や廃炉や放射線の勉強をしてもらえれば、小中学生にいろいろ教えられるので、それは大きな意味があると思います。

兼子 次世代を見据えた取り組みですね。

渡邊 私は1Fで水素爆発が起きたときに、実家の福島にいて、とても怖い思いをしました。何が起きているかわからないから、その分、余計に怖かったのだと思います。不安を払しょくするためにも最前線で状況を理解したい、二度とそういう思いをしないように何とかしたい、という思いを持って電力中央研究所を志望し、地盤工学を専門に、放射性廃棄物処分の研究に従事することになりました。

地盤工学会では震災後に、自分たちは何をすべきかということを議論しました。その頃、1Fでは、地盤工学会の会員でもあるゼネコンの方々など、多くの人が現地で作業をされていました。けれども、土木分野の人が現場で頑張っている、というニュースは少なかった。業界として、そのことをアピールしたい気持ちもありました。

地盤は生活や活動の基礎となるものです。1Fでも、作業環境を安全にし、構造物を安定的に保つという意味では、地盤はとても重要です。さらに言えば、土の定義には水も含まれます。そのため、中性子線やガンマ線に対しても遮へい能力があります。土の組成をバランスよく調整すれば、現場の状況に見合った遮へい材料になりますし、そのようなことでも地盤工学は役に立てると考えています。こうした観点を持って、地盤工学会はこのプログラムに応募しました。地盤工学会の会員数は多く、バリエーションに富んだ人間関係や連携が作れます。業界として人材育成を長く続けられる点で、特徴的な機関だと思っています。

人材育成を継続することは難しいと思いますが、教育の軸となれる教科書があれば、それを使い、発展させながら、学会でも継続的な取り組みができるのではないかと考えています。廃炉地盤工学と呼んでいますが、従前の地盤工学を応用して廃炉に関する教科書をつくることを目指しています。

そのためには研究も必要ですが、その研究は早稲田大学と千葉工業大学が中心となって進めています。例え

ば、土の水分を調整しながら遮蔽実験を行う等、地盤工学にとっては新しい教育への取り組みも始まっています。

一方で二つの課題を感じています。一つは、学会活動に若手が参入しにくいこと。新人職員は通常業務で手一杯なので、ボランティアの側面が強い学会活動にはなかなか参加できない。民間会社には土木と原子力の両方を勉強している若手がいるようなので、そういった方々を巻き込めると非常に心強い。

二つ目は若手とベテランの世代間の意識の差を感じることです。1Fに対する理解度や、社会経験がまるで違うので、若手はベテランの思考やモチベーションになかなか追いつけていない。上から与えられた課題をこなすだけでこのプロジェクトが終わってしまうことは避けたい。そのためには学会だけではなく、大学や高専と横の連携を深めていかなければと考えています。

なお地盤工学会では1F事故後、会長のリーダーシップで委員会を立ち上げました。六、七十人の委員から構成されており、原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)やIRID、東電の人を招いて定期的に意見交換をやっています。今のプログラムがあるうちに、次の展開につながる取り組みの土台をいかに築くかが学会の課題だと思っています。

木藤 学会に若手の人がなかなか来てくれないという話は、たぶんほかの学会も共通だと思います。原子力学会にはJYGNという若手の活動があります。

渡邊 地盤工学会にもそのようなものはあります。地盤工学を専門とする若手が集まって毎年合宿をしており、その回数は38回にも及んでいます。廃炉地盤工学の若手の活動として特徴を明確にして、どこでも似たことをやっている若手が感じてしまわないように、工夫しなければならないと個人的には考えているところです。

塚原 1Fの廃止措置では発生する膨大な放射性廃棄物を何とか処分しなければなりません。どう処分するのがベストなのか。クリアランスをどうするのかなども含めると、地盤工学会の役割は、人材育成的にはむしろ一番重要なのかもしれません。しかも、この話は長期に及びます。若手がないという話は将来、深刻な事態を招くかもしれません。

廃止措置は未知のフロンティア研究

木藤 ここまではそれぞれの取り組みの特徴や、共通の課題を紹介していただきました。それらの課題の深堀と、その解決策の話に移りたいと思います。

指摘いただいた課題の一つは、プログラムが5年で終わった後をどうしていくかという点。もう少し喫緊なところだと、人材育成をもう少し効率的にやれないかということでした。

阿部 学生に向けて前向きな強いメッセージを出した

いです。1Fのエンドステートはこうあるべき、という議論はなされていますが、一方で本事業に代表される廃止措置研究開発に参画した人材、特に学生はどういった実力を身につけるのか、またどんな新しい技術が生み出されようとしているのか、といった観点からのエンドステートについては十分に議論・発信されていないと感じています。我々の拠点では、本プログラムを通して身につけて欲しい能力について明記していますが、それこそ国・文科省からこういったメッセージを出してもらえば、学生や若手がより一層主体的に研究に取り組めると思います。

木藤 それは国を挙げた重要なプロジェクトであるということですね。

阿部 本事業の重要性を説くときに、よく「1Fの廃炉は30年、40年かかる」と言われます。しかしそれだけでは、一部の学生は「ずっと廃炉に関わる仕事のみをやるのか」、もしくは「1Fの廃炉が一区切りついたときに、まだ現役であった場合は他に活躍の場があるのだろうか」と不安を感じるそうです。それは全くの誤解で、現在は廃止措置を対象とした研究であっても、その過程でさまざまな新発見や他分野で活用できるスピノフが数多く生まれてきます。そのことを発信できればと思います。

鈴木 学生には「廃炉に使われる技術は宇宙開発と同じだ」と言っています。例えば遠隔技術は廃炉だけではなく、放射線の強い宇宙でも使える。

阿部 東北大学の先生は、現代のアポロ計画だとおっしゃっていました。廃止措置を特別扱いせずに、あくまで大きな技術的なチャレンジがそこにある、と冷静に捉えれば良いのではないのでしょうか。その上で先ほど述べたように、“大いに夢を語る”役割が必要です。

木藤 そういう意味を含めた何かいい言葉やキャッチフレーズをつくれなんでしょうか。

阿部 このプログラムを契機として、学生たちがどのように学び、どのように成長していったか、そのことが評価されればと思います。それは必ずしも廃炉に関わる分野に何人就職したかという話ではありません。

兼子 廃炉について、ある程度わかる人が世の中のさまざまな分野にいれば、問題や不安が過度に広がることをある程度、防ぐことができると思います。

川崎 最終的には、いろいろな周りの分野で働いている人たちに少しでも理解を深めてもらうことが、結局、福島廃炉を進めることになるのではないかと思います。

木藤 皆さんがやられていることがらが、私たちにもっとうまく伝わるとよいと思います。JSTのホームページを見ても、なかなかよくわからない。その内容をうまく普通の言葉に変えてくれるコミュニケーターがいるといいのではないかと思っています。例えばこのプログラムのディレクターなどの人が、わかりやすい解説をつけていただければと思っています。

塚原 例えば小中学生向けのオープンキャンパスのようなことをやり始めると、仕事が恒常的に増えてしまいます。さらにそれを、各大学で行うとなると、労力が大変になります。そのような取り組みは重要なのですが、効率化を考えて一括でできないでしょうか。

阿部 各大学や機関の取り組みに横串を刺すような形で総括し、例えばインターンシップの窓口を一つ作ってはどうか。公平性を担保しつつも、それぞれの拠点の特色・強みを勘案して、受け入れ先・人数に重み付けするなどの調整を図って効率化が図れると、みんなとても助かると思います。

木藤 それはいい方法だと思います。

渡邊 地盤工学の立場で考えると、原子力分野にインターンシップに行きたくても、その伝手が少ないように思います。インターンシップ担当の先生をはじめ、学生の希望と行き先との調整も大変なはずです。各拠点にはそれぞれ得意、不得意な分野があるので、それで過不足を補うような連携ができればと思います。

国は科学技術政策や人材育成策を明確に

阿部 これから1Fの調査・研究開発が進むにつれ、廃止措置工程が大きく変わることでありえます。後継事業では、現場の状況に応じてその都度優先度の高い研究開発に取り組めるよう、研究項目やスケジュール、予算の使い方などに極力弾力性を持たせるようなプログラムにして頂けると助かります。加えて、人的資源や資金は有限なので、その中でそれらをどう配分し投資すれば、最もよい成果がでるかという俯瞰的な戦略を練ることができる人が必要です。それぞれの拠点の特徴を生かし、それらの差異を尊重しながら連携を進めていく。

木藤 すばらしい。

塚原 うちの専攻では、アジア各国と原子力教育ネットワークをつくっています。原子力工学・廃止措置工学に関わる人材育成を目的に、外国の大学で出張授業をしたり、ネット講義をしています。ただし、これらのマネジメントをする教員は大変です。

兼子 僕らが学生のころは、大学の先生はもっとのんびりしていました。でも、今の学生はそういう印象を持っていない。

塚原 疲弊しているように見えるかもしれません。

阿部 学生は先生の説明ではなく、背中を見ている。

木藤 学生を指導されるなかで感じておられる本音のお話ですね。

阿部 皆多忙のため、単年度でプロジェクトを回すので精一杯で、ロングスパンで見たり考えたりという余裕がなくなっていると感じています。そんな時に学会の知恵や歴史をふまえた教訓が使えないかと思います。

木藤 その点はこの記事に、しっかりと書かれます。

阿部 原子力の黎明期からルネッサンスを経て今日に至るまで、それぞれの時期にいろいろなことがあったと思います。そういうときにどういう対応がなされてきたか。これは原子力に限らず、他の科学技術でも同じことだと思います。そうした先人の知恵や教訓から学ぶ。ロングスパンで物事を見る視点が大切だと思います。

木藤 根本的には、国は科学技術分野をどう推進していくのかという本当の方針をきちんと持っているかという問題があるような気がします。国の委員会で原子力の人材育成を検討していても、本当に必要な分野についてきちんと政策をつくっているのだろうか。今日のような皆さんが肌で感じた印象というのはとても大事だと思います。

さて、プログラムが終了した後についてはどう考えておられますか。

阿部 5年で終わるのではなく、もっと長期的かつ戦略的に、後継事業のあるべき姿を議論している、と国から発信してもらえれば、皆腰を据えて研究・人材育成に取り組めると思います。

塚原 大学がサポートする方針を示していれば、継続的にいろいろなことができると思います。

鈴木 高専は大学に比べると予算規模が小さいので、学校からのサポートはありません。この事業が終わったら、例えば自治体なり企業なりからの寄附講座をつくらないと、たぶん回らないと思います。そのための相談をすでに少し始めているところです。

川崎 私は廃止措置シナリオの評価やコスト評価、安全性評価をやっており、実験はしていないので研究でお金は余り使いません。このプログラムの予算を使って、国際セミナーを開いたり、福島に西日本の学生を連れて行ってセミナーを開催したりしています。そこでこれからの新しいカリキュラムづくりの試行錯誤をしています。こんな授業や討論のスタイルだったらものになるのではというような試験を毎年やっているようなもので、これを今後の大学での教育に活かしていけたらと考えています。

海外との情報交換や教育の連携にもこのプログラムを利用させていただいています。国際セミナーの他にも、ドイツやアメリカの専門家や学生を交えて、スカイプによる合同セミナーを開き、情報交換や研究紹介をしています。廃止措置は多分野の連携が重要なので、海外の専門家とも互いに支え合える人脈を

作っておきたいと考えています。

もちろん、ドイツやアメリカでうまくいった技術や経験を日本でそのまま使ってもうまくいかない時があります。その場合には日本に適用するための工夫が必要になります。ともあれ、そうした連携は重要だと思います。

塚原 実験実習を行うと、費用が結構かかります。プログラムが終了すると、講義はできますが、インターンシップと実習を今のレベルで継続できるかどうかは疑問です。

木藤 廃炉についての講義は共通の部分があると思うので、基本的なことを学べる共通の教科書のようなものを作るというような動きはないのですか。例えばここにいる人たちで。そのようなものに対する必要性や可能性はどうでしょうか。

塚原 確かに、そういうわかりやすいものがあると良いとは思いますが。

誰を対象として、どういうことをめざすかという戦略が必要ですね。子供向けか、市民向けか。あるいは私たちの専門分野に就職してほしいためか。

阿部 教科書をつくるのであれば、目的の明確化が必要です。あくまで手段として教科書があるという位置づけにしないと。例えば今、放射線に関することさらに不安に思っている人たちが、そのテキストを見れば不安が払拭できるというようなことであれば、作成する側のモチベーションも上がります。相手をイメージしてやるということかなという気がします。特に廃止措置は対象がはっきりしている、実問題なので。

学会は情報共有や発信のハブ機能を

木藤 原子力学会やほかの組織に対する要望などはありませんか。

塚原 国は短期的なプロジェクトばかりでなく、長期的な人材育成プランや戦略を出してほしい。学会が国に対し、そのようなものを出してくれるよう働きかけてく



左から鈴木氏、兼子氏、渡邊氏、木藤氏、塚原氏、阿部氏、川崎氏

れると、効果があるように思う。さらには個々の大学ではできなくても全大学連合でできるようなプロジェクトであれば、それができるように学会が音頭をとって情報交換や連携を図ってほしいと思います。

大学内の核燃施設や RI 施設は老朽化しており、施設を維持管理するだけでも大変な労力を要しています。廃止措置に係る人材育成を継続していくためには、このような施設に対する補助も不可欠だと思います。現在、学会の下に、大学の核燃研究施設の整備・統廃合を検討するような部会をつくり、これら施設の在り方を国に提言する活動を進めています。学会からどんどん提言して欲しいですね。

渡邊 この問題については原子力学会が核となるべき立場にあると思います。地盤工学や土木はこれに附带的な立場になると思います。

阿部 原子力発電プラントの腐食の分野では、高度に水質管理された、きれいな環境における金属材料の腐食を取り扱ってきました。しかし 1F の事故時の水環境はそれから大きく逸脱していたわけです。そのため化学などの異なる分野の知見を借りて、腐食対策を講じる必要があったわけです。ぜひ原子力学会は広く張ったアンテナと人間の繋がりを活用して、他学会に積極的に働きかけるなど、文字通りさまざまな英知を結集していただきたい。

渡邊 地盤工学会の人間は精いっぱい勉強しています。ここなら役立てるかもしれない、サポートできるかもしれないと頑張っているのですけれども、それが本当に使えるかどうか、それがシナリオに沿ったものなのかどうかというところには、構想が及んでいないかもしれません。研究成果や開発技術の実際的な使い方や、今後目指すべき方向などについては、原子力や機械などの人たちとも連携を図って、議論し、確かめ、軌道修正しながら進めていきたいと望んでいます。

少しずつですが、このプロジェクトが始まってから、他分野の人と交流する機会が増えました。様々な立場や専門の人たちが、もっと有機的に結びつくことが理想だと思います。

鈴木 この辺りの事を原子力学会が中心となってやって頂くのが良いと思います。

阿部 私たちは現場の役に立ちたいと思ってやっているの、どこが意思決定して、どこが最新の情報を持っているか、そうした情報がほしい。それがないと、全く的外れなことをやってしまう可能性があります。私たちが筋を外していないかどうか、ジャッジする人、あるいは現場ニーズと研究シーズのマッチングを専門に行ってくれる方がいてくれると助かります。

木藤 本日は、中堅、若手の先生方より、学生指導や企業などとの連携の現状、感じておられる課題や提案を率直にお話くださりありがとうございました。プロジェクトの特長や共通項が多層的に描き出されたように思いました。多くの読者にこの記事を読んでいただき、息長いサポーターになってもらえたらと思いました。

(2017年3月30日実施、編集協力：佐田 務)

編集部注：文科省の廃止措置研究・人材育成等強化プログラム事業は東大を含む7拠点で実施中ですが、東大は今回、日程の都合で参加がありませんでした。

阿部博志 (あべ・ひろし)

東北大学大学院工学研究科・工学部量子エネルギー工学専攻 助教

兼子信吾 (かねこ・しんご)

福島大学共生システム理工学類 准教授

川崎大介 (かわさき・だいすけ)

福井大学学術研究院工学系部門 原子力安全工学分野 講師

鈴木茂和 (すずき・しげかず)

福島工業高等専門学校機械工学科 准教授

塚原剛彦 (つかはら・たけひこ)

東京工業大学科学技術創成研究院 先導原子力研究所 准教授

渡邊保貴 (わたなべ・やすたか)

電力中央研究所 主任研究員・早稲田大学 非常勤講師

木藤啓子 (きとう・けいこ)

日本原子力産業協会人材育成部 総括課長

原子力関連施設の作業者の放射線疫学調査研究 INWORKS 疫学調査研究

仏英米3カ国の原子力関連施設の中性子被ばく者と内部被ばく者を含む放射線作業者に關する放射線疫学調査研究 INWORKS の結果が、2015年に発表された。低線量、低線量率の遷延被ばく状況での光子による外部被ばく線量とがん死亡率増加の統計的有意性を示すデータが得られた。そして100mGy以下の低線量域でも全線量域のがん死亡リスクに近い値が得られたため、低線量被ばくのデータでの有意な放射線リスクが確認されたとされた。しかし、中性子被ばくと内部被ばくの線量評価は行われておらず、いくつかの課題が残された。

KEYWORDS: *retrospective cohort study, cancer, leukaemia, colon dose, red bone marrow dose, absorbed dose, neutron, internal contamination*

I. INWORKS コホートの概要

Hamra らは INWORKS (the International Nuclear Workers Study) コホートの概要を以下の様に記載している¹⁾。INWORKS とはフランス(仏)、イギリス(英)、アメリカ(米)3カ国の原子力関連機関の放射線作業者の固形がん、血液のがん、ならびに循環器系疾患(虚血性心疾患、脳血管系疾患等)による死亡率と長期間に亘る光子外部被ばくによる低線量被ばくとの関連性を調べる後ろ向きコホート疫学研究¹である。本稿ではとくに何も記載のない放射線被ばくはすべて光子外部被ばくのことである。この研究の代表的な先行研究として、2005年に公表された原子力産業等の放射線作業者のがんに関する共同研究(IARCⁱⁱ 15カ国合同コホート解析研究または15カ国研究)がある²⁾。この15カ国のうち、仏、英、米3カ国は原子力開発の開始が早い、最も長期に亘る原子力作業者の疫学のデータを持つ中核的な国であり、15カ国研究コホートのうち、人・年(観察対象人数(人)に観察期間(年)をかけた値)では62%が、全がん(白血病を含む)死亡者数では67%がこの3カ国のコホートである。INWORKS コホートにはそれぞれ仏では3機関、英では5機関、米では5機関のデータが含まれている。これらの原子力関連機関で最低1年雇用され、個人線量計で外

Epidemiological Studies of radiation workers in nuclear facilities : Satoshi Iwai, Tsuyoshi Semba, Kenji Ishida, Syunji Takagi, Takafumi Igari.

(2017年4月25日 受理)

ⁱ コホート研究とは分析疫学における手法の1つであり、特定の要因に暴露した集団(暴露群)と暴露していない集団(非暴露群または対照群)を一定期間追跡し、研究対象となる疾病の発生率を比較することで、要因と疾病発生の関連を調べる観察的研究である。後ろ向きコホート研究とは、まず過去の記録を調査して、暴露群と非暴露群を設定し、一定期間を経過して以降の記録を参照し、評価項目の発症やそれによる死亡等を確認するという手法である。

ⁱⁱ IARC: International Agency for Research on Cancer (国際がん研究機関): 世界保健機関(WHO)の外部組織

部被ばく線量がモニタリングされた放射線作業者が対象とされている。INWORKS コホートの国別の人数および追跡調査の期間ならびに光子被ばくによる平均個人線量を表1に示す。

II. 個人被ばく線量の再構築

1. 光子被ばく線量

INWORKS では、Thierry-Chef らは個人線量計の光子の記録線量(Recorded Photon Dose)から個人線量当量 Hp(10)ⁱⁱⁱ(単位:mSv)を経由して男女の結腸、肺、赤色骨髄と女性の乳房の器官吸収線量(単位:mGy)への変換を行っている⁴⁾。INWORKS で用いている変換方法は、すでに15カ国研究で用いた図1に示す方法と同様である。線量評価の対象は100keV-3MeVの光子による外部被ばくである⁶⁾。

記録線量は個人線量計が使用された時期および機関/施設により異なり、とくに初期の時期はレントゲン単位で表される照射線量(単位:R)、吸収線量単位(rad または Gy)で表される空気カーマ、水吸収線量、組織吸収線量、精巣吸収線量等の線量概念で記載されているもの、実効線量当量^{iv}(Sv)で記録されているものがある。

第1段階として様々な線量概念で表示された記録線量を、“校正方法を考慮した Hp(10)”に変換する。校正場では光子線源として通常¹³⁷Cs、⁶⁰Co が使用されるが、当初は入手が容易である²²⁶Ra も使用された。各機関/施設および年代により、校正に使用される線源は異なる場合もある。個人線量計のファントムへの装着の有無、校

ⁱⁱⁱ 光子など透過性の高い放射線被ばくに対して個人線量計を人体に装着して行う個人モニタリングに使用する線量概念、詳細は原子力学会誌「放射線防護に用いられる線量概念」⁵⁾等を参照。

^{iv} ICRP Publ.26 および ICRP スtockホルム声明で示された放射線防護に用いられる防護量の線量概念、ICRP Publ.60 で実効線量に置き換えられる。詳細は保健物理学会誌「放射線防護に用いられる線量概念について第3回放射線防護に用いられる線量の変遷」⁷⁾等を参照

表1 INWORKS コホートの追跡調査期間, 人数, 平均個人線量(データ出典: 文献1, 3)

		仏国	英国	米国	合計
追跡調査期間(年)		1968-2004	1946-2001	1944-2005	1944-2005
人数 (人)	男	51,567 (87.4%)*	134,812 (91.2%)*	81,883 (80.7%)*	268,262 (87.0%)*
	女	7,436 (12.6%)*	13,054 (8.8%)*	19,545 (19.3%)*	40,035 (13.0%)*
	計	59,003	147,866	101,428	308,297
人・年		1,469,500	3,410,483	3,341,049	8,221,032
光子個人平均線量 当量(mSv)	年間	0.81	2.17	1.39	1.66
	積算	16	27	23	24

*性別の割合(ただし, 全コホートの集団線量の97%は男性の線量である。)

コホートの調査項目は, 国, 到達年齢, 性, 誕生日, 社会経済的状況(職位), 雇用期間(放射線作業従事期間), 中性子被ばく状況, 体内汚染(内部被ばく)状況, 死因, 光子による個人被ばく線量(記録線量)である。

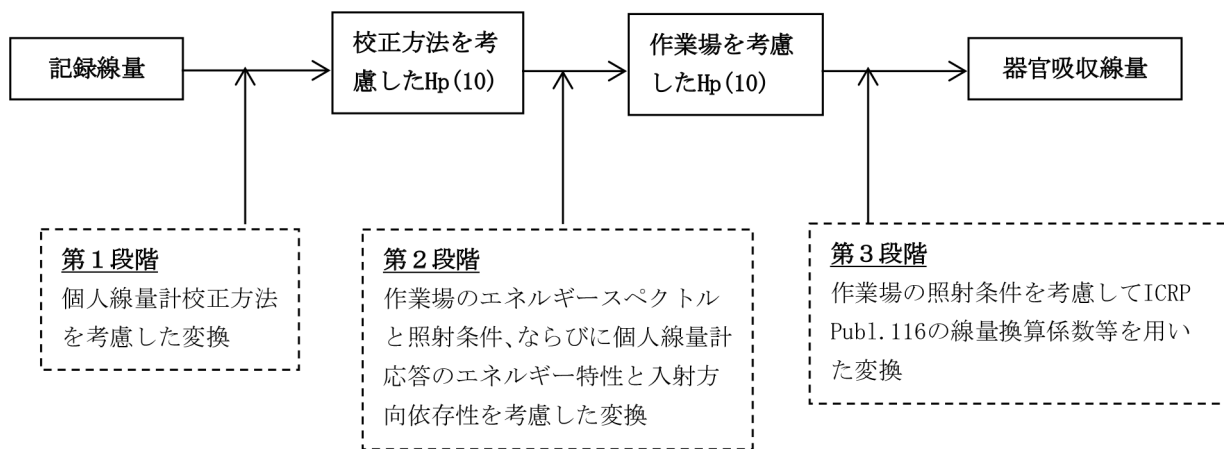


図1 光子の記録線量から器官吸収線量への変換方法

正室の設備(壁, 床, 机等)による後方散乱の影響等も考慮されている。

第2段階として, “校正方法を考慮した Hp(10)”を, “作業場を考慮した Hp(10)”に変換している。ここでは作業場で受ける光子のエネルギー(100-300keV, 300keV-3MeVの2条件)と照射条件(ここではICRP Publ.116で定義した前方照射(AP), 等方照射(ISO)の2条件)の組み合わせを考慮しており, 個人線量計応答のエネルギー特性と入射方向依存性を考慮して変換係数を求めている。第3段階として, 第2段階で評価した“作業場を考慮した Hp(10)”からICRP Publ.116に記載された吸収線量への換算係数等を使用して, 男女の結腸, 肺, 赤色骨髄の吸収線量, ならびに女性の乳房の器官吸収線量への変換を行っている。

以上の3つの段階を通じて, 各年代における各機関/施設で受ける光子エネルギーと照射条件の組み合わせの割合をある割合の下で設定し, 各条件の変換係数を定量化している。Thierry-Chefらはこれらの変換係数のことをバイアス(記号B)と呼び, 各バイアスは対数正規分布で表現できる不確かさ(記号K)を持つ統計量と見なして, 各年代の各機関/施設でのBとKの値を定量化している。

INWORKSでは光子被ばくのほとんどは100keV-3MeVのエネルギー範囲であるとしており, 100keV未満または3MeVを超える光子被ばくに関する取扱いの記載はない。

2. 中性子被ばく線量

INWORKSでは中性子による器官吸収線量は評価していない。しかし, 記録線量として中性子被ばく線量の記録の有無等を確認し, コホートを表2のように分類している。

中性子被ばくの積算記録線量が全外部被ばくの積算記録線量の10%を超える人数割合は全体で13%である。しかし, 中性子モニタリングをしていない人で中性子被ばくを受けた可能性のある者もいることが考えられる。このような人の光子の記録線量の値には中性子の寄与も含まれていることも考えられ, そのことにより光子器官吸収線量を過大評価している可能性があるとしてされている。

15カ国研究では全外部被ばく線量の10%を超える中性子被ばくがある者は疫学解析から除いているが, INWORKSでは含めている。全がん(白血病を除く)^vの疫学解析では, 中性子被ばく状況に関する分類の感度解

表2 中性子被ばく状況を考慮した INWORKS のサブコホート人数(人)(データ出典：文献4)

	フラグ1	フラグ2	フラグ3	合計
仏国	50,417	6,018	2,568	59,003
英国	130,642	12,435	4,789	147,866
米国	87,464	9,179	4,785	101,428
合計	268,523	27,632	12,142	308,297

フラグ1：中性子モニタリングを実施していない，または中性子被ばく線量なしのグループ

フラグ2：中性子の積算記録線量が全外部被ばくの積算記録線量の10%以下のグループ

フラグ3：中性子の積算記録線量が全外部被ばくの積算記録線量の10%を超えるグループ

表3 内部被ばくを考慮した INWORKS のサブコホートの人数(人)(出典：文献4)

	フラグ1(人)	フラグ2(人)	合計(人)	フラグ2/合計
仏国	56,499	2,504	59,003	4%
英国	106,456	41,410	147,866	28%
米国	93,817	7,611	101,428	8%
合計	256,754	51,525	308,279	17%

フラグ1：体内汚染がないグループ

フラグ2：体内汚染があった(仏，英，米)または疑われる(英)グループ

析を行い，死亡率のベースラインの調整を行っている³⁾。詳細は第Ⅲ章に記載するが，中性子被ばく状況を性別や年齢のような階層分類要因の一つとして扱い，データの調整を行っている。したがって，死亡リスクに対する器官吸収線量に中性子線量は含まれておらず，光子線量のみであることに注意する必要がある。白血病等の血液のがんの死亡リスクの解析について，中性子被ばくに関する感度解析やベースライン調整の有無については明記されていない。

3. 内部被ばく線量

INWORKS では内部被ばくについても器官吸収線量を評価していない。しかし，記録として記載された体内摂取の有無によりコホートを表3の様に分類している。

仏，英ではある時期にトリチウムによる被ばくが全身被ばくの記録線量に含まれていたこともある。米国のいくつかの施設ではトリチウムは別に記録されている。しかし INWORKS コホート全体でみるとトリチウム被ばくの寄与は小さいと評価されている。

INWORKS では内部被ばくがあるか，または内部被ばくが疑われる者は全体の17%を占めている。仏国，米国は体内汚染の有無の記録から判断しているが，英国は体内汚染の疑いがある者もフラグ2に含めるため，体内汚染者は英国コホートでは28%を占めている。

15カ国研究では年摂取限度の10%を超えるトリチウム以外の放射性核種の摂取がある者は疫学解析から除いているのに対して，INWORKS では内部被ばくがある者もすべて疫学解析に含めている。INWORKS の全がん(白血病を除く)および白血病等の死亡率の疫学解析で

は，内部被ばくに関する分類の感度解析を行っている⁸⁾。その詳細ならびに内部被ばくのあるサブコホートの取扱いについては第Ⅲ章に記載する。

Ⅲ. 放射線疫学調査結果

1. INWORKS における放射線リスク

INWORKS の放射線疫学結果は，がんや白血病の死亡率の過剰相対リスク(Excess Relative Risk, ERR)または相対リスク(Relative Risk, RR)で表現されている。INWORKS コホートの内5mGy未達の外部被ばく線量を受けた群を対照群(非暴露群)として設定している。INWORKS ではRRとは被ばく群の死亡率と性，年齢などを一致させた対象群のある一定期間の死亡率に対する比であり，ERRはRRから1を引いた値である。ERRおよびRRは共に統計量であるため，平均値と信頼区間(INWORKS では90% CI: Confidence Interval)の上下限値で示している。ERRまたはRRは器官吸収線量(Gy)あたりの値で表示される。INWORKS では全がん(白血病等血液系がんを除く)に対しては，結腸の吸収線量を用い，白血病，リンパ腫，多発性骨髄腫など血液がんに対しては赤色骨髄の吸収線量を用いている。結腸および赤色骨髄の積算線量は表4に示すとおりである。

表4 INWORKS における結腸と赤色骨髄の吸収線量

組織・器官	積算吸収線量(mGy)		
	平均値	最大値	90% タイル値 ^{vi}
結腸	20.9	1331.7	54
赤色骨髄	15.9	1217.5	41

^v INWORKS では，全がん(白血病は除く)という表現ではリンパ腫，多発性骨髄腫のこと含んでいる。固形がんは白血病，リンパ腫，多発性骨髄腫を除いたがんである。

^{vi} 高い方から10%のデータを除いた最大線量値

表5 INWORKSにおけるがん死亡率の各カテゴリー別のERR(データ出典:文献3)

死因	死亡者数 (人)	過剰相対リスク ERR/Gy	
		特別な調整あり ^{*1}	特別な調整なし ^{*2}
全がん	19,748	0.51(90%CI: 0.23-0.82)	0.46(90%CI: 0.23-0.69)
全がん(白血病を除く)	19,064	0.48(90%CI: 0.20-0.79)	0.41(90%CI: 0.18-0.64)
全固形がん	17,957	0.47(90%CI: 0.18-0.79)	0.37(90%CI: 0.14-0.62)
固形がん(肺がんを除く)	12,155	0.46(90%CI: 0.11-0.85)	0.35(90%CI: 0.07-0.65)
固形がん(喫煙関連がんを除く) ^{*3}	-	0.37(90%CI: -0.14-0.95)	-
固形がん(肺がん, 胸膜がんを除く)	-	0.43(90%CI: 0.08-0.82)	-

*1 国, 性, 誕生日, 到達年齢のみならず社会経済状況, 雇用期間, 中性子被ばく状況をバイアス調整に加えている。

*2 国, 性, 誕生日, 到達年齢のみで調整済み

*3 喫煙と関連性のある呼吸器系, 消化器系, 泌尿器系, 卵巣, 子宮頸部等のがんを除く固形がん(非喫煙関連がん)

表6 全がん(白血病を除く)の光子外部被ばくERRに関する中性子被ばく状況の感度解析(データ出典:文献3)

中性子被ばく状況 ^{*1}	人数割合 ^{*2}	死亡人数	過剰相対リスク ERR/Gy
フラグ1	87%	16,651	0.55(90%CI: 0.17-0.95)
フラグ2	9%	1,570	0.36(90%CI: -0.08-0.88)
フラグ3	4%	843	0.62(90%CI: -0.50-2.09)
中性子被ばくベースライン無調整 ^{*3}	100%	19,064	0.20(90%CI: -0.03-0.45)
中性子被ばくベースライン調整済 ^{*4}	100%	19,064	0.48(90%CI: 0.20-0.79)

*1 各フラグの説明は表2の注記参照

*2 各フラグのサブグループの全人数に対する割合

*3 中性子被ばくを除く他の要因のベースラインのみ調整済み

*4 中性子被ばくを含む全要因のベースライン調整済み

2. 白血病を除く全がん死亡率

INWORKSでは10年のラグタイム^{vii}の各カテゴリーのがん死亡率のERRを表5のように示している。

(1) 喫煙, アスベストとの交絡

INWORKSでは, 喫煙, アスベスト暴露の有無は調査していないが, INWORKSでは表5に示した全固形がんのERR(0.47/Gy)を, 全固形がん(肺がんを除く)のERR(0.46/Gy)および非喫煙関連がんのERR(0.37/Gy)と比べても, 喫煙の影響については有意な結果は見えないとしている。しかし, 非喫煙関連がんのERR(0.37/Gy)は全固形がんのERR(0.47/Gy)よりも平均値の比較では大きく低下しているが, 90%信頼区間が重なっているため明確な結論ではないものの, 喫煙による交絡がある可能性は排除できない。アスベストについても, 全固形がんのERR(0.47/Gy)と肺がん, 胸膜がんを除く全がんのERR(0.46/Gy)を比較して, アスベストの影響は有意でないとしている。

(2) 中性子被ばくの影響

中性子被ばくについては, 表6に示すような感度解析

を行っている。表6からフラグ2サブコホート(中性子の積算記録線量が全外部被ばくの積算記録線量の10%以下のグループ)の光子外部被ばくERRはフラグ1サブコホート(中性子モニタリングを実施していない, または中性子被ばくなしのグループ)のERRよりも低い値を示す傾向がある理由として, INWORKSではこのような中性子被ばくがある作業区域の作業者は喫煙が制限されていることと, 他の作業員よりも追加的な健康診断を受けていることを理由に挙げている。フラグ3サブコホート(中性子の積算記録線量が全外部被ばくの積算記録線量の10%を超えるグループ)のERRはフラグ1サブコホートよりも高い値を示すため, フラグ2の説明根拠が少し疑わしくなる。各サブコホートの中性子被ばく状況のベースラインを調整しないとERRは0.20/Gyとなるが, 中性子被ばく状況のベースラインを調整すると, ERRは0.48/Gyとなり, フラグ1サブコホートのERRとほぼ同程度なる。この感度解析結果から中性子被ばく影響について, 十分に納得できる明確な考察がされているとは言い難い。

(3) 社会経済的要因, 雇用期間の交絡, および国別コホートの違い

INWORKSでは表5の「特別な調整の有無」について信頼区間を考慮したERR値の比較から, 社会経済的因子(職位), 雇用期間は交絡因子ではあるが, これらによるベースライン調整効果は小さいと見なしている。国の

^{vii} 登録されたがん死亡日から, 遡った一定期間の被ばくは放射線による誘発がんに関連が無いと見なし, その期間の被ばく線量を積算線量から外す。この期間をラグタイム(lag time)と呼ぶ。通常, 白血病を除く全がんは10年, 白血病は2年を設定することが多い。

表7 全がん(白血病を除く)のERRに関する内部被ばく有無の感度解析(データ出典:文献3)

内部被ばく状況 ^{*1}	人数割合 ^{*2}	過剰相対リスク ERR/Gy
フラグ1	83%	0.72(90%CI: 0.29-1.19)
フラグ2(全核種)	17%	0.46(90%CI: -0.17-0.78)
フラグ2(³ Hを除く全核種)	-	0.45(90%CI: -0.16-0.78)

*1 フラグの説明は表3の注記参照

*2 各フラググループの全人数に対する割合

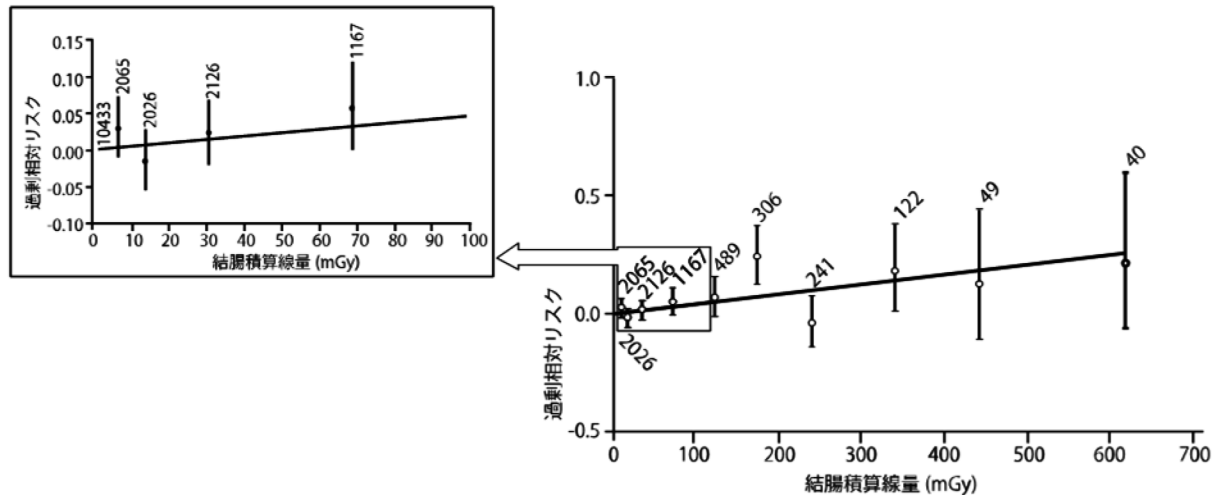


図2 全がん(白血病を除く)の死亡率と光子外部被ばくによる結腸の積算吸収線量の関係(出典:文献3の図一部を改訂)
 ラグタイムは10年,各線量群のERRは各線量群の平均線量に対してプロットしており,縦線は90%信頼区間,図中の数字は全がん(白血病を除く)の死亡者数を示す。

違いによるERRの違いを評価するため,INWORKSコホートから,仏,英,米のそれぞれの国別コホートを差し引いてERRを求めて,これらの不均一性を尤度比検定で評価しているが,不均一性は見出せないため,3カ国のコホートは均一であると見なされている。

(4)内部被ばくの影響

可能性を含め内部被ばくがある者はINWORKSコホートの17%で,とくに英国は28%であるため,コホートから除くのは統計的検出力が低下する恐れがある。内部被ばくの有無については表7に示すような感度解析が行われている。表7からフラグ1サブコホート(内部被ばくのないグループ)の光子外部被ばくのERRは,フラグ2のサブコホート(内部被ばくがあるか,または可能性があるグループ)および全コホートの光子外部被ばくERRに比べて高い傾向を示す。INWORKSでは内部被ばくがないグループのERRが高い傾向を示す理由についての考察はない。同様の傾向が英国のBNFL(British Nuclear Fuels Limited)の作業者のコホートでも見られることをGilliesら⁹⁾が報告しているが,その原因については今後の課題であるとしている。

表7に示すようにINWORKSでは内部被ばくの有無が光子外部被ばくのERRに及ぼす感度解析は実施しているが,全がん(白血病を除く)のERRについて,内部被ばくの有無状況における光子外部被ばく死亡率のベ-

スラインの値も示されておらず,ERR値のベースライン調整を実施したか否かの記載もない。

(5)積算線量とがん死亡率(白血病を除く)との関係

INWORKSでは結腸の光子外部被ばく積算吸収線量を11の線量群(<5, 5-<10, 10-<20, 20-<50, 50-<100, 50-<100, 150-<200, 200-<300, 300-<400, 400-<500, 500mGy以上)に分けて,全がん死亡率(白血病を除く)のRR(相対リスク)を示しているが,図2にはERR(過剰相対リスク)として示す。この図では直線(L)モデルが当てはめられており,2次項を含むモデルの当てはめの検討もされたが,特に改善はないため,直線(L)モデルの当てはめは妥当であると考えられている。直線(L)モデルに基づけばERR=0.48/Gy(90%CI:0.20-0.79)であり,INWORKSコホートの全がん(白血病を除く)の死亡者19,064人中の209人,すなわち1%が光子外部被ばくに関連するものであると評価されている。

表8 低線量域における全がん(白血病を除く)のERR
(データ出典:文献3)

線量域(mGy)	過剰相対リスク ERR/Gy
0-100	0.81 (90%CI: 0.01-1.64)
0-150	0.69 (90%CI: 0.10-1.30)
0-200	1.04 (90%CI: 0.55-1.56)
全線量域	0.48 (90%CI: 0.20-0.79)

表9 非CLL白血病, リンパ腫, 多発性骨髄腫の死亡率のERR(データ出典: 文献8)

死因	死亡者数 (人)	過剰相対リスク ERR/Gy		
		特別な調整なし ^{*1}	社会経済的状況の 調整付加 ^{*2}	内部被ばく状況の 調整付加 ^{*3}
非CLL白血病	531	2.96 (90%CI: 1.17-5.21)	2.91 (90%CI: 1.11-5.17)	3.39 (90%CI: 1.39-5.93)
多発性骨髄腫	293	0.84 (90%CI: -0.96-3.33)	0.88 (90%CI: -0.94-3.45)	0.91 (90%CI: <0-3.64)
非ホジキンリンパ腫	710	0.47 (90%CI: -0.76-2.03)	0.53 (90%CI: -0.74-2.13)	0.52 (90%CI: -0.77-2.17)
ホジキンリンパ腫	104	2.94 (90%CI: <0-11.49)	2.58 (90%CI: <0-10.98)	2.32 (90%CI: <0-10.90)

*1 国, 暦年, 性, 年齢のみで調整済

*2 国, 暦年, 性, 年齢および社会経済的状況(職位等)で調整済

*3 国, 暦年, 性, 年齢および体内汚染有無(表3注記参照)で調整済

低線量域に絞ったERRについて評価した結果を表8に示す。0-200mGyの線量域のERRが統計的に有意な増加を示すことは、100mGyを超える高い線量データに強く支配されている訳ではなく、0-100mGyの低線量群データでもERRは0.81/Gy(90%CI: 0.01-1.64)と、統計的に有意な増加を示している。INWORKSでは、0-100mGy領域の全がん(白血病を除く)のERRは90%信頼区間を考慮すれば、全線量域のERRと統計的に有意な相違はないと見なしている。そして、0-100mGyの線量域のERRの統計的精度は不十分であるが、積算線量に伴うERRの有意な増加が見られたとしている。

しかし、図2から分かるように、50mGy以下の3群(<10mGy, 10-<20mGy, 20-<50mGy)のデータは統計的に有意な増加を示している訳ではない。これらの結果は単純には比較できない^{viii}が、原爆被爆寿命調査(LSS: Life Span Study)コホートの固形がん死亡率のERRについて従来から述べられている、統計的に有意な増加が見られる最小線量をPierceらが50mSv¹⁰⁾、Prestonらが125mSv¹¹⁾としている結果と比較しても、とくに大きな不整合があるわけではない。したがって、INWORKSで100mGy以下の線量域でも全がん(白血病を除く)のERRに有意な増加する証拠が得られたことを強調するためには、100mGy未満の各線量群のERRをより詳細に解析評価し、従来の知見との違いを明確にすることが重要である。

3. 白血病等血液のがんの死亡率

INWORKSでは白血病ならびにリンパ腫, 多発性骨髄腫による死亡率のERRを表9のように示している。非

^{viii} LSSでは中性子と光子による外部被ばく線量の合計(但し中性子には補正係数10を乗じている。)を横軸としているが、INWORKSでは光子の外部被ばく線量のみであり、中性子被ばくは交絡因子のように扱っている。LSSでは95%信頼区間を用いているが、INWORKSでは90%信頼区間を用いているなどの違いがある。

CLL白血病^{ix}のラグタイムは2年、ホジキンおよび非ホジキンリンパ腫^x、多発性骨髄腫^{xi}については10年を設定している。ERRの積算線量の関数として直線(L)モデルで十分に近似でき、2次(Q)モデルと直線2次(L-Q)モデルを当てはめても本質的な改善は見られない。

(1) 交絡要因の検討

社会経済的要因, および内部被ばくの影響については感度解析が行われたが、表9で示すように、これらによる死亡率ベースラインの調整を行っても各ERRは統計的に有意には変化しておらず、これらの要因による有意差は見出せていない。白血病リスクに関する内部被ばくの影響に関する結果はShilinskaらがMayak生産施設で行った疫学研究結果と同じである¹²⁾。

中性子被ばくの記録線量の記載がある者を除いて非CLL白血病死亡率のERRを評価しているが、その結果はERR/Gy=4.19(90%CI:1.42-7.80)となり、中性子被ばくの記録線量がある者を含む全コホートのERR/Gy=2.96(90%CI:1.17-5.21)よりも明らかな増加を示している。

喫煙と非CLL白血病との関連性はINWORKSでは調査されていない。喫煙と骨髄性白血病とは関連性を持つと考えられているが、相対的に大きな交絡ではないことをVeneisらは示している¹³⁾。Schubauer-BeriganらはベンゼンとCLL白血病は弱い交絡があることを述べている¹⁴⁾が、関連性についてはINWORKSでは検討されていない。その理由として、ベンゼンは原子力産業では

^{ix} CLL(Chronic Lymphocytic Leukaemia: 慢性リンパ性白血病)は放射線被ばくとの関連性はないと考えられている。

^x 腫瘍化したリンパ球が身体のかなで腫瘍を作る悪性リンパ腫はさらに「ホジキンリンパ腫」と「非ホジキンリンパ腫」に分けられる。リンパ腫に非常に大きな「ホジキン細胞」や「リードステルンベルグ細胞」と呼ばれる特殊な腫瘍細胞がみつかった場合に「ホジキンリンパ腫」と診断名をつけ、それらの大型腫瘍細胞が見つからない場合には「非ホジキンリンパ腫」という診断名を付けられる。

^{xi} 骨髄中の形質細胞というリンパ球が腫瘍化した病気で、単に骨髄腫とも呼ばれることもある。

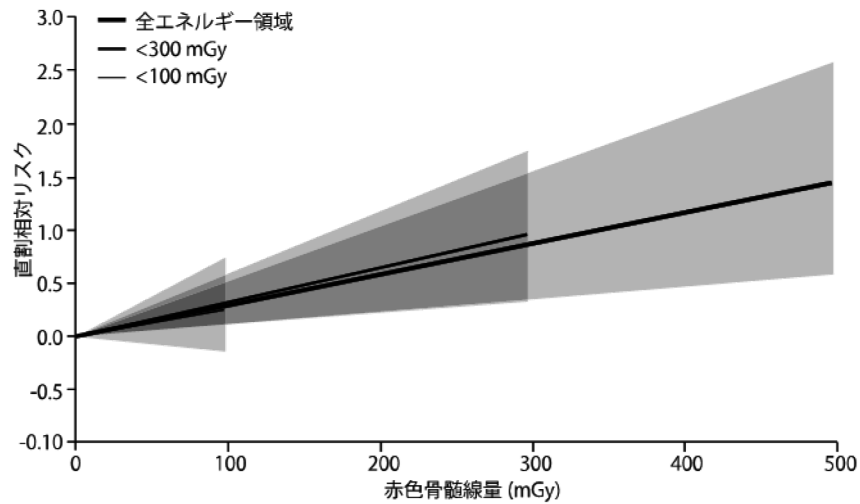


図3 非 CLL 白血病の過剰相対リスクと光子外部被ばくによる赤色骨髄の積算吸収線量の関係
(出典：文献8の図を一部改訂)

表10 非 CLL 白血病の過剰相対リスクと赤色骨髄の各線量群の積算吸収線量の関係(データ出典：文献8)

線量群 (mGy)	0 - <5	5 - <50	50 - <100	100 - <200	200 - <300	300 以上
平均線量 (mGy)	1	17.2	70	137.9	241.2	407.5
ERR (90%CI)	0	0.01 (-0.14 - 0.19)	0.3 (-0.03 - 0.73)	0.19 (-0.18 - 0.73)	1.3 (0.46 - 2.62)	0.7 (-0.15 - 2.26)

広く使用されている物質ではないためであるとしている。

したがって、INWORKS で検討されている交絡要因の中で、非 CLL 白血病に有意な影響を持つものは、中性子被ばく状況だけであるが、その原因の考察はされておらず、非 CLL 白血病の ERR 値にも反映されていない。

国別の ERR の違いを評価するため、INWORKS コホートから、仏英米のそれぞれの国別コホートを差し引いて非白血病死亡率の ERR を求めているが、不均一性は見出せないため、3カ国のコホートは均一であると見なされている。

(2) 積算線量と非 CLL 白血病死亡率との関係

INWORKS では光子外部被ばくによる赤色骨髄吸収線量 100mGy 未満、300mGy 未満の非 CLL 白血病死亡率 ERR (平均値と 90%信頼期間) を、直線(L)モデルを用いて評価し、全線量域の ERR とともに、図3に示した。INWORKS では、100mGy 未満および 300mGy 未満の低線量域の ERR は、90%信頼期間の幅広いが、全線量域の ERR とほぼ同程度の値を示すことを述べ、低線量の遷延被ばくと非 CLL 白血病の関連性を示す強力な証拠を示したと記述している。しかし、100mGy 以下では統計的に有意な増加を示す結果は得られていない。

INWORKS では、赤色骨髄の積算吸収線量と非 CLL 白血病死亡率の RR を示しているが、表10には ERR と

して示す。表10では 5mGy 未満の死亡率を対照群(非暴露群)としている。この結果から 200mGy 未満では ERR の統計的に有意な増加は確認できない。

IV. まとめ

INWORKS では喫煙習慣の有無、アスベストへの暴露の有無は調査していないが、喫煙やアスベストと関連性を持つがんを除いた ERR 解析を実施して、喫煙やアスベストの影響は見られないとしている。この結果は喫煙の有無を調査した放射線影響協会の第V期調査で喫煙が肺癌死亡リスクと関連性が見られるという結果¹⁵⁾と異なっている。

中性子被ばくと内部被ばくについては線量記録で分類しており、結腸ならびに赤色骨髄の吸収線量への評価は実施していないが、感度解析を実施している。その結果を表11に示す。全がん(白血病を除く)の中性子被ばくについては、感度解析で記録線量の結果の分類を行うと ERR 値に有意差が見られるため、ベースラインの調整を実施している。ERR は光子外部被ばくの ERR 値であり、中性子被ばくが光子外部被ばくの ERR 値に及ぼす影響を考察する必要があるが、それらに関する十分な考察結果が示されていない。

非 CLL 白血病の ERR については、内部被ばくの有無についての感度解析を行った結果、有意差なしとなったため、内部被ばくの有無について ERR のベースライン

表 11 中性子被ばく状況ならびに内部被ばく状況の感度解析と ERR への反映

死因	被ばく	感度解析結果	ERR への反映
全がん(白血病を除く)	中性子被ばく	有意差あり	各フラグのサブコホートごとにベースラインの調整で反映
	内部被ばく	有意差あり	反映していない
非 CLL 白血病	中性子被ばく	有意差あり	反映していない
	内部被ばく	有意差なし	ベースライン調整不要

調整は不要であるとして実施していない。しかし、全がん(白血病を除く)の内部被ばくと非 CLL 白血病の中性子被ばく状況については、それぞれ感度解析結果で有意差が示されたにも拘わらず、ERR のベースライン調整に反映されていないようである。

このような結果から考えると中性子被ばく状況、内部被ばく状況は感度解析を行い、ベースラインの調整には一部反映しているとは言いながら、これらの被ばく状況の検討、考察、データ調整への反映は十分ではない。そして中性子被ばく者と内部被ばく者を解析対象に含めることにより、統計的検出力は高まったが、解析データの信頼性は必ずしも、高まっているとは言えない。

INWORKS では全がん(白血病を除く)および非 CLL 白血病について、低線量域の ERR が全線量域の ERR と同程度であるという証拠が得られたとしている。しかし非 CLL 白血病では 200mGy 未満の ERR の増加は統計的に有意ではなく、全がん(白血病を除く)も 50mGy 未満では ERR は統計的に有意に増加しているとは言えない。この結果は原爆被爆者の疫学データ LSS で示されたことと大きな差異はなく、INWORKS により低線量被ばくの ERR の増加を示す新たな更新された結果を示すことができたとは言えない。

INWORKS の中性子被ばくや内部被ばくの影響は一部で考慮されているように考えられるが、ERR は光子

の外部被ばくによる器官吸収線量に対する値であるため、中性子被ばくや内部被ばく線量を考慮した他の疫学データとの比較には慎重な取り扱いが必要である。

－ 参考資料 －

- 1) G.B.Hamra *et al.* *International journal of epidemiology*, dyv122. (2015).
- 2) E.Cardis *et al.* *BMJ* 331: 77-80. doi: 10.1136/bmj.38499.599861.E0 (Online 29 June 2005), 15987704.
- 3) D.B.Richardson *et al.* *bmj*, 351, h5359. (2015).
- 4) I.Thierry-Chef *et al.* *Radiat. Res.*, 183 (6), 632-642. (2015).
- 5) 平山英夫他 *日本原子力学会誌* 55 (2) 83-96 (2012).
- 6) I.Thierry-Chef, *Radiat. Res.* 167(4), 380-395 (2007).
- 7) 高橋史明 *保健物理*, 43 (3), 226-233 (2008).
- 8) K.Leuraud *et al.* *The Lancet Haematology*, 2 (7), e276-e281. (2015).
- 9) M.Gillies *et al.* *Journal of Radiological Protection*, 34 (3), 595. (2014).
- 10) D.A.Pierce *et al.* *Radiat. Res.*, 146 (1), 1-27. (1996).
- 11) D.L.Preston *et al.* *Radiat. Res.*, 160 (4), 381-407 (2003).
- 12) N.S.Shilnikova *et al.* *Radiat Res*, 159 (6), 787-98. (2003).
- 13) P.Vineis *et al.*, *Journal of the National Cancer Institute*, 96 (2), 99-106. (2004).
- 14) M.K.Schubauer-Berigan *et al.* *Radiat. Res.*, 183 (6), 620-631. (2015).
- 15) 放射線影響協会の BMJ 掲載の INWORKS がんリスク論文に関する見解(平成 28 年 1 月 15 日).

原子力関連施設の作業者の放射線疫学調査研究 IARC15 カ国合同コホート疫学調査研究(15 カ国研究)

INWORKS よりも 10 年前の 2005 年, 15 カ国の原子力産業に従事する放射線作業者の放射線疫学研究結果が発表された。この研究は「15 カ国研究」と呼ばれ, 低線量, 低線量率, 遷延被ばくで統計的に有意ながん死亡率が確認される結果を示したが, 線量評価に問題があるカナダのデータを除いた結果, 統計的に有意ながん死亡率は確認できなかった。15 カ国研究では線量評価が困難との理由で, 比較的被ばく線量が高いと考えられる中性子被ばく者と内部被ばく者を除いたことが統計的検出力が十分でない一因であると考えられた。

KEYWORDS: IARC, 15-Country Study, collaborated cohort study, protracted low dose, cancer mortality, Canada, NDR

I. 15 カ国研究コホートの概要

INWORKS 以前に, 原子力産業等に従事する放射線作業者の放射線関連がん死亡リスク推定の精度を向上させる目的で 15 カ国研究ⁱが行われた。この研究は, 15 カ国の 96 基の原子力プラントを含む 194 の原子力関連施設に勤務し, 光子外部被ばくがモニタリングされた約 60 万人を対象とした後ろ向きコホート解析であるが, 最終的な解析対象者は約 40 万人であった。疫学調査期間は国や機関/施設により異なるが, 調査開始が最も早いものは 1943 年で, 終了時期が最も遅いものは 2000 年であり, 観察期間と人数の積は 5,192,710 人・年である。

疫学調査の速報版は 2005 年の BMJ 電子版¹⁾に, そして詳細版は 2007 年の Radiation Research 誌に発表された²⁾。15 カ国研究コホートの光子外部被ばくの平均個人線量当量は 19.4mSv で, 90%が 50mSv 未満, 500mSv を超える人は 0.1%未満であった。ただし, 勤務期間が 1 年未満の者(113,711 人), 記録から中性子被ばくが全身線量の 10%を超える可能性がある者(19,041 人), ならびに年摂取限度(ALI: Annual Limit of Intake)を超える内部被ばくのある者(39,730 人)ⁱⁱ, ならびに年間 250mSv を超えた高線量率の被ばくを受けた者は疫学解析対象から除かれており³⁾, 解析対象コホート人数は 407,391 人(男性は約 90%)である。

コホート調査項目は性, 年齢, 暦年, 雇用期間, 社会経済的地位(SES: socio-economic status)ⁱⁱⁱである。喫

煙^{iv}, 食習慣, ならびに調査した原子力関連施設以外で受けた職業被ばくは含まれていないため, これらによる交絡を直接調整することはできていない。しかし, 喫煙と食習慣は調査項目のひとつである社会経済的地位との関連性があるため, 社会経済的地位を調整することで, これらの交絡の影響を部分的に緩和できるとされた。雇用期間は 10 年未満, 10 年以上で分類され, 健康労働者生存効果(healthy worker survival effect)の調整に使用された。

II. 個人被ばく線量の再構築

15 カ国研究の線量評価方法としては Thierry-Chef らが, 光子の外部被ばくに関する個人線量計の記録線量から個人線量当量 Hp(10)を経由して, 器官・組織の等価線量(Sv)を評価する方法を示している⁴⁾。この方法は INWORKS で使用された方法の原案である。INWORKS と異なる点は, INWORKS が性別を考慮したボクセル人体ファントムの器官・組織の吸収線量(Gy)で表示しているのに対して, 15 カ国研究では雌雄同体の MIRD 型ファントムの器官・組織の等価線量(Sv)で標記している。光子による被ばくを対象としているため, 吸収線量と同じ値である。対象となる器官・組織は結腸, 肺, 赤色骨髄であり, 白血病を含む血液のがんには赤色骨髄線量が用いられ, 肺, 胸膜等のがんには肺線量が使用され, それ以外の器官・組織のがんには結腸線量が使用されている。なお, 15 カ国研究では 100keV 未満の光子被ばくが年間被ばく線量の 10%を超える場合は, 疫学解析対象から除いている。3MeV を超える光子被ばくとしては BWR プラントの冷却水で発生する¹⁶N からの 6-7MeV の γ 線被ばくが考えられるが,

ⁱⁱⁱ 放射線以外のがんリスクに関する交絡因子(喫煙, 食習慣, 職業・収入等)を調整する目的で用いられた。

^{iv} ベルギー, フィンランド, 日本, スペインのコホートおよび米国, 英国, カナダの一部の施設では喫煙調査実施。

ⁱ オーストラリア, ベルギー, カナダ, フィンランド, フランス, ハンガリー, 日本, 韓国, リトアニア, スロバキア, スペイン, スイス, スウェーデン, 英国, 米国の 15 カ国, ただし, 米国のアイダホ国立研究所とカナダのオンタリオハイドロ社と日本は社会経済的地位情報が利用できないとの理由で, 白血病を除く全がん, 固形がんの統合解析からは除かれた。そのため, 統合解析コホート対象者の人数が約 30%減少した。しかし, 白血病, リンパ腫, 多発性骨髄腫の統合解析では交絡の影響が小さいとの理由で除いていない。

ⁱⁱ トリチウム内部被ばく者は疫学対象者に含まれる。

表1 15カ国研究でのがん死亡率のカテゴリー別の ERR(データ出典:文献2)

死因	死亡者数(人)	過剰相対リスク ERR/Sv
全がん	5,233	0.97(90%CI: 0.28-1.77)
全がん(白血病を除く)	5,024	0.97(90%CI: 0.28-1.80) (95%CI: 0.14-1.97) ^{*2}
全がん(白血病, 肺がん, 胸膜がんを除く)	3,528	0.59(90%CI: -0.16-1.51)
固形がん	4,770	0.87(90%CI: -0.16-1.71)
固形がん(喫煙関連がん*1)	2,737	0.91(90%CI: 0.04-1.98)
固形がん(肺がん以外の喫煙関連がん)	1,280	0.21(90%CI: <0-1.68)
固形がん(喫煙関連がんを除く)	2,033	0.62(90%CI: -0.36-1.92)
非 CLL 白血病	196	1.93(90%CI: <0-4.52) (95%CI: <0-8.47) ^{*2}
多発性骨髄腫	83	6.15(90%CI: <0-20.6)
ホジキンリンパ腫	44	-0.18(90%CI: <0-7.15)
非ホジキンリンパ腫	248	0.44(90%CI: <0-4.78)

*1 喫煙と関連性のある呼吸器系, 消化器系, 泌尿器系の固形がん

*2 出典:文献1

被ばく線量全体への影響は小さいとみなされるため, 疫学解析対象から除いてはいない。一方, INWORKS では光子のエネルギー範囲は 100keV-3MeV としており, それ以外の取扱いの記述はない。

Ⅲ. 放射線疫学調査結果

15カ国研究ではがん死亡率の ERR を表1のように示している。これ以外にも 31種の部位別がんの ERR を表示している。対照群(非暴露群)としては 15カ国研究コホートの 5mSv 未満のグループを設定している。ラグタイムについて白血病は 2年, それ以外のがんは 10年としている。ERR は積算線量に対する直線(L)モデルを当てはめて求めている。積算線量の多項式モデルの当てはめも試みているが, 直線(L)モデルの評価値との乖離はほとんどないと見なしている。

全がん(白血病を除く)死亡率の ERR は 0.97/Sv(90% CI: 0.27, -1.80)で, 積算線量と統計的に有意な関連が見られた。31種類の部位別がんのうち, 肺がんは積算線量との間に唯一統計的に有意な関連が見られ, ERR は 1.86/Sv(90% CI: 0.49-3.63)であった。非喫煙関連がんの 0.62/Sv(90% CI: -0.36-1.92)に比べて, 喫煙関連がん(肺がん, 胸膜がん)の 0.91/Sv(90% CI: 0.04-1.98)は積算線量と強い関連を示した。社会経済的状况についてベースライン調整すると ERR 値は全がん(白血病を除く)で 22%, 非 CLL 白血病で 12%低下する。社会経済的状况には喫煙習慣の多寡も関連していると考えられるため, この調整に喫煙影響が含まれている可能性はある。

この結果から喫煙による ERR への影響の可能性は否定できないが, 喫煙の有無の情報はコホート対象者の調査項目にはないため, 喫煙による ERR への影響が直接説明された訳ではない。

非 CLL 白血病死亡率の ERR は 1.93/Sv(90% CI: <0

表2 低線量域における全がん(白血病を除く)の統合解析の ERR(データ出典:文献2)

積算線量(mSv)	ERR/Sv
<400	1.18(90%CI: 0.37-2.11)
<300	2.52(90%CI: 1.31-3.87)
<200	1.39(90%CI: 0.02-2.92)
<100	1.51(90%CI: -0.29-3.51)
全線量領域	0.97(90%CI: 0.27-1.80)

表3 15カ国研究における全がん(白血病を除く)の死亡者が 100 を超えるサブコホートおよび統合解析の ERR(データ出典:文献2)

(サブ)コホート名	ERR/Sv
カナダ	6.65(90%CI: 2.56-13)
スウェーデン	-0.58(90%CI: <0-6.49)
英国	0.66(90%CI: -0.25-1.86)
米国-Hanford	1.17(90%CI: -0.23-2.99)
米国-原子力発電所	-0.92(90%CI: <0-0.78)
米国-ORNL	4.28(90%CI: <0.4-11.6)
統合解析	0.97(90%CI: <0.27-1.8)

-7.14)で統計的には積算線量との関連は有意でなかった。多発性骨髄腫, ホジキンリンパ腫, 非ホジキンリンパ腫などの血液のがんについても死亡率の ERR は積算線量と統計的に有意な関連性を示していない。

低線量域における全がん(白血病を除く)の ERR を表2に示す。表2の結果から, 100mSv 未満では ERR は積算線量とともに統計的に有意に増加するということは示すことはできない。

表3に示すように, 全がん(白血病を除く)の死亡者数が 100 人を超えるサブコホートについて ERR を比較すると, カナダの ERR の値のみが特に高く(統計的に有意)[∇], 全体の結果に影響を高く引き上げていることが懸念された。ちなみにカナダの全がん(白血病を除く)死亡率の ERR は 3.60/Sv(90% CI: 1.03-7.27)であった。そ

して、カナダの機関のうち、オンタリオ hidro 社(OH 社)(死亡数 400 例)は社会経済的状況情報がないとの理由によって、統合解析から除かれたが、OH 社を除いたカナダ(死亡数 204 例)の ERR は 6.65/Sv (90% CI: 2.56–13.0)となり、かえって ERR を高める結果となった。

そして統合解析からカナダを排除した結果、全がん(白血病を除く)の ERR は 0.58/Sv (95% : -0.22 – 1.55)となり、統計的に有意な増加を示す証拠はない結果となった。

IV. カナダコホートの課題

15 カ国研究以前に行われた米英加 3 カ国研究⁵⁾に含まれたカナダ作業者の結果は他の国々のものと整合性があったにも拘わらず、その後の 15 カ国研究でのカナダの全がん(白血病を除く)の死亡率 ERR が特別に高かったことに関してカナダ原子力公社(AECL: Atomic Energy Canada Limited)からの依頼で要因調査が行われた⁶⁾。15 カ国研究では、米英加 3 カ国研究で使用された AECL の記録線量ではなくカナダ国家線量登録(NDR: National Dose Registry)の線量値が直接用いられた。調査の結果 NDR の 1971 年以前のデータ、特に 1956–1970 年のゼロ線量の作業者の人年が欠落していることが明らかとなり、このことがきっかけとなり、より詳細な調査が開始された。カナダ原子力安全委員会(CNSC: Canadian Nuclear Safety Commission)によれば、1965 年以降に初めて雇用された人は被ばくによる固形がんの増加は見られなかったが、1956–1964 年の間に初めて雇用された AECL の 3,088 人の作業者は固形がんによる死亡率の増加リスクが統計的に極めて有意に高かった(線量がゼロのグループに比べて 9 倍)。そしてこのグループのデータが 15 カ国研究のカナダの結果に影響を与えていることが明らかとなった。そして NDR に登録されたこのグループは線量情報が過少報告されており、線量データが不完全であったと結論付けられた⁶⁾。一方、米英加 3 カ国研究⁵⁾のカナダのデータは AECL の内部記録を用いており、1956–1971 年に初めて雇用されたゼロ線量の人・年のデータ欠落の問題等は存在してい

^v 15 カ国研究の各国のサブコホートの ERR の値で 90% 信頼区間の下限値が正の値を示すのはカナダのサブコホート(オンタリオ hidro 社を含む場合および除いた場合のどちらも)だけである。

ないとされた⁷⁾。

V. まとめ

15 カ国研究ではカナダのサブコホートの NDR に登録された線量データに問題があり、ERR が高く出ることが明らかになった。そのため、カナダのデータの影響を受けて、全がん(白血病を除く)の統合解析の ERR/Sv の 90% 信頼区間の下限値が正の値を示した。しかし、カナダのデータを除くと、全がん(白血病を除く)の ERR/Sv の 90% 信頼区間の下限値は負となり、統計的に有意な増加は示すことができない。非 CLL 白血病の ERR/Sv に関しては、カナダを含む統合解析でも ERR/Sv の 90% 信頼区間の下限値は負の値であり、統計的に有意な増加を示すことはできない。したがって、全がん(白血病を除く)および非 CLL 白血病ともに、積算線量の増加による死亡率の統計的に有意な増加を示すことはできない。15 カ国研究では、大規模な低線量、低線量率のコホートであるが、積算線量に伴う ERR の統計的に有意な増加を示すことはできなかった。

15 カ国研究では、喫煙関連がんとは非喫煙関連がんの比較から、喫煙による ERR への影響の可能性は否定できないが、喫煙の有無の情報はコホート全体の調査項目にはないため、喫煙による ERR への影響は明らかではない^{vi}。

また、解析の対象からは有意な中性子被ばくと内部被ばくの可能性の者が除かれている。これらの者は比較的高い線量^{vii}の光子外部被ばくを受けた可能性がある者を含んでいるが、除外することによって、統計的な検出力が低下する要因となったと考えられる。

— 参考資料 —

- 1) E.Cardis *et al. Bmj*, 331(7508), 77.(2005)
- 2) M.Vrijheid *et al. Radiat. Res.* 167(4), 361-379.(2007).
- 3) M.Vrijheid *et al. Radiat. Res.* 167(4), 361-379.(2007).
- 4) I.Thierry-Chef *et al. Radiat. Res.* 167(4), 380-395.(2007).
- 5) E.Cardis *et al. Radiat. Res.* 142(2), 117-132.(1995).
- 6) Canadian Nuclear Safety Commission..INFO-0811 (2011).
- 7) J.P.Ashmore *et al. J Radiol Prot*, 30, 121-129.(2010).

^{vi} 喫煙の有無を調査した 7 つのサブコホートのうち、喫煙との正の交絡が見られるのは日本を含む 3 つであり、他の 4 つは交絡が見られない³⁾。

^{vii} 中性子または内部被ばくをした可能性がある者の光子の平均個人線量当量は 46.6mSv で 15 カ国研究コホート全体の平均線量 19.4mSv に比べて 2 倍以上高い³⁾。

原子力関連施設の作業者の放射線疫学調査研究 15 カ国研究から INWORKS までの放射線疫学研究の流れ

本稿では 15 カ国研究, それ以降に実施された仏英米の国別の疫学研究, および INWORKS までの一連の研究成果を俯瞰して, 原子力関連施設の放射線作業者の疫学研究の全体像を解説する。そして, これらの低線量, 低線量率, 遷延被ばくの放射線リスクを急性被ばくである原爆被爆者の疫学研究結果との比較について記述する。

KEYWORDS: France, U.K., U.S., nuclear worker, pool cohort, combined cohort, NRRW

I. 各研究の概要

低線量・遷延被ばくによるがん死亡率を直接的に評価するため, 原子力産業等に従事する複数の機関/施設の放射線作業者を統合した疫学研究として, 1995 年に米英加 3 カ国の原子力産業等の放射線作業者の疫学調査研究¹⁾が, 1999 年に英国放射線作業者国家登録に基づく疫学調査研究²⁾が公表された。しかし, どちらもがん死亡率と積算線量との有意な関連性は見出すことはできなかった。その後, 統計的な検出力向上のため, 約 41 万人規模の 15 カ国研究が行われた。その結果が 2005 年に公表され, 信頼性に問題のあるカナダのデータを除く 14 カ国の統合解析結果からは, がん死亡率と積算線量との有意な関連性は見出すことはできなかった。15 カ国研究から INWORKS 研究までの間に仏, 英, 米ではいくつかの原子力作業者の放射線疫学研究が行われた。これらの放射線疫学研究の概要を表 1 に示す。表 1 に示す放射線疫学調査研究の多くは光子被ばくのみならず, 中性子の外部被ばく者および放射性核種による内部被ばく者を対象としている。積算の平均個人線量当量は 20mSv 前後である。15 カ国研究では中性子被ばく者と内部被ばく者を除いているが, 仏, 英, 米で行われた研究では, 一部の研究を除き, すべて含まれている。もちろん, 中性子被ばく者と内部被ばく者は INWORKS においても含まれている。

II. 各研究における線量再構築

各疫学研究では, 個人線量計の記録線量から線量の再構築を行っている。線量再構築の状況を表 2 に示す。

表 2 から, 米国 2015 の研究³⁾を除けば, 中性子線量は評価されていない。しかし, 一部を除くどの研究も中性子被ばくの有無についてはフラグを立てて識別しており, 中性子被ばく者を含めて解析している。内部被ばくについては, 米国 2015 の研究のみトリチウムの内部被

ばくについて線量評価しており, 他の核種についてはどの研究も線量評価はしていないにも拘わらず, 15 カ国研究以外の研究では内部被ばく者を含めて疫学解析している。一般的に中性子被ばく, または内部被ばくをしている者は比較的被ばく線量が高い者が多く, これらのデータを除くことにより, 統計的な検出力が下がることを懸念したためと考えられる。しかし, 中性子や内部被ばくの線量評価をしていない場合, がん死亡率の過剰相対リスク(ERR)は光子の外部被ばく線量に対する値であり, 中性子被ばくや内部被ばくの線量は加算されていない。中性子被ばくや内部被ばくの影響を除くためには, 中性子被ばく者や内部被ばく者に対する感度解析やベースラインの調整等が必要となるが, INWORKS を除けば, 感度解析やベースライン調整等を実施していない論文も見受けられる。

III. 他の疫学研究との比較

低線量率, 遷延被ばくである 15 カ国研究から INWORKS まで, 外部被ばくのモニタリングが行われた仏, 英, 米の原子力作業者の放射線疫学研究と, 急性被ばくである原爆被爆者コホートの寿命調査である LSS⁸⁾(約 87,000 人)疫学調査研究結果を表 3 に示す。表 3 に示す全がん(白血病を除く)と固形がんとの違いは, 白血病以外のリンパ腫や多発性骨髄種などの血液のがんを含むか否かの違いである。ラグタイムは固形がんについては 10 年であるが, 非 CLL 白血病は 2 年としている。ただし, 米国 2015³⁾は非 CLL 白血病を 7 年としている。

急性被ばくである LSS と低線量率遷延被ばくである原子力施設の放射線作業者のがん死亡率について ERR を比較すると, 90%または 95%信頼区間を考慮すれば, 両者の値に明らかな有意差は見られない。

IV. まとめ

15 カ国研究から INWORKS に至るまでに仏, 英, 米それぞれで行われた原子力産業等における放射線作業者のがん死亡率の疫学調査研究結果について, 急性被ばくである LSS 疫学調査研究結果と比較すると, 信頼区間を考慮すれば ERR は統計的に明らかな有意差は見られ

ⁱ 放射線に被曝した場合に同じ吸収線量であっても, 放射線の種類, エネルギーの違いにより生物に及ぼす効果に量的な差がある。その違いを比で表したものが生物学的効果比(RBE: Relative Biological Effectiveness)である

表1 15カ国研究から INWORKS までに、仏、英、米で行われた原子力作業者の放射線疫学調査研究の概要

疫学研究	調査期間	人・年	平均個人線量当量 (mSv)	中性子被ばく者の扱い	内部被ばく者の扱い
INWORKS	1944-2005	8,221,032	24	含める	含める
米国 2015 ³⁾	1944-2005	4,019,065	20.2	含める	含める
仏国 2013 ⁴⁾	1968-2004	1,467,611	16.1	含める	含める
仏国 2011 ⁵⁾	1968-2004	1,014,556	12.1	含める	含める
仏国 2010 ⁶⁾	1961-2003	449,984	21.5	除く ²⁾	除く
英国 2009 ⁷⁾	1955-2001	- ¹⁾	24.9	含める	含める
15カ国研究	1943-2000	5,192,710	19.4	除く	除く

*1 人・年のデータは不明。コホート人数は 174,541 人

*2 最終的な解析では中性子被ばく者は除いているが、中性子被ばく者を含めた解析についても実施している。

表2 15カ国研究から INWORKS までに、仏、英、米で行われた原子力作業者の放射線疫学研究における線量再構築

疫学研究	線量評価対象	光子エネルギー	中性子線量	内部被ばく線量
INWORKS	男女別器官吸収線量	100keV-3MeV ²⁾	評価せず	評価せず
米国 2015	明記なし ¹⁾	全て含める	評価 ³⁾	³ Hのみ評価
仏国 2013	明記なし ¹⁾	全て含める	評価せず	評価せず
仏国 2011	明記なし ¹⁾	全て含める	評価せず	評価せず
仏国 2010	明記なし ¹⁾	100keV-3MeV	評価せず	評価せず
英国 2009	明記なし ¹⁾	全て含める	不明	評価せず
15カ国研究	器官の等価線量	100keV-3MeV	評価せず	評価せず

*1 疫学解析に用いている線量の概念については不明である。おそらく、個人線量計の記録線量を用いていると思われる。

*2 100keV 未満の光子被ばくが年間被ばく線量の 10% を超える場合は除き、3MeV を超える光子は線量が少ないと見なして含めている。

*3 中性子被ばくに関する補正係数である RBE(生物学的効果比)ⁱ を 10 としている。

表3 15カ国研究から INWORKS までに仏、英、米で行われた原子力作業者の放射線疫学調査と LSS の調査との比較

疫学研究	固形がんの ERR	全がん(白血病を除く)の ERR	非 CLL 白血病の ERR
INWORKS	0.47/Gy (90%CI: 0.18-0.79)	0.48/Gy (90%CI: 0.20-0.79)	2.96/Gy (90%CI: 1.17-5.21)
米国 2015	-	0.14/Sv ³⁾ (95%CI: -0.17-0.48)	1.7/Sv ³⁾ (95%CI: -0.22-4.7)
仏国 2013	0.34/Sv (90%CI: -0.56-1.38)	-	3.96/Sv (90%CI: <0-16.82)
仏国 2011	0.46/Sv (90%CI: -0.48-1.54)	-	-
仏国 2010 ¹⁾	-	-	-
英国 2009	-	0.275/Sv (95%CI: 0.02-0.56)	1.712/Sv (95%CI: 0.06-4.29)
15カ国研究	0.87/Sv (90%CI: -0.16-1.71)	0.97/Sv (90%CI: 0.27-1.80) 0.65/Sv ⁴⁾ (90%CI: -0.22-1.55) ⁴⁾	1.93/Sv (90%CI: <0-7.14)
LSS ²⁾	0.37/Sv (90%CI: 0.17-0.60)	-	2.63/Sv (90%CI: 1.50-4.27)

*1 ERR で表示されていないため記載せず

*2 被曝時 20~60 歳の男性が対象、非 CLL 白血病は直線(L)モデルによる値

*3 原論文の全がん(白血病を除く)の ERR/10mSv=0.14%(95%CI:-0.17%-0.48%)、(非 CLL)白血病は 1.7%(95%CI:-0.22%-4.7%) からそれぞれの ERR/Sv を直線(L)モデルにより評価した。

*4 データに問題があるカナダを除いた結果

なかった。

低線量・遷延被ばくによるがん死亡率を直接的に評価するため、15カ国研究から大がかりに始まった原子力施設の放射線作業者のがん死亡率の疫学研究は、15カ国の

中核となる仏、英、米で自国のコホートに対して個別に疫学研究が行われた。その後、この3カ国のデータは統合され INWORKS としてまとめられた。INWORKS では追跡調査の期間が伸びたことと共に、15カ国研究で除

かれた中性子被ばく者と内部被ばく者を解析対象に含めたため、人・年は約 1.6 倍、白血病を除く固形がん死亡者数は 3.8 倍、非 CLL 白血病による死亡者数も 2.7 倍となり、統計的な検出力は大きく向上した。しかし、中性子被ばく線量と内部被ばく線量が評価されておらず、被ばくに有無のフラグを立てて分類し、ベースラインを調整しているだけなので、結果的には光子の外部被ばくに対するがん死亡率の ERR しか評価されていないこととなり、中性子被ばく線量も考慮している LSS の結果と直接比較するには慎重な検討が必要である。中性子線量評価および内部被ばく線量評価結果を含めた疫学解析が行われることが今後の重要な課題のひとつである。INWORKS では喫煙との交絡は見られないと結論されたが、データの解釈によっては喫煙との交絡も排除できない可能性も考えられる。なお、発がん性物質への暴露の有無や、医療被ばくを含む原子力関連施設以外の被ばく影響の調査も今後の課題であると考えられる。

－ 参考資料 －

- 1) E.Cardis *et al.*, *Radiat.Res.* 142 (2), 117-132.(1995).
- 2) C.R.Muirhead *et al.*, *Journal of Radiological Protection*, 19 (1), 3-26 (1999).
- 3) M.K.Schubauer-Berigan *et al.*, *Radiat. Res.* 183 (6), 620-631.(2015).
- 4) C.Metz-Flamant *et al.*, *Occupational and environmental medicine*, 70 (9), 630-638.(2013).
- 5) C.Metz-Flamant *et al.*, *Radiat. Res.* 176 (1), 115-127.
- 6) O.Laurent *et al.*, *International archives of occupational and*

- environmental health*, 83 (8), 935-944.(2010).
- 7) C.R.Muirhead *et al.*, *British journal of cancer*, 100 (1), 206-212.(2009).
 - 8) K.Ozasa *et al.*, *Radiat. Res.* 177 (3), 229-243.(2011).

著者紹介

岩井 敏 (いわい・さとし)

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

仙波 毅 (せんば・つよし)

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

石田健二 (いしだ・けんじ)

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

高木俊治 (たかぎ・しゅんじ)

三菱総合研究所
(専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線防護

猪狩貴史 (いがり・たかふみ)

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

地球温暖化対策におけるイノベーション どのような期待があるのか、如何なる技術が想定 されているか

キャノングローバル戦略研究所 杉山 大志

地球温暖化対策のためのイノベーションⁱについて、なぜそれが必要とされているのか、如何なる技術が想定されているのかを論じる。

諸国は、地球平均の温度上昇を2度以下に抑制する等の野心的な目標に政治的に合意している。しかしながら、技術的・経済的に達成の見通しが立っているとは言えない。このことから、温暖化対策技術に関するイノベーションへの期待が寄せられている。

政府資料(第5期科学技術基本計画, エネルギー環境イノベーション戦略, 新産業構造ビジョン等)では、イノベーションによって経済成長をもたらす、温暖化問題を含めた社会課題全般を解決することが期待されている。今後のイノベーションの方向性として、①共通基盤技術(IoT・AI・ロボット等)が発達し、金融・医療・製造業・エネルギー等の分野に適用され新産業を創出し、②そのフィードバックを受けて共通基盤技術自身も一層進歩し、さらには③既存の分野の垣根を超えた破壊的イノベーションも引き起こすという姿が描かれている。その中であって、温暖化対策イノベーションはそれ単独ではなく、科学技術全般のイノベーションの一部として位置づけられている。

KEYWORDS: *global warming, innovation, technology, IPCC, scenario*

I. はじめに

1. パリ協定と地球温暖化対策計画

2016年末に発効したパリ協定ⁱⁱでは、地球温暖化防止のための長期的な目標として、「産業革命前からの地球温暖化による温度上昇について2度を十分に下回るよう抑制する」ことを掲げた。更にこのために、21世紀後半には温室効果ガスの純排出量をゼロにすることを目標に掲げた。加えて、2020年迄に、諸国は2050年頃を目途とした長期戦略を提出するよう招請されている。

このパリ協定合意を受けて策定された日本の地球温暖化対策計画では、温暖化対策と経済との両立が謳われ、イノベーションを通じて、2050年までに80%の温室効果ガス排出削減を目指すとしているⁱⁱⁱ。

Innovation to mitigate global warming ; the requirement by policy and the expectation of technologies : Taishi Sugiyama.

(2017年4月10日 受理)

ⁱ 本稿では、イノベーションとは単なる科学・技術の発明・発見ではなく、製品・サービスとしての普及も含む概念として取り扱う。社会制度等の科学・技術以外のイノベーションについては扱わない。

ⁱⁱ パリ協定の解説として詳しくは上野貴弘(2016)。

ⁱⁱⁱ なおパリ協定10条においても、イノベーションは温暖化問題の長期的解決、経済成長および持続可能な開発のために重要であると言及している(UNFCCC 2015a p27)。

それでは、日本は温暖化対策のためのイノベーションを、どのような政策によれば実現していけるのだろうか。これが本稿の問題意識である。

2. 用語について

本稿では、イノベーション研究の慣例にならない、イノベーションとは単なる科学的発見や技術的発明ではなく、製品・サービスとしての普及も含む概念として取り扱う(大橋弘2014)。ただし文献によっては、この定義は異なる場合もあることに留意されたい。

また本稿では、簡単のため、単にイノベーションといったときは科学技術全般のイノベーションを差し、温暖化対策技術に関するイノベーションについては温暖化対策イノベーションと呼ぶことにする。なおイノベーションという場合には科学技術だけでなく社会制度やビジネスモデルなどのイノベーションを含む考え方もあるが、本稿では科学技術イノベーションのみを対象とする。

II. 地球温暖化問題からのイノベーションへの要請

1. IPCCのシナリオ

パリ協定の目標は、図1にまとめられたIPCCのシナリオのうち、「2度以下」と記したシナリオ(430-480ppmおよび480-530ppmの2つのシナリオ)を念頭に置いて

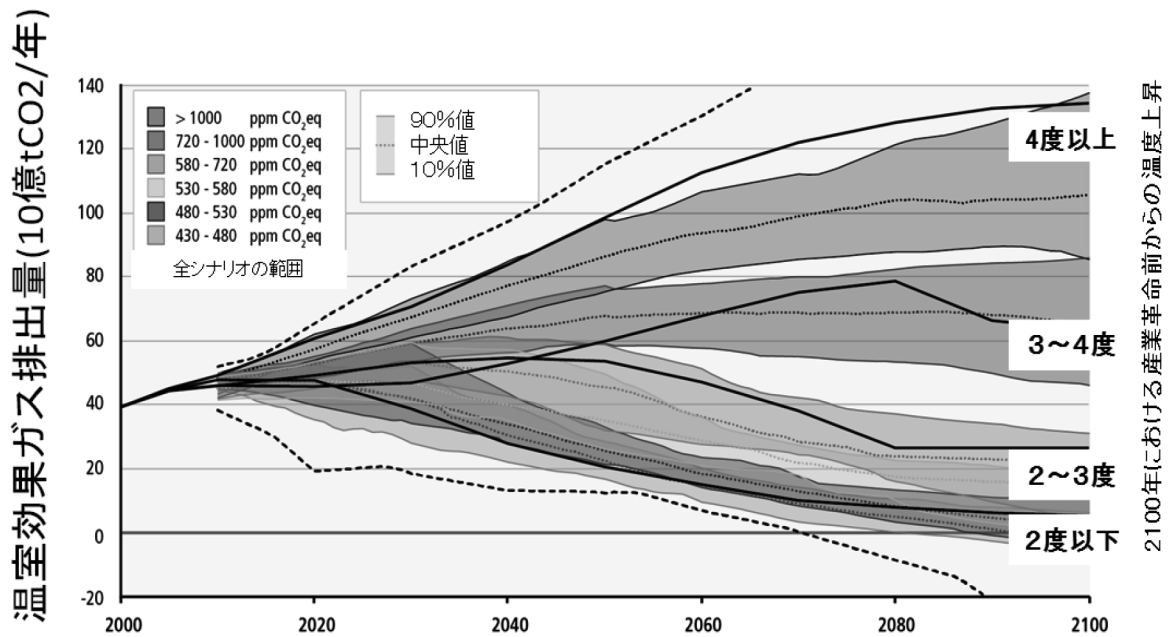


図1 IPCCがまとめた温室効果ガス排出量シナリオ^{iv}

地球温暖化を産業革命前に比べて2度以下に抑制するためには、「2度以下」と記したシナリオ(430-480ppm および 480-530ppm の2つのシナリオ)の範囲で排出量が推移することが必要になる。この場合、2050年の排出量は2010年に比べて4~7割減、2100年には排出量がほぼゼロになる。

設定されたものである。

ところが、この「2度以下」のシナリオの内容を見ると、あらゆる温暖化対策技術について一定の技術進歩を見込んだ上で、更にバイオエネルギー発電とCCS(両者を合わせてBECCSボックスと呼ばれる)を大量に導入する、としている。これは、バイオエネルギー生産によってCO₂を大気から吸収して、燃焼により発生したCO₂はCCSによって地中に埋めることによって、大気中からCO₂を取り除きながら発電するという技術である。そして、これによって電力部門については「負の排出」を実現し、電力以外の部門からの排出を全て相殺して、経済活動全体の温室効果ガス(GHG)排出量をゼロにしている。

しかし、このような大規模な排出削減シナリオの実現には多くの課題がある。そこで以下の4つの観点から、イノベーションへの要請が生じることとなる。

2. IPCCシナリオからのイノベーションへの要請

(1) 高い炭素価格を抑制する

まずこのシナリオでは、高い炭素価格(概ね炭素税のことだと思えばよい^v)が世界共通で導入されると想定

^{iv} (IPCC 2014) Fig. SPM.4(p11).

^v 正確に言えば、炭素価格とは、数値モデル上で1トンのCO₂排出に対して課しているペナルティのことを指している。政策としては多様な政策手段で実現される。例えば炭素税ならその税率が炭素価格となり、排出量の規制ならばその規制水準までCO₂を削減するときのCO₂排出削減限界費用が炭素価格となる。

しており、CO₂の1トンの排出に対して2020年に50ドル、2030年に100ドル、2050年に200ドル、2100年に1500ドル程度と、一貫してかなり高い水準の炭素価格となっている^{vi, vii}。しかし、このように高い炭素価格が世界共通で導入されるということは、国際政治の現実においては極めて難しいと思われる。このため、炭素価格を低く抑えることが出来るようなイノベーションが要請されることになる。

(2) バイオエネルギーとCCSが実現しない場合の代替策となる

IPCC報告にも記述してあるが、バイオエネルギーの大量生産は生態系に悪影響を与える懸念があり、またCCSはCO₂の貯留地点についての政治合意が難しいといった問題を抱える(IPCC2014)。もしもこれらの技術が利用できなければ、同じ排出量の経路を実現するために、一層の温暖化対策イノベーションが要請されることになる。

(3) パリ協定の目標を深掘りする

加えて、パリ協定では各国が2025年から2030年にかけての排出削減目標を提出したが、それを合計しても2度以下への抑制はできそうにないと見られている^{viii}。このことは、温室効果ガスの排出削減目標を年間数十億トン規模で深掘りしなければならないという意味で、「ギ

^{vi} IPCC(2014), p59, Figure TS.12.

^{vii} なおこの炭素価格は最適解での価格なので、「仮に完全に合理的な政策が採られたとしても、これだけの価格になる」という意味である。実際には政策は完全に合理的ではないので、国や部門によっては、炭素価格はこれよりも高くなる。

ガトンギャップ」と呼ばれる。このギガトンギャップを埋めるためにも、今後の温暖化対策イノベーションが要請されることになる。

(4) シナリオで表現されていない技術をもたらす

最後に、図1で使用された統合評価モデル(Integrated Assessment Models, IAM)は、多様な温暖化対策技術を想定しており、そこにはBECCSを含めてあらゆる技術についての進歩が一定程度は考慮されている。だが将来については不確実なことが多いので個別の技術予測の精度には限界がある。また将来については経済構造が大きく変わることもありうる。実際にはIAMは現時点においてある程度見通せる技術についての分析になる傾向があって、抜本的なイノベーションについてはあまりうまく表現できていないと考えられている(江守正多2016)。このことから、IAMによるシナリオを超えた排出削減を実現するものとしても、今後の温暖化対策イノベーションへの期待がかかることになる。

3. 地球温暖化対策計画におけるイノベーションへの期待

パリ協定を受けて策定された日本の地球温暖化対策計画においてもイノベーションへの期待が言及されている。そこでは、「地球温暖化対策と経済成長を両立させながら、長期的目標として2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す…(中略)…このような大幅な排出削減は、従来の取組の延長では実現が困難である。したがって、抜本的排出削減を可能とする革新的技術の開発・普及などイノベーションによる解決を最大限に追求する…(中略)…長期的、戦略的な取組の中で大幅な排出削減を目指し、また、世界全体での削減にも貢献していく」としている。

4. 小括

このように、地球温暖化問題においては、地球温暖化を2度以下に抑制する等の野心的な目標が政治的に合意されながらも、技術的・経済的な達成の見通しが立っているとは言えないことから、温暖化対策技術に関するイノベーションへの期待が寄せられている。

なお、2度という目標はパリ協定で政治的に合意されたものの、環境影響の大きさについては依然として科学的な不確実性があるので^{ix}、将来にはこの目標は変更され

る余地がある。しかし、図1をみると、仮に「2~3度」のシナリオに留めることを目標にするとしても、21世紀後半には温室効果ガスの排出量を現状よりも大幅に削減する必要があり、やはり温暖化対策イノベーションが要請されることに変わりはない。

III. どのようなイノベーションが期待されているのか

1. はじめに

温暖化対策イノベーションへの要請について前章で述べたが、本章では、具体的にはどのような技術が想定ないし期待されているのか、日本政府の計画・ビジョン等の資料を用いて概観する。この際、いわゆる温暖化対策技術だけでなく、それに関連する範囲で科学技術全般のイノベーションも取り扱う。そうすることによって、温暖化対策イノベーションと、科学技術全般のイノベーションがどのように関係づけられているかが解るであろう。

直接に温暖化対策イノベーションに関する日本政府の資料としては「エネルギー・環境イノベーション戦略」があるが、ここではまず、概念的にその上位にある「第5期科学技術基本計画」から順に紹介する。

2. 第5期科学技術基本計画(内閣府)

日本政府は、長期的視野に立って体系的な科学技術政策を実行する目的で、定期的に「科学技術基本計画」を策定してきた。内閣府に設置された総合科学技術・イノベーション会議(CSTI, 旧総合科学技術会議から改組)は、この計画の策定と実行に責任を有している(内閣府2016a)。同会議は「科学技術イノベーション総合戦略」を策定し、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)や革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)といった「国家重点プログラム」の創設、イノベーション・ナショナルシステムの改革に向けた、新たな研究開発法人制度の創設、大学と研究資金の一体改革の検討など、省庁の壁を越えた日本全体での科学技術イノベーションへの取組を強化してきた。

2016年1月22日、2016~2020年度にわたる第5期科学技術基本計画が閣議決定された(図2)(内閣府2016a)。そこでは現状を「情報通信技術(Information and Communication Technologies, ICT)の進化等により、社会・経済の構造が日々大きく変化する“大変革時代”が到来し、国内外の課題が増大、複雑化する中で科学技術イノベーション推進の必要性が増している」と認識しており、特に、「“未来の産業創造と社会変革”に向けて、自ら大きな変化を起こし、大変革時代を先導していくため、非連続なイノベーションを生み出す研究開発を強化し、新しい価値やサービスが次々と創出される“超スマート社会”を世界に先駆けて実現するための一連の取組を更に深化させつつ“Society 5.0”として強力に推進する」、と

^{ix} 気候変動枠組み条約事務局による分析(UNFCCC 2015b)。INDCs Synthesis Report

http://unfccc.int/focus/indc_portal/items/9240.php

^{ix} 江守正多(2016)は、地球温暖化によって上昇する温度が1.5度、2度、2.5度の場合を比較すると、現在定量化される範囲においては、個々の温度の場合の環境影響の誤差の方が、異なる温度間での環境影響の差よりも大きいという主旨のことを述べている。

(2) 世界に先駆けた「超スマート社会」の実現 (Society 5.0)

- 世界では、ものづくり分野を中心に、ネットワークや I o T を活用していく取組が打ち出されている。我が国ではその活用を、ものづくりだけでなく様々な分野に広げ、経済成長や健康長寿社会の形成、さらには社会変革につなげていく。また、科学技術の成果のあらゆる分野や領域への浸透を促し、ビジネス力の強化、サービスの質の向上につなげる
- サイバー空間とフィジカル空間（現実社会）が高度に融合した「超スマート社会」を未来の姿として共有し、その実現に向けた一連の取組を「Society 5.0」※とし、更に深化させつつ強力に推進
※ 狩猟社会、農耕社会、工業社会、情報社会に続くような新たな社会を生み出す変革を科学技術イノベーションが先導していく、という意味を持つ
- サービスや事業の「システム化」、システムの高度化、複数のシステム間の連携協調が必要であり、産学官・関係府省連携の下、共通的なプラットフォーム（超スマート社会サービスプラットフォーム）構築に必要となる取組を推進

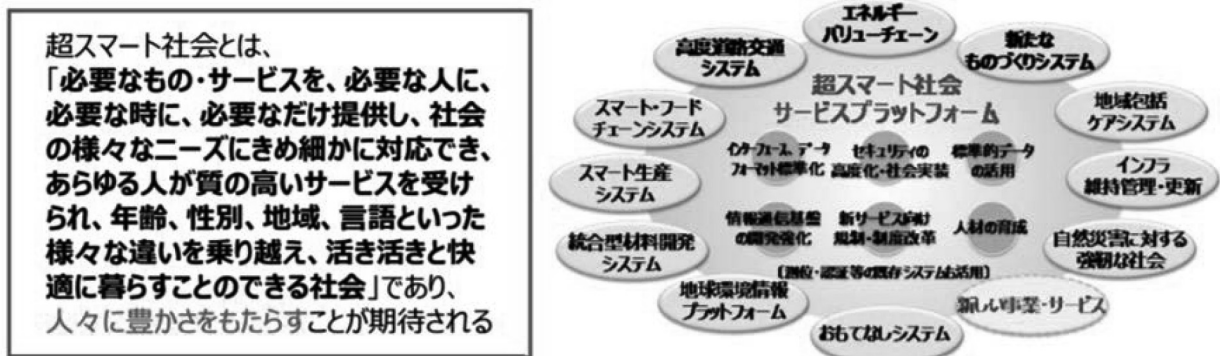


図2 第5期科学技術基本計画(抜粋)(内閣府 2016a) <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5gaiyo.pdf>

している。図2から分るように、温暖化対策に関する技術も、このような全体的な枠組みの一部として位置づけられている。例えば、エネルギーバリューチェーン、スマート生産システム等である。

ここで超スマート社会とは、「必要なもの・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供し、社会の様々なニーズにきめ細かく対応でき、あらゆる人が質の高いサービスを受けられ、年齢、性別、地域、言語といった様々な違いを乗り越え、生き活きと快適に暮らすことのできる社会」と定義されている。

そこでは例えば、「生活の質の向上をもたらす人とロボット・人工知能(AI)との共生、ユーザーの多様なニーズにきめ細かく応えるカスタマイズされたサービスの提供、潜在的ニーズを先取りして人の活動を支援するサービスの提供、地域や年齢等によるサービス格差の解消、誰もがサービス提供者となれる環境の整備等の実現」が期待されている。

また、超スマート社会に向けた取組の進展に伴い、エネルギー、交通、製造、サービスなど、個々のシステムが組み合わせられるだけにとどまらず、将来的には、人事、経理、法務のような組織のマネジメント機能や、労働力の提供及びアイデアの創出など人が実施する作業の価値までもが組み合わせられ、更なる価値の創出が期待でき

る、としている。

3. エネルギー・環境イノベーション戦略(内閣府)

内閣府総合科学技術・イノベーション会議は、「エネルギー・環境イノベーション戦略」(NESTI 2050)を、2016年4月19日に取りまとめた(図3)(内閣府 2016b)。これは前述の地球温暖化対策計画と並ぶ日本政府の地球温暖化対策の1つと位置づけられている。

ここでは、第5期科学技術基本計画で示された「Society 5.0」(超スマート社会)に言及した上で、「エネルギー・環境分野においても、排出削減技術を個別に開発・導入するだけでなく、エネルギー関連の装置や設備をネットワーク化し、また、個別の機器・設備等をそれぞれ制御するだけでなく、エネルギー・システムとして統括的に捉え、システム全体として最適化を図る。…エネルギーの徹底的な有効利用が実現し、世界全体のエネルギー消費量・CO₂排出量が最小化される」としている。

かかる考え方を反映して、同戦略では、従前から行われてきた太陽電池や蓄電池などの個別のいわゆる温暖化対策技術開発に加えて、AI等のICTによるシステム統合技術、および超伝導・パワーエレクトロニクスといった材料・部品などのシステムコア技術といった、温暖化以外の分野でも活用が期待される共通基盤技術について



図3 エネルギー・環境イノベーション戦略(抜粋)(内閣府 2016b) <http://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/gaiyo.pdf>

も有望分野として重点が置かれている。

4. 新産業構造ビジョン(経産省)

第5期科学技術基本計画に対して、産業面から補完する関係にあるものとして、この新産業構造ビジョンがある(図4)。ここにも温暖化対策に係わる技術の将来像が描かれている。

経緯であるが、まず「日本再興戦略 改訂2015」が2015年6月30日に閣議決定された。そこでは「IoT・ビッグデータ・人工知能等による変革は、従来にないスピードとインパクトで進行しており、民間が時機を失うことなく的確な投資を行い、また、国がそれを促し加速するためのルールの整備・変更を遅滞なく講じていくためには、羅針盤となる官民共有のビジョンが必要」であったとした。

これを受けて、経産省が事務局を務める産業構造審議会は「新産業構造部会」を立ち上げ(8月)、翌年の2016年4月27日に「新産業構造ビジョン」の中間整理を発表した。参加省庁は、内閣府、公正取引委員会、金融庁、総務省、財務省、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、国土交通省である(経産省 2016)。

同ビジョンでは、今後のイノベーションの方向性として、① ICT・IoT・AI・制御等の「共通基盤技術」が、金

融・医療・製造業・エネルギー等の産業分野に適用され(経産省 2016 p11)、②実地で収集されたビッグデータをもとにアルゴリズムやデバイスの改良を図る等、フィードバックを受けて共通基盤技術が進歩し^x(同 p19, p20)、更には③既存の分野の垣根を超えた破壊的イノベーションも起きる(同 p16, p27)という形が描かれている。

この③の破壊的イノベーションについて、例えば運輸部門においては、自動走行技術やドローン技術の進展を軸に、社会ニーズに対応する新たなバリューチェーン・産業群が出現し、新サービス・製品が生まれる可能性があるとしている(図5)。

5. 次世代人工知能技術社会実装ビジョン(NEDO)

以上で見たように、イノベーションに関する政府の計画・ビジョンでは、ICTが特に注目されている。以下で

^xフィードバックには、例えば、以下の様なものがある。シミュレーション技術の利用によって材料の製造・加工技術が進歩すると、フィードバックとして、計算能力の高い計算機が出来る。あるいは、ロボットは、実地に投入されデータが収集されることで、制御アルゴリズムが改良される。例えば掃除ロボットや軍用ロボットに活用されているアルゴリズムである包摂アーキテクチャもそのようにして改善された(Brooks 2003)。



図4 新産業構造ビジョン(抜粋) (経産省 2016 p11)

http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzou/pdf/008_05_01.pdf

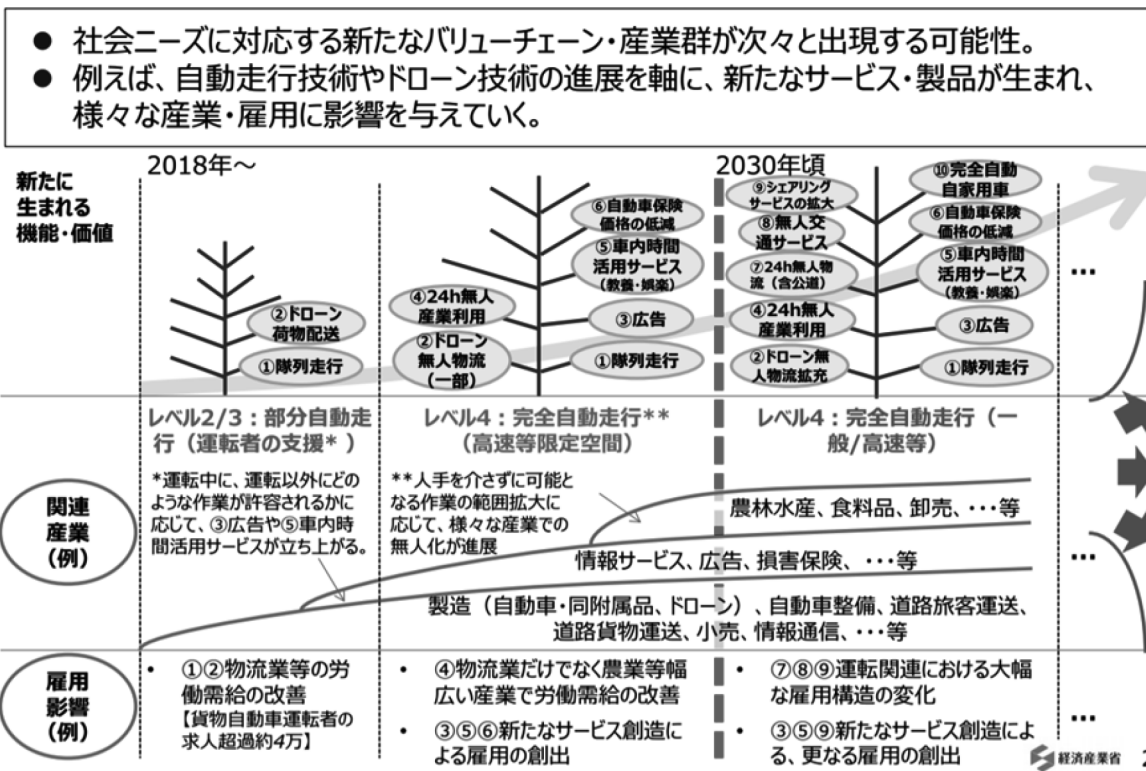


図5 新産業構造ビジョン(抜粋) 「移動に関連する新産業の広がり」(経産省 2016 p26)

http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzou/pdf/008_05_01.pdf

はその1つの柱である人工知能を取り上げる。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、2016年4月21日に、人工知能技術の進展予測とともに、各分野においてどのような効果もた

らされるのかを時間軸上に可視化した「次世代人工知能技術社会実装ビジョン」を公表した(NEDO 2016)。

同ビジョンでは、現在～2020年、2020年～2030年、2030年以降の3つの時間枠に分けて、人工知能技術及び

人工知能及びその関連技術の進展（全体版）



TSC Frontier & Fusion Area Unit			
分類	現在～2020年	2020年～2030年	2030年以降
認識能力関係	<ul style="list-style-type: none"> 静止画像・動画からの一般物体認識が人間レベルに到達 3次元情報からの環境認識が人間レベルに到達 人間の表情、感情の認識が人間レベルに到達 	<ul style="list-style-type: none"> 原始的シンボルグラウンディング問題の解決を背景に、特定ドメインにおいて、文脈や背景知識を考慮した認識が可能に スモールデータでの学習による認識が可能に 	<ul style="list-style-type: none"> 特定ドメインに限らず、一般ドメインにおいて、文化や社会的背景などを考慮した認識が可能に（シンボルグラウンディング問題の解決）
運動能力関係	<ul style="list-style-type: none"> ディープラーニング（DL）と強化学習の融合が進化し、人間が設定した報酬体系の下、高度なゲームなどのタスクの遂行（フランチング）が人間レベルに到達 運動に関するプリミティブ、構造（オントロジー）を自動生成する技術の確立 DL+強化学習の進化により、剛体物マニピュレーション制御のほか、柔軟物マニピュレーション制御を学習 自律移動しながら3Dマップを生成し、周辺環境を構造化 不整地等非構造化環境におけるロコモーション技術が確立 	<ul style="list-style-type: none"> スモールデータでの学習により、深い背景知識を必要とするタスクの遂行が人間レベルに到達 人間の運動・モノの操作・動画画像から概念階層を自動で獲得（運動からの自動的なオントロジー獲得技術の確立） 安全マニピュレーション技術の確立 ハードの進化とあわせて、さまざまな実用的タスクに対するマニピュレーション技術が確立 安全ロコモーション技術の確立 ハードの進化とあわせて、さまざまな実用的タスクに対するロコモーション技術が確立 	<ul style="list-style-type: none"> 文化や社会的背景を必要とするタスクの遂行が人間レベルに到達 マニピュレーション機能がモジュール化され、社会全体で最適配置される 移動が社会の中に組み込まれ、社会全体に移動ソリューションが提供される
言語・意味理解	<ul style="list-style-type: none"> 画像とテキストを相互変換する原始的シンボルグラウンディング技術の確立 特定ドメインにおいて、会話が成立するための発話計画を自動で生成 	<ul style="list-style-type: none"> マルチモーダルな情報、運動に関するプリミティブとテキストを相互変換する、より本格的なシンボルグラウンディング技術の確立 原始的シンボルグラウンディング問題の解決を背景に、新聞等のフォーマルなテキストの分類、情報検索、含意関係認識等が人間レベルに到達 原始的シンボルグラウンディング問題の解決を背景に、特定ドメインの機械翻訳が人間レベルに到達 	<ul style="list-style-type: none"> 人間の言語知識と、画像や運動を介したグラウンディングが融合し、大規模な知識獲得が可能に フォーマルなテキストに限らず、インフォーマルなテキストの分類、情報検索、含意関係認識等が人間レベルに到達 機械翻訳が人間レベルに到達 機械が仮説や要約を生成 音声対話が人間レベルに到達
数値データの処理、人間やシステムのモデル化	<ul style="list-style-type: none"> センサからの大量データの取得・活用が進む（IoT） 認知発達モデル、脳の情報処理の研究が加速 	<ul style="list-style-type: none"> センサデータにより、社会の部分的最適化が可能に 認知発達モデルが部分的に構築 脳の情報処理原理が部分的に解明 	<ul style="list-style-type: none"> 認識能力、運動能力、言語・意味理解能力の向上とあいまって、社会全体の最適化が可能に 認知発達モデルが概ね構築 脳の情報処理原理が概ね解明
計算機システム等の必要なハードウェア	<ul style="list-style-type: none"> ワンショット3D計測やハイパースペクトルカメラなどのセンサ 省電力高性能小型プロセッサ 触覚センサなどセンサ類の高密度化 高度マニピュレータ 	<ul style="list-style-type: none"> インジキングモデル型デバイス スマートアクチュエータ あらゆるデバイスが超低消費電力駆動 	<ul style="list-style-type: none"> 人の脳にせまる脳型デバイス

図6 次世代人工知能技術社会実装ビジョン(抜粋)(NEDO 2016) <http://www.nedo.go.jp/content/100782828.pdf>

その関連技術の進展のビジョンを作成し(図6),「ものづくり」,「モビリティ」,「医療・健康,介護」,「流通・小売,物流」の4つの出口分野における効果を示した。

6. 小括

政府の計画・ビジョン等の資料では、経済成長をもたらす、社会課題全般を解決するために、イノベーションに大きな期待が寄せられている。その内容としては、何れの資料も方向性が一致しており、①共通基盤技術(IoT・AI・ロボット等)が発達し、金融・医療・製造業・エネルギー等の分野に適用され新産業を創出し、②そのフィードバックを受けて共通基盤技術も一層進歩し、更には③既存の分野の垣根を超えた破壊的イノベーションも引き起こす、という形が描かれている。

そして、そのような科学技術全般のイノベーションの一部として、温暖化対策イノベーションは位置づけられている。

IV. 結びに代えて

本稿ではパリ協定・IPCCシナリオからのイノベーションへの要請を整理し、また「エネルギー・環境イノベーション戦略」等からどのような技術のイノベーション

が想定されているかを紹介した。

ここで気づくのは、上記の何れにおいても原子力技術のイノベーションがきちんと位置付けられていないことである。この理由は、原子力についてはすでに確立した技術なのでイノベーションの余地はあるにしても、それほど本質的ではない、と漠然と見做されているためと思われる。

原子力技術にとってより重要な課題は、それが社会的に受容され、法的・政治的な安定性が確保され、事業として採算が合うようになるといった「社会的イノベーション」が起きることであろう。

他方で、本稿の検討から原子力技術政策へ得られる示唆としては、原子力技術もICTや材料技術等の他分野の技術と一体となって進歩することは間違いない、ということである。原子力技術の将来についてそのような将来像を積極的に描く作業をする価値は高いと思われる。つまりⅢ章で描いたような将来像を原子力技術についても書いてみる、ということである。これによって、ICTや材料技術によってどのようなブレークスルーがありうるかを一通り考えることができる。更には、日本の科学技術全体における原子力技術の重要な位置づけを示すこともできるだろう。

－ 参 考 文 献 －

- 1) IPCC (2014) 第5次評価第3部会報告書
http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/
- 2) NEDO (2016)「次世代人工知能技術社会実装ビジョン」次世代人工知能技術社会実装ビジョン作成検討会 平成28年4月21日 http://www.nedo.go.jp/content/100782828.pdf
- 3) 上野貴弘 (2016)「COP21 パリ協定の概要と分析・評価」電力中央研究所報告 Y15017.
- 4) 江守正多 (2016)「パリ協定の長期目標に関する考察」中央環境審議会情報 地球環境部会 長期低炭素ビジョン小委員会 (第3回)資料2
http://www.env.go.jp/council/06earth/y0618-03/mat02.pdf
- 5) 大橋 弘 (2014)「プロダクトイノベーションの経済分析」, 東京大学出版会.
- 6) 経産省 (2016)「新産業構造ビジョン 中間整理」, 産業構造審議会 新産業構造部会, 平成28年4月27日
本文: http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzu11ou/pdf/008_04_00.pdf,

資料: http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzu/pdf/008_05_01.pdf

- 7) 内閣府 (2016a) 科学技術基本計画 閣議決定, 平成28年1月22日
http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/sinsangyo/4kai/sanko2.pdf
- 8) 内閣府 (2016b)「エネルギー・環境イノベーション戦略(案)」の概要, 総合科学技術・イノベーション会議(第18回)平成28年4月19日
http://www8.cao.go.jp/cstp/siryu/haihui018/siryu1-1.pdf



杉山大志 (すぎやま・たいし)

キャノングローバル戦略研究所 上席研究員
IPCC1.5度特別報告書代表執筆者。エネルギー環境政策研究に従事。
著書に「地球温暖化とのつきあいかた(ウェッジ)」等多数。



From Editors 編集委員会からのお知らせ

－ 最近の編集委員会の話題より －
(6月6日第12回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・平成29年4月16日～5月15日に英文誌へ26論文の投稿があった。
- ・論文誌編集委員会の新年度のグループ構成員を決定した。
- ・ORCID学協会コンソーシアム設立検討会の状況が報告された。
- ・英訳出版WGの作業工程に関して事務局から案が説明された。作業が膨大になるので、臨時職員の雇用を要望することとした。
- ・原子力学会放射線工学部会が主催する9th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technologyの論文集をPNSTで出版することが申請され、検討の結果、これを承認した。
- ・Actinides 2017国際会議担当者より、PNST出版の編集小委員会の改訂版が提出され、これを承認した。
- ・投稿ガイドラインおよび英文論文誌審査／査読要領の改定案を承認した。編集委員のメール審議とする。

【学会誌関係】

- ・副委員長から次年度の編集理事への引継ぎ事項の最終版の説明があった。
- ・5/25理事会で承認が得られなかった「編集委員会規程」「学会誌に関する規程」について副委員長から報告があった。これを受け、修正箇所について担当委員から改めて説明があり、修正箇所を確認した。次回の理事会に改めて提出し、承認を得ることとした。また、「学会誌への投稿記事の採否に関する判断基準」、「学会誌記事作成の流れおよび校閲の留意点」の確認を行い、幹事会で承認された。
- ・J-STAGEで公開する記事の公開時期は、出版2年経過後となっていたが、編集委員会から半年経過後とするのが望ましいと意向が示され、委員長が5/25理事会で説明、審議。その結果、出版後半年経たない記事の公開が承認された旨の報告があった。
- ・学会誌ホームページの修正案の説明があり、承認された。
- ・連載講座提案書が核融合工学部会から提出され、内容を審議し、承認された。
- ・巻頭言、時論、各記事の企画の進捗状況について検討した。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

廃止措置に挑む JAEA 梶葉遠隔技術開発センター

日本原子力研究開発機構 山田 大地

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所の廃止措置にあたって、高放射線下で人に代わって作業を行うロボット等の遠隔技術が活用されており、今後も遠隔技術には調査、除染、デブリ取出しに向けた作業のため更なる活用が期待されている。日本原子力研究開発機構梶葉遠隔技術開発センターは、遠隔技術に関する研究開発を促進するとともに、遠隔技術に係る技術者、オペレータ等の育成のための施設として平成 28 年 4 月より運用が開始された。本稿では梶葉遠隔技術開発センターの取り組みについて紹介する。

KEYWORDS: *Fukushima Daiichi, Decommissioning, Naraha Remote Technology Development Center*

I. はじめに

福島第一原子力発電所(以降、福島第一を記す)の事故以来、いまだ 8 万人以上の福島県民の方々が避難生活を余儀なくされている(平成 29 年 1 月現在)。福島第一では汚染水対策、原子炉建屋内の調査、4 号機の使用済燃料プールからの燃料取り出しなど、廃止措置に向けた進展が見られるものの、まだ数多くの課題がある。

これらの課題に対して、人の活動が制限される放射線環境下において円滑に作業を実施するために、ロボットを代表とする遠隔技術が 1 つの重要な技術となる。日本原子力研究開発機構(JAEA; Japan Atomic Energy Agency)梶葉遠隔技術開発センターは、遠隔技術の研究開発の拠点として平成 28 年 4 月より運用を開始した。梶葉遠隔技術開発センターは遠隔技術の研究開発とその技術者、オペレータ等の育成の場として、企業や教育機関及び研究機関等に施設を利用してもらうことにより廃止措置に貢献する。本稿ではこの梶葉遠隔技術開発センターについて紹介する。

II. 梶葉遠隔技術開発センター

梶葉遠隔技術開発センターは遠隔技術の研究開発、また遠隔技術の技術者やオペレータの育成の基盤となる施設である。本施設では、企業や研究機関に施設利用として遠隔技術の実証実験や評価の場を提供するとともに、自らも研究開発に取り組んでいる。

Naraha Remote Technology Development Center for Decommissioning of Fukushima Daiichi : Taichi Yamada.

(2017 年 4 月 3 日 受理)



図 1 梶葉遠隔技術開発センター

図 1 に梶葉遠隔技術開発センターの全景を示す。梶葉遠隔技術開発センターでは研究管理棟と試験棟がある。研究管理棟では、長期の施設利用者のための居室や会議室がある。また、後述するバーチャルリアリティ(VR)システムを整備している。試験棟では、幅 60m、奥行 80m、高さ 40m の大規模な空間でロボットの試験ができる。40m の高さがあるため、小型無人飛行体(ドローン)などの試験も可能である。試験棟は実規模実証試験エリアと要素試験エリアからなる。また、附属建屋にて、施設利用者がデータの整理や打ち合わせができる研究室やロボットの修理、加工ができる工作室を用意している。

また、本施設では以下の 3 点に取り組んでいる。1 つはロボットが活動する環境を模擬するための試験設備を中心とした実証試験フィールドの整備である。もう 1 つは VR やシミュレーションといった計算科学により、ロボットの仕様のデータや環境データの再現を用いた試験、訓練をするシステムの開発である。最後の 1 つはロボットの性能やオペレータの技能の試験法の開発であ

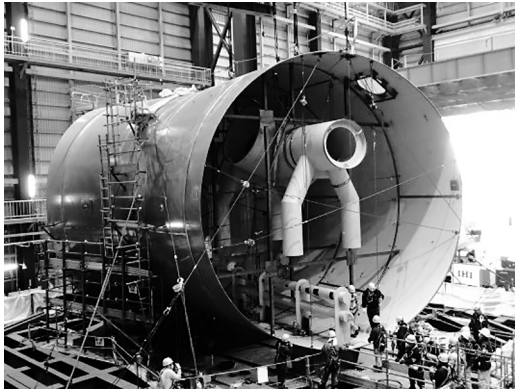


図2 原子炉格納容器下部の実規模試験体
(写真提供：IRID)



図3 モックアップ階段

る。以降、本稿ではこれらの3点並びに施設の利用例を紹介する。

Ⅲ. 実証試験設備

原子炉建屋のようにロボットが活動するために整備されていない環境においては、多様な要素がロボットの活動の障害となる。これら障害となる要素すべてについて、予め机上の検討により予測し、対応することは極めて困難である。このため、ロボットの研究開発においては実証実験による評価検証が重要となる。これに対して、試験棟はロボットの実証実験のフィールドとして利用できる。その中の要素試験エリアに模擬試験のための設備を有している。本節では、実規模試験エリアと模擬試験の設備であるモックアップ階段とロボット試験用水槽について紹介する。

1. 実規模試験エリア

実規模試験エリアは原子炉やその格納容器等の大規模な設備の実規模模擬体による試験が可能なエリアとなっている。実規模試験エリアでは、模擬体の組み立て、試験、解体の一連の作業ができるスペースがある。また、組み立て、試験、解体の各工程のために模擬体を移動できるようにレールを設けている。

現在(平成29年3月)、実規模試験エリアでは、国際廃炉研究開発機構(IRID; International Research Institute for Nuclear Decommissioning)が主導して、原子炉格納容器下部の実規模試験体(図2)を用いた補修・止水技術の開発のための実証実験を進めている。本実験では、これまで工場等各所で試験してきた要素技術を統合して、総合的な実験を行う。実際の現場となる福島第一の原子炉建屋内と同様の模擬体を用いることにより、作業工程の確認、原子炉格納容器下部の補修・止水技術の知見を集積することが計画されている¹⁾。

2. モックアップ階段

遠隔操作により作業・調査を実施するに当たって、多

表1 モックアップ階段の仕様

全体寸法	幅7.4m, 奥行き5.8m, 高さ7.5m
傾斜角度	40度, 41度, 42度, 43度, 51度, 55度(6段階可変)
手すり幅	有効幅: 600mm, 700mm, 800mm, 900mm, 1000mm(5段階可変)
階段周り方向	90度(左右回り), 180度(左右周り)(入れ替え可能)
踏み板	縞鋼板・グレーチング(入れ替え可能)

くの場合、ロボットは作業・調査の対象箇所までの移動の能力が要求される。特にロボットが遠隔操作で階段等の段差を昇降することは難しく、福島第一で実際に作業したロボットにおいても段差の昇降に時間を要していることが報告されている²⁾。そこで、階段昇降の試験のためモックアップ階段を用意している。モックアップ階段の写真を図3、仕様を表1に示す。モックアップ階段は傾斜角度、手すり幅、階段周り方向、踏み板材質が可変であり、これらの要素に対して多様な試験ができる。また、これらの要素の可変幅は、福島第一に投入するロボットの試験ができるよう、福島第一の原子炉建屋内の階段の仕様を網羅できる設計となっている。

3. ロボット試験用水槽

原子炉建屋内には使用済み燃料プールや原子炉内、原子炉格納容器下部等の水没した箇所があり、これらの箇所について水中ロボットによる調査が期待される。そこで、水中ロボットやロボットに搭載するセンサの試験のために、ロボット試験用水槽を整備している。ロボット試験用水槽の写真を図4、仕様を表2に示す。ロボット試験用水槽では水深5mまでの試験ができる。また、水質の模擬として淡水、濁水、塩水で試験が可能であり、水温を常温から60℃の範囲で調整できる。また、ロボット試験用水槽には内部の様子を観測するための窓を上段、中段、下段で計12箇所設置しており、試験中にロボットの動作を確認できる。

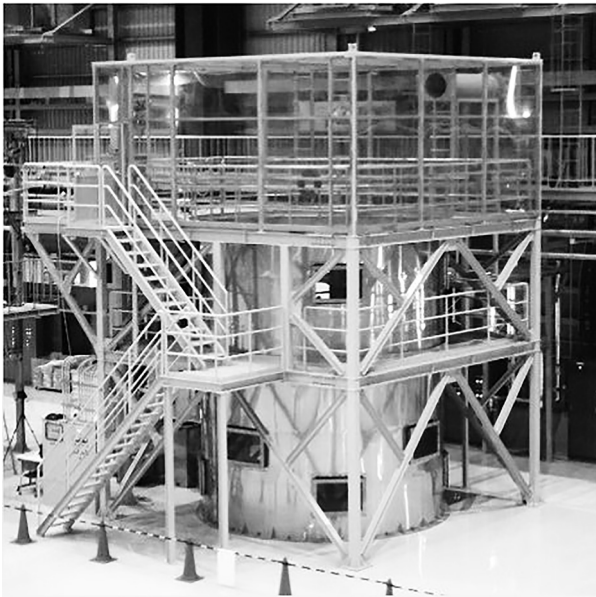


図4 ロボット試験用水槽

表2 ロボット試験用水槽の仕様

寸法	直径4.5m, 水深5.0m
水温調整範囲	常温~60℃
試験可能な水質	淡水, 濁水, 塩水(海水濃度相当)

IV. 計算科学による支援設備

ロボットの研究開発において、実機の製作のコストが大きいことが課題となる。そこで、シミュレーション技術により開発時の検討の効率化が期待できる。図5の例では、シミュレータによりロボットの階段昇降の試験をしており、ロボットの寸法やセンサ取り付け位置などの検討ができる。同時に、シミュレーション技術を用いたロボットの操作訓練や作業計画の検討により、訓練機や試験機を用意するコストを低減できる。

また、ロボットのデータのみならず、ロボットが活動する環境を、センサの計測データや図面等から再現することにより、作業現場を考慮した訓練、作業計画の検討ができる。特に福島第一の廃止措置においては、原子炉建屋内の進入が容易ではないことから、計算機上での環

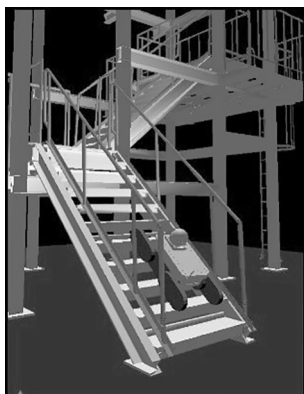


図5 階段昇降のシミュレーション

境の再現を活用した訓練や作業計画には大きな効果が期待される。このため、計算機上で再現した環境データを視覚化して複数人同時に提示できるVRシステムを整備している。本節では、楢葉遠隔技術開発センターで整備しているロボットシミュレータとVRシステムについて紹介する。

1. ロボットシミュレータ

楢葉遠隔技術開発センターではChoreonoid³⁾をもとにロボットシミュレータを整備している。Choreonoidは動力学シミュレーション機能を備えたロボット用統合GUI(Graphical User Interface)ソフトウェアであり、使用者が独自に追加機能を実装することが可能である。楢葉遠隔技術開発センターでは遠隔操作の訓練や作業計画の検討のため、遠隔機材の操作インターフェースや通信遅延のシミュレーションの追加機能やサンプルとなるロボットデータの開発を進めている⁴⁾。また、Choreonoidに適用可能な形式の環境データを用意しており、現在、事故後にロボットが計測した福島第一の1,2,3号機原子炉建屋の地下1階・地上1階のデータⁱ⁾の他、モックアップ階段とロボット試験用水槽のデータがある。

2. バーチャルリアリティシステム

図6に楢葉遠隔技術開発センターのVRシステムを示す。本システムは正面、右、左、床面の4面のスクリーンに環境データの立体画像を投影する。これを専用の眼鏡を着用して見ることで、計算機上で再現した仮想空間に侵入した感覚を視覚的に提示する。本システムは幅3.6m、奥行き2.25m、高さ3.6mであり、10人程度が同時に仮想空間を見ながら議論できる。環境データとして、3次元CADデータが提示できる他、ロボットによる調査に用いられている測域センサ⁵⁾(LiDAR, レーザスキャナとも呼ばれる)の点群データも提示でき、調査結果をデータ加工の手間を少なく確認できる。また、前述したロボットシミュレータと連携し、シミュレーションの様子を提示できるため、ロボットの動作を立体的に

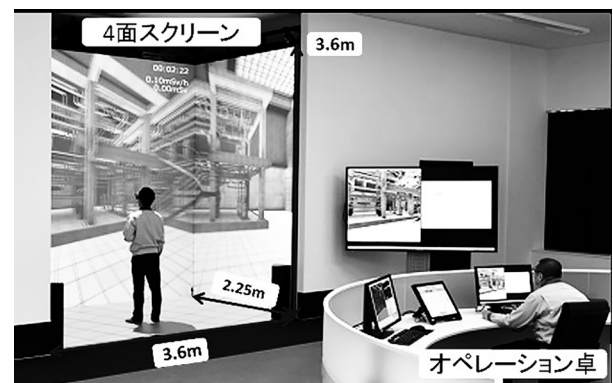


図6 バーチャルリアリティシステム

ⁱ⁾ 東京電力ホールディングス株式会社より提供を受けた

かつ多角的な視点から確認して訓練・作業計画の検討ができる。

さらに、本システムは前節で述べた原子炉建屋のデータを提示できるため、ロボットの研究開発の他、福島第一の作業員に対する教育・訓練に活用できる。本システムは現場の状況の確認や作業計画の検討のため、以下の機能を実装している。

- 距離計測
環境中の構造物間の距離を計測する
- 仮想の物体の設置・移動と干渉判定
機材の持ち込みの検討のため、仮想の物体を環境内に設置し、移動できる。また、移動の際に他の物体との干渉を判定できる
- 照明による視覚のシミュレーション
ハンドライト等で照らした視界を提示する
- 被ばく線量のシミュレーション
線源データから被ばく線量をシミュレートする

V. ロボットの試験・評価法

福島第一のような災害現場で遠隔技術を用いて作業するにあたって、ロボットが操作不能となり取り残されると、そのロボットがその後の作業の障害となるリスクがある。このリスクを低減するために、作業に適したロボットと十分な技能を持ったオペレータの選定が重要となる。この選定のためには、ロボットの性能とオペレータの技能の評価が必要となる。これらの評価のため、原子力災害対応ロボットの試験法の開発に取り組んでいる。また、ロボットの動作を定量的に評価するための計測装置を整備している。本節では、計測装置であるモーションキャプチャと、原子力災害対応ロボット試験法の開発について説明する。

1. モーションキャプチャ

ロボットの試験に当たって、ロボットの動作を計測できると、その動作が意図した動作と一致しているか定量的に評価ができる。檜葉遠隔技術開発センターでは大型のモーションキャプチャ(図7)によってロボットの動作



図7 モーションキャプチャ

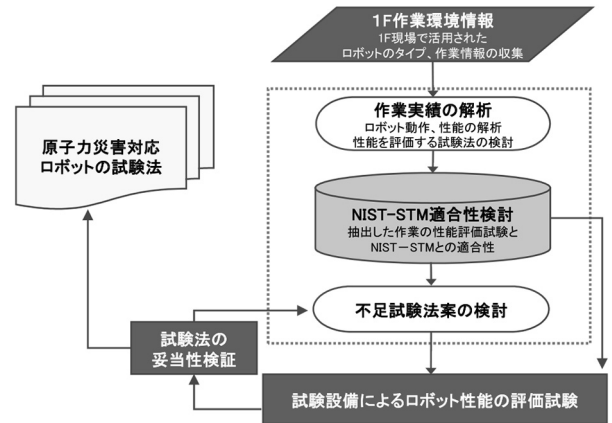


図8 原子力災害対応ロボット試験法開発フロー

を計測できる。このモーションキャプチャは幅15m、奥行き15m、高さ7mのトラスに16台のカメラを設置しており、計測が有効な範囲は幅10m、奥行き10m、高さ2mである。計測範囲が広いことから、散乱した瓦礫等の模擬環境を設置した上でロボットの試験を実施し、その動作が計測できる。

2. 原子力災害対応ロボット試験法の整備・開発

図8に原子力災害対応ロボットの試験法の開発のフローを示す²⁾。福島第一でのロボットの作業の情報を収集、解析し、その結果をもとにロボットに要求される動作・性能を調査する。このロボットに要求される動作・性能について、試験法の準備を進めている。

要求される動作・性能の項目のうち、NIST-STMにて適応可能な試験法がある項目の場合、NIST-STMの当該の試験法を整備する。NIST-STMは米国標準技術研究所(NIST; National Institute of Standards and Technology)により開発された一般災害対応ロボットの性能を定量的に評価する試験法である。これに対して、原子力災害特有でNIST-STMに適応可能な試験法がない項目については、その項目の試験法の開発に取り組む。

VI. 施設利用

平成28年4月の運用開始からの1年間に38件の利用があった。ここでは、代表的な利用例として第1回廃炉創造ロボコンについて紹介する。

図9に第1回廃炉創造ロボコンの様子を示す。第1回廃炉創造ロボコンは文部科学省と廃止措置人材育成高専等連携協議会の主催により、平成28年12月3日(土)に檜葉遠隔技術開発センターで開催された。全国13校の高等専門学校より15チームの学生らが参加した。廃炉創造ロボコンでは、学生は福島第一の廃止措置用のロボット製作を題材とした課題に取り組む。この取り組みを通して、学生の創造性、課題発見能力、課題解決能力の育成への貢献を目的としている。



図9 第一回廃炉創造ロボコン

課題は、「モックアップ階段の階上へ5kgの荷を搬送する」、「凹凸のある地形を踏破してその地形を調査する」の2種類あり、参加者はいずれかの課題に対して10分のプレゼンテーションと10分以内の実演を行う。また、強い放射線下での作業を想定して半導体機器は動作時間が制限される、ロボットを直接見ず遠隔操作するといったルールが設定された。これらの課題への取り組みを通して、参加した学生らにとって廃止措置用のロボットを創造するとともにそのアイデアを発表し、実践する機会となった。

この他、楡葉遠隔技術開発センターでは原子力災害対応ロボットの試験や、企業による遠隔技術の展示会、福島復興や廃止措置に関連する会議や講演会、福島第一廃止措置に関する人材育成のイベントなどにも活用された。

VII. おわりに

本稿では、廃止措置に向けたJAEA 楡葉遠隔技術開

発センターについて、その施設とそこでの取り組みについて紹介した。楡葉遠隔技術開発センターでは、廃止措置に関する遠隔技術の研究開発・人材育成の場として、遠隔機材の試験のための設備を提供するとともに、それら設備の整備、拡充に取り組んでいる。また、今後廃止措置で要求される遠隔技術について、常に先を考えた試験法や試験設備の研究開発・整備を通して、遠隔技術開発を先導し、福島第一廃止措置並びに福島復興に貢献する。

－ 参考資料 －

- 1) IRID：“格納容器(PCV)下部を模擬した実規模試験体試験準備完了と試験計画について(2016年10月13日)”, <http://irid.or.jp/>, 2017年3月アクセス.
- 2) 谷藤祐太ら：“遠隔機器のための試験法開発の取り組み”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演(SI2017), pp. 457-459, 2017.
- 3) 中岡慎郎：“拡張可能なロボット用統合 GUI 環境 Choreonoid”, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 3, pp.12-17, 2013.
- 4) 鈴木健太ら：“遠隔操作ロボットに係るシミュレーション機能及び周辺技術開発”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2017), pp. 460-462, 2017.
- 5) H.Kawata ら：“Development of ultra-small lightweight optical range sensor system”, Proc. Intelligent Robots and System(IROS2005), pp. 1078-1083, 2005.

著者紹介

山田大地 (やまだ・たいち)

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 (専門分野/関心分野)生活環境におけるロボットの自律走行及び自己位置推定/災害対応ロボット, ロボットの試験環境及び評価法



火山現象に対する原子力発電所の安全確保について

JEAG4625 改定版の背景とその技術的根拠(その2)

原子力安全推進協会 中村 隆夫, 電源開発 岩田 吉左

福島第一原子力発電所事故後に原子力規制委員会が制定した「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」(以下、新規制基準と言う。)を受け、シビアアクシデント防止のために新たに設置が求められた重大事故等対処施設について火山現象に対し詳細設計段階で考慮すべき事項を定めるとともに、火山現象による施設への影響を確認するための点検計画に関する規定を追加するため、指針の改定について検討した。

本稿では指針改定の検討に携わった著者らが、重大事故等対処施設を火山現象から防護するための基本的考え方、具体的な対応方針及び火山現象により発電所が停止した後の施設の点検に関する留意事項とそれらの技術的根拠について解説する。

I. はじめに

日本電気協会は世界に先駆けて火山現象に対する原子力発電所(以下、発電所と言う。)の安全確保のための学協会規格 JEAG4625(以下、指針と言う)を2009年に制定したが、その後引き続き指針改定のための検討を続け、2016年には福島第一原子力発電所事故(以下福島事故と言う。)後に原子力規制委員会が制定したシビアアクシデント(以下、重大事故あるいはSAと言う。)防止のための新規制基準を受けて、新たに設置が求められた重大事故等対処施設について詳細設計段階で火山現象に対して考慮すべき事項を定めると共に、火山現象による施設の影響を確認するための点検計画に関する規定を追加する指針改定を実施した。^{1, 2)}

本稿では、指針改定に関わった著者らが、SAが発生するおそれのある事態に対応して、その発生及び拡大を防止する目的で設置された重大事故等対処施設を火山現象から防護するための基本的考え方、具体的な対応方針及び火山現象により発電所が停止した後の施設の点検に関する留意事項について解説する。

II. 火山現象に対する安全確保の考え方

火山現象に対する安全確保の考え方は、「火山現象か

ら屋外設備を防護する」ことと、建屋内設備については「建屋内に火山現象の影響を及ぼさない」ことにより、重要な安全機能の喪失を防ぐことである。

火山現象に対して安全を確保するために講じる具体的な手段としては、発電所を安全に停止し、それを長期的に維持・冷却するために必要な屋外設備を防護すると共に、建屋内への火山現象の影響の侵入を防止することが必要である。対象となる施設は、発電所を安全に停止し、高温停止状態から冷温停止状態へ移行させ、且つ、冷温停止状態を安定に維持するための施設に加えて、使用済燃料貯蔵プールの冷却機能を維持するために必要な構築物、系統及び機器が該当する。

SAは、安全機能及びサポート機能が多重故障、共通要因故障により広範に失われることで発生する。

新規制基準においては、福島事故において設計基準事故に対処するための安全機能が津波により喪失しSAに至ったこと等を教訓に、更なる深層防護レベルとして重大事故等対処施設の設置を要求している。

重大事故等対処施設の安全機能の確保においては、SAに至るような安全機能等の喪失状態(シナリオ)を特定した上で、特定された安全機能等の喪失状態を発生させない(既存機能の強化)、更に、万一発生した場合でも喪失した機能を代替あるいは復旧する手段(代替機能の整備)を講じることが基本的なアプローチとなる。

重大事故等対処施設の深層防護上の位置づけは、人と環境を有害な放射線影響から防護することを目的に、事象の進展に応じたSA発生防止のための対策(炉心損傷

Safety Assessment of Nuclear Power Plant under Volcanic Phenomena-Background and Technical Basis of JEAG4625-2015: Takao Nakamura, Kichisa Iwata.

(2017年3月23日 受理)

防止), SA 拡大防止のための対策及び影響抑制のための対策を構築することになるが, 高い信頼性と独立性そして他の防護レベルとバランスが取れていることが求められる。

重大事故等対処施設としては, 代替電源, 代替注水設備, 代替除熱設備等があり, 常設型, 可搬型の設備が要求されている。常設型の設備は, 即応性に優れ, 可搬型の設備は対応の柔軟性に優れているという特長がある。電気事業者はこれらの設備を組み合わせる SA 防止のために適切な措置を講じる必要がある。

Ⅲ. 重大事故等対処施設に関する火山影響評価

重大事故等対処施設の影響評価で考慮する火山現象としては, 広範囲に降下し, 海流等によってサイトに到達することがある火山灰等及び火山ガスを対象とする。

火山灰等による施設への影響モードは, 「荷重」, 「閉塞」, 「摩耗」, 「腐食」, 「大気汚染」, 「給水の汚染」, 「絶縁影響」があり, これらの影響が及ぶ可能性のある施設を抽出する必要がある。

重大事故等対処施設について火山現象による影響評価を実施する際には, その安全機能に基づき直接系と関連系に整理した上で施設を抽出する。抽出の観点は以下の通りとした。

- ・屋外に設置されている施設(荷重・閉塞・摩耗・腐食・大気汚染・給水の汚染・絶縁影響)
- ・屋外に開口しており火山灰等を含む海水の流路となる施設(閉塞・摩耗・腐食)
- ・屋外に開口しており火山灰等を含む空気の流路となる施設(閉塞・摩耗・腐食)
- ・屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設(絶縁影響(制御盤等))
- ・火山灰等から防護する建屋(荷重)

また, 火山灰等の影響を受ける可能性がある施設で, 重大事故等対処施設に波及的影響を及ぼし得る施設についても抽出する。

重大事故等対処施設の例を以下に示す。

- (1) 常設設備
 - ・代替注水設備(ポンプ, タンク等)
 - ・代替除熱設備(フィルタベントシステム, 代替熱交換器システム等)
 - ・代替発電機(空冷式ディーゼル発電機等)
- (2) 可搬型設備
 - ・電源車
 - ・可搬型注水設備(消防自動車, 放水車等)
 - ・移動式代替熱交換器設備
 - ・燃料補給用タンクローリー
- (3) 建屋

・上記設備を収納する建屋

本指針では, 火山噴火の影響により, 「止める」, 「冷やす」, 「閉じ込める」の重要な安全機能が喪失しないようハード面及びソフト面の対策を整備することを定めている。このため, 設計段階で想定される火山噴火により SA が発生する可能性は極めて低い。一方, 設計想定を超える規模の火山噴火により SA が発生する場合, 及び火山噴火と SA が独立して同時に発生する場合の想定の実現性については, 設計想定を超える火山噴火の発生頻度と SA の発生確率の大きさに基づいて判断する必要があることから, 確率論的アプローチを用いた手法の活用が必要となる。現時点では, 設計想定を超える規模の噴火の想定や, 火山噴火と SA との重ね合わせの判断に用いるまでには確率論的アプローチの手法が整備されてきておらず, 今後継続して検討を進める必要がある。従って, 今回の指針改定においては, 重大事故等対処施設が火山噴火後にその機能を喪失することなく, かつ, 運用面での対応を阻害することがないことを確認することを目的として, 重大事故等対処施設が待機状態での降灰を前提として影響評価方針をまとめることとした。

火山灰による施設への具体的な影響としては, 対象設備の特徴(真上に開口部がある等)から, 「閉塞」や「給水の汚染」を考慮する設備も一部あるが, 火山灰の堆積による「荷重」となる。

なお, 「腐食」については, 運転状態及び待機状態にかかわらず屋外設備の外表面に付着することから発生する可能性があるが, 屋外設備は塗装等が施されているため, 短期に金属表面の腐食が進むことはないと考えられることから考慮する必要はないとした。

Ⅳ. 重大事故等対処施設設計の具体例

Ⅲ章に述べた考慮すべき影響モードの考え方を基に, 以下に代表的な重大事故等対処施設における火山灰等に対する設備対策設計の具体例と考え方について述べる。

(1) 代替注水設備(ポンプ)

代替注水設備(ポンプ)は屋外に設置される場合, 火山灰が設備に堆積するおそれがある。そのため火山現象に対する影響モードは火山灰堆積荷重による局部曲げによる変形等が考えられる。これは, 屋外タンクの場合, 屋根根部への火山灰堆積荷重による座屈を想定しているのに対し, 屋外ポンプでは, 火山灰堆積荷重の影響を受けると想定される部位として投影面積が最も大きいモータ上面を想定し, その上で運転時荷重(ポンプスラスト荷重)が加わるモータフレームについて健全性評価を実施するため, 影響モードは火山灰堆積荷重による局部曲げによる変形等となる。

これに対する具体的な配慮事項は, 以下の2点である。

- ・火山灰除去のため, 設備上部に容易にアクセスできる構造となっていること。

- ・堆積した火山灰を除去することができる構造であること。

なお、発電所敷地ごとに火山灰堆積厚さを調査・評価して設定し、火山灰堆積荷重に対して耐える構造であることを評価してもよい。また、火山噴火の影響が敷地に到達するまでには時間的余裕があることから、事前に防護カバー等により設備への火山灰侵入を防ぐことを考慮してもよい。

(2) 代替注水設備(タンク等)

代替注水設備(タンク等)は屋外に設置される場合、火山灰が設備に侵入及び堆積するおそれがある。そのため火山現象に対する影響モードは火山灰の侵入による水源の汚染、火山灰堆積荷重による座屈等が考えられる。これに対する具体的配慮事項は、以下の2点である。

- ・屋外タンクベント管は、吸込み口が下向きに設置されている等、火山灰が管内に侵入し難い構造であること。
- ・火山灰除去のため、タンクの屋根へ容易にアクセスできる構造となっていること。

なお、発電所敷地ごとに火山灰堆積厚さを調査・評価して設定し、火山灰堆積荷重に対して耐える構造であることを評価してもよい。

(3) 代替除熱設備(フィルタベントシステム)

代替除熱設備(フィルタベントシステム)の吸気口は屋内にあり、火山灰の影響を直接受けないため考慮する必要はないが、排気口を屋外に有する場合は、火山灰が設備に侵入するおそれがある。そのため火山現象に対する影響モードは火山灰の侵入による排気ラインの閉塞が考えられる。これに対する具体的配慮事項は、以下の2点である。

- ・火山灰の侵入により、閉塞し難い構造であること。
- ・排気ライン最下部に堆積した火山灰を除去できること。

なお、火山噴火の影響が敷地に到達するまでには時間的余裕があることから、事前に防護カバー等により、設備への火山灰侵入を防ぐことを考慮してもよい。

(4) 代替除熱設備(代替熱交換器システム)

代替除熱設備(代替熱交換器システム)は屋外に設置される場合、火山灰が設備に堆積及び侵入するおそれがある。そのため火山現象に対する影響モードは火山灰の付着による除熱効率の低下、火山灰の堆積荷重による局部曲げによる変形等、火山灰の冷却水への侵入による水質の悪化が考えられる。これに対する具体的配慮事項は、以下の2点である。

- ・火山灰除去のため、設備上部に容易にアクセスできる構造となっていること。
- ・冷却水が冷却管等により大気から分離された構造であること。

なお、発電所敷地ごとに火山灰堆積厚さを調査・評価

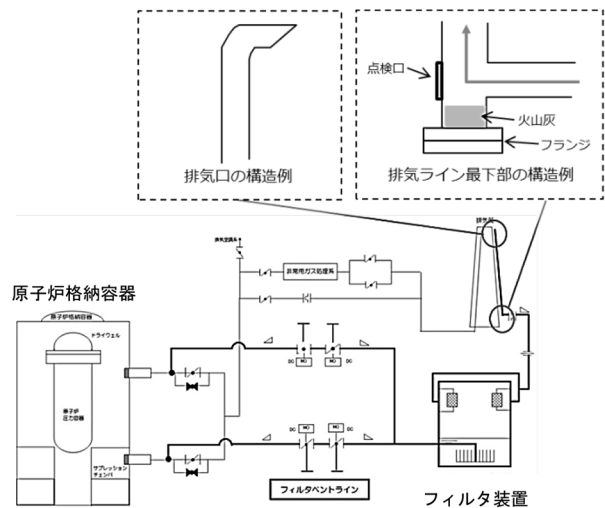


図1 フィルタベントシステムの例

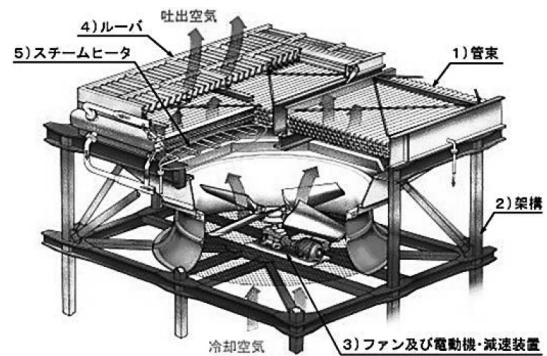


図2 代替熱交換器システムの例

して設定し、火山灰堆積荷重に対して耐える構造であることを評価してもよい。また、火山噴火の影響が敷地に到達するまでには時間的余裕があることから、事前に吐出空気により火山灰が堆積しない様、設備を運転する運用としてもよい。

(5) 可搬型設備

可搬型設備は屋外で保管される場合、火山灰が設備に堆積するおそれがある。そのため火山現象に対する影響モードは火山灰の堆積荷重による局部曲げによる変形等が考えられる。これに対する具体的配慮事項は、以下の2点である。

- ・火山灰除去のため、設備上部に容易にアクセスできる構造となっていること。
- ・堆積した火山灰を除去することができる構造であること。

なお、火山灰が設備に堆積した場合に堆積荷重が厳しい条件となる部位について、健全性に影響がないことを評価してもよい。

本設備の具体的影響評価例として、燃料補給用タンクローリーの評価を以下に示す。

① 評価モデル

上部に火山灰が堆積するタンク室を評価対象とし、支

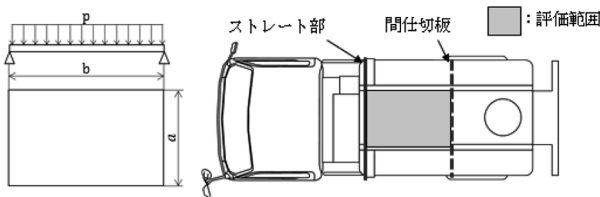


図3 タンクローリーの荷重評価モデル

持されている範囲の中で、最も面積が大きい防護枠に囲まれた範囲を対象とする。

タンク室を平板と仮定し、等分布荷重が作用する4辺支持板を評価モデルとする。

モデル化範囲は、中間部に間仕切板があるため、間仕切板を支持点と考え、ストレート部から間仕切板までとする。

② 評価方法

機械工学便覧に基づき、等分布荷重の4辺支持条件の最大曲げ応力を求める以下の式を用いる。

$$\sigma_{max} = \beta_1 \frac{pa^2}{h^2}$$

β_1 : 長方形板の最大応力の係数

p : 等分布荷重

a : 短辺の長さ

h : 板厚

V. 火山噴火後の施設の影響確認

火山現象は長期にわたって継続する可能性があることが想定される。その際、発電所は運転を継続する、あるいは運転を停止する、いずれの場合においても、施設を点検・保守することによりその安全機能を確認・維持することが深層防護の観点から極めて重要である。今回の指針の改定においては、火山現象に際して放出される火山灰等が発電所に到達し、運転を停止した後に実施する影響確認において留意すべき点を取りまとめた。検討に当たっては、火山灰等による施設への影響モードに基づき、安全機能の確認のために実施する点検作業等において留意すべき事項について整理した。

(1) 想定する火山現象

噴火により発生した火山灰が空中を浮遊して発電所へ到達することを想定し、発電所に影響を及ぼす可能性のある事象として以下の火山現象を抽出した。

- ・大気中を浮遊する火山灰
- ・大気中から地表に降下した火山灰
- ・海面に浮遊又は海水中に懸濁する火山灰等

なお、火山弾等の放出、火砕流及び火砕サージ、溶岩流、岩屑なだれ、火山泥流、新火口の形成については、立地可否の際に除外されるため、対象外とした。

(2) 火山噴火による発電所停止後の影響確認対象施設と確認内容

火山噴火後の影響確認対象施設は、原子炉の安全停止

に関わる系統及び使用済燃料貯蔵プールの冷却に関わる設備、その停止により、上位の安全重要度の設備の運転に影響を及ぼす下位の安全重要度の設備のうち、火山灰等の影響を受ける設備を対象とした。

想定される火山現象を考慮した対象施設と確認内容の基本的な考え方を図4に示す。

対象施設は、屋内設置施設と屋外設置施設に分類し、更に設備の種類により分類し、そのそれぞれに対して影響確認のために必要な点検・保守作業の内容を検討した。また、この基本的な考え方に従って検討した対象施設及び点検・保守内容の具体例を表1に示す。

なお、火山現象に対する施設の安全機能を維持するため、その影響確認は発電所の停止後だけではなく、運転中にも随時行う必要がある。また、点検の範囲についても、上記の範囲に留まらず実施可能な限り広範囲に実施することが望ましい。その際、今回検討した影響確認のための点検・保守内容を参考とすることができる。

VI. 火山現象の有する不確かさへの取組み

日本の火山についてはこれまで様々な研究がなされており、歴史時代の噴火データを調査し、堆積物の分析から火山灰等の到達範囲や噴火規模を推定している。噴火頻度も過去の噴火の痕跡から推定するが、数千年～数十万年のオーダーとなる。また、噴火規模もマグマだまりの状況から推定するが、噴出量は噴火形態によるため、火山灰の到達範囲は噴煙高さ、風向・風速等に大きく影響される。このため、火山噴火の頻度やその規模の推定については、定量的な評価方法を確立していく必要がある。

本指針の改定に当たっては、火山現象の持つ不確かさを定量的に検討・評価する取組みが重要であることから、火山ハザードの構築、降灰シミュレーション手法の構築等、確率論的なアプローチが可能となるよう継続して取り組んでいくことを記載している。

VII. おわりに

我が国は世界有数の火山国であることから、その豊富な知見を活用して将来発生するおそれのある火山現象に備えることが発電所の安全確保上極めて重要である。

このため、火山現象に対し発電所の安全性を確保する目的から必要事項を技術指針に取りまとめ、更に新たな知見を加えてその改定に努めていくことは世界の発電所の安全性向上に大いに寄与するものであり、また我が国の責務ともいえる。

火山現象には自然現象特有の不確かさがあるため、本指針においては、現時点における火山学に関する最新知見に基づき、前述のような火山現象の不確かさを踏まえた上で判断することを基本としているが、今後も最新の

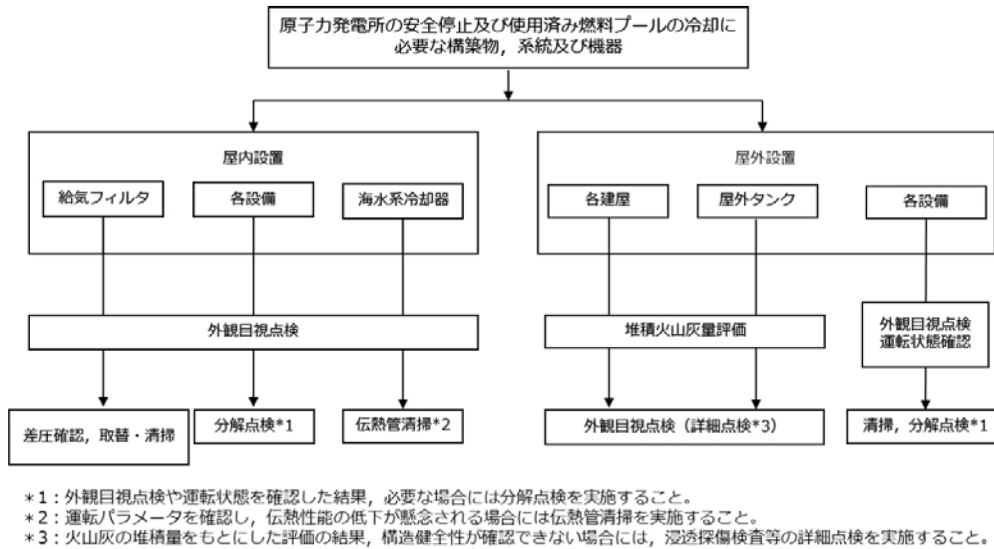


図4 火山噴火後の影響確認対象施設と確認内容

表1 火山噴火後の影響確認対象施設及び点検・保守内容の具体例

対象施設	安全重要度 クラス分類	想定劣化事象	推奨項目	備考
建屋 (例：原子炉建屋，補助建屋)	－	堆積による損傷(座屈等)	火山灰清掃及び外観目視点検	・建屋排水設備等の清掃も行う必要がある。
屋外タンク (例：燃料取替用水タンク，DG燃料貯蔵タンク，復水タンク等)	1 2	堆積による損傷(座屈等)	火山灰清掃及び外観目視点検	・火山灰による化学的腐食により直ちに機能に影響を及ぼすことはないが，外観目視点検により影響がないことを確認する。
屋外ポンプ・モータ (例：原子炉補機冷却海水ポンプ)	1	・放熱性能の低下によるモータ過熱 ・軸封機能の低下	火山灰清掃及び運転状態確認(有意な振動，温度上昇の有無)	・待機状態のポンプがある場合には，待機状態のポンプについても運転し，異常がないことを確認する。
屋外配管，弁 (例：動的機能を有する弁，主蒸気安全弁，主蒸気逃がし弁の排気ライン)	1 2	堆積による損傷	火山灰清掃及び外観目視点検	・電動弁，空気作動弁については動作確認も実施する。 ・主蒸気安全弁，主蒸気逃がし弁の排気ラインは屋外に設置されているため，プラントごとの配置等に留意し対策を検討する必要がある。
屋外開閉所 (例：がいし等)	3	絶縁劣化	火山灰清掃及び運転状態確認(有意な温度上昇の有無)	－

知見に基づいて適宜改定を行っていく方針である。

－ 参考資料 －

- 1) JEAG4625-2015 “原子力発電所火山影響評価技術指針”，日本電気協会，(2016年)。
- 2) 中村隆夫，中田節也，岩田吉左，小野勤，濱崎史生 火山現象に対する原子力発電所の安全確保について(その2)重大事故等対処施設の影響評価等に関する JEAG4625 の改定 日本原子力学会和文論文誌，Vol.15, No.4, pp.173-182, 2016。

著者紹介



中村隆夫 (なかむら・たかお)
 原子力安全推進協会
 (専門分野/関心分野)原子力社会工学，
 規格基準



岩田吉左 (いわた・きちさ)
 電源開発株式会社
 (専門分野/関心分野)原子力発電所の設備
 設計

原子力推進姿勢を堅持する英仏

日本原子力研究開発機構 内山 軍蔵

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所事故後、原子力政策をめぐる各国の対応は分かれた。このシリーズ解説では先進国の動向を中心に、シリーズでその動向を紹介する。今回紹介する仏国ではこの春に次期大統領選挙が予定されており、原子力の推進姿勢は維持するものの、オランダ政権時に決まった「エネルギー移行法」の動向が注目される。また、英国では原子力に対する政府の積極的な推進方針をうけて、電気事業者は1,600万kWの新規建設計画を打ち出している。

KEYWORDS: *Fukushima Daiichi, Nuclear Power Plant, Nuclear Energy Policy, Energy Transition Law, Nuclear Safety, Brexit, European Union, EPR, United kingdom, France*

I. 仏国の動向

1. 原子力政策

仏国には現在58基の原子力発電所があり、総発電量に対する原子力発電の割合は約75%を占めている。この割合は東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(1F)事故前と変わっていないが¹⁾、その事故後の2012年4月大統領選挙が行われ、ドイツの原子力からの撤退を背景に「原子力発電割合を現在の75%から50%に削減」を主張した社会党のオランダ候補が、「エネルギー自給、二酸化炭素放出削減の観点から原子力利用は不可欠」と強調するサルコジ大統領を破り、大統領となった。2015年7月には選挙公約を法案化した「エネルギー移行法」が国民的議論を経て憲法評議会で承認され、8月18日、公布・施行された²⁾。同法の施行により、原子力発電量の上限は現在と同じ63.2GWに設定され、2025年までに発電全体に占める原子力発電の割合を50%に減少させることとなった。このため、現在建設中のフラマンビル原子力発電所3号機の欧州加圧水型炉(EPR)の運転開始により、いくつかの原子炉を閉鎖することになる。

仏国政府は2016年10月、「エネルギー移行法」に基づくエネルギー利用の具体的な道筋を示したエネルギー多年計画(PPE)を当初の計画より約3ヵ月遅れて策定した³⁾。主な内容は、2023年までに、①エネルギー消費量の12%削減、②化石燃料利用の22%削減、③再生可能エ

Adherence to nuclear power promotion attitudes in United kingdom and France : Gunzo Uchiyama.

(2017年1月19日 受理)

ネルギーの様々な利用(発電、熱、ガス、燃料)に係る技術開発の加速などである。

現在2017年4月23日の第1回投票に向けた次期大統領選挙が行われている。支持率低迷により現オランダ大統領は立候補していない今回の大統領選有力候補のエネルギー政策は表1の通りである⁴⁾。有力候補のエネルギー政策は、エネルギー移行法の維持か、同法を破棄して、現在の原子力発電の割合を維持するかに分かれるが、アモン候補(現政権社会党)を除けばいずれの候補もエネルギーミックスにおける原子力の重要性はほとんど変わらず、エネルギーの自給及び独立性の観点から第3世代及び第4世代の原子炉(高速炉ASTRID計画など)の技術開発などは継続されるものと考えられる。

2. 原子力規制(1F事故後の安全確保)

1F事故を受けて欧州原子力安全規制グループ(ENSREG: European Nuclear Safety Regulation Group)は2012年4月26日、欧州内原子力発電所のストレステストの実施結果を踏まえた原子力発電所の安全対策のために、仏国を含めた欧州内各国のアクションプランを作成することを決定した⁵⁾。ENSREGは原子力の安全確保等を目的に欧州共同体(EU)加盟国の原子力安全監督機関の長によって構成される独立機関であり、欧州委員会が2007年に設置した。アクションプランはハード面の安全対策の改良及びソフト面の組織及び人的要因(外部委託を含む)の考慮を重要項目としている。これに基づき仏原子力安全機関(ASN)はアクションプランを2012年12月に作成した。ENSREGは2013年4月にプ

表 1 次期大統領有力候補のエネルギー政策

候補	マクロン候補 (中道派)	ルベン候補 (極右国民戦線)	フィヨン候補 (右派共和党)	アモン候補 (左派社会党)
エネルギー政策	<ul style="list-style-type: none"> 原子力をエネルギー・環境政策の中核に位置づけ。 「エネルギー移行法」を維持。 フェッセンハイム原子力発電所の閉鎖には賛成。 	<ul style="list-style-type: none"> 原子力をエネルギー供給の上で重要と位置づけ。 政府が仏電力 EDF の経営権を維持。 フェッセンハイム原子力発電所の閉鎖に反対。 フラマンビル原子力発電所 EPR 建設は続行。 既存の原子炉の運転年数を延長。 再生可能エネルギーを推進するが、風力発電には反対。 	<ul style="list-style-type: none"> 原子力推進派。 運転年数を 40 年から 60 年に延長。 フェッセンハイム原子力発電所の閉鎖に反対。 エネルギー移行法に反対。 フラマンビル原子力発電所 EPR に加え、小型、中型原子炉の建設も推進。 第 4 世代原子炉の研究開発を推進。 	<ul style="list-style-type: none"> 「エネルギー移行法」を維持。 運転年数 40 年を超える原子炉を優先的に閉鎖。 2050 年頃に完全な脱原子力発電を達成。 再生可能エネルギーや省エネの発展などに関する大型プログラムを推進。

リュッセルで開催したセミナーにおいて、各国から提出されたアクションプランをレビューし勧告を出した。ASN はこの勧告に従い、2016 年 3 月 2 日、原子力発電所安全対策アクションプランを改訂した。主な改訂箇所は、安全対策の改良に係る対応であり、以下の 2 段階で実施する対策が記載された。

【第 1 段階】(2012 年から 2015 年、電源喪失及び冷却水喪失時の一時的な対策)

- ・緊急用ディーゼル発電機の設置
- ・原子力事故即応チーム (FARN (Force d'action rapide nucléaire) の新設
- ・現状設備 (ポンプ、発電機等) の強化
- ・耐震及び洪水対策の強化、
- ・地震時の自動炉心停止システムの設置
- ・使用済燃料貯蔵プール水位測定システムの設置

【第 2 段階】(2015 年から 2020 年、想定範囲外の電源喪失及び冷却水喪失時に対する恒久的対策)

- ・緊急用ディーゼル発電機用建屋の建設
- ・冷却水供給システムの設置
- ・フィルターベントの耐震強化
- ・事故時の放射性ヨウ素ガスの放出量低減装置の設置
- ・建屋内の水素検出器の設置
- ・外部攻撃に対応するための危機管理センター建屋の建設

なお、FARN は、仏国の原子力発電所で緊急事態が発生した場合に、増援チーム、非常用機材 (給電、給水、圧縮空気の供給) 及び兵站手段を 24 時間以内に提供することを目的としている。速やかに事故発生現場に急行し、1 週間にわたり 24 時間体制で対応作業にあたることができるよう、FARN はビュージェイ発電所などの 4 箇所の原子力発電所に設置された。

3. フラマンビル原子力発電所 EPR 炭素偏析問題

ASN は 2015 年 4 月 7 日にフラマンビル原子力発電所 EPR の圧力容器の蓋に用いられている鋼鉄の炭素含有量が規定値を上回る極めて重大な異常が発見されたと公表した⁶⁾。ASN は炭素濃度が高いことは圧力容器の機械的強度を低下させることにつながるとしており、圧力容器蓋に関する検査結果について 2017 年 6 月頃に発表する予定である。今回の EPR 圧力容器蓋材料の炭素含有量が高くなっていったことに伴い、その部品を製造した工場において過去に製造された既存原子炉の蒸気発生器等の材料の検査を実施した。その結果、58 基の原子炉うち鋼鉄の炭素偏析の問題があるとされた原子炉は 18 基であったが、その後安全性が確認され順次再稼働している。

4. アレバ再編

ウラン価格の低迷と 1F 事故後の新規原子炉建設計画の遅延などにより 6 年連続の赤字経営となった仏原子力大手アレバの再編計画が仏国政府の要望もあり進められている⁸⁾。仏国政府は 2016 年 12 月 15 日、アレバの救済を目的とする再編計画を欧州委員会に提出し、許可を申

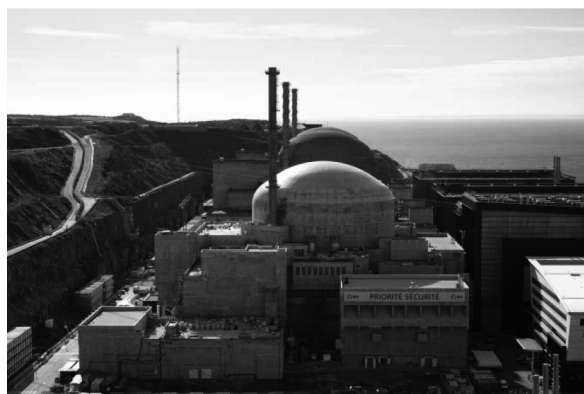


図 1 フラマンビル原子力発電所 3 号機 EPR⁷⁾

請した。アレバは再編を通じて、原子燃料サイクル事業（ウラン採掘、濃縮、使用済燃料の再処理、輸送と貯蔵、原子力施設の解体）を扱う「NewCo(仮称)」, 現アレバの不良資産を束ねる「バッドバンク」の役割を果たす持株会社「アレバSA」, 原子炉製造・保守部門「アレバNP」に3分割され、アレバNPは仏電力 EDF に売却される。なお、NewCo については30億ユーロ、アレバSAについては20億ユーロの増資が予定されている。

II. 英国

1. 原子力政策

英国は、石炭、石油、ガスなど豊富な化石燃料資源に恵まれた国であるが、原子力開発を黎明期から開始し、国産技術によるマグノックス炉(ガス冷却炉)、AGR(改良型ガス冷却炉)や燃料サイクル技術を開発してきた⁹⁾。英国では現在改良型ガス冷却炉(AGR)14基と加圧水型軽水炉(PWR)1基の原子力発電所が運転中であり、合計出力は約888万kWである。

英国の原子力開発は、英国経済の復活と小さな政府の実現を掲げたサッチャー政権(保守党)による1990年の電力民営化や競争導入の流れと、1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故により高まった原子力の安全性を懸念する世論の高まり、反原子力の立場を取る1997年のブレア政権(労働党)の発足などにより、1995年に運転を開始したPWRのサイズウェルB原子力発電所(125万kW)を最後に途絶えている。

しかし、北海ガス田の生産量減少や地球環境問題を受け、エネルギーの過度の海外依存を避けること、地球温暖化ガス排出削減目標(2020年までに1990年比34%)達成の観点から、英国政府は2006年から原子力開発の再開に向けたエネルギー政策策定に取り組み、2008年には原子力発電を推進するための原子力政策として、「原子力白書(Nuclear White Paper 2008)」を発表した¹⁰⁾。

英国の世論調査では2000年以降、温暖化問題や燃料価格の高騰を背景に原子力発電への支持率が増加する傾向を見せており、1F事故直後には一時的に反対が増加したものの、近年では賛成が反対を大きく上回っている。1F事故後も原子力推進政策は変わらず英国政府の原子力推進の方針も変わっていない。2012年には、原子力も含めた低炭素電源への投資促進を目的とした電力市場改革を内容としたエネルギー法案が議会で提出され、2013年12月の議会承認によりエネルギー法として制定された。許認可プロセスの見直しや炉型の承認作業等を通じ、民間電気事業者が原子力を開発するための環境整備を進められることや、原子力も再生可能エネルギーと同様にその発電量を長期固定価格で買い取り、投資リスクを軽減させる方向が示された。1F事故後、既設炉の安全確認や追加対策の検討が安全規制当局によって実施されたが、既設炉の運転を制限する必要のないことが確



図2 ヒンクリーポイントC原子力発電所完成予想図¹⁷⁾

認された。また、新規建設についても、エネルギー大臣が「英国の繁栄は原子力発電なくしては困難」とし、原子力推進の方針を再確認した。

英国政府の原子力政策に呼応し、電気事業者は1,600万kWの新規建設計画を打ち出している¹¹⁾。仏EDFの子会社であるEDF エナジー社は、2地点640万kW(EPR)、日立傘下のホライズン社は、2地点600万kW(ABWR)、また東芝(出資比率60%)と仏GDFスエズ社(40%)の合弁会社であるニュージェン社は、1地点360万kW(API000)の建設計画をそれぞれ打ち出している。

このうちEDF エナジーが進めるヒンクリーポイントC原子力発電所(160万kW2基)の欧州加圧水型炉(EPR)建設計画が先行している。2013年3月に英国政府からEPR建設計画の許可を取得する¹²⁾とともに、10月には英国政府との間で発電電力の買取条件(35年にわたる固定買取価格の設定等)について合意に達した¹³⁾。英国政府がヒンクリーポイントC原子力発電所でのEPR建設を決めたことで、1F事故以後の脱原子力の動きに危機感を強めていた原子力業界は安堵感を表明した。

英国政府は2016年9月15日、ヒンクリーポイントC原子力発電所建設計画(欧州加圧水型炉EPR、2基)について仏電力(EDF)と新たな合意に原則的に達し、同計画を承認したことを発表した¹⁴⁾。英国政府は今回の合意で、将来の英国原子力発電プロジェクトへの外国投資に対しいくつか条件を課している。英国政府は、事前の通知や閣僚の同意なしに、建設工事の完了前にEDF株の売却を防止することができるようになる。英国政府、仏電力(EDF)及び中国広核集団(CGN)は2016年9月29日、英国ヒンクリーポイントC原子力発電所EPR(欧州加圧水型炉)建設計画に関する契約に署名した¹⁵⁾。英国原子力規制局(ONR)は2017年3月27日に基礎工事の許可を付与した¹⁶⁾。

2. 欧州連合からの離脱

英国政府は2016年2月2日、欧州連合(EU)からの離脱交渉開始に向け、Brexit白書を英国議会で提出した¹⁸⁾。同白書では、欧州連合(EU)からの離脱がEUと英国の双方に利益をもたらすよう、建設的かつ前向きな

協力関係を構築することとしている。同白書は、メイ首相が公表した EU 離脱交渉における 12 の原則を反映しつつ、現在の状況と今後の展望をまとめるとともに、EU 域内の原子力発電と放射性廃棄物管理の法的枠組を規定した欧州原子力共同体(ユーラトム)からも離脱すると明記している。離脱の理由として、英国の法制の中でユーラトムが EU に含まれることは 2008 年の EU 改正法が明確に示しているとした。同首相は、原子力はエネルギーミックスの中心であるとし、離脱した場合でも原子力協力や保障措置、安全確保、核物質の取引等における欧州その他の国際パートナーとの緊密かつ効果的な取り決め維持という明確な姿勢には影響はないとしている。原子力研究開発についても、協力取り決めの代替案などにより国際協力を継続していくとしている。

－ 参考資料 －

- 1) World Nuclear Association ホームページ,
[http:// www.world- nuclear.org/ information- library/ country- profiles/ countries- a- f/ france.aspx](http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx).
- 2) 仏国政府ホームページ,
[http:// www.gouvernement.fr/ en/ energy- transition](http://www.gouvernement.fr/en/energy-transition).
- 3) 仏国政府ホームページ,
[http:// www.developpement- durable.gouv.fr/ programmation- pluriannuelle- energie](http://www.developpement-durable.gouv.fr/programmation-pluriannuelle-energie).
- 4) ルモンド紙, 2017 年 4 月 4 日付.
- 5) 仏原子力機関 ASN ホームページ,
[https:// www.asn.fr/ Informer/ Actualites/ Tests- de- resistance- europeens- l- ASN- publie- la- mise- a- jour- de- son- plan- d- action- national](https://www.asn.fr/Informer/Actualites/Tests-de-resistance-europeens-l-ASN-publie-la-mise-a-jour-de-son-plan-d-action-national).
- 6) ASN ホームページ,
[https:// www.asn.fr/ Informer/ Actualites/ EPR- de- Flamanville- anomalies- de- fabrication- de- la- cuve](https://www.asn.fr/Informer/Actualites/EPR-de-Flamanville-anomalies-de-fabrication-de-la-cuve).
- 7) EDF ホームページ,
[https:// www.edf.fr/ groupe- edf/ producteur- industriel/ carte- des- implantations/ centrale- nucleaire- de- flamanville- 3/ presentation](https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/centrale-nucleaire-de-flamanville-3/presentation)
- 8) Les Echos 紙 2016 年 12 月 16 日付.
- 9) World Nuclear Association ホームページ, Nuclear Development in the United Kingdom,
[http:// www.world- nuclear.org/ information- library/ country- profiles/ countries- t- z/ appendices/ nuclear- development- in- the- united- kingdom.aspx](http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/appendices/nuclear-development-in-the-united-kingdom.aspx).
- 10) 英国政府ホームページ, Meeting the Energy Challenge A White Paper on Nuclear Power January 2008,
[http:// webarchive. nationalarchives. gov. uk/ +/ http:// www.berr.gov.uk/ files/ file43006.pdf](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.berr.gov.uk/files/file43006.pdf).
- 11) J. Lillington, "New build- analysis capability to core physics design, fuel performance and safety analysis modelling requirements", NUGENIA Annual Forum 2017, held in 28-30, March 2017 (Amsterdam).
- 12) 英国政府ホームページ,
[https:// www.gov.uk/ government/ news/ new- nuclear- power- station- gets- planning- permission](https://www.gov.uk/government/news/new-nuclear-power-station-gets-planning-permission)
- 13) 英国政府ホームページ,
[https:// www.gov.uk/ government/ news/ initial- agreement- reached- on- new- nuclear- power- station- at- hinkley](https://www.gov.uk/government/news/initial-agreement-reached-on-new-nuclear-power-station-at-hinkley).
- 14) 英国政府ホームページ,
[https:// www.gov.uk/ government/ speeches/ hinkley- point- c](https://www.gov.uk/government/speeches/hinkley-point-c).
- 15) 英国政府ホームページ,
[https:// www.gov.uk/ government/ news/ hinkley- point- c- contract- signed](https://www.gov.uk/government/news/hinkley-point-c-contract-signed).
- 16) 英国政府ホームページ,
[http:// news. onr. org. uk/ 2017/ 03/ onr- gives- first- consent- for- construction- at- hinkley- point- c](http://news.onr.org.uk/2017/03/onr-gives-first-consent-for-construction-at-hinkley-point-c).
- 17) EDF ホームページ,
[https:// www.edfenergy.com/ energy/ nuclear- new- build- projects/ hinkley- point- c](https://www.edfenergy.com/energy/nuclear-new-build-projects/hinkley-point-c)
- 18) World Nuclear News home page,
[http:// www.world- nuclear- news.org](http://www.world-nuclear-news.org).

著者紹介



内山軍蔵 (うちやま・ぐんぞう)

日本原子力研究開発機構
パリ事務所長
(専門分野)燃料サイクル, 原子力化学工
学, 原子力安全, 分離技術

地政学的リスクとエネルギー

第1回 シェール革命と変貌する石油地政学

東京大学 小宮山 涼一

近年の米国におけるシェールオイル増産と世界の石油需給の緩和により、国際的に原油価格は大きく下落し、その長期化の可能性が高まっている。シェールオイルによる油価下落が続けば、世界最大の石油輸出拠点である中東産油国の石油輸出収入低下と社会・政治の不安定化、石油投資環境の悪化と上流開発投資の停滞、ひいては国際市場への中長期的な原油安定供給に影響が及ぶ可能性がある。このように「シェール革命」により、石油を巡る地政学的リスクが再び高まる可能性があるといえる。

KEYWORDS: shale oil, international oil market, OPEC, oil revenue, production curtailment, oil price

I. はじめに

米国での近年のシェールオイル増産と国際石油需給の緩和は、2014年秋以降、国際的な原油価格の大幅な下落を引き起こし(図1)、その長期化の可能性を高めており、「シェール革命」は世界の石油地政学に大きな変容をもたらす一要因となる可能性が指摘されている。シェール革命の進行により、米国の石油・ガス生産量は過去10年間で飛躍的に増大し、米国は世界最大の産油・産ガス国となった。米国でのシェールオイル増産は、油価下落のみならず、2016年12月に15年ぶりにOPECとロシアなどの主要産油国間での原油の協調減産合意をもたらし、一方で、米国では1970年代以降、約40年間にわたる原油輸出の禁止政策を転換させるきっかけになるなど、これまでの国際石油市場の構造転換へ影響を与えた。また米国トランプ政権は国益最大化を目指して、シェールオイルを含めた石油生産拡大を狙い、化石燃料を重視した政策を進めている。国際情勢が変化中、このように石油は再び戦略商品としての特殊性を強め、市場取引される一般財と異なり、生産や輸出に国家の政策影響が作用する政治商品化の兆しが現れつつある。

当初シェールオイル開発はコスト高と認識されていたが、技術進歩やノウハウの集積および地質関連情報の活用により生産効率が改善し、現下の原油価格水準でも採

Geopolitical risk in energy market (I) ; Emerging risk in international oil market : Ryoichi Komiyama.

(2017年4月9日 受理)

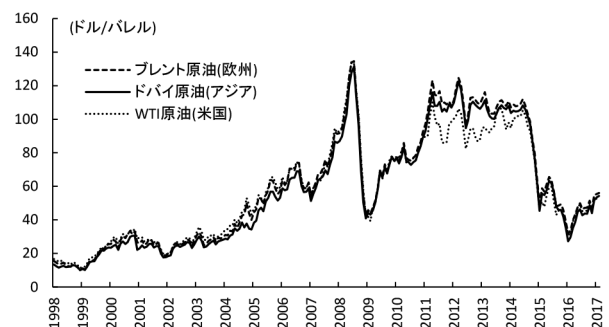


図1 主要原油の価格の推移
(出所)文献¹⁾より作成

算性が確保され、持続的に生産可能な案件も現れている。本稿では、シェール革命の現状や、世界の石油市場や政治・経済に与える潜在的影響について解説する。

II. シェールオイル生産の動向

1. シェールオイル開発の現状と展望

2014年秋以降の原油価格低迷の影響を受けてシェールオイルの生産は頭打ちの状況が続いている(図2)。2017年2月の米国シェールオイル生産量は、2015年3月のピーク時から日量50万バレル少ない同420万バレルとなった。ここで米シェール生産を見る上で、多数の掘削済未仕上坑井(DUC: drilled but uncompleted well)の現況を注視する必要がある。シェール開発は坑井掘削段階と、生産実施段階(坑井の仕上段階)に分類できるが、原油価格の下落以降、米国内にDUCは約4,000本も確認されている。シェール開発では通常、掘削開始から

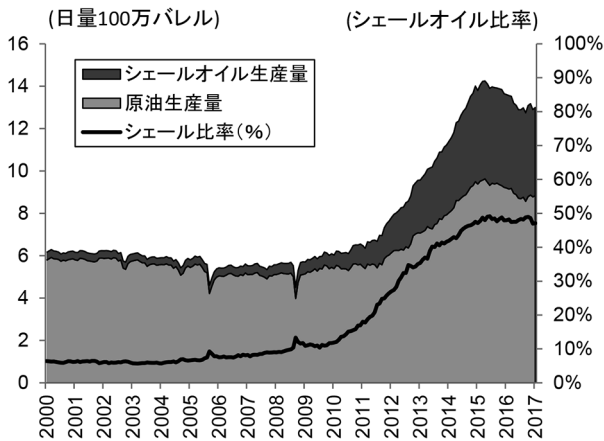


図2 米国原油・シェールオイル生産量推移
(出所)米エネルギー省エネルギー情報局²⁾を基に作成

生産実施まで約2年間のリードタイムを要すると言われるが、一旦掘削されたDUCの場合、1年間以内に生産開始可能なため、原油価格がふたたび上昇に転じれば、多数のDUCからのシェールオイル生産が短期間に再び急増し、原油価格上昇を抑制へ作用することも考えられる。現に、米エネルギー省は、2050年までの見通し³⁾で、基準ケースにおいて足元の低油価による開発投資削減により、2017年のシェールオイル生産量は、2015年のピーク生産量日量490万バレルから60万バレル少ない430万バレルに減少すると見込まれているが、しかし中長期的には、油価上昇に伴って投資も復調し、2050年には日量620万バレルに達し、2015年比で3割の増産を見込んでいる(図3)。シェールオイル生産が最大限拡大するケースではさらに増産が進み、2050年時点で日量1,300万バレルへ増加し、2015年比2.6倍まで拡大する。これに対し、生産が縮小するケースでは2050年の生産量は270万バレルに減少するが、それでも日本の石油需要の半分に相当する量が見込まれており、シェールオイルの動向は長期にわたり国際石油市場に影響を及ぼし続けると考えられる。

このように、シェール革命により米国内の原油生産量

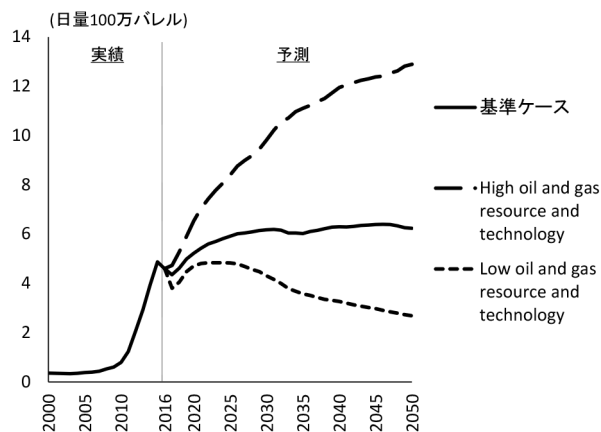


図3 米国シェールオイル生産の見通し
(出所)米エネルギー省エネルギー情報局³⁾を基に作成

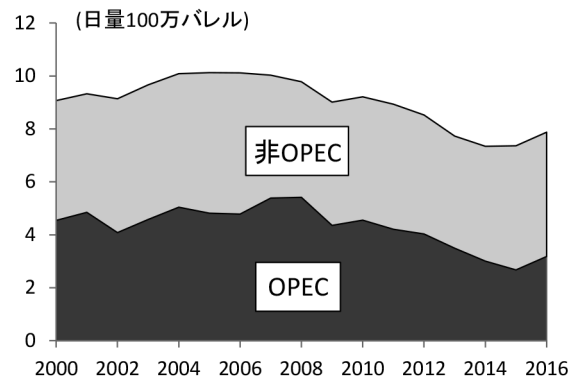


図4 米国の原油輸入量の推移
(出所)米エネルギー省エネルギー情報局²⁾を基に作成

急増をうけ、同国の世界最大の原油輸入量は2006年に日量1,000万バレルでピークに到達後、減少に転じ、2016年には同790万バレルまで減少した(図4)。サウジアラビアを中心とするOPEC諸国からの輸入量はより大きく減少しており、米国の原油輸入量に占めるOPEC原油比率は2000年の50%から2016年には40%にまで大きく縮小した。

またシェールオイル増産の影響は、米国の石油精製業にも大きく作用した。特に2015年までの原油輸出が原則禁止の期間、シェール鉱床開発によって増産されたシェールオイルの大量供給により米国内石油在庫が増大し、需給が緩和したことで国内原油価格が国際価格に比べ割安になり、米国内の原油調達のコスト競争力が高まった。同じく、シェールガス増産で国内の天然ガス価格も低下し、製油所の自家消費燃料や電力コスト、水素の製造コスト等の下落も、米国の石油精製業のコスト競争力向上に貢献した。これを受け、米国の石油精製業の精製マージンが回復し、米国の国際的な石油精製競争力が大きく改善した(図5)。このように、米国の精製部門の競争力が強化されたことにより、米国産の石油製品の競争力も高まり、米国からの石油製品の輸出が拡大している(図6)。シェール革命以前より、米国からの石油製品輸出量は増加基調にあったが、シェール鉱床開発の進

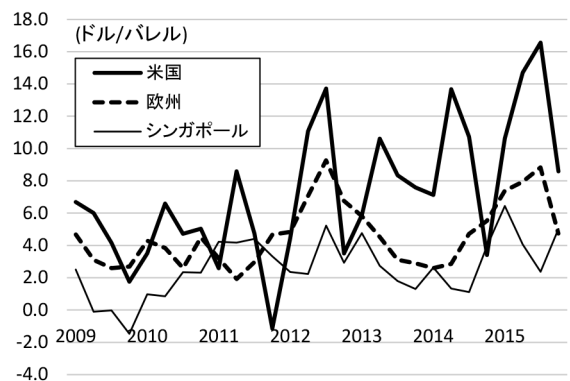


図5 米国、欧州、シンガポールの精製マージンの推移
(出所)BP統計⁴⁾より作成

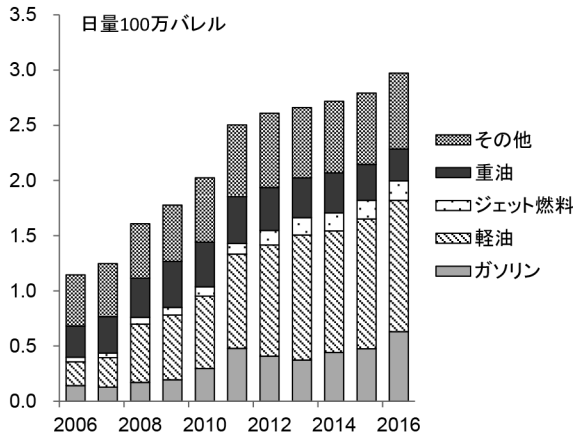


図6 米国からの石油製品輸出の推移 (出所)米エネルギー省エネルギー情報局²⁾を基に作成

展に伴い、米国の石油製品の輸出増加がさらに進んでいる。

2. シェールオイルの生産特性、コスト

国際石油市場の観点からみて、シェールオイルが有する重要な生産特性として、その生産量が短期間で原油価格水準に反応し、生産調整が行われる点が挙げられる。シェールオイルは、在来型石油開発と比べ、既述のとおり、掘削から生産まで期間が短く、原油価格の変動に応じて生産調整が可能となる。在来型油田の場合、生産開始からピーク生産量への到達まで一定期間を要し、その後徐々に生産量が減少する生産パスがよく観測されるのに対して、シェールオイルの場合、回収可能資源の大部分が生産開始から約1年以内でほぼ生産され尽くされ、それ以降、生産が低水準で長期にわたり継続する生産パスが見られる(図7)。シェールオイル生産の減衰率は、在来型原油よりも高いことが知られており、米国エネルギー省によると、2015年に生産を開始した主要なシェール鉱床(パーミアン、バッケン、イーグルフォード等)での生産坑井では、おおよそ生産開始後2~3カ月以内に生産ピークに到達し、その後、急速に生産が減退する(図7)。生産ピークに到達後、1年以内に生産量は4分の1程度まで減退する。よって、シェール資源の生産量を継続的に増加するためには、多数の坑井を連続して掘削す

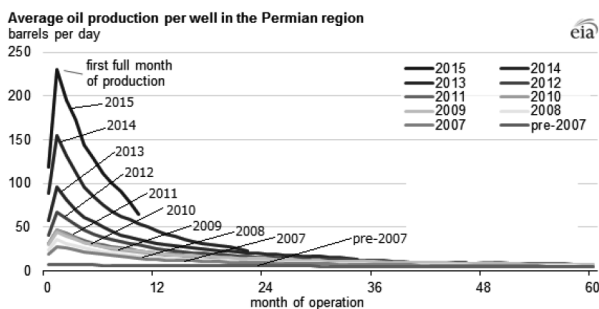


図7 米国シェール鉱床の一坑井当りの生産量の推移 (出所)米エネルギー省エネルギー情報局²⁾を基に作成

る必要がある。しかし一方で、掘削を停止すれば、既存のシェール鉱床の生産量の大部分は1年以内に生産され尽くすので、生産量も急減する。よって、原油価格の上昇局面では、坑井掘削が旺盛になれば、在来型油田よりも短期間に速やかに生産量が増大し、価格下落局面で掘削停止になれば、生産量は短期間で減退する。そのためシェールオイルは、そのような特性と膨大な資源量から、サウジアラビアと同様に、国際石油市場で調整弁のような生産調整機能を期待する見方がある。また、シェールオイルは米国以外にも存在すると言われるが、米国のシェールオイル急増には、掘削技術の他に、伝統的な産油国として、過去半世紀以上にわたる在来型原油生産で蓄積した国内の豊富な地質情報や既存の整備されたパイプライン等の石油インフラも大きく貢献しており、技術の適用だけでは他国でのシェール生産はそれ程容易ではない側面もあると考えられる。

3. シェールオイルの生産コスト

現在、2014年の原油価格下落以降も、シェールオイル減産はそれほど進行していない(図2)。この背景には、シェール開発企業による地質関連情報の集積や、技術高効率化によるコスト削減と生産性向上が進んだことが指摘されている。米国エネルギー省によると、主要鉱床の掘削コストは、坑井あたりの平均開発コストが最も高かった2012年に比べ、2015年は20~30%低下している(図8)。コスト削減により、シェールオイル開発の採算水準も低下し、40~60ドル/バレルが一般的な採算ラインと言われているが、一部のシェール鉱床では30ドル/バレルで生産可能になったとの指摘もある。また近年、シェール生産後期の生産増進を狙う追加的掘削・破碎に関する技術開発や操業ノウハウ蓄積も進んでいる。このため、低油価の環境で以前は採算に合わないシェール鉱床も、このような技術や操業ノウハウの活用により、原油価格下落に対する耐性を持ち始めている。そのため、シェールオイルがそれほど減産しないと言われている。このような現状を踏まえれば、米国の石油生産量は、原油価格が50ドル/バレルを超える水準まで上昇が継続す

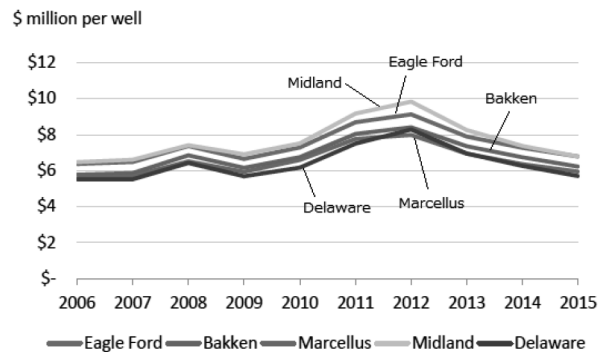


図8 米国シェール鉱床の1坑井当りの平均開発コスト (出所)米エネルギー省エネルギー情報局⁵⁾を基に作成

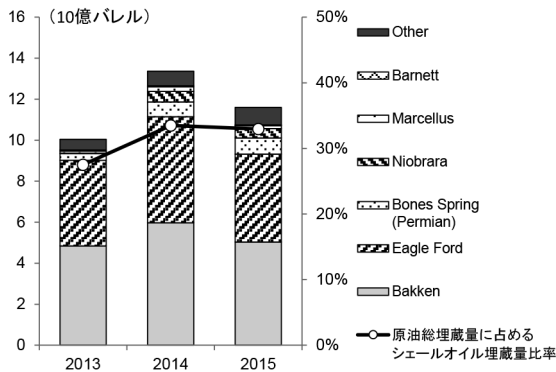


図9 米国内のシェールオイルの確認埋蔵量 (出所)米エネルギー省エネルギー情報局²⁾を基に作成

れば、ふたたび増産局面に入ると考えられる。もちろん原油価格は、国際的な需給のファンダメンタルズで決まるため、米国の生産量単独で決まりはしないが、米国の原油生産量は最大日量1,300万バレルまで増加することや資源量も十分に存在することから(2015年の米国内の確認埋蔵量約120億バレル)(図9)、シェールオイルは、原油価格を長期的に現状並みに安定的に抑えるバックストップ技術のような役割を担う可能性もある。

Ⅲ. シェールオイルの地政学的影響

1. OPEC 等産油国の石油生産政策への影響

サウジアラビアなど主要産油国が加盟するOPECの原油生産政策に関しても、米国シェールオイルの影響は大きい。シェール革命により国際石油市場の需給が大きく軟化し、2014年後半より原油価格が下落した。OPECは価格下落初期に、米シェール増産に対し、OPECの市場シェアを重視する戦略を進めて油価下落を容認した。この結果、油価下落が加速し、2016年2月に原油価格が20ドル/バレル台まで暴落した。OPECの当時の方針は、シェールオイルに対する警戒感が強いことから、油価下落容認により、米シェール資源のような高コスト鉱床の原油生産抑制を狙い牽制したと言われている。米シェールオイルが油価下落時にそのコスト競争力の弱さから減産し、その結果、OPECが市場シェアを拡大し、価格調整の主導権を握り、油価も徐々に回復することを期待した戦略であったが、実際には上述のとおり、シェールオイルは低油価でも耐久性を持ったことから、その減産は緩やかであり、油価回復は遅れた。

そのためOPECは2016年9月に方針転換を行い、市場シェア拡大ではなく価格下落防止、価格回復を優先して、協調減産を実施した。しかしこれにより仮に原油価格が上昇しても、多くのシェール開発・生産が採算ラインにのり、シェールオイル増産は再び活発化し、油価低迷が慢性化する可能性もある。OPECが減産し油価上昇が起きても、シェール増産を促進するのは、OPECから見れば合理的な政策とは言えない。またシェール増産

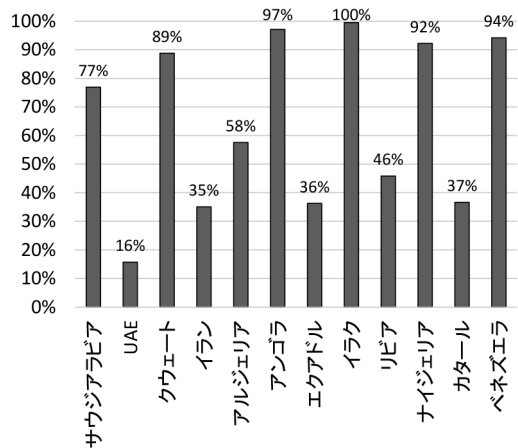


図10 輸出額に占める石油収入の比率(2015年) (出所)OPEC⁶⁾

で米国の原油輸入が減少し、その結果、米国向けに従来輸出されていたアフリカや中南米産原油が、OPECの主要輸出先であるアジアへ流れ、アジアの原油市場の競争が一段と厳しさを増している。

このように米シェールオイル増産は地政学的にもOPECの生産方針に大きな影響を与え、今後も国際原油価格はシェールオイルの影響を受けると考えられる。

2. OPEC 等産油国の石油収入への影響

油価下落の長期化で、石油収入に依存するOPEC加盟国の財政状況も悪化している。OPEC加盟国(インドネシア等を除く)の2015年の輸出額に占める石油収入の割合を見ると(図10)、サウジアラビア、クウェート、イラク、ベネズエラ、アンゴラ、ナイジェリアのOPECの半分の6カ国で、輸出額の約8割以上を石油収入が占め、原油価格の変動に対して脆弱な財政構造であることが分かる。この6カ国のうち、サウジアラビア以外の5カ国は、9割前後を上回る。一方、UAEは経済多角化の推進と共に、イランも資源以外の産業の比重が高いため、輸出額に占める石油収入比率は低い。

また、図11にOPEC主要産油国の財政収支を均衡させる原油価格

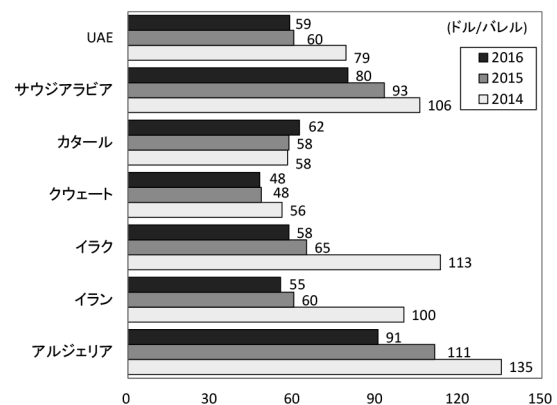


図11 OPEC 中東・アフリカ産油国の財政収支均衡原油価格 (出所)IMF⁷⁾

せるために必要な原油価格水準の推移を示す。主要な石油輸出国の財政は石油輸出収入への依存度が高く、原油価格を想定して国家予算の計画を行っている。中東・アフリカの産油国では、現在の原油価格の水準である50ドル/バレルでは財政収支が赤字もしくは赤字に近い国が大半を占める。図11より、産油国の財政健全化の上で、現行の価格水準を上回る原油価格が必要であることが分かる。同じ産油国でも、経済構造や国家資産等により、原油価格下落による財政への影響は異なるが、石油輸出国は総じて厳しい財政事情に直面している。

UAEのように経済の多角化を進め資産規模の大きい国へ、油価下落が与える影響は小さい可能性がある一方、サウジアラビアは巨大な金融資産等を保有しているが、石油収入依存度が高く、国民への社会保障や補助金付与を積極的に行っているため、油価下落の影響は大きいと言える。他にも多数の石油輸出国が、石油収入を使用して国民への教育・医療・福祉など公共サービスや補助金を充実化して、国内政情、民心の安定化を進めてきた。しかし、昨今の油価下落により、オイルマネーのみで手厚い公共サービスの提供継続が困難な状況となっている。今後、産油国が公共サービス縮小や補助金削減を進めれば、国民が石油収入の恩恵を享受できず、不平、不満が国内にまん延し、政治・社会が不安定化する可能性もある。このようにシェールオイル増産は、中東産油国の社会経済にも大きな影響を及ぼしていると言える。

さらに世界の石油輸出拠点である中東産油国で政情不安が進めば、原油の安定供給への懸念も増し、原油価格の上昇を招く恐れもある。2010年の「アラブの春」では、民主化推進運動の中東域内連鎖により、産油国の政情が不安定化し、原油安定供給の懸念を引き起こし、原油価格が大きく上昇した。また石油輸出国の社会・政治の不安定化は、中長期的にも良好な投資環境の形成を阻害し、上流開発投資の停滞を招き、中長期的な安定供給に影響を与える。もちろん、油価下落自体も、上流開発投資の見直し、キャンセルを引き起こし、原油安定供給の障害となる。

IV. 米国新政権の動向

今後のシェールオイルの帰趨は、政策に依るところも大きいと考えられる。米国トランプ政権の“American energy dominance”に象徴されるエネルギー政策は、世

界最大の石油・ガス生産国として、米国に賦存する石油・ガス・石炭等の化石燃料資源を最大限活用し、国際市場での競争力強化、国力最大化を目指していると考えられている。既にトランプ政権は、石油・ガス供給インフラの整備、資源開発のための連邦政府管轄地等の開放拡大、石油・ガス開発等に関する規制緩和等の方針を定めており、石油・ガス生産の拡大を指向している。

米国のシェールオイルは、その開発コスト低下と生産拡大が進行していることから、これまでの非在来型資源への見方とは異なり、中長期的な一層の増産と国際石油市場への影響に関する関心が高まっている。トランプ政権による化石燃料を重視した政策方針が、もちろん不確実性もあるが、シェールオイル生産の拡大に実効性のある形で寄与すれば、国際市場への原油供給拡大、原油市場の安定化に貢献する一方、既述の通り、中東産油国の石油輸出収入低下と社会・政治の不安定化、ひいては国際石油市場の混迷化をもたらす可能性もあり、シェール革命により、石油を巡る地政学的リスクが再び高まる可能性があるといえる。さらに、シェールオイル生産が抑制される展開になれば、再び中東・アフリカの不安定な資源情勢が国際市場のカギを握ることになるため、今後のシェールオイルの動向を十分に注視することが不可欠である。

— 参考資料 —

- 1) 日本エネルギー経済研究所, エネルギートレンド, 2017年.
- 2) EIA/DOE, Petroleum & Other Liquids.
https://www.eia.gov/petroleum/data.cfm (アクセス日: 2017年2月16日).
- 3) EIA/DOE, Annual Energy Outlook 2017, 2017年.
- 4) BP, Statistical Review of World Energy 2016, 2016年.
- 5) EIA/DOE, Trends in U.S. Oil and Natural Gas Upstream Costs, 2016年.
- 6) OPEC, OPEC Annual Statistical Bulletin 2016, 2016年.
- 7) IMF, IMF Regional Economic Outlook: Middle East and Central Asia, 2016年.

著者紹介



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

福島環境回復に向けた取り組み

第3回 環境放射線モニタリング調査・評価技術の開発

日本原子力研究開発機構 眞田 幸尚

本稿(第3回)では、東京電力福島第一原子力発電所事故後行われてきた環境中での放射線モニタリングについて概説するとともに、代表的なモニタリングの結果例である有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリング及び人手によりサーベイメータを用いて行われている地上モニタリングについて紹介し、相互比較を行った例を示す。また、新たな技術開発例として無人機の活用例と課題について概説する。

KEYWORDS: radiation measurement, radioactive cesium, airborne radiation monitoring, unmanned aerial vehicle, gamma-ray spectrometry

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(以下、1F)事故後、様々な大学や研究機関で環境中での放射線測定技術が研究・開発されている。事故から6年経過した現在でも、放射線計測に期待されるニーズは高く、例えば除染現場では迅速かつ正確に測定する技術、河川等の水系を移動する放射性セシウムの環境動態研究では連続的かつ直接的に水中・水底の放射性セシウム濃度を測定する技術、並びに避難指示区域の解除等政策の決定には広域に測定する技術等が挙げられる。事故以前の環境放射線モニタリングは、核実験起源の微量な放射性物質の測定や原子力発電所周辺で異常のないことを確認するためのモニタリングが主な目的であったため、上記のニーズに対応できる放射線測定技術が事故後に必要となり、実務に対応しつつ開発が進められてきた。

陸上の広域な場所を効率的に測定することや水底の放射性物質濃度を測定するニーズに対し、現在技術革新の著しい無人機が用いられ始めている。しかしながら、無人機で測定された結果を、空からであれば地上の空間線量率に水底であれば堆積物中の放射性物質濃度に換算する手法については、現在でも発展途上である。

本稿では、「環境放射線モニタリング調査・評価技術の開発」として、現在行われているモニタリングについて概説するとともに、国立研究開発法人日本原子力研究開

発機構(以下、原子力機構)で開発されている無人機を用いた新たな放射線測定技術とその課題について紹介する。

II. 政府の主導するモニタリング

1. 総合モニタリング計画

現在、福島県を中心とした環境モニタリングは、原子力災害対策本部に設置されているモニタリング調整会議により年度初めに定められる「総合モニタリング計画」に基づき実施されている¹⁾。表1に総合モニタリング計画で定められた測定項目について示す。モニタリング項目は多岐にわたっており、これらの測定結果は、各担当省庁のホームページで公開されている(例えば、原子力規制庁ホームページ²⁾)。これらの測定結果は、測定の目的や手法が異なることから同じ場所の測定結果であっても、それぞれ値が異なる場合がある。ここでは、1Fの周辺を測定した代表的な例である地上で人手により測定した空間線量率の測定結果(地上モニタリング)、有人のヘリコプターで測定した測定結果(航空機モニタリング)及び空間線量率から土壌中における放射性セシウムの沈着量換算の際に重要なパラメータとなる土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果について紹介する。また、地上モニタリング結果と航空機モニタリング結果に着目し、比較することで各々の測定結果の特徴について述べる。

2. 地上モニタリング

原子力規制庁は、事故直後に文部科学省が開始した人手による広域な空間線量率の測定を継続的に行っている³⁾。測定場所は、1Fから80km圏内の地域を1km×1kmメッシュに分割し、非可住区域以外の各メッシュの1カ所について定期的に測定を行っている。使用して

Challenges for enhancing Fukushima environmental resilience (3); Development of measurement and evaluation techniques for the environmental radiation monitoring: Yukihisa Sanada.

(2017年3月10日 受理)

■前回タイトル

第2回 事故進展と放射性物質の放出・沈着分布の特徴

表1 総合モニタリング計画で定められた測定項目

項目	担当省庁	項目	担当省庁
○福島県全域の環境一般モニタリング <ul style="list-style-type: none"> 可搬型モニタリングポスト等の測定結果の公開 原子力発電所周辺の空間線量率、大気浮遊じん（ダスト）等の継続的測定 空間線量率の分布、地表面への様々な放射性物質の沈着状況を確認 原子力発電所80km圏内における航空機モニタリング 避難指示区域等における詳細モニタリングの実施 	原子力規制委員会 原災本部 福島県 原子力事業者等	○学校、保育所等のモニタリング <ul style="list-style-type: none"> 福島県内の学校等における空間線量率の測定結果を公開 屋外プールの水の放射性物質の濃度の測定 学校等の給食の放射性物質を測定 	原子力規制委員会 文科省 福島県等
		○港湾、空港、講演、下水道等のモニタリング <ul style="list-style-type: none"> 下水汚泥中の放射性物質の濃度の測定 港湾、空港、都市公園等の空間線量率の測定 	国交省 福島県 地方公共団体等
○水環境 <ul style="list-style-type: none"> 福島県並びに近隣県の河川、湖沼・水源地、地下水、沿岸等における水質、底質、環境試料の放射性物質の濃度及び空間線量率の測定 	環境省 福島県	○野生動植物、廃棄物のモニタリング <ul style="list-style-type: none"> 野生動植物の採取・分析を実施 廃棄物処理施設等の放流水中の放射性物質濃度 敷地境界における空間線量率等の測定 	環境省 福島県 地方公共団体 事業者等
○海域モニタリング <ul style="list-style-type: none"> 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の周辺の(1)近傍海域、(2)沿岸海域、(3)沖合海域、(4)外洋海域及び(5)東京湾について、海水、海底土及び海洋生物の放射性物質の濃度を測定 	原子力規制委員会 水産庁、国交省 海保庁、環境省 福島県 東京電力等	○農地土壌、林野、牧草等のモニタリング <ul style="list-style-type: none"> 福島県等において、農地土壌の放射性物質の濃度の推移の把握や移行特性の解明を行う 福島県内の試験地において、森林土壌、枝、葉、樹皮及び木材等の放射性物質の濃度を測定 関係都道県毎に都道県内各地の牧草等について放射性物質の濃度を測定 福島県内において、ため池等の放射性物質の濃度を測定 	農水省 林野庁 地方公共団体等
○全国的環境一般のモニタリング <ul style="list-style-type: none"> 各都道府県におけるモニタリングポストによる空間線量率の測定結果をインターネットを通じて公開 月間降下物（雨や空気中のほこり等）は月に1回、上水（蛇口）は年に1回の頻度で測定し、放射性物質の濃度を測定 福島県隣県の比較的放射性物質の沈着量の高い地域について、航空機モニタリングを実施。 	原子力規制委員会 地方公共団体等	○水道のモニタリング <ul style="list-style-type: none"> 関係都県毎に、浄水場の浄水及び取水地域の原水、福島県内については水源別に水道水における放射性物質の濃度を測定 	厚労省 原災本部 地方公共団体等
		○食品のモニタリング <ul style="list-style-type: none"> 食品に含まれる放射性物質の濃度を測定 食品摂取を通じた実際の被ばく線量の推計調査を実施 	厚労省、原災本部 農水省、水産庁 福島県 関係地方公共団体等

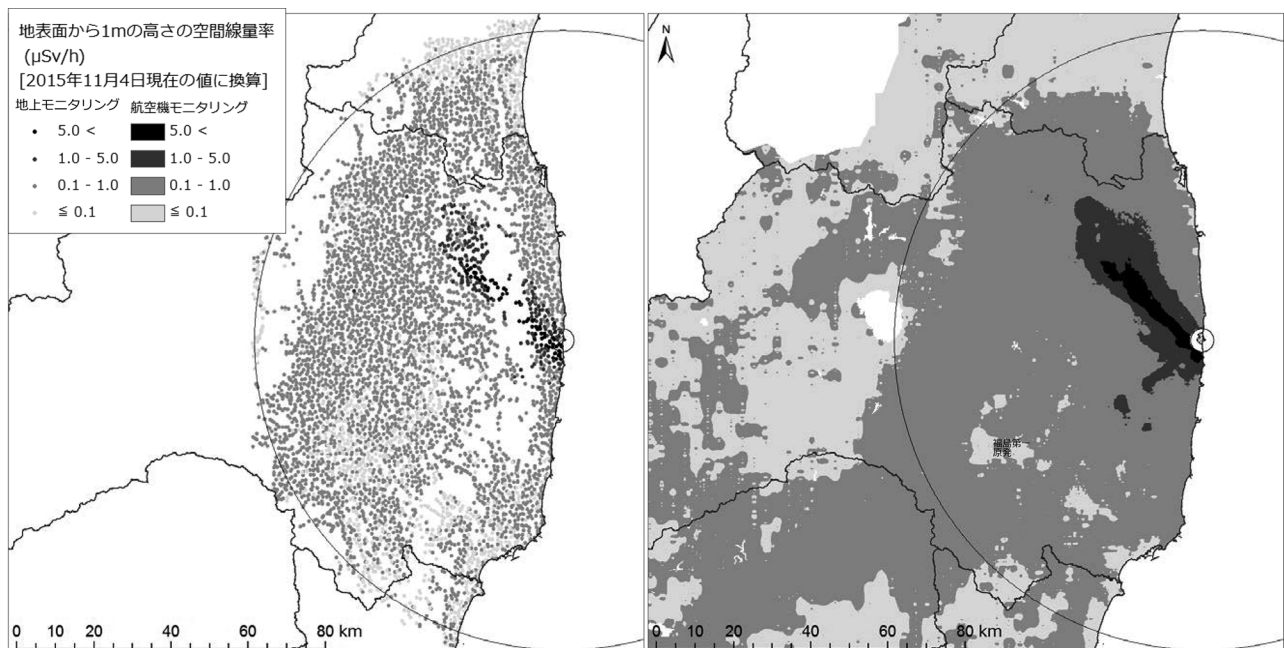


図1 空間線量率の測定結果マップ(左：地上モニタリング、右：航空機モニタリング)

いる放射線測定器は、国内で使用実績の高いNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ(日立製作所製TCS-172B)である。2015年の測定点数は6,577点であり、測定結果は過去との比較から空間線量率の減衰量を算出するとともに、除染の効果等様々な考察が行われている³⁾。図1(左)に2015年の測定結果を示す。

3. 航空機モニタリング

航空機モニタリングは、有人のヘリコプター内に専用のγ線検出システムを搭載し、対地高度を保持しつつ上空でγ線スペクトルデータを取得する。取得したデータは、機体や検出器の自己汚染を含むバックグラウンドや

宇宙線の影響を差し引き、地上からの放射線の計数率を求める。その計数率にあらかじめ求めていた地上高さ1mにおける空間線量率に換算するパラメータや実施のフライト高度による補正係数を用いて地上値に換算する。航空機モニタリングの詳細な方法は、真田ら⁴⁾に詳しい。航空機モニタリングの測定結果は測定点数が比較的多いことや山間部等データの欠測が少ないことから、測定点間をIDW(Inverse Distance Weighted)法などの内挿法により補間しコンター図として示されることが多い。図1(右)に2015年に測定した空間線量率のコンター図を示す。

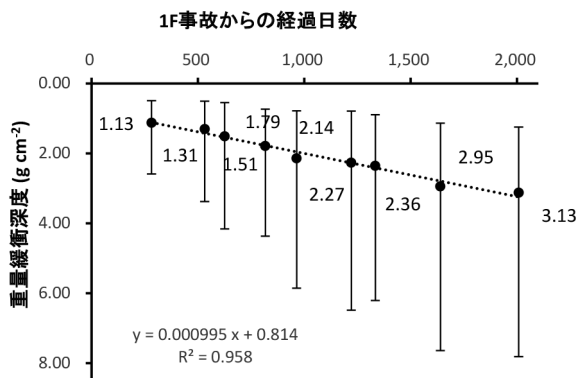


図2 事故からの経過時間と重量緩衝深度の変化。約80点の測定結果を平均化。誤差棒は測定結果の5パーセンタイル値及びおよび95パーセンタイル値。原子力規制庁事業報告書⁵⁾より作図。

4. 土壤中の放射性セシウム の深度分布調査

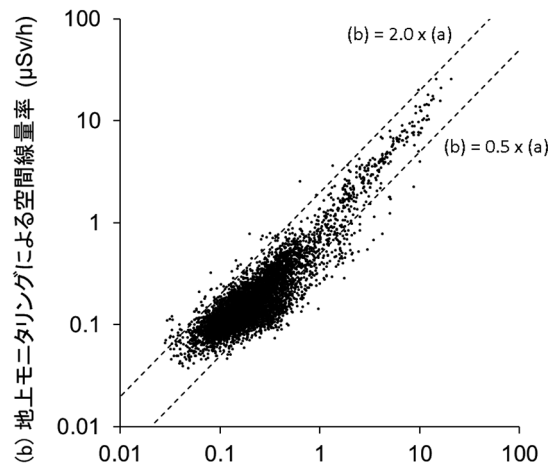
原子力規制庁では、事故後、1F周辺の人為的な攪乱の少ない平坦な場所約80カ所においてスクレーパープレートを用いた、重量緩衝深度(β : cm^{-2})の実測を継続的に行っており、その結果を公開している⁵⁾。重量緩衝深度は土壤中における表層から深度方向の放射性物質の分布状況を表す指標であり、数値が大きいほど深いところに放射性セシウムが入り込んでいることを示している。図2に2015年までに測定された重量緩衝深度の平均値を示す。事故からの重量緩衝深度は相関関係にあり、大気中から地表面に沈着した放射性セシウムは雨水等により徐々に土壌の深さ方向に浸透することを示している。この情報を元に、文部科学省の分析マニュアル⁶⁾で与えられている係数を利用することにより、地上高さ1mで測定した空間線量率から地表面の放射性物質の沈着量(Bq m^{-2})を推定することが可能になる。

5. モニタリング結果の比較例

前述したように、測定手法の異なるデータを比較することは、それぞれの測定手法や放射線の分布状況の理解の一助となる。図3には、図1に示した測定結果の同地点における地上モニタリングと航空機モニタリングを比較した。全体的な傾向は、図中に補助線として示した傾き2.0及び0.5の直線の間にプロットが集中しており、おおむね整合していることが分かる。一方、航空機モニタリングと比較して地上モニタリングが小さいプロットが比較的多いが、これは局所的な除染を行った場所である。すなわち、この結果は地上モニタリングと航空機モニタリングの測定範囲の違い(線源視野)に起因する。

Ⅲ. 無人機を用いたモニタリング技術

これまで示したように、地上におけるモニタリングは公共機関を中心に様々なデータが得られており、放射性セシウムの分布状況や変化状況はおおむね明らかになりつつある。現状の課題は、1F周辺等の高線量箇所や森



(a) 航空機モニタリングによる空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

図3 同地点における地上モニタリングと航空機モニタリングの比較

林の水底などの人手により簡単に測定できない場所での測定手法の開発である。そのような場所に、近年技術革新の著しい無人機の活用が進められている。ここでは、無人機を用いたモニタリング技術の適用例と課題について紹介する。

1. 無人ヘリコプターによるモニタリング

近年、マルチローターの小型ヘリコプター(ドローン)を中心とした無人機に放射線検出器を組み合わせた空からの放射線分布測定ツールが開発されている。1F周辺においても除染効果の確認やホットスポット探査を目的として使用されている。現在、1F周辺の環境モニタリングで最も活用されているのが、YAMAHA 発動機社製の自律型無人ヘリコプター(R-MAX G1)である。原子力規制庁と原子力機構はこの無人ヘリコプターに放射線検出器を搭載し、1Fから約5kmの範囲について定期的にモニタリングを行っている。図4に2013年と2015年に実施した測定結果の例を示す。このように発電所周辺の空間線量率は減少する傾向にあることが分かる。これらの測定結果については地上モニタリング結果との比較や経過時間と減衰量の関係について考察されている⁷⁾。

2. 空からのモニタリングの課題

空から地上の放射線を測定する上で最も注意しなくてはならないのが、測定する対地高度により地上の測定範囲(線源視野)が変化する点である。図5に測定の高度と線源視野の半径の関係について示す。この図は、モンテカルロ計算コードの一種であるEGS5を用いてシミュレーションしたもので、検出器位置(h)から地上に投影した点を中心とした円状線源の半径を変化させ、地上から検出器位置に到達する放射線の数を計算した。図5では、線源半径を2,000mまで計算し検出器位置に到達する放射線の合計値を100%として、80%を占める放射

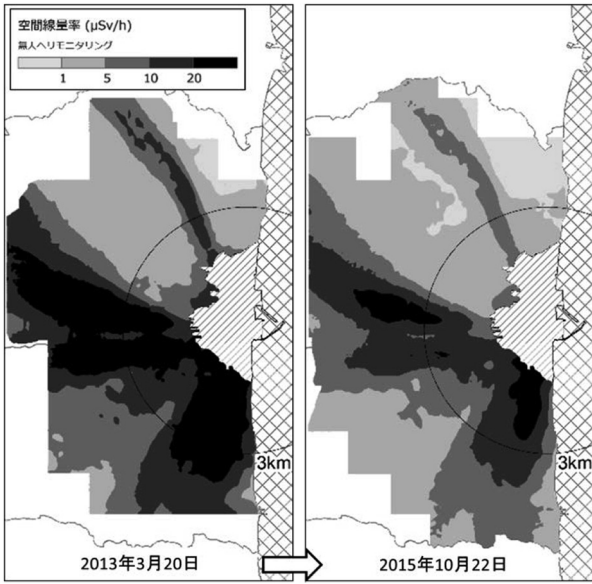


図4 無人ヘリコプターによる1F周辺のモニタリング結果。これらの測定結果は測定最終日に減衰補正を行っている。

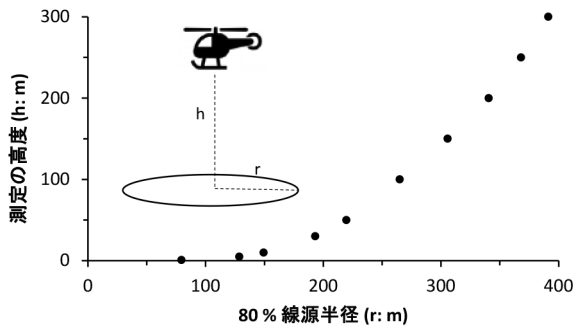


図5 測定の高さと測定範囲の関係。検出器位置における放射線の数をもとに80%となる線源半径(80%線源半径)をプロットした。

線の発生源を含む線源半径(80%線源半径: r)を求めプロットしている。この80%線源半径は、測定高度における線源視野の大きさを表す指標となる。図5のように、地上モニタリングで行われる地上高さ1m(h=1)での80%線源半径は約80m、無人機のフライト高度である100mでは80%線源半径は約250mとなり測定の高さにより線源視野範囲が変化することがわかる。このように、測定高度の異なるデータの比較には線源視野の違いを考慮することが測定結果の正しい理解の一助となる。また、測定データの精度を均一化するために対地高度を一定にフライトすることが重要なポイントとなり、無人機側に対地高度を自動的に保つ機能を付加できることが望ましい。

3. γ 線イメージング

図6に示した測定範囲の測定高度による違いは、放射線の位置情報のない単一の検出器を使用することが前提となっており、コンプトンカメラなどの位置分解能のよい検出器には当てはまらない。近年、ICの小型化技術

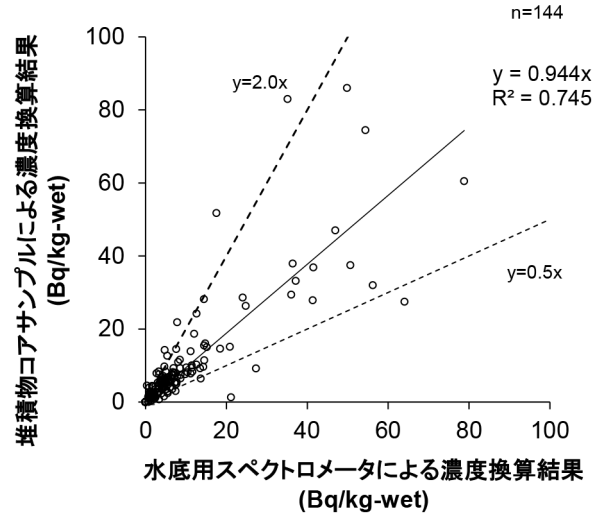


図6 水底用 γ 線スペクトロメータによる農業用ため池底の堆積物中の放射性セシウム濃度測定結果と堆積物コアサンプルによる放射性セシウム濃度測定結果の比較。補助線として傾き2.0および0.5の直線を表示している。

が進んでおり、複数の検出からの情報をもとに放射線の位置を特定する小型で軽量な γ 線イメージング用のシステムが開発されている。ローレンスバークレー国立研究所(LNBL)では、コンプトンカメラ方式の γ 線イメージャーにステレオ撮影による測定対象の3Dデータを組み合わせ、放射線分布の3次元化が可能となるシステムを開発している⁸⁾。原子力機構においても、前述した無人ヘリコプターに搭載できるコンプトンカメラを開発しており、従来の1つの検出器で測定した結果よりも位置分解能の向上した放射線分布マップの作成に成功している⁹⁾。また、早稲田大学では、ドローンに搭載できる2kg以下のコンプトンカメラの開発に成功している¹⁰⁾。これらの γ 線イメージャーは一定の計数率を蓄積する必要があるため、比較的長い測定時間が必要であるが、空間線量率が比較的高くて変化が大きな場所で狭い範囲の測定には有効であることから除染現場や、1Fの廃炉現場での活用が期待できる。

4. 水底のモニタリング

生活圏に密着する農業用のため池、ダム、河川敷および沿岸域などの水系における放射性セシウムの状況が懸念されている。農林水産省が定期的に福島県内で実施している農業用ため池のモニタリング結果¹¹⁾を見ると、水中の放射性物質濃度はおおむね10 Bq/L以下となっているが、水底の堆積物中の放射性セシウム濃度は最大で数百kBq/kg-dryとなる場所もあり比較的高濃度であると報告されている。現在、堆積物中の放射性セシウムの濃度測定にはサンプルを採取して、実験室で放射線を計測する手法が一般的であるが、この手法は正確である一方、手間と時間がかかる。原子力機構では、水底用 γ 線スペクトロメータやひも状の放射線検出器であるプラスチックシンチレーションファイバーを用いた現場で直



図7 原子力機構で使用している潜水型ロボットの諸元及びおよび概観(仏国 ECA Hytec 社製の H300-CBRN)

接水底の放射性セシウム濃度を測定する手法を開発している¹²⁾。あらかじめ計算シミュレーションで放射性セシウム濃度への換算を可能とした水底用のスペクトロメータを農業用ため池の水底に沈め測定した結果と同地点における堆積物コアサンプルを実験室で定量した結果を図6に示す。散布図はばらつきがあるものの相関関係にある。ばらつきの範囲は、図中に補助線として示した傾き2.0および0.5の直線内に入り、水中であるため堆積物サンプルとスペクトロメータの測定位置を一致させることが難しいことや水草等の影響によりスペクトロメータが水底に密着しにくいことを考えても放射性セシウム蓄積量を評価するのに十分な精度を有すると言える。

このような測定技術を潜水型のロボットに適用し農業用ため池よりも広いダムや沿岸域での測定に活用する研究開発を進めている。図7に、開発した水底の放射線計測用の潜水型ロボットの外観を示す。このロボットは200 mのケーブルで遠隔操作が可能であり、水底に着底させることによって放射線を計測可能である。ロボットの開発は福島県内のダム等で試験を継続的に実施し、放射線測定の精度や水底堆積物中における放射性セシウムの鉛直分布等の条件の影響についてデータを蓄積している。

IV. まとめ

環境放射線モニタリング用調査・評価技術の開発について原子力機構の関わる放射線計測技術を中心にまとめた。1F事故から6年が経過した現在でも、放射線測定に向けられたニーズは簡単に測定が難しい場所の計測や詳細な分布の測定などの特殊な用途など依然として高い。今後とも、新たな放射線測定技術を開発していくとともに、これまで蓄積した経験を原子力防災に使える技術として最適化することが必要である。

— 参考資料 —

- 1) 原子力規制庁ホームページ：総合モニタリング計画, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/204/list-1.html> (2017年2月閲覧)
- 2) 原子力規制庁ホームページ：放射線モニタリング情報, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/> (2017年2月閲覧)
- 3) Mikami, S. et al.: J. Environ. Radioactiv., 139, 250-259 (2015).
- 4) 眞田幸尚ら：平成27年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2016-016 (2016).
- 5) 日本原子力研究開発機構：平成27年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業成果報告書(2016), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry08.html> (2017年3月閲覧).
- 6) 文部科学省：“ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法,” 放射能測定法シリーズ 33, (平成20年3月).
- 7) Sanada, Y. et al.: Appl. Radiat. Isot., 118, 308-316 (2016).
- 8) Haefner, A. et al.: Nucl. Inst. Met. A., <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.11.046> (2017年3月閲覧)
- 9) Shikaze, Y. et al.: J. Nucl. Sci. Tech., 53, 1907-1918 (2016).
- 10) 片岡淳ら：光学, 45, 289-300 (2016).
- 11) 東北農政局：平成27年度福島県内のため池等における放射性物質の調査結果について(2016), http://www.maff.go.jp/tohoku/osirase/higai_taisaku/hukou/pdf/h27-torimatome_tyousa.pdf (2017年3月閲覧).
- 12) 眞田幸尚：光学, 45, 300-305 (2016).

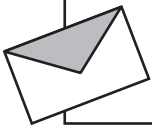
著者紹介

眞田幸尚 (さなだ・ゆきひさ)

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門
(専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線管理



理事会だより



監事の立場から

I. はじめに

「理事会だより」は、会員の皆様とのよりよいコミュニケーションのために、平成26年8月号から開始されました。これまで、各理事が理事会や学会組織、常設委員会の活動状況や会員の皆様へのメッセージなどをお伝えしてきました。今回は、監事の立場から理事会の様子などについて、紹介したいと思います。

II. 監事の職務

そもそも監事とはどういう職務かご存知でしょうか。原子力学会は一般社団法人ですので、「一般社団法人及び一般財団法人に関する法律」に基づき、運営されていますが、同法第99条～106条に監事の職務等について、規定されています。その主な内容は以下の通りです。

- ・理事の職務の執行を監査する。
- ・理事会に出席し、必要が認められる時は意見を述べる。
- ・社員総会に提出しようとする議案、書類その他法務省令で定めるものを調査する。

これを踏まえ、当会定款に幹事の職務および権限として、以下の通り定められています。

(監事の職務および権限)

第22条 監事は、理事の職務の執行を監査し、法令で定めるところにより、監査報告を作成する。

2 監事は、いつでも、理事および使用人に対して事業の報告を求め、この法人の業務および財産の状況の調査をすることができる。

III. 監査活動について

2名の監事は、監査活動の一環として、基本的に、毎回、理事会に出席し、理事会が適切に運営されていることを確認するとともに、適宜、議論にも参加しています。

理事会での議論については、これまでの「理事会だより」で紹介されていますが、特に監事として特筆すべき内容を紹介します。

(1) 財務状況の改善

平成22年度に正味財産期末残高が4,200万円の赤字となった財務状況は、その後の財務改善活動が功を奏し、翌平成23年度からプラスに転じ、平成27年度末には、4,900万円のプラスとなりました(詳細は2016年11月号51ページの理事会だよりを参照)。関係者のご努力に感謝いたします。

過去の財務危機を二度と繰り返さないために、現在も、理事会においては、毎回、予算の執行状況を確認するとともに、予定外の支出要請に対しては、その必要性だけでなく財務影響を踏まえて、支出可否を判断するなど、適切な財務管理がなされています。

(2) 規定類の改定

当会には200を超える規定類がありますが、規定間の不整合、様式の不統一といった不備があり、これらを解消するため、平成27年度から、規定類の改訂作業を行いました。百々元理事の献身的な対応のお陰で、相互に整合のとれ、統一されたルールができ、コンプライアンスの観点からもより良い環境が整備されたと思います。

(3) 年会・大会のスケジュール改善

2016年春の年会から演題登録、プログラム公開に係るシステムとしてConfitが導入されていますが、これは年会大会の発表申込及び予稿投稿の準備に余裕を持たせたいとの主目的で2015年度に事務局と理事会において検討がなされた成果です。これにより、準備期間が1か月近く長くなったのに加え、Confitによるプログラム、予稿の容易な確認といった利便性の向上も得られています。

(4) 福島第一原子力発電所事故に対する取組

これまで事故調査委員会(2013年度報告書発行)、福島特別プロジェクト、福島原発廃炉検討委員会、福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会と広範な取組を継続していますが、これは2011年の事故を受けた定款改定の基本原則を具体化するものです。今後も引き続き、積極的な活動が期待されます。

IV. あとがき

以上、監事の立場から理事会の活動状況について紹介してきましたが、最後に触れておきたいのは、理事の皆さんが、如何に献身的に活動を行っているかということです。理事の皆さんは、理事会での活動の他、常設委員会他の担当委員会を複数受け持ち、理事会と傘下委員会との調整もされており、学会活動に多くの時間を費やして頂いています。我々監事は、こうした理事の方々の献身的な活動に感謝しつつも、当会運営が、ルールに基づき適切に行われ、会員に役立つ活動が行われるよう、これからもしっかりと職務を遂行していきます。

(MHI NSE 梅澤成光, 関西電力 水田 仁)