

巻頭言

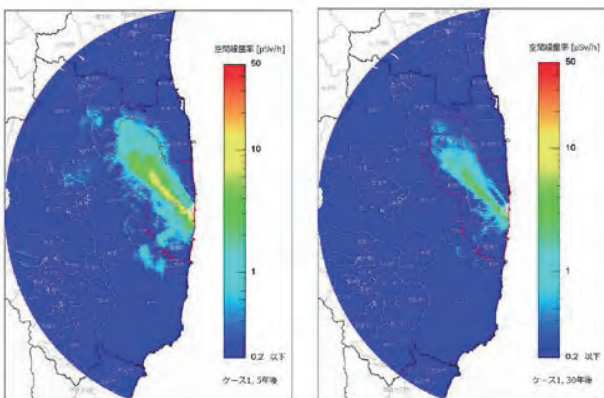
- 1 Meeting this Generation's Responsibilities to the Future
William D. Magwood

時論

- 2 防災学術連携体の設立—今こそ必要な学会の垣根を超えた議論と社会を含めた交流
和田 章
- 4 「オールハザードアプローチ」と「レギュラトリーサイエンス」
あらゆるハザードを明示的に検討対象とするオールハザードアプローチと、科学と政策をつなぐ部分を「見える化」するレギュラトリーサイエンスが原子力安全分野に取り入れられるべきである。
岸本 充生

解説

- 29 30年後の福島環境放射線レベル推定とその技術開発
福島第一原発から80キロ圏内の空間線量率は、これからどうなるのか。原子力機構が開発した分布状況変化モデルをもとに、今後を予測した。
木名瀬 栄

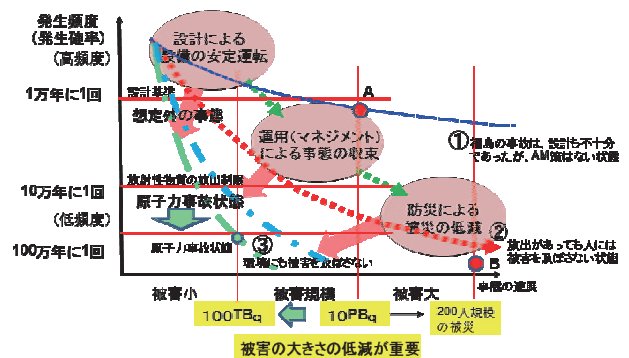


空間線量率の分布状況予測図
左は5年後、右は30年後

解説

- 12 低炭素電力システムにおける原子力と再生可能エネルギーの共生を考える—系統安定性、経済性及び自由化の観点から
原子力と再生可能エネルギーは、資本費は高いが温室効果ガスをほぼ放出しない特徴を有する。これらの電源が自由化後の市場で重要な役割を合理的に果たすようにする上で、技術面及び制度面で求められる革新について概観する。
尾本 彰, 藤井康正
- 23 原子力発電所が二度と過酷事故を起こさないために—防災までを共に考える原子力安全
リスク評価は想定外を少なくすることに役立つ。設計はもとより運用、防災までをリスク評価をすることで、判断を客観的に行えるようになる。それにより、原子力安全の事故耐性の向上と、リスクマネジメントのあり方をめぐる議論に資することが期待できる。
宮野 廣, 村松 健

リスクRは、被害規模Cと発生頻度Pの組み合わせである

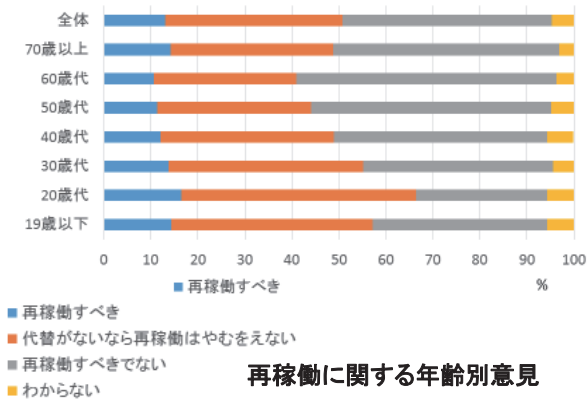


解説シリーズ 転機を迎えるエネルギー市場 (4)

- 17 原油価格の変動とその構造的要因
原油価格の変動をもたらすのは石油の需給バランスや地政学的要因の作用、石油先物市場への投機資金流入などだ。今後は高コストな石油生産が相対的に増えることで、価格は徐々に上昇すると見られる。
小宮山涼一

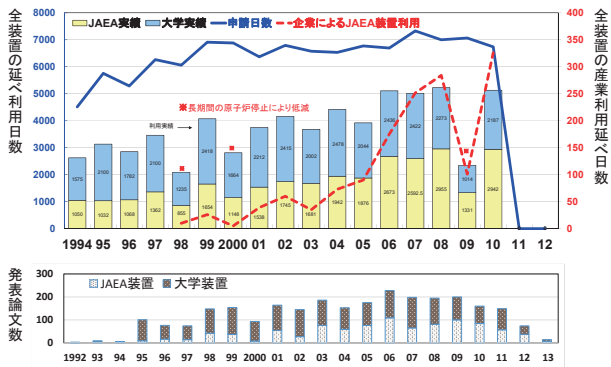
34 浜岡周辺地区での世論調査が語るもの—世代による原子力肯定比率の違い

静岡県内でアンケート調査を実施したところ、若い世代ほど原子力発電を支持する比率が高いことがわかった。この結果を日本の年代別構成比に合わせて再計算すると、再稼働肯定の比率が否定の比率を上回ることになる。 **山本隆三**



38 中性子ビーム利用研究における研究用原子炉 JRR-3 の役割—これまでとこれから

JRR-3 で行われてきた中性子ビーム利用に焦点をあて、その実績を紹介するとともに、J-PARC 本格稼働後の JRR-3 での中性子ビーム利用研究の方向性を議論する。 **武田全康, 松林政仁**



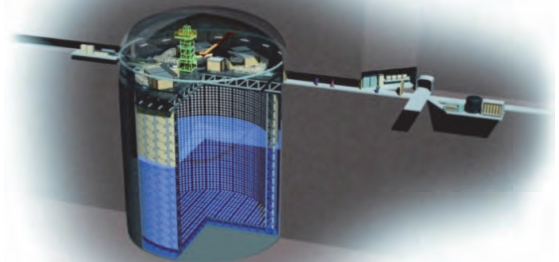
6 NEWS

- 京大と近畿大研究炉、新規基準に合格
- 学会、研究炉の役割明確化を提言
- 量子科学技術研究開発機構が発足
- 川内1・2号の運転差し止め抗告を棄却
- 東工大、科学技術創成研究院を設置
- 福島環境安全センターが三春に移転
- 男女共同委が多様性と安全を議論
- 海外ニュース

サイエンスよみもの

43 加速器で生成したニュートリノを用いて粒子と反粒子の違いを探る—東海・神岡間長基線ニュートリノ振動実験 T2K

1998年のニュートリノ振動の発見により、ニュートリノの質量がゼロでないことが実験的に示された。ニュートリノ振動の精密測定は素粒子物理学の最前線の一つであり、そのフロントランナーのT2K実験について紹介する。 **中平 武**



提供：高エネルギー加速器研究機構

理事会だより

51 だれもが考え、だれもが悩む時代

- 28 From Editors
- 52 会告
- 53 会報 原子力関係会議案内、寄贈本一覧、英文論文誌目次 (Vol.53, No.6), 和文論文誌目次 (Vol.15, No.2), 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

談話室

49 「ぼくたちはお婿に行けますか？」



私は福島第一原発で働き、その時の様子を『いちえふ』という漫画に描いた作業員兼漫画家です。 **竜田一人**

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://ssl.aesj.net/publish/meyasubako>)にお寄せください。

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

Meeting this Generation's Responsibilities to the Future

卷頭言



W. D. Magwood, IV

Director General, Nuclear Energy Agency (NEA) of OECD

Previously served as one of the five Commissioners in the US NRC, and was also Director of Nuclear Energy at the US DOE. Launched several important initiatives including the Generation IV International Forum (GIF). At the current position since 1 September 2014.

Despite its many challenges, the world in which we live today is the most advanced, peaceful, and prosperous world humankind has ever experienced. The medical science of today was beyond conception two hundred years ago. A century ago, only the most imaginative could have envisioned the lights and traffic of modern Tokyo. Technologies today's children take for granted—the Internet, mobile phones, digital media—were not even the stuff of science fiction when their grandparents were their age.

It is easy to forget that all of these advances, the comforts and conveniences of our 21st century world, are the result of the hard work of scientists, engineers, and builders of past decades. Nothing we have today that makes our society function would be available had our predecessors not devoted their time and resources to innovate the new and the better. Had they simply satisfied themselves with what they had and focused their efforts to maintain the status quo rather than build the future, our world would look very different.

It is in that context that we should think about the way governments around the world invest in science and innovation. It is difficult to look at the long-range research and development budgets in many technological fields and not think that we are not meeting the challenge that our forefathers met; that we are not working hard enough to build a better future.

Nuclear technology is an area in which we could do more. Scientists in many countries convene in meetings held by the Nuclear Energy Agency and discuss concepts that could make nuclear energy live up to all its original promises. For example, the Generation IV International Forum brings together experts from a dozen countries who believe that they have identified practical concepts for plants that are designed such that they are not susceptible to a nuclear accident, yet would produce clean electricity, heat, and water. Advanced nuclear technologies like these could provide society with clean energy for a thousand years or more. Many

scientists have also shown that we can obtain more energy from used nuclear fuel while transmuting its most toxic components in a way that makes the waste less radiotoxic than the original uranium ore after hundreds of years instead of hundreds of thousands.

Some of these ideas have been discussed by experts for decades. But in many of the most advanced countries of the world, the resources to realize these visions simply have not been available. In fact, in recent years, many governments have shut down the experimental facilities needed to test and develop advanced technologies. As a result, there are few places scientists can go to convert their ideas from concepts to realities. For example, fast neutron materials testing facilities were shut down in almost every country except Russia (in Japan, the ultimate fate of two such facilities, Joyo and Monju, is still to be decided). Once lost, these capabilities are difficult to regain, as the cost of building new facilities is daunting. Choosing to operate or build facilities like these is a difficult matter; the value of research facilities of this nature to the global community and, possibly, to future generations, is difficult to measure while the fiscal realities faced by national governments are quite evident.

But the challenge today is to find a place in our minds and our budgets for long-term technology research. Even if some countries decide that today's nuclear technologies do not fit their plans, it hobbles the future to forgo scientific exploration and technical innovation. Without innovation, we not only take choices from future societies, but we also consign all of our long-lived nuclear wastes to their care when technology might have provided other options. Without exploration, we do not know what benefits we bypass and leave behind.

Just as those before us had to choose to invest to build our modern world, so must we choose whether to invest in the world of the 22nd century and beyond. One hopes we will choose well.

(March 31, 2016)



防災学術連携体の設立

—今こそ必要な学会の垣根を超えた議論と社会を含めた交流—



和田 章 (わだ・あきら)

東京工業大学名誉教授。専門は建築構造学。

日本建築学会会長(2011-2013)、日本免震構造協会会長(2013-)など歴任、この度、防災学術連携体代表幹事の一人に就く。

1. 東日本大震災と学術分野の反省

東日本大震災から5年が過ぎた。これは自然の猛威に人間社会が耐えられなかったという意味で自然災害と呼ばれているが、建築と耐震工学に関係してきた一人として、過去に大津波が襲ったことを知っていて、何も対策せずにまちや都市が作られていたことを見過ごしていたなど、防災・減災への努力が足りなかったことが多くあり、忸怩たる思いで一杯である。大きな自然の猛威ほど発生頻度は小さく、今日が大丈夫だったから明日も大丈夫だと考えがちであり、科学・技術への過信、自然を無視した社会の行動の驕りが起きやすい。

文明社会は数え切れないほどの多くの仕組みによって支えられて動いている。大きな自然災害は、尊い人命を奪うだけでなく、これらの整然とした文明を壊し、正常な社会の動きに大混乱を及ぼす。場合によっては、この混乱は世界に広がる。我々は至っていない防災・減災に反省し途方に暮れてしまうが、直後から救助活動・緊急医療・瓦礫処理・道路啓開・復旧活動・仮設住宅建設などに大変なお仕事をされた人たちが多くおられ、頭がさがる。災害が起きないように備えることは絶え間なく行わねばならないが、起きてしまったからの復旧復興についても真剣に取り組みねばならず、防災減災・災害復興は、日本人全体の問題として考えねばならない。学術の分野に目を向けても同様であり、法学・経済・理学・工学・農学・医学・社会学などすべての専門分野にとって重要問題である。

2. 分野を超えた隙間ない議論と交流

明治以来150年の間に我国の学術分野は細分化を続け、他の専門分野のことは分からず、それぞれ真剣に取り組んでいるに違いないと考え、他分野への関心が徐々に薄れ、専門を超えた議論はされ難くなる。結果として他分野の活動に暗黙の了解が増長し、重要な仕事はマニュアルなどを介して伝言ゲームのように進められていく。これらの暗黙の了解の間に、誰も注目しない重要な弱点が残ってしまう。ただし、抜け目のない大きな自然の猛威はこれらの弱点を檻から飛び出した猛獣のように

攻めてきて、大災害を起こす。

東日本大震災の惨状を前にして、研究者や技術者がそれぞれの専門の枠の中で議論していたのでは対処できず、防災減災の成立だけでなく、災害復興に混乱を生まないためには、全体で起こることに想像力を馳せ、専門間の隙間を埋める努力を続け、他分野の研究を知り交流することが必要であると、多くの研究者が考えた。垣根を越えて自由に議論することは、研究者間だけでなく、企業などの組織内の上下関係を超え、複数の企業が関係する大きな仕事では企業の組織を超え、さらに専門分野を超えて隙間なく、行われる必要がある。

3. 日本学術会議と多くの学会の連携活動から防災学術連携体の設立

日本学術会議では、東日本大震災の起こる2年ほど前から防災分野の隙間ない議論のために、複数の学会の垣根を超えた議論が必要であると考え、2010年3月には公開シンポジウム「自然災害軽減のための学協会の役割と課題」を開催している。しかし、大震災の前であり真剣さが足りず、議論だけが進んでいたように思う。ただ、これらに関係していた多くの学会は、2011年5月に「東日本大震災の総合対応に関する学協会連絡会」を設立することができ、30学会の参加による学際連携を進めてきた。2012年5月に、次頁に転載する共同声明を發出し、2014年11月には国連防災世界会議(仙台にて2015年3月に開催)に向けて英文の共同声明を發出した。

上記の学協会連絡会を発展させ、2016年1月9日に地震災害や津波災害だけでなく、火山の爆発、気象変動が激しくなり多発する集中豪雨、豪雪、結果として起こる崖崩れ、巨大台風による強風などすべての自然災害を対象に、よりよい防災減災・災害復興を目指すため、理学・工学・農学から医学・社会学まで広い分野の47の学会の参画を得て「防災学術連携体」が設立された。

4. 防災学術連携体の活動

防災学術連携体は日本学術会議に設けられた「防災減災・災害復興に関する学術連携委員会」と密接に連携して活動する。年に一度大きなシンポジウムを開催し、防

災関連総合ポータルサイト(janet-dr.com)に各学会の行事カレンダー、研究報告などを載せ、平常時から学会間の連携を深める。大災害等の緊急事態時に動けるように、学会間の緊急の連絡網を整備する。各学会の防災関連の委員会活動のデータベースを構築し、各学会の関係者からの研究検索だけでなく、市町村の防災担当者、企業の関係者、一般の人から、このデータベースに触れることができるようにする。初めに述べたように、防災減災・災害復興には多くの専門が関係するため、各学会は全国の人々に役立ちたいと考えている。

防災学術連携体は、自然大災害の頻度は低いため継続性のある組織作りが最重要と考えている。国内だけでなく海外の学術団体・関係機関と国際交流をすすめる、世界の防災にも協力する所存である。

現在の参加学会を最後に示す。詳細情報は上記のポータルサイトを是非開けて戴きたい。

■自然災害に対する防災減災を進め、より良い災害復興をめざすために、日本学術会議を要として、防災に関わる学会が集まり、平常時から相互理解と連携を図ると共に、緊急事態時に学会間の緊密な連絡がとれるよう備えています。

■政府・自治体・関係機関との連携を図り、防災に役立てると共に、緊急事態時に円滑な協力関係が結べるように備えています。

■学術連携を図ることで、より総合的な視点をもった防災減災研究の向上発達をめざします。

三十学会・共同声明

2012年5月

東日本大震災の総合対応に関する学協会連絡会

東日本大震災以降、中央防災会議、内閣府、国土交通省、文部科学省等を中心に、政府は大地震・大津波に対する対策に全力を傾注している。これを受けて、東日本大震災の総合対応に関する学協会連絡会は、「巨大災害から生命と国土を護る-24学会からの発信」連続シンポジウム(全8回のうち1回から3回)を開催し、学会の壁を越えて本質的な議論を展開してきた。これらの議論に基づき学協会連絡会は、大災害から国民の生命と国土を護ることを期して、政府に、次の方針を国土・防災・減災政策に盛り込むことを要望する。

1. 首都直下、東海・東南海・南海地震等の巨大地震が、日本の政治・経済・社会の根底を揺るがすことのないように、被害を軽減する実効性のある総合的な防災・減災政策に全力を傾けること。巨大災害の発災および復旧の非常時においては、国家の責任のもとで、機動力のある特例的な対応が取れるよう法制度の整備を含め準備しておくこと。

2. 従来、政府の検討対象から除きがちであった低頻度

で巨大、あるいは甚大な震災について、有効な対策の有無に関わらず検討対象としてとりあげること。情報公開により、地震研究と国土・防災・減災政策の連携を促進し、総合的で抜け落ちのない対策を目指すこと。

3. 今後想定されるハザードについて、常に柔軟性を持たせ、想定を上回る規模のハザードも起こりうるという前提にたち、国土計画・都市計画・防災減災計画を検討すること。産学官の英知を結集し、国民が検討の経過や結果を広く共有するための基盤を整備し、継続的に維持・更新していくこと。

4. 数十年～百数十年に一度の頻度で起きる大災害には、構造の強化・施設の整備による防災政策で対処すること。数百年～千年に一度の頻度で起きる巨大災害には、人命の犠牲を最小にするべく、避難設備の整備と避難教育の充実を組み合わせた総合的な減災政策で対処すること。

5. 災害の多い我が国の歴史と東日本大震災の教訓のもとに、古来の災害履歴を踏まえた、リスク分析を行うことによって、より安全な場所への居住や産業の立地誘導を図ること。地域の歴史・風土・自然環境を踏まえたハザードマップと地域減災計画を立案し、継続的な教育や準備により日常防災を実現すること。

6. 人口減少・高齢化、エネルギー問題、国家財政の厳しさ等を踏まえ、地方と共に中長期的な国土総合計画を作成し、国民に周知すること。国土総合計画は、国土計画、都市計画、農山漁村計画、防災・減災計画等が総合的に検討されるものであり、太平洋軸と日本海軸の相互バックアップ体制の確保なども含め、日本列島のグランドデザインの観点をもつこと。

以上、政府への要望を述べてきたが、学術の世界においても、学会がそれぞれ専門分野に分かれて検討するのではなく、学会の壁を越えて議論し、総合的により良い方向を見いだす努力が重要である。当学協会連絡会は、従来の縦割りの弊害を見直し、学会間の連携を深め、国土・防災・減災政策に関する諸課題に取り組む決意である。

防災学術連携体の参加学会(2016.3時点 48学会)

安全工学会、横断型基幹科学技術研究団体連合、環境システム計測制御学会、空気調和・衛生工学会、計測自動制御学会、こども環境学会、砂防学会、地域安全学会、地理情報システム学会、地盤工学会、土木学会、日本応用地質学会、日本海洋学会、日本火災学会、日本火山学会、日本風工学会、日本活断層学会、日本機械学会、日本気象学会、日本救急医学会、日本計画行政学会、日本建築学会、日本原子力学会、日本古生物学会、日本コンクリート工学会、日本災害看護学会、日本災害情報学会、日本災害復興学会、日本自然災害学会、日本社会学会、日本集団災害医学会、日本森林学会、日本地震学会、日本地震工学会、日本地すべり学会、日本自治体危機管理学会、日本造園学会、日本第四紀学会、日本地域経済学会、日本地球惑星科学連合、日本地質学会、日本地図学会、日本地理学会、日本都市計画学会、日本水環境学会、日本ロボット学会、農業農村工学会、廃棄物資源循環学会

(2016年3月28日記)



「オールハザードアプローチ」と「レギュラトリーサイエンス」



岸本充生 (きしもと・あつお)

東京大学公共政策大学院/政策ビジョン研究センター特任教授

1998年京都大学大学院経済学研究科博士後期課程修了、博士(経済学)。産業技術総合研究所安全科学研究部門研究グループ長を経て、2014年4月から現職。共著書に『基準値のからくり』(講談社)など。

本稿では、東日本大震災と福島第一原子力発電所事故を受けて、原子力安全の分野に少しだけ取り入れられたものと、まだ全く取り入れられていないものと、2つのカタカナ語の概念を取り上げる。

東日本大震災の教訓としての「想定外をなくせ」は、結果的に、関係者を経験したハザードの極端なワーストケースを想定する作業に向かわせ、首都直下型地震や南海トラフ地震(だけが)が近いうちに起きることが既成事実化している。逆に、火山噴火は、御嶽山が小規模な噴火を起こすまではほとんど注意が向けられなかったし、太陽フレアや隕石衝突といった他の種類のリスクは議題にも上がっていない。そのため、本来、国として実施すべき、様々なリスク削減対策の優先順位付けは依然としてなされていない。

欧米では、9.11テロで始まり、相次いで自然災害が起きた2000年代に、想定外をなくすためにどうすればよいか検討した結果、英国も米国も欧州連合も共通の答えにたどり着いた。それが「オールハザードアプローチ(all hazard approach)」であり、それに基づく実践としての「ナショナルリスクアセスメント(National Risk Assessment)」であった。オールハザードアプローチとは、その名のとおりに、自然現象や事故、そして悪意によるもの(脅威)も含む考え得るすべてのハザードを対象とする。スウェーデンの緊急事態庁、米国の国土安全保障省など、そのための省庁が設置されている国も多い。

例えば、英国では2004年に成立した民間緊急事態法(Civil Contingencies Act)に基づき、2005年以降、2年に一度、今後5年間に発生する可能性のある数十種類のハザードを、発生確率と影響の大きさの二軸で評価するナショナルリスクアセスメントを実施している。欧州委員会は2011年に加盟国に、2015年末までに少なくとも1回実施し、その後は3年ごとに実施することを勧告した。ナショナルリスクアセスメントは、最初に、国として何を守りたいかを定める必要がある。例えば、オランダは、領土の安全保障、身体的安全、経済的安全保障、生態的安全、社会的政治的安定性の5つを挙げた。ス

ウェーデンでは、民主主義・法の役割・人権・自由、という項目が入っている。続いて、あらゆるハザードの中から取り上げるハザードを選択し、それぞれのシナリオを作成し、発生確率と影響の大きさの二軸で評価する。これらの情報は通常、リスクマップとして示され、リスク対策を考えるための基盤となる。オールハザードアプローチは、国に限らず、地域でも、組織でも、個人レベルでも実施可能である。英国では、ロンドンオリンピック前に「オリンピック版リスクアセスメント」が実施された。オリンピック特有の緊急事態の想定とリスクの定義を行い、関係機関の対応能力とのギャップを明らかにした。2020年にオリンピック開催を控えた日本でも必要な作業であり、準備期間も考えるとすぐにも開始した方が良い。

オールハザードアプローチの対義語は、事件・事故衝動型(event driven)である。日本のこれまでの安全対策、安全規制はほとんどがこのやり方で行われてきた。例えば、学校安全を考えてみよう。不審者が侵入したらその対策、下校時の連れ去りがあればその対策、自然災害に遭えばその対策、集団登校の列が自動車事故に遭えばその対策、という具合に基本的に後追いである。同種の事故・事件は防げるかもしれないが、他の種類のものはそれが起こるまで待つことになってしまう。オールハザードアプローチの採用は、こうした後追い型から先手を打つやり方への変革を意味する。もちろん「オール」と言っても見逃しはありうる。そのため、PDCAサイクルを回し、定期的に更新することが不可欠なのである。

原子力規制委員会による新規制基準の中に、(まだ原子力災害の原因になったわけでない)火山噴火や竜巻といった外部事象が明示的に含まれたことは、オールハザードアプローチに向けた最初の一歩だと考えることも可能である。ただし、これを、クリアすればOKという受け身でなく、オールハザードアプローチの一環として捉え、新しい情報を取り込み続け主体的に更新していく姿勢が求められる。

第二のテーマは「レギュラトリーサイエンス」である。

日本社会では、安全は科学であり、安心は心理の問題であるという安全/安心二分法が広く信じられてきたが、安全も科学だけでは決めることができないという事実も東日本大震災や福島第一原子力発電所事故の教訓の1つである。安全とは「リスクがないこと」ではなく、「許容できないリスクがないこと」(ISO/IEC ガイド 51)である。許容できないリスクがないことを示すためには、当然リスクを見積もる必要がある。リスクの見積もり、すなわちリスク評価には不確実性がつきものであり、再現可能な科学的データだけでなく、推論や判断を伴わざるをえない。さらにどのリスクレベルが「許容できないレベル」であるかは社会全体で決めることである。

しかし、安全に関する意思決定について、「科学的に決めた」と言いたい行政の希望と、「科学的に決めた」と言ってほしい国民の期待に、科学者・専門家が無理して答えているという構図は今でもあまり変わらない。低線量放射線の健康影響も、次回発生する津波の高さも、活断層の有無も、火山が噴火するかどうかも、現実社会は不確実性だらけである。真理を探究する科学の世界では時間制約はないが、政策の世界は時間制約のもと、不確実性を残したままで意思決定せざるをえない。ある自治体の首長は、防潮堤の高さ(計画堤防高)は「ちゃんとした科学的根拠に基づいて」決めたと言明したが、実際は、過去3回の実績津波高さとする特定の想定でのシミュレーション結果という最大でも4つのデータのうちの1つに、せり上がりを考慮して得られた設計津波水位に1メートルの安全係数を足した必要堤防高をもとに、様々な要素を「総合的に考慮して海岸管理者が適切に設定」するものが計画堤防高である。人々が「科学的根拠」でイメージするものとは大きなギャップがある。

しかし、客観的なファクトとしての科学から直線的に政策が決定されると考えるモデルはもう過去のものである。1970年代にはすでにそのような直線モデルに異議を唱える形で「トランスサイエンス」、すなわち、「認識論的に言えば事実に関する問題であり、科学の言語で述べることができるが、科学だけでは答えることができない問題群」の存在が指摘された。その後、「レギュラトリーサイエンス」という言葉が、国内では1987年に「科学技術の進歩を真に人と社会に役立つ最も望ましい姿に調整(レギュレート)するための、予測・評価・判断の科学」として提唱された。同時期に米国でも「リサーチサイエンス」と対比する形でレギュラトリーサイエンスが定義された。トランスサイエンスとレギュラトリーサイエンスはともに科学と政策の交錯する不確実な部分を指しているが、前者は「科学によって答えられない」側面を強調するのに対して、後者は政策によって問われた問いに回答するための新しいタイプの科学を作って可能な限り答え

ようとする点に特徴がある。すなわち、科学と政策の間のギャップを、社会側から埋めようとするか、科学側から埋めようとするか、という態度の違いと捉えることもできるだろう。レギュラトリーサイエンスはその後、目先の意思決定課題の解決のための実践の学問として発展してきた。様々な規制機関、例えば、米国では食品医薬品庁(FDA)、欧州では医薬品庁(EMA)や化学品庁(ECHA)、オーストラリアでは殺虫剤&動物用医薬品局(APVMA)、そして日本では医薬品医療機器総合機構(PMDA)などが自らの組織の研究基盤をレギュラトリーサイエンスと称している。日本学術会議は、2010年に「日本の展望 リスクに対応できる社会を目指して」において、「安全の科学(リスク管理科学:レギュラトリーサイエンス)」の確立と振興を、2011年に「わが国に望まれる食品安全のためのレギュラトリーサイエンス」で、食品安全分野での研究推進や人材育成を提言した。このように、基準値の策定に代表される、科学的データに基づきつつも推論や判断を含む仕事をレギュラトリーサイエンスと位置付け、伝統的な科学と区別された「もう1つの科学」として、研究振興や人材育成を目指す動きは国内外で活発化しつつある。

原子力規制委員会はその活動原則の1つに「何のものにとらわれず、科学的・技術的な見地から、独立して意思決定を行う」と掲げ、「科学的」へのこだわりは強い。しかし、通常の科学を規制意思決定につなげるには、その間にレギュラトリーサイエンスが必要であることは、食品安全や医薬品安全の分野と変わらない。多くの安全分野では、リスク評価とリスク管理は機能的に区別されている。食品分野では、食品安全委員会が、科学的データに基づきリスク評価を行い、その結果を受けて厚生労働省などがリスク管理措置を決めている。リスク評価はレギュラトリーサイエンスであるが、リスク管理は政策判断である。防潮堤の高さでいうと、必要堤防高を求めるプロセスはリスク評価に相当し、必要堤防高から計画堤防高を決めるのがリスク管理である。原子力安全の分野では、通常の科学からリスク評価を経て、リスク管理が行われるという道筋がよく見えなくなっている。科学的な装いにこだわりすぎることで、かえって科学と政策の間のプロセスがブラックボックス化してしまっているのではないだろうか。その中身を、レギュラトリーサイエンスとして再定式化することで「見える化」することは、透明性を高め、結果として信頼性を高めることにつながるだろう。もちろんレギュラトリーサイエンスは、暫定的な性格を持っており、科学的知見や技術革新、社会経済環境の変化などを反映して常に見直されていくべきものであるという点は「オールハザードアプローチ」と共通している。(2016年3月6日記)



京大と近畿大の研究炉，新規制基準に合格

原子力規制委員会は4月13日、京都大学の臨界実験装置と近畿大学の原子炉が新しい規制基準を満たしているとする審査書案をまとめた。研究炉の審査書がまとめられたのはこれが初めて。

大阪府熊取町にある京都大学の臨界実験装置「KUCA」は出力100Wで、学生などを対象に炉物理実験や中性子

利用実験を行っていたが、新規制基準に対応するため昨年3月から運転を停止している。東大阪市にある近畿大学の原子炉は出力1Wで、近大生や小中高の教員が原子炉の運転や実験実習を行っていたが、新規制基準対応のために一昨年2月から運転を中止していた。

(原子力学会誌編集委員会)

原子力学会，研究炉の将来計画の明確化や新基準対応に向けた連携を提言

日本原子力学会の上塚寛会長、上坂充副会長兼研究炉等の役割検討・提言分科会主査、中島健同分科会委員は4月5日の原子力委員会で、日本における研究炉等の役割について中間報告を行った。新たな規制基準への対応で国内の研究炉はすべてが停止しており、原子力人材育成や研究開発および産業利用に支障をきたしている。このため日本原子力学会は2015年6月に「研究炉等の役割検討・提言分科会」を設けて検討を重ね、2016年3月に研究炉等の役割と現在の課題、方向性についての提言などを中間報告としてまとめたもの。

報告では、研究炉は炉を用いたカリキュラムに沿って進める教育、実習、研修による人材育成と、研究炉等を用いる研究開発を通じた研究者・技術者の人材育成の2つの役割があると評価した。震災以前は毎年1,400～1,700名を育成してきたが、すべての研究炉が停止して以降2014年度では約300名と5分の1未満に減少。今後も重要な役割を担う研究炉について、(1)新規

制基準への対応(2)高経年化対策(3)使用済み燃料に対する措置(4)核セキュリティ強化対応および対象となる一部の研究炉での燃料低濃縮化(5)廃止措置および次期研究炉の検討(6)運転員の力量と士気の確保——が課題だとした。

さらに同分科会は、原子力人材育成に不可欠な研究炉等の確実な維持運用のために将来計画を明確にすること、研究炉等の新基準対応に向けて連携を図り審査の透明性確保に努めること、使用済み燃料に関し特に米国返還期限である2029年以降の措置について検討しておくこと——を提言として掲げた。

岡芳明原子力委員長は、海外の研究炉の規制例なども参考にしつつ着実に対応を進めていくことを求め、今後原子力委員会としても研究炉の考え方について提言のあたりで示す方針を述べた。

(資料提供：日本原子力産業協会)

量子科学技術研究開発機構が発足，放医研と原子力機構の相乗効果発揮へ

放射線医学総合研究所と日本原子力研究開発機構の量子ビーム・核融合部門が量子科学技術研究開発機構として4月1日に統合し、同機構の発足記念式典が4月3日、千葉市の同機構本部(旧放医研本部)で行われた。放医研と原子力機構がそれぞれ蓄積してきた知見・ノウハウの相乗効果を発揮させ、さらなる学理的な理論究明とともに、医療、バイオ、エネルギー、材料開発など、幅広い分野でイノベーションを創出し、社会に貢献することを目指す。

式典には馳浩文部科学大臣をはじめ政界、自治体、学界などから多くの来賓が訪れ、新たな組織の門出を祝っ

た。放医研ではこれまで重粒子線がん治療装置を活用し、多くの放射線医学利用に係る研究開発を行ってきたほか、患者治療でも既に9,000人を超える実績をもつ。馳大臣は式典に臨む前に、治療台を傾けずに重粒子線を照射できる回転ガントリーを設置する新治療研究棟を視察。自身も治療台に横たわるなどして研究棟を視察した馳大臣は、式典の挨拶の中で「国民の視線を意識しての運営」を新組織に期待した。

式典終了後、記者会見を行った量子科学技術研究開発機構の平野俊夫理事長は、新組織発足の所感として「多様な学問領域を統合することのワクワク感」と述べ、統

合がもたらす相乗効果への希望に満ちあふれる一方、「多様には対立やカバもある」などと課題もあげた上、解決には「魔法はない、対話すること」として、今後自らも現場に赴き、特に若い人たちと積極的に対話し、組織内の交流を深めていく考えを強調した。

量子科学技術研究開発機構は本部を千葉市に置く。旧

原子力機構の量子ビーム科学研究部門は、高崎量子応用研究所(群馬県)、関西科学研究所(京都府、兵庫県)、同じく核融合エネルギー研究開発部門は、那珂核融合研究所(茨城県)、六ヶ所核融合研究所(青森県)を主な研究拠点としている。

(同)

川内1・2号の運転差し止め抗告を棄却、新規制基準に合理性との判断

福岡高等裁判所宮崎支部は4月6日、川内原子力発電所運転差し止め仮処分の抗告審に対し、「抗告人らが本件原子炉施設の運転に当たって具体的危険性があると主張する点を検討しても、抗告人らの人格権が侵害され又はそのおそれがあると認めることはできない」として、抗告人らの申立てを棄却した。本件は、鹿児島地方裁判所が2015年4月22日に川内1,2号機の運転差し止めを求める仮処分の申立てを却下の決定に対して、同年5月6日に福

岡高等裁判所宮崎支部に即時抗告されたもの。

九州電力は同日、これまで同社が、川内原子力発電所が基準地震動に対する耐震安全性を確保していることや、事故等により周辺環境への放射性物質の異常な放出が生じる現実的危険性がないこと等を主張してきたことが、裁判所に認められたものであり、妥当な決定をいただいたとのコメントを発表した。

(同)

東工大、研究力強化に向けて科学技術創成研究院を設置

東京工業大学は2016年4月1日より、研究改革のため体制を集約して約180名の研究者を擁する科学技術創成研究院を設置した。同研究院は学長直属の研究組織となり、現行の研究組織を再編成して新たなミッションを担う6つの「研究所・研究センター」と、最先端研究を小規模のチームで機動的に推進する10の「研究ユニット」を統括する。

研究ユニットは卓越したリーダーが“尖った”研究を大

きく育てるための仕組みとしており、設置期間は原則5年間として、具体的なミッションを定めてその実現を図る。今回の改革によって複雑化する社会の要請に応え、新たな分野や融合分野の研究を創出し、研究成果の社会への還元を一層促進する。ユニットと研究所・研究センターとの連携により「世界の研究ハブ」実現を目指す。

(同)

原子力機構、福島環境安全センターを三春町の福島県環境創造センターに移転

日本原子力研究開発機構は4月26日、福島市にあった福島環境安全センターの機能を三春町の福島県環境創造センターに移転した。

福島環境安全センターは東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所事故による放射性物質の影響を受けた地域の環境を回復するために、原子力機構が2011年に福島市内に設立した。一方、福島県は、南相馬市と三春町に環境の回復・創造に向けた統合的な取り組みを行う拠点として環境創造センターの設置を決定。2015年4月に原子力機構は福島県、国立環境研究所と環境創造センターにおける連携協力協定を締結。南相馬市の施設は2015年9月に完成し、連携協力協定にもとづいて、原子

力機構の福島環境安全センターが手がけてきた業務のうち遠隔放射線監視技術開発については南相馬市に機能を移転していた。

また、このほど福島県三春町の研究棟が完成したことから、福島環境安全センターの残る機能についても今年4月26日から、環境創造センターに移転した。三春町の研究棟では放射線計測技術開発や森林から河川水系に至る流域圏での放射性セシウムの環境中での移動状況の調査研究や、除染で発生した除去土壌等の減容化・再生利用に向けた技術開発に取り組む。

(資料提供：日本原子力研究開発機構)

原子力の技術・安全性向上における多様性とは？

原子力学会男女共同参画委員会は3月28日、東北大

学で開かれた春の大会で、「多様性がもたらす技術安全

性の向上」をテーマとする企画セッションを開催した。男女共同参画委員会では女性会員増に向けた各種の取組を進めてきたが、本会の女性比率は4.4%(2016年3月末)と依然少ない。「原子力や放射線の現場では意外に女性が多い。彼女らが学会に参画しないのはなぜか?」という疑問に対し、2015年秋の大会の企画セッションでは本会非会員の現場実務者を講師として招き、東北大震災発生直後の実体験に基づく重要な知見とともに学会に対する要望も聞くことができた。今回はさらに、技術や安全性の向上のためには、「協働」が重要ではないかとの問題意識のもと、研究者および技術者双方の立場から、東北大の吉田浩子氏と三菱重工業の千歳敬子氏に講演いただいた。

吉田氏は、福島第一事故被災地域での調査・測定をとおし地域住民と関わってこられた経験をもとに、今後も続く現存被ばく状況において専門家や学会が住民と協働していくことの重要性を説かれた。また千歳氏は、新規制基準のもとでのPRAによる安全性評価実施現場の状況について紹介され、プラントの継続的な安全性向上における、ツール整備や教育、評価精度向上などの課題を指摘された。二人がそれぞれ、被災地の現場で、プラント安全性評価の現場で、奮闘されてきた様子に感銘を受けると同時に、専門家と非専門家、技術者と研究者の「協働」の大切さを印象づけられた講演であった。

(原子力学会男女共同参画委員会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

IEA「エネルギー部門のCO₂排出量、経済成長と関係なく横ばい」

国際エネルギー機関(IEA)は3月16日、昨年1年間に世界で排出された温室効果ガスに関する報告書を公表し、人為的なCO₂排出源としては最大のエネルギー部門において、2年連続で排出量が横ばいであったことを明らかにした。同機関のF.ピロル事務局長は、「経済成長していても、それとは無関係に排出量の増加が止まったという前回調査時の歓迎すべき結果が裏付けられた」と評価。排出量に関する新たな枠組を採択した歴史的なパリCOP21から数か月しか経過していないことから、この事実は地球温暖化に対する取り組みの中で一層の推進力になるとの見通しを表明した。

報告書によると、2014年のCO₂排出量が321.3億トンと2013年実績から足踏み状態となったのに続き、2015年の排出量も暫定数値で321.4億トンと、ほぼ横ばいの結果になった。発電量の増加分の9割を占めた再生可能エネルギーが重要な役割を果たしており、風力による発電量だけで増加分の半分以上を占めたと説明。同時に、世界経済が3%以上成長し続けていたことから、「経済成長と排出量増加の関係性が弱くなっていることが改めて証明された」としている。

報告書はまた、IEAが過去40年以上にわたって世界のCO₂情報を収集してきたなかで、排出量が現状レベルに留まった、あるいは前年実績から低下したのは、今回を除けば1980年代初頭と1992年、および2009年の3

回のみだと指摘。これらの時期はいずれも、世界的な経済不況が影響していたが、近年の場合は経済が拡大する最中での結果であり、このことは国際通貨基金が示した世界のGDP成長率(2014年に3.4%増、2015年に3.1%増)からも確実だとした。

2015年の排出量が頭打ちとなった理由について報告書は、中国と米国という2大排出国の両方でエネルギー関連の排出量が低下したことを挙げた。中国ではエネルギー多消費産業からの脱却を図る経済構造改革と、政府による低炭素電源への移行努力が功を奏し、石炭の利用が2年連続で減少。これにともないCO₂排出量も1.5%低下した。米国でも発電用燃料が石炭から天然ガスに大きくシフトしたため、排出量は2%減となっている。ただし、これら2国による排出量の低下は、その他の多くのアジア諸国や中東諸国における排出量増と、欧州の排出量が穏やかな上昇を見せたことで相殺されたとの見方を示している。

【中国】

輸出用・第3世代設計の国際展開促進企業が正式発足

中国で原子力発電事業の実施資格を持つ中国核工業集团公司(CNNC)と中国広核集团有限公司(CGN)は3月17日、双方の第3世代原子炉設計を統合して開発した「華龍1号」の国際展開促進を目的とする合弁事業体「華龍国際核電技術有限公司(略称：華龍公司)」が正式に発足したと発表した。華龍1号は中国が知的財産権を保有

する第3世代の独自ブランド設計という位置付けで、福建省福清と広西省防城港の両サイトで実証炉が建設中であるほか、海外ではパキスタンで同設計を採用した建設工事を昨年から開始。アルゼンチンと英国でも、将来的に同設計の採用炉を建設することが決まっている。今度、国家戦略に従って原子炉を海外市場に一層大々的に売り込んでいくため、統一基準の下で同設計の技術統合をさらに進めるとともに、国内外で知的財産権と関連資産の共同管理を行うことになる。

CNNC が開発した第3世代の「ACP1000」と CGN の「ACPR1000 +」には設計上の類似点が多く、国家能源局 (NEA) は 2013 年初めに一本化を決定。2014 年 8 月に華龍 1 号としての全体設計を NEA と国家核安全局 (NNSA) が承認した。福島第一原子力発電所事故の教訓をフィードバックするとともに安全系には動的小および静的概念を組み合わせるなど、国際的に最も厳しい安全基準を満たすとしているが、両社それぞれのバージョンが存在すると言われている。華龍会社の設立は 2014 年 8 月に両社が結んだ技術統合合意に基づいており、2015 年 12 月に両社は登記資本金 5 億元 (約 90 億円) の合併事業体として折半出資する合意文書に調印した。それ以降、同公司を北京で商業登記する作業が完了したことから、今回正式な発足に至ったもの。董事長として CGN の鄒勇平氏、総経理には CNNC の徐鵬飛氏がそれぞれ就任した。

英社と中国企業が高温ガス炉開発で協力覚書

英国を本拠地とするエネルギー関連エンジニアリング企業の AMEC フォスターウィーラー社は 4 月 6 日、中国の原子炉建設会社である中国核工業建設集团公司 (CNEC) と高温ガス炉 (HTR) の共同開発に道を拓く協力覚書を締結したと発表した。英国その他の国における HTR 建設を念頭に、原子力発電の幅広い分野で協力していく考え。中国では主力の輸出用第3世代 PWR 設計である「華龍 1 号」のみならず、脱塩や熱電併給など多目的利用が可能で固有の安全性を有する第4世代の HTR も有力な輸出用設計と位置付けており、AMEC フォスターウィーラー社との協力を通じて、HTR 輸出の可能性を探ると見られている。

今回の覚書は、英国政府の対英投資促進部門である貿易投資総省 (UKTI) と中英貿易協会 (CBBC) による原子力産業貿易ミッションが北京を訪問したのを機に調印された。両社は今後、世界中で原子力発電所の設計、建設、運転、廃止措置プロジェクトに携わる機会を共同で模索。既存炉の定検時管理や運転、経年化管理、運転期間

延長、および改修の各分野についても、有益な専門的知見を特定するとした。また、人材育成、廃棄物管理、廃止措置も協力範囲に含まれるとしている。

【EU】

EC、2050 年までに EU 域内の原子力設備維持に必要な投資額を試算

欧州連合 (EU) の執行機関である欧州委員会 (EC) は 4 月 4 日、EU 域内における原子力発電所のライフサイクルの全ステップで必要となる投資額を試算した「原子力の説明プログラム (PINC)」を公表した。欧州原子力共同体条約の要件に基づいて、福島第一原子力発電所事故にともなう安全性改善と既存炉の安全な運転期間長期化への投資を中心に、同事故後初めて全体的な投資額を示したものの。域内のエネルギー供給保証と電源多様化に資する重要な低炭素電源として、原子力発電は 2050 年代まで EU のエネルギー・ミックスにおける重要要素であり続けると結論づける一方、2050 年以降に少なくとも 9,500 万 kW の原子力設備を維持するには 3,500 億～4,500 億ユーロ (約 44 兆円～56 兆 6,000 億円) が必要とした。これらに既存炉の運転期間長期化やバックエンド活動への投資を含めた原子力発電全体で必要な投資総額は、2015 年～2050 年までに 6,500 億～7,600 億ユーロ (約 81 兆 6,000 億～95 兆円) にのぼると指摘している。

EU 域内では現在、全加盟国の半数に当たる 14 か国で、129 基・約 1 億 2,000 万 kW の原子炉が 30 年近い平均年数で稼働中。これらの原子炉が電力供給保証上の役割を担っている関係から、EU のエネルギー同盟戦略および欧州エネルギー供給保証戦略に基づき、加盟国には安全性とセキュリティ、廃棄物管理および核不拡散などで最も厳しい基準を適用させている。また、EU は原子力を 2030 年までの温室効果ガス排出抑制目標達成の一助とする考えであるため、PINC には、EU がエネルギー関係目標を達成する上で原子力がどのような助けとなるかという議論に基盤を提供するという意図がある。原子力発電所での安全確保は EC の絶対的優先事項であることから、特に福島第一事故後の関連投資と既存炉の運転期間長期化にともなう投資を盛りこんだほか、域内の原子力産業でバックエンド関連活動が急増するなど、新たなフェーズに移行しつつあるため、関連投資について確かな情報に基づく議論が可能となるよう意図したもの。

【ロシア】

初の 120 万 kW 級、第 3 世代 PWR のノボロネジ 6 号機に運転認可

ロシアの原子力発電公社であるエネルゴアトム社は 3 月 23 日、同国初の 120 万 kW 級 PWR であるノボロネジ原子力発電所 6 号機に対し、連邦環境・技術・原子力規制庁(ROSTEKNADZOR)が運転認可を発給したと発表した。これにより、同炉では燃料装荷や臨界条件の達成、それに続く試運転に向けた準備作業が可能になった。ロシアで稼働する大型商業炉としては、昨年 9 月に営業運転開始が許されたロストフ 3 号機に次いで、31 基目になる。

ロシア中部に位置するノボロネジ発電所では、すでに閉鎖された 1~2 号機を除く 3、4 号機(各 40 万 kW 級 PWR)と 5 号機(100 万 kW 級 PWR)が運転中。2008 年に着工した同 6 号機はⅡ期工事 1 号機とも呼称され、第 3 世代の 120 万 kW 級ロシア型 PWR(VVER)シリーズ「AES - 2006」を採用した初号機という位置付けになる。運転認可発給に先立ち、同炉の準備状況などを点検した原子力規制庁は、安全システムのみならず緊急時の対策なども審査。最も厳しい安全要件を含めて、同炉が運転認可発給の条件すべてを満たしていると結論付けていた。

【ベラルーシ】

導入初号機の炉内構造物の組立がロシアで完了

ベラルーシ初の原子炉となるベラルーシ原子力発電所 1 号機用の炉内構造物の組立作業が、ロシア南部ボルゴドンスクにある AEM テクノロジー社で完了した。同社は、建設工事を請け負ったロスアトム社の傘下にある発電機器製造企業「アトムエネルゴマッシ社(AEM)」のボルゴドンスク支部で、2013 年に同発電所用の原子炉機器(総重量 4,000 トン)を受注。炉内構造物の組立完了は 3 月 14 日に発表したもので、今年後半にもフロドナ州オストロベツにある建設サイトに搬入するとした。炉内構造物は 300 ものパーツで構成されており、これを格納する原子炉容器については 2015 年 10 月に納入済み。2018 年の完成目指して同炉の建設工事は佳境に入っている。

ベラルーシは、ロシア政府から 100 億ドルの融資を受けて 120 万 kW のロシア型 PWR(VVER)設計シリーズ「AES - 2006」を 2 基、ターンキー契約で建設する契約を 2012 年にロシアと締結。2013 年 11 月に 1 号機の原

子炉系統部分で最初のコンクリート打設を行ったのに続き、2014 年 4 月には 2 号機の建設工事を開始していた。2 号機の完成は 2020 年になる予定である。

【ウクライナ】

WH 社、ウクライナの既存原子炉の出力増強プログラムに協力

東芝傘下のウェスチングハウス(WH)社は 3 月 14 日、ウクライナの原子力発電公社であるエネルゴアトム社が進める既存炉の出力増強プロジェクトに協力することになったと発表した。具体的には、エネルゴアトム社と協力関係にあるウクライナのタービン発電機設計製造業者「ターボアトム社」と協力していく了解覚書を締結したものの。3 社が力を合わせて、ウクライナで稼働する 13 基の 100 万 kW 級ロシア型 PWR(VVER)の出力を通常レベルの 110%まで、徐々に増強するとしている。

チェルノブイリ事故から 30 年が経過したウクライナでは、全 15 基の原子炉で総発電電力量の 50%近くを賄っており、エネルゴアトム社は内閣が承認した 2030 年までのエネルギー戦略に従い、経年化した原子炉の運転期間延長プログラムも推進中。同社によると、これら既存炉は同国のエネルギー供給システムにおける屋台骨であり、エネルギー自給の強化に資する素晴らしい性能と技術的可能性を備えているが、現時点では十分に活用できていない。今回の覚書は、そうした既存炉の発電能力をフル活用するという目標の不可欠の部分になると説明した。

【スウェーデン】

規制当局、使用済み燃料封入施設の立地・建設審査で肯定的評価

スウェーデン放射線安全庁(SSM)は 3 月 23 日、最終処分前の使用済み燃料を銅製キャニスターに封入する施設の立地・建設許可審査で、「事業者は安全性と放射線防護に関する要件をすべて満たし得る」と評価したことを明らかにした。スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB)が 2011 年に提出していた申請書について暫定的な評価結果を示したものの。この封入施設は最終処分場を建設する計画の一部であり、SKB は同時に最終処分場そのものについても立地・建設許可を申請。同処分場の立地と建設に関しては、SSM が 2015 年中に 2 回、安全性やサイト選定プロセスについて好意的な審査結果を暫定的に公表していた。封入施設に対する今回の評価によ

り、12,000 トンの使用済み燃料をエストハンマルのフォルスマルク原子力発電所隣接区域で、地下 500m の岩盤中に処分するという計画は、2020 年代初頭の着工と、その 10 年後の操業開始を目指してまた一歩前進したことになる。

スウェーデンでは現在、既存原子炉 10 基で発生した使用済み燃料約 6,000 トンをオスカーシャム原子力発電所の集中中間貯蔵施設 (CLAB) に湿式貯蔵している。すでに閉鎖済みの 2 基分も含め、既存炉が閉鎖されるまでに排出される使用済み燃料をすべて一時的に貯蔵するため、SKB は CLAB の容量を現在の 8,000 トンから 11,000 トンに拡張する施設と、キャニスターへの使用済み燃料封入施設を CLAB の隣接区域に建設する計画。これらを統合した施設全体を「CLINK」と呼称している。

【ドイツ】

地裁が福島第一事故直後の原子炉閉鎖指示にともなう賠償請求を棄却

ドイツのボン地方裁判所は 4 月 6 日、福島第一原子力発電所事故により閉鎖を余儀なくされた原子炉 2 基分の損害賠償を求めていた EnBW 社の請求を棄却する判断を下した。同社はネッカー原子力発電所 1 号機 (GKN1) とフィリップスブルク原子力発電所 1 号機 (KKP1) の閉鎖を命じた連邦政府と地元バーデン＝ビュルテンベルク州政府を相手取って、2 億 6,100 万ユーロ (約 325 億円) の支払を要求していたが、裁判所は棄却の理由として「原子炉の閉鎖とそれに伴う損害を回避するために利用可能だった法的措置を、EnBW 社が直ちに取らなかった」点を指摘している。

福島第一事故発生直後の 2011 年 3 月 16 日、A. メルケル首相は故障により長期停止中だった原子炉 1 基と、1980 年以前に運転開始した古い原子炉 7 基で安全レビューを行うため、3 か月間の暫定停止を命令。地元州政府の指示を受けて EnBW 社は同日と翌 17 日に GKN1 と KKP1 を停止したが、7 月になってもこれらの再稼働は認められず、そのまま閉鎖することが 8 月に決定した。これら 8 基のうち、同様に期限切れを待たずに

閉鎖されたピブリス A、B 原子力発電所については、事業者の RWE 社が直ちに地元ヘッセン州政府に損害賠償を求めて提訴しており、州の行政裁判所は 2013 年に州政府の停止命令は違法であると判断。控訴審でも最高裁が 2014 年 1 月、RWE 社の見解を支持する裁定を下していた。

【英国】

原子炉新設計画を進める 3 事業者が議会委員会で実行可能性を強調

英国で約 20 年ぶりとなる一連の原子炉新設計画を進める 3 事業者が 3 月 23 日、議会のエネルギー気候変動委員会でそれぞれのプロジェクトの進行状況や課題点を明示するとともに、これらが確実に実行可能であると証言した。この審問会は、手続が最も先行しているヒンクリーポイント C (HPC) 原子力発電所建設計画で事業者の EDF エナジー社が最終投資判断 (FID) を複数回、先送りしていることから、3 事業者の代表を召喚して開かれたもの。同社の V. デリバス CEO は、財政問題の解決に向けたフランス政府との協議が最終段階に来ているため、まもなく FID を下すと確約したほか、ムーアサイド計画を進めている NuGen 社の T. サムソン CEO も、2018 年までに FID を下した後、2020 年代半ばまでに 3 基の原子炉が完成するとの見通しを表明した。

現在、英国で具体的に進展している原子力発電所新設プロジェクトは、次の 3 計画。すなわち、(1)「EDF エナジー社の HPC 計画」：南西部のサマセット州で 160 万 kW 級の仏アレバ社製欧州加圧水型炉 (EPR) を 2 基、2025 年以降に完成、(2)「東芝が出資する NuGen 社のムーアサイド計画」：北西部の西カンブリア地方で 2024 年の初号機完成を目標に 3 基・360 万 kW 分のウェスチングハウス (WH) 社製 AP1000 を建設、(3)「日立製作所が出資するホライズン・ニュークリア社のウィルヴァ・ニューイッド計画」：中西部のウェールズ地方アングルシー島で 130 万 kW 級の日立 GE 社製 ABWR を 2~3 基、2020 年代前半に完成である。

低炭素電力システムにおける原子力と再生可能エネルギーの共生を考える

— 系統安定性、経済性及び自由化の観点から —

日米共同研究チーム 東京工業大学 尾本 彰, 東京大学 藤井 康正

日米両国で、市場メカニズムに価格設定と資源配分を委ねるとともに、低炭素電力システムへの移行を積極的に進める努力がなされている。これらの目標を効率的に達成するため、非化石電源であると同時に資本集約的でもある原子力と再生可能エネルギーを主要な電源として共生させていくことが想定される。しかし、それには発電システムと電力市場における技術的、制度的イノベーションが必要であり、本記事ではこのような課題を体系的に示し解決策を考察した日米共同研究チームの中間報告について解説する。

Key words: Deregulation environment nuclear renewables storage FIT CRM

I. はじめに

世界の電力市場における政策目標には、低廉で信頼性の高い電力供給の保証、温室効果ガス(GHG)排出削減等の環境目標の達成、供給に混乱が生じるリスクの低減等がある。これらの幅広い目標の達成に向け、2つの大きな変化、即ち、電力市場の自由化及び太陽光発電と風力発電を中心とする再生可能エネルギー・システム(RES)の大量導入が進行中である。これらの目標を効率的に達成するために、発電システムと市場の規制をどのように改善あるいは再設計したらよいかということである。とりわけ、低炭素電力システムへの移行のためには、資本集約的な原子力とRESの両方が、今後も重要な役割を担わなければならない。このような目標を達成するには、どのような技術上及び制度上のイノベーションが必要であろうか？

以下、第Ⅱ章では、日本において原子力とRESに関する将来のシナリオの幅を制限する可能性のある一連の制約要因を示す。第Ⅲ章では、現在の電力市場規制が直面している問題を概観する。第Ⅳ章では、特に原子力、太陽光及び風力等、将来の電力市場での非化石電源の十分な利用を促進するのに役立つであろう様々な新技術を紹介する。第Ⅴ章では、それまでのセクションにおける所

Compatibility of Nuclear and Renewables with Grid Stability, Economics and Deregulation : Akira Omoto, Yasumasa Fujii
(2016年3月31日受理)

見をまとめたうえで、日本が低炭素電力システムの実現に向けて取り得る進路について議論する。

Ⅱ. 日本における原子力と再生可能エネルギーの発展：制約及び影響

1) 自由化及びRESシェア拡大によって生じる技術的な問題

需給をバランスさせるために、適切な市場メカニズム(ルール)を設計する必要がある、また同時に、混乱が生じた時の系統安定性や供給安定性を確保し、さらにはGHG排出削減その他の環境目標を含む政策目標を達成しなければならない。発電出力全体の中で自然条件で出力が変動するRESのシェアが拡大することで、余剰電力の発生、送電線の過負荷、電力の質(電圧や周波数制御を含む)等の観点で、電力系統の運用上の課題が生じる。

2) 経済的制約

日本政府の発電コスト検証ワーキンググループが行った最新(2015年5月)の試算¹⁾によると、日本の電力の2030年時点の期間均等化発電原価(LCOE)は、原子力が最も低く、次が石炭火力で、そして概してLNG火力、太陽光、風力、石油火力の順であるが、長期的に見た場合、化石燃料、太陽光及び風力の価格変動には大きな不確実性が伴う。太陽光と陸上風力のLCOEは、大幅な低下が想定されている。ただLCOEは、電力供給の経済上の見通しに影響を与えるいくつかの要因の一つに過ぎな

い。その他の要因として、次のものがある。

- 全体的な電源ミックスの変化
- 太陽光発電や風力発電を補完するためのバックアップ電源や系統の蓄電能力に伴う追加コスト
- 太陽光及び風力の FIT(固定価格買取制度)に関連して増えるコスト負担
- 大規模に再生可能エネルギーが利用された場合の影響(その一つの可能性は価格暴落²⁾で、これは欧州や米国の一部で既に起こりつつある現象)

大量の太陽光発電設備が追加されると、太陽光発電の出力が高い時に、供給が需要を上回る事態が起こり得て、個々の太陽光設備所有者の収入は減少することになる。多くの風力発電設備が導入された場合も、同じ現象が起こる可能性が高い。RESの容量増加によって電力の平均市場価格が大きく変化することはないかもしれないが、価格変動は大幅に大きくなる可能性が高い。電力市場の価格暴落のリスクを減らすことが可能な技術的な解決策はいくつかある。例えば、低価格の電力を購入して運用する揚水式発電所や蓄電池等に電力を貯めておき、価格が上昇した時にそれを売却することなどである。そのほか、供給が需要を上回った場合にRES設備を止めるという解決法(出力抑制)もある。しかし、根本的な問題は、世界の多くの地域において、あまりにも急速にRESが広がっているため、太陽光と風力の発電量が必要とされる規模に達した時に、余剰電力を無駄なく利用するための費用対効果比の高い対応手段を開発する時間が足りないことである。

3) 気候変動問題

日本政府は、2030年までに温室効果ガスの排出量を2013年の水準に比べて26%削減すると発表した。これは、「安定供給(Energy Security)」、「経済効率性(Economic Efficiency)」、「環境(Environment)」、「安全性(Safety)」という「3E+S」の目標を同時に達成するための進路を示し、化石燃料への依存を減らすことを求めている。原子力発電が次第に低減していく場合、この目標達成の見通しは、慎重な分析を必要とする。

4) 社会

日本が低炭素電力システムへ移行しようとする時、2つの大きな社会的問題に直面する。国民が原子力に対して不信感を持っていることと低炭素社会の経済的負担に対する受忍には限度があるだろうという問題である。より強力なリスク・ガバナンスを設定するため、業界と規制当局が行動を起こしているが、事故の影響による原子力への信頼の喪失によって、世論はこれまで、RESの拡大、さらなる省エネルギー及び原子力の低減に賛成する方向へシフトしている。米国の一部で、又はその他のいくつかの国で、再生可能エネルギーのための補助金の負

担が増加したため、補助金の規模を縮小する決定がなされている。補助金による電気料金のさらなる上昇を、日本の産業部門と家庭部門の消費者がどの程度受忍できるか明確でない。

5) エネルギー安全保障

歴史的に日本の電力供給は、化石燃料価格の変動に対して脆弱である。これは、日本が原子力エネルギーへの依存度を高める動機となった。2030年に、原子力のシェアが20~22%、再生可能エネルギーのシェアが22~24%(日本政府の長期エネルギー需給見通しの予測値、2015年7月)となった場合、日本のエネルギー自給率は現在の水準である6%から約25%へ改善される。これは、福島事故前の水準である20%を超えるものである。原子力がなければ、自給率は約15%となる。RESによるエネルギー安全保障の向上は、部分的には、RESによる発電量が低レベルにとどまった時にバックアップとして利用される電源が何であるかに依存する。米国や欧州の場合と同様、バックアップが火力発電で提供されるとすれば、その分、RESによるエネルギー安全保障上のメリットは低下する。

6) 原子力発電所の運転延長に対する自由化の影響

原子力発電所は資本集約的であるが、燃料費と運転及びメンテナンスに伴う変動費が低いため、原子炉の寿命を延ばすことで、非常に低価格の電力を供給できる。日本の法律は原子力発電所の寿命を40年に設定しているが、規制上の要件を満たすことを条件に、延長の余地を残している。米国では、運転中の原子炉の約80%が運転を60年まで延長できる認可を規制当局から受け、現在、規制当局は、ライセンスを80年まで延長可能な道筋を決定している。寿命を延長する動きは、他の多くの国でも見られる。電力市場の自由化は、RESのシェア拡大と相まって、原子力発電所の寿命に影響を与える可能性がある。卸売市場で競争が激化しており、運転寿命を延長するために必要な投資負担が大きく、市場での経済メリットを上回る状況下では、一部の経年化した発電所の閉鎖を早めざるを得なくなるかもしれない。RESの拡大がもたらした電力の低価格またはマイナス価格と、RESに対する補助金の影響により、最近では、米国の経年化した原子力発電所のいくつかが早期閉鎖を余儀なくされている。

7) 原子力発電所の新規建設に対する自由化の影響

自由化された電力市場では、市場の不確実性が大きくなっているため、資本集約的な発電技術を用いた発電所の建設は困難となっている。米国では、自由化された州

の中で原子力発電所の新設が行われている州はない。欧州では、原子力発電所の新設は他のインセンティブがある国でのみ見られる。原子力発電所新設の経済上及び財務上のリスク低減のために提案されている施策例は：

- ・ 全ての非化石電源 (RES だけではない) に対して FIT または同等の制度を設ける。
- ・ 確実に、かつ指令に応じた供給ができる発電設備に対して対価付きの容量市場を用意する。
- ・ 長期の電力売買協定を結ぶ。
- ・ 全ての非化石電力に電源構成シェア目標を設ける (ポートフォリオ・スタンダード)。
- ・ 需要の伸びに合わせた発電容量の拡大が可能な小型モジュール炉を用いる。

Ⅲ. 自由化市場の問題と規制上の選択肢

1) 自由化の目標と市場の限界

自由化の目的は、発電事業者と消費者との間の適正なリスク配分に基づき、電力システムの運用、拡大、計画における効率を向上させることである。競争市場の創設の背景にある考え方は、正しい選択をすればその利益を享受でき、失敗すればその損失を負担する事業者に投資と運転の意思決定を任せようというものである。意思決定 (特に長期計画) を市場に任せる場合、これまでの米国や欧州での実績を見る限り、意思決定が本質的に近視眼的なものになるという限界がある。規制の追加的介入がなければ、市場は、短期的・中期的にエネルギー供給コストを最小限に抑えることだけを目指し、GHG 排出の削減あるいは RES の導入等、その他の優先されるべき目標は軽視されるであろう。自由化に向けた市場ルールを作ることは多くの課題が伴い、米国や欧州では、規制当局が、良好な事例・そうでない事例を学ぶ都度、市場ルールを改正する事態に陥っている。

2) エネルギー安全保障と持続可能性のための市場誘導手段

エネルギー安全保障と持続可能性という目標は、少なくとも競争力と同程度に優先度の高い事項である。このため、ある種の長期ビジョンのある市場を作り上げることが必要となる。基本的な経済原則によると、このような規制上のサポートを設計する最も直接的な方法は、いわゆる「市場誘導」手段を用いることである。炭素税や排出枠の割当等が例である。しかし、残念ながら、これらのメカニズムは、事業者の長期的視点の欠如に関する問題に十分に対処するものではない。技術支援政策は、支援を必要とする全てのタイプの技術 (例えば、風力、太陽光、CO₂回収・貯留) の導入促進に利用することができる。最近まで、そのような技術導入を支援する最も一般的な手法は、FIT の実施を通じたものであった。規制当局は、(投資に対して満足できる利益率を保証すること

で) RES による一定量の発電を実現するために必要と考えられる料金制度を定め、市場の自由度を容認する。ただ FIT は、世界中で新制度に置き換えられたり、あるいは少なくとも再設計されたりしている。RES は、卸売市場のリスクと競争圧力から隔離されるべきであるという考え方は、この特別扱いが非効率をもたらすという理由で次第に姿を消しつつある。

3) 不確実性と CRM の下で困難な投資環境

電気事業は国家経済の土台であるため、常に一定程度政治的統制の下にあった。その結果、事業者は起こり得る規制上の変化というリスク、即ち通常「規制リスク」と呼ばれる要因にも対応しなければならないため、他の全ての市場において一般的に見られる水準 (例えば、価格ボラティリティ、競合他社の戦略に関する不確実性等) を超える投資上の不確実性が大きい。さらに、2つ目の心配事もある。需要側 (顧客側) は、少なくとも現在では、理由はどうあれ電力不足のリスクについて「心配無用な」状態にある。これは一般的に、政府がそのような状況 (もちろん電力価格が高騰するような事態についても同様) に陥らないよう対策を取るはずだとの前提に基づいている。このようなリスクの認識上のギャップのために、米国等における自由化環境下の電力会社は、高資本コスト・低運転コストの発電技術に十分な投資を行わない傾向がみられ、結果として供給保障に不安が生じている。規制当局は戦略目標を追求するために市場規則を変更する可能性があるが、そのような当局の介入は、もう一つの制御不能なリスクを生む。発電所の閉鎖を回避し、供給安定性を確保するため、多くの国では、容量確保メカニズム (CRM) を導入しつつある。これは、火力や原子力等の電源に対して、電力システムシステムの信頼性向上に貢献した場合に、報酬を与えるシステムである。いくつかの国々が CRM を導入済みか、導入中である。目標は、自由化環境下にある電力システムの適切な設備容量を確保するために、短期的電力市場が出す価格シグナルを補強して、投資を呼び込み、金融ヘッジを追加することにある。主な課題は、この制度の効果と経済効率性を最大にするためのメカニズムを設計する最も適切な方法を見出すことである。

Ⅳ. 科学技術：電力生産と需要のバランス

原子力、風力、太陽光は、資本コストが高く、操業コストが安い。すなわち、このような技術を部分負荷で運用することは、たいへん高くつく。需要が常に充足され、同時にこれらの発電プラントがフル稼働することでコストを最小限に抑えることができるよう、新しい技術により、原子力と RES を低炭素電力システムへ合理的に統合することが求められる。

A) 需要のシフト：電力価格が安い時間帯で利用する

ように、一部の産業施設の操業スケジュールを変更すると同時に、一般家庭顧客にリアルタイムの価格情報を送るなどの方法を用いれば、効果の大きさには不確実性があるが、秒単位から時間単位の間隔で電力需要のシフトが可能である。電気自動車のバッテリーを電力系統から(夜間に)充電するなど、新しい応用によって掘り起こされた「新しい」需要は、制御可能な需要として、需給調整機能の増強に資する。

B)蓄電：低価格の時間帯の電力(仕事量)は、価格高騰時に電力を供給するために貯めておくことができる(揚水システム、バッテリーなど)。このような技術は、何時間分かの電力を貯めることができるが、何週間分、あるいは一定の季節を賄うほどの量を貯めるというわけにはいかない。蓄電には費用がかかる。従って蓄電容量には限界がある。

C)ハイブリッド・システム：ハイブリッド・システムは、フル稼働で運転している原子力または太陽熱発電のプラントからの熱出力を利用して、電力に加えて、エネルギー集約的な副産物を適当な割合で生産するシステムである。(ただし、日本国内の日照条件では、太陽熱発電の実用性は低いと考えられる。)電力価格が安く、需要が少ない時に、電力の生産を減らして、副産物を生産するシステムである。長期の見通しでは、水素が主な電気以外の副産物になるであろう。なぜなら(1)既存の工業マーケットがある(金属生産、化学、精錬など)、(2)必要な時まで貯蔵しておくことができる、(3)潜在的に輸送やピーク時の電力生産に利用できるからである。

さらに、経済的な低炭素の原子力・再生可能エネルギーを系統へ統合するいくつかの新しい種類の技術が開発段階にある。

D)電気を蓄熱に転換：風力発電と太陽光発電の大規模配備により、電力供給が需要を上回る期間が生じることになる。このような期間、余剰電力は、電気抵抗での発熱を通して高温熱に転換し、蓄えることができる。余剰電力と蓄熱の合計コストが、工業熱用に利用されると仮定した場合の化石燃料価格を下回る水準まで下がったとすると、そのような高温熱は、経済的に競争力のある熱源となる。低コストの蓄熱技術の事例のひとつ(kWh当たり5ドル以下、バッテリーの10分の1以下)は、耐火煉瓦抵抗加熱式エネルギー貯蔵(FIRES)である。FIRESベースのシステムの場合、電力価格が競合する化石燃料価格より低くなった時に、電力を使って煉瓦を高温に熱する。工業用の炉や窯で化石燃料を利用して、その一部を補うために熱風を供給する必要がある場合に、熱した煉瓦を通して空気を吹き込む。FIRESは実質的に、電力価格の暴落を防ぎ、その最低水準を化石燃料と等価の(またはそれより少し低い)価格に引き留める効果がある。風力または太陽光の出力が大きい時の余剰電力を工業部門に送り、化石燃料の利用の一部を補い、それ

によってGHGの排出を削減することができる。

E)時期をずらした電力生産のための熱貯蔵:原子力と太陽熱システムは、作り出した熱を直接電力に転換するか、あるいは一旦貯めておき、あとで電力に転換するか、いずれかの方法をとる。電力価格が低い時、熱は貯蔵装置に送られる。電力価格が高い時、貯められていた熱を利用して蒸気タービンで発電することを想定している。

F)原子力へのトッピングサイクルの追加³⁾:これは、改良型原子炉と発電サイクル技術との組み合わせによるもので、トッピングサイクルとしてのガスタービンの付いたベースロード原子炉を2つのモードで稼働させる。すなわち、(1)原子力の熱によるベースロードと(2)天然ガス(短期的)、蓄熱、バイオ燃料及び/又は水素を用いた追加的なピーク電力の生産という2つのモードである。トッピングサイクルの追加によって増加する熱変換効率は、天然ガスプラントその他の技術の単独利用よりも高められると考えられ、潜在的に、追加熱をピーク電力に転換する最も効率の良い方法である。軽水炉は稼働温度が低いためトッピングサイクルの追加には適しないが、フッ化物塩冷却高温炉など、様々な高温原子炉への追加が想定される。

これら6カテゴリーは、それぞれを応用する際、互いに排他的なものではない。個々の技術の役割は、次のことに依存している。すなわち、(1)それぞれのケースにおける技術進歩のベース、(2)原子力、風力、太陽光の発電容量の相対的な大きさ、(3)時間と共に変化する需要動向である。エネルギーを1時間蓄えるのに望ましい技術と、エネルギーを1日または1か月蓄えるのに望ましい技術は異なる。最後に、原子炉は熱を生産し電力に転換するが、これに対して、風力と太陽電池は、直接電力を生産する。これは重要な違いである。最も低コストのエネルギー貯蔵技術は、電気よりも熱を貯めることである。その理由は、電気と熱の本質的な物理的違いにある。このような違いにより、原子力がRESの大規模な利用を可能にする技術となる。なぜなら、原子力は、低コストの蓄熱を通じて、(RESと異なり)制御可能な電気出力を提供することができ、それによって、需要と供給を一致させるための原子力+風力+太陽光という組み合わせのシステムが可能になるからである。

V. まとめと今後の道筋

1)日本では、電力システムにおける2つの変化、即ち、電力市場の自由化及び自然条件次第で出力が変動するRESの大量導入が進行中である。これは、(消費者であると)同時に発電事業者でもある多くの需要家を巻き込んだ、より分散型の電力系統への変化を意味する。世界的に、電力市場の自由化には既に多くの経験が積み重ねられているが、RESのシェアを大きく高めた場合の市場への影響に関する経験はそれほど多くない。

2) 電力市場の自由化と自然条件次第で出力が変動する RES の導入の組み合わせは、技術的にも経済的にも、課題を生む。電力会社のアンバンドルによって、もはや中央集権的に計画できないシステムが生まれる。電力システムの中に自然条件で出力が変動する RES のシェアが拡大することは、余剰電力の発生、送電線の過負荷、配電される電気の質の観点で系統運用の安定性に影響を与えるため、系統に追加的な対策が必要になる。

3) 低炭素電力システムへのシフトが進むと、電力市場に大きな変化が生じる。例えば、RES のシェア増大で FIT の負担が増えたり、電力市場の価格暴落が生じたりする可能性がある。そのような時に、余剰の安い電力を生産的に利用する技術を開発する必要があるが、そのペースは、RES の急速な増加に追いついていない。

4) 市場メカニズムにのみ依拠することは、近視眼的な意思決定につながる恐れがある。長期的な持続可能性と安全保障のための政策が必要である。その中には、FIT 制度の修正、容量市場、長期電力売買契約、原子力と RES の両方を含めた非化石電源のシェアに適用される電源構成シェア目標設定等の選択肢が含まれる。これら全てのメカニズムによって、高資本コストで低運転コストの原子力発電所と RES を建設する場合の財務リスクを低減できる。

5) RES をリスクと卸売市場での競争圧力から隔離すべきという考え方は、不効率をもたらすという理由で、世界的にも次第に姿を消しつつある。

6) 低炭素エネルギーシステムの開発は、電力系統や多くの産業の構造を変化させることになる。そのような経済の中で、原子力、風力、太陽光が主な電源になっていく。低炭素電力システムへの移行には、新しい技術と新しい政策が必要になる。資本集約的な低運転コストの原子力、風力、太陽光のプラントがフル稼働することで、コストを最小限に抑えることができるよう、採算の良い形で原子力と RES を低炭素電力システムに統合するための新技術が必要になる。原子力発電所には、原子炉自体は定格熱出力で経済的に稼働しながらも、系統ピーク時に RES による変動電力の供給を可能にする新しい技術が必要である。そのような技術は、原子力の経済性を高め、同時に RES の大規模な利用を可能にする。ハイブリッド運転(例えば、電力需要が少ない時に水素を生産する)、原子炉と蓄熱装置の連結、原子力発電へのトップングサイクルの追加などの選択肢の研究開発のためには、インセンティブが必要である。

7) 意思決定を行う立場の者には、次のことが求められる。a) 電力市場自由化と RES 導入を同時に行うことに伴う課題を理解し、持続可能性とエネルギー安全保障の目標に向けて慎重にシステムを設計する。b) 低炭素電力システムの中で発電された余剰電力を無駄なく利用で

きる方法を見つける。c) 主に RES と原子力からなる低炭素電力システムを設計する際、どのようなイノベーションが最も重要であるかを検討する。原子力と RES を共存する形で導入することで、低廉で信頼性の高い電力サービスを提供する低炭素電力システムの基幹を作り上げることができる。このような潜在能力を引き出すには、技術面と制度面の両方でのイノベーションが必要になる。

本記事は、

MIT (<https://ipc.mit.edu/research/energy>),

東大(<http://www.esl.t.u-tokyo.ac.jp/reports.html>)

に掲載の日米共同研究チームによる論文の梗概を尾本・藤井の2人が代表して紹介するものである。

— 参考資料 —

- 1) 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告(案), 総合資源エネルギー調査会, 2015
- 2) The Future of Solar Energy, MIT, 2015
- 3) Electricity Production using Nuclear Reactors with Topping Cycles to Compete with Low-Price Natural Gas and Subsidized Renewables, C. Forsberg, icapp2016

著者紹介



尾本彰 (おもと・あきら)

(東京工業大学 特任教授)

(専門分野/関心分野) リスク評価と管理,
原子力政策



藤井康正 (ふじい・やすまさ)

(東京大学 教授)

(専門分野/関心分野) エネルギーシステム
工学, 技術評価

日米共同研究チーム(アルファベット順)

(米国)

FORSBERG, Charles W. (マサチューセッツ工科大学 教授)

HARATYK, Geoffrey (マサチューセッツ工科大学 博士課程)

LESTER, Richard (マサチューセッツ工科大学 教授)

BATLLE LOPEZ, Carlos (マサチューセッツ工科大学 客員教授)

(日本)

藤井 康正(東京大学 教授)

小宮山 涼一(東京大学 准教授)

栗原 郁夫(電力中央研究所 首席研究員)

尾本 彰(東京工業大学 特任教授)

村上 朋子(日本エネルギー経済研究所 グループマネージャー)

谷口 富裕(東京工業大学 特任教授)

転機を迎えるエネルギー市場

(その4)原油価格の変動とその構造的要因

東京大学 小宮山 涼一

原油価格はこれまで大きく変動しており、世界経済や国際エネルギー市場に大きな影響を与えてきた。原油価格の変動をもたらす構造的要因として、石油の需給バランス(需給のひっ迫と緩和)、地政学的要因の作用や石油先物市場への投機資金流入等が挙げられる。今後の原油価格を展望すると、既存油田の自然減退分を補完して現行の生産水準を長期的に維持する場合、より高コストな石油生産が徐々に大きな役割を担うため、価格は徐々に上昇すると見られている。また長期的に、世界の石油供給における中東依存度が高まり、中東の地政学的リスクが原油価格に与える影響が増加すると考えられる。

KEYWORDS: *crude oil price, volatility, boom-and-bust cycle, geopolitical risk, OPEC, Non-OPEC, oil demand, call on OPEC, shale oil, oil price outlook*

I. はじめに

1970年代以降、原油価格は大幅な変動を経てきた。第一次石油危機(1973年)、第二次石油危機(1979年)での価格高騰、1986年の価格暴落(逆オイルショック)、湾岸危機時の価格上昇(1990年)、アジア通貨危機に端を発した価格下落(1998年)、2000年代初頭からの中国の経済成長、石油需要増大等に伴う価格高騰、米国金融危機(リーマンショック)での価格暴落(2008年)、それ以降の中東情勢不安定化による価格高騰と最近の供給過剰による価格暴落である(図1)。2008年7月にはWTI原油(WTIはウエスト・テキサス・インターミディエートの略で、テキサスで産出される軽質低硫黄原油であり、北米での指標となる原油)の価格は瞬間値で147ドル/バレルまで高騰し、さらに2011年から約3年半の間に100ドル/バレル以上で推移した原油価格が、2014年後半から急落している(図2)。2015年末には、国際的な指標原油が軒並み30ドル台まで下落し、半年間で5割以上も急落し、大きなボラティリティ(変動)を経験した。この価格変動の構造的要因として基本的に、需給バランス(需給のひっ迫、緩和)が第一に挙げられる。これに加えて、地政学的要因(中東情勢の不安定化等)や石油先物市

場への投機資金流入といった金融的要因等が原油価格の変動に作用したと見られている。また、金利や為替も原油価格に影響を与えているとの報告もある¹⁾。

これまで70年代の石油危機による原油価格の高騰を受け、国際的に省エネや代替エネルギー開発(原子力・ガス・石炭など)が急速に進み、世界の一次エネルギー消費に占める石油の比率は1973年の46.2%から2014年には32.6%まで低下した。しかし依然として石油は一次エネルギー消費に占める比率が最も大きく、特に運輸部門や石油化学産業を中心に、社会経済活動を支える上で重要な燃料として位置づけられている。このため、原油価格の動向が、社会経済やエネルギー市場に及ぼす影響は依然として大きい。

本稿ではこれまでの原油価格の変遷や、最近の国際石

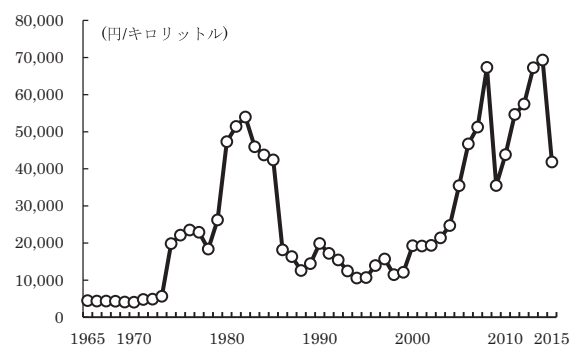


図1 日本の原油輸入CIF価格の推移(出所:日本エネルギー経済研究所, エネルギー・経済統計要覧, 2015年)

Turning point in energy market - (No. 4) Crude oil price movement and its background: Ryoichi Komiyama.

(2016年4月12日受理)

【前回のタイトル】(その3)電力自由化の国際動向

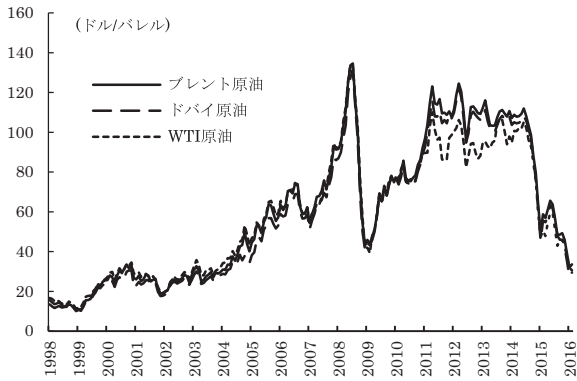


図2 国際指標原油価格の推移(出所:日本エネルギー経済研究所, エネルギートレンド, 2016年)

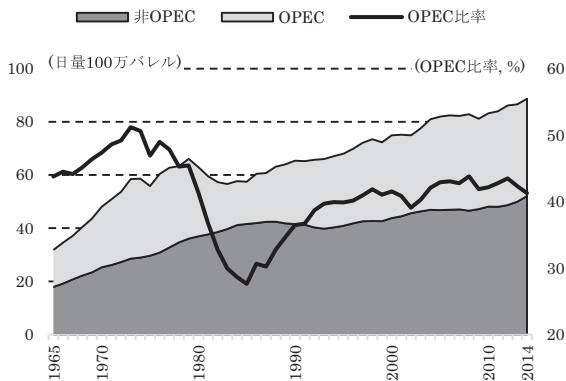


図3 世界の原油生産量とOPEC生産比率の推移(出所:BP, Statistical Review of World Energy 2015, 2015年)

油市場の環境を踏まえ、今後の原油価格の動向について展望する。

II. 原油の市場構造

持続的な社会経済の発展のためには、エネルギーは不可欠な資源である。この中でも石油は、世界の一次エネルギー消費で最大の比率にあること、原油価格が他のエネルギー源の価格や取引に影響すること、さらに、原油価格が国際経済や国際政治の動向にも影響することから、社会経済への影響力が最も大きい。

原油価格はさまざまな要因の複合作用により変動を繰り返してきたが、最も重要な構造的要因は需給のファンダメンタルズ(石油の需要と供給のバランス)である。これまで、石油需要の伸びに対して供給の伸びが不足気味になれば価格は高騰し、需要の伸びに対して供給の伸びが余剰気味になれば価格は下落する傾向にある。

また国際石油市場の構造を見るとこれまで、OPEC(石油輸出国機構:サウジアラビア等の中東湾岸産油国を中心とした石油カルテル)が、加盟各国の生産政策をコントロールすることで、国際市場での一定の影響力を保持してきた。すなわち、石油需要の伸びから非OPEC(米国、北海地域等)での石油生産量の伸び(とOPEC産油国のNGL等)を差し引いた量が、OPECの必要増産量

となるが(“Call on OPEC”と呼ばれる)、OPECがこの必要増産量に対して十分な生産を実施せず、減産した場合には、原油価格の下落を防ぎ、価格を下支えする方向に作用する。また、石油需要の大幅な増加や、非OPEC地域での石油生産量の停滞を受けて、OPECの必要増産量が大きく拡大すれば、OPECの供給余力がひっ迫して市場の脆弱性が高まることにより、原油価格は高騰する傾向にあった。2000年代初頭から米国金融危機までの間、中国の石油需要が大きく増加したにもかかわらず、非OPECの生産量がその需要増加テンポに追いつかずそれほど増加しなかったため、その結果、世界最大の産油国であるサウジアラビアの余剰生産能力が枯渇し、原油価格は継続的に上昇したのである。

これまでのOPECの市場支配力を世界の原油生産量に占めるOPECの生産比率でみると、1965年から第一次石油危機(1973年)まで、OPECの原油生産量は非OPECの増産テンポを上回っていたことから、OPEC生産比率も増加し、1973年には5割に達した(図3)。しかし、79年の第二次石油危機により原油価格がさらに高騰した結果、省エネ、代替エネルギー開発がすすみ、また、石油需要の伸びが鈍化し、さらに、価格高騰で採算性が改善した非OPEC地域の生産量が増加した結果、OPEC生産比率は80年代半ばには3割以下にまで激減した。86年以降は、原油価格低迷や世界経済の回復で石油需要の増加が持ち直したこと、91年のソ連崩壊で旧ソ連の原油生産が大きく減少したこと、北海地域やアラスカなどの伝統的な原油生産が成熟期に入り増産テンポが緩やかになったことから、OPEC生産比率は4割まで回復して今日まで至っている。近年においても、原油価格の急落や、OPEC加盟国の石油収入増大の必要性が一層増していること等の情勢を踏まえ、OPECによる需給調整機能は、国際的な原油価格形成への作用という面で、依然として注視されていると言える。

III. 原油価格の変遷

本節では1970年代の2度の石油危機から、最近の原油価格急落までの変遷について概観する。

(1) 1970~80年代の原油価格の変遷

70年代の石油危機から80年代まで、国際石油市場は原油価格の急騰と急落が発生したという意味で、「ブーム&バストサイクル」をはじめて経験した。

70年代から80年代初頭にかけて、2度にわたり原油価格が高騰し、その後、86年に急落した。この際の原油価格高騰は中東情勢の不安定化に伴い発生している。この中東情勢を不安定化した歴史的な背景として挙げられる要因の一つは、イスラエル建国が1948年に宣言され、アラブ諸国がこれに反発して、それらの中で第一次中東戦争が勃発し、それ以降の中東地域の脆弱性を大きく高め

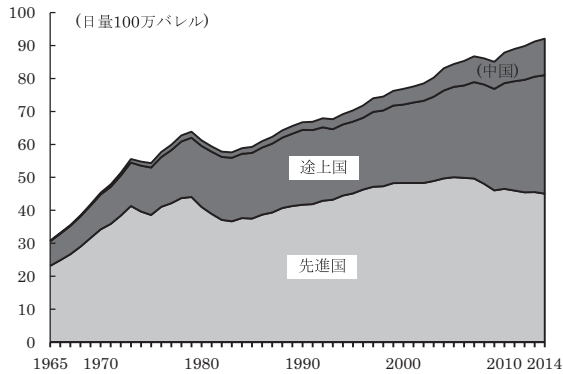


図4 世界の石油需要の推移(出所:BP, Statistical Review of World Energy 2015, 2015年)



図6 非OPECの原油生産量増減の推移(出所:International Energy Agency(IEA), Oil Market Report, 2016年3月)

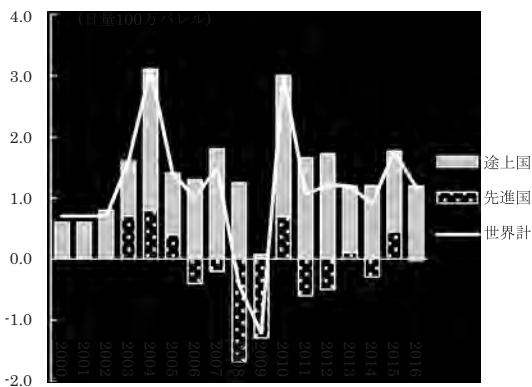


図5 世界の石油需要増減の推移(出所:International Energy Agency(IEA), Oil Market Report, 2016年3月)

た点にある。その後、第一次石油危機は73年の第四次中東戦争とアラブ禁輸によって引き起こされ、第二次石油危機は79年のイラン革命とイラン・イラク戦争の勃発により発生している。

この2度の石油危機では、中東産原油の供給障害と共に、消費国での不安感によるパニック買いに伴う需要増が発生し、需給バランスの不均衡をもたらし、原油価格が高騰した。しかしこの原油価格高騰は、次の循環的影響として、世界的な経済低迷や、省エネ促進、代替エネルギー開発の促進を招いた結果、石油需要の伸びが大きく停滞し、1986年に原油価格が暴落した(逆オイルショック)。まだ非OPEC地域での石油の供給を見ると、原油価格の高騰によって、石油事業の採算性が改善し、相対的に開発コストの高い同地域の石油開発の拡大を促した。特に、70年代は中東産油国を中心に石油資源の国有化が行われたため、国際石油会社(メジャー)は、地政学的リスクの小さい北米、北海地域へ石油開発投資をシフトした。その結果、非OPEC地域の原油生産量は75年から85年の10年間に4割も増加し、86年の原油価格暴落に大きく作用した。

(2) 1990年代～米国金融危機までの原油価格の変遷

イラクのクウェート侵攻による湾岸戦争の影響により、ドバイ原油(アジア向けの指標原油)の価格は90年7

月から90年10月にかけて2倍へ高騰したものの、OPECによる協調的増産や消費国の慎重な対策により、価格高騰はすぐに収束した。その後、1998年には、前年のアジア通貨危機によるアジア新興国の需要減退の影響により、原油価格は軟化し下落した。この価格下落は、危機感を抱いたOPECに減産を通じた生産規律を回復させる契機となり(加盟各国が生産枠に基づき増産を抑制)、これに非OPECの中心であるロシアの供給引き締めも加わり、原油価格に上昇圧力が作用した。それ以降、原油価格は米国金融危機での下落にいたるまで、継続的な高騰局面を迎え、国際的な指標原油であるWTI原油の価格は2008年1月にはついに一時100ドル/バレルを超えるに至り、2008年7月には瞬間値で147ドル/バレルまで高騰した。高騰の主な要因として、中国など新興国の石油需要の増加、OPECの供給余力の縮小、産油国の資源ナショナリズムの台頭や、中東やアフリカ産油国での地政学的リスクの増大などが挙げられる。加えて、投機的要因(金融面での過剰流動性の下での投機的資金の石油先物市場への流入)が、価格の変動を促したと考えられている。この間の原油価格高騰は連動的に、天然ガス、石炭、ウランなどの燃料価格の高騰も促した。その後、米国金融危機(リーマンショック)により、2008年後半に原油価格が急落した。

この間の価格高騰の要因の中でも、影響度合いの大きな要因は、世界の石油需要の増大にあると言える(図4、図5)。2000年代初頭に入り、その傾向は著しく、2004年の世界の石油需要は前年比で日量約300万バレル(約3%)も増加した。需要増大の中心は中国であり、中国の需要増分は日量約70万バレルに達し、一カ国で世界の需要増の2割を占めた。世界の需要増加に対して、中東産油国を中心に大幅な増産圧力が作用したため、OPECの供給余力が低下して市場のリスクに対する脆弱性が増大し、価格高騰に拍車をかけた。

原油価格高騰に影響を与えた要因に関して多くの分析が見受けられるが²⁻⁵⁾、原油価格が歴史的な高価格水準で推移した2007年から2008年の原油価格に関する分析

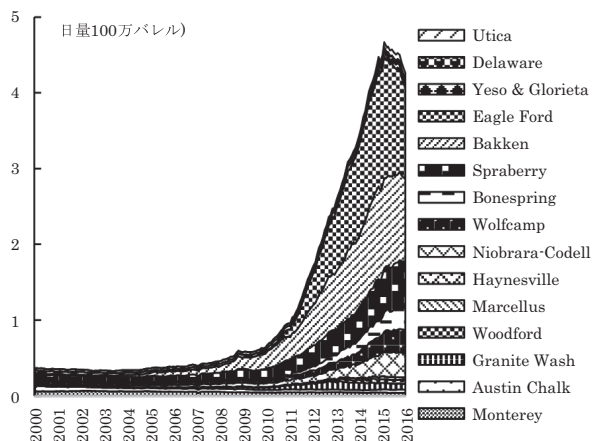


図7 米国のシェールオイル (tight oil) 生産量の推移 (出所: U.S. Energy Information Administration, Shale in the United States)

によれば、90~100ドル/バレルに達した原油価格のうち、需給バランスを要因とした価格は50~60ドル/バレル、上乗せされたプレミアムは40ドル/バレル程度と推計されている⁶⁾。この結果は、高騰した原油価格が需給バランスから決定される均衡価格から大きく乖離していることが示唆されている。

(3) 最近の原油価格の動向

米国金融危機をうけて、2008年後半に原油価格は急落したが、再度、2011年から3年間、100ドル/バレルを超える高水準が継続した。米国金融危機後、需給緩和により価格下落圧力が作用したが、中東産油国の社会情勢により価格の高騰が続いたのである。中東の大部分の産油国経済は石油輸出収入に依存しているが、2011年以降の同地域での「アラブの春」による社会情勢の不安定化を踏まえ、国民の支持を獲得して政情を安定化するため産油国が給付金を増やしたため、さらに財政支出が増大した。これを充当するための石油収入確保のために高価格の維持が求められ、中東産油国が減産等を通じて産油量を調整すると見られていた。

しかしその後、2014年後半から国際的に原油価格は下落した。この要因は、需給の緩和にある。とくに、2011年から3年間にわたる価格高騰が、価格下落を招いた重要な要因として考えられる。原油価格高騰は石油需要を抑制し、石油生産拡大に向けた方向に作用するためである。価格が急落した2014年は、欧州や新興国経済の低迷を受けて、世界の石油需要が過去5年間で最低の伸び率になった(図5)。一方、2014年は世界の需要の伸びをはるかに上回る非OPEC地域での生産増加(前年比日量240万バレル増、需要の伸びの3倍)があった(図6)。この大増産は米国のシェールオイル増産によりもたらされた(図7)。他方、OPECは価格低迷の中でも減産せず、生産を維持したため、国際石油需給は大幅に軟化したのである。

IV. シェールオイル

アメリカの産油量は現在、世界第2位を誇り、増加基調にあるが、この要因はシェールオイルにある。アメリカの原油生産は急速に伸び、前年比の増産量は2012年日量100万バレル、2013年同120万バレル、2014年同160万バレルとなり、3年間で増産量は日量約380万バレル(アラブ首長国連邦の原油生産量に匹敵)に達した。アメリカやカナダ等では、以前よりシェールオイルの資源量が潜在的に認められていたが、探鉱・開発コストが在来型原油と比べ相対的に高いため、本格的な商業生産には至らなかった。しかし、水平掘削と水圧破砕等の先進技術の発達と、米国金融危機以降の100ドル/バレルを上回る原油価格の継続により採算性が改善され、シェールオイルの本格的な大規模生産が可能となった。この状況下において、シェールオイルの大増産が、国際石油市場での需給緩和圧力となった⁷⁾⁸⁾。またアメリカでのシェールオイル拡大の要因として、石油パイプライン網が発達している点がある。油田で生産した原油を市場に流通させるためにはパイプラインが必要となるが、アメリカでは既にパイプライン網が整備されている。パイプライン等のインフラの整備コストは莫大であり、このインフラ面での優位性も作用して、アメリカ国内に分散するシェールオイル資源の開発拡大が実現した。

一般に、比較的成本の高い非在来型原油は油価が下落すると採算確保が困難になり生産量が減少すると言われているが、アメリカのシェールオイル生産量も直近ではやや減少傾向にある(図7)。シェールオイルの生産コストは油田ごとに違いがあると言われ、当該事業の損益分岐コストは40~80ドル/バレル程度と推定されており、原油価格がふたたび反転して上昇すれば、シェールオイルも増産すると考えられ、中長期的に原油価格高騰を潜在的に抑制する役割を担うことも考えられる。なお、昨今の原油価格は40ドル/バレルを下回る水準にあったが、シェールオイル生産はすぐには全面的に停止せずある程度は維持された。既に開発が進められた油田の損益分岐コストは、短期的な限界費用(操業費等の可変費)に相当するため、現在生産を継続する油田の損益分岐コストは低水準にあると見られている。また、原油価格が下落し採算性が厳しくなれば、石油企業はコスト効率化を進め生産コストは下がるため、油価低迷への適応を進めていると考えられる。

V. 原油価格変動の影響

(1) 経済への影響

原油価格高騰の経済的な影響に関しては、石油の短期的な価格弾力性は小さいため、原油価格高騰は石油輸入国では価格高騰分だけ石油支出額が増加し、経済的負担が増大する。石油輸入国から輸出国に資金が流出する一

方(所得移転), 輸入価格上昇に伴う物価上昇により, 金利の上昇, 消費や投資の減退, 生産活動の停滞など, 経済全体が縮小する可能性がある。他方, 石油輸出国は輸出入増加で経済が拡大し, 輸入増加で世界貿易の縮小を緩和させる。また, "オイルマネー"の世界の金融資産などへの投資による金融活動の活発化や, 資金の潤沢な供給を通じて金利上昇の抑制をもたらす可能性もある。また近年は70年代の石油危機時と異なり, エネルギー利用の効率化が進んでエネルギーシステムの構造が変容していることから, 2000年初頭から米国金融危機までの価格高騰が経済に与えた影響は, 以前よりも緩和しているとの報告もある⁹⁾。

原油価格下落の経済的な影響に関しては, 世界のGDPの大半を占める米国, EU, 日本, 中国, インド等のすべてが石油純輸入国であり, 純輸入国にとって価格低下は石油輸入費用の低下をもたらす, 産油国への国富流出が減少するので, 石油純輸入国の経済および国際経済全体に押し上げ効果をもたらすと考えられる。また, 原油価格は他の燃料価格にも影響を及ぼすため, その価格低下はエネルギーコスト全体の削減をもたらす, 企業収益の改善や産業競争力強化につながる。原油価格低下で家計にはガソリン代, 電気代等の光熱費減少をもたらす, 消費を刺激すると考えられる。

一方, 石油輸出国に対して原油価格低下は経済低迷をもたらす。石油収入への依存度が高く, 資産的余力の少ない産油国, 例えば非OPEC地域ではロシア, OPECではベネズエラ, ナイジェリア, 人口の多いイラン等へ経済的な悪影響を与える。例えば, ロシア経済は, 石油やガスに対する依存度が高く, 全輸出の7割は石油, ガス輸出であり, 原油価格低下は深刻な問題となる。また, ロシア経済の低迷が, 金融不安等の形で波及すれば, 世界経済に大きな影響を与える可能性もある。

(2) 石油市場への影響

原油価格高騰は, 石油の需要面では, 石油の価格弾力性は短期的に小さいため, 最近の原油価格高騰を見ると, 即時的に需要抑制に大きな影響を及ぼしたとは言いがたい。しかし長期にわたる原油価格高騰は, 消費国に石油消費抑制策の推進をもたらす, 需要の動向に影響を及ぼす可能性もある。石油の供給面では, 原油価格高騰は産油国に生産能力拡大の本格化を促すが, 現実的には課題もある。例えば, 豊富な石油資源量を保有する多くの中東産油国での生産拡大には, 生産効率の優れた外資技術導入が重要な役割を果たすと期待されるが, 概して中東産油国は外資導入に対して保守的であり, 産油国ごとにその受入に対する政策(資源の開発条件等)が異なる。このような産油国側の事情により, 欧米メジャー等の国際石油会社は, 資源へのアクセス確保が重要な課題となっている。そのため, 中東等の産油国での生産能力

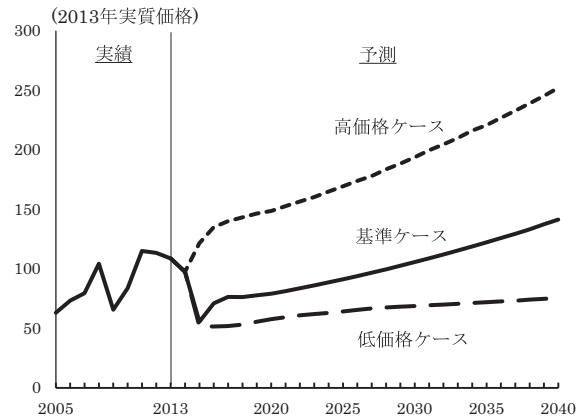


図8 原油価格の長期予測(出所: U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2015
<<http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>>, アクセス日: 2016年3月12日)

拡大については不確実性も大きい。

一方, 原油価格の大幅な低下は, 特にそれが長期の場合, 将来の価格高騰を潜在的に引起す可能性を高める懸念がある。すなわち, 低価格が需要拡大を刺激もしくは需要の減少傾向を弱め, 供給拡大を抑制することで, 中長期的には需給ひっ迫をもたらす可能性がある。特に重要なのは供給への影響で, 原油価格低下は, 高コストの石油生産を抑制する。例えば, 既述の通り, 近年の価格急落をもたらす要因であったアメリカの原油生産にはすでに影響が現れ, シェールオイルも含めた生産量の伸びが鈍化している。また, 油価低下が石油産業の業績低迷をもたらして, 石油開発投資が再検討され, 投資が縮小される傾向が表れている。このように供給投資が抑制されれば, 将来的に需給ひっ迫を引き起こす可能性もある。以上の動向を踏まえれば, 原油価格急落の度合いが大きければ, 将来の価格高騰の度合いも大きくなる可能性があると言える。

VI. 原油価格の展望

2014年後半から続く原油価格の下落が, 中長期的に継続するかどうかについては, 不確実性が大きい。

原油の市場均衡価格の長期的な動向を考えた場合, 一般に, 原油価格に徐々に上昇圧力が作用する可能性が高いと考えられている。近年の石油需要は世界で年平均日量100万バレル程度で増えており(図5), 当面もこの巡航速度で増加すると考えられる。例えばこの先の10年間で, 日量1000万バレル増加する可能性を考えると, 同量の追加供給を確保するための投資が今後10年間で必要になる。今後の需要増と, 加えて現在生産中の既存油田が自然減退する分を満たして世界の石油需給を均衡させるためには, 北米地域のシェールオイルも含め, 生産コストの比較的高い石油の生産が必要となる。そのため投資を考えれば, 将来に向けて, 原油価格は結果的に上昇すると考えられ, より高コストな石油生産の比率が

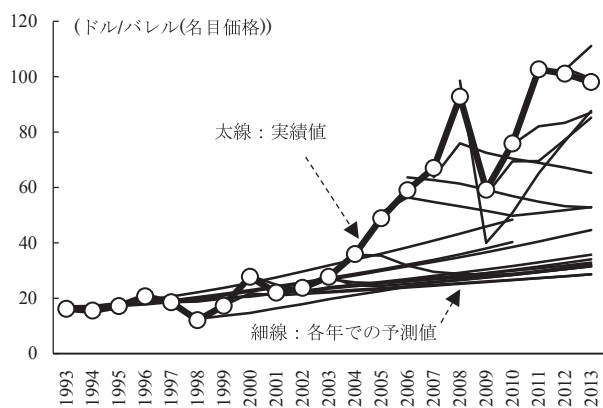


図9 原油価格の実績値と長期予測(出所: U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook Retrospective Review <<https://www.eia.gov/forecasts/aeo/retrospective/>>, アクセス日: 2016年3月12日)

徐々に高まると考えられる。今後、クリーンエネルギー自動車やバイオ燃料等の普及により石油需要の伸びが国際的に鈍化したとしても、石油需要がほぼ横ばいでの推移を続ける限り、既存油田の自然減退分を補完する為の投資が必要であり、投資が不足すれば需給の不均衡を招き、価格高騰をもたらす可能性がある。図8の通り、将来の原油価格の予測には大きな不確実性があるが、基本的な基調として、高コスト原油比率の高まりを受けて、原油価格は徐々に上昇すると考えられている。また、主に中東域外の高コストの石油生産拡大を図ったとしても、石油資源の大半は中東に賦存することから、長期的には世界の石油供給における中東依存度が高まると考えられている¹⁰⁾。そのため、中東産油国の国際石油市場での存在感が高まることで、中東の地政学的リスクが原油価格に与える影響が増加する可能性がある。

またより現実的に見れば、原油価格は市場で決定されるため、短期的には変動が続くと考えられる。需給バランスに影響を及ぼす要因が顕在化すれば大きな変動が現れると考えられ、世界経済の減速等が起きれば価格は下落し、中東情勢が緊迫化すれば価格が一挙に高騰する可

能性もある。原油価格はその時点での経済情勢や地政学的リスクで変動しながら、長期的な市場均衡価格に沿って徐々に上昇すると見られる。

しかし、原油価格を予測することは常に困難である。これまでの原油価格の予測を見ても、予測時点での情勢等が大きく影響しており、特に低価格期での予測は、原油価格の推移を実績値よりも過小評価する傾向にある(図9)。そのため、様々なリスク要因を考慮しながら、将来発生しうる原油価格のシナリオを描き、国際石油市場における今後の想定外の事象に対しても適切に対応できる対策の構築が引き続き重要であると考えられる。

－ 参考文献 －

- 1) J. Cunado et al., Energy Policy, Volume 86, November 2015, Pages 867-879.
- 2) L. Coleman, Energy Policy, Volume 40, January 2012, Pages 318-324.
- 3) Y. Wang et al, Energy Economics, Volume 51, September 2015, Pages 599-608.
- 4) J. Zhang, Energy Economics, Volume 49, May 2015, Pages 649-659.
- 5) G. Wu and Y. Zhang, Energy Policy, Volume 72, September 2014, Pages 78-86.
- 6) 柳澤明, エネルギー経済 34(2), 39-51, 2008-04.
- 7) C. B. Mănescu, G. Nuñob, Volume 86, November 2015, Pages 855-866.
- 8) D. Tokic, Energy Policy, Volume 85, October 2015, Pages 162-169.
- 9) V. A. Vásconez, Energy Policy, Volume 86, November 2015, Pages 844-854.
- 10) OECD/IEA, World Energy Outlook 2015, 2015.

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

原子力発電所が二度と過酷事故を起こさないために —防災までを共に考える原子力安全—

法政大学(原子力発電所過酷事故防止検討会主査) 宮野 廣
 東京都市大学(標準委員会 リスク活用分科会主査) 村松 健

原子力発電には基本的に「放射能リスク」を内在するものであり、福島第一原子力発電所の事故はそれを顕在化させた。国、地方自治体、学术界、事業者(電力)、メーカーなど全てのステークホルダーにおいて、原子力発電にかかわりを持つものたちが、その役割においてその責任を自覚するとともに、「原子力安全」の本質に取り組むことが重要であると認識させられた。設計、運転、そして防災の領域で役割に応じて安全確保策に取り組まなければならないが、異常事象発生の防止、その影響の緩和策の施行、そして放射性物質放出事故の発生に対して、いかに被害を防ぎ緩和させるか、リスク評価を介してお互いの分担と効果を確認することが、安全策の実効性を上げる上で重要なことである。特に、これまでほとんど取り組んでこなかった防災、さらに事故の後始末まで拡大した広範なリスク評価を提案する。それにより、原子力安全の事故耐性が格段に良くなることが期待される。

KEYWORDS: Nuclear Safety, Scientific Risk, Social Risk, Risk Assessment

I. はじめに

平成23年3月11日、わが国における最大級のM9の東北地方太平洋沖地震が発生した。その結果、東京電力福島第一原子力発電所は被災し、原子力事故を起こすこととなってしまった。

直接的な原因は自然災害への配慮の不足と不十分な想定であった。一方、さらに深く要因を探ると、全ての自然災害の脅威に着目した対応では無かったこと、アクシデントマネジメントが不足していたこと、特に自然災害などの外的事象に対する設計基準を超えた事象に対するアクシデントマネジメント(AM)が全くできていなかったこと、新たな学術的な知見に対する対応の考え方や仕組みができていなかったこと、設備の機能に対するシステムとしての見方ができず、サポート機器である電源の喪失によって重要な安全機能を全て失うと言う事態を想定できず、緊急時の対応が全てできない状況を生んでしまったこと、緊急時の指揮や判断機能などの組織、体制ができず、効果的な対応策が取れなかったことなどが重

要な要因である。

「原子力発電所が二度と過酷事故を起こさないために」の検討は、福島第一原子力発電所の過酷事故の後、平成24年(2012年)秋、阿部博之元東北大学総長からの呼びかけ、「人が開発した技術は、どのようなものであっても意味を持って開発されたものであり、それをいかに人に役立つものとして使えるようにするかは、科学者・技術者の重要な役割の一つである。」により始めたものである。原子力発電の技術もその一つである。これを受けて、本検討会では、原子力を利用する技術を、安全に役立つものとするべく、福島の事故の教訓から何をすべきかを議論して取りまとめた。その結果を10の提言としてまとめ、報告書と共に原子力規制委員会に提示し、更に広く公開して関係機関に呼び掛け、実現を求めてきた。その多くは、原子力規制委員会・規制庁で定めた新基準に取り入れられ、実現している。しかし、その中でも最も重要と位置付けた課題、「リスク評価の活用」については、未だ十分な取り組みができていない状況である。そこには様々な要因が交錯していると推察されるが、主要な要因の一つと考えるのは社会の理解が得られないことであり、社会にリスク評価とはどんなものであり、リスク評価の有用性が理解されることが必要なことであると考えた。

Preventing recurrence of severe accidents at nuclear power plants - Think up disaster prevention along with citizens for nuclear safety : Hiroshi Miyano, Ken Muramatsu.

(2016年2月29日 受理)

II. 過酷事故防止のための提言とその対応

1. 目的と経緯

原子力に携わるものは、原子力の安全に対して、たとえどのような対策を取ろうとも、他の産業と同様に、「絶対安全」というものではなく、事故のリスクは存在するという認識を持たなくてはならない。その対応として、社会とともにリスクを考え取り組むこと、すなわち、包括的なリスクマネジメントを行い、判断する仕組みを構築することが重要であり、それは福島第一事故後に残された重要な課題と考える。これを推進すべく、これまでにいくつかの取り組みをしてきた。

平成 25 年 4 月には、検討会の第 I 期の報告書(1 月 20 日発刊の単行本を参照)を発行した。平成 25 年 11 月には、「原子力が有する社会的リスクと科学的リスク」として、「リスク概念を導入した原子力発電の安全性向上を目指して」と題するシンポジウムを開催し、平成 26 年 4 月には、「原子力が有する社会的リスクと科学的リスク」の第二弾、「自然の脅威、地震、津波に立ち向かう最善の方策を求めると」題し、国際シンポジウムを開催した。ここでは、原子力におけるリスク評価に関して、社会との対話を試みるとともに、どのような理解が得られるのかを把握したが、リスク評価への理解に至るには、かなり厳しいものがあつた。リスクへの理解は進まず、リスクと言うもの、リスク評価と言うもの、への理解の難しさを感じた。

平成 27 年(2015 年)には、これまでのリスクコミュニケーション、リスクの理解と言う視点を変えて、「社会とともにリスク評価を行う」という視点での取り組みを行うこととし、原子力防災を行う、自治体の担当の方々との意見交換を進め、10 月にはワークショップ「リスクと原子力防災を考える」を開催して、意見交換を行った。

このように、ようやく“共に考えるリスクマネジメント”の実践に踏み込むことができた、と言える。

2. 真因と対策の提言とその実行

事故の真因をまとめると、第一に自然災害での想定の不十分、第二に不十分な AM 策、第三に実効性がなかった防災体制、第四に役立たせ得なかった国際社会との交流である(国際社会の知見の取り入れ、特にリスク評価への取り組み)。これらを踏まえて、“原子力発電所を預かる事業者の安全対応のみに任せてよかったのか、国、規制のやるべきことはなんだったのか”もう一度見直す必要があるとの結論に至ったのである。そこで、10 項目の提言にまとめ社会に発信した。主要な提言は、提言 1 は想定外への対応を十分におこなうこと、提言 2 は世界的に高く評価されるレベルの対策を実行すること、提言 3 は自らの責務を認識し、事故の防止・緩和策の具体化を図ること、提言 4 はリスクを共に考え対策に取り組む

こと、である。これらの提言の内、いくつかは新規規制基準に取り入れられ、多くは実行されている。十分に設備対応はできた。

3. 残された課題ーリスク評価の役割

福島第一事故以前の事故をみても、必ず設計上の問題が現れ、それは避けられない状況にある。常に見直す姿勢が必要であろう。過去の経緯を見ると、人間のミスなど、人に係わる部分での事故要因や不具合要因も多く、欧米では、既にリスク評価に取り組み、想定外事象に対しての安全性の確保に生かしている。しかし、福島の事故では、この領域での対策の遅れが目立った。新規規制基準の多くは、設計要因への対応で、AM 策を含めてほとんどが設備の対策であり、それはソフト面での対応では、十分な対策となっていない。このリスク評価への取り組みは、欧米では、既に TMI(スリーマイル島)事故以降、積極的に取り組み、様々な対策に生かしている。

深層防護の観点から、安全確保は、設計での対応、運用での対応、防災での対応と独立した安全確保策がとられている。それぞれの安全確保策は、リスク評価で位置づけられ、それぞれが役割を分担してリスクを効果的に下げる目的を果たしている。

リスクとは、被害の大きさと発生の確率を掛けたものとして現わされる。被害の大きさを何にするか、それぞれの分野のリスクを同じ土俵で評価するには、同じものさしとしなければならない。これまでは、被害の大きさは死亡者数で現わしてきたが、それでは小さなリスクを適切に現わせない。そこで環境の汚染とも言える放出放射線量で現わす試みもある。福島の事故では、設計での事故の防止策も十分ではなく、運用、防災での対応もほとんどできておらず、放射性物質の放出量では 10PBq 程度が放出されてしまった。放射性物質による直接的な被害はなかったが、避難のまずさから、病人、年寄りから 200 人規模の人的被害を出すこととなった。適切に運用での放出防止策やそれを制限する緩和策、防災での手立てができていれば、放射性物質の放出量は少なく、また避難での人的被害を出すことはなかったものと言える。ここに、新たなリスクの目標を 100TBq とすれば、それに見合った対応策をそれぞれの領域、設計、運用での策に施すことで、この目標の実現は可能となる。このように安全の確保は、全体として低いリスクを確保することであり、リスクを小さくすることに役立つ。

提言 3、4 で示したリスクへの取り組みは、ハードウェア、すなわち設備に頼る事故の防止策だけではなく、リスク低減策を設計、運用、防災のそれぞれの領域で適切に施策を施すことにより、放射性物質による影響の低減という原子力安全を成り立たせることが、安全を確実にするために必要なことと言っているのである。ハードウェアに頼り、絶対安全を確保するのではなく、運用で

のマネジメントを含め、防災までを考えてのリスクを少なくする安全策を確保することを社会とともに考え、適切な方策を選択していく。そのコンセンサス、方向性の理解と納得を得た対応とすることを選択できる仕組みを構築しなければならない。その基盤がリスク評価である。

Ⅲ. 防災へのリスク分析・評価の適用

1. 一般防災へのリスク評価の適用

社会には様々な脅威、ハザードがある。地震や津波、火山の噴火、台風による豪雨など様々ある。これらの脅威、ハザードに対して、どのように避難計画ができているのか、事態の進展とともに考えなければならない避難などの防災の流れとして一つの例を示す。

一般の災害における、防災を考えるに当たっては、リスク評価とは、住民のトータル的人的被害の可能性をリスクとして、最適化を図るものである。図1には、一般防災での、ハザードの要因となる社会が受ける脅威の例を示す。このハザード要因と言われる災害要因の発生から、災害としてのハザードの事態発生の見込み(一般にはハザードとして、ハザードマップが作成されている)、それによる住民の被災の想定、これがリスクである。この時に、どのような防災措置をとれば、リスクがどのように変化するのか、これを適切にとらえて、防災計画を策定することが求められる。

2. 一般災害とリスク評価

ハザードによる脅威に対して、判断の指標に何をとりか、は一つの課題である。時間とともに変化し、避難の準備や避難の決定を判断する指標を定める必要がある。「避難の指示」などは時間との関係で、十分に退避、避難ができる時点で判断しなければならない。

避難の決定の後、避難の過程でどのようなハザード、



図1 社会が受ける脅威の例

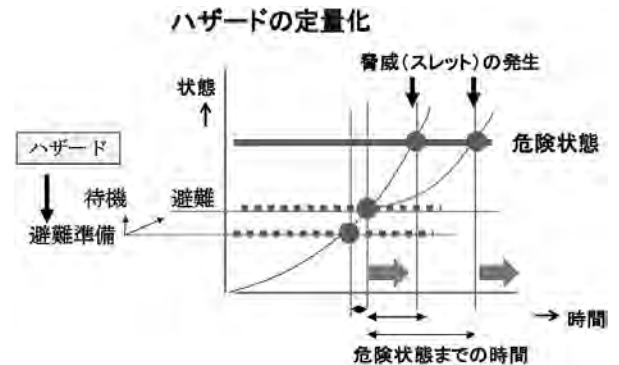


図2 ハザードの定量化と避難の判断

脅威がもたらされるか、その予測と可能性を考える必要がある。事前に計画を立てる場合には、様々な選択肢のどれを選択するかにより、最終的なリスク値が変わることを把握した上で、防災計画を立案するとよい。更に防災は、避難で終わるものではない。避難後の復旧や正常状態への回帰までをどのように進めるべきかの選択の判断にも、リスク評価を適用することは可能であり、有用であると考えられる。

例えば台風では、川の水が氾濫した後の対応である。自宅での待機という選択、増水の中の避難、救援の要請など、様々な選択肢がある。これらの選択により、被害の結果は異なるものとなる。

ここで、図2に示すように、ハザードへの対応には、その定量化が必要である。図の縦軸がハザードを定量化した値を示し、時間と共に変化していることを把握する。危険と想定する量に対して、避難に要する時間などを想定した上で、決められた量により、避難の「待機」や「避難」を判断する。この判断は一律ではない。対象となる人、集団の環境などの条件により異なる。待機の段階で避難する場合も考えられる。この分析もリスク分析の一環として行うことが望ましい。

3. 子力防災でのリスク評価の適用

そこで、リスク評価を一般防災と同様に、原子力防災にどのように適用するかを考える。原子力防災におけるハザードは、一般防災の地震、津波、台風などと同様に、住民に脅威をもたらす。それは、原子力発電所からの放射性物質の放出である。この場合にも、適切に指標を定めて避難をするかの判断を行うことも可能であるが、現在は、発電所からの放出、もしくは国の判断による避難の指示と同時に、ある領域の住民は避難をするとされている。避難の起点が異なるだけで、避難の経路、避難時の条件などにより受けるリスク影響は異なるものの、その評価法は変わらない。リスク評価を行うことにより、何をリスクと定義するか、受け入れられるリスクとはなにか、どのようにすればリスクを下げるができるのか

か、などを考えることで、それにより適切なリスク低減策を得ることができる。

原子力防災では、リスクを取る住民の地理的分布が広域になることから、社会リスクとしてどのように集約していくか、はこれからの課題であり、リスク値の活用の方法と合わせて、考えて行かなければならない。

4. 原子力防災と一般防災の関連

原子力事故における防災、原子力防災においても、事態の進展や、リスク評価の手法には、一般防災との違いはないと考える。図3にそのリスク分析、リスク評価の全貌を示す。災害をもたらすハザードが、風や水没、というものから、放射性物質の拡散や落下というものとなる違いである。大きな相違は、一般の災害では、ハザードは目に見える事態が多いが、原子力事故では、放射性物質への対応というハザードは目には見えない事態とも言える。この違いをリスク分析、リスク評価にどのように取り込むのかは、重要な課題である。

原子力事故のリスク評価では、発電所内の事故の進展評価においても、発電所外での対応においても同じであり、事態を何らかの方向で捉える事が、重要な要素となる。すなわち、図2に示したように、何らかの方法で何をとらえればよいか、事態の進展をハザードの定量化としてとらえられなければ、対応を取ることができない、と言うことである。また、同時に、事故が進展し発電所からの放射性物質を放出する事態となるに至っても、放射性物質の放出を捉えられなければ、その事態になっていることは把握されず、事故発生後の防災の措置を取ることが、方策はなくはないが、困難を極めることになる。

リスク評価は、このように事態が目には見えないことを前提に行わなければならない。

5. 社会と共に取り組むリスク評価に

原子力発電所も、地域も、自然災害は同様に受ける。その結果、原子力災害が複合的に発生する可能性もあり、地域社会は、これを複合事象として考えなければならない。これまで見てきた原子力発電所のリスク評価

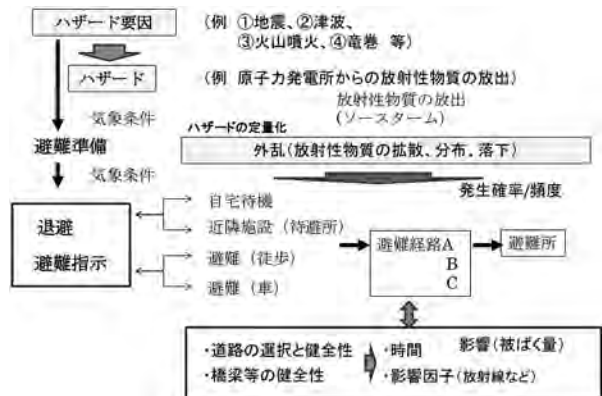


図3 原子力防災におけるハザードとリスク評価

は、設備の損傷、炉心の損傷、格納容器損傷、に注力して取り組まれてきた。社会が受けるリスク評価であるレベル 3PRA (社会に与えるリスク評価)では、簡単なモデルでのリスク分析を行って高い安全性が確保されると言ってきた。しかし、原子力発電の事故でもたらされるリスクは、最後は地域社会、広域社会が共に取らなければならない。その意味で、事故進展を原子力発電所の視点からの安全確保にとどめるのではなく、住民目線での取るべきリスクとは何か、それがどの程度のものか、などを含めて、防災までを考えたリスク評価に取り組み、これを総合して原子力安全を確保する取り組みとして行かなければならない。

IV. 防災までを共に考える原子力安全

1. 防災へのリスク評価の適用

設計、運用、防災を適切に行うことで、被害の大きさも、発生頻度も低減することができる。

ハザード要因が複雑になってきており、様々な自然現象や人為トータルとしてリスクを考え、リスクを低減する方策を取っていくことが、原子力安全の確保につながると考える。これまで、原子力界が取り組んできたリスク評価は、原子力発電所の設備の安全確保が中心であり、防災の領域は事故の発生で単に逃げればよい、そのような事態になることは基本的にはないので、簡単な付け足しの評価を行うことが提案されていただけであった。これもほとんどの場合は、評価に取り組んでいなかった。住民目線での原子力安全と防災を考えることが必要であり、なにがリスクなのか、社会として共に考えることが必要である。その上で、誰が責任を持って、どのようにこれを実現していくべきかがこれからの重大な課題である。

原子力利用におけるリスク評価とは、リスクとは何か、シナリオをどのように考えるか、リスク評価をどのように使うのかなどを明確にして取り組むことである。図4にその概念を示す。横軸には被害の大きさを低減すること、立軸にはその発生頻度、発生の可能性を低くすることを示している。設計段階でのリスク低減、これは設計による設備の安定運転の確保であり、運用段階でのリスク低減、これはマネジメントによる事態の収束、すなわち設計基準を超えた事故に至る事態に対応することである。さらにこれに、防災による被災の低減(減災)が加わり、原子力安全、原子力事故によるリスク低減が図れる、ということを示している。すなわち、これらの作業には、原子力の専門家やリスクの専門家ばかりではなく、もちろん、メーカーや電力、地方自治体、規制のステークホルダーに、地域住民や一般社会の人々も加わり、社会全体としてのリスクマネジメントに取り組むことが必要となる。その接点が、防災へのリスク評価の取り込みである。それにより、より効果的に原子力安全の確保、

技術国際交流センターの助勢を得て、行ったものである。

－ 参考資料 －

- 1) 監修：原子力発電所過酷事故防止検討会編集委員会，原子力政策への提言(第一分冊)，原子力発電所が二度と過酷事故を起こさないために－国，原子力界は何をなすべきか－，科学技術国際交流センター，2016年1月
- 2) 宮野 廣，第12回学術講演会，科学的リスクと社会リスク，2B-3-1，P357-359，日本保全学会，2015年
- 3) 宮野 廣，原子力発電を再考する－原子力安全を確保するために，エネルギーレビュー，2016年3月

著者紹介



宮野 廣 (みやの・ひろし)
法政大学，AESJ 廃炉委員長
(専門分野/関心分野)流体振動，原子力発電システム，システム安全



村松 健 (むらまつ・けん)
東京都市大学，AESJ リスク活用分科会主査
(専門分野/関心分野)原子力安全，リスク強化，PRA



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－
(5月10日第11回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・4月に英文誌へ25論文，和文誌へ7論文の投稿があった。
- ・予算執行承認手続きについて確認した。
- ・平成28年度編集委員を確定した。佐藤泰委員には編集顧問として第2分野のPre-Screening担当をお願いすることとした。
- ・和文論文誌投稿の手引き，同投稿規程(ガイドラインとする)，論文等の投稿・校閲に関する倫理指針(規約とする)を見直した。
- ・論文引用を促進するために，英文誌著者へのアンケート集計結果を含めて，学会誌へ記事を載せることとした。
- ・論文審査懸案事項への対処を検討した。

【学会誌関係】

- ・編集委員長より，次年度引継ぎ資料としての今年度活動報告の内容確認があった。
- ・編集長より，特集企画とそのスケジュールについて説明があった。
- ・次年度の学会誌編集委員が承認された。
- ・学会誌記事の過去分全面公開について，話し合った。
- ・座談会「もんじゅ」への投書が複数あり，今後の参考とした。
- ・編集委員会規程等の文言について議論した。
- ・次号以降の記事進捗状況の報告と確認を行った。
- ・ゲストを含め全出席者と意見交換した。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

30年後の福島環境放射線レベル推定とその技術開発

日本原子力研究開発機構 木名瀬 栄

日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、福島第一原子力発電所(福島第一原発)から80km圏内を対象に、空間線量率の分布状況変化モデルを開発している。膨大な空間線量率測定データを用いて避難指示区域内外の地域特性に応じたモデルパラメータを導出し、福島第一原発事故30年後までの空間線量率分布の経時変化を推定するとともにモデルの不確かさ解析および妥当性検証を行った。本稿では、空間線量率の分布状況変化モデルとそのモデルパラメータの特徴、モデルを用いて作図した空間線量率分布の将来予測図を紹介する。

KEYWORDS: *Ambient Dose Equivalent Rate, Prediction Model, Ecological half life, Caesium, Vehicle Borne Survey, land Use, Map, Fukushima*

I. はじめに

福島第一原発事故後、住民の放射線レベルの理解、適切な除染などの防護措置の選択、避難指示区域の見直しなどに資する基礎情報を提供するため、福島第一原発事故により環境中に沈着した放射性セシウムやそれに伴う空間線量率の変化傾向を予測できる長期的影響把握手法の確立が必要である。しかし、公衆の防護の目的に特定されるべき環境中に沈着した放射性セシウムは、線源として適切な防護措置の選択に結びつけることが困難な状況にある。福島第一原発事故前の経験から、地表面に沈着した放射性セシウムの経時変化は、その放射性壊変に加えて、風雨などの自然環境変化に影響(ウェザリング効果)されることが確認されているが、評価対象とする時空間によって異なるため、その程度を信頼性高く推定することが困難である。

原子力機構では、平成24年度は文部科学省の、平成25年度からは原子力規制庁の委託業務の一環として、空間線量率の分布状況変化モデルを開発している(1-3)。空間線量率の分布状況変化モデルは、福島第一原発から80km圏内の空間線量率測定データと土地利用形態に関するデータを用い、ある初期状況から時間とともに解が変化し、未来予測のように将来の解が得られる初期値問

題型としている。すなわち、土地利用形態に応じた空間線量率の変化を大量に調べることを基本とした、一般化された経験則によって現象を捉える統計帰納法によるモデルとしている。本報告では、これまでに開発した空間線量率の分布状況変化モデルの特徴を示すと同時に、これからの福島復興に資するよう、空間線量率の分布状況変化モデルを用いて作図した、福島第一原発から80km圏内の空間線量率分布の将来予測図を紹介する。

II. 空間線量率の分布状況変化モデル

空間線量率の分布状況変化モデルは、福島第一原発から80km圏内の広域な範囲に沈着した放射性セシウムを起因とした空間線量率の状況の予測に役立てるよう、福島第一原発事故後に実施された走行サーベイなどによる空間線量率の膨大な測定データをもとに構築している。福島第一原発から80km圏内を対象に、土地利用形態別に環境半減期(放射性セシウムの壊変による影響を取り除き、放射性セシウムの環境中での挙動に影響を及ぼすウェザリングや人間活動などの様々な要因により、環境中の空間線量率が半分になるまでの時間)を導出し、この環境半減期をモデルパラメータとした2-コンパートメントからなるモデルとした。

1. モデル式

空間線量率の起因となる放射性セシウム(^{134}Cs , ^{137}Cs)を対象とする、2-コンパートメントモデルである空間線量率の分布状況変化モデルは次式(1)で表す。

Prediction of Ambient Dose Equivalent Rates for 30 Years after the Fukushima Accident and its Technological Development : Sakae Kinase

(2016年4月11日受理)

$$D(t) = (D_0 - D_{BG}) \left\{ f_{fast} \exp\left(\frac{-\ln 2}{T_{fast}} \cdot t\right) + (1 - f_{fast}) \exp\left(\frac{-\ln 2}{T_{slow}} \cdot t\right) \right\} \\ + \frac{k \exp(-\lambda_{134} t) + \exp(-\lambda_{137} t)}{k + 1} + D_{BG} \quad (1)$$

ここで、 $D(t)$ は経過時間 t における空間線量率、 D_{BG} は平均的なバックグラウンド空間線量率 $0.05 \mu\text{Sv/h}$ 、 T_{slow} は減衰が遅い成分の環境半減期 92 年、 k は ^{134}Cs の ^{137}Cs に対する初期空間線量率比(同じ濃度)2.7、 λ_{134} は ^{134}Cs の壊変定数、 λ_{137} は ^{137}Cs の壊変定数である。式(1)中の初期空間線量率 D_0 は、走行サーベイなどによる測定データを生活圏の空間線量率へ補正した値を、減衰が速い成分の環境半減期 T_{fast} および減衰が速い成分の割合 f_{fast} は、土地利用形態別の値(累積頻度分布作成)を走行サーベイの空間線量率測定データから導出・設定している。

式(1)は、統計帰納法によるモデルを表現している。モデルパラメータである T_{fast} および T_{slow} は放射性セシウムの沈着時の状態や沈着表面の種類などに依存し、環境中の放射性セシウムの移行メカニズムと定量的に関係づけることは困難であるが、 T_{fast} は放射性セシウムの土壌深さ方向への移行にともなう土壌による遮蔽、ウェザリングや除染などの人間活動による放射性セシウムの低減化に、 T_{slow} は浸潤などにおける部分的な沈着表面の放射性セシウムの保持や、再浮遊や人間活動による放射性セシウムの再分布に影響されていると考える。 T_{fast} および T_{slow} は、それぞれ相性における分布相と消失相を表現する値に相当するといえよう。

2. 線量率測定データとモデルパラメータ

(1) 空間線量率測定データの調査

福島第一原発事故後に得られた空間線量率は、モニタリングポストなどの定点における連続測定データ(時間連続データ)、走行サーベイなどに用いられた可搬型測定器による不定期な測定データ(時間離散データ)に大別される。それぞれの空間線量率測定データには、空間線量率の分布状況変化モデルへの適用において、時空間的な特徴を反映すべき点に長短がある。すなわち、時間連続データは同一地点において空間線量率の経時変化を解析することのできる十分な時間頻度の情報を提供するが、測定地点が限定されており地域的に十分な広さとその代表性をカバーできない。一方、時間離散データは空間線量率の地域的な特徴を解析するのに十分な範囲をカバーしているが、事故初期などの数回の測定データでは経時変化の傾向を決定するのに十分ではない。そうしたことから、平成 24 年度の空間線量率の分布状況変化モデル開発では、時間連続データである「東京電力株式会社福島第一原子力発電所 20km 圏内の測定結果」と「福島県による緊急時環境放射線等モニタリング実施結果」、時間離散データである走行サーベイ、航空機モニタリングなどによって得られた測定結果を用いてモデルパラメータ

表 1 走行サーベイデータ

測定実施日	データ数
1 次：平成 23 年 6 月 4 日～13 日	42,090
2 次：平成 23 年 12 月 5 日～28 日	33,887
3 次：平成 24 年 3 月 13 日～30 日	59,037
4 次：平成 24 年 8 月 20 日～10 月 12 日	126,249
5 次：平成 24 年 11 月 5 日～12 月 12 日	87,991
6 次：平成 25 年 6 月 12 日～8 月 8 日	128,270
7 次：平成 25 年 11 月 5 日～12 月 12 日	115,985
8 次：平成 26 年 6 月 23 日～8 月 8 日	104,630
「総合モニタリング計画」に基づき実施	
1 巡：平成 23 年 8 月 2 日～30 日	97,512
2 巡：平成 23 年 8 月 31 日～10 月 9 日	114,971
3 巡：平成 23 年 10 月 1 日～11 月 4 日	119,660
4 巡：平成 23 年 11 月 5 日～12 月 12 日	134,376
5 巡：平成 23 年 12 月 14 日	135,724
～平成 24 年 1 月 30 日	
6 巡：平成 24 年 2 月 4 日～3 月 10 日	132,692
7 巡：平成 24 年 3 月 12 日～4 月 16 日	144,644
8 巡：平成 24 年 5 月 16 日～6 月 18 日	145,295
9 巡：平成 24 年 7 月 4 日～8 月 6 日	148,560
10 巡：平成 24 年 9 月 4 日～10 月 18 日	153,136
11 巡：平成 24 年 10 月 31 日～12 月 7 日	152,960
12 巡：平成 25 年 1 月 9 日～2 月 18 日	142,435
13 巡：平成 25 年 3 月 18 日～4 月 19 日	153,242
14 巡：平成 25 年 6 月 4 日～7 月 8 日	154,560
15 巡：平成 25 年 8 月 27 日～10 月 8 日	155,963
16 巡：平成 25 年 11 月 6 日～12 月 3 日	154,696
17 巡：平成 26 年 3 月 18 日～4 月 22 日	158,506

の 1 つである環境半減期を導出した。福島第一原発事故後 5 年が経過した現時点では、広範囲かつ多頻度で実施された走行サーベイなどにより、生活圏の空間線量率測定データを多く収集することができたため、より適切に住民の生活圏を対象としたモデルパラメータなどの導出・設定を可能にした。表 1 にモデルパラメータの導出・設定に用いた走行サーベイの測定実施日、データ数を示す。表中のデータのうち、文部科学省/原子力規制庁の委託業務で実施した第 1～8 次走行サーベイは福島第一原発から 80km 圏内を、「総合モニタリング計画」(モニタリング調整会議決定)に基づき実施されている走行サーベイは、避難指示区域内を測定対象にしている。

(2) 福島第一原発から 80km 圏内のメッシュサイズ

空間線量率の分布状況変化モデルにおいて、福島第一原発から 80km 圏内のメッシュサイズは、空間線量率測定を踏まえた空間線量率分布予測の利便性と信頼性向上を図るうえで、これまでの測定データの単位区画と同等になることが望ましい。 ^{137}Cs の空气中平均自由行程(ガンマ線が空气中の分子と衝突せずに飛行する平均距離)が約 108m であることも勘案し、福島第一原発から 80km 圏内のメッシュサイズは、走行サーベイ測定デー

タの単位区画である第3次地域区画1/10細分メッシュ区画に対応する約100m単位としている。

(3) 空間線量率の初期値設定

空間線量率の分布状況変化モデルでは、空間線量率の初期値として、福島第一原発から80km圏内のメッシュすべてに対して、走行サーベイによる測定データがある場合にはその値を、走行サーベイによる測定データがない場合には走行サーベイと航空機モニタリングによる測定データの相関関係を用いて、航空機モニタリングによる測定データを走行サーベイによる測定相当データに補正した値を適用している。いずれの場合においても、住民の生活圏を対象とすべく、歩行サーベイによる測定データとの比率によって補正している。また、帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域である避難指示区域内では主として「総合モニタリング計画」に基づき実施されている走行サーベイの詳細モニタリング結果を活用している。

(4) モデルパラメータの導出・設定

減衰が遅い成分の環境半減期とその変化の範囲は、レベル3PRAに関する日本原子力学会の値や米国原子力規制委員会の値(中央値92年, 45-135年)を、減衰が速い成分の環境半減期とその変化の範囲は、走行サーベイの空間線量率測定データに対する最小二乗法フィットにより導出した値を用いている。減衰が速い成分の環境半減期は、その信頼性および合理性を図るため、避難指示区域内には陸域観測技術衛星(ALOS)土地利用形態別のうち森林(落葉樹、常緑樹)か否かの群別に、避難指示区域外にはALOS土地利用形態別に統計解析より導出した。

表2に減衰が速い成分の環境半減期について解析した結果を示す。表中の値からは、森林(落葉樹、常緑樹)に分類されたメッシュにおける減衰が速い成分の環境半減期は、他のALOS土地利用形態に比べやや長いことが示される。しかし、最新の解析結果では、ALOS土地利

表2 減衰が速い成分の環境半減期

ALOS 土地 利用形態	減衰が速い成分の環境半減期[年]		
	5%値	中央値	95%値
避難指示区域外			
水域	0.25	0.56	1.2
都市	0.35	0.60	1.7
水田	0.32	0.55	1.5
畑地	0.32	0.63	1.9
草地	0.29	0.58	2.2
落葉樹	0.29	0.66	2.7
常緑樹	0.28	0.94	5.7
裸地	0.31	0.62	1.6
避難指示区域内			
森林	0.29	0.68	3.1
森林以外	0.32	0.60	1.7

用形態間の相違は顕著でなく、避難指示区域内外で異なること(避難指示区域外に比べ人間活動が少なかった避難指示区域内の方が、減衰が速い成分の環境半減期は長くなる)が示唆されている。なお、減衰が速い成分の環境半減期の統計分布は、90%信頼区間の分布に着目すると、対数正規分布とみなすことができた。

減衰が速い成分の割合は、避難指示区域内、避難指示区域外それぞれについて、「総合モニタリング計画」に基づき実施されている走行サーベイの詳細モニタリング結果と第1~8次走行サーベイの空間線量率測定データを用いて導出した。具体的には、減衰が速い成分の環境半減期を定数とし、初期の空間線量率と減衰が速い成分の割合の2つのパラメータを対象にして非線形最小二乗法フィットにより減衰が速い成分の割合を導出した。得られた減衰が速い成分の割合は、避難指示区域内である帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域それぞれのALOS土地利用形態別のうち森林(落葉樹、常緑樹)か否かの群別に、避難指示区域外にはALOS土地利用形態別に分類し、中央値とその変化の範囲を導出した。

減衰が速い成分の割合を表3に示す。避難指示区域外の減衰が速い成分の割合は、ALOS土地利用形態間の相違が顕著である。とくに、常緑樹に分類されたメッシュにおける減衰が速い成分の割合は、都市など他の土地利用形態に分類されたメッシュの値に比べ小さい。また、避難指示区域内である帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域それぞれの減衰が速い成分の割合については、人間活動などが比較的多い避難指示解除準備区域の方が他の区域に比べ大きく、分散も大きくなる傾向が示された。90%信頼区間の分布に着目すると、い

表3 減衰が速い成分の割合

ALOS 土地利用形態 /属性	減衰が速い成分の割合[-]		
	5%値	中央値	95%値
避難指示区域外			
水域	0.53	0.76	0.89
都市	0.52	0.77	0.93
水田	0.53	0.75	0.93
畑地	0.48	0.71	0.89
草地	0.47	0.72	0.92
落葉樹	0.41	0.68	0.88
常緑樹	0.26	0.62	0.86
裸地	0.51	0.73	0.90
避難指示区域内			
帰還困難、森林	0.32	0.45	0.55
帰還困難、森林以外	0.33	0.47	0.57
居住制限、森林	0.37	0.48	0.61
居住制限、森林以外	0.39	0.49	0.65
避難指示解除準備、森林	0.37	0.51	0.67
避難指示解除準備、森林以外	0.29	0.51	0.69

れの減衰が速い成分の割合についても、その統計分布は正規分布とみなすことができた。

3. モデルの不確かさ解析と妥当性検証

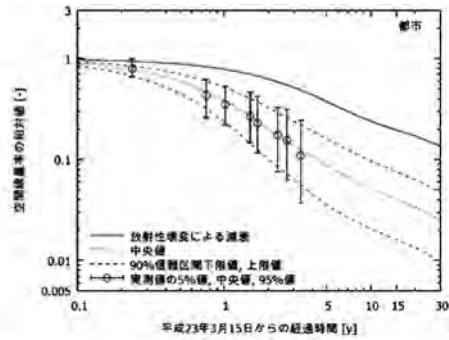
(1) モデルの不確かさ解析

空間線量率の分布状況変化モデルを用いて、福島第一原発事故30年後までの避難指示区域内外それぞれの空間線量率を予測した。分布状況変化モデルの不確かさ解析では、式(1)に示される3つのモデルパラメータである、減衰が速い成分の割合、減衰が速い成分の環境半減期、減衰が遅い成分の環境半減期の統計分布を考慮したモンテカルロ計算により、空間線量率の変化を推定した。減衰が遅い成分の環境半減期の統計分布は先行研究の結果を踏まえ一様分布とした。

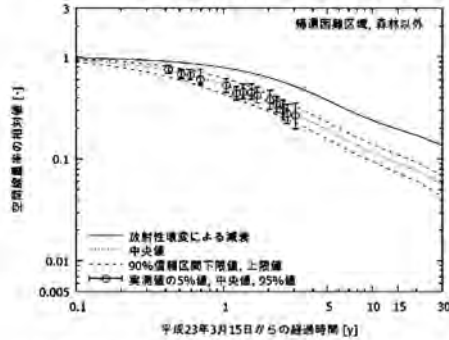
分布状況変化モデルにより推定した空間線量率の経時変化の一例を図1(a)~(c)に示す。避難指示区域外のうちALOS土地利用形態が都市に分類されたメッシュを図1(a)に、避難指示区域内のうち帰還困難区域、避難指示解除準備区域それぞれについてALOS土地利用形態が森林(落葉樹、常緑樹)以外に分類されたメッシュを図1(b)および(c)に示している。いずれもバックグラウンド空間線量率を除く初期の空間線量率で規格化した。図より、分布状況変化モデルにより推定した空間線量率は放射性セシウムの壊変のみを考慮した場合に較べ速く減衰すること、人間活動が少ないほど遅く減衰することが示唆されている。また、図1(a)~(c)には、規格化して得られた空間線量率の相対値と、第1~8次までの走行サーベイや「総合モニタリング計画」に基づき実施されている第17巡までの走行サーベイの空間線量率測定データの相対値(測定データからバックグラウンド空間線量率を差し引いた後、初期の空間線量率で除した値)もプロットした。推定した空間線量率の相対値(中央値)は走行サーベイによる空間線量率測定データとよく一致すること、走行サーベイによる空間線量率測定データのほとんどがモデルパラメータの不確かさを考慮した推定値の変化の範囲内にあることが確認できる。

(2) モデルの妥当性検証

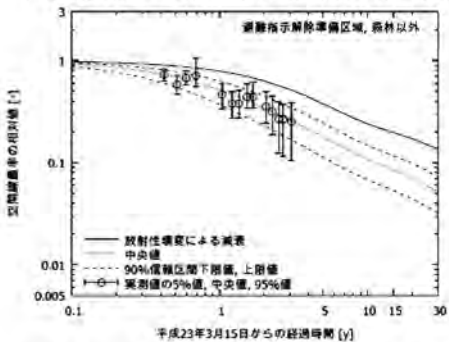
空間線量率の分布状況変化モデルの妥当性を検証するため、第7次走行サーベイの空間線量率測定データを基準とした分布状況変化モデルを用いて、第8次走行サーベイの避難指示区域外の空間線量率を推定・比較した。その比較結果を図2に示す。両者は、0.1 μ Sv/h以上となる空間線量率について、係数2の範囲で概ね一致することが確認できた。空間線量率が高くなるにつれて、その一致度は良くなっている。なお、0.1~0.2 μ Sv/h程度の空間線量率において、離散的な傾向を示すデータは推定に利用した基準の測定データの有効桁に起因するものである。



(a) 避難指示区域外 (都市)



(b) 避難指示区域内 (帰還困難区域, 森林以外)



(c) 避難指示区域内 (避難指示解除準備区域, 森林以外)

図1 空間線量率の相対値の経時変化

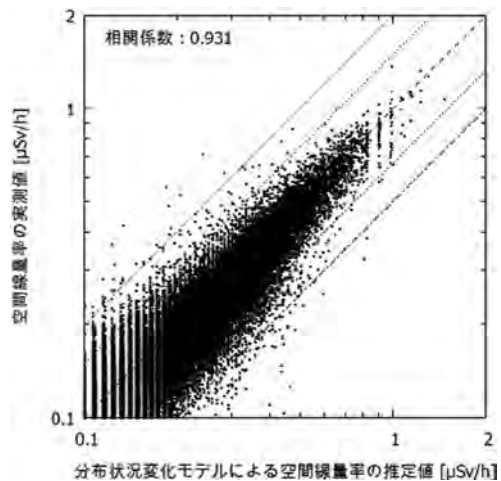


図2 空間線量率の分布状況変化モデルによる推定値(第7次走行サーベイ基準)と第8次走行サーベイの空間線量率測定データとの比較.

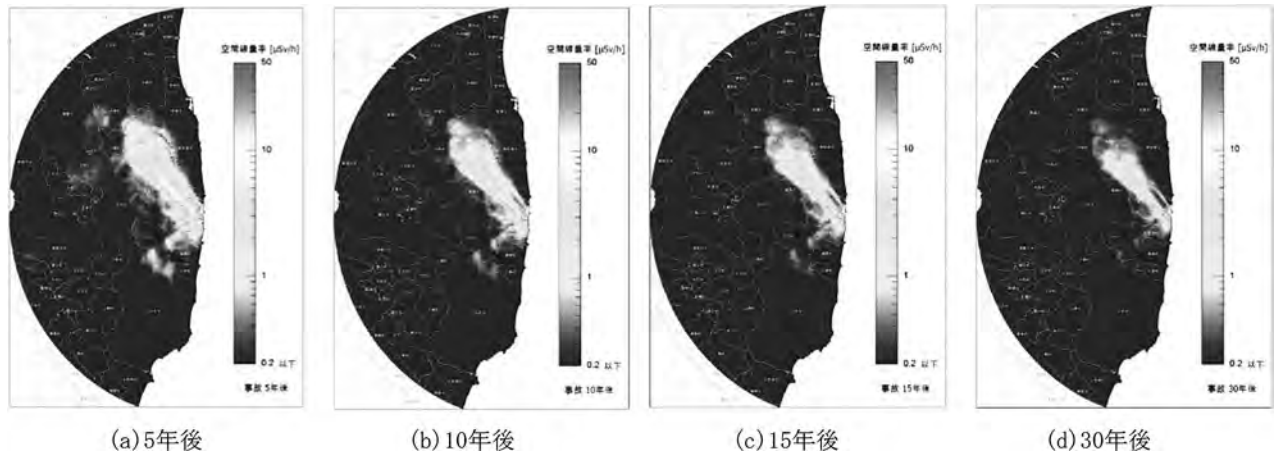


図3 空間線量率の分布状況予測図

Ⅲ. 空間線量率の予測図

セシウム 137 の物理的半減期に相当する 30 年を目処に、事故発生 5 年後、10 年後、15 年後、30 年後の福島第一原発から 80km 圏内の空間線量率分布を作図した。空間線量率の初期値には、第 8 次走行サーベイ、「総合モニタリング計画」に基づき実施されている第 17 巡の走行サーベイおよび第 8 次航空機モニタリング(平成 25 年 11 月 19 日時点)の空間線量率測定データを用いた。予測する空間線量率は、分布状況変化モデルに用いる環境半減期などのモデルパラメータ導出データの不確かさを考慮して、バックグラウンド空間線量率を含めた空間線量率 $0.20\mu\text{Sv/h}$ を超えるメッシュに対して行うこととし、数値に対応したグレースケールにより可視化した。なお、 $0.20\mu\text{Sv/h}$ 未満の空間線量率のメッシュについては $0.20\mu\text{Sv/h}$ に対応した明暗と同様にした。猪苗代湖上や福島第一原発から 3km 圏内のような、航空機モニタリングや走行サーベイによる測定データがないメッシュについては白抜きにした。モデルパラメータの中央値を適用した将来予測結果を図 3(a)～(d)に示す。予測した空間線量率は、住民の生活圏を対象にしたものであり、バックグラウンド空間線量率を含めた値である。事故 30 年後の年間 20mSv ($3.8\mu\text{Sv/h}$) を超えるエリアは、事故 5 年後に比べ、約 20 分の 1 程度に減少することが示唆された。

Ⅳ. おわりに

福島第一原発から 80km 圏内を対象に、空間線量率の分布状況変化モデルを開発するとともに、福島第一原発事故後 30 年までの空間線量率分布を予測した。空間線量率の分布状況変化モデルは、環境半減期などのモデルパラメータを用いた計算により、避難指示区域内外それぞれの生活圏において空間線量率分布を簡便に推定する

ことが可能であるため、住民の放射線レベルの理解などに活用できることから、今後の福島復興に役立つと考える。

本稿のおもな内容は、平成 26 年度原子力規制庁の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及び移行モデルの開発)事業の一環として実施したものである。空間線量率の将来予測図は、原子力機構が当該委託業務を実施する中で得た知見をもとに作成したものである。空間線量率分布の分布状況変化モデルは、今後新たな測定データ・知見が得られれば、その都度見直しを実施し、さらなる検討を加える。

－ 参考資料 －

- 1) 日本原子力研究開発機構、平成 24 年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書(2013), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry05.html>
- 2) 日本原子力研究開発機構、平成 25 年度原子力規制庁委託事業「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立事業」成果報告書(2014), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry06.html>
- 3) 日本原子力研究開発機構、平成 26 年度原子力規制庁委託事業「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及び移行モデルの開発」成果報告書(2015), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry07.html>

著者紹介



木名瀬栄(きなせ・さかえ)

日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター/茨城大学 連携大学院
(専門分野/関心分野)放射線防護、とくにファントムの開発と線量評価に関する研究

浜岡周辺地区での世論調査が語るもの

世代による原子力肯定比率の違い

常葉大学 山本 隆三

静岡県に立地する中部電力浜岡原子力発電所の近隣4市において、原子力発電に係る様々な問題に関するアンケート調査を実施した。約7600の回答を得たが、調査結果を分析する過程で分かったことがある。その一つは、世代により原子力発電を肯定する比率が異なり、若い世代ほど原子力発電を支持する比率が高いことだ。さらに、アンケート回答者においては高齢者の比率が高く、回答に年齢によるバイアスが掛かることも明らかになった。年齢構成を日本の年代別構成比に合わせ、原子力発電所の安全審査合格後の再稼働に関する回答を再計算したところ、再稼働肯定の比率が否定の比率を上回っていることが分かった。また、アンケートからは、原子力発電への理解を深めるため行うべきことも見えてきた。まず、アンケートから見えてきたことを第一回目として報告したい。

KEYWORDS: *Hamaoka Nuclear Power Station, Public Acceptance of Nuclear Power, Survey of Public Opinions, Energy Mix, Climate Change*

I. はじめに

原子力に関するアンケート調査を実施することを思いつuitしたのは、英国、米国における原子力発電に関する世論調査を分析した論文からだ。日本のマスコミ、地方自治体が行う原子力に関するアンケート調査では、単純にイエスカノーかを問う形が多い。例えば、「原子力発電所の再稼働に賛成か反対か」との設問を設けるだけだ。

欧米のアンケート調査例では、回答者の環境問題、エネルギー安全保証に関する関心の度合いなど、細かい設問が設けられていることが多い。日本においても単純にイエス、ノーかを問うのではなく、エネルギー、温暖化問題への関心の度合いなどによる賛否の比率を割り出せば、今後の原子力・エネルギー政策を策定する際の参考になる事項を明らかにできるのではと考え、調査を実施することにした。

アンケート調査を実施したのは、中部電力浜岡原子力発電所が立地する御前崎市とその周辺3市、掛川、菊川、牧之原市である。米英のアンケート調査でも立地地区の原子力発電所運転への賛成率は高くなっているが、その周辺では必ずしも高くはない。日本でも同様の傾向があ

Survey of public opinions in areas close to Hamaoka Power Station in Shizuoka : Ryuzo Yamamoto.

(2016年3月7日受理)

るものと推測されるが、その確認を行おうとしたものだ。

調査表は、2015年11月中旬から下旬に4市の4万弱の世帯に配布され、12月中旬までに約7600通の回答を得た。この回答を分析することにより割り出された結果を2回に分けて報告する。今回はアンケート調査から読み取れることを分析し、次回は調査結果に基づき、原子力・エネルギー政策立案に際し考えるべき点に触れたい。

II. アンケート調査と原子力反対派

アンケート表を送付した数日後に、原子力反対の論調で知られる新聞社より問い合わせの電話が掛かってきた。内容は「アンケートに記載している一部の質問事項が原子力賛成への誘導ではないか」との質問だった。その指摘された質問事項は表1に記載したものだ。日本のエネルギー自給率、原油、天然ガスの中東依存度、温暖化問題に関する動静、原子力発電所の停止により燃料購入量が増えていること、電気料金が値上がりしている事実を記載している。これは、エネルギー・環境問題への関心の度合いによる賛否の差を割り出すための事実の説明であり、これが賛成に誘導する質問というのであれば、事実関係を説明するアンケートは実施できなくなる。

表1 環境とエネルギーに関するアンケート項目

- ・化石燃料の輸入状況
- ・ホルムズ海峡の危険性
- ・地球温暖化の影響
- ・COP21の開催
- ・日本の温室効果ガス排出目標値
- ・追加の燃料費発生
- ・家庭用電気料金の上昇
- ・産業用電気料金の上昇

記者にその旨説明したところ、「原子力反対派の意見がアンケートには記載されていない」との更なる質問があった。当たり前だが、反対派、賛成派どちらの意見も記載していない。事実関係に基づく意見を聞くためのアンケートだから当然だ。記者に「賛成派の意見も記載はない。客観的な事実を説明するのがアンケートの主旨に沿っているはず」と説明したが、数日後には反対派が記者会見を行い、誘導的なアンケートと非難されることになった。反対する方は、電気代が上昇したという客観的な事実を知られるのは困るということなのだろう。

研究室の電話番号をアンケートでは問い合わせ先として公開したために、十数件の電話を受けることになった。アンケート内容の質問、反対の意見、賛成の意見、それぞれ3分の1ずつだった。賛成の方は「単純なイエス、ノーを問うアンケートでは分からない意見も吸い上げられる良いアンケートと思う。もっと大々的に実施して欲しい」という内容が大半だった。

反対の方には二種類あり、「賛成に誘導しているアンケートなのでけしからん」と言いたいことだけ言って電話を切る人、もう一つのタイプは「反対だけど、こういう疑問がある」として、原子力発電に関する様々な疑問を解明しようとする人だった。この疑問のなかには誤解も随分見受けられたが、こういう方に正しい知識をどのように学んで戴くかは、原子力発電に関する理解を深めて戴く際に今後十分考えるべき点だ。

Ⅲ. マスコミの世論調査の危うさ

マスコミが行うアンケート調査では、再稼働に賛成か反対か単純に尋ねるものが多い。例えば、2月16日付け朝日新聞は1月16日、17日に実施した世論調査の結果を取り上げているが、「いま停止している原子力発電所の運転を再開することに、賛成ですか。反対ですか。」との設問があり、回答は賛成31%、反対54%だ。

同様の質問を、私たちの調査でも行った。私たちのアンケート調査に回答を戴いた方の年齢構成を表2に示してある。表から年齢層に偏りがあることが分かる。日本の年齢構成では60歳以上の方は32.6%だが、アンケート回答者の比率は50%を超え53.1%だ。最新の人口構成比のデータで日本の人口構成に合わせ、アンケートの回答を再計算した結果を図1の全体の賛否に示した。ア

表2 アンケート年齢別回答比率と日本の人口階層

年齢階層	アンケートの階層比 (%)	全人口の階層 (%)
10代	0.5	9.3
20代	1.8	10.3
30代	4.5	13.1
40代	10.2	14.2
50代	19.9	12.1
60代	36.5	14.4
70代以上	26.6	18.2
合計	100.0	91.6

注：全人口階層は総務省資料(平成25年)

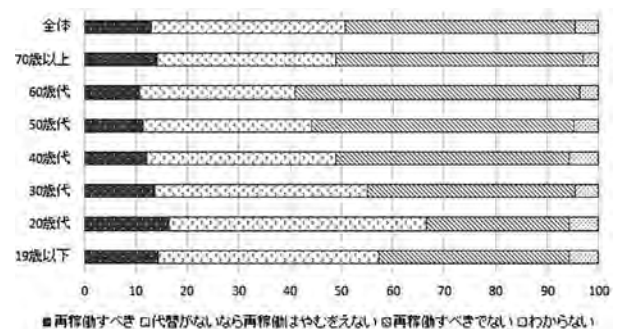


図1 再稼働に関する年齢別意見

注：全体の比率は総務省の年齢別構成比による

ンケートの年齢別の回答から、年齢層が高くなるに従って、安全審査合格後の再稼働に否定的な方が増加する傾向にあり、60歳代が最も否定的なことが分かる。

日本の人口構成を基にすると再稼働に肯定的な方が、50%を超えていることになり、アンケートを単純に集計することの問題が浮き彫りになる。マスコミのアンケート調査でも同様の問題が発生している可能性がある(注)。例えば、先に取り上げた朝日新聞のアンケートは、無作為に作成した番号に電話をかけ調査を行っているが、世帯用の固定電話を持つ時点で若い人の比率は極端に少ない筈だ。さらに、問題は世帯用の番号3909件に対し、回答が1943人、50%しかないことだ。アンケートに回答している年齢層は高いと容易に想像ができる。

マスコミは、世論調査を行う際に、時代の流れ、即ちITの発達を考える必要がある。昔ながらの固定電話で回答があったものだけ単純に集計すれば、高齢者の回答が色濃く反映された意見になっている筈だ。世論調査の結果については、対象となっている年齢層、その回答の内訳まで公表されていない限り、年齢のバイアスが掛かっていると疑ったほうがよさそうだ。

ただ、私たちのアンケートでも、回答者の男女比は約2:1であり、アンケートの回答者は男性のほうが多くなっている。男性よりも女性が再稼働に関し否定的な意見が相対的に多い。表3が示す通りだ。年齢と男女比でアンケートの回答を修正すれば、再稼働に肯定的な意見は私たちの結果を少し下回ることになると思われる。また、地域によっても、職業によっても意見は異なること

表3 再稼働に関する男女別意見

	合計	男性	女性
全体	7513	4970	2461
再稼働すべき	12.2	15.5	5.4
代替がないなら再稼働はやむをえない	33.5	33.6	33.2
再稼働すべきでない	50.3	48.0	54.9
わからない	4.0	2.9	6.5

注：年齢構成による修正を行っていない生のデータ。合計には不明83人のデータを含む

になる。

IV. 地域、職業による再稼働肯定率の差は

今回調査を実施した4市の位置図と、国勢調査による2015年10月1日現在の人口速報集計値を図2に示した。人口当たりの回答率は次の通りになる。掛川市3.7%，御前崎市3.1%，菊川市3.3%，牧之原市3.5%。立地自治体である御前崎市の回答率が相対的に若干低い

が、他市と大きな差はない。再稼働に関する回答を市ごとに見ていくと、立地御前崎市と周辺3市では再稼働に関する意見の相違がみられる。立地点では原子力発電所に対する肯定率が向上することが、他国でも確認されているので予想された結果であった。市ごとの回答については、図3を参照して欲しいが、年齢による修正を行っていないので、否定的な意見の比率が相対的に高くなっている。

また、今回の調査では、エネルギー、温暖化問題に関する関心の有無を調査しているが、市ごとの調査結果を見ると、原発の停止により燃料費が上昇していることを



図2 浜岡原発周辺図

注：市名の後の数字は人口

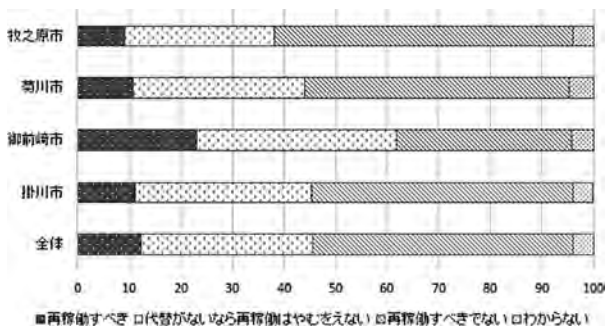


図3 再稼働に関する市別意見

注：年齢構成による修正を行っていない生のデータ。合計には不明104人のデータ含む

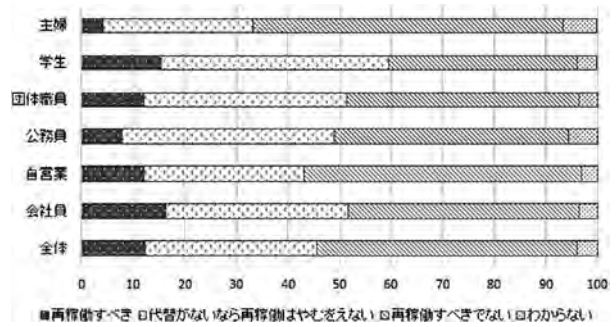


図4 再稼働に関する職業別意見

注：年齢構成による修正を行っていない生のデータ

知っているかどうかとの質問では、御前崎市のみ「知っていた」との回答が他の3市より高く、立地点の住民の方は、原発停止による燃料費上昇に比較的高い関心を持っていることが分かる。

テレビの情報番組出演時には、「視聴者の多くは専業主婦だが、その多くの方は原子力に否定的。テレビで再稼働問題にどこまで踏み込むかの悩みがある」との話を関係者から聞くことがあるが、先に述べたように、今回の調査でも女性が男性よりも再稼働に否定的であることが分かった。

今回アンケートに回答戴いた方の職業で最も多かったのは、年齢層を反映したと思われる「無職」であり約29%を占めた。次いで「会社員」24%、「自営業」16%、「主婦」14%、「公務員」4%と続いている。「再稼働すべき」と「代替がないなら再稼働やむなし」と答えた方を再稼働肯定と理解すると、肯定が否定より多かった職業は「会社員」「公務員」「団体職員」「学生」であった。最も再稼働に否定的であったのは「主婦」だった。図4が示す通りだ。

エネルギーあるいは気候変動問題に関心を持つ人の再稼働の肯定率は、関心のない人より相対的に高くなっている。その分析については、次回のレポートで触れることにしたい。

V. 原子力発電所増設に係る意見

日本政府は2030年の電力供給の目標値を発表している。その構成比は原子力20%から22%，再生可能エネルギー22%から24%，石油火力3%，石炭火力26%，LNG27%となっている。この目標値と同時に、2030年に向けエネルギー効率を35%改善する目標も設定されている。

この目標設定の背景には、2013年比で、2030年に温室効果ガスを26%削減するとの、気候変動枠組み条約の下で表明されている日本政府の目標がある。目標を達成するために二酸化炭素を殆ど排出しない低炭素電源の原子力と再エネによる発電比率を44%に設定し、その上で、さらに35%の省エネが必要になったと想像される。温室効果ガスの排出目標から逆算された数字と言っても過言ではないかもしれない。

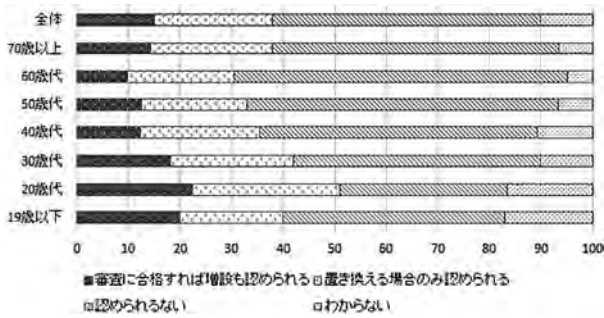


図5 増設関する年齢別意見

注：全体の比率は総務省の年齢別構成比による

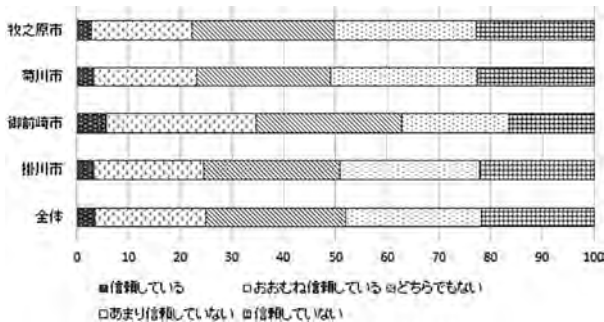


図6 日本政府の信頼度

低炭素電源の比率は電気料金の試算から決められたように思われる。固定価格買取制度により支援されている再エネ比率が増加すると電気料金が上昇するため、電気料金上昇を招かない範囲内で試算された再エネ比率に基づき原子力と再エネの比率が決められたのだろう。

原子力の比率を20%から22%にするためには、既存の一部原子力発電所の運転期間を40年から60年に延期する一方、既存の発電所を新設備により置き換えることも必要になる。あるいは、増設も必要になるかもしれない。この原子力発電所の増設あるいは既存設備の置き換えに関する意見もアンケートにより調査した。

その回答は図5に示されているが、安全審査後の再稼働に関する意見とほぼ同様の年齢別の傾向をしめしているものの、再稼働を肯定する比率との比較では、増設あるいは置き換えを認める比率は低くなっている。

同様に、原子力発電の比率を20%にするとの政府の方針に関しても、支持する比率は再稼働との比較では相対的に低くなり、増設あるいは置き換えとほぼ同じ比率になっている。原子力の比率を20%にするという政府方針に共感を得ることができなければ、温室効果ガスの削減目標達成も困難になるが、低い支持の背景には日本政府に対する低い信頼度がある。

4市ごとの日本政府への信頼度は図6に示されている。御前崎市の「信頼している」「おおむね信頼している」は他3市より高いものの、「あまり信頼していない」「信頼していない」の合計を下回っている。

VI. 政府への信頼度を高める必要がある

2030年の電力供給の目標値を政府は明らかにしたものの、20%から22%の原子力発電比率をどのように達成するかその道筋を明らかにしていない。原子力発電所の増設あるいは置き換えには、10年以上の期間が必要だ。2030年に必要な原子力発電所の能力を明らかにしている以上、政府は直ちにその達成のプロセスを示さなければ、温室効果ガスの排出目標を含め、エネルギーミックス、電源構成も達成が困難になる。プロセスを明らかにしない限り、政府への信頼度も高まらないと思われる。

4市における、政府の原子力政策への信頼度、日本政府の信頼度と比較すると、中部電力への信頼度は相対的に高くなっている。特に、御前崎市では「信頼している」「おおむね信頼している」の合計が47.2%に達しており、「信頼していない」「あまり信頼していない」の合計29.3%をかなり上回っている。

政府への信頼度との比較で事業者への信頼度が高い背景には、発電所で働く人が身近におり、その人柄などを通し信頼度が高まること、さらに事業者による地元住民への丁寧な説明の結果だろうと想像できる。

原子力発電への信頼を高めるためには、顔が見える説明者が必要とされるということだろう。では、どのような内容の説明を行えば良いのだろうか。説明の内容についてアンケートから分かったことを基に次回考えたい。(注：その後、マスコミの世論調査では、年齢構成の修正が行われていることが分かりましたので、関連部分の記述を削除します)

— 参考資料 —

次回掲載します。

著者紹介



山本隆三 (やまもと・りゅうぞう)
常葉大学経営学部教授
(専門分野/関心分野) 環境・エネルギー政策、環境経済学

中性子ビーム利用研究における研究用原子炉 JRR-3 の役割

これまでとこれから

日本原子力研究開発機構 武田 全康, 松林 政仁

国内において東日本大震災後、研究用原子炉が長期にわたり停止する中、軽水炉に引き続き、研究用原子炉の新規制基準対応審査も進展を見せ、ようやく国内での研究用原子炉の再稼働が視野に入ってきた。本解説では、日本原子力研究開発機構が所有する定常中性子源である研究用原子炉 JRR-3 で行われてきた中性子ビーム利用研究に焦点をあて、その概要とこれまでの利用実績を紹介する。次に大強度パルス中性子源である J-PARC の本格的な稼働による国内有数の研究用原子炉としての JRR-3 の位置づけの変化を踏まえた上で、JRR-3 が再稼働した後の中性子ビーム利用研究の方向性を議論する。

KEYWORDS: *Neutron Science, Materials Science, Structural analysis method, Analytical Science, nondestructive, research reactor, JRR-3*

I. はじめに

IAEA が出している研究用原子炉データベース (RRDB) によれば、計画中、建設中、解体中も含めた研究用原子炉 (以下、研究炉) は、地球上に 773 基あり、その中で 248 基が運転中、18 基が一時停止中となっている。国内には廃止措置中のものを除き、大小合わせて 11 基の研究炉が設置されている。東日本大震災を機に全ての研究炉は新規規制基準対応のため停止していたが、2016 年 5 月 11 日の原子力規制委員会で、京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) と近畿大学原子炉に対する審査合格のニュースがもたらされ、研究炉の再稼働によりようやく光りが見えてきた。

研究炉は様々な目的で利用されているが、本解説では、日本原子力研究開発機構 (原子力機構) が茨城県那珂郡東海村に所有する研究炉 JRR-3 に焦点を当てる。JRR-3 では中性子ビーム利用と照射利用の双方が行われてきた。中性子利用は震災が起きた 2010 年度の実績で約 22,000 人・日に及び、照射利用に比べ遙かに数多くの利用者を有する。ここでは、このビーム利用研究に対して、JRR-3 がこれまでに果たしてきた役割と、大強度

陽子加速器施設 (J-PARC) の物質・生命科学実験施設 (MLF: Materials and Life Science Experimental Facility) で、世界最高強度の中性子ビームが利用可能になった現状を踏まえ、JRR-3 における研究の方向性について議論する。

II. Japan Research Reactor 3 (JRR-3)

1. JRR-3 の概要

日本原子力研究所史によれば、JRR-3 は、わが国初の国産研究炉として誕生した。1964 年に臨界に達した後、約 21 年間にわたり原子力の黎明期を支える多くの研究 (原子炉の設計・製作・建設等の全般的な経験の獲得、動力炉用の原子燃料及び部品の性能及び寿命に関するデータの取得、再処理試験用燃料の供給並びに放射性同位元素の生産等) に広く活用された。しかし、増大する利用者のニーズに十分対応できなくなったため、1985 年から性能向上を目指した改造を行い、1990 年に熱出力 20MW、軽水減速、重水反射体付きプール型の高性能汎用研究炉として利用運転を再開した。

2. 改造後の JRR-3

改造後の JRR-3 には、それぞれ 9 本の水平実験孔と垂直実験孔があり、水平実験孔の全てと一つの垂直実験孔は中性子ビーム利用実験に、残りの垂直実験孔は材料

The Role of the Research Reactor JRR-3 in Neutron Sciences :
Masayasu Takeda, Masahito Matsubayashi.

(2016 年 4 月 18 日 受理)

照射に使われている。原子炉建屋は炉室とビームホールに別れ、炉室に9台、ビームホールに22台の合計31台の中性子ビーム利用実験装置が設置されている。その内の18台は原子力機構が、13台は東京大学物性研究所(物性研)、東北大学、京都大学が設置したものである。ただし、原子力機構が設置した18台の装置のうち、生命科学研究用のBIX-3とBIX-4は、2016年4月1日付けで発足した量子科学技術研究開発機構(量研機構)に移管されている。

Ⅲ. 中性子ビーム利用実験装置

1. 中性子の優れた性質

中性子ビームを利用した研究の主要な目的は、物質のミクロな構造解析や微量な元素分析である。そのために冷中性子や熱中性子の領域(1 μ eV - 100 meV)の中性子(熱冷中性子)が使われるが、それは以下に示すような他の手法には代えがたい、構造解析及び分析プローブとしての優れた特徴を有するからである。

- ・ 粒子であるとともに波動性を併せ持つ
- ・ 一部の同位体元素を多く含む物質をのぞき、物質に対する透過力が大きく、物質中の原子核と核力相互作用により散乱する
- ・ 中性子スピンと物質中の磁気モーメントの磁気双極子相互作用による磁気感受性を有する

- ・ 周期律表で隣り合わせの元素の識別能力や、重元素と軽元素が物質の中で共存する場合でも、軽元素に対する感受性を有する
- ・ 核散乱長、非干渉性散乱断面積、吸収断面積が同じ元素でも同位体ごとに異なる
- ・ 熱冷中性子の波長が結晶の格子間隔とほぼ等しいため、結晶格子による中性子の回折が起こり、それを利用して、結晶構造の決定や材料内部の応力ひずみの評価を行うことができる
- ・ 熱冷中性子のエネルギーが、物質中の原子、分子、スピンの運動(振動やゆらぎ)エネルギーと同程度であるために起こる非弾性散乱から、物質内部の動的な構造情報を引き出すことができる
- ・ 核反応を起こすことにより放出される元素固有のガンマ線や、放射性物質の生成・壊変により発生する放射線により、試料に含まれる元素の微量分析ができる

2. JRR-3の中性子ビーム利用実験装置

JRR-3に限らず国内外の中性子実験施設には複数のビーム孔が設けられており、多種多様な研究目的で様々な装置が設置されている。そこで行われる研究対象は生命科学から、物質科学、基礎物理学に至るまで非常に広い学術分野を網羅している。JRR-3には、原子力機構と大学が装置を設置しているが、原子力機構が設置した実験装置に関して、BIX-3, BIX-4をのぞき金属やセラ

表1 JRR-3に日本原子力研究機構が設置した中性子ビーム利用実験装置とその主な用途及び特徴。

装置種別	装置名	主な用途	特徴
中性子回折計	HRPD	粉末結晶構造解析	汎用, 核燃使用許可(以下核燃)
	BIX-3, BIX-4	タンパク質結晶構造解析	生命科学研究用
	RESA-1	応力ひずみ評価	大型構造物測定
3軸型中性子分光器	TAS-1	スピン波, 格子振動の観測, 磁気構造解析	偏極中性子利用, 核燃
	TAS-2		強磁場, 高圧力などの特殊環境, 核燃
	LTAS		低エネルギー励起の観測(< 5meV)核燃
中性子小角散乱装置	PNO	結晶粒, 粒界, 析出物, ボイドの分布や濃度揺らぎの観測	1 μ m程度の大きな構造
	SANS-J-II		非常に広い空間スケール(1nm-1 μ m)の構造解析, 偏極中性子利用, 核燃
中性子反射率計	SUIREN	表面, 多層薄膜の構造解析	偏極中性子利用が可
中性子イメージング装置	TNRF	構造物の内部非破壊観察	広い視野, 動画(最高2,000frame/秒), トモグラフィー
	CNRF		詳細分布, 吸収の小さな試料測定可
即発ガンマ線分析装置	PGA	元素非破壊定量分析	ロボットによる自動測定
	MPGA		同時計数法による高いS/N比, 高い確度での定量
機器開発用装置	MUSASI	多目的	汎用
	CHOP	パルス中性子用機器開発	パルス中性子源の模擬が可
	NOP	中性子光学機器開発	偏極中性子
放射化分析用照射設備	PN-3	元素の定性・定量分析	ppb-ppm オーダーの極めて高い感度

ミックスなどを研究対象とした場合の主な用途やそれぞれの装置の特徴を表1に簡単にまとめた。より詳細な装置情報は、JRR-3ユーザーズオフィスがWEB上で公開している¹⁾。また、各実験装置の測定原理やたくさんの利用研究例をインターネットや他の文献(たとえば、参考資料2,3)で見つけることができる。

IV. JRR-3 の利用実績

1. JRR-3 の利用者数と利用延べ日数

JRR-3は大震災による休眠状態に入るまでは、年間7サイクル(約170日)の運転が行われ実験に供されてきた。1994年度から2010年度の利用実績を図1の左上段に、1992年度から2013年度に公表された論文の数の推移を、全装置の延べ利用日数を原子力機構と大学が管理する装置に分けて左下段に棒グラフで示した。上段のグラフに折れ線で示したのは、延べ申請日数(実線)とJAEAの装置を使って行われた産業利用の日数(破線)である。上側の折れ線が示す申請日数と棒グラフの比が充足率となる。1998, 2000, 2009年度に利用日数が落ち込んでいるが、冷中性子源などの原子炉付帯設備の不具合によって運転日数が減少したためである。

改造JRR-3の利用開始からしばらくは、産業界による利用はなかったが、年に数件であったものが1998年から徐々に増え始め、2005年から右肩上がりに利用が伸びている。これは、文部科学省による「中性子利用技術移転推進プログラム」が2006年度から2010年度にかけてJRR-3で実施され、大学以外の研究機関や民間企業などの研究者・技術者が中性子ビーム利用実験を経験する機会が増えたことによる。このプログラムが有効に機能し、産業界の中性子利用が大きく広がったことがわかる。

2. JRR-3 の利用制度

原子力機構が管理する装置は、原子力機構の施設供用制度及び原子力機構と東京大学大学院工学系研究科原子力専攻で運営する共同利用及び原子力連携重点研究制度により、それ以外の大学の装置は物性研の共同利用制度により一般利用者が使うことができる。ただし、どの枠組みでも利用に当たっては、定期的に行われる課題公募で行われる審査により課題が採択されることが必要である⁴⁾。原子力機構の装置に関しては、共同研究契約による利用も可能であるが、量研機構の管理する装置(BIX-3, BIX-4)の利用方法は、執筆時点では未定である。

図1の右上に、2010年度における実施課題数の利用制度ごとの割合を円グラフで示した。2010年度で見ると実施された課題の中で、原子力機構の職員が主体的に行ったものは、装置課題、独自研究、共同研究を合わせたもので、全体の約1/3を占めている。一方、ここには示していないが、機構職員が主体的に行った実験を利用日数で見ると全体の約2/3を占めている。これは、装置の維持高度化に時間をかけていること、現地にいるので比較的長期間の実験をやりやすいためである。

3. 利用研究分野

実際にどのような研究分野に利用されたのかを、2010年度に関し、全利用可能日数(装置数×装置ごとの利用可能日数)に占める割合でみたものが、図1右下の円グラフである。装置・機器開発、磁性、生命科学研究が大きな割合を占めているが、これらの開発や測定には時間がかかることが多いことを反映している。「その他」には、地球惑星科学、超伝導、表面・界面、環境、イメージング、農林業などの研究分野が含まれている。しかし、成果占有型の施設供用(非公開)の情報を含めることはできないので、この円グラフの中には、実態とかけ離

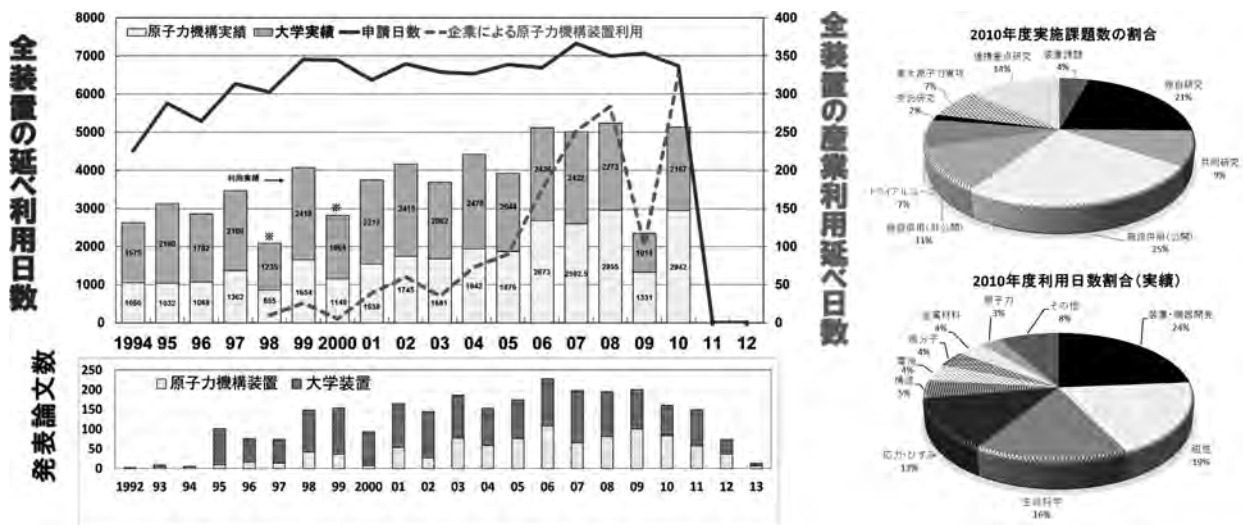


図1 JRR-3 利用実績(右上段)と JRR-3 利用研究による発表論文数(左下段)の年次推移, 2010(平成22)年度の実施課題数の利用制度ごとの内訳(右上)と研究分野ごとの利用日数の割合(右下)

れている研究分野があることに注意して欲しい。

V. 「原子力」と中性子ビーム利用研究

1. JRR-3 での学術研究の位置づけと意義

改造後の JRR-3 における中性子ビーム利用研究は、1956 年の第 1 期原子力長期計画に「原子力の研究、開発および利用を進めるにあたっては、動力としての利用面と放射線の利用面とを平行的に促進するものとする」として示された方針のうち、後者の放射線利用の側面が強く、一般的な「原子力」という言葉からは想像できない学術分野における基礎研究を中心として行われてきたのが実態である。これらの研究を今後も継続発展させていくこと、さらには、そこで得られた成果を国民に対してわかりやすく示して行くことは、福島事故以来、国民が「原子力」に対して抱いている負のイメージから脱却し、「原子力」の持つ人類の福祉の向上に貢献できるという側面に再度目を向けてもらうためには必要不可欠である。

2. 中性子を利用した「原子力」基礎研究

原子力を動力として利用するための、核燃料、被覆管、压力容器、配管などの軽水炉の構成要素(原子炉部品)が物質である以上、それらのミクロな構造情報が軽水炉の性能や安全性の向上にとって重要な鍵となりうる場合には、中性子ビームを利用した多くの先行研究がある。一例をあげれば、原子炉部品のミクロな構造と脆性の関係がある。原子炉部品は絶えず熱や高圧水蒸気などにさらされ昇温、降温を繰り返すため、原子炉部品は長期間の間に何度も構造相転移点を昇温と降温の際に通過する。結晶構造の変化に加え、温度履歴を繰り返すことによる、組成変化(たとえば UO_x の X の変化や UC の生成など)、双晶の形成、結晶粒界の変化、欠陥や析出物の生成などは、材料の脆性に影響を与える要因であるため、温度履歴により物質内部のミクロな構造がどのように変わるのかを知ることは重要である。結晶構造の変化は中性子回折法で、結晶粒界の変化、欠陥や析出物は中性子小角散乱法で調べることができる。その他の手法も含めた多くの先行研究例が参考資料 5 に紹介されている。

3. JRR-3 で行われた「原子力」関連研究例

(1) 軽水炉構成部品の中性子イメージング

中性子イメージングの特徴は、汎用的に用いられる X 線イメージングと異なり水素、炭素、ホウ素等の軽元素を含む材料を可視化でき、鉄、鉛、ウラン等の金属の透過像を得られることである。この特徴を生かして熱中性子ラジオグラフィ装置(TNRF)を用いた数多くの「原子力」に関連した研究が行われ、参考資料 3 の 201 頁に詳しく紹介されている。一例として、未照射の中性子ラジオグラフィ較正用核燃料ピンの中生子による透過画像と X 線による透過画像を図 2 に示す。中性子による透過



図 2 中性子(上)と X 線(下)による較正用核燃料ピンの透過像

画像では燃料ペレットの中空部及びギャップが明瞭に確認できるが、X 線では確認が困難であることがわかる。

(2) 2 重伝熱管の残留応力分布評価⁶⁾

応力評価装置である RESA-2(2015 年度で廃止)の測定と計算シミュレーションを併せて、次世代ナトリウム冷却高速炉の加熱型蒸気発生器用の候補として検討されている 2 重伝熱管の残留応力分布評価が行われた。この 2 重伝熱管では伝熱性能を維持するために外管と内管は初期残留応力により機械的に密着しているが、長期に亘る蒸気発生器の使用で応力の緩和が生じ、これにより面圧が低下し伝熱性能が劣化していくことが問題となっていた。RESA-2 で測定した初期残留応力を初期入力パラメータとして用いた数値解析の結果、使用期間に亘って所要の面圧が維持されるとの結論が得られた。

VI. 大強度パルス中性子源時代を迎えて

1. JRR-3 と MLF

米国オークリッジ国立研究所の SNS (Spallation Neutron Source) が端緒を切った陽子加速器大強度パルス中性子源が、国内でも MLF で利用可能となり、さらに、EU と中国でも新たな実験施設の建設が進められている⁷⁾。現時点で世界最高強度を誇るパルス中性子源を持つ MLF は JRR-3 と同じ原子力機構の原子力科学研究所の敷地にあり、両者は直線距離で 800 m しか離れていない。そして、MLF にも JRR-3 に負けず劣らず多種多様な中性子利用実験装置が設置され、幅広い分野を網羅した研究が行われている。そのため、「MLF があるなら JRR-3 は必要ないのでは？」という声が専門外の方から上がってくるのは自然な流れといえる。なぜ JRR-3 の再稼働を今か今かと待ち望む研究者が少なくないのだろうか?⁸⁾

2. 中性子に貴賤なし

国内の中性子業界では、「Every neutron is good neutron.」という言葉が知られている。これを筆者は、RI、原子炉、加速器によらず、中性子源から取り出されるものは中性子であって、それらをその特性に応じてうまく使いこなすことが、中性子業界に生きる人間に求められているものと解釈している。

中性子散乱法により構造情報を得ようとする場合、試料に入射する中性子と出射する中性子の波長がわかっていることのできるパルス中性子源では、中性子が生まれて検出器に到達するまでの時間を波長やエネルギーと対応

づけられる(飛行時間法)。そのため MLF の場合、25Hz で中性子源へ入射する陽子パルスによって発生したいろいろな波長の中性を有効に使えるので、一度に広い時間空間の構造情報を得ることができる。

一方、原子炉から出た中性子では飛行時間法が使えないので、原子炉から取り出されたいろいろな波長を含む中性子の中から、モノクロメータなどで特定の波長を切り出して使うのが一般的である。切り出された中性子の強度は、同じ波長で比較した MLF での中性子の時間平均強度よりも大きいので、限られた領域の構造情報を精密に取り出すのに適している。

3. 望遠レンズと広角レンズ

カメラのレンズに例えれば、MLF は広角レンズで、JRR-3 は望遠レンズであるといえる。広角レンズによる画像には局所構造のデータも含まれているが、画像を拡大すればするほど精度は落ちる。一方で、望遠レンズで広い範囲を何度もシャッターを切って埋め尽くすのは効率が悪い。広角レンズ(MLF)は全体像を眺めるのにはとても有効だが、望遠レンズ(JRR-3)でなければ得ることが難しい情報があるため、それを使いたい、あるいは両方使いたいと思う研究者はいなくなるのである⁸⁾。

4. JRR-3 の持つ優位性

一般の研究者の関心を引くことはないが、表 1 に示したように JRR-3 では核燃料物質の使用許可を持つ装置があるのも「原子力」研究を進める上では重要である。これは、許認可の問題でしかないが、JRR-3 では高速中性子の影響がほとんどないのでバックグラウンドが低く、装置周りに分厚い遮蔽体が必要ない。そのため、頻繁に装置の試料位置にアクセスしなければならない特殊試料環境装置を用いた実験や機器開発などは、JRR-3 の方が圧倒的にやりやすいという本質的な違いもある。

また、MLF では大量のデジタルデータを計算機で処理する必要があるが、この処理は一般利用者には実質ブラックボックスとなっており、特に中性子利用研究を初めて行う学生の教育には不向きである。一方、JRR-3 で扱わなければならないのは、基本的には中性子カウント数という単一の数値であるため直感的で理解しやすい。

VII. まとめ

JRR-3 の運転維持管理には多額の費用が必要である。JRR-3 の早期再稼働を果たし、それを有効活用していくためには、望遠レンズが単なる研究者のおもちゃではなく、研究成果を通してその投資が社会に還元できることをわかりやすく示し、一般社会の理解を得ることが必要

不可欠である。そのためには、まず、成果の創出を行わなければならないが、我々がこれまで JRR-3 で行ってきた学術研究を確実に進めるとともに、「原子力」研究への貢献を付け加えることは、原子力の総合研究機関である原子力機構が所有する施設である以上自明である。

これまで、原子力機構で JRR-3 による研究を主に担ってきた量子ビーム応用研究センターは、2016 年 4 月 1 日付けで、原子力機構が所有する中性子と放射光を使った先端的な微視的構造・機能解析技術を駆使し、原子力科学、原子力利用に資する物質・材料科学研究を推進することを目的として、物質科学研究センターへと改組された。

このセンターの強みは、中性子と放射光を利用した微視的構造解析装置を JRR-3 と SPring-8 に所有し、それらの維持・高度化を行うだけでなく、その両者において放射性物質を取り扱うことのできる設備及び知識と技術を有していることである。その上で、センターは中性子と放射光の連携と、原子力機構内外の研究者との連携により、「原子力」研究の推進を加速する役割を担っている。最後まで拙稿に目を通していただいた、「原子力」の専門家の方々との共同研究を夢見ながら筆を置くことにする。

— 参考資料 —

- 1) <http://jrr3uo.jaea.go.jp>
- 2) 「中性子回折の基礎と応用」, 社団法人 日本アイソトープ協会編 2012 年. [in Japanese]
- 3) 「中性子イメージング技術の基礎と応用」, 社団法人 日本アイソトープ協会編 2009 年. [in Japanese]
- 4) http://www.jsns.net/jp/html/message/n_contact_info.html に各制度の相談窓口がまとめられている.
- 5) Sven C. Vogel, *ISRN Materials Science*, 2013, 302408 (2013).
- 6) N. Kinohara, H. Suzuki, K. Akita, N. Kasahara, *Proc. ICAPP '12* (Chicago) 12220 (2012).
- 7) <http://neutronsources.org/neutron-centres.html>
- 8) JRR-3 停止の影響による海外の研究炉利用状況調査 <http://jrr3uo.jaea.go.jp/pdf/topics/201603073.pdf>.

著者紹介



武田全康 (たけだ・まさやす)

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 物質科学研究センター
(専門分野/関心分野) 偏極中性子散乱法による物性研究/中性子反射率法



松林政仁 (まつばやし・まさひと)

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 物質科学研究センター
(専門分野/関心分野) 中性子ラジオグラフィ/中性子イメージング技術

サイエンスよみもの

加速器で生成したニュートリノを用いて 粒子と反粒子の違いを探す 東海－神岡間長基線ニュートリノ振動実験 T2K

高エネルギー加速器研究機構 中平 武

2015年、梶田隆章氏、アーサー・マクドナルド氏のノーベル物理学賞受賞をきっかけに、近年に「ニュートリノ」がニュースに現れた年となった。1998年のニュートリノ振動の発見により、ニュートリノの質量がゼロでないことが実験的に示され、素粒子の「標準模型」を超える新しいパラダイムが拓かれた。現在ではニュートリノ振動の精密測定は素粒子物理学の最前線の一つであり、そのフロントランナーのT2K(Tokai-to-Kamioka)実験について紹介する。

KEYWORDS: High intensity proton accelerator, neutrino oscillation, Accelerator-based long baseline neutrino experiment, T2K experiment

I. 加速器によるニュートリノの生成

茨城県東海村にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)と日本原子力機構(JAEA)が共同で運営する大強度陽子加速器施設J-PARC¹⁾では、2009年度より岐阜県飛騨市神岡町にある東京大学宇宙線研究所の大型水チェレンコフ素粒子観測装置スーパーカミオカンデ²⁾にむけて素粒子の一つであるニュートリノを大量に生成している。そのニュートリノビームを用いてニュートリノ振動

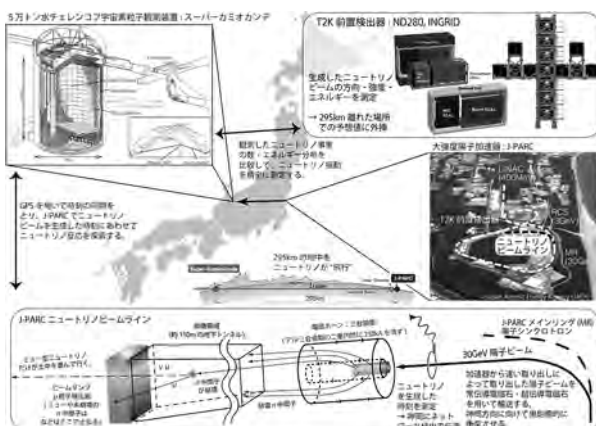


図1 J-PARC ニュートリノ実験施設と T2K 実験の概要⁴⁾

Search for the matter-antimatter asymmetry in the accelerator-produced neutrinos: Tokai-to-Kamioka long baseline neutrino oscillation experiment (T2K) : Takeshi Nakadaira
(2016年1月23日受理)

現象の全貌の解明をめざす東海－神岡間長基線ニュートリノ振動実験：T2K 実験^{3,4)}が進行中である。(図1)

J-PARCでは、加速器を用いて30GeVに加速された陽子を神岡の方向にむけて瞬時的(約5 μ 秒)に黒鉛製標的に照射する。その反応で生成された大量の π 中間子を“電磁ホーン”とよばれるパルス電磁石が発生させるトロイダル磁場を用いて集束する。 π 中間子は神岡方向へ飛行しながら μ 粒子と μ ニュートリノに崩壊する。 μ 粒子はビームダンプで止められるが、 μ ニュートリノは神岡方向に向かって土の中を飛行していく。スーパーカミオカンデは、約2.5秒おきにくるニュートリノビームのタイミングに合わせて50ktの純水中でおきたニュートリノ反応を検出する。J-PARC内で前置検出器によって測定した生成直後のニュートリノのフラックス・エネルギー分布を外挿した予測と、スーパーカミオカンデでの測定を比較することで約300km飛行する間のニュートリノの変化を捉える。

II. ニュートリノ振動とは

1. 素粒子の「標準模型」

「物質を構成する最小単位(素粒子)は何か」を探る素粒子物理学は、二十世紀の粒子加速器の飛躍的な進歩により“標準模型”(the standard model)と呼ばれる描像にたどりついた。標準模型では、物質を構成する素粒子は12種類あり、これらの素粒子には重力と電磁気力にくわえ

表1 物質を構成する素粒子の一覧

	第一世代	第二世代	第三世代	電荷
クォーク	u: アップ 質量=2.3MeV	c: チャーム 質量=1.3GeV	t: トップ 質量=173GeV	+2/3
	d: ダウン 質量=4.8MeV	s: ストレンジ 質量=0.1GeV	b: ボトム 質量=4.2GeV	-1/3
レプトン	e: 電子 質量=0.5MeV	μ : ミュー 質量=0.1GeV	τ : タウ 質量=1.8GeV	-1
	ν_e : 電子ニュートリノ	ν_μ : ミュー(μ) ニュートリノ	ν_τ : タウ(τ) ニュートリノ	0

て、“強い相互作用”と“弱い相互作用”の計4つの力がはたらく。強い相互作用は、原子核を構成する陽子や中性子を結び付けている力である。弱い相互作用は、原子核の β 崩壊で中性子が陽子(+副産物)に変わる反応のように、粒子の種類を変える反応をおこす相互作用である。物質を構成する素粒子は、強い相互作用をする6種類のクォークと、強い相互作用をしない6種類のレプトンに分類される。そのうちレプトンは、電磁相互作用をする電子、 μ 粒子、 τ 粒子の3種類の荷電レプトンと、電磁相互作用をしないニュートリノに分類される。(表1)

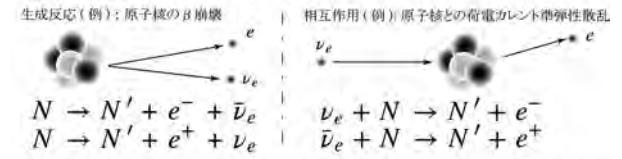
ニュートリノは、原子核の β 崩壊のときに電子とともに発生している粒子である。 β 崩壊の終状態の電子のエネルギー分布から運動学的にニュートリノの質量を求め実験がおこなわれたが、どの結果も検出限界以下(電子の25万分の1以下)という結果であったので、“標準模型”では、ニュートリノの質量はゼロとされた。

それぞれの素粒子には、質量は同じで電荷などの固有量子数の符号が逆の“反粒子”が存在する。例えば、負の電荷をもつ電子に対して、質量は同じだが正の電荷をもつ陽電子が存在する。ニュートリノに関しては、弱い相互作用したときに負の荷電レプトン(電子など)を生成するものをニュートリノとよび、正の荷電レプトン(陽電子など)を生成するものを反ニュートリノとよぶ。

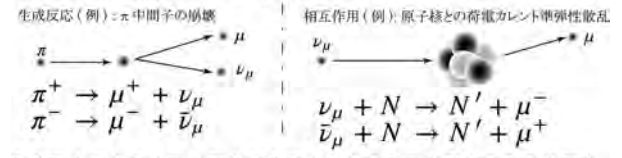
標準模型は、これまでに得られた素粒子実験の結果をほぼ完璧に記述することができる。しかし、素粒子物理には「なぜクォークや荷電レプトンはそれぞれ違う質量をもつのか?」「なぜ4つの相互作用があるのか?」「宇宙が誕生したとき素粒子はどうやってできたのか?」など、標準模型では解けない根源的な問いがいくつも残っている。これらの問いに迫るためには、新しい法則性を付け加えて標準理論を越える理論(Beyond the standard model)を構築することが必要である。

1998年のニュートリノ振動現象の発見は、ニュートリノの質量がゼロでないことを証明した。これは、「標準模型にない新たな実験的事実」で、「標準理論」に何を足さないといけないか?という突破口を拓いたと言える。Beyond the standard modelへの大ヒントであるニュートリノ振動の全貌を解明するのが、T2K実験の目的である。

電子(型)ニュートリノ



ミュー(型)ニュートリノ



タウ(型)ニュートリノ

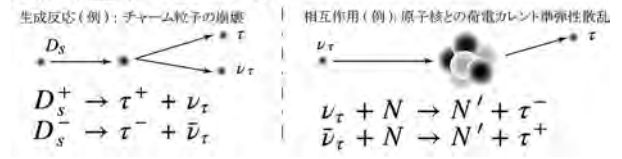


図2 3種類のニュートリノの違い

2. 3種類のニュートリノ

標準模型では、クォークや荷電レプトンの場合はその質量によって分類され、質量以外の性質は同じである。一方、ニュートリノは質量では分別できないので、弱い相互作用の反応の種類によって3種類に分類される。

ニュートリノは、原子核の β 崩壊などの弱い相互作用で生成されるとき、荷電レプトンと一緒に生成される。このとき、ペアとなって生成される荷電レプトンの種類に対応して、電子(型)ニュートリノ、 μ (型)ニュートリノ、 τ (型)ニュートリノの計3種類がある(図2)。逆に、ニュートリノが原子核と弱い相互作用によって反応して荷電レプトンを放出する場合にも、ニュートリノの種類と放出される荷電レプトンの種類は対応している。電子ニュートリノと原子核の反応からは電子が放出され、 μ ニュートリノと τ ニュートリノと原子核が反応した場合には、それぞれ μ 粒子、 τ 粒子が放出される。したがって実験的には、「どのような反応で生成されたか?」「ニュートリノが反応してどの種類の荷電レプトンが生成されたか?」を決めることによってニュートリノの種類を同定する。

3. ニュートリノ振動

素粒子は微小な世界を記述する量子力学に従っていて、ニュートリノも例外でない。ニュートリノ振動は量子力学のエッセンスである“状態の重ね合わせ”、“粒子と波動の二重性”、“異なる状態の干渉”の3つの概念で理解することができる。

電子型、 μ 型、 τ 型という分類は、「どの反応をおこすか?」の違いで、それぞれは“弱い相互作用の固有状態”である。もしニュートリノにゼロでない質量があるならば、3種類の質量の値(m_1, m_2, m_3)をとりうると考える

のが自然であろう。ただし、「弱い相互作用の固有状態」と「質量の固有状態」が一一対応とは限らない。たとえば、1つの弱い相互作用の固有状態は、3つの質量固有状態の重ね合わせと考える必要がある。このとき、各々の弱い相互作用の固有状態が、3つの質量固有状態がどのような比率で含んでいるかは一意に決まっている。逆に、各々の質量固有状態が、3つの弱い相互作用の固有状態をどのような比率で含んでいるかも一意に決まっている。

T2K 実験では、最初に μ ニュートリノを生成する。1つの μ ニュートリノは、質量 m_1 、質量 m_2 、質量 m_3 の3つの固有状態を含みうる。その後、生成されたニュートリノは「運動方程式」にしたがって飛行することになるが、「運動方程式」は質量を含むので、3つの質量固有状態はそれぞれ異なった伝播をする。量子力学では粒子は波として伝播するが、質量の違いは波長(振動数)の違いに現れる。波長が違う3つの波は進むにつれて位相がずれるので、一定距離飛行したあとのニュートリノの状態は、初期状態とは異なる比率で3つ質量固有状態が重ね合わさったものとなっている。一方、各々の質量固有状態にしろ μ ニュートリノ成分の比率は距離によらず不変である。すると、一定距離飛行したあとの3つ質量固有状態の μ ニュートリノ成分の和は、初期状態とは異なる値になる。

つまり、生成された時点で100%が μ ニュートリノ成分であった状態が、一定距離飛行すると μ ニュートリノの成分が100%を切ることがありえる。また、生成された時点では電子ニュートリノ成分は0であったのに、一定距離飛行すると電子ニュートリノ成分が0でなくなることもありえる。これは、「ニュートリノは時間がたつにつれて弱い相互作用で分類したニュートリノの種類が変化する」ということである。これがニュートリノ振動である。

ニュートリノ振動は、量子力学の導入によく用いられる「電子の二重スリット実験」とよく似ている。(図3)ひとつずつ電子を二重スリットの間を通過させて到達位置を測定する実験では、それぞれの終状態に対して、スリット1を経由する場合とスリット2を経由する場合の異なる中間状態を経由する2つの波動関数が干渉を起こし、到達位置の確率分布に干渉縞が現れる。T2K 実験では、発生した μ ニュートリノが、「 m_1 という質量をもって伝搬する場合」と、別の「 m_2 または m_3 という質量をもって伝搬する場合」の異なる中間状態を経由する複数の波動関数が干渉を起こすことで、 μ ニュートリノを観測する確率分布に観測位置による干渉縞が現れている、という解釈もできる。この描像では干渉をおこすためには中間状態が異なっていることが必要条件であり、したがってニュートリノ振動が起きるためには中間状態の質量値が異なることが必要条件である。つまり、ニュートリノ振動の存在は「ニュートリノの質量値が全

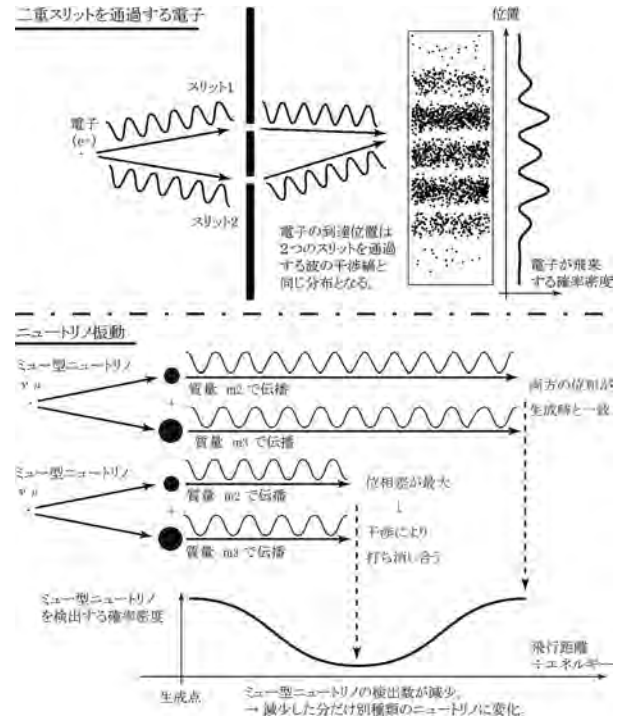


図3 「電子の二重スリット実験」とニュートリノ振動のアナロジー

て同じ」という可能性を排除する。すなわち、「少なくとも1つの質量値はゼロでない」という結論が導かれる。

この飛行距離に依るニュートリノの種類の変化がニュートリノ「振動」とよばれるのは、ニュートリノの検出確率の変化が、飛行距離に応じたサインカーブを描くためである。その「波長」は、(ニュートリノのエネルギー ÷ ニュートリノの質量の二乗の差)に比例している。

4. 加速器実験でのニュートリノ振動の観測

ニュートリノ振動の効果が最初に顕著にあらわれるのは、振動の位相が反転する「波長」の1/2の距離である。ニュートリノ振動を精度よく観測するためには、基線長(ニュートリノ発生源からニュートリノ検出器までの距離)をこの距離に設定するのが適切である。したがって、基線長は、生成するニュートリノのエネルギーに比例し、ニュートリノの質量(の二乗の差)に反比例する。

実験的に μ ニュートリノを同定するには、検出器を構成する原子核との反応(図2中段右)によって生成される μ 粒子を検出する必要がある。その反応断面積はニュートリノエネルギーが低くなるほど小さく、そもそも μ 粒子の質量(0.1GeV)よりも低エネルギーのニュートリノはこの反応をおこしえない。 μ ニュートリノを検出する加速器ニュートリノ実験で、ニュートリノのエネルギーを約400MeV以下に設定するのは実験的に非常に不利になるので、基線長を短く設定するには限界がある。また、ニュートリノの質量(の二乗の差)が小さいという自然界の性質からも、基線長を長くすることが必要とな

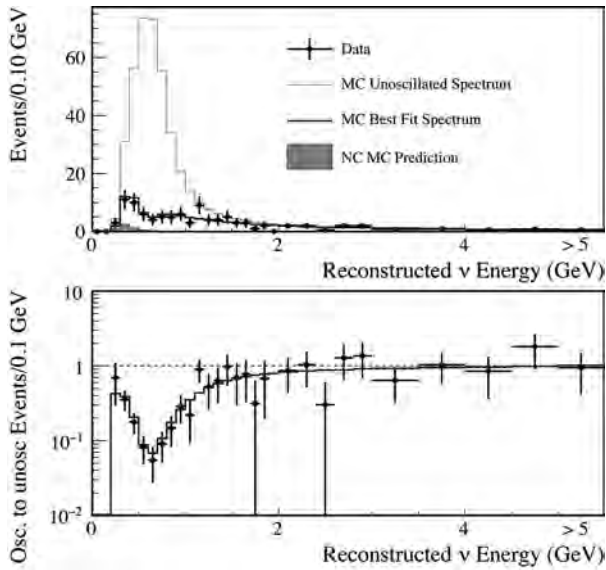


図4 T2K 実験で 2013 年までにスーパーカミオカンデで検出した J-PARC ニュートリノビーム由来の μ ニュートリノ反応のエネルギー分布と前置検出器での観測の外挿(上図), およびそれらの比(下図)⁵⁾。

る。ニュートリノの質量が極端に小さいがゆえに、「極小の世界を記述する量子力学の効果であるニュートリノ振動を観測するために、100km オーダーの長距離を必要とする」というのはなんとも不思議なものである。

加速器ニュートリノ実験では、もちいる加速器、測定器が大型であるため、これらの位置を変えながら距離の関数としてニュートリノ振動を測定するのは現実的ではない。その代わりに、エネルギーの関数として測定する。図4の T2K 実験の最新の解析結果⁵⁾では、 μ ニュートリノの検出確率がエネルギー(の逆数)に対してサインカーブを描いている。この振幅がニュートリノ振動の大きさで、確率が最小となるエネルギーからニュートリノの質量の二乗差が求められる。

Ⅲ. 粒子と反粒子は何が違うのか？

1. なぜ原子は陽子・中性子と電子からできているのか？

加速器などを用いて高エネルギーな状態を実現すると、新たに陽子や電子などの粒子を生成することができるが、かならず反陽子、陽電子などの反粒子とペアで生成される。ビッグバンで宇宙が生成されたときにも粒子・反粒子が同じ数だけ生成されたはずであるが、自然界には反陽子、反中性子と陽電子からできた“反物質”はみあたらず、現在の宇宙は粒子と反粒子の数は全く不均衡である。これは大きな謎である。

このような粒子と反粒子が不均衡な宇宙が生成されるための「サハロフの三条件」と呼ばれる必要条件の一つが「粒子と反粒子は従う物理法則が違う」という条件である。“反粒子の物理法則”は、“粒子の物理法則”に電荷の正負と空間の左右を逆にしたものである(“CP 変換”)。

この両者に違いがあることを“CP 対称性の破れ”と呼ぶ。これまでにクォークでは“CP 対称性の破れ”が発見されていて、小林誠氏、益川敏英氏による「素粒子には3世代6種類以上のバリエーションが存在し、それらが互いに混ざり合うことで CP 対称性が破れる」という理論(2008 年ノーベル賞)が実験で証明されている。しかし、クォークでの“CP 対称性の破れ”は小さく、現在の宇宙を定量的には説明できないと考えられている。そのため、現在の宇宙を形成する主因となった別の“CP 対称性の破れ”があるはずで、それがなにかを究明することが重要な課題である。その大本命が「レプトンで大きく CP 対称性が破れている」という可能性で、その場合ニュートリノ振動に“CP 対称性の破れ”が現れると考えられている。

2. ニュートリノ振動の全貌解明による CP 対称性の破れの探索

(1) CP 対称性が破れるための“必要条件”

“小林・益川理論”のエッセンスは、「CP 対称性が破れるには、素粒子が2世代4種類では足りない」という点にある。つまり、レプトンの CP 対称性が破れるには、「3種類のニュートリノの全てがまざってニュートリノ振動している」ということが必要条件となる。T2K 実験以前の実験は、「 μ ニュートリノはニュートリノ振動でほとんどが τ ニュートリノに変化している」という結果であった。しかし、もし CP 対称性が破れているならば一部の μ ニュートリノは電子ニュートリノに変化しているはずである。

(2) 全てのニュートリノ振動モードを“コンプリート”

T2K 実験の第一の目標は、 μ ニュートリノからニュートリノ振動によって変化した電子ニュートリノを探索することであった。それまで未発見であった「ほんの一部の電子ニュートリノへの変化」を捉えるため、とにかく大強度のニュートリノビームを生成することが実験成功のための最重要課題である。J-PARC のニュートリノ実験施設は 2009 年度から稼働し、2010 年1月より T2K 実験は本格的な実験を開始した。大地震などの予期せぬ中断を乗り越え、2013 年に μ ニュートリノから変化して現れた電子ニュートリノを世界で初めて“発見”した。(図5)

これにより、ニュートリノで CP 対称性の破れがおきうる可能性が示された。このニュートリノ振動モードは原子炉からの反電子ニュートリノを用いた実験(Daya Bay 実験, Double CHOOZ 実験, RENO 実験)でも発見された。この“第三の振動モードの探索”では、最初に T2K 実験が兆候⁶⁾(6つの候補事象)を見つけたが、さきに“発見”(5 σ 以上の信頼性)したのは原子炉実験であった。

(3) ニュートリノで CP 対称性の破れはどこに現れるのか？

T2K 実験が測定している、 μ ニュートリノから電子

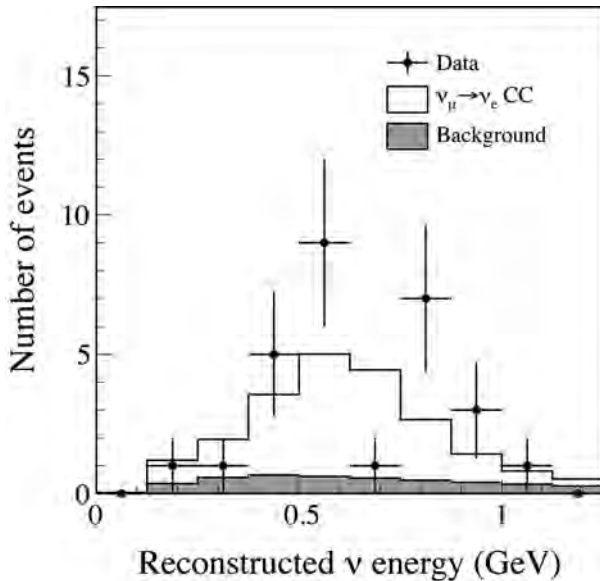


図5 T2K 実験でスーパーカミオカンデにより検出された J-PARC ニュートリノビームに由来する電子ニュートリノ事象候補のエネルギー分布の最新結果⁵⁾。予想されるバックグラウンドが4.97 事象であったのに対して、実際にはそれよりも統計的に有意に多い28 事象が観測された。

ニュートリノへの振動は、「単純なニュートリノ振動」に加えて「CP 対称性の破れ」の大きさによって変化する成分がある。つまり、T2K 実験は、「CP 対称性の破れ」の効果も含んだニュートリノ振動を観測する。しかも、この「CP 対称性の破れ」の効果は、粒子のニュートリノ振動(μ ニュートリノから電子ニュートリノへの変化)と、反粒子のニュートリノ振動(反 μ ニュートリノから反電子ニュートリノへの変化)では全く逆に現れる。

ちなみに、原子炉実験では、商業用原子炉で発生する大量の反電子ニュートリノが一定距離飛行すると、ニュートリノ振動で別の種類のニュートリノに変化して数が減少するのが観測される。この方法では、「CP 対称性の破れ」の効果を含まない「単純なニュートリノ振動」だけを測定することができる。

(4) どうやって CP 対称性の破れの大きさを求めるか？

J-PARC ニュートリノ実験施設では、電磁ホーンの電流の向きを切り替えることによって、 μ ニュートリノのビームだけでなく、反 μ ニュートリノのビームも生成することができる。つまり、T2K 実験は、粒子のニュートリノ振動と、反粒子のニュートリノ振動の両方を測定し、その差を見ることで「CP 対称性の破れ」を直接探索することが可能である。とはいえ「ニュートリノ振動」と「反ニュートリノ振動」の差は最大でも25%と予想され、その小さな差を区別するのに十分な大強度のニュートリノを生成できるかが実験の成否を決める。T2K 実験は2014 年度より反ニュートリノビームの実験も開始し、「CP 対称性の破れ」の探索をまさに始めたところである。現時点では陽子ビーム強度約350kW で(反)ニュートリ

ノビームを生成しているが、早期に設計ビーム強度750kW を達成し、さらに1MW を越える大強度のニュートリノ生成をめざしている。

また、別のアプローチも可能である。T2K 実験で測定している「CP 対称性の破れ」の効果も含めたニュートリノ振動の大きさから、原子炉実験で測定された「CP 対称性の破れ」の効果を含まないニュートリノ振動の大きさを差し引くことで、「CP 対称性の破れ」の効果を見積もることが可能である。T2K 実験と原子炉実験の最新の結果を合わせると、統計誤差はまだ大きいものの「大きな CP 対称性の破れ」の可能性を示唆している⁵⁾、注目を集めている。「第三のニュートリノ振動の探索」では互いに先を争った T2K 実験と原子炉実験であるが、「CP 対称性の破れの探索」に関しては、協業関係にあるといってもよい。

(5) ニュートリノの CP 対称性の破れの探索の先陣争い

ニュートリノ振動での CP 対称性の破れは世界的にも注目されている。米国でも2014 年から基線長810km での長基線ニュートリノ実験(NO ν A 実験)が始まり、CP 対称性の破れの兆候をさがしはじめている。後発ながら NO ν A 実験は順調にデータ蓄積をして猛烈に追い上げており、J-PARC および T2K 実験グループもビーム強度の向上とビーム運転時間の確保に躍起になっている。T2K 実験と NO ν A 実験は CP 対称性の破れの探索に関しては先を競っているが、基線長の違う2つの実験の結果を組み合わせることで別のニュートリノの性質が明らかになる可能性がある。「ニュートリノの質量階層性問題」これに関しては、それぞれの実験で単独に解くことは容易ではない。T2K 実験と NO ν A 実験は、お互いに相補的に競争しあう、理想的なライバル関係と言える。

VI. むすび

素粒子のなかでも弱い相互作用のみに支配されるニュートリノは、「パリティ対称性の破れ」や「ニュートリノ振動」など、その性質が明らかになるたびにそれまでの常識をくつがえしてきた。「ニュートリノと反ニュートリノは実は同じ粒子ではないのか?」「質量の絶対値はいくつか?」などまだまだ多くの謎が残っている。

前述のとおり原子炉実験と加速器実験を組み合わせると「CP 対称性の破れ」を2つのアプローチで測定できるが、それらは一致するだろうか?もし2つが一致すると、ニュートリノ振動に関しての理解が間違っていないという揺るぎない証明になる。逆に一致しない場合、ニュートリノ振動に関してこれまでの常識にない新しい物理法則の糸口かもしれない。素粒子物理が追い求める「Beyond the standard」の端緒に手がとどくかもしれない T2K 実験にご期待ください。

- 参考資料 -

- 1) 大強度陽子加速器施設(J-PARC): <http://j-parc.jp/>
- 2) S. Fukuda *et al* [Super-Kamiokande Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A501 (2003) 418-462
- 3) T2K 実験グループ: <http://t2k-experiment.org/ja>
- 4) K. Abe *et al* [T2K Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A 659, 106 (2011)
- 5) K. Abe *et al* [T2K Collaboration], Phys. Rev. D 91, No. 7, 072010 (2015)
- 6) K. Abe *et al* [T2K Collaboration], Phys. Rev. Lett. 107, 041801 (2011)

著者紹介



中平武 (なかだいら・たけし)
 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所/J-PARC センター(専門分野/関心分野)高エネルギー物理学/ニュートリノ物理

日本原子力学会発行 一般書籍販売のご案内

一般社団法人 日本原子力学会事務局

■書籍購入方法

日本原子力学会HPの書籍販売のページよりご注文ください。ご注文いただきましたら、書籍と請求書をお送りいたしますので、金融機関にてお振込(※)をお願いいたします。

書籍販売のページ

<http://www.aesj.net/publish/shopping>

※個人購入の場合、法人購入でも初めて購入される場合は、支払い方法が「先払い」となりますのでご注意ください。

■問合せ先

一般社団法人 日本原子力学会事務局
 〒105-0004 東京都港区新橋2-3-7,
 TEL: 03-3508-1261, FAX: 03-3581-6128,
 E-Mail: syoseki@aesj.or.jp

■振込先

各行とも(社)日本原子力学会・普通預金口座
 三菱東京UFJ銀行 新橋支店 (0044334)
 三井住友銀行 日比谷支店 (0131013)
 みずほ銀行 新橋支店 (1067036)

書籍 No.	書籍名	会員価格 (税抜)
8301	核融合炉設計及び研究開発の現状と課題	8,000
8701	核燃料リサイクルの現状と展望	3,500
8702	軽水炉圧力容器監視試験ハンドブック	3,000
8802	固体線量計の開発と応用の現状	3,000
8901	原子燃料サイクルにおける新技術とその応用	2,000
9101	原子力発電プラントの水化学管理と基盤技術	4,000
9501	金属燃料サイクル技術—その現状と将来の見通し	3,000
9502	原子力発電プラントの水化学管理の実績と将来展望	4,000
9802	原子力の安全研究	4,000
9903	ミクロ科学とエネルギー	2,000
0101	新しい原子力文明へ	1,620
0102	原子炉炉心計算法の高度化の現状と展望	4,000
0105	ノイズ ザ リバイバル	3,000
0106	BWR 核熱水力安定性評価の現状と課題	5,000

書籍 No.	書籍名	会員価格 (税抜)
0201	先端原子力 ア・ラ・カルト	1,429
0202	燃料サイクル技術	3,200
0203	モンテカルロ法による粒子シミュレーションの現状と課題	4,000
0301	核融合ニュートロニクス主要課題の現状と新たな提案	2,000
0305	原子力発電プラントの水化学最適化の実績と将来展望	3,000
0306	モンテカルロ法のためのベンチマーク問題集	2,000
0402	原子力がひらく世紀(第3版)	1,905
0407	モンテカルロ計算法高度化の現状	4,762
0603	先端技術と原子力(2006年)	1,905
0604	エネルギーの外部性と原子力	1,715
0605	モンテカルロ計算ハンドブック	4,762
0702	鉛ビスマス利用技術ハンドブック	2,857
1301	アクチノイド物性研究のための計算科学入門	5,000
1501	放射線遮蔽ハンドブック-基礎編-	5,000

談話室

「ぼくたちはお婿に行けますか？」

竜田 一人

「ところでお前、結婚とかしないの？」
久々に会った友人との世間話の中で、そんな話題が出た。2016年3月。東日本大震災と福島第一原子力発電所事故発生から丁度5年を迎える頃だった。

ご存知の方もいらっしゃるかも知れませんが、私は2012年と2014年に福島第一原発で働き、その時の様子を『いちえふ 福島第一原子力発電所労働記』という漫画に描かせていただいた、作業員兼漫画家でございます。(現在拙作は講談社より3巻まで発売中。よろしかったらご一読下さいませ)

今後も作業員として働きたいので、本名や素顔は隠して漫画家の仕事はしているが、当然古くからの友人知人には正体は知れており、その友人も私が第一原発で働いて来た事を前提にその質問をしている。

私も友人も年齢は50を過ぎており、お互い独身で今更結婚でもないという境遇は同じで、私もその質問には

「別に結婚などする予定は無い(まあ相手もいないし〜)」と答えたのだが、彼から次に続いた質問には、人生まだ何があるか分からん、という前提ともうひとつ、万が一結婚した場合の(しなくてもだが)懸念があるようだった。つまり以下の言葉だ。

「お前、もし子供作ることになったら、不安は無いのか？」

さすがに原子力学会誌をお読みの皆様ならばこの懸念に科学的根拠が無いことは言わずもがなでしょう。

だが、彼の質問は至って真面目なものだった。ここで誤解していただきたくないのは、彼は「原子力発電に対して何か意見のある人」でも、「放射線を過剰に恐れる人」でもなく、一応私と同じ大学を出た(専攻はド文系ですが)、ごく普通の常識知識を持った社会人で、むしろ東日本大震災発生以降のデマや、それにまつわり激化した周囲の人達の政治的社会的主張から来る対立に、苦々しい思いをしているような立場の人物だったということ

2012年 3号機廃棄物処理建屋内 使用済燃料プール循環冷却配管補修工事



だ。つまり、いわゆる原発や放射能問題、にはニュートラルな立場の平均的日本人。しかも私の漫画も読んで、原子力の仕事に対する理解も評価もしてくれている、その彼が、原発作業員に対して普通に発した質問が、「子作りに不安は無いの？」なのだ。

勿論私は即座に「んなもん無えよ」と答えた。

これまでもマスメディアのインタビューで「お身体に変わりはありませんか？」等という(何らかの健康影響を期待するかのよう)な質問はさんざん受けて慣れっこになっており、また彼に悪気がないのも分かっていたので、特に気に障ることもなかったが、「ああ、これが世間の平均的な感覚なのね」と認識を新たにするところではあった。

その後、放射線被曝が人体に与える影響と、これまでの原発作業における自身の被曝量(累計30mSv程度)を挙げ、彼には理解してもらったのだが、その中で広島、長崎での研究例から、放射線被曝による障害は子孫に遺伝しないと説明すると、「それは知らなかった」という答えが帰って来たのだ。

よくある「レントゲン検査で何マイクロ、飛行機に乗って0.何ミリ」みたいな話と、「鼻血はデマ」みたいな話は、しっかり理解している人でも、被曝と遺伝に関する部分については、まるっと知識が抜け落ちている、というより間違っただけの情報(不妊や奇形児の発生等のデマ)を信じている場合が多いというのは、原子力関係者のみならず医療、教育関係者等にも、もっと知られておくべきだと改めて思った。これはその後数人に聞き取り調査をしても同様の結果だ。

第一原発の事故から5年経って、当初予言されたように人がバタバタ死ぬこともなく、鼻血や甲状腺がん多発といったデマ以外、何の健康影響も出ない事が明らかになった今日、未だ根強く残っているのがこの「遺伝的影響」に関する誤解だろう。

「何年後に死ぬ」という予言が外れたので、ターゲットを子孫に移し「次の世代や何世代後かに影響が」と有効期限の無限引き伸ばしを図るデマに対して、「んなもん無えよ」と、即座に否定してやるだけの知識と自信が、現在の我々に求められているのだ。

この誤解が根強くはびこっている原因は、何よりも生物学的知識の欠如と、それにつけ込んだデマの手口の巧妙さだろう。遺伝子とDNAの区別も、体細胞分裂と生殖細胞の減数分裂の違いも分からず、細胞のDNA修復

機能も知らないところへ、「DNAに傷が！」「間違っただけの遺伝情報が受け継がれる！」と言われれば、子孫への影響を心配して当然だ。

だがその知識を今すぐ一般に普及させるのは、恐らく不可能だろう。それよりもやはり日本では広島、長崎の例をもって「被曝二世三世に原爆の影響は出なかった」事実を周知した方が早い筈だ。

ところが皮肉な事に、これまで原爆被害の悲惨さばかりを強調して来た戦後平和教育や、毎年繰り返される8月の報道のイメージにより、核兵器の恐ろしさだけが印象に残り、実際の被曝の科学的影響については、ほとんど正確に伝わっていないのではないかと思う。

戦後の広島、長崎では縁談を断られる等の差別があり、第一原発事故後の福島でも「わたしたちは子供を産めますか」と聞く女の子がいた。

そう聞かれた時に、「はい、産めます」と即座に答えるのが我々大人の勤めだと言った科学者もいる。

その科学者の自信と気概に、私は大いに勇気づけられた。放射線被曝に対する無知や誤解から生じる差別や不安は、我々原発作業員にものしかかって来る問題だからだ。前述のように私は今後結婚する予定も子供を持つ予定も無いが、これからの廃炉作業を担う若い世代が、無用な不安を抱え込んだり、謂れのない差別を受けたりしないようにしていく勤めが、私の世代にもあると感じている。

白血病の労災認定基準をもって、廃炉作業中の被曝による発病が科学的に立証されたとするデマをはじめ、これからの作業員の健康問題が、悪い意味で取り沙汰される機会が多いだろう。世間一般の被曝に対する認識が現状のままでは、福島の女の子だけでなく、若い原発作業員にも、将来に対する不安や、謂れのない差別に苦しめられる可能性がないとも限らない。

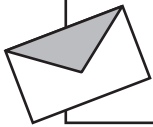
彼らに代わって、僭越ながら日本原子力学会の皆様にお問い合わせしたいと思います。

「ぼくたちはお婿に行けますか？」

唯一の核被爆国として、偏見と差別の苦い歴史を経験して来た国民が、過去の貴重な知見を有するにも関わらず、再び無知による差別を繰り返す愚を、座して見ている原子力関係者などいないと信じています。

(2016年4月23日記)

理事会だより



だれもが考え、だれもが悩む時代

理事に就任し、この6月で任期が終了する。どんな働きができたか、実のところ、頭の中に疑問符が残る。引き受けたからには、やはり、少なくとも就任中は役に立つ存在でいたいと思っていた。しかし、一兵卒の私には、2年間では、理解し切れない議題が多い。そこで今回、理事会だよりを担当するにあたって、何を書こうか悩んだ結果、理事会でどんなことを検討しているかを書いてみようと思いついた。私の理解不足や、勘違いなどあるかも知れないが許していただき、平成28年3月22日の第7回理事会を紹介しようと思う。

その日は13時30分に始まり、終了が18時30分という5時間の長い会議だった。議題数16、報告事項数32と年度末ということもあって盛りだくさんであった。前回理事会議事録に始まり、入退会の承認、28年度事業計画の承認、28年度予算の承認、規則類の改定、補助金応募の件、研究専門委員会設立の件、人事など重要案件ばかり、目の前の書類は2.3cmと厚く、それをめくりながら、審議をしていく。指摘箇所、修正箇所一つ一つが経験のない私にとっては勉強になった。

今回は、その中でも社会環境部会の佐田務主査に出席いただいた説明「関西電力株式会社大津地裁仮処分について」で私を感じた事をお話したい。大津地裁仮処分については滋賀県の住民29名が平成27年1月30日に高浜3・4号機再稼働禁止仮処分申立を行い、審尋が4回行われた。その後、平成28年3月9日「高浜3・4号機を運転してはならない」旨を決定し、関西電力株式会社は3月14日に、保全異議申立と執行停止申立を行った。

佐田主査の説明の中で特に印象的だったのは「今回の仮処分をめぐる構造的な背景要因」の部分で、「科学技術をめぐる不確実性への対応、その対応をめぐる社会的なコンセンサス形成の正当性と手続きの妥当性、司法の判断と世の中の規範や価値観との整合性を調整する回路の問題など広大な問題の一部が顕現したのではないか」という言葉である。私はこの件についてこの理事会だよりで説明できるほどに深く理解はしていない。しかし、説明を聞いているそれぞれの理事が作り出す雰囲気の中に、非常に深い思いを感じた。

理事会でこのような深い思いに直面でき、私も共有することができると感じることはいままでにも何度かあった。共有というのはおこがましいかも知れないが、「同じ人間だ」と思える瞬間である。それは、現代社会で今、だれもが抱えている課題に原子力学会理事会メンバーも直面している時である。実は私は理事会メンバーになる

前は、理事の方々に対して大きな誤解をしていた。少なくとも「私と違う考えの人間」であると思っていた。今、私たちは日常生活や社会の隅々で科学技術が浸透して、好むと好まざるとに関わらず、科学技術からの恩恵や利便性の向上といった正の影響を受け、さらに負の影響も受けずにはいられない。そのような科学技術をめぐる不確実性への対応に迫られ、その入り口にさしかかっている。理事の面々も同じように悩み、考える場面に直面している。こういった場面に接することができたのは、私が理事を経験させていただいて良かったと思える点である。

私は聖徳太子が作った十七条の憲法の十条が好きで、いつも誦んじる。「十に曰わく、忿(こころのいかり)を絶ち瞋(おもてのいかり)を棄(す)て、人の違(たが)うを怒らざれ。人みな心あり、心おのおの執(と)るところあり。彼是(ぜ)とすれば則ちわれは非(と)す。われ是(と)すれば則ち彼は非(と)す。われ必ず聖なるにあらず。彼必ず愚なるにあらず。共にこれ凡夫(ぼんぷ)のみ。是非の理(ことわり)なんぞよく定むべき。相共に賢愚なること鑑(みみがね)の端(はし)なきがごとし。ここをもって、かの人瞋(いか)ると雖(いえど)も、かえってわが失(あやまち)を恐れよ。われ独(ひと)り得たりと雖も、衆に従いて同じく拳(おこな)え」。この条文の特に後半の部分の現代文訳「自分にはかならず聖人で、相手がかならず愚かだというわけではない。皆ともに凡人なのだ。そもそもこれがよいとかよくないとか、だれがさだめうるのだろうか。おたがいだれも賢くもあり愚かでもある。それは耳輪には端がないようなものだ」。

今、だれもが抱えている科学技術の不確実性のような課題に対しては、だれもが凡夫として、取り組んでいかなければならないと感じている。だからこそ、もっと多様性を大切にしなければならない。すでに行われている外部の多様な意見を取り入れることも大切である。私は学会員の「あの日どう思い、そう行動し、そして今どう思うか」の声を聴きたい。同じ課題に直面している同じ人間として、まずは多様な学会員の声を聴き、アカデミックな場で、自由な意見を論じる場を作り出し、社会的発信をしていきたい。そういった試みの中から原子力学会の新たな動きが生まれてくると思っている。

(東京都市大学 岡田 往子)

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