

巻頭言

- 1 原子力発電所の安全性を時間の次元で考えると 白石 隆

解説

- 14 燃料デブリの臨界安全管理をどうするかー福島第一原子力発電所の廃炉に向けて

燃料デブリの臨界安全管理に関する技術的な検討を行った。取り出しのための技術開発及び手順策定の際には炉内状況の十分な調査と、総合的なリスクを低減するという観点に立った検討が必要である。中島 健

- 19 燃料デブリ取り出しに向けた臨界安全における課題
ー燃料デブリの性状に関する知見と検討

臨界安全管理の観点から、TMI-2 事故以降に蓄積された炉心溶融及び燃料デブリ性状についての知見を整理し、福島第一原発内の燃料デブリ性状について検討した。永瀬文久



- 24 福島沿岸海域におけるセシウム 137 収支と生態系移行

セシウム 137 を中心に海洋環境での収支と生態系内での移行について、事故後の推移と現状を概説する。一部の魚種で放射能レベルの低下が予想外に遅いこと、海洋へ放射能流出が継続していることが課題だ。神田穰太

時論

- 2 民俗知生成のプロセスに向けて

災害の絶えない列島に生きてきた私たちは、歴史社会的に積み上げてきた自然知、技術知、経験知という知を醸成し、民俗知として継承してきた。田口洋美

- 4 福島 20km 圏内帰還困難区域の設定に誤りー科学にもとづく福島復興なしに、オリンピック成功なし

科学にもとづき、強制避難を抜本的に改め、帰還希望者の生活を再建すべきだ。高田 純

- 6 今こそ、エネルギー教育を

エネルギー・リテラシーの向上は持続可能な社会の構築のために必要不可欠である。秋津 裕

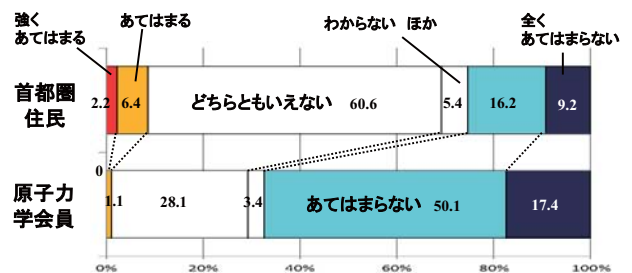
解説

- 29 「原子カムラ」の境界を越えるためのコミュニケーション

(1) 市民と専門家間に存在する心理的境界

原子力学会員の多くは、自分たちが一般の人たちから否定的にみられているとの認識をもっているが、それは事実とは異なる。その思い込みや誤解こそが、学会員自ら「原子カムラ」の心理的境界を作っている可能性がある。土田昭司

Q. あなたは、原子力に携わっている人たちや組織に対して、一般市民はどう思っているとお考えですか。
「私は、原子力に携わっている人たちに好感をもっている」



解説

34 福島事故後の原子力安全確保のためのリスク論の重要性

福島事故以降の原子力安全確保に向けて、リスク論の具体的な展開として現在進行中の安全規制に関係した課題とその展望について述べる。 高田毅士

40 廃炉に向けてのリスクコミュニケーションとは

福島原発の事故以来、原発や放射線に対する人々の意識が揺れ動いている。ゼロリスク志向の意識をリスク許容・耐容へと変えるためには、リスク分析の考え方を導入する必要がある。 西澤真理子

解説シリーズ

レジリエンスエンジニアリングの動向 (1)

43 レジリエンスエンジニアリングの概要と今日的意義

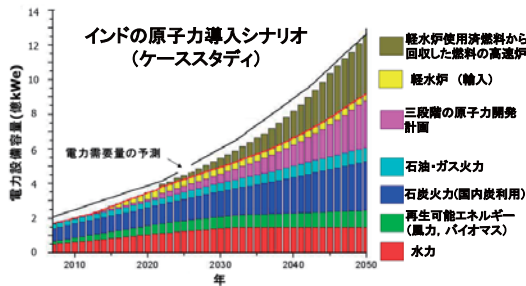
レジリエンスエンジニアリングは、原子力分野で実装されてきた安全の実現法を補強する効果的な方法論としてのポテンシャルをもつ。ここではその概要と、この方法論が開発されてきた歴史的背景やその意味合いについて解説する。 北村正晴

解説シリーズ

世界の原子力事情 (5)

55 インドの原子力開発の動向

三段階の原子力開発計画を策定し、国際的な原子力開発の流れとは一線を画しながら、独自の原子力開発を展開してきたインド。最近では高速炉開発を含め原子力の大幅拡大を目指している。 佐藤浩司, 柳澤 務



談話室

61 インド訪問記

田中 淳

8 NEWS

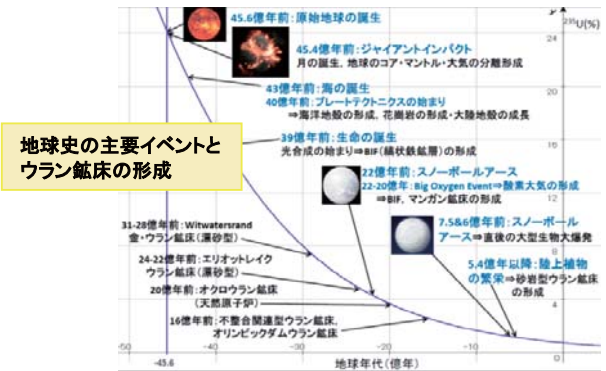
- 学会事故調が最終報告書を公表
- 規制委が大飯破砕帯を「活動性なし」
- 海外ニュース

解説シリーズ

核燃料サイクル—フロントエンド (2)

49 多様なウラン鉱床の形成と資源の持続性

原始太陽系の形成以来、ウランとトリウムは兄弟であり、ずっと長い間行動を共にしてきた。しかし地球史の変遷で、ウランとトリウムは次第に別行動をとるようになり、ウランは単独で地球上のいたるところに様々なタイプのウラン鉱床を形成した。 小林孝男



報告

62 CPD ノススmeer信頼される原子力技術者・研究者を目指して

(2) 様々な学協会が進める CPD 尾崎 章

- 18 From Editors
- 66 新刊紹介
「分析値の不確かさ 求め方と評価」 鹿野文寿
「原子力の本当の話」 瀧口克己
- 67 会告 日本原子力学会行動指針 パブリックコメントのお願い
- 68 会報 原子力関係会議案内、主催・共催案内、寄贈本一覧、新入会一覧、新規フェロー一覧、フェロー賞受賞者一覧、新規シルバー・永年会員一覧、英文論文誌 (Vol.51, No.4) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧
- 後付 「第46回(平成25年度)日本原子力学会賞」受賞一覧、受賞概要

原子力発電所の安全性を時間の次元で考えると



政策研究大学院大学 学長

白石 隆 (しらいし・たかし)

1972年東京大学教養学部卒業。同大学助教授、コーネル大学教授、京都大学東南アジア研究センター教授、内閣府総合科学技術会議常勤議員を経て、2011年より現職。アジアの政治、政治史、国際関係を専門とし、著書多数。『インドネシア - 国家と政治』（サントリー学芸賞受賞）、『海の帝国 - アジアをどう考えるか』（読売吉野作造賞受賞）。

われわれがなにかものを考えるとき、そこにはいつも時間の次元が入っている。自然科学者が対象とする時間は、ビッグバンが138億年前、生命の誕生が40億年前といわれるから、10の9～10乗である。一方、人文・社会科学の対象とする時間ははるかに短い。ホモ・サピエンスがこの地上に現れたのは14～20万年前、これは10の5乗であるが、文明が誕生したのは5～6千年前、近代文明の歴史は300～400年、これは10の2～3乗である。

こういう当たり前のことを言うのは、福島第一原子力発電所の事故以来、原子力発電所の安全性について、わたしにはなんとも理解できない議論が横行しているからである。

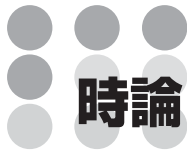
たとえば、原子力規制委員会は、新安全基準において、「重要な安全機能を有する施設は、将来活動する可能性のある断層等の露頭がないことを確認した地盤に設置する」としている。そこで考えている時間の幅は12～13万年（後期更新世以降）、そこで判断できない場合は40万年（中期更新世以降）、つまり、10の5乗である。では、これは妥当なのか。

とてもそうは思えないということは、すでに別の機会（「地球を読む、原発の安全、硬直的な『活断層』基準」、『読売新聞』、2013年3月31日号）に述べた。したがって、ここでは、この時間の幅ということについて、2点、別の論点を出しておきたい。

その一つはリスク評価に関わる。ある時間の幅を設定し、その時間内に原子力発電所でどのレベルの事故がどれほどの頻度でおこりそうかを評価すれば、その分布はべき分布になるだろう。いかなる技術システムにも100%の安全はありえないから、あるレベル以上のテール・リスクはとらざるをえない。それを決めるのは政治であるが、その際、一つ、ほとんど議論されない問題がある。どれほどの時間の幅でリスク評価をするかである。時間の幅を長くとればとるほど、テール・リスクは高くなる。では、原子力発電所のリスク評価はどの程度の時間の幅で行われるべきか。原子力発電所の耐用年数が40～50年と想定されていることからすれば、リスク評価は100年程度の時間の幅でやれば十分なはずである。これを10の5乗の時間でやれば、テール・リスクはもちろんはるかに高くなる。政治がリスクをとりたがらない一つの理由はここにある。

もう一つは科学技術の進歩の速度である。科学史を見ると、原子核の分裂が発見されたのは1938年、エンリコ・フェルミが核分裂の連鎖反応に成功したのは1942年、その3年後に原子爆弾が開発され、1951年に実験炉が作られ、1954年に世界最初の原子力潜水艦が進水し、同年、世界最初の原子力発電所も運転を開始した。すべて20世紀、100年以内の出来事である。では、これからの100年、科学技術はどうなるのか。もちろんだれも知らない。規制委員会は、安全性の判断に際し、科学技術進歩の可能性をまったく考えない。しかし、ある水準の研究開発投資をすれば、それなりのリターンはある。では、どんな投資をどれくらいの規模で行うのか。これも政治の問題である。しかし、その判断は、投資のリターンを1年で考えるか、10年、50年、100年で考えるか、つまり、時間の幅をどう設定するかで大いに違う。

(2014年2月3日記)



民俗知生成のプロセスに向けて



田口 洋美 (たぐち・ひろみ)

東北芸術工科大学教授，同大学東北文化研究センター所長

1957年，茨城県東海村生まれ。日本観光文化研究所主任研究員を経て1996年に狩猟文化研究所を設立。東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程修了，博士(環境学)。著作に『越後三面山人記-マタギの自然観に習う-』，『マタギ-森と狩人の記録-』などがある。

原発のある日常から

私は，茨城県那珂郡東海村の村松宿という集落で生まれ育った。最も原子炉や実験施設に近い集落といわれている。生まれた年，1957年の夏，8月29日に自宅からおよそ2キロ離れた海浜の松林のなかにあった実験炉でチェレンコフ光が輝いた。臨界実験の成功であった。科学技術の最先端に行く村，世界の東海村と謳いあげられた。私の知的好奇心は，幼い頃から関わってきた原子力関係者の影響の賜である。幼稚園，小学校から中学校へと成長するなかで，原発，原研，原燃の社宅で幾人かの研究者の家族や子どもたちとふれあい，洋書や英字新聞を当たり前のように読む人々に驚いたものだ。その驚きは，あこがれに変わり，知的欲求へと私を駆り立てた。そして今，私は大学人として生き，幼なじみや親友たちの幾人かが原子力関連企業に勤め，日々働いている。結果的に私が人文社会系科学を基礎とした環境学へと進み学位を得たのもふるさとの影響なのかも知れない。

そしてこの10年あまりの間に父母が他界し，私は実家を継いだ。3.11の震災も東海村の自宅で体験した。地震の最中，原発が危ういと思った。漏れたらどうなるのだろうか，その不安で震え，幾度となく空を見上げた。しかし，東海原発は紙一重で持ちこたえた。自宅近くのモニタリングポストの値に変化はなかった。そして運が良いことに，私はその後も自宅に帰ることができ，親類や友人たちと語らう時間も持つことが許されている。

先日，私のゼミの学生を自宅に招き，卒論の集中指導をする恒例の「自宅ゼミ」を行った。ゼミ生の1人は福島県大熊町の出身であり，ふるさとに帰れない避難者である。「大熊にそっくりですね」彼は私のふるさとを歩きながらそういった。彼と私は年齢こそ35歳も違ってはいるが，その言葉の端々に原発の村に生まれ育ってきた当事者として共有できる感覚があった。実は震災の日，彼も大熊町の自宅にいたのである。

震災から3ヶ月あまり後にふるさとの一斉清掃が行われたが，その時近隣に暮らすおばさんたちがこんな会話

をしていた。

「JCOの時は，お葬式の最中でみんな外にいたんだからね。お醤油がないんで買いに行ったら事故だって聞いてきて，それで慌ててテレビつけたんだから」

「こんなところに若い人らに住めなんていえないよね」「いざとなったらみんなと一緒に逝くんだから」「そうだね，本当だ」

それは諦めなのか，それとも何が起きても引き受けるという覚悟なのか。

人々は，何を，どう学べば良いのか。災害に向き合うたびに，人々は傷つき痛み，もがき苦しみ，そして学び，自分たちの力でできることを探し，それを地域の知として語り伝え，共有してきた。地域の人々が，日常からの学びを醸成し，具体的な語りとして，また実践へと高めてきたことごとを，私は「民俗知(民族知)」と呼んできたが，原発事故に対応する民俗知はまだ形成されていない。やっとそのプロセスに入ったばかりである。

災害の民俗知

関東地方の北部から中部，茨城県的那珂川，栃木県，埼玉県を貫流する利根川，荒川水系などは，近世から近代にかけて洪水で知られた河川であるが，この一帯にはアゲブネ(上舟)と呼ばれる板船が農家の母屋や物置，蔵の軒下に下げられていた。現在でもこの洪水に備えての舟を所有する農家は少なくない。台風や集中豪雨などで河川が氾濫し，低地帯の広大な面積が水没するという水害にたびたび見舞われ，これに対応した日常の備えとして各家が舟を所有していたのである。もっともこの舟は水害から逃れるというのではなく，水が引くまでの期間，近隣との往き来を行うための連絡船として使用していたのである。また同一地域では，食物蔵などは家屋敷以上に高く土盛りをしてその上に建てて水害の際に食糧が枯渇することのないように備えてきた。

2005年の暮れから2006年2月にかけて豪雪に見舞われた長野県下水内郡栄村秋山郷では，雪崩で国道が閉ざ

され集落が孤立するという雪害に見舞われたが、どこの家も平然と日々を暮らした。マスコミは雪に閉ざされた村としてこぞって報道したのだが、むら人当人はなぜそこまで慌てふためいて報道されるのか理解できなかった。それは家々が日常の備えとして一冬分の食糧を備蓄していたからであるが、会社組織の雇用形態になれた人々からすればむら人の対応が奇異にすら見えた。実際、豪雪によって交通が途絶されて一番困ったのは、秋山郷の村の小学校に勤める教師たちであった。しかし、その教師たちもむら人の差し入れなどの協力によって食べ物にはほとんど困りはしなかった。

地形や地勢を見る見方も伝承され難くなった。民俗学や歴史学、地理学では「歴史の古い集落や屋敷地ほど自然災害に強い」と、当たり前のようにいわれてきた。それは当然なことで、繰り返し起こる災害をくぐり抜け、現在も存在する集落や屋敷地は、その持続性を持って耐災性が実証されているからである。地形学や地震学、工学といった近代の知の営みがこの国で発展を遂げる以前から、そこに集落や屋敷地が存在していた。これは偶然ではなく、過去の人々は地形や地勢を見て、生活の場の立地を選択していたのである。人口が増え、良質な宅地や屋敷地が選択できなくなり、条件の悪い場所にまで人々は暮らすようになった。では、どのような立地条件下に集落や屋敷地が選択され開かれてきたのか。その歴史の変遷を1万年というロングタイムスパンで動的に把握する研究を私が所属する東北芸術工科大学東北文化研究センターで開始している。

これらは民俗知の一端に過ぎないが、人々の歩んできた歴史は厳しい自然といかに向き合い生き延びるか、それを日頃からいかに心掛けるか、それが生活文化であり、この日本という災害列島に生き継いできた人々の知恵でもあった。近年では、自らが食糧を生産せず、消費一方の生活をする人々が主体となり、このような生産者側の論理、民俗知的生存戦略は忘れられつつある。しかし、災害が毎年のように繰り返しておこる列島で生き抜くには、膨大な時間と経験のなかで醸成されてきた民間の知恵が見直される必要がある。すべてを行政や企業に頼るのではなく、自らの力でできることをするのが、本来の人々の知恵であり生き方であった。無論、このような自立型の人々の生き方を崩したのは、近代以降、とくに戦後の市場偏重型の価値観であったことは語るまでもない。またこれを受け入れ、「これでよし」としてきたのも民間であるから、どちらが良いも悪いもない。問われるのは、私たちがこれからどう生きて行くかであろう。

人々は災害の絶えない列島に生き、歴史社会的に積み上げてきた自然知、技術知、経験知という知を醸成し、民俗知として継承してきた。この尊い知を現代という時代は評価しようとはしていない、といっている言い過ぎかも知れないが、目に見える形でこれを継承し、さらに育

て上げるという方法は選択されてはいない。筆者はこれまで繰り返し述べてきたが「地域にある自然は、地域の人々の生活の歴史とともにあり、その歴史の中で醸成されてきた民俗知を有効に取り入れてはじめて、地域住民のみならず現代社会の合意形成が可能となる」と考えている。

原子力災害の民俗知

3.11の震災後、歴史資料を中心とした文化財レスキューや被災地の古文書の整理保存が急ピッチで進められている。さらには歴史史料を参考にしながら地質学、地震学の動態的研究に援用しようという動きも活発化している。確かにこれまでも歴史記述の検証可能性という意味からもこの手法は取られては来ているが、災害史あるいは大地の記憶を読み解くという観点から新たな知見を開く、より高度な研究へと発展させていく可能性を秘めている。近年、人文科学に対する評価は極めて低い。言語と思考を鍛え上げてゆく分野の衰退は、将来、科学全体の根本を揺るがすことになるだろう。自然科学も工学もすべては言語によって思考され鍛えられるものである。その言語を基礎とする分野の衰退は思考の衰退をまねき、哲学の衰退をも意味する。即効性や具体性が顕著でないものに対しても評価主義や数値データ主義を当てはめるのは決して私たちの未来に良い影響をもたらさない。なぜなら数には数に表そうとする意図や意識が含まれてしまうからである。

また一方では、原子力災害に対する民俗知の生成という動きも注視されるべきであろう。原子力災害の場合、避難する人々の側の論理だけではなく、避難してきた人々を受け入れる、あるいは受け止める側の論理、民俗知の生成も重要な鍵となる。聞くところによれば、避難区域から避難した人々が自分の出身地を名乗ることも出来ない極めて悲しい実態があるようである。他の行政区に避難しても、避難先の住民から小言や排除的言動を受け、苦しむという構造がある。私もかつてJCOの事故の際に同じような経験をしたことがある。車のナンバープレートを見ただけで温泉への入浴を断られたのである。反感を持ち、排除しようという住民も弱者であり、また正しい放射能に関する知識を持っていない。「～だろう」という印象論が住民の恐怖感や不安感を煽るのである。避難した住民、それを受け入れる地域の住民、その両者の中で巻き起こるズレが互いを傷つけ合ってしまう。これを回避し、避難住民を暖かく迎え、引き受けられる社会の民俗知の生成を求めたい。そのためには分かりやすい放射能に関する知識の普及啓発が第一であろう。その上での原発の有無の議論へと丁寧に進めていくべきであろう。

(2013年12月18日記)



福島 20km 圏内帰還困難区域の設定に誤り 科学にもとづく福島復興なしに、オリンピック成功なし



高田 純 (たかだ・じゅん)

札幌医科大学 教授

広島大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程中退、同大原爆放射線医学研究所助教授を経て、2004年から現職。理学博士。広島での黒い雨の濃縮ウランの研究をはじめ、世界の核災害地の放射線衛生を調査してきた。

福島第一原発の地震津波事故災害により周辺福島県民の受けた線量は、外部被曝がスリーマイル島原発事故および東海村臨界事故時の周辺住民レベル。甲状腺のヨウ素 131 による内部被曝線量は、チェルノブイリ事故時の住民線量の 1,000 分の 1 以下と低線量。仮に放射線リスクの直線仮説を採用しても、福島県民の内部被曝による甲状腺がんの発生は 1,000 万人の小児に 1 人と推定されるので、健康リスクなし。震災 2 年目の福島 20km 圏内の多くの居住区の年間線量で、除染なしでも実線量は、20 ミリシーベルト (mSv) 以下。政府事故対策本部は、実線量の 3 倍以上の過大評価をした、空間線量率から計算した 50 ミリシーベルト以上の誤った推定値で、住民たちの人生を破壊している。安倍政権は、今こそ、科学にもとづき、強制避難を抜本的に改め、帰還希望者の生活を再建すべきだ。

1. 人体線量は年間 20mSv 未満だった帰還困難区域

私は、広島の黒い雨中の濃縮ウランの分析からはじまり、米ソの核実験、中共の楼蘭遺跡周辺での核爆発災害、東西シベリヤの核汚染、チェルノブイリ原子炉事故災害の現地調査をしてきました。同様な科学手法で福島の線量を調査する、放射線衛生学と防護学の専門家です^{1,2)}。

震災の翌 4 月 6 日に札幌を陸路出発し、福島を中心に、東日本の放射線衛生を広範囲に調査しました。その時の最も重要な検査が、二本松市内に避難した浪江町の人たちの甲状腺に蓄積した放射性ヨウ素量の検査でした。結果は、チェルノブイリ事故時の 1,000 分の 1 以下と低線量でした³⁾。

その時に、町に残してきた牛たちを見てきてほしいと頼まれたのが縁となって、2 年半の間、浪江町の和牛畜産農家のみなさんと、現地の牛を中心とした放射線衛生調査を続けています。

牛たちは元気でした。人恋しくて、赤の他人の私ですが、近寄ってきました。およそひと月間も屋外に放置させられていましたが、急性放射線障害は見られませんでした。禿げていませんし、下痢もしていません。今も全く元気です。

浪江町など福島第一原発 (F1) 周辺は、震災当時の 3 月でさえ、線量率は 1 日 1mSv 以下と推定されます。実際、F1 の境界まで 2 日間調査した、4 月の筆者の個人線量は積算で 0.10mSv でした³⁾。

20km 圏内の放射線衛生調査として、現地での個人線量評価と、体内セシウム検査を、実施しました。方法は、直読式の個人線量計を装着して、震災 2 年目 3 月の 2 泊 3 日、末の森の畜産農家で現地滞在型線量検査を行ったのです。次に、和牛生産者の体内セシウムを、比較的汚染の低い二本松市内の仮設住宅で測定しました。

結果は、浪江町に 1 年居続けた場合の年間線量が、内外被曝合わせて 17mSv と評価しました。しかし、この地域は、政府が年間 50mSv 以上と断定し帰還困難区域と指定したのです⁴⁾。

本当は、人体線量が帰還できる年 20mSv 以下なのに、ズサンな調査をした前民主党政権時代の空間線量によって帰還できなくされています。これは政府事故対策本部による人災です。これを長期間強制するなら、政府の犯罪になります。

現在も続く非科学政策は、菅直人政権に原点がありません。1945 (昭和 20) 年 8 月の広島長崎の核爆発災害、1999 (平成 11) 年 9 月の東海村臨界事故では、全日本の科学力で徹底した調査が行われました。その後、順調に地域は安定化し、復興しました。しかし、菅直人氏らは、福島 20km 圏内に、私たち大学の専門科学者の調査を動員させる指示をしないばかりか、排除したのです。彼は、こうして 20km 圏内をブラックボックス化しました。

2. 原子力問題調査特別委員会の非科学と人権蹂躪

全くデタラメなのが前民主党政権時代に作られた 20km 圏内の避難指示区域地図です。空間線量率の測定から推定した年間積算線量が、20mSv 以上を居住制限区域、50mSv 以上を帰還困難区域と定めています。

すなわち、畑などの屋外での空間線量の計測値から作成されたのであって、人の実線量の計測ではないのです。屋外に、雨の日も雪の日も、真夏の暑い日も、真冬の寒い日も、屋外に 8 時間も、裸でいることになっています。屋内は木造、学校の校舎も木造です。職場も全て木造です。現実離れした仮定です。

人は多くの時間、服を着て、屋内にいますし、動き回っています。しかも、自分の身体でさえ、ガンマ線を 30～40% 遮蔽しているのです。人生がかかっている個人線量の推定が、全く怪しい測定と、現実離れした仮定と、自己遮蔽を無視した計算により、避難をいまだに、強制させられています。

原子力緊急時ではこの程度でもいいかもしれませんが、帰還を検討するには、やってはいけないズサンな計算です。この非科学的な区画割地図で、20km 圏内の 86,000 人の人生が分類されているのです。

こんないい加減な推定で、福島県の帰還困難地域が策定され、強制避難を命じています。政府事故対策本部が帰らせないとする非科学は、20km 圏内からの強制避難民に対する、人権蹂躪です。

原子力規制委員会の田中俊一委員長は、IAEA や ICRP など国際的な基準に沿って、人の線量は、空間線量ではなく、人に装着して測る個人線量を基礎とすると明言しました。にもかかわらず、2013 (平成 25) 年 11 月 14 日の衆議院原子力問題調査特別委員会では民主党の中川正治委員から、とんでもない意見が出されました。

「やはり個人的な線量というのはそれなりに管理して、その管理の体制というのをどうしていくかということも含めて、これはこれで議論をしていくということ。そして、もう一方の、基準という部分については、これは空間線量でやっていかざるを得ないんじゃないかというふうに理解をしているんです」

すなわち、人の線量は個人線量計の値とするが、国が定める強制避難区域は、デタラメな空間線量でいくと、中川氏は言ったのです。

その後、田中委員長から、「帰還困難区域というのは、戻って住んでいる住民がおりませんから、実測ができません」と、実線量である人体線量を調査していない自分たち政府の無責任を棚に上げました。これでは、実線量が年間 20mSv 以下であっても、国が定めた 3 倍以上も高い空間線量値の規制を受けて、未来永劫帰還できなくなるのです。これは、科学を無視した政府の犯罪です。政府命令の福島強制避難は、強制連行と同義語です。

3. 原発沿岸 40km でオリンピックマラソン

政府の誤った判断で帰還困難区域に指定されている浪江町末の森の実年間線量は 2012 (平成 24) 年で 17mSv、現在はより一層低線量になっています。この値は全く除染なしですから、もし政府が除染したならば、直ぐに年間 5mSv 以下に改善できるのです。

20km 圏内、帰還できるのに、2 年 8 か月も放置してきた政府の責任は大きい。牧畜、農業再建あってこそ、圏内の再建です。その間、地震で傷み、風雨にさらされた家々の破壊は進行して、とても住めるような状況ではありません。

浪江町には現在、300 頭ほどの和牛が元気に生きています。3 軒の牧畜農家が懸命に牛飼いを続けています。彼らは、帰還を希望しています。早急なインフラ整備を政府に求めています⁴⁾。

家や道路を水で洗浄するほど無駄なことはない。金＝税金をドブに捨てるとは正に、このことを言う。沿岸を中心に、20km 圏内の瓦礫と共に、農地・放牧地の表土 10cm の深さまで、剥ぎ取り、沿岸 40km を埋め立て、防波堤道路を建造するのです。セシウム土の上に 1m もきれいな土を乗せれば、完璧にガンマ線は遮蔽できます。

人がいない山林まで除染する必要はありません。人家の周りど、農地・牧畜の表土だけ、セシウムを除けば十分、農畜産業は再建できます。

この建設は、安倍政権が目指す国土強靱化計画にぴったり当てはまるとともに、福島 20km 圏内の完全復興に直結します。除染と防波堤道路の建設、そして、全戸の新築で、不死鳥のごとくよみがえる。浪江町、双葉町などに、約 2～3 万戸の新築を、福島県内の企業が請け負えば、経済効果は抜群です。1 軒あたり仮に 1 千万の補助金を支給するなら、約 3,000 億円で住宅再建です⁵⁾。

大正時代の関東大震災で、この方法でよみがえったのが横浜市。6 万戸の瓦礫を海岸に埋めて、山下公園が出来ました。平成の安倍政権に福島防波堤道路 40km が造れないはずはない。オリンピックで走り、世界に福島と東北の復興を示すのです。これが日本流と力を見せつけましょう、安倍総理！

(平成 25 年 12 月 15 日 記)

－ 参考資料 －

- 1) 高田 純、「世界の放射線被曝地調査」、講談社ブルーバックス、(2002)。
- 2) 高田 純、「シルクロードの今昔」、医療科学社、(2013)。
- 3) 高田 純、「福島 嘘と真実」、医療科学社、(2011)。
- 4) 高田 純、「復活の牧場 報告 2013」放射線防護情報センター、(2013)。
- 5) 放射線防護情報センター。http://rpic.jp/



今こそ、エネルギー教育を



秋津 裕 (あきつ・ゆたか)

京都大学大学院エネルギー科学研究科
エネルギー社会・環境科学専攻 大学院生
日本女子大学家政学部児童学科卒。住友商事、
PR コンサルティング会社を経て幼稚園主任教
諭となる。'10年から放射線教育に携わり、'13
年大学院修士課程へ進学。研究分野はエネル
ギー環境教育。

東日本大震災からこの3月で丸3年が経った。被災された方々はもちろんのこと、復興に当たられている多くに関係者におかれては片時も心休まることのなかった歲月であったに違いない。昨年は富士山、日本食の世界遺産登録や東京五輪・パラリンピック招致成功の嬉しい知らせに国中がわいた。何かが少しずつ変わっていくのかなど期待を寄せる一方で、頭の片隅ではこの国はこれからどこへ向かうのか、子ども達の世代は今後どうなるのかと気掛かりなことも否めない。

昨年末に内容が明らかとなったIPCC第2作業部会第5次報告書の最終草案は、有効な対策がなければ今世紀末までに気温が最大4.8℃上昇すると分析した。このシナリオでは、今世紀中に二酸化炭素濃度を下降に転じさせる対策をとらないと、大規模な河川氾濫で被害を受ける人口が3倍に増え、海面上昇で移住を強いられる人が数億人に上り、高温や高湿によって今世紀末までに農作業や屋外活動に支障が出る恐れがあると指摘している。ここでいう対策とはエネルギー対策であり、今後私たちは低炭素社会構築に向けて様々な変革への対応を余儀なくされる。エネルギー選択が及ぼす影響を認識し適切な判断、選択、行動ができる能力、すなわち国民ひとりひとりのエネルギー・リテラシーの向上は持続可能な社会の構築のために必要不可欠であり、国民の問題であるエネルギー選択¹⁾のための意思決定に重要な役割を果たす²⁾と考える。

しかし残念なことにエネルギー・リテラシーを育成する上で、わが国の学校におけるエネルギー教育は、欧米先進国からは大きく出遅れ、国の理念、位置づけ、内容が明確でないまま教師の裁量に委ねられてきた。原子力災害後は、エネルギー教育を重要と考える教師でも学校長や保護者、教育委員会といった周囲の理解を得られないとエネルギーを扱うことすら難しいと聞く。長年原子力について十分な議論を尽くすことなくきてしまったわが国は、エネルギーについて語りづらい資源小国となった。迫り来る厳しい気候変動の解決の糸口となるエネルギー選択を次世代に重ねると、これから始まるビッグイベントの歓喜のその先の未来像が見えてこないため手放

しでは喜べないのである。

私がエネルギー問題を直視したのは、2010年に母校のリカレント教育課程ⁱで受講した「地球環境エネルギー産業講座ⁱⁱ」であった。修了レポートで提案した『初等教育(幼児～小学生)における放射線理解のための学習会企画』がきっかけで今日に至る。放射線の存在を知らなければ原子力を含むこの国のエネルギーについて語ることは困難と考えたからだ。対象を幼少期とした理由は二つ、ひとつ目は空気と同様に放射線があることをありのままのイメージでまず知る。ふたつ目は子どもの年齢が小さいほど保護者との距離が近いので、子どもを通じて放射線を学びそびれた世代へもこれを届けることにある。私は前職(幼稚園教諭)の経験から、大切なことを知るのに年齢は関係ないと思っている。エネルギーについての気づきや価値観が形成され始めるのは幼少期³⁾であり、放射線についても小学校社会科の平和教育で学んだ原爆が、後の知識形成に大きく影響しそのまま成人となる報告⁴⁾がある。

私は震災の年に文部科学省主催の放射線出前授業の講師として全国10校の小学1～6年生720人の児童に放射線を伝えたが、かつての放射線＝原爆とは異なり、児童は的確に放射線の姿を捉えていることが感想文から伺い知れた。いくつか紹介しよう。「地球にもともと放射線があったのがわかりました」「放射線の特徴はほとんどおばけと同じだけどはかることができるからすごいと思いました」(以上2年生)「はじめ放射線は体に悪くてなければいいのになと思っていただけ、人の役に立っていることがわかりました」「人の体から、食べ物から、空気にも放射線があると知ってびっくりしました」「こういうことをもっとたくさんの方々に知ってもらいたいと思います」「福島の野菜を買おうとしなかった私は『失礼なことをやってしまった』と思いました。安全だから売ってい

ⁱ 日本女子大学が立案し、文科省の2007年度「社会人の学び直しニーズ対応教育事業委託」として採択された

ⁱⁱ 千代田テクノル(株)、非破壊検査(株)による寄附講座 講師は日本原子力学会シニアネットワーク連絡会(2009～11年度まで6期開講)

るのに」(以上6年生)

子ども達は大人が想像する以上に感性が豊かで情報を持ち胸襟を開いて話しを聴く準備ができています。一期一会の出前授業はフォロー学習ができないので毎回細心の注意が必要だ。例えば、講師の私見を伝えるようなことはないか、使用する言葉は適切か、数字の説明は妥当か、次の学びへつながるかである。そして子ども達の学びは大人にも気づきを与える⁵⁾。放射線出前授業を保護者参観へ開放した小学校があったように、共に知る機会を設けることを勧めたい。

このような私の考えに共感して頂けた原子力安全システム研究所(INSS)は、学校教育へスライドするような放射線学習絵本製作を提案くださり、昨春『はじめてほうしゃせんⁱⁱⁱ⁾』が完成した。絵本のねらいは「放射線を知る」である。この絵本が出てから必ず頂く質問が「幼児に放射線が理解できるのでしょうか」である。就学前後の学習指導において、学びの達成を表す言葉は明確に表現が異なる。幼稚園学習指導要領では理解するという言葉は使わない。かわりに気づく、関心を持つ、味わうという表現で保育が行われる。幼児にとっては何もかもが「はじめて」の出会いだからである。例えば人と「はじめて」と出会った時にその人を理解するとは言わないだろう。放射線学習も同様で、まず出会い、知ってみようという位置づけにした。

絵本という媒体の性質とはじめて放射線に触れることを考え、多くの説明を要する内容や、文字と絵だけでは理解し難い概念については全て削ぎ落とし、見開き2頁に取り上げる話題はひとつとした。最も配慮したことは言葉選びである。短く耳に優しい言葉と文章で、放射線の姿をできるだけまっすぐに届けることをこの作業に込めた。特に作者の主観が反映する形容詞や副詞は極力使用しないように努めた。このようにしながら文科省出前授業で挙げられた小学生指導ポイントを押さえ、加えて原発事故にも触れた。子ども達の世代は、原子力のリスクも覚悟しながら今後のエネルギー選択をしなければならないと考えたからだ。絵本の各頁端には読み聞かせをする大人向けにコラムが添えられている。この解説コラムについては巻末や別刷を設けるのはどうかという意見も頂いたが、私は子どもへの読み聞かせと大人への知識提供の同報を重視した。放射線を学びそびれた世代へ届けるためには、子どものために開いた絵本の頁の傍らに短いコラムがあることが重要だとこだわりを持っている。

絵本をきっかけに様々な出会いがあった。昨年12月にご縁を頂いた福井県原子力平和利用協議会は、原子力

の正しい理解の和を広げることを目的として1972年に結成された歴史ある市民団体だ。その敦賀支部女性部部長から、「放射線の絵本を書いたあなたの創造力で、そもそもなぜ放射線はあるのかについて原子核あたりから話してほしい」と勉強会講師の要請を頂いた。長年、原子力、放射線、日本のエネルギーの学びを重ねている方々に、いかばかりのものを届けられるのかと逡巡したが、共に勉強させて頂くことをお許し頂きお引き受けした。この方は「原子力の善し悪しを問う間もなく既に身近にあり、私たちは共に生きなければならない。難しいことばかりだが少しでも知れば疑問も出てくるし専門家との対話も持てる。私たちがやめたら後には続かないから」と穏やかに語る。原子力立地として引き受けたリスクは、同時に日本のエネルギーを支えている自負でもある。

一方、エネルギーや原子力とはほとんど無縁という、地域で子育てで支援をしている女性達の全国ネットワーク代表者会合に同席させて頂き、原子力、放射線、エネルギーについて各地の声を伺った。中には福島県や関東圏の放射能汚染から避難している方達を支援しているグループもいらした。しかし大半は原子力も放射線も語りづらく今や話題にもほらなくなっているのが現状で、西へいくほどその傾向は強い。印象的だったのは、誰もが「子ども達のためならなんでもできる」と大きく頷いていたことだ。原発反対を声高に唱える方がいる一方で「エネルギー問題は大切だから、まず知って広い視野で考える必要がある」と自身の考えを伝えてくれる方もいらした。この方達はオピニオンリーダーとして、機会さえあれば子ども達のためにエネルギーについて考える準備はあると期待したい。

原子力災害によってエネルギー問題への関心が一時は高まったが薄れるのも時間の問題である。CO₂ゼロエミッションを目指したエネルギーシナリオ^{iv)}も読み解く力がなければ国民の合意形成は難しい。資源小国として国全体のエネルギー・リテラシーの向上をめざすことは重要であり教育に近道はない。現行の学校教育の中でエネルギー教育を明確に位置づけ、地道に取り組むことが急務であると考えます。(2014年1月3日記)

－ 参考資料 －

- 1) 橋場隆, 山下宏文, 他: エネルギー環境教育のあり方に関する研究, *INSS Journal* (12) 46-64 (2005).
- 2) J.DeWaters, S.Powers, : Establishing Measurement Criteria for an Energy Literacy Questionnaire, *J. Environ. Edu* 44 (1), 38-55 (2013).
- 3) Zografakis, N. et al.: Effective education for energy efficiency, *Energy Policy*, 36, 3226-3232 (2008).
- 4) 西谷源展: 放射線に対する意識と学校教育の影響, *Japanese Society of Radiological Technology*, 60 (11), 1555-1563 (2004).
- 5) European Commission: EDUCATION ON ENERGY-Teaching tomorrow's energy consumers, (2006)

ⁱⁱⁱ⁾ 原子力安全システム研究所 社会システム研究所エネルギー問題研究プロジェクト, (2013), 非売品.

^{iv)} 京都大学グローバルCOEプログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点: シナリオ策定委員会, ゼロカーボンエネルギーシナリオの提案, ニューズレター(13), 2-6 (2013).



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員(目次欄掲載)または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。資料提供元の記載のない記事は、編集委員会がまとめたものです。

学会事故調が最終報告書を公表

福島第一原子力発電所事故の原因究明や必要な提言を行うために活動していた日本原子力学会の「東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会」(学会事故調)は3月8日、最終報告書を公表した。

報告書では津波対策や過酷事故対策が不十分だったことが事故を引き起こした直接要因であり、事故後の緊急時対策や事故による影響の緩和・回復策にも問題があったと指摘。その背景には、専門家が個別の狭い専門に閉じこもることでシステムにおける安全に見落としが生じたことをあげ、専門家の自らの役割に関する認識不足があったと分析した。

また事業者は、津波や過酷事故に関する新たな知見により明らかになったリスクを経営判断などによって軽視して必要な安全対策を先延ばしにし、規制要求以上の安全対策を自主的に改善する姿勢に欠けていたと指摘。一方で規制当局は、過酷事故や防災に関わる安全規制が国際的に大きく遅れをとっていたにもかかわらず、国際的な取組みや共同作業から謙虚に学ぼうとする取組みが不足していたとの見解を示した。

さらに原子力発電は、社会や経済に深く関わる巨大複雑系システムとしての特性があることを踏まえ、原子力発電プラントの安全を確保するための、俯瞰的な視点を有する人材および組織運営基盤が形成されていなかったことを背後要因としてあげた。

これらの分析と事故の分析評価から、報告書は5つの大項目に関する50件にわたる提言をまとめ、学会が果たすべき責務の再認識や学際的取組みの強化などを盛り込んだ。提言の主なものは以下の通り。

(1) 原子力安全の基本的な事項

規制組織は安全目標とともにリスク情報を積極的に活用し、基本安全原則など高次の安全思想を規制上に明確に位置づけ、規制基準などの体系化を図る。また、深層防護の理解の深化と適用の強化を図る。そのためには日本原子力学会が立案した「基本安全原則」を活用し、安全設計の基本的考え方を明文化した規制図書を制定すべきである。

(2) 直接要因に関する事項

地震や津波などの外的事象に対する包絡的な評価を行い、プラントごとに対応を定めていくことを義務付ける。過酷事故ではシナリオ通りには事象が進展しない可

能性があるため、マネジメントとして事態に対応する柔軟な対応能力が必要である。この醸成のため、演習などを通じた継続的な改善活動を行うべきである。初期の危機管理の段階では、事業者と地方公共団体が連携し、決められた手順で放射性物質の環境放出前に迅速に緊急防護措置を実行していくスキームを確立するべきである。

(3) 背後要因のうち組織的なものに関する事項

学会は、社会からの信頼と負託に応える責務を有する。被災地域の復興と日本の再生に向けた活動も学会の責務であることを再認識しなければならない。また学会は、学会において自由で率直な意見交換を行える雰囲気醸成に努める。さらに学会は、原子力安全研究や、原子力安全に関する他のアカデミアを含めた俯瞰的な討論と協働のための「場」の構築について、主導的役割を果たさなければならない。規制制度の裏付けとなる研究や標準策定活動も強化する。

原子力産業界は安全意識、技術力、対話力という視点から抽出した組織的課題を共通の課題として深く受け止め、その解消に全力で取り組まなければならない。また、トップは組織に継続的に安全性を高める姿勢を堅持する安全文化を浸透させるべきである。

規制機関においても、自らの組織や制度に対する継続的な改善が求められる。このためには、被規制者と緊密なコミュニケーションをとり、被規制者が持つ最新の現場の一次情報に接するとともに、独善を排し規制制度と運用体制の課題を見出す取組みが必要である。また、リスク情報を活用した規制手法の導入に取り組み、ハードウェアの機械的性能に偏してきたこれまでの規制を、原子力安全の基本的な考え方やシステム全体の性能・機能とマネジメントを重視する規制体系に転換する。

(4) 共通的な事項

原子力に関する安全研究は、安全に対するアプローチを俯瞰するための理解を深め、多様な安全向上のためのソフト、ハードの継続的な高度化を進めるための駆動力となるべきである。また、積極的に国際的な活動に参加し、そこでの議論を国内へ反映させる実効性のある体制作りを行うべきである。

原子力分野の人材の育成にあたっては、「原子力安全」を最優先する価値観の継続的向上を図るべきである。常に過信や慢心を排し、「学ぶ態度」および「問いかける姿

勢」を根付かせ、その定着度合いを定期的に確認・評価する。また、原子力分野の職務には原子力に特有の安全知識と経験が必須であることを制度的に明確化し、必要な教育・訓練を徹底すべきである。

さらに人材の継続的な育成の観点から、放射線教育を充実させることは急務であり、原子力関係者は小中高校教員への原子力・放射線についての研修に協力するとともに、原子力への興味を高めるための情報発信をしなければならない。

(5) 今後の復興に関する事項

緊急時に一元的にデータを収集し、保存するための放射線モニタリングシステムを確立し、その体制整備を図るべきである。今後は住民の長期の線量評価も必要であり、個人線量モニタリングの新しい手法を開発し、継続的評価管理を進める仕組みを構築すべきである。

除染実施方法の指針であるガイドラインを、最新の知見を取り入れることにより充実するとともに、除染に柔軟かつ現実的に対応できるようにするべきである。また放射性物質汚染対処特措法と従来から存在する原子炉等規制法などとの関係を整理する。

除染についてはICRPの最適化の原則を踏まえ、現実的な除染目標や除染区域を設定するべきである。除染にあたっては被ばく管理に「平均的個人」を用いるのではなく、各個人の被ばく線量測定結果に基づいて見直すべきである。

市町村が行う除染では、現場に近いところで意思決定が速やかにできるようにすべきである。除染技術についてはその成果を体系的に整理し、効果的に除染の指針や手引きに反映させる仕組みを構築する。また除染廃棄物の保管・貯蔵場所の選定にあたっては住民の参加を積極

的に行い、汚染廃棄物の減容処理、再利用の措置が取れるよう必要な措置を講じるべきである。

環境修復を進めるために周辺住民の理解と協力、参加は不可欠である。そのため日本原子力学会は継続してフォーラムなどの開催、共催、地域との対話集会などを行う。また行政などとの接点となり、必要に応じて住民の要請を取り次いで国や関係団体に必要な措置を要請する。

(6) まとめ

原子力安全を確保するためには原子力安全の基本的考え方を明確にし、確率論的リスク評価を活用し、安全目標を設定すること、そして深層防護の考え方を正しく理解し、プラント設計、アクシデントマネジメント、防災などに適用することに取り組む。それらの基盤となる原子力安全研究の継続的展開の重要性をあらためて強調する。学会は真摯にこの研究に取り組むとともに、人材育成を図り、原子力に係る課題の解決に向けて貢献していく。

これらの提言が、規制機関をはじめとする政府、産業界、学術・研究機関などさまざまな関係者において、今後の具体的な活動に結び付いていくことを期待する。また、当学会自らが取り組むべきものも含まれている。それらへの真剣な取り組みを含め、今後、提言が実現するよう学会として関係機関などへの働きかけを続けていく。

また、これらの提言は、何よりも原子力関係情報の透明性を重視する立場から、原子力発電に関心をもつあらゆる人々と広く共有されるべきものと考えられる。原子力に関わる全ての組織と専門家がここで示された提言を自らへの問いかけととらえ、真剣に取り組むことが必要である。これができない組織と専門家は、原子力に携わる資格がないと、自覚しなければならないと、まとめている。

(原子力学会編集委員会)

規制委が大飯破砕帯を「活動性なし」と評価

関西電力大飯原子力発電所敷地内の破砕帯(断層)が活断層である疑いを指摘されていた問題について、原子力規制委員会は2月12日の定例会合で、「将来活動する可能性のある断層などには該当しない」とする専門家調査団の報告書を了承した。重要施設の直下を通る「F-6破砕帯」について活動性はないとしたもの。敷地内の破

砕帯の評価に関しては、6つの原子力発電所について規制委が評価・検討を行っているが、活動性なしとの評価が正式に了承されたのは、今回の関西電力大飯発電所が初めて。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

世界最大級の超伝導コイル「JT-60SA」を搬入

日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所(茨城県那珂市)の「JT-60SA」に用いる世界最大級超伝導コイルが1月22日、建設を行う本体室に搬入された。

「JT-60SA」計画では、ITER計画から原型炉開発に向けて必要となる高圧力プラズマの長時間(100秒程

度)維持を実現し、運転手法を確立することを目指して、従前の大型核融合装置JT-60を解体し、新たに機器製作・組立が進められている。建設に際しては、本計画が、国内の「トカマク重点化計画」とともに、国際プロジェクトとなるITER計画の補完のため、日欧共同で実

News

施している「幅広いアプローチ活動」の「サテライト・トカマク計画」にも資することから、欧州と共同で機器の調達を行っている。

今回の搬入は、プラズマの位置や形状を制御する大型超伝導コイル「EF(平衡制御)コイル」のうちのEF4～6。

22日には直径10.5mの世界最大級のEF6の搬入が報道陣に公開された。同研究所で製作された大型コイルEF6は、専用開設した搬入口より、縦置きで搬入された。

放医研がセシウムを可視化できるカメラを開発

放射線医学総合研究所は1月23日、放射性セシウムを原子の種類に特有なエネルギーを持つ特性X線で可視化する新しいカメラを開発したと発表した。従来のガンマ線検出型と異なり重厚な遮へい材が不要で、軽量化、コストダウンも可能となり、除染作業や原子炉廃止措置での貢献が期待される。

効率的な除染作業や原子炉廃止措置での汚染管理のため、放射性物質の存在を可視化して分布状況を把握するガンマカメラやコンプトンカメラがこれまで開発されてきた。けれども視野以外の方向を遮るため、鉛などの材

料を遮へい材として使用しなければならず、感度を高めるには機材が重くなるという欠点があった。また、軽量化を図ったコンプトンカメラも構造が複雑なことから高価なため、普及には問題があった。

今回、放医研が開発した「特性X線カメラ」は、ガンマ線ではなく、放射性セシウムが放出する32keVの特性X線を検出することで可視化するもの。ガンマ線は透過させ、特性X線のみをピンホールカメラとして作用するように設計されているのが特徴だ。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】

議会、包括的歳出法案に ユッカマウンテン計画含める

米国議会・下院の歳出委員会は1月13日、今年9月末までが対象となる2014会計年度の包括的(オムニバス)歳出法案を公表し、ネバダ州ユッカマウンテンを将来的に廃棄物処分場として利用可能としておくために継続的な予算拠出の対象に含めていることを明らかにした。

オムニバス歳出法案は、現行の会計年度が始まる前に予算が成立しなかった個別の歳出法案を一つにまとめ、一括処理・成立させるためのもの。上下両院の議員が長期間の協議により予算拠出の優先項目を再調整し、最も必要とされる重要プログラムに税金が投入されるよう考慮し、両院協議会の報告書として上下両院の本会議で順次、採決されることになる。

2014会計年度のオムニバス歳出法案では12分野の通常歳出法案が網羅されており、原子力を管轄するエネルギー・水資源分野においては2013年度予算から7億7,700万ドル増の340億ドルを計上。共和党の優先拠出項目を反映する結果になったとしており、「原子力研究開発」については前年度から5%増の8億8,900万ドルとした。また、既存炉の安全性と運転寿命を保証し

次世代原子炉の開発を促進するための予算は大統領の要請額を1億5,400万ドル上回る額を盛り込んだとしている。

また、「米国人の利益を守るとともに現政権による行き過ぎを阻止するための重要な政策的条項」として、「ユッカマウンテンを将来使用する可能性を維持し、安全評価報告書(SER)の3巻目を完成させることを目的とした前年度予算拠出の継続」を明記した。前年度の予算拠出は、ユッカマウンテンの建設認可申請を審査する米原子力規制委員会にとって繰り越し予算の基準となることから、その重要性に配慮。打ち切りにより同審査のSERが1巻しか発行されなかった事実を鑑み、審査活動の継続を通じて後続の技術文書が作成されるよう促している。

【英国】

NDA、プル管理計画の 進展状況報告書を公表

英国の原子力デコミッション機構(NDA)は1月20日、2030～35年の開始を目指してエネルギー気候変動省(DECC)と共同で、国内のプルトニウム管理計画の進展状況を説明する政策方針書を公表した。過去2年間の評価結果として、MOX燃料に転換して軽水炉で

再利用することが政府の最も望ましいとする管理方法として留まっているものの、信頼性のあるオプションとして CANDU エナジー社製の「改良型 CANDU6 (EC6)」、GE 日立ニュークリア・エナジー社製の高速炉「PRISM」で再利用することについても技術的な段階に調査を進めていくとしている。

いずれの技術にも長短があるが、完璧な解決法は存在しないとして、NDA では多重的なアプローチも視野に入れて最適な税金の使い方を探ると言明。すべてのオプションに関する技術的、商業的なリスクと不確定要素について、一定レベルの理解を得るとともに商業利用に向けた理解も促進する必要があることから、最終的なオプションの選定とその実行に向けて、今後 1～2 年の間にメーカー側と技術調査を行う考えを打ち出している。

英国では既存の再処理プログラム終了時に約 140 トンのプルトニウムが国内に残ると予測されており、DECC は 2011 年 2 月にプルトニウムを戦略的かつ長期的に管理する方策として①現在の長期貯蔵の継続、②固化後に直接処分、③ MOX 燃料に加工し原子炉で再利用——指摘。同年 12 月には聴取したすべての見解から「③案が最も望ましいことが確認された」とし、大部分のプルトニウムを MOX 燃料として再利用、転換不能な残りは固化処分すべきとの見解を表明していた。

同見解はまだ確定したものではなく、最終決定前の実証やリスク軽減などさらなる段階の作業が必要であるため、DECC を支援する NDA はその後、軽水炉での MOX 利用に関する技術的、商業的な観点からの詳細調査に加えて、MOX 以外の再利用について代替提案の募集、再利用しないオプションについても審査を実施した。

【スイス】

世論調査で過半数が「原子力は必要」と回答

スイス政府は福島第一原発事故を契機に、総発電量の約 40% を賄う国内原子炉 5 基を 2034 年までに段階的に閉鎖する方針を決めた。しかし、回答者の過半数が既存原子炉の必要性を認めるという世論調査結果が 1 月 17 日に公表され、国民が手放しで同政策を支持しているわけではないことが明らかになった。

この調査は、同国の原子力発電事業者団体「スイス・ニュークリア」が市場調査会社の DemoSCOPE に委託して 14 年連続で行っているもので、今回は昨年 10 月、同国で多数派を占めるドイツ語圏住民のほか、ティチーノ州のイタリア語圏に居住する合計 2,200 名を対象に実施した。

それによると、回答者の 64.3% が「スイスには既存の

原子力発電所 5 基が必要」と答えるなど、原子力の利点を改めて確認。これは前年に実施した調査から 3 ポイント上昇している。また、62% が「原子力にはコスト的な利点がある」としたほか、68% (前回は 62.1%) が「安全に操業されている限り既存炉 5 基の運転を続けるべきだ」との見解を明示。回答者の 4 分の 3 (前回は 74.2%) が、事業者による継続的な技術改善と設備の近代化を理由に 5 基の安全性を確信するなど、できるだけ原子力の利点を活用すべきだとする国民は増加傾向にある。

その一方で、既存炉が CO₂ の排出量削減に貢献していることを知る回答者は 41.9% と少なく、英米と比較してその環境上の利点に対する認識は低いことが判明した。

このほか、連邦政府の脱原子力政策に関しては、前回調査より 2 ポイント減の 73% が国内の電力需要量すべてを国内で賄うことを希望したものの、諸外国へのエネルギー依存を高める政策を望まない国民の割合は 78% にのぼった。また、88% が「政府のエネルギー移行政策により供給保証が脅かされることはあってはならない」と答えており、前回回答の 84% を上回っている。

なお、2012 年初頭の調査によると、スイス国民の 58% は、エネルギー移行政策のコストと影響が明確になるまで現行のエネルギー・ミックスにおける原子力と水力のシェアを維持したいと回答。78% はエネルギー移行政策、脱原子力政策に関する国民投票に参加したいと答えている。

【ポーランド】

導入計画改定し、初号機の完成を数年先送り

原子力の導入を目指すポーランド政府は 1 月 29 日、前日に閣議決定したばかりの改定版の原子力開発計画 (PPEJ) を発表した。約 20 年前に最初の導入計画が頓挫した同国では多くの人材が諸外国に流出。原発の開発と運転に必要なインフラ全体を構築する必要があるとの認識から、2009 年に公表した開発ロードマップから全体的に 4～5 年、日程を先送りした内容で、2024 年末までに最初の 100 万 kW 分を完成させるとしている。

発表記者会見では PPEJ を作成した経済省の H・トロヤノフスカ次官のほか J・ピエホチンスキ副首相も列席。背景状況について、ポーランドのエネルギー・ミックスにおける最優先事項として競争力増強の基盤となる安価なエネルギー確保の重要性を強調するとともに、国内で増加する電力需要を賄うためには原子力を含めて電源設備を現在の 3,350 万 kW から 2030 年までに 4,450 万 kW に増強する必要があると説明した。

PPEJの長期的なプロセスを通じて政府は単に原発を建設するのではなく、高い要件と基準を満たした原子力によりエネルギー部門で技術文化と専門的人材の雇用を生み出す新たな産業の進展を促すなど、経済社会と地域の開発推進力に位置付けていると強調。欧州委員会(EC)が欧州連合域内の温室効果ガス排出量にさらなる抑制目標を定めつつあることなどから、CO₂排出量ゼロの原子力をエネルギー構成要素に加える必要があるとしている。

経済省はまた、国際原子力機関(IAEA)の資料によると、原子力の導入には初号機の建設も含めて10～15年間の準備作業が必要としている点に言及。関連法整備や組織の設置、科学的な研究、人材の訓練システムなどのインフラから始めることの方針を表明した。

スケジュールの第1段階として、今年初頭から16年末までに第1原発の建設サイトと採用設計を決定し、第2段階の17年から18年末には建設計画に対する法的な承認を得る。19年から始まる第3段階で建設に着手し、これまで20年に設定していた初号機として、少なくとも100万kW分の完成を24年末までに設定。最終段階の25年以降、30年末までに少なくとも300万kW、35年の開発目標として、2つのサイトで600万kWの完成を設定したことを明らかにした。

【ハンガリー】

ロシアからの融資で2基増設へ

ハンガリー政府は1月15日、ロシアと結んだ原子力平和利用分野における協力協定の下、国内唯一の原子力発電所であるパクシュ原発に建て替え用原子炉を2基増設する計画をロシアからの融資により進めると発表した。

総工費の8割に当たる100億ユーロが21年ローンで提供される取り決めで、政府は同原発の設備容量維持のため、経年化炉を大型のロシア型PWR(VVER)でリプレースするとの考えを明示。ハンガリーのV・オルバーン首相とロシアのV・プーチン大統領の会談に合わせて合意文書が14日にモスクワで調印されており、同文書は今後、ハンガリー議会の承認を得るために提出される計画だ。

パクシュ原発では出力50万kWのVVERが80年代から4基稼働している。国内総発電電力量の4割を賄う重要電源であることから、同国の規制当局は2012年、1号機の運転認可を32年まで20年間延長することを承認。残り3基も順次、運転認可を延長していくと見られていた。

【スウェーデン】

バッテンフォール社、 原子炉建て替えて諮問協議開始

スウェーデン南西部沿岸でリングハルス原発(80万kW級BWR1基、90～100万kW級PWR3基)を所有するバッテンフォール社は1月16日、同原発における高経年炉の建て替えを念頭に置いた長期的分析調査の重要な一部分として、将来的な環境影響評価のための諮問協議を関連の政府機関や地元住民、その他の関係者に対して開始すると発表した。

同国では約30年間にわたった脱原子力政策の後、2011年1月に既存原子炉10基に限って建て替えを許可する法案が発効。その後発生した福島第一原発事故で新設をめぐる状況は微妙になったが、バッテンフォール社は12年7月、代替炉の建設可能性を情報分析する申請書を放射線安全庁に提出した。また、昨年6月には、建て替え用を利用選択肢の一つとする用地購入交渉をリングハルス原発近郊の土地所有者と開始している。

【カザフスタン】

ウラン生産量、2013年も世界一

カザフスタンの国営原子力企業であるカザトムプロムは1月23日、昨年1年間に同国のウラン生産量が計画した通り、対前年比7.6%増の2万2,500トンになったと発表した。2009年にカナダを抜いて以降、連続して世界第1位のウラン生産国の立場を維持している。

発表によると、2013年に世界で生産されたウランの総量は速報値で5万8,800トンとなっており、38%がカザフ産。12年の生産シェアから1ポイントの増加となった。このうち、カザトムプロムとしての生産量は1万2,600トンで、世界全体でも21%を占める見通した。また、ウランの年間輸出契約量は、2013年はカザフ全体で2万3,400トンだったが、カザトムプロム社の販売量は1万200トン。同社の12年の販売量から940トン増加している。同社は昨年中に米国に代表事務所を開設しており、これが新たなウラン供給契約の実施につながったと説明している。

【ヨルダン】

サウジと原子力導入準備で 協力協定

ヨルダンの国営ペトラ通信は1月22日、同国とサウジアラビアが原子力平和利用分野における二国間協力協

定を締結したと伝えた。原子力導入を目指す中東の両国が、関連研究や人材養成、法整備などの準備作業で協力していく。

同協定への署名はヨルダン原子力委員会(JAEC)のK・トウカン委員長とサウジの「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市(KA・CARE)」のH・ヤマニ理事長が実施。ヨルダンにとってサウジは、日本やロシアを含めて13か国目の原子力協定締結国となった。

協力分野は原子力技術や原子炉の設計、建設、運転に関連する基礎的および応用的な平和利用研究の実施など多岐にわたるほか、原材料物質の研究探査や採掘、放射性廃棄物の管理、関連鉱物の開発も含まれる。

ヨルダンはサウジのような産油国ではないが、ウランを産出する。現時点で国内での核燃料サイクルは検討していないが、JAECのアラジ副委員長は昨年7月、中東地域でサウジが計画する16基を含め20基程度の原子炉があれば、採算性など濃縮施設を国内に持つ前提は満たされ、運営はサウジやUAEなどと多国間プロジェクトにするのが現実的だと発言。遠い将来の可能性はありと見られている。

このほか両国は、保障措置技術や革新的な新世代の原子炉技術、核物質の規制、および原子力安全や放射線防護、環境保護分野における法整備と人材養成の準備でも協力。両国の国境付近における原子力平和利用関連施設の許認可と操業について透明性を保証することも盛り込んでいる。

【インド】

国産炉の新規サイト、 ゴラクプール原発で起工式

インド原子力発電公社(NPCIL)は1月13日、インド北部のハリヤナ州でゴラクプール原子力発電所1、2号機の起工式を開催した。デリー首都圏から北西170kmのサイトでは、原子力省(DAE)大臣を兼務するR・シ

ンハ原子力委員長やNPCIL 総裁などが見守るなか、M・シン首相が記念の礎石を敷設。出力70万kWの国産加圧重水炉(PWHR)を2020年から21年にかけて2基建設するという1期工事の準備作業が開始されることになった。

インドでは現在、長期の運転休止状態にあるラジャスタン1号機を除いて19基の原子炉が営業運転中。昨年10月にインド初の100万kW級PWRであるロシア製のクダンクラム1号機が送電網に接続されたが、それ以外はほとんど出力10万kW～54万kWの国産PHWRである。

ハリヤナで建設されるPHWRはこれらをスケールアップした設計で、カクラパーおよびラジャスタンの2サイトで2基ずつ建設中の70万kW級PHWRと類似のものになる。総工費は2,100億ルピー(約3,532億円)で、動的と静的な安全システムを併用するなど、NPCILでは最新技術を駆使した安全設計であることを強調している。

今後は規制上の承認を段階的に取得しながら、15年6月のコンクリート打設を目指す。最終的には2期工事の2基を含め4基・280万kWが建設される計画だ。

なお、同じハリヤナ州のパハトルガルでは3日、DAEが「原子力パートナーシップ・グローバル・センター(GCNEP)」の定礎式を行った。

2010年4月の核セキュリティ・サミットでシン首相が構想を公表していたもので、①先進的原子力システム、②原子力セキュリティ、③放射線安全、④原子力材料特性、⑤放射性同位体と放射線技術の応用——について調査研究する5つの独立の学校で構成される施設。国際社会との連携を通じ、人類に恩恵をもたらす安全確実かつ持続可能な原子力発電を推進するという義務を負っており、インド内外の科学者による研究活動や人材養成、専門的課題の国際セミナーやワークショップにも活用されることになる。

燃料デブリの臨界安全管理をどうするか 福島第一原子力発電所の廃炉に向けて

京都大学 原子炉実験所 中島 健

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けた課題の一つである燃料デブリの臨界安全管理に関して、技術的な検討を行った。今後の燃料デブリ取り出しのための技術開発及び手順策定に当たっては、炉内状況の十分な調査に加えて、総合的なリスクを低減するという観点に立った検討が必要である。

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(1F)では、2011年3月11日の地震発生時に運転中であった1～3号機の3つの原子炉全てで炉心溶融(メルトダウン)が発生した。溶融した燃料(燃料デブリ)は压力容器内にとどまらず、格納容器にも広がっているものと推測されている。原子力災害対策本部が作成した中長期ロードマップによると、2020年上半期までに燃料デブリの取り出しを開始し、10～15年で取り出しを完了するとしている。(廃止措置の完了は30～40年後となる。)

この燃料デブリ取り出しに当たっては、多くの技術的課題があり、その一つとして燃料デブリの臨界安全管理技術が挙げられる。これは今後の廃止措置の各段階において、溶融した燃料が臨界となり有意な量の放射性物質が放出されるような事態とならないように、燃料デブリの状況を監視し、未臨界状態を維持管理するための技術である。核燃料物質の臨界安全管理技術については、原子力エネルギー利用の初期から多くの研究がなされており、その成果はハンドブックや標準、あるいはデータベースなどとして取りまとめられ、公開されている。しかしながら、それらは正常な状態の燃料(再処理工程などの各種形態・性状の燃料を含む)を対象としたものであり、1Fのような燃料デブリを想定したものではない。また現状では、压力容器あるいは格納容器内のどの位置にどの位の燃料デブリが、どのような形状及び組成で存在しているのか、という情報はほとんど得られていない。このため、原子炉建屋内、格納容器内の調査と併せて、種々の状況を想定した燃料デブリの臨界安全性に関

する技術開発が必要となる。

1F 廃止措置計画における燃料デブリの臨界安全管理の課題については、2011年炉物理夏期セミナーや2013年日本原子力学会「秋の大会」炉物理部会企画セッションにおいて議論されてきた^{1～3)}。本稿では、これらの場における議論を踏まえた、燃料デブリに関する臨界安全上の課題について述べる。

II. 廃止措置

1. 福島第一原子力発電所の状況

2011年12月16日に政府(原子力災害対策本部)は、1Fの原子炉の冷却が安定し、万一のトラブルが生じても敷地内の放射線量が十分低く保たれることが技術的に確認できたとして、「冷温停止状態」に達したと宣言した⁴⁾。その後、2年以上が経過した今日でも注水による冷却は続けられており、並行して原子炉建屋内部の調査が行われているが、燃料の破損状況はいまだに確認できていない。

燃料デブリの臨界性評価においては、燃料デブリの組成、性状、形状などのデータが必要となるが、現状では推測したデータを用いるしかない。この場合、どの程度の保守性を仮定するかによって、評価結果が大きく異なることとなる。

東京電力が実施した解析及びプラントデータ等をもとにした推定によると、各炉における燃料の状態は以下のとおりである^{5,6)}。

1号機： 事故後溶融した燃料はほぼ全量が原子炉压力容器下部プレナムへ落下しており、元々の炉心部にはほとんど燃料が残存していない。下部プレナムに落下した燃料デブリは、大部分が原子炉格納容器ベデスタルに落下したと考えられるが、燃料デブリはコア・コンクリート反応を引き起こすものの、注水による冷却、崩壊

Issues on Criticality Safety Control of Fuel Debris: Ken NAKAJIMA.

(2014年1月6日 受理)

熱の低下によりコア・コンクリート反応は停止し、格納容器内に留まっているものと考えられる。現在(2013年12月)、給水系より2.5m³/h、炉心スプレイ系より2.0m³/hの注水を行っており、圧力容器底部の温度は約20℃となっている。ドライウェル(D/W)の水位は床上約2.8m、圧力抑制室(S/C)はほぼ満水と評価されている。

2号機及び3号機：事故後、溶融した燃料のうち、一部は原子炉圧力容器下部プレナムまたは原子炉格納容器ベダスタルへ落下し、燃料の一部は元々の炉心部に残存していると考えられる。現在、給水系より2.0～1.9m³/h、炉心スプレイ系より3.5m³/hの注水を行っており、圧力容器底部の温度は25℃前後となっている。2号機のD/W水位は床上約60cm、S/Cはトラス室水位と同程度、3号機では、D/W水位床上5.5～7.5m、S/Cは不明である。

2. 中長期ロードマップ

政府及び東京電力は、1Fの廃炉に向けた計画として、2011年12月に中長期ロードマップを策定した(2012年7月及び2013年6月に改定版策定)⁷⁾。第1図にロードマップの概略を示す。このロードマップ策定では、敷地外への放射性物質の影響を極力低減させ、事故前のレベルとすることを大目標としており、このために以下の安全確保の目標を設定している。

- (1) プラントの安定状態を維持しながら廃止措置をできるだけ早期に完了させる。
- (2) 敷地外の安全確保を図る(公衆への被ばく影響の低減)。
- (3) 敷地内の安全確保を図る(作業員への被ばくの低減)。

策定したロードマップは3期に分けられており、第1期は、ステップ2^a完了から初号機の使用済燃料プール内の燃料取り出し開始までであり、2013年11月に終了した。第2期は初号機の燃料デブリ取り出し開始までの期間であり、このために必要な研究開発や格納容器補修作業などが行われるほか、滞留水処理を完了させ、廃棄物処理・処分及び施設解体に向けた研究開発に着手する(目標はステップ2完了から10年以内、改定ロードマップでは2020年上半期)。第3期は、廃止措置終了までの期間であり、ステップ2完了から20～25年後に燃料デブリの取り出しを完了し、30～40年後の廃止措置完了

ステップ1,2	第1期	第2期	第3期
安定状態達成 ・冷温停止状態 ・放出の大幅抑制	使用済み燃料プール内の燃料取り出しが開始されるまでの期間(2年以内)	燃料デブリ取り出しが開始されるまでの期間(10年以内)	廃止措置終了までの期間(30～40年後)
	2011年12月達成	2013年11月開始	目標:2020年上半期

第1図 中長期ロードマップの概略

を目標としている。

この中で、燃料デブリの取り出しは、次の手順で実施することとなっている。

- (a) 原子炉建屋内の除染
- (b) 建屋間、格納容器補修、止水
現状の大循環ループによる冷却から建屋内循環ループ冷却へ、さらに小循環ループ冷却への変更^{b)}
- (c) 格納容器内部調査、サンプリング
- (d) 水張り、圧力容器上蓋開放
- (e) 炉内調査、サンプリング
- (f) 燃料デブリ取り出し、輸送・貯蔵

これらの各手順における作業が燃料デブリの臨界安全管理にどのような影響を与えるのかを評価し、臨界防止のための適切な対応を行っていく必要がある。

なお、上記手順(b)において、止水ができなかった場合に水張りをせずに取り出すための代替法の検討も行っている。その場合には、減速材である水が存在しないことから、臨界の可能性はほぼ無視できることとなる。ただし、何らかの遮蔽材を使用する場合には、遮蔽材による中性子の反射・減速効果を考慮する必要がある。

Ⅲ. 臨界安全上の課題

1. 臨界評価の考え方

中長期ロードマップでは、「安全確保を維持しながら廃止措置をできるだけ早期に完了させる」ことを目標の一つとしている。「早期に完了させる」ことは、1Fが安定状態となつてはいるが、本来の閉じ込め機能を確保できている状況ではないことから、そのリスクを早期に低減させる必要があるためである。燃料デブリ取り出し時の臨界安全管理では、臨界事象発生による公衆、従事者及び環境への有意な影響を与えないようにすることが、最も重要であることは言うまでもないが、それと併せて、取り出しを早期に実施・完了することが必要といえる。

このためには、現場の状況を踏まえた現実的な想定のもとに、安全性を確保できる範囲で効率的に作業を進めていくことが重要となる。臨界性の評価においても、通常の安全評価で行っているような現実的な設定を超えた過度の保守的な条件での評価ではなく、現状に基づく最適な評価(Best Estimate)を行うべきと考える。この場合、評価結果に対して変動し得る範囲(誤差)の評価も必

^{a)} 1F事故収束の道筋として定められたステップの一つ。「放射性物質の放出が管理され、放射線量が大幅に抑えられている」状況(冷温停止状態)であり、2011年12月に達成された。

^{b)} 大循環ループ：現状の循環注水ラインを指す。建屋内循環ループ：現在の汚染水処理設備を経由せずに建屋内の滞留水を原子炉へ注水するループ。小循環ループ：格納容器止水後に格納容器内の水を循環させるループ。なお、ループ変更の詳細は、止水及び地下水流入対策の状況により決定する。

要となる。現実的な評価を行うためには、燃料デブリの組成や密度、分布状態などの情報が必要であるが、不明な情報については推定に基づくこととなるが、その場合は推定の誤差を考慮した保守的な設定とせざるを得ない。このため、格納容器及び圧力容器内部の早急な調査が待たれる。

2. 臨界の可能性検討

(1) 臨界性の評価

各炉の運転履歴等の運転管理データから燃料組成を評価することは可能であり、燃料デブリが均一の組成を有していると仮定するならば、その組成を評価することができる。しかし、TMI-2の燃料デブリの分析結果によると、燃料溶解の状況が燃料デブリの組成に大きな影響を与えていることが示されている。このため、均一組成の燃料デブリは仮想的なものといえるが、1Fの燃料がどのような条件で臨界となるのかを確認するために、均一組成燃料の臨界性評価を行った。第2図に、燃焼度を21GWd/tとしたときのUO₂粉末が水(H₂O)中に均質に分布した球形状炉心の実効増倍率のH/U依存性を、新燃料(0GWd/t)の値とともに示す。ここでは、2号機あるいは3号機に装荷された燃料量である燃料集合体548体に相当する初期U量(約100トン)を用いており、ほぼ無限体系になっている。なお、燃焼度21GWd/tは3号炉の平均燃焼度(21.8 GWd/t)を模擬している。図の横軸であるH/Uは、水素とウランの原子個数密度の比であり、中性子減速の度合いを表している。図中の表に、代表的なH/Uに対応したウラン濃度及び含水率を示してある。また、燃焼燃料の実効増倍率評価において考慮したFP核種は、臨界安全ハンドブック⁸⁾において燃焼度クレジットの評価時に考慮してよいFP核種としており、構造材や制御棒(B₄C)は存在しないものとした。

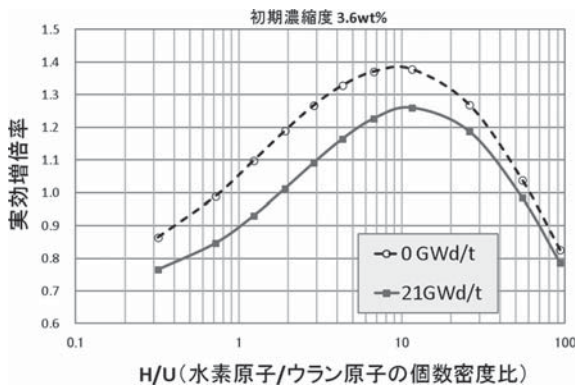
同図より、燃焼燃料、新燃料ともにH/U = 10前後で

最適減速状態となり、実効増倍率が最大となっている。また、臨界となる範囲は、燃焼燃料でH/U = 2.0 ~ 50、新燃料ではH/U = 0.7 ~ 60となった。これらは、ウラン濃度に換算すると400 ~ 7,700gU/Lの範囲となり、ウラン溶液としてはかなりの高濃度となる。粉体状の燃料デブリが冷却水などにより攪拌された場合には、このような状況が過渡的に生じる可能性がある。一方、体積比(含水率)として考えた場合は20 ~ 96%と臨界の範囲が幅広く、多孔質状の燃料デブリ内部に水が浸入した場合には、臨界となりうる。ちなみに、燃焼燃料で最適減速状態の場合には、約300kgのウランがあれば臨界となりうる^c。ここでは、構造材や吸収体、あるいは水中の不純物などを無視したほか、最も臨界となりやすい球形状を仮定しており、仮想的な臨界量といえるが、炉内装荷量(約100トン)の僅か0.3%で臨界となりうることは注意すべきである。

(2) 冷却中の臨界可能性

現状の燃料は上述のように、1号機では燃料デブリの大部分が格納容器ペDESTALまで落下し、炉心部にはほとんど残っていない状態、2、3号機では一部は炉心部に残っているが、他は圧力容器下部あるいは格納容器ペDESTALに落下している状態と推定されている。冷却水は給水系及び炉心スプレイ系から注水している。給水系では、シュラウドの外側を通り圧力容器下部に注水され、炉心スプレイ系では炉心部に直接注水が行われているが、いずれの炉でも圧力容器が損傷していることから、少なくとも炉心部に有意な量の冷却水は存在していないものと考えられる。また、格納容器内の水位は各炉により異なっており(II.1.項参照)、格納容器破損の状況を反映しているものといえる。

1 ~ 3号機には、気相中の放射性物質を除去し外部への放出量を低減させるとともに、水素ガス濃度の監視を行うための「格納容器ガス管理システム⁹⁾」が設置されているが、同システムにより核分裂生成物であるXe-135を測定することにより、燃料デブリの臨界監視も行っている^d。このシステムでは、Xe-135濃度が1Bq/cm³(Cm-244等の自発核分裂により発生するXe-135濃度の約100倍)を超える場合に臨界と判定することとなっており、これは出力約10Wに相当する。このほかに、圧力容器の温度変化及びモニタリングポストにおける空間線量率の変化も臨界の判定に用いている。これまでの



H/U	0.7	2.0	10	50	60
U濃度(gU/liter)	7700	5600	2000	500	420
含水率(Vol%)	20	42	79	95	96

第2図 UO₂燃料の実効増倍率のH/U依存性²⁾

^c最適減速状態の増倍率は第2図より1.28程度となる。これを無限増倍率とみなし、移動面積M²を33cm²と仮定し、球形状の幾何学的バックリングを用いて臨界となる球半径を求めると、約34cmとなった。このときのウラン量は330kgである。

^dXe-135はI-135(半減期6.6h)の崩壊による生成が主であるため、濃度変化に時間遅れが生じる。このため、検出核種をXe-135から、Kr-87, 88に変更し、応答速度を向上したシステムを開発中である。

ところ、臨界と判定されたことはなく、有意な臨界が発生したことはないと判断できる。なお、万が一、臨界の兆候がみられた場合には、注水系を通してホウ酸水が注入されることとなっている。

なお、1Fでは「冷温停止状態」の宣言以後、これまでに多くの地震(余震)や冷却水量の変動を経験しており、それらによる臨界性の変化が認められていないことから、今後も臨界となる可能性は非常に低いといえるが、燃料デブリの分布や形状が変化するような事象が発生する可能性がある場合には、十分な監視が必要である。

(3) 取り出し時の臨界可能性

燃料デブリの取出しの準備として、格納容器等の補修・止水後に水張りを行うが、水張りでは、これまで水が存在しなかった領域が冠水状態となることから、その過程において臨界となる可能性がある。ただし、この場合は注水速度に応じて臨界に近接していくことから、十分な監視を行うことにより臨界となる兆候を検知することが可能と考える。また、万一、臨界(超過)となった場合でも、反応度の添加が比較的ゆっくりとしていることから、過大な反応度超過となる以前に検知し、停止措置を講じることが可能といえる。なお、水張り作業時に大量の燃料デブリが移動する可能性がある場合には、以下の燃料デブリ取り出し作業と同様の対応が必要となる。

水張り完了後の燃料デブリのサンプリングや本格的な取り出し作業の段階においては、燃料デブリの形状、配置を直接変化させることから、臨界となる可能性が最も高くなる。取り出しの際に大量の燃料デブリが崩落などにより压力容器下部あるいは格納容器ベDESTALなどに堆積した場合には、比較的大きな反応度が短時間のうちに添加される可能性があることから、事前に燃料デブリの状況を十分に調査した上で、必要な対策を取り、作業に取り掛かる必要がある。場合によっては、何らかの中性子吸収体⁹を体系に混入させておくことも必要と考える。

3. 臨界事象

燃料デブリが万一臨界となった場合には、放射線の発生による従事者及び公衆への影響、気体状放射性物質の放出による公衆及び環境への影響が考えられる。

燃料デブリは压力容器内あるいは格納容器内に存在しており、また、その取り出し作業は高放射線場での作業となることから、遠隔操作が主となる。このような状況において、臨界となり放射線が発生したとしても、十分な遮蔽体の内部での事象であることから、従事者や公衆

⁹ホウ酸水を格納容器全体に注入するには約200トンのホウ酸が必要と評価されている。また、機器の腐食や廃液処理の問題がある。このため、燃料デブリ取り出し時の臨界安全管理方策として、ペレットやゲル状の中性子吸収体の提案が行われている(2013年日本原子力学会春の年会, H34)。

への影響は非常に低いものと考えられる。格納容器の外部において燃料デブリが臨界となる可能性が考えられる場合には、必要な遮蔽を施す等の対策が必要となる。

気体状放射性物質の放出による外部への影響については、臨界の規模(出力と継続時間)に依存する。万が一、臨界になったとしても、小規模なものに留まれば、外部への影響は軽微なものとなる。基本的には臨界としないことが望ましいが、万一、臨界となった場合でも外部への影響が無視できるものであるならば、総合的なリスクは変わらないこととなる。むしろ、臨界防止のための手順が複雑になり作業期間が長期に及ぶような場合には、総合的なリスクが高くなる場合もあるので、注意が必要である。

臨界時に発生する希ガス、ヨウ素による被ばく線量を東京電力が評価しているが、それによると、臨界となり出力1kWが24時間継続(24kWh)した場合、敷地周辺において24 μ Svの被ばく線量となる¹⁰。これに従えば、出力100kWが10時間継続(1,000kWh)した場合には、1mSvとなる。これは通常の閉じ込め機能を無視した結果であり、閉じ込めを考慮するとより低い値となる。したがって、臨界となっても早期に検知し、短時間に収束することができれば、外部への影響は軽微なものに留めることができる。このためには、臨界の兆候あるいは臨界状態を早期に検知し、適切な停止措置により短時間で収束させる技術の確立が必要である。

なお、大量の燃料デブリの位置変化などにより、急激に大きな反応度が添加されるような場合には、臨界の検知及び停止措置が働く前に相当数の核分裂が発生し、多くの気体状放射性物質が放出される可能性がある。臨界の規模は添加される反応度に依存するが、燃料デブリが機械的に拘束されていない条件下では、急激な出力上昇に伴い発生する機械的エネルギーにより燃料デブリの形状が変化し、比較的短時間で未臨界となることが考えられる。また、燃料デブリの表面積が大きく水への熱移動が容易なことから、压力容器や格納容器を破損させるような大規模な蒸気爆発が発生する可能性は低いといえる。しかしながら、燃料デブリの形状が変化するような作業を行う場合には、事前調査により状況を十分に把握し、急激な反応度添加が生じないような対策を取っておく必要がある。

IV. 今後の課題

これまでの議論を踏まえた燃料デブリの取出し時における臨界安全管理における課題を以下に示す。

・状況の把握

燃料デブリの組成、密度、配置等を明らかにすること。このためには、解析コード等による燃料溶融過程の解明を行うとともに、炉内の調査・試料のサンプリング及び分析が必要である。

・臨界評価の検証

上記の状況把握に基づいた臨界評価における精度(誤差)の妥当性を確認すること。

・臨界の検知と停止措置

臨界の兆候あるいは臨界を早期に検知するシステム及び検知後短時間で未臨界とするシステムを開発すること。また、それらを用いた臨界事象の検知、停止の有効性を確認すること。

・総合的なリスクの評価

臨界安全管理を含めた燃料デブリ取り出しに係るリスク要因を抽出し、公衆及び従事者の安全確保と環境の保全の観点から、種々の状況下における総合的なリスクを評価し、これを低減するための方策を検討すること。なお、方策の実施に当たっては、広く情報を開示し、関係者の理解を得ることが必要と考える。

— 参考資料 —

- 1) 第 43 回炉物理夏期セミナーテキスト, 日本原子力学会炉物理部会, (2011 年 8 月).
- 2) 中島健, 「再臨界について」, 炉物理の研究第 64 号, 日本原子力学会炉物理部会, (2012 年 3 月).
- 3) 日本原子力学会「2013 年秋の大会」炉物理部会セッション「燃料デブリ取出に向けた臨界安全における課題」, (2013 年 9 月).
- 4) 「東京電力福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋

ステップ 2 完了報告書」, 原子力災害対策本部 政府・東京電力統合対策室, (平成 23 年 12 月 16 日).

- 5) 「福島第一原子力発電所 1～3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第 1 回進捗報告」, 東京電力, (平成 25 年 12 月 13 日).
- 6) 「福島第一原子力発電所 プラント関連パラメータ」, 東京電力, (2013 年 12 月 30 日).
- 7) 「東京電力(株)福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」, 原子力災害対策本部 東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議, (平成 25 年 6 月 27 日).
- 8) 日本原子力研究所核燃料施設安全性研究委員会, 臨界安全ハンドブック第 2 版, JAERI 1340, (1999).
- 9) 「福島第一原子力発電所 1～4 号機に対する「中期的安全確保の考え方」に関する経済産業省原子力安全・保安院への報告について(その 1)(改訂 2)」(4. 原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備), 東京電力, (平成 23 年 12 月 7 日).
- 10) 「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」(II-2-8 原子炉格納容器ガス管理設備), 東京電力, (平成 24 年 12 月, 平成 25 年 8 月一部補正).

著者紹介



中島 健 (なかじま・けん)

京都大学 原子炉実験所

(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 臨界安全, 臨界事故, 原子炉実験・教育



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 —
(3月3日第9回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌は 2 月期に特集号を含め 31 論文が投稿された。5 月号入構済み。Special Issue への投稿状況が報告された。
- ・和文論文投稿数減少への対策として、和文誌掲載論文のうち、ダウンロード回数が多い論文の中から、著者が希望する場合、英訳し英文誌へ転載することとした。英文翻訳料は著者負担、英文誌掲載料は免除とする。福島事故関連論文は積極的に進める。掲載は毎月 1 論文程度。
- ・論文誌関連規定類の見直し検討経過が報告された。
- ・次年度の分野別編集委員数を増加することを確認した。また、外国籍の編集委員の増員を検討することとした

【学会誌関係】

- ・次年度予算、広告の出稿予定について委員長から報告があった。
- ・編集長から、次年度の予算申請に関する経緯の説明、学会誌の編集方針、最近の学会誌に掲載されている社会性のある記事について、説明と報告があった。
- ・2/28 に実施した、学会誌座談会の報告が編集長からあった。掲載は、5 月号の予定。
- ・春年会の企画セッションからの記事候補の確認を行った。学会誌記事に採用したいセッションは、年會を待たずに執筆の打診を行い、掲載に向けて進めることを確認した。
- ・巻頭言、時論の企画状況、今後の掲載予定について確認した。
- ・バックエンド部会と企画していた連載講座の執筆者、メ切等が確定し、担当委員から報告があり、提案は了承された。連載は 9 月号からの予定。

編集委員会連絡先 < hensyu@aesj.or.jp >

解説

燃料デブリ取り出しに向けた臨界安全における課題 燃料デブリの性状に関する知見と検討

日本原子力研究開発機構 永瀬 文久

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置を進めるためには、燃料デブリ取り出し時及び取り出し後の臨界安全管理が必要である。燃料デブリの臨界安全管理技術開発においては、燃料デブリの単位大きさ、気孔率、燃料と制御材料や構造材との混合状態、燃焼度分布、核分裂生成物の残存率等に関する情報が重要である。本報告においては、シビアアクシデント時の燃料及び炉心構成材料の挙動やスリーマイル島発電所2号炉から採取した燃料デブリの特性に関する知見を整理し、臨界安全管理の観点から福島第一原子力発電所で形成された燃料デブリの性状について検討する。

I. はじめに

東京電力(株)福島第一原子力発電所(福島第一原発)の1号機から3号機においては、多くの燃料が溶融した可能性が高い。原子力災害対策本部に設置された「東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議」は発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップを策定し、溶融した燃料の取出しを10年後以内に開始し20～25年後に完了するとしている。廃止措置を確実にかつ効率的に進めるためには、様々な課題について技術開発を行う必要がある。燃料デブリ(二酸化ウラン(UO₂)燃料やその他の炉心構成材料が溶融して固化したもの)の臨界管理技術開発はそのうちの一つであり、臨界検出技術や臨界回避対策などが検討されている。これらの技術開発を行っていく上で、燃料デブリの性状や分布に関する情報が必要とされ、「技術研究組合 国際廃炉研究開発機構」においては、臨界管理技術開発に加えて燃料デブリ性状把握や事故進展及び炉内状況推定を目的とした研究開発も行われている。

本報告においては、米国スリーマイル島発電所2号機(TMI-2)事故以降に蓄積された炉心溶融及び燃料デブリ性状に関する知見についてとりまとめ、それを基に福島第一原発内の燃料デブリの性状に関する検討を行った結果を紹介する。

Subjects on Criticality Safety for Fuel Debris Retrieval ; Knowledge and consideration about characteristics of fuel debris : Fumihisa NAGASE.

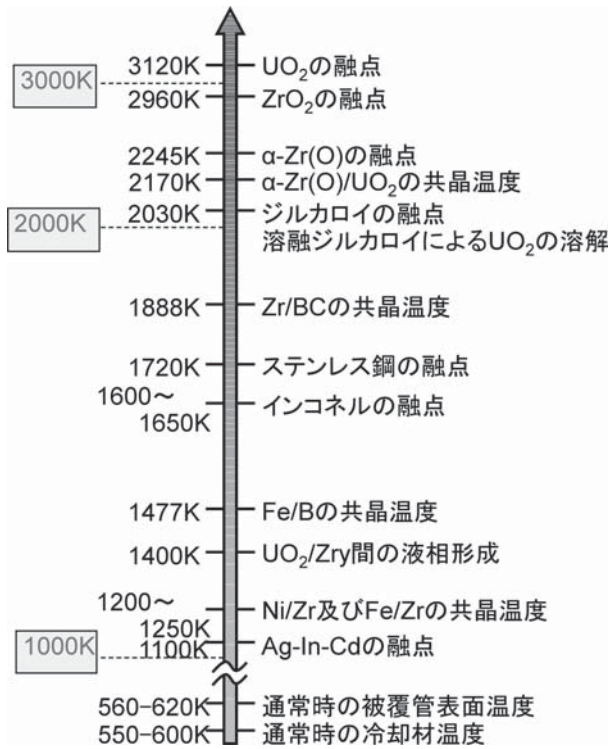
(2014年1月6日 受理)

II. 炉心溶融進展や燃料デブリ性状に関する従来知見

1. 炉心溶融進展に関する従来知見

原子炉炉心にはUO₂ペレットとジルコニウム合金(代表的にはジルカロイ)製被覆管からなる燃料棒以外にも、燃料棒を束ねるスペーサーグリッド、制御材(Ag-In-CdやB₄C等)、制御棒被覆管材(ステンレス鋼)、炉心シュラウドや下部支持板等の炉心支持構造物(ステンレス鋼)が存在する。これらの炉心構成材料は一般に高い融点を持ち、運転温度条件では安定である。しかし、シビアアクシデント時には崩壊熱の蓄積とジルカロイ/水蒸気反応が主要な熱源となり、炉心温度は3,000Kを超えることもあることから、炉心構成材料は溶融し温度と時間に依存して溶融の範囲は拡大していく。

第1図¹⁾は、炉心構成材料の融点や化学的相互作用、特に液相を形成する共晶形成温度を温度指標上に示したものである。燃料棒を構成するUO₂とジルカロイの融点は比較的高い温度範囲にあるが、Ag-In-Cdの融点、BWRで用いられている制御棒を構成するボロン(B)とステンレス鋼の主成分である鉄(Fe)との間の共晶温度、Feと燃料被覆管の主成分であるジルコニウム(Zr)との間の共晶温度は1,500K以下にあることが分かる。これらの温度は不活性雰囲気中で酸化していない材料について調べられたものであり、酸素ポテンシャルや材料の酸化状態によって変わる(高温側にシフトする)が、UO₂の溶融よりかなり低い温度で(早い時刻に)制御棒や構造材料において液相の形成が始まる。炉心構成材料間反応に関する反応速度も実験的に求められている^{2,3)}。BWRの場合、BWR制御棒材料間の反応であるB₄C/ステン



第1図 炉心構成材料の溶融及び共晶(液相)形成に関する温度指標¹⁾

レス鋼反応が、約 1,480K 以上では大きな反応速度をもって進行する。UO₂ とジルカロイ被覆管との間にも、1,700K を超える高温では界面に液相金属ウランを含む反応層が形成され、ジルカロイ被覆管の融点以上では急速に UO₂ が溶解される⁴⁾。制御棒や金属炉心構成材料から始まった液相形成が温度上昇とともに徐々に燃料領域に広がっていくことがこの温度指標や反応速度に関する知見だけからも分かる。

1980 年代を中心に燃料集合体の損傷及び溶融過程を調べる大規模な試験が、研究用原子炉等を用いて精力的に実施された³⁾。これらの実験ではシビアアクシデント模擬条件下で大小様々な燃料集合体を加熱し、燃料棒の温度変化、燃料の損傷、溶融した燃料棒の崩落と固化、及び低融点の制御棒材やスペーサーグリッドが集合体溶融に与える影響等が調べられた。

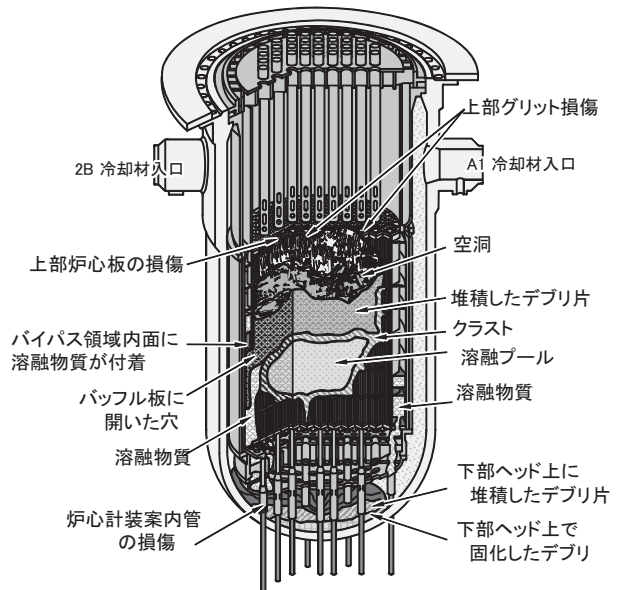
以上の基礎知見及び大小試験から得られた知見を基にすれば、シビアアクシデント時には炉内では以下のような溶融が開始し進展すると推察できる。炉心での溶融開始位置は比較的溫度が高い炉心中央かややその上である。まず、低融点の材料を含む、あるいは構成する材料間に比較的低い溫度で共晶が形成される制御棒において液相が出現し、制御棒が溶融崩落する。発生した溶融物は下方に流れ落ち、燃料集合体のスペーサーグリッド上あるいは炉心下部の溫度が低い位置で固化する。溶融物の一部は半径方向にも広がり UO₂ や被覆管を溶解する。溫度上昇が続けば UO₂ とジルカロイの反応が顕著となり、UO₂ や ZrO₂ 等のセラミックスの溶融も起こる。す

なわち、溶融過程の初期に炉心下部に流れ落ちる溶融物の多くは制御棒構成材料などの金属成分が多く、遅れて UO₂ や酸化した被覆管などのセラミックス成分が流れ落ちると考えられる。しかし、事故シナリオや事故時の炉内条件によっては炉心下部に流れ落ちた金属およびセラミックス溶融物が一旦固化した後に、崩壊熱により再溶融し混合する可能性もある。混合した後に比重等の違いから金属とセラミックスが分離することもある。また、溫度上昇がゆっくりで酸素ポテンシャルが高ければ、材料の酸化が主となって溶融のタイミングが遅れ、酸化により脆化した炉心構成材料が何らかの負荷(例えば、冷却材の注入時の熱衝撃等)により崩落するシナリオも考えられる。

2. TMI-2 デブリ分析から得られた知見

TMI-2 事故は機器の故障と人為的ミスがいくつも重なり、圧力容器内から冷却材が流失した事故である。炉心の約 3 分の 2 が露出する状態になり、露出は約 2.5 時間に及んだ。この間、炉心中央上部で燃料集合体の溶融が始まり、炉心の約 45% (62t) が溶融した。溶融物は炉心下部で一旦固化したが、崩壊熱の蓄積により再び溶融し、約 19t が圧力容器下部ヘッド上に流れ落ちた(第2図⁵⁾)。

TMI-2 は加圧水型軽水炉 (PWR) であるのに対して福島第一原発は沸騰水型軽水炉 (BWR) であり、使われている炉心構成材料やそれらの装荷量、原子炉圧力容器内の構造が異なる。また、事故シナリオも異なり、さらには炉心が露出していた時間も福島第一原発ではより長い (6 ~ 14 時間という推定)。このため、詳細において燃料デブリの性状や分布⁶⁾ は TMI-2 と福島第一原発では異なると考えられるが、TMI-2 デブリ分析の結果は福



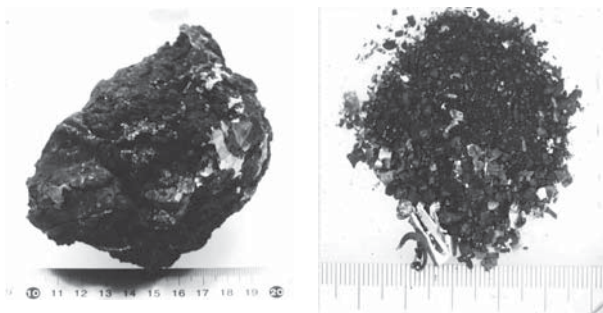
第2図 TMI-2 炉心の損傷状況⁵⁾

島第一原発でのデブリ性状推定に活用できる。

第2図に示したように、炉心上部で溶融した燃料は炉心下部で固化し、溶融プールとそれを囲むクラスト層を形成している。また、溶融プールから流れ出した溶融物は、下部ヘッド上で固化している。これらの領域では燃料デブリは連続した固化物であり、压力容器の直径から考えると最大で2～3mの塊となる。一方、炉内には大小の固化した溶融物や破碎したUO₂や被覆管の破片からなるデブリ(ルースデブリ)がある。日本原子力研究開発機構に運ばれた燃料デブリの外観例を第3図に示す。TMI-2炉心からの取り出し作業時に割れたものもあるが、拳より大きいものから砂粒のように細かな粒子まである。すなわち、燃料デブリの大きさや形状は、溶融進展過程や冷却条件等の形成条件によって様々であり、福島第一原発においても様々な大きさや形状の燃料デブリが存在すると考えられる。

日本原子力研究開発機構に持ち込まれたTMI-2デブリに対する密度測定結果を第1表に示す。採取位置により若干の違いは見られるが、加重平均密度は8.1 ± 0.7g/mm³程度である。密度の小さなデブリは金属や気孔を多く含み、密度の大きなデブリはUO₂を多く含むと考えられる。PWRにおける炉心材料の初期装荷量の90%以上がUO₂ペレットとジルカロイ被覆管であることから分かるように、多くの燃料デブリの主成分は(U, Zr)O₂であった。UO₂(理論密度: 10.95g/cm³)とZrO₂(同, 5.56g/cm³)の間にあるデブリの平均密度は、一定の気孔率を考慮すれば妥当な値である。

第4図は気孔を有するデブリの断面マイクロ組織の例である。気孔は、ガス状のFP、蒸発した金属、溶融物が冷却材中に落下した際に巻き込んだ水蒸気等により生成されると考えられる。これらの生成条件は、事故シ



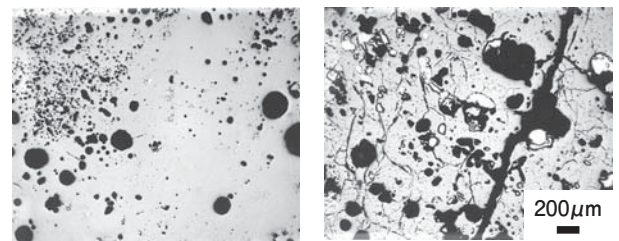
第3図 燃料デブリ外観の例

第1表 TMI-2デブリに対する密度測定結果

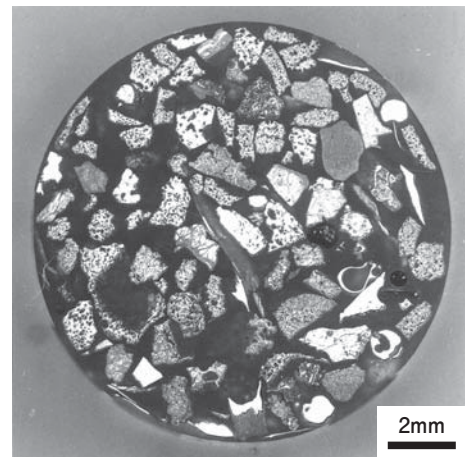
採取場所	測定数	合計重量 (g)	密度 (g/cm ³)			
			最小値	最大値	平均値	加重平均
上部炉心	4	3.4	7.70	10.23	8.52	8.79
クラスト	5	1777.4	7.59	8.57	7.98	7.65
溶融プール	8	174.1	7.66	10.49	8.62	8.00
下部ヘッド(ルース)	1	0.4	-	-	8.08	8.08
下部ヘッド(ハード)	14	736.0	6.32	8.77	7.67	7.38
合計	32	2691.2	6.32	10.49	8.08	7.60

ナリオ(最高温度や冷却条件を含む)や炉内位置により変化するため、燃料デブリ内の気孔率を一概に推定することはできない。冷却材中に落ちて下部ヘッド上で固化したデブリには比較的多くの空孔が見られるが、実際にTMI-2デブリ中に見られる気孔率は様々である(第5図)。

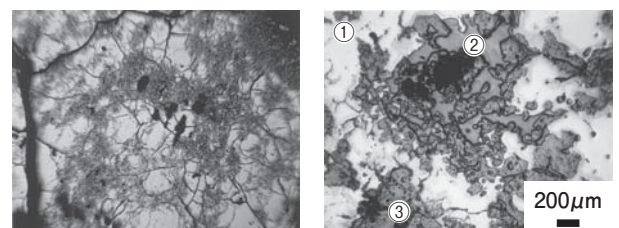
燃料デブリの切断面に対し化学腐食を施して成分毎に異なる着色をしたマイクロ組織の例を第6図に示す。左図は(U, Zr)O₂を主成分とするセラミックス質である。すでに述べたように、この組成を持つセラミックスデブリが最も多い。右図は金属を多く含むデブリの断面である。領域①及び②がジルカロイやステンレス鋼の成分からなる金属であり、領域③が(U, Zr)O₂である。制御棒や燃料棒以外の炉心材料は、溶融進展過程において早期に溶解落ちるとともに燃料領域に広がり燃料棒の溶融を促進することを前項において述べた。このことを裏付けるように、TMI-2で採取されたデブリの中には、制御



第4図 TMI-2デブリ断面に見られた気孔



第5図 下部ヘッド上から採取された様々なTMI-2デブリの断面



第6図 化学腐食を施した燃料デブリの断面組織

棒材料のみで構成されるものもあれば、第6図の右図に示したように燃料と金属材料が混在するものが見られた。ただし、繰り返しになるが、炉心初期装荷量から予想されるように、多くのデブリは(U, Zr)O₂を主成分とするセラミックス質であった。

TMI-2は事故の約3ヶ月前の1978年12月末に営業運転を開始している。したがって、燃料の燃焼度は低く、炉心中央(溶融プール)や下部ヘッド上から採取された燃料デブリ中の燃焼度分布は2,500～4,500MWd/t(平均約3,350MWd/t)、上部炉心から採取された燃料デブリの燃焼度分布は1,800～4,500MWd/t(平均約3,050MWd/t)であった⁷⁾。一方、福島第一原発では炉心に装荷されていた燃料の燃焼度の範囲は広く⁸⁾、燃焼度の範囲は< 10,000～60,000MWd/t程度であると推定できる。一般に燃焼度の高い燃料は炉心外周部に、燃焼度の低い燃料は炉心中央部に装荷されており、事故初期に比較的温度の高い炉心中央部から溶け始めたとすれば、その溶融物には低燃焼度の燃料が多く含まれたはずである。遅れて溶け落ちたであろう高燃焼度燃料が低燃焼度燃料とどれだけ混合するかは、事故の進展と溶融進展シナリオ次第(炉心下部で溶けるタイミングの異なる燃料が混じる過程があったかどうか)で決まる。

燃料温度の上昇と時間の経過に伴い燃料からはFPが放出されていく。燃料にどれだけのFPが残っているかは臨界評価に必要な情報であろう。燃料からのFP放出に関する基礎データは、我が国及び欧米で取得されてきた³⁾。第7図に、揮発性の異なる代表的なFPの放出挙動について概要をまとめた。CsやI等の揮発性の高いFPは燃料の溶融温度に近づくにつれて急速に放出され、燃料が溶融した場合には短時間にほぼ全量が放出される。したがって、福島第一原発においても溶融した燃料にはCs等の揮発性の高いFPはほとんど残っていないと考えられる。実際に、溶融したことが明らかなTMI-2デブリにおいて検出されたCsの量は生成量の5%以下であった⁸⁾。一方、揮発性の低いウランやプルトニウムは、燃料の溶融温度においても放出速度は小さい。福島第一原発においても原子炉建屋外で検出された燃料物質が極微量であることから分かるように、ウラ



第7図 揮発性の異なる代表的なFPの放出挙動
(水蒸気雰囲気)

ンやプルトニウムのほとんどはデブリ中に残っていると予想できる。

TMI-2事故においては、1次冷却水は加圧器圧力逃し弁からの放出により減少し続け、炉内は水蒸気でほぼ満たされていたと考えられる。炉心にあった金属材料はその多くの割合(ジルコニウム約24tの約43%)が酸化され、酸化に伴い発生した水素により炉心の雰囲気は水蒸気と水素の混合雰囲気になった。炉心構成材料中に含まれる元素の酸化状態から事故時における炉内の酸素ポテンシャルが推定されている。OECD/CSNIのTMI-2共同研究で得られた元素の酸化状態に関する情報は以下ようになる。銀、インジウム、ニッケルおよびスズは金属状態で存在した。鉄は金属と酸化物の両方の状態で検出された。クロムは一般に酸化物となっていた。これらの結果から、1,500～2,300Kの温度範囲で、TMI-2炉心の酸素ポテンシャルは約-150kJ/molと約-500kJ/molの範囲にあったと推定されている。

Ⅲ. 福島原発デブリの性状に関する考察

TMI-2デブリの性状から福島第一原発で生成したであろう燃料デブリの性状を推察するためには、TMI-2と福島第一原発との間の炉心及び事故条件の違いを知る必要がある。

まず、TMI-2はPWR、福島第一原発はBWRであることから、圧力容器の内部及び燃料集合体の構造が異なる。例えば、BWR燃料集合体はジルカロイ製のチャンネルボックスで覆われており、4体の集合体の間に制御棒が挿入される。これに対して、PWR燃料集合体にはチャンネルボックスはなく、制御棒は燃料集合体の中、燃料棒間に挿入される。BWR炉心ではジルカロイの割合が比較的大きい。また、既に述べたように、BWRではB₄Cが、PWRではAg-In-Cdが主に制御材として使用されている。

2つの事故では、炉型に加え、事故原因、事故時の運転員の対応や安全機器の作動状況、冷却材の注入条件等が異なり、燃料デブリ性状に及ぼす炉内の温度や雰囲気等が異なるはずである。また、炉心が露出していた時間も、TMI-2では2.5時間程度とされ、福島第一原発では6～14時間程度と推測されている。さらに、福島第一原発では压力容器底を貫通して溶融物が格納容器に落下し、コンクリートと反応し、いわゆるMCCI(Molten Core Concrete Interaction)生成物が生じていると考えられる。MCCI生成物には、炉内で生成したデブリの組成に加え、コンクリート成分であるCaOやSiO₂、ステンレス鋼等が酸化したFeOやCr₂O₃が多く含まれている⁹⁾。

これらの違いを考慮し、TMI-2事故以降に行われたシビアアクシデント時の燃料挙動に関する研究やTMI-2デブリの分析の結果から、福島原発での臨界評

価に関連し、デブリの性状を以下のように推察する。

燃料デブリの形状は、TMI-2 デブリと同様に様々であろう。一旦固化した溶融物が再溶融して固まった溶融プールのような大きな塊から、液滴が固まったものや急冷時に破碎した燃料片や金属酸化物からなる小片まで想定される。事故の進展が比較的少ないと考えられる2号機や3号機では炉心周辺部で燃料が溶融せずに残っている可能性もある。

制御棒が早期に溶融崩落するなどの溶融シナリオと初期インベントリーを考えると、燃料、制御材及びその他の炉心構成材料が炉内全体にわたり均一に混合したデブリが生成していることは考えづらい。大部分のデブリ主成分は(U, Zr) O₂であり、制御材や制御棒を構成する金属材料の一部はこのセラミックス相に分散しているであろうが、多くは分かれて存在するのではないだろうか。炉心が冷却材から露出していた時間が長かったために溶融進展の度合いが高く、下部プレナムや圧力容器の下部ヘッド上に溶融物が一箇所に集まり再溶融した場合にはそこで均質化が起こっているかもしれない。これも局所的に過ぎないと考える。大きな塊が再溶融した場合にも、密度差や化学的な混合性、揮発性も考慮すれば、金属材料とセラミックスが分離している可能性は十分ある。

燃焼度の異なる燃料間の混じり具合についても、溶融進展シナリオと事故進展の度合い次第であるが、炉心位置により燃料が溶融したタイミングが異なり、燃料デブリ中の燃料の燃焼度は採取位置によって異なると考えた方がいいように思える。

燃料デブリの空孔率は、燃料デブリの生成条件、生成位置、冷却条件等に依存し一様ではないと考える。

事故時の炉内雰囲気については、事故シナリオがある程度推定できればシビアアクシデント解析コードによって推定することが可能である。また、これによって金属の酸化の程度も評価可能だと考える。

燃料あるいは燃料デブリ中のFP残留率は、元素の揮発性に依存する。揮発性の高い希ガス、ヨウ素、セシウ

ムは、燃料(デブリ)中にほとんど残存していないと考ええてよく、炉内の壁面や水中に多く存在していると考えられる。一方、揮発性の低い元素については、比較的多くが燃料(デブリ)中に残っていると考えてよい。

IV. おわりに

臨界安全管理の観点から、TMI-2 事故以降に蓄積された炉心溶融及び燃料デブリ性状についての知見を整理し、福島第一原発内の燃料デブリ性状に関する検討を行った。

事故の進展や炉内条件、炉内位置によりデブリの性状は変化するため、検討の結果はあくまで推定であり、一例に過ぎない。シビアアクシデント解析コードにより炉内状況の推定が行われ、その結果はデブリ性状の推定にも活用できると考えられる。しかし、福島第一原発事故においては電源の喪失により事故時のパラメータが十分に得られなかったことから、解析コードを用いた評価においてもいまだ不確かさが大きく、デブリ性状把握や臨界管理においても慎重な技術対応が必要であると考え

— 参考資料 —

- 1) P. Hofmann, *et al.*, *Nucl. Technol.*, 87, 146-186 (1989).
- 2) 永瀬文久, 東北大学工学研究科, 学位論文, (1997).
- 3) B.J. Lewis, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 380, 126-143 (2008).
- 4) P. Hofmann, *et al.*, KfK-4485, (1989).
- 5) C.S. Olsen, *et al.*, *Nucl. Technol.*, 87, 57-94 (1989).
- 6) 永瀬文久, 日本原子力学会誌, 54 (11), 727-731 (2012).
- 7) 上塚寛, 他, JAERI-Research 95-084, (1995).
- 8) 西原健司, 他, JAEA-Data/Code 2012-018, (2012).
- 9) C. Journeau, *et al.*, *Nucl. Eng. Technol.*, 44 (3), 261-272 (2012).

著者紹介



永瀬文久 (ながせ・ふみひさ)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野) 事故時燃料挙動評価

福島沿岸海域におけるセシウム 137 収支と生態系移行

東京海洋大学 神田 穰太

福島第一原子力発電所事故は、大規模な海洋汚染を伴った点で、過去の事故と大きく異なっている。我が国の沿岸海域ではじめて経験した深刻な海洋汚染であったこともあり、調査・研究についても十分とはいえない面があった。本稿では、セシウム 137 (^{137}Cs) を中心に海洋環境での収支と生態系内での移行について、事故後の推移と現状を概説する。一部の魚種で放射能レベルの低下が予想外に遅いこと、依然として海洋へ放射能流出が継続していることなど、残された課題についても紹介する。

I. 福島事故による海洋汚染と調査の経緯

福島第一原子力発電所事故は 2011 年 3 月 11 日の地震とそれに続く津波による冷却機能喪失により、核燃料の融解・破損と建屋内での水素爆発を経て、压力容器や格納容器、配管等の損傷に至ったものである。事故により外部へ大量の放射性物質を漏出する結果となり、海洋環境にも大きな影響が及んだ。

1. 事故による海洋への放射能移行

事故ではまず大気へ放射性物質が放出された。放出は 2011 年 3 月中旬から始まり、放出総量の大部分は 3 月末までに放出されたと見られている¹⁾。大気中へ出た放射性物質は、拡散しながら大気と共に移動した。放射性物質の種類(核種)によるが、大気中に分散した核種の一部はやがて地上か海面に沈着(塵や雨などとして降下)した。この大気経由の沈着が初期段階での海洋汚染の主要なプロセスであった。

一方、事故直後から 1～3 号機の原子炉を冷却するために様々な手段で炉内への注水が行われた。容器や配管の損傷もあって、注がれた水の流路は今も正確には分からないようであるが、炉内で汚染されたと考えられる高濃度の放射性物質を含む水が、隣接するタービン建屋地下などに滞留しているのが 3 月 24 日までに確認された。続いて 4 月 1～6 日には 2 号機取水口前から、5 月 10～11 日には 3 号機取水口前から高濃度汚染水が港湾へ

漏出しているのが確認された。この高濃度汚染水は建屋の地下から、周辺のケーブルホール、トレンチ、配水管その他の管渠に流れ込んだものが流出したとみられている。この他に、4 月 5～10 日に低レベル汚染水の意図的排水も行われた。5 月までの段階で東京電力が確認している汚染水流出はこの 3 件のみである。しかし、後述のように発電所周辺の海水の放射性物質濃度は 3 月 26 日頃から急増していることから、すでにこの頃から何らかの経路による汚染水流出があったと考えられる。この 3 月中の流出を含め、経路や量が明らかになっていない流出があったことは確実と思われる。大気からの沈着にやや遅れて、放射性物質が汚染水として海洋に直接流出したことが、今回の事故の海洋汚染を特徴づけている¹⁾。

2. 海洋調査の経緯

(1) 政府によるモニタリング

事故を受けて国による海域モニタリングが開始された。東京電力による発電所付近の海岸での海水モニタリングは 3 月 21 日に始まり、港湾内や沿岸海域に順次対象が拡大された。3 月 23 日の海洋研究開発機構・白鳳丸による調査を皮切りに、文部科学省(現在の所管は原子力規制庁)による沖合 30km での海洋調査も開始された。汚染水の漏出を受けて、国、東京電力共にモニタリングの対象海域は順次拡大され、福島県等による沿岸海水の調査も開始された。東京電力による発電所周辺海域の調査も国のモニタリングの一環とみなされるが、広範な海域の調査が事故当事者に委ねられている点は、特に海外からは奇異な状況と感じられるようである²⁾。

海水のモニタリングでの測定値は、5 月以降になると ND(検出限界未満)と報告される場合が多くなってき

Cesium-137 Budget and Ecological Transfer in the Coastal Marine Environment of Fukushima : Jota KANDA.

(2014 年 1 月 6 日 受理)

た。検出限界値は測定時間を延ばす等である程度低下できるし、セシウムについてはリンモリブデン酸アンモニウムによる吸着・濃縮を用いた高感度分析法で事故前のレベルでも測定可能である。モニタリングでの高感度分析の導入は、日本海洋学会などからも提言されたが、実際に行われるまでにはかなりの時間を要した。

海底堆積物については、4月末になってから調査が開始された。堆積物調査も、発電所から20km圏内は東京電力、それ以外が国や県などとする区分がなされた。ただし調査開始から1年程度は、東京電力のデータのみ堆積物の湿重量(水を含んだ重量)あたりの放射能で公表され、国などの乾重量(水を含まない重量)あたりのデータと比較できない状態が続いた。その他に、海岸や河口についてのモニタリングが環境省によってなされている。

(2) 魚介類モニタリング

一方、魚介類の調査も各県などにより、3月下旬から順次開始された。これらのデータは水産庁が取りまとめて公表しているが、基本的に食品としての安全性評価と漁獲物出荷の規制が目的であり、当該海域の主要漁獲物が対象で、魚体も可食部を中心に調べられている。また、震災後の混乱もあって、特に当初は県ごとにデータ数が大きく異なっていた。食用にならない海洋生物はこのモニタリングの対象ではなく、海洋生態系の全体的な汚染状況や、食用魚介類への放射性物質の移行経路等については、この調査から把握することは困難である。

(3) 研究活動としての調査

以上のような行政機関による調査とは別に、研究者による研究活動として行われる調査がある。例えば、筆者の属する東京海洋大学は、海洋調査が可能な練習船を保有しており、石丸隆教授(当時)を中心に海洋における放射能調査の実施が検討された。上述のようにプランクトンや底生生物(海底面付近に生息する生物群)などの調査が欠落していた点を考慮して、生態系についての網羅的な調査が計画された。幸い福島県の漁業者、福島県水産試験場、大学および船舶職員の理解を得て、2011年7月1日から8日にかけて海鷹丸による初めての調査が行われた³⁾。この調査は、以後も年2回のペースで継続されている。筆者も含む東京海洋大学の研究グループは、2012年度から文部科学省科学研究費補助事業・新学術領域研究「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」の計画研究班として活動し、練習船による調査は2013年度から新設の福島大学環境放射能研究所と東京海洋大学の連携事業となっている。

福島第一原子力発電所から半径20km以内の海域は、事故後長く立ち入りが制限されていた。東京電力の関係者を除けば外部の研究者による調査は行われず、生物等に関する調査も実施されていなかった。日本海洋学会震災対応ワーキンググループは、NHKからの提案を受け

て、2011年11月末から12月初めにかけて20km圏内の共同調査を行った。事故後の8ヶ月もの間、外部の研究者が20km圏内に立ち入っていなかったことは、国際的にみても異常な状況であった。共同調査は発電所付近の調査に透明性を確保する一助になったほか、東京電力が生物・魚介類等の調査を開始する契機になったと考えられる。

2012年度以降は、文部科学省、水産庁、環境省などの大型の研究プロジェクトが複数始まり、研究ベースの海洋環境調査は格段に増えたが、海洋調査のスタートは陸上に比べて大きく遅れた。陸上の汚染調査では、大規模な研究者グループの自発的取り組みに国からの支援が行われ、比較的早くから国のモニタリングとも整合する形で研究が進められたと聞いている。船舶が必要であることなど、陸上の調査とは事情が異なる面もあるが、早くも2011年6月に米国の研究船が放射能調査のために福島沖に入ったこととは対照的といわざるを得ない。

研究ベースの調査では、一般に研究成果がまとまるまでデータが公開されない傾向がある。国のモニタリングは、速やかに結果が公開されるものの、公開後のデータ解析等を誰が担うかは不明確で、結果的にデータが公開されればなしの状態になっている面がある。公開によって、きちんとしたデータ解析を外部の研究者等が行うことを促そうとするのであれば、モニタリングの内容やデータのクオリティ等に外部からの要望が反映される仕組みがあっても良いはずである。

II. 事故後の汚染状況の推移

こうした調査を通じて明らかにされてきたセシウム137 (^{137}Cs)による海洋汚染について、沿岸海域を中心に以下に概説する。 ^{137}Cs は天然には存在しない核種であるが、大気圏内核実験等に由来するわずかな量が海洋に残存している。事故前の福島県沖などの海水では ^{137}Cs の放射能は概ね0.0015Bq/Lであった⁴⁾。

1. 海水の汚染の推移

(1) 大気からの沈着による汚染

事故当初に海洋へ到達した放射性物質の大半は、大気を経由したものであった。大気に放出された放射性物質の拡散や移動については、複数のシミュレーションで再現されている。個々のシミュレーションの結果は必ずしも整合的ではないが、発電所を中心に主要な部分は東側の太平洋上に向かってひろがり、非常に複雑なパターンになっている。 ^{137}Cs などでは、加えて降雨などに大きく影響を受ける沈着過程の不均一性も作用し、一層複雑な分布をすることになった。ただし海面に沈着した放射性物質は海洋内で希釈されながら海水と共に移動するため、沈着量の分布についての実証データはほとんど得られていない。

シミュレーション結果その他に基づいた推定によれば、大気に放出された¹³⁷Csのうち、2割程度が我が国の陸域に沈着し、残りの8割程度が海洋に沈着したとみられている⁴⁾。3月中旬から大気へ放出された放射性物質は、比較的短期間に太平洋上に広く分散した。広い範囲に分散したことに加えて、海水の鉛直的な混合の効果が重なって、発電所沖30kmの海水中で発電所沖合での3月下旬の海水の¹³⁷Csは最大10~20Bq/L程度であった。また、発電所近傍で最初に行われた海水分析では3月21日に約1,500Bq/Lの¹³⁷Csが検出されている。

(2) 直接流出による汚染

前述の通り、3月末になって周辺の海水から直接流出による極めて高い放射能が検出され始めた。¹³⁷Csについては、発電所の港湾外の直近で6万8千Bq/L(4月7日)に達するなど、沿岸では圧倒的に大きな影響があった。

大気に比べて、海洋での汚染物質の拡散は遅い。限られた観測データと各種のシミュレーション結果によれば、直接流出による汚染域は存在範囲を広げつつ、平均的には南に向かい、やがて黒潮が本州から東向きに離れていく黒潮続流域に達してから、東側に向かったとされる⁴⁾。発電所の南10~16kmの海岸では、数日から1週間程度遅れて1,000Bq/Lを超える汚染のピークがあった。一方、発電所からほぼ同じ距離の15km東の沖合では、同時期ないしやや遅れておおむね200~300Bq/L程度のピークがあった。沖合に比べて南側の海岸沿いの放射能が高かったことが、今回の福島海域の汚染の特徴である。いわき市沿岸では2~3週間遅れて数百Bq/Lに達するピークがあったと推測される。

福島県沿岸の海水中の放射能は、5月には1ヶ月に百~数百分の1になる速さで急減した。この放射能の急速な低下は、極めて短期間に集中して放射性物質が放出された今回の事故の特徴をよく表している¹⁾。その後は海水の放射能低下は緩慢になった。現在は、発電所直近で2~3Bq/L前後に達することがあるが、その他の福島沿岸海域では事故前のレベルの数倍から数百倍程度(0.01~1Bq/L)で、ほとんど変化しない状態で維持されている。発電所等からの継続的な流出と、太平洋への散逸が釣り合った状態になっていると考えてよい⁵⁾。

2. 堆積物の汚染の推移

海水中のセシウムはイオンとして海水に溶けているが、一部は浮遊する土砂や生物系粒子に吸着され、プランクトンなどの生物にも取り込まれる。こうした粒子が海底に沈降することで、¹³⁷Csなども海底堆積物(底泥)に移行していく。このプロセスを主に担う沈降粒子は、プランクトンなどの遺骸や排泄物などの有機物を中心に、様々な粒状物が凝集して生成する。また、今回の事故では、海底堆積物と汚染海水の直接的な接触により堆

積物に放射性セシウムが吸着したプロセスが重要であるとする見解も出されている。

海底堆積物の¹³⁷Cs放射能は、沿岸の高いところで数千Bq/kg、多くは数十~数百Bq/kgである。発電所から同程度の距離の陸上の土壌と比較すれば数十から数万分の1程度、平均的にはおよそ100分の1程度でしかない⁴⁾。これは、海洋に到達した放射性物質の大部分は海水と共に移動しながら希釈されていき、ごく一部だけが堆積物に移行したためである。海底堆積物の放射性物質は、堆積物表層の粒子と共に移動する可能性がある。また海水の放射能が低下したことで、堆積物から放射能が脱着する可能性もある。実際に、海底堆積物の¹³⁷Cs放射能は減少傾向にあるが、減少は海水に比べて遅い。一方、場所によっては河川から放射性物質を含んだ陸上の土砂が流入するなどして、一時的に増加した場所もあった。堆積物の¹³⁷Cs放射能の測定値は、同一地点でも大きくバラつくことがある。これは沿岸での海底環境の不均一性を反映するものと考えられる。同一地点での時系列データの解釈にはこの点を考え合わせる必要がある。

海底堆積物に残存している¹³⁷Csについて、国、福島県、東京電力のデータをもとに2012年4~9月の段階で試算した。銚子から金華山に至る海岸線の東方沖合の水深200mまでの海域について、表層堆積物の重量あたりデータ(全299データ)から面積あたり積算値(Bq/m²)を推定した。面積あたりの積算値への換算は、東京海洋大学の堆積物データ等から得られた相関関係を用いた。この積算値を海域面積に乗じて全残存量を算出すると93.5TBq(テラベクレル、10¹²Bq)になる。汚染水による流出量が3.5~10PBqとすれば、1~3%程度が残留することになる。なお、同じ海域での海水についての残存量は、国と東京電力の全636データから15.3TBqと算出された。

3. 海洋生物の汚染の推移

¹³⁷Csなどの放射性物質は、海水と餌の両方から生物に入る。早くも2011年4月初旬には、コウナゴ(イカナゴの稚魚)から当時の規制値を上回る放射性セシウム(¹³⁴Csと¹³⁷Cs)とヨウ素131が検出された。稚魚は相対的に成長率が高く、体外との物質交換も早いため、海水やプランクトンの放射性物質が比較的速やかに移行したものとみられる。しかし一般には、魚類は体内での放射性物質蓄積に時間を要する。特に餌からの移行については、食物連鎖のそれぞれの生物での遅れが積み重なる。¹³⁷Csについては、多くの魚類で2011年夏から冬頃にかけて放射能が最も高くなり、以後は減少に転じた。

海洋生物は、絶えず体内に入ってくる余分な塩類を積極的に体外に捨てる仕組みを持っている。福島沿岸海域では、海水の放射能は速やかに低下したから、生物体内の¹³⁷Csも比較的速やかに排出されるはずである。一般

に魚類では、環境中の放射能レベルが長く一定に保たれれば、体内の放射性セシウムは重量あたりで海水のおおむね 100 倍程度に濃縮される⁴⁾。現在の海水の放射性セシウムレベルで考えると、発電所の直近を除き、規制値 (100Bq/kg) を超える魚が出現するとは考えられない。

魚類の ¹³⁷Cs は実際に低下が続いているが、一部に低下が遅い種類もあり、依然として規制値を超える個体が捕獲されている⁶⁾。これは、後述のように放射性セシウムの移行が続いているためと考えざるを得ない。

4. 発電所と河川からの継続流入

(1) 発電所からの流入

前述の通り海水中の ¹³⁷Cs 放射能の低下が緩慢なことから、発電所からの放射性物質の流出が継続している可能性が早くから指摘されていた。発電所の専用港湾の海水の ¹³⁷Cs に着目すると、現在でも港湾外より港湾内の放射能が高く、港湾内でも 1～4 号機に近い場所ほど高くなる状態が続いている。港湾内の各所に設置されたシルトフェンス等は、海水の動きを完全に止めるものではない。外海に面する港湾口は開放されており、5～6 号機の冷却用海水は港湾内でくみ上げられて港湾外へ放流されている。港湾内外の海水は今も絶えず入れ替わっている訳で、この濃度差が維持されていることは、¹³⁷Cs が継続的に外海へ向けて移行していることの証拠にもなる⁷⁾。

筆者は東京電力の公表データを用いて、発電所からの継続流出量を推定した⁸⁾。2 号機取水口の汚染水流入が封止された 2011 年 4 月 6 日以降、発電所専用港湾海水の ¹³⁷Cs 放射能は急減している。その減少は指数関数に良く適合し、時定数は 0.44 日⁻¹ と計算された。港湾内外の放射能分布等を考えると、この時定数は港湾中央部の海水交換率とみなしてよい。すなわち、港湾中央部では海水の 44% に相当する量が毎日置き換わっている。この海水交換率はその後も変化したとは考えにくい。

1 日に約半分の海水が置き換わるにもかかわらず、港湾内の ¹³⁷Cs 放射能低下はきわめて緩慢で、月単位程度ではほぼ一定と見なすことができる。これは海水交換による港湾からの流出と港湾への放射能供給が釣り合っていることに他ならず、この関係から ¹³⁷Cs の外海への流出量 (= 港湾への供給量) を計算することができる。2012 年 4 月 1 日から 9 月 30 日については、1 ヶ月平均で 0.24TBq になる。2011 年 6 月から 2012 年 9 月までを合計すれば 17.1TBq で、これは事故当初の ¹³⁷Cs の流出量の 1% 以下である。

(2) 河川からの流入

¹³⁷Cs は面積あたりで見れば、海洋に比べて圧倒的に陸上の方に多く残留している。従って、河川等を経由しての海洋への流出は無視できない可能性が高く、研究の一つの焦点になっている。例えば、東京湾の底泥では、荒

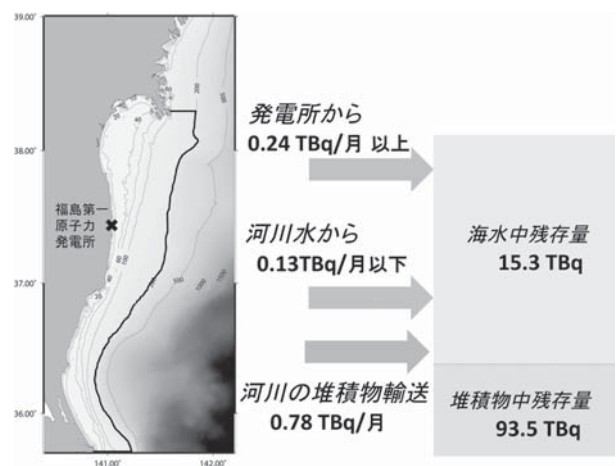
川河口などを中心に比較的高い ¹³⁷Cs 放射能が検出されている。これは主に関東地方の陸地に沈着した放射能が粒状物などとして河川経由で運ばれて蓄積しているためである。福島沿岸海域でも同様の流入が起こっている。

極めて単純な試算ではあるが、筆者は残存量の計算と同じ銚子から金華山に至る海岸線に流入する河川について、2012 年 4～9 月の ¹³⁷Cs 供給量を見積もっている。今後の研究が進めばより正確な数値が得られるようになるはずで、以下は暫定的な数字とお考えいただきたい。河川水流入量については、降水量に流域面積を乗じ、流出係数を 0.7 として概算値とした。河川水の ¹³⁷Cs 放射能は環境省のモニタリングを参照したが、ほぼ全てのデータが 1Bq/L 以下と報告されている。1Bq/L として毎月 1.3TBq の流入と計算される。実際には、福島県内の河川水について高感度分析が行われたデータによれば 2011 年段階でほとんどが 0.1Bq/L 以下であるから、最大でも 1 月に 0.13TBq あるいはそれ以下として良いであろう。一方、河川からの土砂 (浮遊砂および掃流砂) については、比流出土砂量を 300m³/km²/年と仮定し、流域面積と環境省の河床および河岸堆積物の ¹³⁷Cs モニタリングデータから、毎月 0.78TBq と計算した。海水、堆積物の残存量と発電所及び河川からの流入量を第 1 図にまとめた。

Ⅲ. 残された不明点と課題

1. 一部魚種の放射性セシウム残存

前述のように、海底付近に生息する、いわゆる底魚などの一部では体内の放射性セシウムレベル低下が遅い魚種がある。これは、体外からの放射性セシウムの移行が続いているためと考えざるを得ない。発電所周辺を除けば、海水の放射能は十分に低下したから、可能性があるのは餌である。食物連鎖に放射性セシウムが継続的に入っている可能性がある。底魚に放射性セシウムレベル



第 1 図 2012 年 4～9 月における銚子沖から金華山沖の水深 200m までの沿岸海域 (図左側) における ¹³⁷Cs の残存量と継続流入量の推定値

の低下が遅い種が多いことから、まず堆積物からの移行が考えられる。セシウムは鉱物粒子への吸着性が強く、特に特定の種類の粘土鉱物とは強い結合をすることが知られている。粘土鉱物と強く結合した放射性セシウムは生物へ移行しにくい。しかし、海底堆積物中には、生物の遺骸や排泄物などに由来する有機物性の粒子が含まれる。こうした有機物に含まれる放射性セシウムは比較的生物へ移行しやすいと考えられ、候補の一つである。

福島第一原子力発電所や河川からの継続的な放射性セシウム流入が原因となる可能性も指摘されている⁶⁾。発電所直近(港湾外)の放射性セシウムは、2~3Bq/Lに達することがあるから、規制値(100Bq/kg)を超える魚が港湾内だけでなく港湾外でも出現し続ける可能性は高い。ただし、これだけでは沿岸海域の各地で見つかる放射能レベルの高い魚の出現を説明するのは困難と考える。河川については十分に研究が進んでいないが、今のところ一部の汽水性の魚種(河川水と海水が混合する水域に生息する魚種)を除けば、河川の影響がはっきり示された研究例はない。従って、福島県や近県で規制値を超えた魚類の多くは、継続流出している放射性セシウムではなく、事故当初に放出されて海底環境に残留している放射能による可能性が高いと考えられる。この点は研究の大きな焦点になっている。

福島県の沿岸海域では、試験操業を除いて沿岸漁業全体が休止状態になっている。規制値を超える個体の出現がなくなる限り、その魚種についての出荷規制は解除されず⁹⁾、従って漁業再開は困難である。放射能レベルが高い個体が出現する機構の解明が急がれる。

2. 発電所からの放射能流出

2013年の夏になって発電所敷地からの放射性物質の流出が大きくクローズアップされた。発端が地下水のトリチウムやストロンチウム90の放射能上昇であったため、地下水の問題が大きく注目されている。しかし海洋への流出経路は、地下水だけではないと考えられる。セシウムは細粒の粘土鉱物に吸着されやすいことが知られているから、土壌を浸透するようなルートでの流出は小さい。東京電力の公表データを見ると、港湾取水口の¹³⁷Csは、3号機の前面が最も高い。放射性セシウムを相対的に多く含む汚染水が地下坑などに残存し、おそらくは配管やクラックなど大きな隙間を経て流出するものであろう⁴⁾。流出源となる汚染水は、建屋地下、地下坑、管路などさまざまな場所にあつて、場所によって放射性セシウム、ストロンチウム90、トリチウムの相対比が異なっている。流出源も流出経路も複数存在し、その実態は明らかになっていないと見るべきである。十分に実態を把握した上で、将来的な危険性も含めて、対策の優先順位を決めていくべきであろう。

東京電力は、建屋地下から汚染水を汲み上げてセシウ

ムを除去し、その一部を脱塩処理した上で原子炉注水に使い、残りをタンクに保管している。注入される水にはトリチウムだけでなくストロンチウム90なども含まれている(脱塩処理では十分除かれぬ)という。この水は核燃料と接触して建屋地下に戻り、周辺から流入する地下水によって希釈されている。セシウムの除去によってストロンチウム90とトリチウムは相対的に増加する。これらの核種の海洋への流出比をみると、放射性セシウムの流出が減少したのに対して、ストロンチウム90やトリチウムの減少が小幅にとどまっていることが分かる⁴⁾。この流出比の変化はセシウム除去処理が関係している可能性もある。今後はセシウムだけでなく、ストロンチウム90やトリチウムについても注視が必要になる。

事故時点で1~3号機の核燃料中には700PBqの¹³⁷Csがあったという。これまでに環境中へ放出されたか、汚染水から除去処理された量はその半分以下と思われる。従って残りはまだ原子炉内に残っているはずであるが、その存在場所や状態は明らかではない。また、くみ上げた汚染水中のセシウム以外の放射性核種は、タンク内に水として残ったままである。多核種除去設備(ALPS)¹⁰⁾による除去がうまくいっても、トリチウムを含む汚染水が残ることになる。恒久的な水の封じ込めは簡単ではない。タンクからの漏洩が頻繁に起こっている現状から考えても、将来の海洋汚染の危険性は依然として存在する。

— 参考資料 —

- 1) N. Yoshida, J. Kanda. *Science*, 336, 1115-1116 (2012).
- 2) The Christina Science Monitor (2013), <http://www.csmonitor.com/Environment/Energy-Voices/2013/0828/Fukushima-leak-Who-will-clean-up-the-mess-video>
- 3) 朝日新聞特別報道部, プロメテウスの罫5(第25章 海鷹丸が来た), p.13-54, 学研(2013).
- 4) 神田穰太. 環境情報科学, 41(2), 21-27 (2012).
- 5) 神田穰太. 科学, 83(11), 1284-1286 (2013).
- 6) K. Buesseler. *Science*, 338, 480-482 (2012).
- 7) 神田穰太. 科学, 83(6), 634-638 (2013).
- 8) J. Kanda. *Biogeosciences*, 10, 6107-6113 (2013)
- 9) 原子力災害対策本部(2013), <http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/pdf/2r985200002xsqt.pdf>
- 10) 東京電力(2013), http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl/genkyo/fp_cc/fp_alps/index.html

著者紹介



神田穰太 (かんだ・じょうた)
東京海洋大学大学院海洋科学系
(専門分野) 同位体標識実験等による海洋環境の物質循環解析、事故後に沿岸環境の放射能汚染に関わるようになった。

解説

「原子カムラ」の境界を越えるための コミュニケーション(1) 市民と専門家之间存在する心理的境界

関西大学 土田 昭司

原子力発電所に代表される社会的忌避感を内包する科学技術については、市民と専門家間に認識のギャップが生じやすい。「原子カムラ」の境界を越えるためには、原子力についてのこの認識ギャップを互いに正しく把握することが肝要であろう。本稿では、この心理的な認識ギャップについて、日本原子力学会「市民および専門家の意識調査・分析」特別専門委員会で行っている、社会調査をもとに明らかにする。福島事故以後、原子力利用についての認識は、首都圏住民と原子力学会員ではほとんど正反対といえるほどのギャップが認められた。高レベル放射性廃棄物の最終処分地については、首都圏住民に解決に向けた意識が福島事故後に少しずつ高まってきていた。また、原子力学会員には、自分たちが一般の人たちから否定的にみられているとの事実とは異なる思い込み・誤解があり、自らが「原子カムラ」の心理的境界を作っていた。

I. はじめに

原子力発電所に代表される社会的忌避感を内包する施設(迷惑施設)と社会とが適切な関係を作ろうとする場面において、市民と専門家のその技術に関連する認識のギャップは、それを阻害する大きな要因のひとつとして古くから指摘されてきた。そして、東京電力福島第一原子力発電所事故の後によく聞かれるようになった「原子カムラ」という言葉は、この市民と専門家のギャップを示した端的な言葉として捉えることができる。

原子力業界は、なぜ社会から「ムラ」と認識されるのだろうか。「ムラ」を形作るのは、ムラ内部の構成員の凝集力ばかりではない。「ムラ」を外から見の人が「ムラ」自体をどのように捉えるのか、ということも「ムラ」を形作る要因になりうるだろう。すなわち、「ムラ内部の構成員」と「世間(Public, 集合としての市民)」との相互作用によって、その2者の間に境界が生じた(境界をお互いが作り上げた)状態と捉えることができる。

市民と専門家之间存在する認識のギャップを埋めようとする試みは、リスク・コミュニケーションとして原子力分野においてもこれまでに積極的に行われてきた。初期

においては、欠乏モデル(deficit model)に基づいて、情報の送り手である専門家が事実に基づいた正しい情報や正しい考え方を受け手である市民に正しく伝えようとする方略が用いられた。しかしながら、リスクのもつ不確実性やリスクに関わる価値観の多様性ゆえに、欠乏モデルによるリスク・コミュニケーションは受け手の反発や不同意をまねきやすく生産的な結果が得られにくい。そこで今日では、リスク・コミュニケーションの本質が、関係者相互の信頼形成にあるとの理解から、参加と対話モデル(participatory/dialogue model)によるリスク・コミュニケーションが望ましいと考えられている。

参加と対話モデルによるリスク・コミュニケーションは、市民や専門家を含む社会各層が参加して、互いに平等に、双方向の対話を行うものである。したがって、市民だけではなく科学技術の専門家も、互いの理解を深めそのリスク認知・判断を変化させることが想定されている。自他の認識についてギャップの詳細を正しく理解し、またその原因を検討して、互いに変化すべきことを把握することが「原子カムラ」の境界を越える一助となるであろう。

シリーズの1回目となる本稿では、「原子カムラ」という境界を形作った、市民と専門家間の認識ギャップがどのようなものなのかを、日本原子力学会「市民および専門家の意識調査・分析」特別専門委員会で行っている社会調査をもとに明らかにする。

A Communication Method beyond the Gap between Citizens and Experts (1) ; Psychological barrier between them shown by social surveys : Shoji TSUCHIDA.

(2014年1月8日 受理)

II. 日本原子力学会員と首都圏住民を対象とした調査

1. 調査の概要

学会員を対象とした調査は、2007年1月から毎年1月(第3回調査のみ前年12月)に実施され、2014年1月に第8回調査が行われる。日本原子力学会員名簿から無作為に抽出された1,400名を対象に調査票を郵送し、回答票を返送してもらう郵送法を用いている。毎年の有効回答数は559名(39.9%)から611名(44.6%)であった。

首都圏住民を対象とした調査は、2008年1月から学会員を対象とした調査と同時に毎年実施され、2014年1月に第7回調査が行われる。東京駅を中心に半径30kmの範囲内にある町丁(○町○丁目単位の区画)を無作為に25地点抽出し、地点毎に直近の国勢調査を基準として性年齢別に割り当てた20歳以上の住民20名に回答してもらう2段階無作為割当抽出を行い、毎年500名の回答者を得ている。実査は、調査員が訪問し、調査を受諾した対象者に調査票を手渡し、後日訪問回収する留置法を用いている。

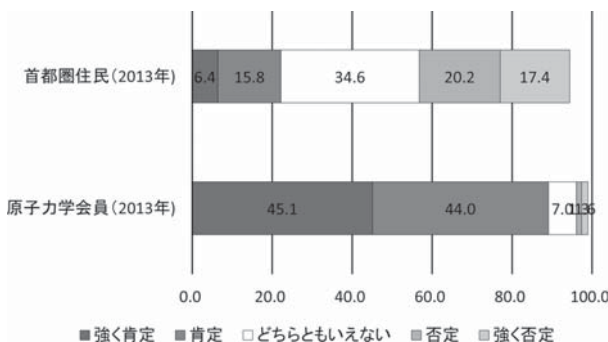
学会員対象調査と首都圏住民調査では、基本的に同じ質問項目を用いてきた。また、質問項目のおおよそ半数は毎年同じものを用いてきている。そのため、原子力の専門家とを主体とする会員と、一般市民を主体とする首都圏住民の比較が可能であるとともに、経年変化も分析できる設計となっている。

なお、実査は一般社団法人輿論科学協会が実施。

2. 日本原子力学会員と首都圏住民との間の認識のギャップ

まず初めに、原子力利用について、学会員と首都圏住民の認識のギャップがどのようなものであるのかを確認しよう。

第1図は、東京電力福島第一原発事故後の意見として、「今後、原子力発電の安全を確保することは可能」との意見に同意するか否かを問うた2013年調査の結果である。(図で100%に満たない部分は「わからない・知らない」「無回答」。以下、本稿の全ての図において同じ。)



第1図 [福島事故後の意見] 今後、原子力発電の安全を確保することは可能

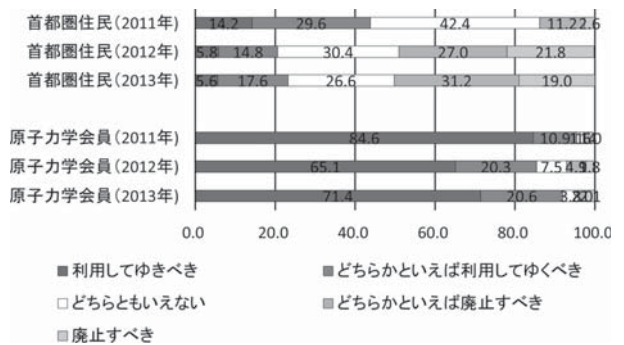
首都圏住民で、原子力発電の安全を確保することは可能と肯定した者は22.2%であるのに対して、学会員では89.1%であった。逆に、原子力発電の安全確保の可能性を否定した者は、首都圏住民では37.6%にのぼったのに対して、原子力学会ではわずかに2.9%であった。

原子力発電を利用すべきか廃止すべきかの意見については、東京電力福島第一原発事故の前後の変化も加えてみてみよう(第2図)。

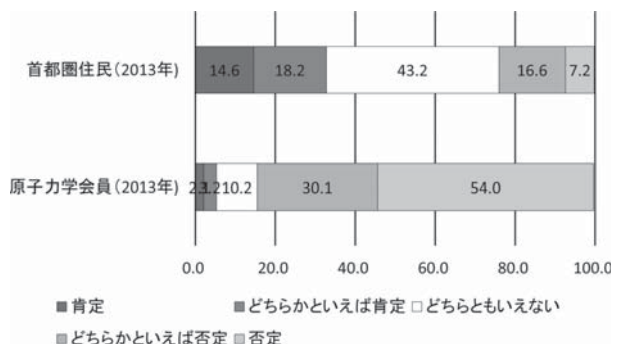
首都圏住民では、東京電力福島第一原発事故前の2011年1月調査では、原子力発電を利用すべき43.8%、廃止すべき13.8%であったが、事故後の2012年1月調査では、原子力発電を利用すべき20.6%、廃止すべき48.8%と意見分布が逆転した。2013年1月調査も2012年調査結果とほぼ同じであった。これに対して、学会員では、東京電力福島第一原発事故前の2011年1月調査では、原子力発電を利用すべき95.5%、廃止すべき2.4%と、ほとんどの者が原子力利用を肯定していた。事故後の2012年1月調査では、原子力発電を利用すべきが85.4%と10%ほど減少したが、2013年には92.0%と事故前の水準に戻りつつあった。

このような首都圏住民と学会員との認識のギャップは、原子力発電の経済的側面においても見られる(第3図)。

2013年調査において、学会員の84.1%は原子力発電がなくては日本は経済的に発展できないと認識していた。原子力発電がなくても日本が経済的に発展できると認識していた者は学会員の5.3%にすぎない。



第2図 原子力発電の利用—廃止の意見



第3図 原子力発電がなくても、日本は経済的に発展できる

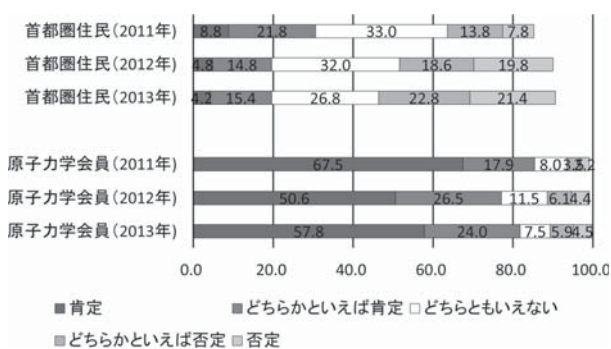
しかしながら、首都圏住民では、32.8%の者が原子力発電がなくても日本は経済的に発展できると認識しており、発展できないと認識していた者は23.8%であった。

さらに、原子力発電に代わることができる発電方法があるか否かの認識においても同様のギャップがみられた(第4図)。

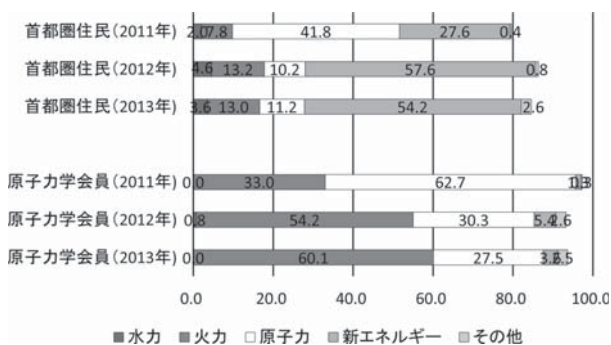
首都圏住民では、近い将来に原子力発電に代わることができる発電方法があると認識していた者は、東京電力福島第一原発事故前の2011年1月に21.6%であったが、事故後には、2012年に38.4%、2013年に44.2%と増加傾向にあった。逆に、学会員では、近い将来に原子力発電に代わることができる発電方法はないと認識していた者がほとんどであって、2011年に85.4%、2012年に77.1%、2013年に81.8%と、東京電力福島第一原発事故前後においてもさほど大きな変化はみられなかった。

しかしながら、学会員にも、今後原子力による発電が減少してゆくのではないかと認識が東京電力福島第一原発事故に生じていたようである。20年後の日本において発電量の最も多い電源を予測してもらったところ(第5図)、東京電力福島第一原発事故前の2011年1月には、学会員の62.7%が20年後に最も多い発電方法は原子力であると認識していたが、事故後には、それが2012年30.3%、2013年27.5%とほぼ半減し、代わって火力が2011年の33.0%から、事故後には2012年54.2%、2013年60.1%と増加していた。

首都圏住民では東京電力福島第一原発事故前の2011年1月には原子力発電が41.8%と最も多く、次に新エネ



第4図 近い将来に原子力発電に代わられる発電方法はない



第5図 20年後の日本の発電量の最も多い電源の予測

ルギー 27.6%であったものが、事故後には、原子力発電は2012年10.2%、2013年11.2%となり、新エネルギーであるとする者が2012年57.6%、2013年54.2%となった。

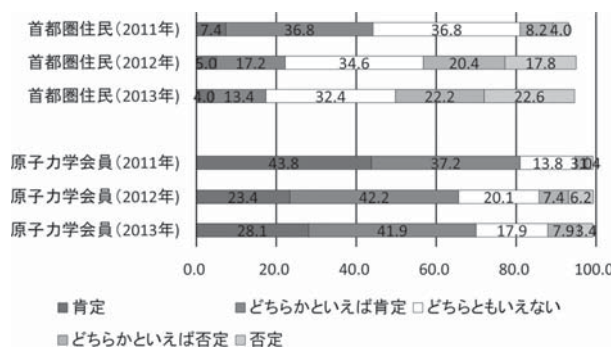
原子力に携わる人たちの安全確保に対する意識や努力に対する信頼についても、首都圏住民と学会員の間には大きなギャップがあった(第6図)。

首都圏住民では、東京電力福島第一原発事故前の2011年1月には、原子力に携わる人たちの安全確保に対する意識や努力を信頼していた者は44.2%と半数近くであったが、事故後には逆に、信頼できないとする者が2012年1月に38.2%、2013年1月に44.8%と年々増加傾向を示していた。学会員では、原子力に携わる人たちの安全確保に対する意識や努力を信頼する者は、東京電力福島第一原発事故前の2011年1月に80.1%、事故後の2012年1月に65.6%、2013年1月に70.0%と、事故によって積極的に信頼する者が減少したものの、しだいに事故前の水準に戻りつつあった。

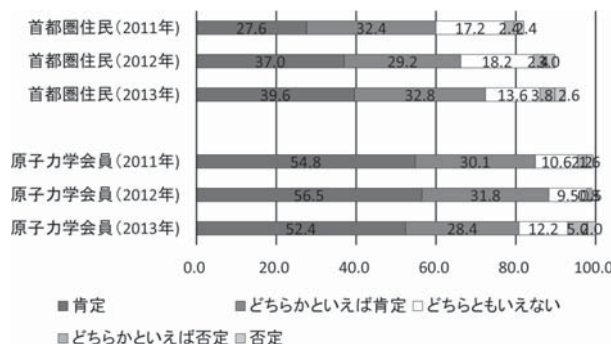
3. 高レベル放射性廃棄物の最終処分地

高レベル放射性廃棄物の最終処分地についての認識は、首都圏住民に解決に向けた意識が東京電力福島第一原発事故後に少しずつ広まってきているように見受けられる。

第7図は、「高レベル放射性廃棄物の最終処分地を早



第6図 原子力に携わる人たちの安全確保に対する意識や努力を信頼している



第7図 高レベル放射性廃棄物の最終処分地を早急に決定しなければならない

急に決定しなければならない」という意見に納得できるか否かを問うた結果である。

学会員では、納得できるとした者が、2011年1月84.9%、2012年88.3%、2013年1月80.8%と、東京電力福島第一原発事故と関わりなくほとんど変化はなかった。しかしながら、首都圏住民では、納得できるとした者が、2011年1月60.0%、2012年66.2%、2013年1月72.4%と、東京電力福島第一原発事故後に増加傾向になっていた。また、この質問について、首都圏住民で「わからない・しらない」とした者が2011年1月には17.6%であったのに対して2013年1月には7.6%に減少していた。

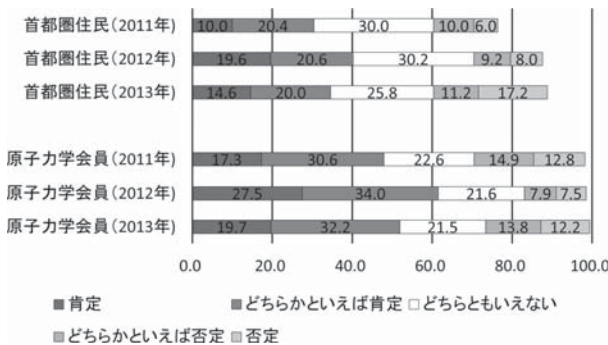
「高レベル放射性廃棄物の最終処分地は、当分の間決定できない」という意見に納得できるか否かを問うた結果(第8図)では、これに納得できないとする者が、学会員では、東京電力福島第一原発事故後の2012年1月に15.4%と、事故前の2011年1月の27.7%より減少したが、2013年1月には28.4%と事故前の水準に戻った。これに対して、首都圏住民では、この意見に納得できないとする者は、東京電力福島第一原発事故前の2011年1月に16.0%であったものが、2013年1月には28.4%と増えていた。

4. 自らが「ムラ人」と思い込んでいる原子力 専門家の誤解

2013年1月調査では、首都圏住民に対して、原子力に携わる人たちをどのようにみているかについていくつかの質問をした。同時に、学会員に対しては、同じ質問を「一般の人たちから原子力に携わる人たちはどのようにみられていると思うか」との形式に変えて問うた。

その結果、首都圏住民がもっている原子力に携わる人たちについての認識と、学会員が一般の人たちが原子力に携わる人たちに持っていると推測する認識には大きなギャップがあることが明らかになった。

「原子力に携わっている人たちの価値観や考え方は、一般の人たちとずれている」と思う(と思われている)か否かの質問(第9図)では、首都圏住民の37.0%がこれ

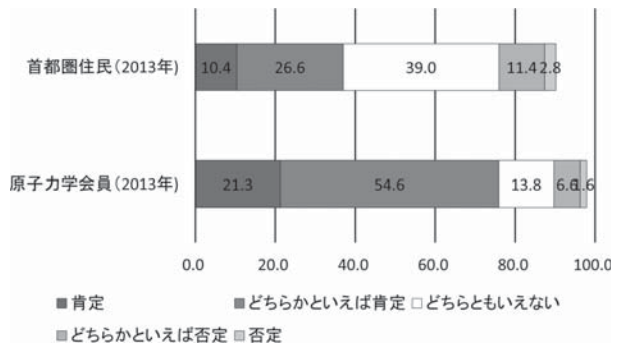


第8図 高レベル放射性廃棄物の最終処分地は、当分の間決定できない

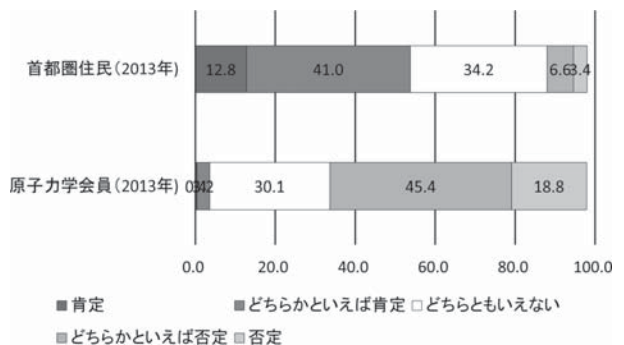
を肯定した。これは決して少ない数とはいえませんが、しかし、首都圏住民の3分の2はそのような認識は持っていなかったことを示している。これに対して、学会員では75.9%とほとんどの者が一般の人たちからそのような思われていると認識していた。

「原子力に携わっている人たちに感謝している」と思う(と思われている)か否かの質問(第10図)では、首都圏住民の53.8%と半数以上が「感謝している」とこれを肯定していたにもかかわらず、学会員で一般の人たちから「感謝されている」と認識していた者は3.6%に過ぎなかった。学会員64.2%は、一般の人たちから感謝されていないと認識していた。

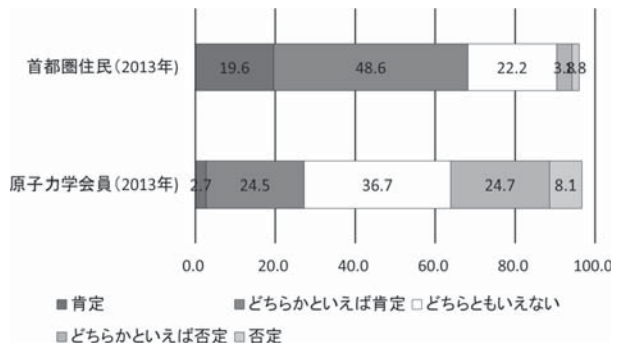
「原子力に携わっている人たちは、大変な仕事をしており、苦勞をしていると思う」と思う(と思われている)か否かの質問(第11図)では、首都圏住民の68.2%がこ



第9図 原子力に携わっている人たちの価値観や考え方は、一般の人たちとずれている



第10図 原子力に携わっている人たちに感謝している



第11図 原子力に携わっている人たちは、大変な仕事をしており、苦勞をしていると思う

それを肯定していたが、学会員でそのように思われていると認識していた者は27.2%であった。学会員の3分の1(32.8%)は、そのようには思われていないと認識していた。

III. 調査結果が示したもの

東京電力福島第一原発事故が起きるまでは、日本において一般の人たちの原子力に対する認識は、それほど極端に否定的ではなく、むしろ年毎に原子力を肯定的に認識する人の割合は増えてきていた^{1,2)}。例えば、本稿において示したように、2011年1月において原子力発電を利用すべきと認識していた首都圏住民は43.8%、廃止すべきは13.8%であった。

東京電力福島第一原発事故によってこの認識は逆転し、多くの人々が原子力を否定する認識を持つようになった。原子力利用を推進するべきとの認識を持つ者は社会一般とは異質な少数の存在であるとして「原子カムラ」とのラベル付けさえ行われている。

しかしながら、一般の人たち(首都圏住民)は原子力に携わる人々をそれほど異質な存在であると見なしているわけではない。確かに、首都圏住民の3分の1は原子力に携わる人たちは一般の人たちとはずれた価値観や考え方をしているとの意見に同意していたが、同時に、大半の首都圏住民は「原子力に携わっている人たちは、大変な仕事をしており、苦勞をしている」と認めて、原子力に携わっている人たちに感謝していたのである。むしろ、学会員のほとんどが、自分たちが異質であると思われており、一般の人たちから受け入れられていないと思いついでいた。学会員が一般の人たちの認識を誤解しているのである。そのことによって、学会員のほうが、自らを社会から排斥されていると思いつみ、一般の人たちとの間に心理的な障壁(境界)を作っているというべきであろう。

一般の人たちに、原子力利用について真摯に考えようとするのが、東京電力福島第一原発事故後に増えたとうかがえる結果もみられた。高レベル放射性廃棄物の最終処分地についての首都圏住民の認識の変化はその一例といえるであろう。

東京電力福島第一原発事故は、原子力の専門家(学会員)にも衝撃を与えた。一般の人たちに比べればわずかなではあるものの、事故後には学会員にも全般的に原子力についての認識を否定的な方向に変化させた者が増えた。また、学会員の多くは、20年後の日本の主な発電

方式は原子力ではなく火力であろうと予測するようになってきている。

けれども、2012年12月に実施された衆議院選挙において、原子力利用を否定しない政策を掲げた自由民主党が政権を担うことになったことによる影響と思われるが、2013年1月調査の結果では、学会員の認識は原子力を否定する方向から、東京電力福島第一原発事故前の水準に向けて原子力を肯定する方向への全般的な変化を見せている。

選挙結果は民意の表れではあるが、調査結果をみる限り、一般の人々の原子力に対する認識は自由民主党政権下においても否定的な方向に変化し続けている。選挙結果をもって原子力利用が人々から認められたとみなすことには十分に慎重であるべきであろう。人間には、自分が安全であると思いつもうとする正常性バイアスや、効力感が得られない場合に生じる諦めによって危険を過小評価して受け入れてもよいと判断する心理的メカニズムもある³⁾。一般の人たちの認識については、原子力の専門家の認識についても同様であるが、より深い検討が望まれる。

なお、本稿において紹介した結果は、日本原子力学会特別専門委員会が行ってきている調査結果の一部である。すべての調査結果の概要についてはホームページ<http://www.ponpo.jp/DMWG/>を参照していただきたい。

— 参考資料 —

- 1) 日本原子力学会特別専門委員会, エネルギーと原子力に関するアンケート調査結果等の概要報告, <http://www.ponpo.jp/DMWG/>.
- 2) 木村 浩, 首都圏住民と原子力学会員との間にある原子力に対する認識のギャップとは, 日本原子力学会誌「アトモス」, 51(9), 683-685(2009).
- 3) 土田昭司, 原子力利用に世論がめざすもの, 伝熱, 52, 61-67(2013).
- 4) 土田昭司, 山川栄樹, 新・社会調査のためのデータ分析入門, 有斐閣, (2011).

著者紹介

土田昭司 (つちだ・しょうじ)

関西大学

(専門分野) 社会調査, リスク認知, リスク・コミュニケーション。特に, 原子力などの科学技術と社会との関係に関する社会心理学的領域。



福島事故後の原子力安全確保のための リスク論の重要性

東京大学 高田 毅士

福島事故以降の原子力安全確保に向けて、特にリスク概念の重要性、新たなリスク概念の出現、これらを踏まえてリスク論の具体的な展開として現在進行中の安全規制に関係した課題とその展望について述べた。リスク論的考え方の重要性は福島発電所事故から得られる最も重要な教訓であるが、さらに古典的なリスクの概念を拡張した新しい概念にも言及する。さらに、それらの具体の実践として安全規制の課題に触れ、規制のリスク論に基づく改革と各ステークホルダー間のコミュニケーションの重要性と連携、説明性の向上が必要であることを示した。

I. はじめに

福島事故から2年半が経過した。まだ、福島第一原子力発電所における汚染水処理、廃炉へ向けた道筋が見えない。避難生活を強いられている10万余の福島住民のケアなど極めて重大な課題が山積する中、新原子力規制庁が昨年に発足し福島事故の教訓を反映した新規制基準が策定され、既設原子力発電所の再稼働に向けて基準適合性の審査が現在実施されている。

筆者としては、毎月刊行される学会誌「アトモス」に寄稿される関連諸氏の意見や解説から、自身の考えが整理でき、新しい見方の存在などに気付かされることもあり、工学分野に身を置く者として何が重要な課題であるのか見えてきた気がする。筆者自身は原子力耐震安全分野に長く携わっているが、元々は建築構造分野出身であること、原子力施設の耐震設計や確率論的地震リスク評価(PRA)手法の開発にも従事してきた技術者である。

専門テーマは構造信頼性や構造物のリスク評価であり、不確かさ、変動性、不完全情報等を考慮した不確定解析なども研究対象としており、最近では広くリスクマネジメントにも興味を持っている。我々の様々な意思決定は広い意味でリスクマネジメントを意識的、無意識的に実行しているわけであり、それを原子力発電所に対して定式化・具体化したものが原子力発電所の確率論的リスク評価である。

本稿はこうした経験を踏まえて、原子力発電所の安全確保および安全規制の視点から、リスク概念の重要性を取り上げ、今後の在り方について考えた。

Risk Concept for Nuclear Safety Assurance after Fukushima Accident: Tsuyoshi TAKADA.

(2013年10月10日受理)

II. リスク概念の重要性

1. 不確かさとリスク

福島第一原子力発電所事故の教訓のひとつとして「不確かさの認識とリスク概念の重要性」を、IAEAの閣僚会議の報告書や多くの専門家が指摘している^{1~3)}。自然現象である地震や津波の評価には大きな不確かさが伴う。地震発生に関して、時間的(いつ)、空間的(どこで)不確かさが存在することや、発生する地震の特性的(どれぐらいの)不確かさも存在するし、震源から発電所敷地までの地震波や津波の伝播に関する不確かさも無視できない。こうした不確実な環境下でのモノづくりに関して、構造工学分野では以下の文章がよく引用される⁴⁾。

“Structural engineering is the art of molding materials we do not really understand, into shapes we cannot really analyze, so as to withstand forces we cannot really assess, in such a way that the public does not really suspect.”

この構造工学の定義文における重要な点は、材料・外力・解析モデル等に関する不確かさの存在を認識すること、その程度を計量すること、そして、不確実な環境下で妥当な選択を行ったことをうまく一般国民に説明することであり、原子力発電所の設計、評価においても全く同様に適用できるものである。

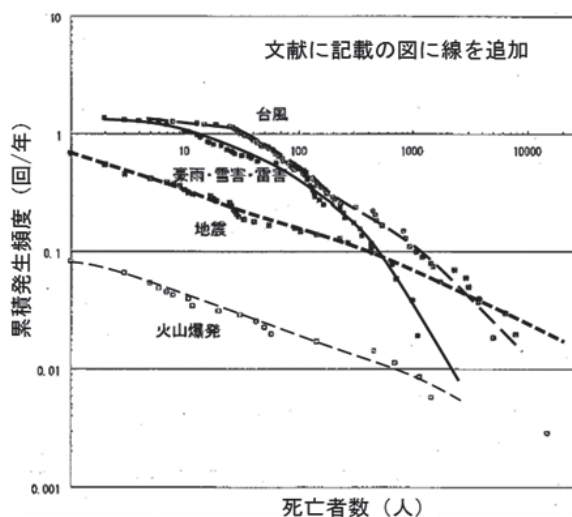
不確かさが存在するがゆえに、構造物の安全性が問題となる。不確かさをどのように計量するか、不確かさの存在を認識した上でそれを計量するには確率論が用いられることが多い。未来の出来事、偶然に支配される現象は過去の統計や経験、知識に基づいてある程度の精度で

確率モデルを構築できる。多様な不確実さを考慮に入れ構造物の安全性を評価するには、構造物が危険な状態に陥る確率を評価し危険な状態が周辺にどれくらい悪影響を与えるかを評価する必要がある。それにはリスク概念が不可欠である。

そもそも、ISO⁵⁾によると、「リスクとは、対象とする事象の発生確率と、事象発生後の被害(影響)の組み合わせである。」と定義される。組み合わせとは、積を示す場合(被害の期待値)、発生確率と被害量をセットで表現する場合(リスク曲線)の両方の意味を含む。

自然現象にさらされる構造物の安全性について考えてみると、リスクを低減する方策は多様である。構造物をより丈夫にする方法(危険確率を低減する)だけでなく、構造物が崩壊した後の被害量を軽減する(影響を緩和する)方法も考えられる。それぞれ、予防(prevention)、緩和・軽減(mitigation)と呼ばれることもある。どちらの方法が実現性が高く効果的であるかは対象により多様である。例えば、人命確保を目標として、地震被害と津波被害を考えた場合、地震リスクの軽減は両方の方策があり得るが、津波リスクの軽減については、堅牢な防潮堤を築くことよりも津波警報・避難対策の充実が有効な場合が多い。

異種の原因によるリスク比較も有効である。第1図は、我が国の過去の災害統計に基づいて、地震、台風、豪雨・雪害・雷害、火山爆発による過去の死亡者数をリスク曲線で比較したものである。横軸がそれぞれの原因による死亡者数、縦軸がそのような事象が生じる年発生頻度を表す。これより、年間10人程度の死亡者数が生じるのは台風が一番多く、地震や火山による死亡者数は発生頻度は小さいものの、一旦生じると多くの死亡者数が出ることもわかる。これらのリスク曲線より、それぞれの災害の特徴と、発生頻度を知ることができる。このように過去の統計があればそれよりリスク曲線を描くこ



第1図 日本における自然災害リスク曲線の比較⁶⁾

とができるが、データが少ないものについてはリスク解析をして曲線を推定することになる。

また、被害の様相の違いによる比較も有効である。過去の地震被害による死者の死亡原因を調べてみると、関東大震災では死亡者の9割弱が火災による焼死であり、阪神・淡路大震災では早朝の地震発生による建物倒壊による圧死が8割以上を占め、そして、東日本大震災では大津波による溺死が9割以上となっており、命の失い方は災害によって全く異なる。従って、強い構造物を作るだけの一面的な対応では不十分で被害の様相に応じた多面的方策を考える必要がある。

このようにリスクマネジメントでは対象システムの目標性能を実現させるためにリスク概念を導入して、多様なリスク低減対策の中から最適な対策を選択・実施できる。そして、その結果を設計にフィードバックしたり、緊急時の安全性確保の多重化の検討に役立てるなど、システム全体を高い安全レベルに到達させることができる。福島第一原子力発電所の事故が示すように、過去の災害事象は広範な分野が関わっており、これらの広い分野を横断し一貫して取り扱う有効な概念として、リスク概念を位置づけることができる。

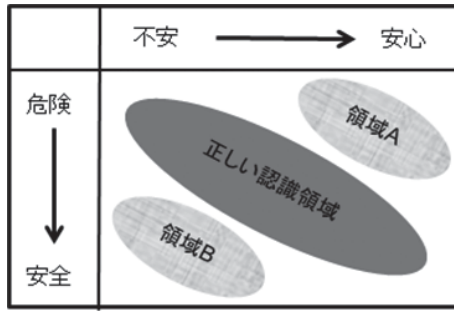
2. リスクに関する憂慮

(1) 想定外をなくすことが重要とする錯覚

人は東日本大震災の大惨事を経験して情緒的、主観的なメッセージを使う傾向が強くなる。例えば、「今後、想定外を失くす」、「絶対安全でリスクゼロ社会の実現」などである。しかし、自然に対峙して想定外を失くすことは難しい。経験が少なく稀な事象ほど不確実であり、想定できない事象が今後起こり得ることは避けられないと認識すべきである。絶対安全でリスクゼロ社会を実現することは人類の夢ではあるが、そのような社会は容易には築けない。このような場合には、冷静に客観的に現実を直視し、自然が内包する不確実さを絶えず認識しながら現実的に実現可能な解を見つけ出すことが技術者としての役割であろう。絶対安全なものなど不確実さの存在を考えると実現し得ないのであるが、心情的に「絶対安全であるべき」、「絶対安全であるはず」と、対象を「絶対安全」のように扱ってしまうと、絶対安全であるから予防もせず災害に備えることをしなくなり思考停止に陥ってしまうことになり、大変危険な状態である。福島事故は、このような心の持ち様が大きな要因であったとも考えられる。

(2) 「安全」と「安心」の混乱

安全・安心と一語のように使われることが多いが、安全と安心は同じ概念ではない⁷⁾。「安全」は客観的で科学的な課題と関連し、「安心」は主観的で心理的な課題に關係している。構造物を強く造ればより安全になるが、必ずしも安心というわけではない。「安全」は「安心」の一要素



第2図 安全と安心の領域

素であり、信頼感、納得のゆく説明など、さまざまな要件がそろって安心感が得られる。従って、「安全」を向上させるための対策と、「安心」が醸成する対応は必ずしも同じでないことに注意すべきである。

「安全」と「安心」について、第2図は文献⁷⁾を元に作成したものである。対象物を安全⇄危険の軸と、安心⇄不安の軸でつくる2次元平面上に配したとすると、危険なものを不安と感じ、安全なものに安心することは好ましい状況であるが、図中の領域Aは、本来危険なものを安心と誤って思う場合は好ましい状況ではない。また、領域Bのように安全なものであっても安心できない場合も問題である。こうした心理的側面については、リスクコミュニケーションに関わる問題が重要との指摘が多い。一般国民と専門家の間で、また、分野の異なる専門家の間においてもリスクコミュニケーションは極めて根が深い問題である。

これらの問題はリスク心理学の領域でもあるが、専門家の間でも、「安全」と「安心」を混同して対象とする問題を議論、論理展開していることが少なくなく、注意を要する。専門的、科学的な課題の議論において、主観的、情緒的な表現で論理展開されて、科学的、論理的な議論ができなくなることもあり、客観的内容と、情緒的・主観的内容を意識的に区別して論ずることが望ましい。

Ⅲ. 新たなリスク概念の出現

1. 安全の破綻

東日本大震災における津波被害、福島原子力発電所の事故からの教訓として、従来のリスク概念を空間軸と時間軸に拡張することが必要となる⁸⁾。筆者らは日本工学会アカデミー専門部会で近未来に出現する新しいリスク像を模索し、以下の2つの特徴があることを指摘した⁹⁾。

- (1) 同時多発性(simultaneous occurrence)
- (2) 連鎖的被害拡大(cascading disaster)

(1)の同時多発は、共通原因故障と似た概念である。異なる空間領域に位置する複数のシステムの同時不具合あるいは同時破壊によるものである。共通要因の場合もあり、また、独立の要因も考えられる。これはリスク概念の空間軸への拡張である。(2)については、福島発電所で明らかになったように、事故状態にあるプラントの時々

刻々変化するプラント状態に対してリスク自体が時間とともに変化し、被害が拡大することがある。これはリスク概念の時間軸への拡張である。

このWG⁹⁾では「Safety Burst (安全の破綻)」という新概念を提案し、その定義として、「強い影響を与える可能性のある大きなシステムが一箇所または同時多発的に複数箇所の損傷を受けることによって連鎖的に被害が拡大し、想定した状態を維持・確保できなくなった状態」を与えている。今回の大津波による被害や原子力発電所事故はまさにこの状態に近いものと考えられる。安全の破綻は、安全と思っていたものが外乱により思いもよらない状態になることを指し、知識や想像を超えるような事態の発生に対しては、従来のリスク概念を拡張した捉え方が必要であることを示している。

2. 現代システムの特徴

文献⁹⁾では、現代の工学システムの特徴を示すために、過去と現代の被害の様態の相違として、第3図が示されている。この図より以下のことが指摘できる。

- (1) 技術が進歩することにより当該技術が破綻した結果の危険性は以前よりも大きい。技術が進むほど危険が増すという矛盾が生じる。
- (2) 安全情報により危険と考えなくなり、危険に対する備えについて思考停止してしまう。

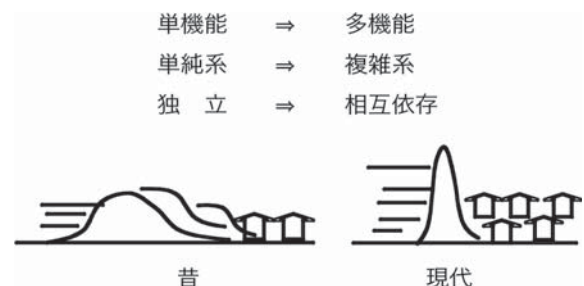
今後、工学システムが、多機能化、複雑化、相互依存化が進むにつれ、我々が今までに経験したことのない新たなリスクが出現し、新しい概念を取り入れたリスクマネジメントが重要となる。

3. 新しい概念

上述の新たなリスクの出現に対して、現代の工学システムの特徴を反映した新しい概念がいろいろ提案されている。以下には、ロバストネス、自律性、動的リスク管理、レジリエンスについて紹介する。

ロバストネス(robustness)：頑強性とは、些細な外乱に対しても構造物は動じない鈍感な性質を有することを意味し、構造物に相対的に弱い箇所(アキレス腱)を作らないような設計、施工をすべきという考え方がある。

自律性(self-sustainedness)：工学システムに限らず、現代社会は、電気、ガス、水道、情報などといったイン



第3図 過去と現代の被害の相違⁹⁾

フラに多大に依存しており、どれかひとつが機能喪失することにより、多数のシステムの機能を麻痺させる。これを補うには、システム単体が他のシステムにできるだけ依存しないような構成となる必要があり、これを自律性あるいは自律分散と呼んでいる。

動的リスク管理 (dynamic risk management) : 例えば、構造システムの地震リスク評価、火災リスク評価が現在各所で実施されつつあるが、地震による構造システムの被害の時間的進展や、被害が生じた時の情報を逐次取り込んでリスク評価する可能性を模索し、より現実に近い情報の下で意思決定、リスク管理するフレームワークの構築が必要である。

レジリエンス (resilience) : 回復能力と訳され、環境から加えられる攪乱に対してシステムが適応し、平常状態をどれだけ継続できるかという能力のことである¹⁰⁾。システムの機能低下が起った後、早く正常に戻る能力が高いほどレジリエントなシステムということになり、リスク概念の時間軸への拡張に近い。

IV. 原子力安全におけるリスク論の展開

1. 原子力規制におけるリスク概念

上述したリスク概念の重要性を踏まえて原子力安全確保の課題について述べる。

2006年に改定された原子力施設の耐震設計審査指針においては、将来の地震動評価には大きな不確かさが存在することを認めた上で「残余のリスク」の概念が導入された。このことは、原子力発電所の「絶対安全」思想からの大いなる脱却であり、リスクに基づく規制の第一歩であったと言える。翌年に新潟県中越沖地震が起り東京電力柏崎刈羽原子力発電所では設計用地震動 S2 を超える記録が観測され、基準地震動 Ss の見直しが必要となった。この時、基準地震動を上回った記録が観測されたことへの対応が緊急で重要課題であるとされ、残余のリスク評価については、Ss 地震動の超過確率を参照するに留まり、その状態は現在の新規制基準においても変わらない。

さて、現在、原子力規制庁においては「発電用原子炉施設の地震・津波に関わる規制基準」が策定され実用に供されているが、残念ながらリスク論が積極的に採用されているとは言い難い。これは、福島事故を経験したにもかかわらず、「絶対安全至上主義」からの脱却ができていないことの表れである。東日本大震災により一転、巨大連動地震の発生や地震動の評価に係る不確かさが理学分野で今まで以上に注目され、既存原子力施設の耐震検討において、「絶対安全」を指向し、著しく保守性を有する極大地震動や著しく厳しい想定条件が選択される傾向にある。しかしながら、それだけ厳しい条件を課したにも関わらず、原子力発電所の安全性に対してはまだ不十分ではという不安が残る。これは、「絶対安全至上主義」

に立脚しているがゆえに生じる。つまり、「絶対安全」が達成されるまではどこまでも満足のゆく状況にならないというジレンマが生じる。

一方、リスク概念に基づく安全規制においては、原子力発電所が「安全か否か?」ではなく、「どの程度に安全か?」を定量的に示すことになる。すなわち、別途定められる社会の受容基準あるいは安全目標をクリアすることが安全性確保の要件となる。残余のリスクを評価して、リスクを一定値以下になるよう、いろいろな対策を講じることになる。この時、重要なことは、発電所から「電力」という便益を享受するというと同時に、発電所は絶対安全ではなく一定のリスクを保有することを社会に伝えることである。極小リスクではあっても保有するリスクを絶えず低減するための努力を怠るようでは、原子力発電所を保有する資格はないものと考えらるべきである。

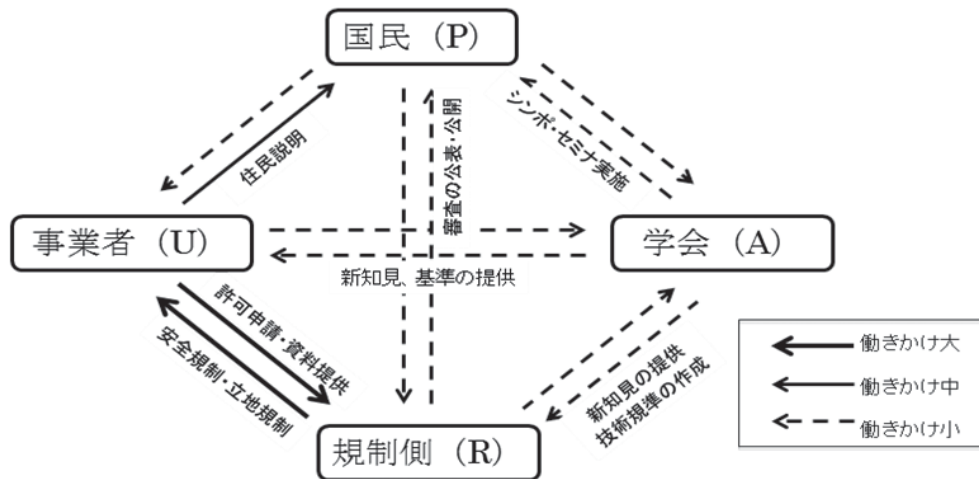
福島事故以後、実施された総合的安全性評価(いわゆる、ストレステスト)は、耐震設計上、耐津波対策上の安全評価に加えて、発電所全体の挙動における弱点の特定やクリフエッジの回避など、高重要度部位だけでなく一般クラスの部位についても発電所を全体システムとしての挙動が検討された。発電所を総体として評価し、脆弱部位の特定、安全確保のためのシステムの冗長性、独立性、多重性、多様性の確保によりロバストネスの向上に繋がる。また、追加電源の設置など、より高自律性、よりレジリエントな発電所実現に向かう活動であったと言える。

このように発電所全体を俯瞰することはトータルシステムの視点¹¹⁾として重要で、特に地震や津波は発電所敷地全体に同時に影響を与えるために絶えず全体を見てゆかねばならない。トータルシステムはリスク概念に加えて今後重要となる捉え方である。また、発電所のシビアアクシデント対策の実施も重要であり、これは緊急時の時間変化する動的リスク制御の活動に他ならない。

2. 原子力安全関係者の連携の必要性 (対峙から連携へ)

原子力安全を考える上で、そのステークホルダーを、第4図のように考えてみた。この図には、原子力学会や他分野の専門学会の役割も重要であることからあえてステークホルダーの一人として加え、現在の社会が抱える問題点の指摘が容易となるようにした。なお、図中には、筆者が独断で現時点における相互関係や働き掛けの方向とその強さを矢印と線の太さで表現してある。

図より、4つの立場が対立の関係ではなく、むしろ共通の目標に向けて各々が適正に機能することにより社会全体で原子力安全の問題が適切に扱われてゆくことを期待したい。ステークホルダー間の対立・対峙の関係ではなく、協調・連携の関係と考えることが重要である。



第4図 原子力安全に関わるステークホルダー間の働きかけ

事業者と規制側は現在停止中の発電所の再稼働をめぐる審査が頻繁に実施されており、両者の関わりは極めて強い。事業者と規制当局は原子力安全問題をめぐって対立の構図はやむを得ない面も多いが、共通の安全問題を議論しているのであるから、「安全か否か」の二元論的議論から、「どの程度の安全を確保するのか」という定量的な議論に向かうべきである。ここで定量的な議論にはリスク概念が必須であることは言うまでもない。

福島原発事故以降、原子力発電は、恐ろしいもの、人間の手に負えないもの、厄介なものという認識が国民の間に蔓延している。こうした国民の感情や世論を無視した原子力推進はあり得ない。現在、福島からの避難住民、原子力発電所を抱える地元住民、さらに一般国民が原子力安全を正しく理解し、適切な安全確保がなされていることを納得してもらうことが重要である。これには、事業者、規制当局、学会が今まで以上に最大マジョリティである国民に対して、適切な働き掛けが必須である。しかしながら、第4図に示すように、現状は、規制側の委員会は全て公開で実施され透明性は確保されているものの、審査会での国民への技術的議論の説明性という点においてはまだまだである。これらは学会や事業者においても同様である。

当学会に限らず、原子力安全の向上には多くの関連学会の役割は極めて大きい。なぜなら、原子力発電所は多分野の緊密な連携から成立しているからである。規制側、事業者、国民に対して、対象が不確実であるという事実も含めて科学的な知見を提供するのが学会の役割である。また、学会においては、様々な意思決定や選択の裏付けとなるデータの提供に加えて、それらを規制側、事業者そして国民に対してわかりやすく説明することが重要である。

学会の中には、原子力発電に対するイデオロギーの違いが会員の間に存在する。推進派もいれば慎重派もいる。この状態は思想の自由を重んじる学会としてはむしろ

健全な状態であり、イデオロギーが異なっても、いろいろな科学的意見を出し合い、意見の違いを相互に徹底的に議論し、相違点を相互に確信する過程が最も重要である。

専門家の中には、イデオロギーが違うから議論せず、協力しないという姿勢は望ましくないと思う。異なる意見を持つ専門家の存在こそ、相違点を見極めれば、対象とする問題をより深く多面的に分析する助けとなることを忘れてはならない。

3. 安全規制の運用上の課題

(公正性, 公開性, 独立性から説明性の向上へ)

2013年7月より、全国の停止中の原子力発電所の再稼働に向けて、新規基準への適合性の審査が開始されている。福島事故の教訓を踏まえて規制庁の「二度とこのような事故を起こさせない」という強い意気込みが感じられるのであるが、前述した内容を踏まえて規制の運用上の要望や期待を以下に記載する。

まず第一に、地震や津波などの自然外的事象に対する安全性確保に対しては「リスク概念」が必須であるということである。米国では性能に基づく、リスク情報を活用した規制に向かうことをNRC²⁾が謳っている。我が国でも、旧指針において「残余のリスク」が初めて導入されたものの、その後、基準地震動Ssを決める際に確率論的地震ハザード評価結果を参照するという極めて消極的な対応しかなされてこなかった。今後は地震PRAの実施、現在、当学会で策定中の津波PRA評価規準等を積極的に活用して、より多面的な安全性確保がなされることを望む。これは、決定論と確率論が対立の概念ではなく、相互補完の関係となっていることに他ならない。いわゆる、安全確保のための複数の異なる方法論を採用したことによる方法論の多様性の確保である。

第二に、技術的な課題については、ピアレビュー制度や、時間をかけた現地調査(ウォークダウン)の実施が

不可欠と考える。ピアレビューは、技術の問題を中立な立場の技術者や専門家が別途、事業者の評価資料をレビューするもので、審査の公正性を確保することが第一義であるが、複数の目を通すことにより、審査結果がより信頼性の高いものになる。また、現地調査の実施も極めて有効であり、既に行なわれている。分野の異なる専門家が事前に関連資料に目を通した後、現地に行き、発電所の状況をつぶさに調査することにより、文章では表現しきれない情報、地震時の発電所内の状況をよりリアリスティックに思い描くことができる。

第三に、IV-2で述べたいろいろなステークホルダーとの関わりの中で、規制側の審査の公正性、独立性、公開性の確保にかなり重きが置かれていることは評価できるものの、加えて、一般国民にも分かる説明性の向上が重要な課題であると考えられる。規制側が事業者の提出した資料を基準に沿って審査するのであるが、両者が安全審査上重要な課題を整理し明確にすると共に、それを事業者がどのように解決しようとしているのか、技術的課題の全体的な位置づけや解決に向けた論理などにわかりやすい説明があれば一般国民の納得感に繋がってゆく。

説明性の向上に関してさらに注意する点を加えたい。科学的議論と工学的意思決定のステップは異なることを認識すべきである。すなわち、科学(真実追求)の領域と工学的判断(意思決定や選択)の領域を明確に区別して議論することが説明性の向上に役に立つ。どのようにものを決めてゆくのか、誰が決めるのか等を明確にすることにより、説明性が飛躍的に向上する。原子力規制委員会の田中委員長が「新規制基準に照らして既存発電所の適合性を審査しているのであって、再稼働の許可を与えているものではない。」と宣言しているように、審査はあくまで技術的なものでなければならない。そして、再稼働の許可は、原子力規制庁の審査結果を踏まえて社会のニーズや外部環境を考慮して政府が判断することになる。

V. おわりに (次の展開へ)

福島事故以降の原子力安全確保に向けて、特にリスク概念の重要性、新しい概念導入の必要性、異なるステークホルダー間の連携の重要性、これらを踏まえて安全規制の課題と要望について言及した。巨大複雑系である原

子力発電所の安全確保のためには、より成熟した安全の概念が必要で、それにはリスク概念の理解と定着が不可欠である。いろいろ述べ、理想論ばかりで現実はそのほど容易ではないとお叱りを受けるのは覚悟の上であるが、筆者としてはリスク論の重要性を信じてやまない。

現在も停止している原子力発電所の再稼働をめぐるいろいろな議論がなされている。原子力安全を専門家は他のステークホルダーにどのように伝え、また、ステークホルダー間でどのような議論をすべきか、まだまだ課題は多いが、ステークホルダーが互いに連携し大いに議論を活発化させてゆけば、出口が見えてくるのではと考えている。

— 参考資料 —

- 1) 政府事故調査・検証委員会報告書, リスク関連の提言, p.433, (2012).
- 2) G. Apostolakis, Role of PRA in enhancing External Events Safety—the Past, Present, and Future, IEM, IAEA, Sept. 4, 2012.
- 3) 亀田, 高田, 蛭沢, 中村, 原子力災害の再発を防ぐ(その3), 地震工学分野からの原子力安全への提言, 日本原子力学会誌, Vol. 54, No.9, (2012).
- 4) E. H. Brown, Structural Analysis Volume 1, (1967).
- 5) ISO/IEC Guide 73: Risk management—Vocabulary—Guidelines for use in standards, 2002.
- 6) 原子力安全委員会, 安全目標専門部会の調査審議状況, 2002.
- 7) 中谷内一也, リスクのモノサシ—安全・安心生活はありうるか, NHK ブックス, (2006)
- 8) T. Takada, On seismic design qualification of NPPs after Fukushima event in Japan, CDROM of 15th World Conference of Earthquake Engineering (WCEE), Lisbon, 2012.
- 9) 高田毅士, 他, Safety Burst (安全の破綻) WG 報告, 日本工学アカデミー, EAJ Information No.121, 2005年3月.
- 10) 東京大学大学院工学系研究科編, 「震災後の工学は何をめざすか」, 内田老鶴圃, (2012).
- 11) 高田毅士, 巻頭言「トータルプロセス・トータルシステム」, 日本保全学会誌, 2013年4月.

著者紹介

高田毅士 (たかだ・つよし)

東京大学

(専門分野/関心分野) 確率論的リスク評価, 設計論, 耐震工学, リスクコミュニケーション, 技術説明学



廃炉に向けてのリスクコミュニケーションとは

リテラジャパン 西澤 真理子

福島第一原発の事故以来、「原発」や「放射線」に対する人々の意識は感情的に揺れ動いている。リスクコミュニケーションの観点からみれば、リスクをゼロにしようとする「ゼロリスク志向」が顕著に見える典型例と言えよう。今後、原発の廃炉や海外への技術移転を考えた場合、ゼロリスク志向からリスクの許容・耐容へと、リスクに対する意識を変える必要がある。これを実現するためには、原子力計画の中にリスク分析 (risk analysis) の考え方を導入すべきで、ソフトの部分を重要視する文化を根付かせる必要がある。

I. はじめに

東京電力福島第一原発で11月、燃料棒の取り出し作業が始まった。事故後、福島県飯館村のアドバイザーをしていた筆者にとって、廃炉作業が一步進んだことは感慨深い。これまで誰も経験したことがない作業を進めるためには、日本の原子力技術を最大限に生かす必要がある。しかし、その一方で原子力技術を駆使するだけでは廃炉作業は終わらないという現実がある。放射性廃棄物を貯蔵し処理するにあたって、今後何十年も国民に説明を尽くさなければならない。廃炉作業は単に技術的な安全が確保されれば済む問題ではないのである。専門家ではない人々にいかにして科学的な説明を分かってもらうのか。今後の廃炉作業にはこの観点が決定的に重要である。本稿では、リスクコミュニケーション(以降、RCと略す)の見地から、今後の課題を提起したい。

II. ゼロリスク志向の問題

RCの立場から懸念しているのは、放射性廃棄物の処理の問題を本当に一般の人々が分かち合えるのかという点である。被災地のがれき処理をめぐる、各地の自治体でがれき受け入れの反対運動が巻き起こったのは記憶に新しい。放射線がほとんど検出されないがれきであっても、反対の姿勢は変わらなかった。廃炉の過程で出てくる放射性廃棄物であれば、なおさら拒否する風潮になるのではないかと。現在、福島県内に中間貯蔵施設を設置することが検討されているが、放射性廃棄物の処理をそのまま福島県に押し付けることにならないだろうか。

十分に放射線量が下がった廃棄物であれば、確かに科

Risk Communication for Decommissioning the Nuclear Reactors in Fukushima: Mariko NISHIZAWA.

(2013年12月24日受理)

学的にいえば人体に問題はないはずである。にもかかわらず強い反対運動が起こるのは、人々が一面的、もしくは論理ではなく直観に基づき形成されたリスク観をもっているからである。

実際、がれき受け入れの反対運動においても、「少しでもリスクがあるなら、がれきを持って来て欲しくない」という声が聞かれた。本来ゼロになり得ないリスクをゼロにしようとする。いわゆる「ゼロリスク志向」である。「放射線量がどれくらい下がればリスクがゼロになるのか?」という問いが意味をなさないことは専門家にとっては常識かもしれないが、一般の人々にとってはそうではない。食料品に「検出限界以下」というラベルが貼られているのが現実である。専門家と一般の人々との間のギャップを埋めないかぎり、放射性廃棄物の問題を共有することはできない。RCが必要とされるのは、ここにおいてである。

III. 日本国内におけるRCの状況

RCは初期の方法論を間違えると、何十年も混乱した状況が続いてしまう。実際、米国でも「リスク分析 (risk analysis)」の理論が確立される前は、長い間RCが軽視されてきた経緯がある。行政や企業の側が適正にリスクを管理できていれば問題はないと考えられてきたのである。しかし、1980年代に入って、リスク評価とリスク管理に加えて、RCがリスク分析を成り立たせる要素の一つと考えられるようになった。行政や企業がどれほど適正に安全検査や品質管理をしても、一般の人々に誤って伝えられるとパニックが生じることが分かってきたのである。米国やヨーロッパではこの知見を踏まえて、20年近く実践が重ねられている。

日本国内ではどうだろうか。確かにリスク分析の考え方は徐々に広まりつつある。日本ではBSE問題を受け

て、2003年に食品の分野でリスク分析の考え方が導入された。いまや数多くの行政や企業がリスク分析を謳っている。しかし、1970年代の米国のように、RCが軽視される傾向がやはり見られるのである。リスク評価とリスク管理に関しては、安全検査や販売停止、自主回収など、行政や企業が明確な方針をもって行っている。だが、RCに関しては、いまだに「安全情報の伝達」としかとらえられていない面がある。RCが目指すのは、単なる一方的な広報を行うことではなく、一般の人々に正しい情報を分かりやすく提供し、信頼関係を構築することである。信頼関係が築けなければ、何か事故が起きた場合にすぐにパニックが生じてしまう¹⁾。

被災地のがれき処理に対して感情的な反発があったのも、原子力の専門家と一般の人々との間に信頼関係が欠如していたのが一因である。「専門家は大丈夫だと言うが、放射線量はゼロであった方がいい」と人々が思ってしまった時点でRCは失敗している。

このたびの原発事故におけるRCの失敗の要因は、RCの軽視だけではない。もう一つの重大な要因は、緊急時と平時の区別があいまいだった点である。これは日本のRC受容のなかで常に問題となってきた点でもある。RCはあくまで平時に取り組む活動であって、緊急時に取り組むものではない。緊急時にはクライシスコミュニケーション(以降、CCと略す)と呼ばれる、全く別の活動をしなければならないのである。原発事故直後に政府が混乱した一因は、緊急時にもかかわらずRCを行おうとした点にある。事故直後、確かに政府や東京電力(東電)がもっていた情報の多くは不確定なものであった。RCでは、ある程度情報が確定的になった時点で公表するのが原則であるため、政府や東電の対応は一見この原則を守っていたように思われる。未確定な情報を流すこと自体がパニックを引き起こす可能性があるため、慎重になっていたとも言えそうである。しかし、RCの考え方が適用できるのはあくまで平時だけである。緊急時に取り組むCCでは、多少は間違いを含んでいるかもしれない情報でも一刻も早く伝える必要がある。不確定な情報だからといって出し惜しみすると、逆にパニックが生じてしまう。実際、事故直後からツイッターなどで「政府や東電が情報を隠しているのではないか」という疑念が広がり、その後の発表についても信頼性が落ちてしまった。もともと原発事故対応への基本的なプランがなく、緊急時と平時を区別して明確に指示を出せなかったのがこの問題の根源にある²⁾。

IV. RCの「ガラパゴス化」

RCを通じて信頼関係を築くというのは、言うのは簡単だが、実際にやろうとすると非常に難しい。とりわけ放射性廃棄物の処理に関しては、欧米でも苦戦している。RCの実践が豊富な食品や医薬の分野とは段違いに

難しく、何度も失敗を重ねている。だが、逆に考えれば、欧米には失敗を重ねた分の知見があるといえる。この知見を利用しない手はない。日本独自にゼロからRCを始める必要はないのである。

実際、日本の行政や企業はこれまで欧米からRCの知見を豊富に学んできている。食品の分野から携帯電話の電磁波の分野まで、さまざまな分野でのRC先進国での報告書がすでに日本国内にある。そうした報告書を活用すれば、RCの理論的な枠組みや実践上の問題点はすぐに共有できるはずである。日本の行政や企業がRCに取り組みようとする時、欧米の文献調査や聞き取り調査から始める傾向があるが、RCの取り組みを開始するたびごとに、一から文献を集めたり、欧米の研究者に頻繁に聞き取りに行ったりする必要はない。RCはいまや豊富な実践の蓄積がある実学なのである。

ひとつ筆者が懸念していることに、日本のRCの「ガラパゴス化」がある。海外の学会に参加するたびに、日本特有のRCの考え方が出来上がりつつあるのではないかと感じている。その顕著な例が「リスクコミュニケーター」という考え方である。現在、日本ではさまざまな分野で「リスクコミュニケーター」養成という声が聞こえる。RCの認知にとっては喜ばしいことではある。しかし、RCは一定の講習を受ければすぐにできるようなものではない。さまざまな実践を通して、どうすれば信頼関係が築けるのか、常に考えながら取り組まなければならないものである。筆者自身も「リスクコミュニケーター」と名乗るのは憚られる。海外ではこうした養成制度はあまり聞かれない。おそらく海外の学会で「私はリスクコミュニケーターである」と言うと、「それはどのような資格なのか?」と聞き返されてしまうだろう。今後、原子力発電所を含めたインフラを輸出することを考えた場合、日本特有のRCの考え方が障害になる可能性がある。国際標準のRCを学ぶことを常に念頭に置かなければならない。

海外の学会の動向を見ると、インドやネパールといったアジアの発展途上国の方が、むしろ日本よりも国際標準のRCを意識し、積極的に動いており、例えば中国の行政が危機対応にソフトの部分強化するために欧州との人的交流を図っている。日本国内でRCの「ガラパゴス化」が進めば、インフラ輸出のソフト面においても、日本は国際的に遅れをとることになるであろう。

V. ゼロリスク志向からリスクの耐容へ

国際標準のRCを行うには、まずリスクに対する意識を改革しなければならない。RCの取り組みが比較的進んでいるとされる食品分野でさえ、日本では独自の「お客様対応」が発展している。科学的な根拠を背景とせず、謝罪や自主回収、無料交換といった対応をやっていることが多い。これでは信頼関係の構築につな

がらない上、国際的にも通用しない。

食品分野に限らず、放射性廃棄物に関しても、人々はなるべくリスクをゼロにしようとしてきた。このゼロリスク志向をまずは改めなくてはならない。ゼロリスクを目指すのではなく、「いかにしてみんなでリスクを負うのか」を探る必要がある。リスクを「受け入れる」(accept)ことを目指すのではなく、「耐容する・許容する」(tolerate)ことを目指すのである。行政や企業の側は、世論に押されてゼロリスクを追求するのではなく、どのように説明すれば人々にリスクを耐容してもらえるのかを考えるべきである。一方、説明を受ける側も、「お客様本位」でいてはいけない。もちろん市民や消費者の視点を大切にすることは重要だが、それは市民や消費者の言うことがすべて受け入れられるべきだということではない。市民や消費者自身も、社会の一員として何が社会にとって最善であるかを考える必要がある。「安全」というものは、行政や企業が作ってくれるものではないのである。市民や消費者も含めた社会全体が、「安全」や「安心」の問題を共有し、それを考える責務を負うことが理想である。RCはそのためにある。

放射性廃棄物やその他の廃炉の問題に関しては、今こそ変わるチャンスである。原発事故直後の混乱、農作物の風評被害、がれきの受け入れ拒否という具合にRCの失敗を経験した今ならば、廃炉を含めた原発の計画全体を根本的に見直して、ソフト面の充実を図ることができる。ある程度の規模をもったRCのチームを作り、原発の計画にリスク分析の考え方を導入すべきである。その際、原子力業界だけでやろうとせず、さまざまな外部の力を取り入れた方がよい。原子力業界以外の方がRCの経験が豊富な面があるといえるからである。今を逃せば、また同様の悲劇—多くの住民が放射線への不安から住み慣れた土地を後にして生活をやり直さないと—ならない、放射線への意見の違いから家族が離散してしまう—が起こるかもしれない。原発の輸出先の国でもこの悲劇が起こる可能性はある。日本の原子力技術を生かすためにも、RCの充実は必要不可欠である。それが、ハードだけではなく、ソフトの部分を重視する文化を業界内に根付かせていくきっかけとなるだろう。

VI. 終わりに

最後に、科学者や技術者といった専門家自身がRCに取り組む時の注意を述べておきたい。福島第一原発の事故以来、さまざまな専門家が放射線について語ってきた。もちろん豊富な知識をもった専門家が直接説明をするということ自体は望ましいことである。被災地の住民自身が「自分の身体は大丈夫か」「どのように対策をすればよいのか」といった点を直接聞くことができる機会は

大切である。しかし、RCの観点からいえば、こうした取り組みのすべてが適切に行われたとは言えない面がある。多くの場合、専門家の一方的な説明に対して、住民が戸惑ったり、説明の要点をつかみ損ねていたりする。専門家と住民の間に適切なコミュニケーションが成り立っていない場合が見られるのである。これは筆者自身が被災地でRCの活動をしながら苦戦した点でもある。

最も重要な点は、専門家と住民の間に知識や関心の差があると自覚することである。放射線の専門家はい「ベクレル」や「シーベルト」といった理論の話から始めてしまいがちであるが、大学レベルの物理学をきちんと身に付けた人々は一般にどれほどいるだろうか。放射線の説明がなかなか理解してもらえないのは、説明をする側の責任であることが多い。専門家の間では当たり前のことであっても、一般の人々にとっては当たり前でないことがたくさんある。相手の目線まで下りて説明をしなければならぬ³⁾。「わたしたちの身の回りの食べ物には天然の放射性物質が含まれていて、例えばポテトチップス1袋には30ベクレルくらい含まれています」と言われた方がピンとくる。

このことはRCの本質ともかかわっている。RCは単にリスクを説明する活動なのではない。RCの先には必ず相手がいるのである。相手に分かってもらいたいと思えば、相手を説得するのではなく、相手が自身で腑に落ちてくれるように説明を工夫することをRCに取り組む上で忘れてはならない。RCには伝える側の想像力が不可欠なのである。

今後、廃炉に際して、放射性廃棄物の処理をはじめとしたさまざまな問題において、適切なRCの取り組みが必要とされる。これまで世界中で積み上げられてきたRCの経験を踏まえて、早急に原子力計画にリスク分析の考え方を導入すべきである。

— 参考文献 —

- 1) 西澤真理子, 『リスクコミュニケーション』, エネルギーフォーラム新書, (2013).
- 2) 西澤真理子, 「これからのリスクコミュニケーション」日本原子力学会誌「アトモス」, 55 [11], 624 ~ 625 (2013).
- 3) リテラジャパン, 『リスクコミュニケーションハンドブック』, <http://literajapan.com/>

著者紹介

西澤真理子 (にしざわ・まりこ)

(現職) リテラジャパン代表

(専門分野/関心分野) リスク政策とリスクコミュニケーション



解説シリーズ

レジリエンスエンジニアリングの動向

第1回 レジリエンスエンジニアリングの概要と今日的意義

(株)テムス研究所 北村 正晴

レジリエンスエンジニアリングは従来、原子力分野で実装されてきた安全の実現法を補強する効果的な方法論としてのポテンシャルを有している。本シリーズではその現状と今後の動向を紹介する。第1回目の本稿ではレジリエンスエンジニアリングの概要を紹介するとともに、この方法論が開発されてきた歴史的背景とその意味合いについて解説する。背景知識を知ることなしにはどんな方法論の技法も適切に理解し運用することはできないと考えるからである。

I. はじめに

1. 今なぜレジリエンスエンジニアリングか

きわめて高いレベルの安全性を実現しようとする試みは、きわめて大きな困難課題に直面することが避けられない。建築や土木、自動車交通などの分野では、注意すべき「危険」の姿や事故が起こった際の結果は、作業者や運転者、そして市民一般の間で認識が共有されている。事故を防止し安全性を高めるための対策に関しても、産業従事者と社会の間で極端な認識ギャップは生じない。他方、原子力産業においては、深層防護の効果によって(福島事故を経験した現在、不謹慎な言い方とおしかりを受けるかもしれないが)事故の経験が日常化していない。そのため事故の生起過程や被害の相場、そして対策の実効性に関する認識が、社会との間以前に産業関係者の中でも共有されていない。このことが安全性向上の方策の立案と実装に大きな困難をもたらしている。

ヒューマンファクターや組織事故研究の先駆者であるJames Reasonは、このことを深層防護の功罪と名付けて、この効果の存在を認識した上での安全文化構築の必要性を指摘している¹⁾。レジリエンスエンジニアリング^{2,3)}は、この要請に応えるための有力な方法論であると筆者は考えている。

レジリエンスエンジニアリングはまだ成長過程にある新しい方法論である。根幹の理論的枠組みはほぼ確立したと見られるが、後述するように、今後の研究開発課題も少なくない。しかしながら福島事故以前の段階で、的確に理解され活用されていたならば、あのような大災害

に至るシナリオは回避できた可能性は小さくない。福島事故からの教訓の反映が原子力界にとって重要な課題である今日、本解説シリーズがレジリエンスエンジニアリングと原子力安全に関する原子力界の理解を深めることに多少とも貢献することを期待したい。

2. 背景からの学び

レジリエンスエンジニアリングは原子力システム(ここでシステムとは運用組織も含む)の安全性を格段に向上させるための有用な方法論である。しかし、その有用性が発揮されるためには、どんな方法論でもそうであるように、その活用のための背景知識を確実に理解しておくことが必要である。数学の知識なしに物理学を習得することはできないし、物理学や化学の知識なしに原子力工学を習得することはできない。レジリエンスエンジニアリングについても背景知識の習得は欠かせない。しかしレジリエンスエンジニアリングのみならず、一般的「安全」実現の方法論(たとえば品質保証や安全文化)に関しても、この当然の認識が必ずしも共有されていないように思われる。この点を自覚し修正することが、福島事故以後の時代において社会の要求に応えることのできる原子力安全の実現のための重要な条件と考える。

本稿では方法論の概略について読者との認識共有を優先させる。そこで方法論の骨子についてⅡ章で紹介した上で、歴史的背景にも力点をおいてⅢ章で説明する。その上で、実際にこの方法論を導入する際の留意点についてⅣ章で述べるという手順で解説を進める

Ⅱ. レジリエンスエンジニアリングの骨子

1. 第一種安全性から第2種安全性へ

安全実現の方法論を論じるには、目指す安全の姿その

Current Status of Resilience Engineering (1) : Overview and Safety Implications of Resilience Engineering : Masaharu KITAMURA.

(2014年1月6日 受理)

ものを定義しておくことが必要である。レジリエンスエンジニアリング提唱者の一人 Erik Hollnagel は、「安全とは望ましくない事態が起こらないこと」とか「安全とは許容できないリスクがないこと」のような静的概念や否定形で定義される安全を第1種の安全性 (Safety-I) と名付けた。そして「システムが大きな外乱などによって通常時の動作状態を維持できない場合、性能は低下させても動作を継続できる」、「破局的な状態は回避できる」、「状況が回復したら速やかに元の状態またはそれに準じる状態に復旧できる」という動的な動作ができる状態を第2種の安全性 (Safety-II) と定義した。定義から明らかかなように、第2種の安全性は外乱、故障等への対応を含んだ動的かつ能動的な概念となっている³⁾。このように定義された安全は、深層防護 (Defense-in-Depth) の概念とも整合性がよい。したがって第2種安全性を目指すことが原子力安全向上方策の指針として妥当性が高いといえよう。

2. システムと環境の特性

第2種の安全性を基本とする必要性と表裏の関係にあるのが対象システムおよび環境の特性の認識である。レジリエンスエンジニアリングにおいては、以下のような認識を基本としている。

- システム・環境は常に変化している。
- 重要な意思決定は、多くの場合不完全情報状態でなされることになる。
- システムには、利益や効率を追究することが要求される。したがってシステムは特別に注意しないと次第に危険な状態へとドリフトしていく。
- 安全は重要ではあるがシステム動作の目的ではない。目的は(第2種安全性の意味での)動作の継続である。

認識 a. は考えてみれば自明であろう。機械システム(人間や組織も含む)も環境も、程度や進展速度は様々であるにしても時々刻々変化を続けているのが実態である。摩耗や腐食も進むし、保全作業がなされればその前後で機器の状態は変化している。運転や保全作業を担う人間の状態、気温、水温、天候などの自然環境、規制や査察などに関わる社会的環境なども変化し続けている。しかし、原子力発電所の安全解析などに際しては、対象のモデル化を行わねばならない。このため便宜的に対象の記述を固定的なものとして扱うことが通例となっている。それはやむをえないことであるにしても、結果として実際の原子力発電所や環境が定常的なものと思いつてはならない。この認識を前提として、安全を守るためには不安に敏感で警戒を怠らない心がけが必要であるとされている²⁾。この心がけがあれば、想定を超える地震や津波、そして長時間の電源喪失のような事象に対する配慮はありえなくてはならない。

認識 b. は認識 a. から必然的に導かれる。常態として存在する変化のすべてが事前に同定されていないのであるから、事前の知識を十分に備えた上での理想的な問題解決など不可能であり、限定合理性 (Bounded Rationality) の範囲での意思決定がなされることが通例である。

認識 c. は原子力分野では見落とされがちであるが、他産業、特に医療とか航空分野の安全研究者の間では共通認識となりつつある。具体的には、システムは安全の維持・向上に格段の注意を払わないと危険へのドリフトが生じるという見方が広い範囲で共有されている。

認識 d. について、原子力関係者の中には違和感を感じる方も少なくないかもしれない。「安全再優先」ではなく、動作または稼働の継続を目的にするなどと述べると安全の軽視ではないかと批判されることもありえよう。しかし安全が維持できなければ当然ながらシステム動作も継続できない。それゆえ、この認識は安全重視と矛盾するものではなく、動作の継続を目指すことで合理的な安全確保が可能であることを意味している。認識 c. と組み合わせ考えての結果として、安全性向上のためには当面の利益や効率は損なわれても採るべき必要な安全上の措置は避けてはならないという指針が導かれる。このような措置のことをレジリエンスエンジニアリングの分野では、犠牲を伴う判断 (Sacrificing Judgment) と名付けており、その必要性が強調されている。これら4項目の認識は、リアリスティックな視点に立った原子力安全の実現方策と密接にリンクしていることを指摘しておく。

3. 鍵となる4能力

ここまで述べた第2種安全性の概念と、4項目の実態認識を前提として、対象システムにレジリエント特性を持たせるためには以下の4つの能力が決定的に重要だという提案がなされている。

対応する (Responding) : 現在生じている変動や外乱などに適切に対応できること。現在のシステム動作状態を修正することや、事前に用意された対応方策の実施などを含む。今何かが生じたときに、適切な対応ができることはどんなシステムでもその持続のためには欠かすことのできない条件である。

監視する (Monitoring) : 現状に照らして、警戒すべき脅威を認識できること、そしてその脅威の発生を知るためには何を重点的に監視すべきかを知っていること。ここでいう脅威とは、システム内部で起こる事象と環境の変化起因の事象の双方を含む。

予見する (Anticipating) : 前項の「監視する」よりもさらに先の時間領域について、事象の進展や新たな脅威あるいは好機の可能性を見定めること。予見ができれば監視、対応いづれについても事前に相当程度の備えができることを考えると、この能力の役割も安全上きわめて

重要である。

学習する (Learning) : 前記の3つの能力は、システムが環境や自分自身に起因する変化に対する適切な対応を行い、第2種の安全性を実現するためにはどうしても必要な能力である。しかしこれらの能力はある時点で十分高かったとしても、そのままでは自足しては前述した「危険へのドリフト」が起こることが避けられない。したがって、これらの能力を絶え間なく向上させること、すなわち学習する機能が備えられていることが必要になる。効果的な学習のためには、着目する事象の選択と、事象からの教訓導出方策とが必要とされる。

これらの4能力がレジリエンスエンジニアリングでは重要視される。ただしここで、4能力の駆動(発揮)は複数の時間スパンを対象にして並列的になされることが必要である。「対応する」を例にとれば「できるだけ速やかに対応する」という要請があっても、実際に対応が期待される時間スパンとしては、文字通り即応する、数分以内に対応する、数十分以内に対応するなど様々なバリエーションが存在する。監視や予見についても事情は同様である。これらの並列性とそれに伴う優先順位付けについても的確な判断が望まれることはいうまでもない。

なお、これら4能力は互いに独立ではない。対応、予見などの能力は、学習能力が高いシステムでは必然的に高くなるし、事前の予見が的確であれば対応能力も向上することは容易に理解されよう。そうであっても、システムがレジリエンス性を持つためには4つの能力のいずれもが欠かせないのである。

4. 補完的要件

レジリエンスエンジニアリングの解説文献などでは、上記の4能力の重要性は必ず指摘される。ただしこれらの能力がその役目を確実に果たせるためには、いくつかの補完的な要件も満たされていることが必要である。具体的には次のような要件が知られている。

リソース (Resources) 配備の適切さ : 仮に将来の脅威を予見でき、監視すべき事項も認識していたとしても、必要なリソース(装置、機材、物資、人員など)が用意され、必要な部署に予見的に配備されていなければ、実際の事象に対応することはできない。つまり前述の4能力には、必要なリソースについての配備に関する能力も含意されていることに注意が必要である。

変化への気づき (Awareness) : 4能力いずれについても、それらが現実にも効果を発揮するには、能力が動作を開始するきっかけが必要である。そのためには、対象とするシステムや環境に生じている変化を、的確に認知し評価して、予見や監視、対応能力が活動のレベルを高める能力が望まれる。その意味で、微妙な変化を着実に検出するとともにその意味するところを明らかにできる気づき能力が欠かせないことになる。

成功事例への着目 : システムのパフォーマンスを高める上で学習が重要であるという認識は多くの分野で広く受け入れられている。しかし安全の分野ではこれまで、事故やニアミスなどの事例に着目して分析し、そこから教訓を得るという学習方式が中心であった。そのアプローチは自然なものであり理解できるが大きなジレンマが潜んでいる。安全性が相当程度向上したシステムにおいては、事故やニアミスなどの事例の発生頻度は必然的にごく小さいものになる。安全性が向上するほど学習の機会は失われていくのである。しかもそのようなシステムにおいて生じる事故やニアミスは本質的に希有の事象であるから、そこからの学習結果がその後の安全性向上に効果的に寄与できる可能性は大きくない。

このジレンマを念頭に置いてレジリエンスエンジニアリングでは、成功事例からも教訓を見いだすという指針を提唱している。航空機の場合を例にとれば、一見すると平穏な運航事例においても、出発前や飛行中に様々な変動や外乱は生じているはずである。それらを的確に処理できたからこそ結果として無事平穏なフライト達成という結果が得られている。このように考えれば、高い安全性を既に実現しているシステムにおいても、学習対象とすべき事例は十分に見いだせるという考え方が、この要件の背景をなしているのである。

なお、これらの補完的要件については、あえて明文化しなくても、鍵となる4能力を的確に発揮させようとするれば、これらの要件は自然に導出できるという考え方もあろう。しかし人間は自分の認知的作業負荷を低下させようと無意識に行動してしまうバイアス、すなわち最小努力の原理⁴⁾に支配されがちである。このバイアスに打ち克つためにはこれら補完的要件も明示的に記すことが必要と考える。

これらの4能力や補完的要件は、実務担当者個人も備えていることが望まれる。しかし個人の能力は限られている。それゆえ、基本線としては対象システムの運用を担う組織が責任を持って配慮すべきものであることを付記する。

5. 適用の範囲

レジリエンスエンジニアリングは変動の存在を前提にした第2種安全性の実現を目指す方法論であることはII.2で述べた通りである。ただしこの方法論は従来の第1種安全性の追求と矛盾するものではない。変動や外乱の程度が小さい場合には、当然ながら第1種安全性追求と同じ結果が得られる。第2種安全性の追求は第1種安全性追求問題に縮退するのである。

レジリエンスエンジニアリングの説明として、鉄道事故や航空機事故に際しての運転士やパイロットによる臨機応変な対応の事例が参照されることがある。そのような事例においては、対応手順書もないような想定を超え

る事象に対して、前記の4能力を活用し、的確で柔軟な判断と行動をした結果が示され賞揚される。しかしそのような柔軟な判断や行動は、直面する事象が文字通りの意味で事前想定困難であったような場合において許容されるものであり、それ以外の場合には標準的な手続きや手順書が遵守されねばならない。レジリエンスエンジニアリングは変化や外乱が小さくて実質的に無視できる場合から、それらが増大してより動的な対応が必要な場合までをシームレスにカバーする方法論である。実際に手順書の記述範囲を超える柔軟な対応や復旧能力までを含むレジリエント特性が発揮されるのは、ごく稀で想定困難な事象が発生した場合である。

なお、標準的な手順による事象対応を行っている最中であっても、かすかな異常兆候でも見逃すまいとする気付き努力や、事象が想定を超えるものであった場合の対応方策についての予見能力などは、適切に活性化されていることが望まれる。その意味では、直面する事象が想定内のものであってさえ、レジリエンスエンジニアリング的な視点は、組織にとっても個人にとっても必要なものと考えらるべきであろう。

Ⅲ. 創成の背景

以上、レジリエンスエンジニアリングの方法論を概説したが、この方法論は従来からの大規模システム安全のための理論や実務的方法論と相反するものではない。それらの知見を内包した自然な発展形として創成されていることを理解されたい。

1. ヒューマンファクター研究への展開

1979年3月に起こったTMI事故が従来のハードウェア中心路線と、大事故は中小事故を包絡するという見方に明確な警鐘をもたらしたことは周知の通りである。その結果としてヒューマンファクターやマンマシンインタフェースの重要性が認識されたこと、原子力システムの安全評価においては人間信頼性解析(Human Reliability Analysis: HRA)が考慮されるようになったことは、大規模システムの安全性を考える上で重要な進展であった。前者を受けて人間の認知行動やエラーメカニズムの研究、ならびに中央制御室の運転員を対象とした支援技術が開発された。安全パラメータ表示システムやアラームフィルタはその代表例である。後者に関しては広く知られたHRA手法であるTHERP(Technique for Human Error Rate Prediction)を嚆矢として、いくつものHRA手法が開発された。これらの多くは人間要素を機械要素的に扱っていたが、その後、人間の認知特性を重視したATHEANA(A Technique for Human Event Analysis), CREAM(Cognitive Reliability and Error Analysis Method)などが開発され第2世代HRA技法と呼ばれている。これらの努力は貴重なものであり、原子

力安全の向上に貢献をしたことは事実である。しかし、いずれの努力も、人間をエラーや失敗を持ち込む存在として捉える点は共通していた。換言すればこれらのアプローチでは、可能であれば人的要因は排除したいという願望が根底にあったことになる。実際にTMI事故に続く10年を超える期間、知識工学技術を用いて人間の役割を代替するための技術開発がなされてきている。言うまでもないことだが、人間はエラーもするが、それよりはるかに高い頻度で正しい判断や行動を行っている。この点に関心を払わずに進められたヒューマンファクター研究やその成果の現場導入が、それほど大きな実効性を持ち得なかったのは、ある意味当然であった。レジリエンスエンジニアリングの主導者であるHollnagelは上記CREAMの開発者でもある。HRA技法開発の先駆者であればこそ、エラーのみに着目することの不十分さに他にさきがけて着眼したと推測される。しかしながら現場におけるヒューマンファクターを考えるに際して、人間の認知プロセスの重要性を指摘したことは、この段階での大きな成果であった。

2. 組織安全と安全文化へ

TMI事故の7年後に起こったチェルノブイリ事故によって、原子力界はヒューマンファクターだけでは安全の確保には不十分であることを思い知らされた。IAEAを牽引車とする国際的な連携活動を通じて、安全文化の重要性の認識は急速に進められたことは周知の通りである。しかしながら安全文化への重心シフトが急速に進んだ結果、先端的研究者には予見されていた重要な課題¹⁾について徹底した考察がなされないまま現場導入が進められたのではないかと推測される。課題の代表例を以下に示す。

安全文化と深層防護のパラドクス： 人間や組織のマネジメントに際して、導入された安全対策を評価することは常に難題である。原子力のように深層防護方式が採用されている場合、深層防護自体が問題点の検出をししばしば困難にする。それゆえ深層防護を基本とするシステムでの安全文化評価は一層困難である。この困難の解消策を適切に講じないと安全文化は機能不全となる。

報告する文化の困難： 困難の解消策の候補として報告制度の役割が期待される。そしてその関連で責めない文化(No Blame Culture)という概念が提唱されている。これらは理念としては「正しい」であろう。しかし「責めない」といっても明らかな怠慢や違反を放置はできない。結局「責める」「責めない」の線引き問題に公正に取り組む文化(Just Culture)⁵⁾の実現は現場の判断にゆだねられることになる。その線引きが人間の認知に照らして適切なものでない限り、結果として期待された効用は容易には発現しない。

問いかけの困難： 報告する文化だけでなく常に問いかける姿勢(Questioning Attitude)を持ってという要請

も、「正しい」ものである。しかし多忙でストレスに満ちた産業現場では実践上の困難が伴う。

以上に示したいずれの困難も、「正しい」理念を、本質を失うことなく現場に組み込むための「実装」能力の重要性を示している。レジリエンスエンジニアリングはこの理念を実装につなぐための有力なツールとしての可能性を有している方法論なのである⁶⁾。

3. 失敗例から成功例への関心移行

Ⅲ.1で述べたエラー中心のヒューマンファクターから脱却する重要なステップはJ.Reasonによる成功事例への注意喚起⁴⁾である。この著作でReasonは人間をエラー要因としてのみ扱う従来の見方に強く異議を唱えた。そして、多くの歴史的エピソードを参照しつつ、人間がすばらしい判断や行動を採用した理由を明らかにしようとした。この著作は、エラー着眼型ヒューマンファクター研究に大きな革新を持ち込んだという意味で画期的である。

ただし、この著作で参照されている成功事例は、いずれも英雄的ともいえる優れた行動である。レジリエンスエンジニアリングの立場からは、学習の対象となる成功事例は日常的な活動の中でも経験されるトラブルの未然防止などの能動的(proactive)活動の中からも見いだされるべきものである。このことを強調したい。

4. 認知システム工学との関わり

レジリエンスエンジニアリングの説明にはじめて接した読者には、中心的な要素である「鍵となる4能力」の提案が唐突に感じられるかもしれない。実際にはこの4能力の提案は、認知システム工学(Cognitive Systems Engineering; CSE)⁷⁾の中でこれまで蓄積されてきた知見の自然な拡張になっている。大規模人工物システムを制御するための制御室には、過去、現在、未来に関する情報が提示されることが必要であるという提案はすでになされている。ここで過去の情報は学習、現在の情報は対応、未来の情報は監視と予見に結びつけられる。それゆえレジリエンスエンジニアリングの提案はCSEにおける知見とほぼ整合している。ただし未来を考える時間スパンを複数想定して、監視と予見という2つの能力を区別して提案していることは、新しい観点である。

以上記したように、レジリエンスエンジニアリングは、ヒューマンファクター、安全文化、エラーから成功例への関心シフト、認知システム工学などの成果を総合した形で構築されている。応用に際してはこれらの既往知見も適切に活用することが望ましいことを指摘する。

IV. 応用上の指針

1. 標準的用法

システムとそれを運用する組織が有するレジリエンス

性を評価し、その向上のための指針を示すことが、レジリエンスエンジニアリングを現場に導入する際の具体策である。鍵となる4能力が高いレベルにあれば、システムのレジリエント性は高いと考えることが自然である。これらの能力についてどのように維持・向上策が講じられているかを業務プロセスに関する調査を通じて明らかにすることが試みられている。調査は目的にあわせた質問集の作成から着手された。Hollnagelは4つの能力それぞれに対応した4組の基本質問集を作成し、それらに対する回答の質を評価してスターグラフに表示する方式を提案し、この方式をResilience Analysis Grid (RAG)と名付けている⁸⁾。

具体的対象への応用に際しては、提案された質問集をそれぞれの現場に適合するように修正することが望ましい。筆者はある企業のご協力を得てこの適合化を行っている⁹⁾。例として、予見能力の評価のための修正質問集を以下に示す。

- ・活用する知識：未来予見のための知識の獲得策は？
- ・予見実施の頻度：予見作業はどんな頻度で実施？
- ・情報の共有：予見された事象の組織内共有方法は？
- ・未来予見の参照モデル：未来を予見するために参照するモデルまたは仮説はあるか？文書化されているか？
- ・予見の時間スパン：何日(月,年)先を予見？
- ・リスク判断：予見された事象についてのリスク管理(受容/回避など)の判断基準は明確？
- ・脅威分析：予見される脅威の性質をどのように分析している？
- ・組織文化：組織由来のリスクにつきどこまで認識？

各質問への回答結果は、「優れている、満足できる、受け入れ可能、受け入れ不能、欠陥大、考慮なし」のように6段階で評価される。予見能力については8項目の質問があるので、この結果は8軸のスターグラフとして可視化される。他の能力についても同様8~12項目の質問集が用意されている。さらにこの8~12項目への回答を平均値や最良値、最悪値などで代表させることで数値化する。4つの能力について数値化した結果は4軸のスターグラフに要約できる。これらの結果を総合的に吟味することで、対象システムおよび組織のレジリエンス特性と、改良が望まれる能力内容とを明らかにできるわけである。

このアプローチは、一定期間内の不適合事例数やヒヤリハット報告数を評価するような、アウトカム評価とは本質的に異なっており、Ⅱ.4で述べた安全性が高いシステムではアウトカム評価は困難になるというジレンマを解消するため、業務のあり方に関するプロセス評価方式が提案されていることに注意されたい。

なおレジリエンスの評価法に関してはRAG以外の方策も探求されている。RAGは代表例と考えていただきたい。

2. 派生的な活用法

レジリエンスエンジニアリングの基本的応用法はシステムや組織のレジリエント性向上であるが、よりインフォーマルな応用を通じての個人レベル効用も期待できる。トータルとしてのレジリエンスエンジニアリング応用だけではなく「レジリエンスエンジニアリング的な着眼点」の活用は下記のような様々なドメインで有効である。

運転業務における「気づき」の活性化： 中央制御室での運転監視やパトロール作業においては注意深い状況認識が期待される。しかし単に「注意深く作業せよ」と言われても、非熟練者にとっては要領がつかめない。その代わりに、「何が起こりそうか、しっかり監視せよ」「類似した状況が過去になかったか学習結果を想起せよ」などと指示されれば「気づき」への可能性が向上する。

保全作業前の心構えの指針： 作業に先立つツールボックスミーティング(職場で(工具箱の横で)作業者を集めて行う打ち合わせ)に際しても同様のやり方ができる。「何々に注意せよ」という留意事項を伝達するだけでなく、「どんな困難が予見されるか」「必要になりそうなリソース(道具, 装置など)はないか」のような問いかけをすることで、着実な事前確認が期待できる。

事故や不適合事象の原因分析の支援： 関与した人間やチームの行動を分析するに際して、実際に生起してしまったシナリオシーケンスに沿って、各ステップでの判断の是非が吟味されることが通例である。このやり方は標準的なものではあるが、得られる教訓はその事例の再発防止のためのものに局所化しがちである。事故の発生に先立って、鍵となる4能力の発揮によって当該事象が回避できた可能性について考察することで、より包括的で未来指向型の事故分析が可能である。

これらの例、特に運転作業と保全作業への応用は見方を変えればNon-Technical Skill (NTS) またはソフトスキル(直接の技術スキルを補完する、状況認識、意思決定、コミュニケーション、チームワークなどのスキル)の向上策と見なすこともできる。レジリエンスエンジニアリングは目的ではなく手段である。このような手段としての利用も採用されてよいと考える。

V. 今後の課題と結言

本稿では紙数の制約から言及しなかったが、レジリエンスエンジニアリングに関しては現在も精力的な研究開発が続いている。とりわけ重要な展開として、システムや組織のレジリエンスを評価するための指標(Indicator)に関する研究が挙げられる。アウトカムに着目した指標は、前述の問題点を抱える上に本質的に遅れ指標(Lagging Indicator)であり予防的安全の実現には効果が薄い。実際に必要なのは先行指標(Leading Indicator)である。前掲のRAGも先行指標として位置づけられるが、これとは異なる先行指標についても研究が進展してお

り、今後の発展が期待できる。またレジリエンスエンジニアリングに密接に関連するテーマとして、トレードオフ問題がある。現実世界での意思決定は最適性の追求問題ではなく、限定合理性の制約下で様々なトレードオフ問題を解決する形で行われている。レジリエンスエンジニアリングと関係が特に深いのは、効率性と完全性のトレードオフ(Efficiency-Thoroughness Trade-Off: ETTO)である。これらの課題についての研究を通じて理解を深めることで、レジリエンスエンジニアリングの応用可能性も一層拡大することと予想される。

本稿では解説シリーズの第1回目として、手法の概要や今日的意義を説明するとともに、背景となる考え方を紹介することに努めた。安全に限らず新しい方法論を理解するに際しては、このような観点が欠かせないと考える。レジリエンスエンジニアリングは発展を続けている若い学術分野である。筆者の説明内容も現時点での個人的理解をベースとしたものであり、不十分な点もあると思われる。それらについては後続する執筆者の皆様ぜひ補足をお願いしたい。なお、若い学術分野では相対的に参入障壁は低いはずである。興味を持つ研究者、実務者の方々の積極的な参画を期待する次第である。

- 参考資料 -

- 1) J.Reason, Achieving a Safety Culture, Work & Stress, 12(3), 293-306 (1998).
- 2) E.Hollnagel, D.D.Woods, N.Leveson, (Eds.), Resilience Engineering: Concepts and Precepts, Ashgate Publishing Co., (2006).
- 3) E.Hollnagel, J.Paries, D.D.Woods, J.Wreathall, Resilience Engineering in Practice, Ashgate Publishing Co., (2011).
- 4) J.Reason, The Human Contribution, unsafe acts, accidents and heroic recoveries, Ashgate Publishing Co., (2008).
- 5) S.W.A.Dekker, Just Culture, Balancing Safety and Accountability, Ashgate Publishing Co., (2007).
- 6) 北村正晴, 理念を実践につなぐ; 求められているのは具現化への道筋, 日本原子力学会誌, 55 (4), 212-216 (2013)
- 7) E. Hollnagel, D.D.Woods, Joint Cognitive Systems; Foundation of Cognitive Systems Engineering, CRC Press, Taylor & Francis Group, (2005).
- 8) E. Hollnagel, RAG- The Resilience Analysis Grid, Epilogue of 3), (2011).
- 9) 北村正晴, 狩川大輔, 高橋信, 石橋明, レジリエンス指向型安全支援研究(1) - 組織レジリエンスの評価と可視化, Proceedings of the Human Interface Symposium 2012, 35-40 (2012).

著者紹介



北村正晴 (きたむら・まさはる)

(株)テムス研究所

(専門分野/関心分野) ヒューマンファクター, 組織マネジメント, 市民と専門家の対話など

解説シリーズ

核燃料サイクル—フロントエンド

第2回 多様なウラン鉱床の形成と資源の持続性

石油天然ガス・金属鉱物資源機構 小林 孝男

原始太陽系の形成以来、ウランとトリウムは兄弟であり、ずっと長い間行動を共にしてきた。しかし地球が形成され、生物が誕生し、酸素が大気に満ちてくると、柔軟性に富む兄ウランとたかくな弟トリウムは次第に別行動をとるようになり、ウランは単独で地球上のいたるところに様々なタイプのウラン鉱床を形成した。ウラン鉱床は地球発達史のエポックを語る化石のようでもある。時代と環境の変化に応じて形成されたウラン鉱床のそれぞれの特徴とウラン資源としての持続性について概観する。

I. 地球史とウラン鉱床の形成

地球は、誕生以来 45.6 億年の間にいくつかの大きなイベントを経て環境を変え成長してきた。それぞれのすべてのイベントは、現在地球上に存在する全ての物質や我々人類にとって大きな意味を持っているが、地球の環境に対応して形成されたウラン鉱床は、古い地球イベントの存在そのものを立証する重要な証拠ともなっている。

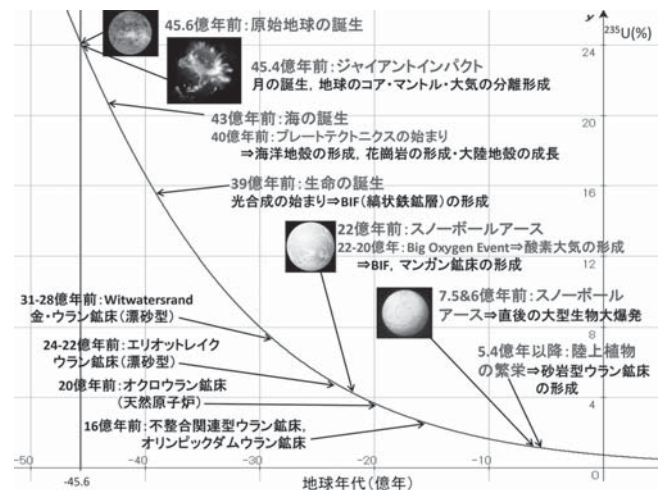
^{235}U と ^{238}U は半減期がそれぞれ 7.04 億年、44.7 億年と異なるので、ウラン全体に占める ^{235}U の濃度は時代の経過とともに減少してきた。第 1 図は、 ^{235}U 濃度と時間の関数上に地球史の主要イベントとウラン鉱床の形成を並べたものである。20 億年前に形成されたガボンのオクロウラン鉱床は世界で唯一確認されている天然原子炉である。20 億年前のウラン鉱石の ^{235}U の濃度は 3.67% で、軽水炉用原子燃料に匹敵するウラン濃縮度であった。オクロ鉱床以前に形成されたウラン鉱床はより高い ^{235}U 濃度を有していたが、ウラン鉱石は核分裂反応を起こすほど高品位にはなり得なかった。22 億年以前には、高品位のウラン鉱床が形成されるために必要な酸素大気が存在しなかったからである。なぜ酸素大気が必要かは後述するが、オクロ鉱床は十分に高品位で、かつ、 ^{235}U の濃度が核分裂反応を誘発するに足る高濃度を有するせまい条件領域(エポック境界)に位置する鉱床であったと

Nuclear Fuel Cycle—Front-end (2) ; Formation of various types of uranium deposits relating to earth events, and sustainability of uranium resources : Takao KOBAYASHI.

(2013 年 12 月 3 日 受理)

■前回タイトル

第 1 回 ウラン資源の特異な市場構造と需給動向



第 1 図 地球史の主要イベントとウラン鉱床の形成

いえる。

地球イベントの変遷とともに、それぞれの時代におけるウランの分離・濃集およびウラン鉱床形成の歴史を振り返ることにする。

1. 原始地球の誕生(45.6 億年前)

原始地球は、45.6 億年前に微惑星の衝突合体により形成された¹⁾。衝突時の重力エネルギーの解放により、原始地球の表面は岩石が溶融したマグマオーシャンに覆われ、コアとマンツルの分離が進行した。原始地球全体のウランとトリウム含有量はコンドライト(石質隕石)と同様と考えられており、両者とも含有量は現在の上部地殻のおよそ 1/400 であるが、その Th/U 比は 3.8 ~ 3.9 でほとんど変化していない(第 1 表)。

第1表 地球イベントとウラン・トリウム

全地球イベント	年代 (億年)	関連形成物	U (ppb)	Th (ppb)	Th/U
原始地球の誕生	45.6	CI 炭素質コンドライト	7.4 ^{*1}	28.9 ^{*1}	3.9 ^{*1}
ジャイアントインパクト	45.4	初生上部マントル月の表面岩石 (現在)	20.5 ^{*2} 300 ^{*3}	85 ^{*2} 1,200 ^{*3}	3.9 ^{*2} 3.7 ^{*3}
海の誕生	43	世界最古の岩石 (ケベック州北部): 42.8 億年			
プレートテクトニクスの始まり⇒大陸地殻の成長	40 ~	中央海嶺玄武岩 (現在) 海洋島玄武岩 (現在) 大陸地殻 (平均) 上部大陸地殻 花崗岩	47 ^{*2} 1,020 ^{*2} 1,020 ^{*2} 2,800 ^{*2} ~10ppm ^{*4}	120 ^{*2} 4,000 ^{*2} 4,800 ^{*2} 10,700 ^{*2} ~30ppm ^{*4}	2.55 ^{*2} 3.92 ^{*2} 4.7 ^{*2} 3.8 ^{*2} —
生命の誕生	35				
	31-28 24-22	Witwatersrand 盆地の鉱石 Blind River-Elliott Lake 鉱石	~0.05% ~0.1%	5-60ppm 10-120ppm	0.01-0.12 ^{*5}
スノーボールアース	22				
Great Oxidation Event ⇒ 酸素大気形成	22-20				
	20	オクロ鉱床の高品位鉱石	10-16 %	~0 %	~0
スノーボールアース	16	不整合関連型鉱床の鉱石 赤鉄鉱質角礫鉱床の鉱石	0.5-20 % 0.03-0.05 %	<16ppm ^{*6} —	<8 × 10 ⁻⁵ —
	7.5-6				
陸上植物の繁栄	5-4 ~	砂岩型ウラン鉱床の鉱石	0.05-0.5%	~0 %	~0

データ出典: *1:RoCholl and Jochum, 1993, *2:Javoy, 1995, *3:唐牛他, 2010, *4:Hazen et al., 2009, *5:Cuney, 2010, *6:Fayek, 1997

2. ジャイアントインパクト(45.4 億年前)

月の成因についてはいくつかの説が存在するが、原始地球の最終段階に火星サイズ(地球の1/10程度の質量)の大型惑星が斜めに衝突し、破壊されて飛び散った破片から月が形成されたとするジャイアントインパクト説が有力である¹⁾。このときに解放された熱エネルギーは莫大で、地球のマントルは大規模に溶融し、コアとマントルの分離は一層促進された。周辺に飛び散った揮発性成分は地球の重力によって引き寄せられ、水は水蒸気となって地球の大気圏にとどまったが、月の引力は十分でないため大気をとどめることはできなかった。

ウランとトリウムはケイ酸塩相と親和性が強い親石元素であるため鉄とニッケルからなるコアにはほとんど取り込まれず、マントル側に分離濃集した。また、ウランとトリウムはイオン半径が大きく酸化数も4以上と大きいため、岩石を構成するケイ酸塩鉱物の結晶中には取り込まれ難く(このような元素を不適合元素と呼ぶ)、マグマの最終固結相に濃集する性質がある。このため、マグマオーシャンから初めに沈殿固結したカンラン岩質の下部マントルではなく上部マントルに濃集した。このときの初生上部マントルのウラン、トリウムは原始地球全体平均の3倍程度に濃集したと推定されているが、Th/U比はほとんど変化していない(第1表)。

3. 海の誕生(43 億年前)

海がいつ地球に出現したかについては定かでない。38億年前にはマグマが海に噴出して形成される枕状溶岩が形成されたことから、この頃に海が存在したことは明らかであるが、2008年にカナダケベック州北部で発見された世界最古の玄武岩質岩石(42.8億年前)は海の誕生が

さらに古いことを示唆している。

この頃の大気は、金属鉄の酸化により極めて還元的な組成($H_2O + H_2 + CO > CO_2$)であったと考えられている。

4. プレートテクトニクスの始まりと大陸地殻の成長(40 億年前)

安定的な海が形成されたことにより、マントルの対流によって地表に噴出するマグマは効果的に冷却され、海洋地殻が形成された。海洋地殻が海洋プレートに乗って拡大し大陸地殻にぶつかって沈み込む際に、大陸側には海洋地殻上に堆積した地層の一部を付着させ(付着した地層を付加体と呼ぶ)、一方、沈み込んだ地層から解放された水がマントルと反応してマグマを形成し、火成活動の過程で花崗岩に富む大陸地殻を成長させるというプロセスがプレートテクトニクスである。グリーンランド西海岸のイスア地域で38億年前の地層から付加体が発見されたこと、カナダ北西準州で40億年前の花崗岩質岩石(アカスタ片麻岩)が発見されたことなどから、プレートテクトニクスの始まりは40億年前頃と推定される。

不適合元素であるウランとトリウムは、マグマの最終固結相である花崗岩中に濃集し、密度の低い花崗岩は浮力で上昇することから、上部地殻のウランとトリウムの含有量はそれぞれ3ppm, 11ppm程度にまで上昇した。一方、上部マントルの組成を表すと言っていい現代の中央海嶺玄武岩(海洋プレートの噴出しの玄武岩)のウランとトリウムの含有量は月の表面岩石よりも低く、また、そのTh/U比は2.55と低い(第1表)。これは、不適合元素に枯渇した上部マントル(depleted mantle)のパラドックスの一つと言われている。古い上部マントルの組成を残している超苦鉄質岩(Mg, Feに富む塩基性の岩石)やキンバライト(上部マントルから高速で地上付近まで貫入した岩石:ダイヤモンドの母岩)の研究によると、Th/U比は初生のコンドライトの値4.0から、およそ36億年前から減少し始め現在の2.6まで減少したことがわかっている。その理由として、トリウムの不適合度がウランよりわずかに大きいこと、20億年前、以降酸素大気の出現によってウランを優先的に濃集した海成堆積岩(黒色頁岩など)の一部が海洋プレートとともにマントル中に沈み込んだことなどが考えられている。

5. 生命の誕生(35 億年前)

海の形成は生命の誕生にとっても大きな役割を演じた。太古の地表は強い紫外線と宇宙放射線にさらされており、生命が誕生する環境は海中でしかありえなかった。最古の生命化石(光合成細菌)は西オーストラリア州のピルバラ地域で35億年前の地層から発見されている。一方、最初の酸素発生型光合成細菌(シアノバクテリ

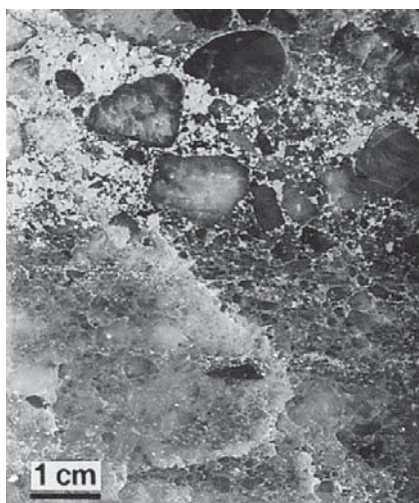
ア：ラン藻)は27億年前(25億年前という説もある)に発生した。25億年前後前を中心に世界の大規模地域に大規模な縞状鉄鉱床(BIF)が形成されている。これは、還元鉄イオン(Fe^{2+})として海水中に溶けて大量に蓄積していた鉄が、生成された酸素と化合し酸化鉄(Fe_2O_3)として沈澱し始めたことで説明される。しかし、この時期に海中で発生した酸素はすべて鉄の酸化で消費され、大気中に放出されることはなかった。

(1) 石英礫岩型ウラン鉱床の形成(31～28億年前)

還元雰囲気下において、ウランとトリウムはともに4価の形をとり、両者の挙動はほとんど変わらない。唯一異なるのは、塩化物または炭酸塩に富むマグマ起源の高温熱水中において、 U^{4+} は塩素や炭酸と錯体を形成してトリウム以上に熱水中に溶解して、冷却時に花崗岩中に閃ウラン鉱(UO_2)を生成することである²⁾。しかし、このプロセスで生成された閃ウラン鉱は、ウランの1～12%のトリウムを含有する³⁾。地球上で初めてのウラン鉱床は、このような閃ウラン鉱が、花崗岩の風化浸食に伴って酸化溶解されることなく河川の下流に運搬され、金や黄鉄鉱などの重鉱物と共に漂砂型プロセスによって濃集堆積し形成された。安定地塊内の堆積盆地に形成されたこのタイプのウラン鉱床は、石英中礫と共に堆積することから、石英礫岩型鉱床と呼ばれる。(第2図)南アフリカ Witwatersrand 盆地の31～28億年前の金・ウラン鉱床群、カナダオンタリオ州のBlind River-Elliot Lake 地域の24～22億年前のウラン鉱床群がこの代表例である。両地域とも、ウランの埋蔵量総計は数10万tU以上と大規模であるが、ウラン品位は0.05～0.1%程度と低品位である。

6. スノーボールアース(22億年前)

カナダのヒューロン湖北岸地域には24～22億年前の大規模な氷河堆積物が堆積し、ヒューロニアン氷河期と



第2図 Witwatersrand 盆地の Vaal Reef 含金礫岩研磨片
白く光る部分は黄鉄鉱粒の集合部。金とウランも主にこの部分に濃集する(地質ニュース, 1994年7月号口絵)

呼ばれている。同時代の熱帯地域に位置した南アフリカ トランスバーク層群中においても22億年前の氷河堆積層が確認されており、当時はスノーボールアース(全球凍結)であったと考えられている⁴⁾。全球凍結の証拠としては、氷河堆積層中の生物活動の停止(軽い炭素同位体比の低下)、氷河堆積層直上におけるマンガン鉱床、BIF、熱帯性炭酸塩岩(Cap Carbonate)の堆積など挙げられる。22億年以前には地球上にマンガン鉱床は形成されていないが、世界のほとんどのマンガン鉱床は22億年のスノーボールアース・イベント直後に形成された。

地球規模の大規模な気候変動は、温室効果の大きい二酸化炭素の増減によって左右される。二酸化炭素は、火山活動によって大気中に供給されるが、一方、岩石の風化作用によって溶出したカルシウムなどの陽イオンと反応して炭酸塩として堆積するほか、植物の光合成によって有機物として地層中に固定され、一部はプレートテクトニクスによってマントル中にもぐり込みリサイクルされる。全球凍結に至るほどの大規模な寒冷化は、マントル対流の転換期における火山活動の停滞、風化作用と生物活動の活性化などが重なって、二酸化炭素の濃度が極度に低下した結果引き起こされたと推定される。

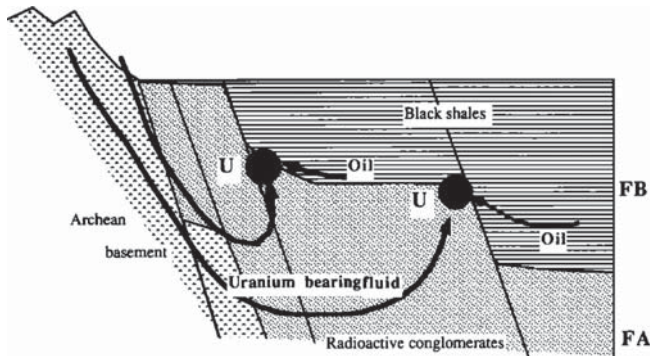
7. Great Oxidation Event: 酸素大気の形成(22～20億年前)

地球が一旦全球凍結に陥ると、生物活動と風化作用は停止し、海水と大気は遮断されるため、火山活動の継続により大気中の二酸化炭素は増加する一方になる。酸素欠乏により海水中には還元鉄とマンガンイオンが蓄積し、地表は温室効果により60℃以上にも達したと推定されている。一転して、氷河は急速に融解して高温環境の下、大陸の岩石は激しく風化浸食し、生命活動に必要な陽イオンやリン酸塩が大量に海水中に供給されたと推定される。氷河の融解により養分に富む深層海水が表層に循環したことも考えられる。このような異常な環境変化の中でシアノバクテリアが大量に発生し、Great Oxidation Eventが進展したと考えられている。真核生物が誕生したのもこの頃(21億年前)である。大量に発生した酸素は鉄とマンガンを消費されたものの、初めて大気中にも放出され、大気中の酸素濃度は現在の1/100程度以上に高まったと考えられている⁴⁾。

(1) オクロウラン鉱床の形成(20億年前)

酸素大気下において、ウランは4価から6価に酸化されウラニルイオン(UO_2^{2+})として、または炭酸、フッ酸、リン酸などとの錯体を形成して水に溶けやすくなる。一方、トリウムは4価の形しか取り得ないので、この時点でウランとトリウムの挙動は決定的な分岐を迎えることになる。

冒頭で述べたオクロウラン鉱床は、ガボンの

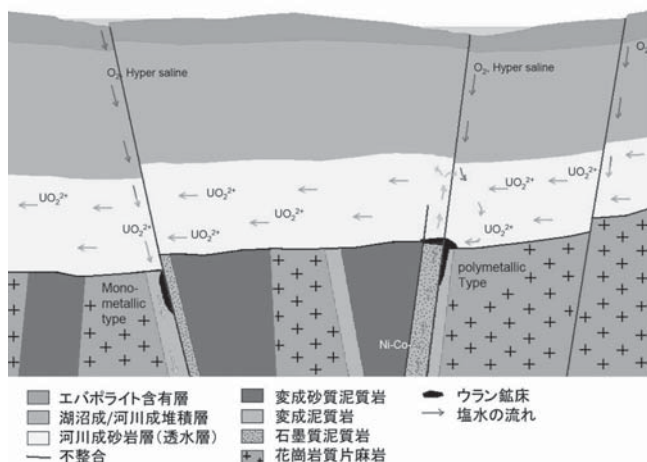


第3図 オクロ鉱床の成因模式図 (Gauthier-Lafaye and Weber, 1989)

Franceville 盆地内に 21.5 億年前に堆積した河川成赤色砂岩層(第3図のFA)の最上部に産する。鉱床の生成年代は 20 億年前である。赤色砂岩は始生代(27 億年前)の花崗岩上に堆積し、基底にはトリウム・ウラン鉱物(ウラノトーライト)に富む礫岩層が認められている。ウランは、始生代の花崗岩またはこの基底礫岩層から酸素に富む地下水によって溶かし出され、地下水と共に断層に沿って上昇し、上位の黒色頁岩層(FB)から絞り出された有機物に富む溶液と反応して還元され、沈殿したと考えられている(第3図)。地域全体でのウラン埋蔵量は約 4 万 tU で、平均品位は 0.3 ~ 0.5%U であるが、高品位部は 10 ~ 16%U にも及び天然原子炉となり得た。酸化・溶解-移動-還元・沈殿のプロセスにより生成されたウラン鉱物はトリウムをほとんど含有しない。

(2) 不整合関連型ウラン鉱床の形成(16 億年前)

このタイプのウラン鉱床は、約 17 億年前から堆積した河川成の赤色砂岩層と 18 億年前の変成作用を受けた古い基盤岩との境界(不整合)近傍に形成された鉱床である。鉱化年代は何度か書き換えられたが、初生の(元の)鉱化年代はおよそ 16 億年前と考えられている。カナダのサスカチワン州アサバスカ盆地とオーストラリア北部準州のアリゲーターリバー地域に同じタイプの鉱床が産し、2 地域で世界のウラン生産量の 21% を占める。高



第4図 不整合関連型鉱床の成因模式図(小林, 2011)

品位(0.5 ~ 20%U)で最も経済性の高い鉱床タイプである。鉱床の成因については議論があるものの、ウランは、赤色砂岩中のウラン・トリウムに富む地層から酸化性の高温地下水によって溶脱されて運ばれ、断層に沿って分布する基盤岩中の石墨質層に還元されて、不整合境界部に沈殿したとする説が有力である。(第4図)

(3) 赤鉄鉱質角礫複合岩型銅・ウラン鉱床(16 億年前)

銅とウランを共産するこのタイプの鉱床は唯一、南オーストラリア州のオリンピックダム鉱床だけである。本鉱床は、品位は 0.03 ~ 0.05%U と低いものの、桁はずれに巨大で世界のウラン埋蔵量のおよそ 1/3 を占める。その成因は謎に包まれているが、銅とウラン(+金)は数 10% の酸化鉄を伴って酸化変質した大規模な花崗岩質角礫岩中に産する。角礫化と熱水変質作用は火山活動に伴うものであるが、強い酸化作用は酸素に富む地表水が激しく循環したことを物語っている。ウランは角礫花崗岩から、銅は超苦鉄質マグマから供給されたとする説が有力である。

8. スノーボールアース(7.5 ~ 6 億年前)

全球凍結の痕跡は、原生代後期の 7.5 億年前と 6 億年前にも確認されている。6 億年前の全球凍結の直後には、初めての多細胞生物であるエディアカラ動物群が出現した。このような生物の大型化には酸素濃度の増加が必要であり、スノーボールアース・イベントが大きな役割を果たしたと考えられる。エディアカラ動物群はその後絶滅したが、この流れはバージェス動物群の出現などカンブリア紀(5.4 ~ 4.9 億年前)の生物の爆発的な多様化につながった。

9. 陸上植物の繁栄(5 ~ 4 億年前)

大気中の酸素濃度がさらに高まったことにより、大気圏にはオゾン層が形成され、紫外線が遮られるようになった。植物の陸上進出が可能になったのである。最初の陸上植物はコケ類でおよそ 5 億年前に藻類の一種が上陸し進化したものと考えられているが、発見されている最古の木の化石はおよそ 4 億年前である。5 億年前の赤茶けた不毛な地上が、1 億年後には緑の楽園へと劇的に変化した様が想像される

(1) 砂岩型ウラン鉱床の形成(4 億年前~現世)

地上に植物が繁茂する以前の陸上堆積物には有機物(植物片など)が混入しないため、海成の黒色頁岩や変成岩中の石墨などの還元物質が近傍に存在する場合を除けば、陸成堆積物中にウラン鉱床は形成されない。砂岩型鉱床は、陸上植物が繁栄するようになった 4 億年以降の河川成砂岩中に産する。河川成の砂岩とは川の底や砂州に堆積した陸の地層の一部分である。川が泥と砂をふるい分けてきれいな砂や砂礫だけを堆積するため、透水性

がよく、しかも適度な還元物質(植物片)を含んでいる。河川成砂岩層は、その上下を不透水層(氾濫原に堆積する泥岩・シルト岩)に挟まれるため、ウランを溶かした酸化性の地下水が流れ込むかっこうのチャンネルを形成する。流れ込んだ酸化性の地下水は、地層を赤色に酸化させて流れ下るとともに地層中の還元物質に徐々に還元されて、酸化還元境界部にウランを沈殿させた。このようにしてできた鉱床をロールタイプの砂岩型鉱床と呼んでいる(第5図)。他のサブタイプの砂岩型鉱床(ニジェールのタイプなど)も含め、砂岩型鉱床は世界で最も普遍的に存在する鉱床である。日本に産する鳥取・岡山県境の人形峠鉱床や岐阜県の月吉鉱床も基底礫岩型と呼ばれる砂岩型鉱床である。品位は0.05~0.5%Uと高くはないが、本シリーズ第1回で述べたとおりISL法での回収が可能な鉱床も多く、世界のウラン生産量の50%以上を占めている。

II. ウラン資源の分布と持続性

1. ウラン鉱床のタイプと分布

前章では地球イベントに係わる主要な鉱床タイプについて述べたが、ウラン鉱床のタイプはこれら以外にも存在し、おおよそ経済性の高いものから順に13のタイプに分類されている(第2表)。10番目までが在来型の資源に分類され現在も生産実績があるが、11番目以降は非在来型として分類され、目下のところウラン単独では生産の対象にはなっていない。1~3番目までの鉱床タイプが世界の在来型既知ウラン資源量のおよそ60%を占め、現在の生産量の80%以上を占めている。鉱床タイプ別の世界の主要鉱床および鉱床地域の分布を第6図に示す。

2. ウラン資源の持続性

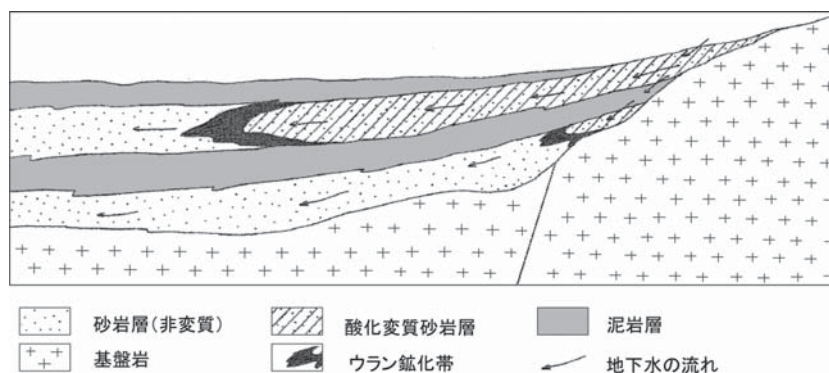
金属資源の耐用年数は何10年たってもほとんど変化しないということがよく言われる。これはウラン資源にとっても当てはまる。既知鉱床の周辺延長や深部延長の探鉱は生産と並行して進められるため、埋蔵量が発見当初の2~3倍に増大することは珍しくない。カナダのマッカーサーリバー鉱山、オーストラリアのオリンピ

第2表 ウラン鉱床の分類(レッドブック 2009)

1. 不整合関連型鉱床 (Unconformity-related type)	8. 交代岩型鉱床 (Metasomatite type)
2. 砂岩型鉱床 (Sandstone type)	9. 表成型鉱床 (Surficial type)
3. 赤鉄鉱質角礫複合岩型鉱床 (Hematite Breccia complex type)	10. ブレッチャーパイプ型鉱床 (Collapse breccia pipe type)
4. 石英中礫岩型鉱床 (Quartz-pebble conglomerate type)	11. 燐灰土型鉱床 (Phosphorite type)
5. 鉱脈型鉱床 (Vein deposits)	12. その他のタイプ 変成岩型鉱床(Metamorphic type) 石灰岩型鉱床(Limestone type) ウラン石炭鉱床(Uranium Coal Deposit)
6. 貫入岩型鉱床(or超変成岩型) (Intrusive type)	13. ウランに富む岩石 黒色頁岩(Black shale type)等
7. 火山-カルデラ関連型鉱床 (Volcanic and caldera-related type)	

クダム/レンジャー鉱山、ニジェールのアーリット/アークタ鉱山などがこの代表例である。しかし、現状の既存鉱山に関していえば、この段階の資源量増大は2010年頃までにはほぼ終了したと考えられる。現在なお盛んに行われているのは、既知鉱床と同様の地質条件を有する既知鉱床地域の探鉱である。最近では、カナダのアサバスカ盆地やナミビアのRössing 鉱床周辺地域で重要な発見があり、資源量が増大した。既知鉱床地域のさらなる探鉱において、既存の既知資源と同規模の資源量が今後新たに発見追加されると期待される。しかし、既知鉱床地域で追加されるウラン資源はより深部へと移行するため、回収コストが高くなる傾向にある。

今後期待されるのは、最新の物理的・地化学的探査手法を用いて新たな鉱床地域を発見することである。また、新たな発想も必要である。ウラン生産量が目下世界一のカザフスタンのウラン鉱床地域(チューサリシュー/シデラリア盆地)についていえば、本盆地の後背地には花崗岩類がほとんど分布しないため、かつて欧米の地質学者はなぜカザフスタンに大規模なウラン鉱床が産するのか理解に苦しんでいた。しかし最近、本地域の後背地に分布する古生層中の黒色頁岩がウランのソースであるらしいことがわかってきた。前章で述べたとおり上部大陸地殻にはウランが濃集しており、いたるところにウランのソースが分布している。鉱床タイプによって詳細は異なるが、ウランが溶けて-流れて-トラップされる地質条件を絞り込んでいけば、ウラン鉱床は今後も発見



第5図 ロールタイプ砂岩型鉱床模式断面図



第6図 主要なウラン鉱床・鉱床地域のタイプ別分布図
注：凡例の記号の大小は大まかな鉱床規模を表す。

し続けることが可能なはずである。

しかしながら、ウラン資源の持続性を考える上では、地質的な資源存在量の問題よりも環境上の制約の方が重大である。最近のウラン鉱山開発・生産・跡処置は、1900年代の中頃に比べるとはるかに自然環境や労働環境に対して繊細な注意がはられるようになった。しかし、過去のずさんな鉱山開発の汚点が新規の開発を困難にしている地域もある。イデオロギーの問題から反対運動にあい、開発の目途がつかないプロジェクトもある。この意味において、原子力発電とウラン鉱山開発は一体と考えられる。原子力発電も鉱山開発も安全と環境への配慮が第一である。原子力がクリーンで安全で、かつ低コストのエネルギーとして世界の信頼を確保できれば、ウラン資源の持続性もおのずと保証されると確信する。

— 参考資料 —

- 1) 東京大学地球惑星システム科学講座, 進化する地球惑星システム, 東京大学出版会, 2004.5.
- 2) R. M. Hazen, *et al.*, Evolution of uranium and thorium minerals, *American Mineralogist*, 2009.
- 3) M. Cuney, Evolution of uranium fractionation processes through time: Driving the secular variation of uranium deposits types, *Econ. Geol.*, 2010.
- 4) 田近英一, 酸素濃度の増大とスノーボールアース・イベント, 日本気象学会, 2007.

著者紹介

小林孝男 (こばやし・たかお)
本誌, 56 [2], p.17 (2014) 参照.

解説シリーズ

世界の原子力事情

第5回 インドの原子力開発の動向

日本原子力研究開発機構 佐藤 浩司,
原子力システム研究懇話会 柳澤 務

三段階の原子力開発計画を策定し、国際的な原子力開発の流れとは一線を画し、独自の(indigenous)原子力開発を展開してきたインド。最近では国際協力をも積極的に活用して高速炉開発を含め早期の原子力の大幅拡大を目指す。

I. インドのエネルギー・電力事情等

国連の世界人口推計 2012 年改訂版によると、インドの人口は現在 12.5 億人であるが、2028 年前後には中国を抜いて世界第 1 位になり、2050 年頃には 16.2 億人に達すると予想されている。また、国際エネルギー機関(IEA)の世界エネルギー予測 2013¹⁾によれば、インド経済は、過去 20 年間の国内総生産(GDP)が年 6.5%で増大してきており、今後も高い経済成長率(2011～2035 年は年 6.3%で GDP が増大)を維持していくものと予測している。このような急速な経済成長と人口増加のために一次エネルギー消費量が急増しており、2011 年の一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量はいずれも中国、米国に次ぐ世界第 3 位(5.7%)となっている。そのため、環境負荷低減に向けてインド政府は、2020 年までに GDP 当たりの CO₂ 排出量を 2005 年比で 20～25%削減する自主目標を発表している。

2011 年のインドの総発電量¹⁾は日本と同規模の 1.052 兆 kWh で、その内訳は石炭火力を主とした火力発電が 79%を占めており、残りが水力 13%、再生可能エネルギー 5%、原子力 3.1%となっている。急速な電力需要の伸びにインフラ整備が追いつかず、慢性的な電力不足(年間発電量及びピーク電力ともに約 10%不足²⁾)状態が続いており、日常的に停電が発生している。

Current Trends in Nuclear Energy (5) ; Trend of Nuclear Power Development in India : Koji SATO, Tsutomu YANAGISAWA.

(2014 年 1 月 14 日 受理)

■前回タイトル

第 4 回 欧州と国際機関

II. インドの原子力政策

1. 歴史的背景

1947 年に英領インドはインドとパキスタンに分離独立し、1950 年にはインド共和国が成立した。インドの原子力開発は、独立前の 1945 年のタタ基礎研究所から始まり、1948 年には原子力法を制定して原子力委員会が設立され、その下に原子力省(DAE)が設置された。インドの原子力開発のスタートは我が国よりも早い。

1957 年にはトロンベイ原子力研究所(後にバーバ原子力研究センター(BARC)と改名)が設立され、引き続きムンバイに発電炉工学部門(後にインド原子力発電公社(NPCIL)と改名)が、カルパッカムに原子炉研究センター(後にインディラ・ガンジー原子力研究センター(IGCAR)と改名)が設立された。1956 年にはアジアで最初の原子炉であるアプサラ(最大熱出力 1,000kWt)が、1969 年には米国から導入した BWR 2 基(各電気出力 16 万 kW)が商業運転を開始している。

また、インドは 1957 年の国際原子力機関(IAEA)の設立に貢献した 12ヶ国の一員で、第 1 回「ジュネーブ原子力平和利用国際会議」の議長をインドの初代原子力委員長長のホミ・バーバ博士が務めている。このように原子力の平和利用に徹してきたインドであるが、1970 年に発効した核不拡散条約(NPT)にはその不平等性を理由に未加盟で、1974 年及び 1998 年に地下核実験を実施したことにより、その後、長い間国際社会からの原子力開発への支援が得られ難い状態が続いていた。これがインド独自の(indigenous)原子力開発を進展させたと考えられる。なお、インドの核実験は、中国との国境紛争に惨敗、パキスタンとのカシミール問題で国家安全保障の不安が生じ、さらに中国が 1964 年に核実験に成功した対抗上、核武装に踏み切った。その後、自発的な核実験

モラトリウムを国際的に公約している。

2005年7月、米国はそれまでのインドに対する核不拡散政策を転換し、民生用原子力協力を行うことに基本的に合意した。それに基づき、2006年3月にインドの原子力施設の軍民分離に関する合意が締結された³⁾。その後2007年10月の米印原子力協力協定の締結を契機として、2008年8月のIAEAとの保障措置協定の締結や、同年9月に原子力供給国グループ(NSG)のインドとの原子力資機材取引を解禁する声明が採択され、国際社会との協力が復活した。

2. 原子力の開発体制

インドの原子力委員会は首相直轄で、その下に原子力規制委員会(AERB)と原子力省(DAE)があり、原子力省の傘下には、5つの研究開発センター、5つの公営企業、3つの産業部門、サービス部門、事務部門がある。(第1図)この1月には、安全で安心でき持続可能な原子力を国際社会と協力して推進する世界原子力パートナーシップセンター(GCNEP)の定礎式が行われ、第6番目の研究開発センターとなる。なお、AERBについては、独立性の高い原子力安全規制機関(NSRA)とNSRAが策定する政策を監視する原子力安全諮問委員会(NSC)を新設し、それにAERBを統合する内容の法案が現在審議中である。

3. 三段階の原子力開発計画

インドは、ウラン(U)資源が乏しくその品位も良くないが、トリウム(Th)資源は世界第2位の埋蔵量(世界の

埋蔵量の約25%)を有している。そのため、バーバ原子力委員長は、究極的にはそのTh燃料を有効活用する「U-Thサイクル」をベースとしたインド独自の三段階の原子力開発計画を1950年代前半に策定した。

第一段階：天然U(U-238)を燃料として利用できる加圧重水炉(PHWR)を建設し、発電とともにU-238から核分裂性のプルトニウム239(Pu-239)を生産

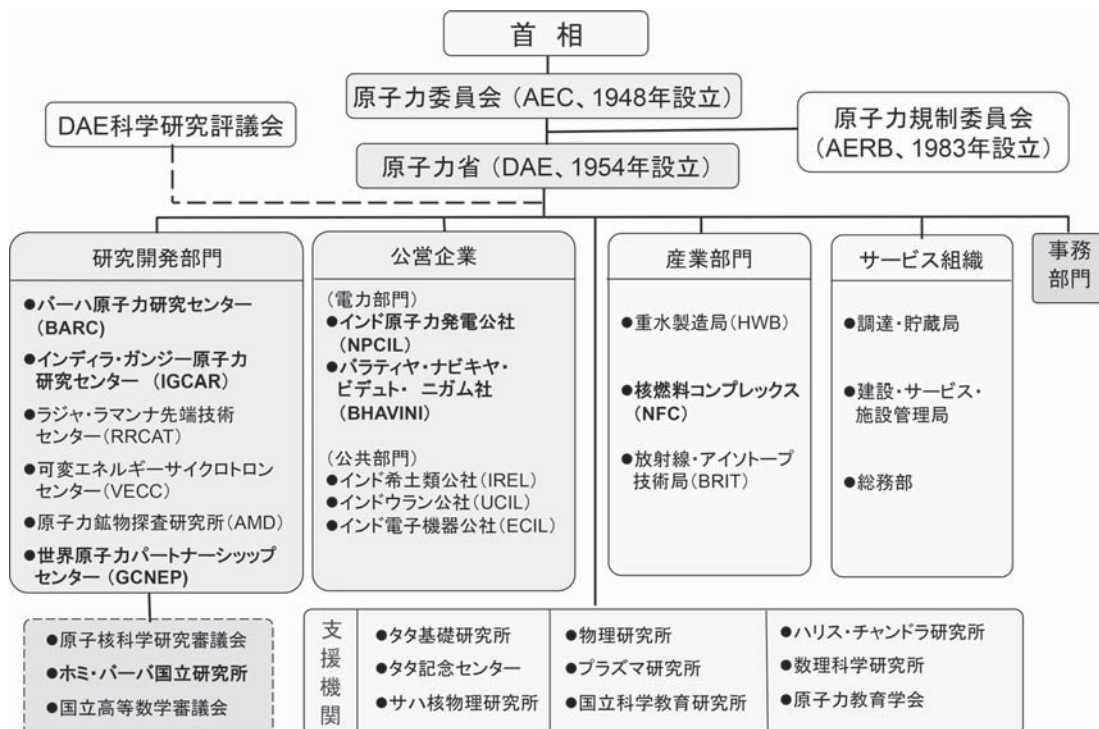
第二段階：PHWR燃料を再処理して回収されるPuと減損Uを燃料として使う高速増殖炉(FBR)を建設し、発電とともにU-238からPu-239を生産する。電力需要の伸びが緩やかになった第二段階の後期には、ブランケットにTh-232燃料を装荷し核分裂性のU-233を生産

第三段階：FBRのブランケット燃料を再処理して回収されるU-233とTh-232を燃料として使う新型重水炉(AHWR；増殖炉)を建設し、発電とともにTh-232からU-233を生産

インドは原子力の開発当初からこの政策を一貫して進めてきており、現在はその第二段階にあたるFBRサイクル技術の開発を重点的に進めている。

4. 電力・原子力導入計画

(1) 電力の第12次5ヵ年計画(2012～2016年度)
 インド政府のエネルギー行政は、電力省、石炭省、石油・天然ガス省、新・再生可能エネルギー省、原子力省の5省に分かれており、計画委員会は5年毎に各省が作成した計画を調整してエネルギー計画を策定している。その中で電力計画は、電力省が新・再生可能エネルギー



第1図 インドの原子力開発体制

省、原子力省の計画を取り入れて策定している。2013年8月末時点のインドの全発電設備容量は、自家発電(3,340万kWe；約12%)を含めて約2.6億kWeで、原子力はその約2%(478万kWe)である。(第2図)

2013年5月に公表された電力の第12次5ヵ年計画(2012年4月～2017年3月)では、ピーク電力不足を解消し老朽化プラントを早期廃止するために、2016年度末までに火力7,234万kWe、水力1,090万kWe、原子力530万kWe、再生可能エネルギー3,000万kWeの合計11,854万kWeの発電設備増設を予定している。

(2) 原子力の長期導入計画

DAEは、2004年に「電力成長戦略」⁴⁾を策定している。そこでは、「インドの生活水準を先進国並みに向上させるためには、1人当たりの年間電力消費量を今後約50年間で1桁増大させる必要がある。エネルギー安定供給と環境負荷低減を考えると原子力発電の大幅な増大が必要であり、さらに国内の資源的制約を考えるとFBRの大幅導入が不可欠である。」として、「原子力設備容量として2022年までに2,900万kWe、2032年までに6,300万kWe、2052年までに2.75億kWe(2052年の全発電設備容量13.4億kWeの20%、全発電量予測8兆kWhの

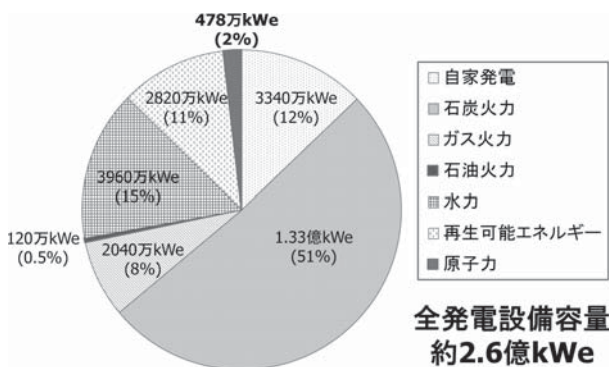
約25%に相当)を導入し、その大半をFBRで賄いたい。」としている。その後、後述するように海外から大型軽水炉を濃縮U付きで大量に輸入すること等が可能となつて、この計画の見直しが行われている。そのケーススタディとして、濃縮U供給国の了解を得て、軽水炉の使用済燃料をインドで再処理し、回収したPuとUをFBRでリサイクルできるようになれば、2050年頃の電力設備の半分を原子力で賄うことも可能であろうとの検討結果も発表されている⁵⁾。(第3図)

昨年9月のDAE発表⁶⁾では、第12次5ヵ年計画中には、現在建設中のPHWR4基(各70万kWe)、軽水炉2基(各100万kWe)とFBR1基(50万kWe)が運転を開始し、またPHWR8基(各70万kWe)、FBR2基(各50万kWe)、軽水炉8基(各100万kWe～165万kWe)及びAHWR1基(30万kWe)が建設を着工する予定である。これらが計画通り進めば、2032年までには海外からの大型軽水炉合計4,000万kWeの導入を含めると原子力発電設備容量を6,300万kWeとすることも可能であろうと予測している。

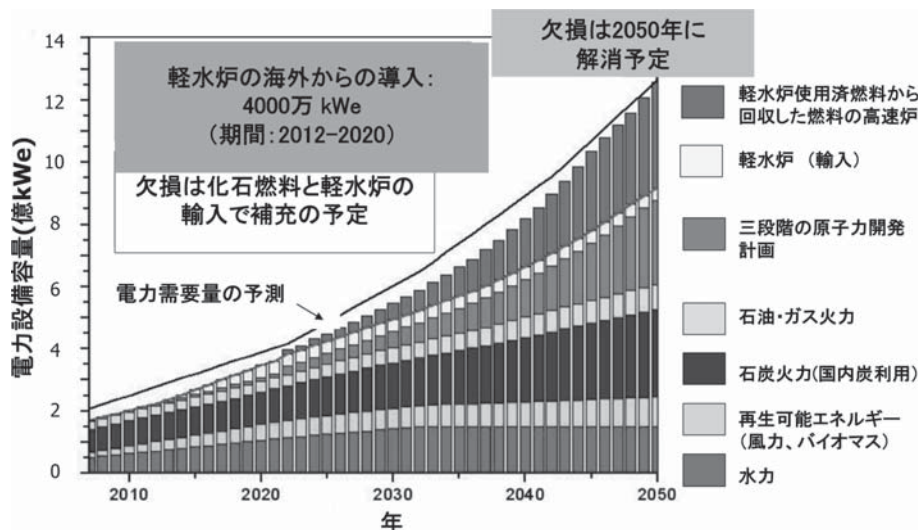
5. 国際協力

インドは米国との原子力協力をきっかけに、フランス、ロシア、カザフスタン、カナダ、韓国、英国、アルゼンチン、モンゴル、ナンビアと原子力協力協定や原子力協力覚書(MOU)を締結⁷⁾しており、現在、日本、オーストラリア等の国々との交渉が行われている。これらの協力協定の締結により、インドへの大型軽水炉の濃縮ウラン付での輸出や天然Uの供給が可能となった。

インドはFBRの分野においても海外との原子力の協力関係を深めており、2010年12月にDAEは、フランスの原子力・代替エネルギー庁(CEA)と原子力研究開発に関する取決めを締結し、ナトリウム冷却FBRの安全関連技術について協力をしており、また、ロシアのロ



第2図 インドの電力設備容量(2013年8月)



第3図 インドの原子力導入シナリオ(ケーススタディ)

スアトムとも次世代の FBR 開発を含む協力覚書を締結している。

ここで一つ我が国の企業がインドへ原子炉を輸出する場合の懸念材料として、2010年9月に成立したインドの原子力損害賠償法がある。インドでは、運転事業者だけでなく、設備や機器を製造し供給した外国企業にも一定の上限を設けた上で責任を追及できることが規定されている。これは、1984年末にインド中部のボパールで発生した米国企業の化学工場での爆発事故で、史上最悪の1万人を超える住民が死亡した苦い経験が背景にあるためと言われている。

III. 原子力開発の現状

1. 第一段階：熱中性子炉 (加圧重水炉と軽水炉) サイクル

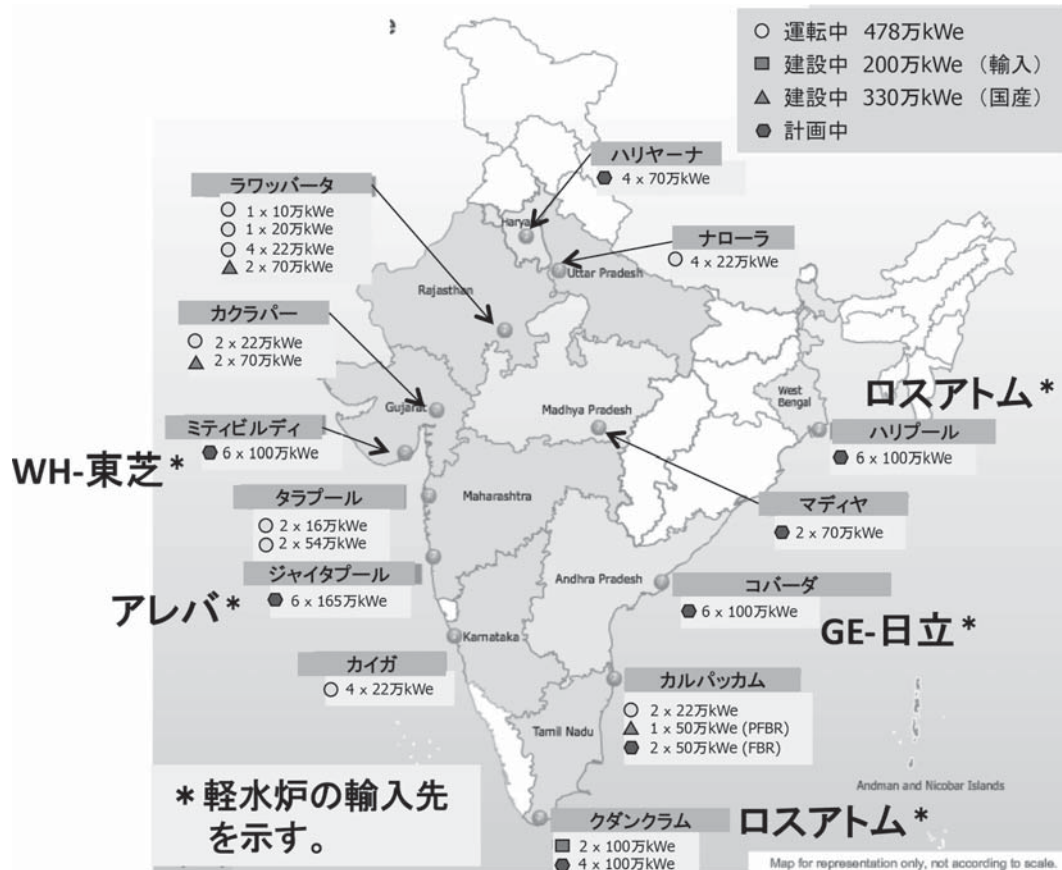
ムンバイに本部のある NPCIL は、職員数は約 13,000 人で、原子力発電所のサイト選定から設計・建設・運転、デコミまでを行っており、世界原子力発電事業者協会(WANO)にも加入している。

インドでは、開発初期に BWR2 基を米国から導入以降は、自国に商業レベルの U 濃縮施設を持っていないため、天然 U を燃料として使用できる重水炉の開発を積極的に推進してきた。カナダ型重水炉 (CANDU) 2 基の建設 (1 基はカナダ製、後の 1 基はインドの核実験に

よりカナダの協力が得られなくなったため国産で開発) 後は、国産技術で PHWR を建設している。現在、第一段階の発電炉としては、PHWR 18 基と、BWR 2 基の合計 20 基が 6 サイトで運転中で、海外からの U 輸入が可能となったことから、ここ数年の設備利用率は平均約 80% と高い値を達成している。

海外からの軽水炉導入については、2008年にロスアトムとクダングラムに PWR (VVER-1000) を 4 基建設 (そのうち 2 基は今年運転開始予定)、その他のサイトを含めて最大 12 基建設、フランスのアレバは 2010年にジャイタプールに EPR を 6 基、さらに米国は WH-東芝が AP1000 を 6 基、GE-日立が ABWR を 6 基建設することに合意している⁷⁾。(第 4 図) 2014年1月現在 NPCIL では、70 万 kWe の PHWR4 基と、ロシア製の PWR (VVER) を 2 基の合計 480 万 kWe を建設中である。また、内陸部 5 か所に 16 基の PHWR を建設する計画をしており、第 12 期 5 年計画中にそのうち 8 基と、海外から導入する軽水炉を 4 サイトに 8 基着工する予定である。なお、NPCIL では PHWR の開発経験を踏まえて 80 万 kWe のインド製 PWR の開発も進めている。

PHWR の燃料は、ハイデラバードにある核燃料コンプレックス (NFC; 400tHM/y) で製造され、また、PHWR の使用済燃料はタラプールやカルパッカムにあ



第 4 図 インドの運転中、建設中、計画中の原子力発電サイト (2014 年 1 月)

る BARC の再処理施設 (100tHM/y × 3) で再処理され、回収された Pu はタラプールにある BARC の先進燃料製造施設 (AFFF; 20tHM/y) で PFBR 用の混合酸化物 (MOX) 燃料に加工される。さらに、将来的には軽水炉の使用済燃料をインド国内で再処理し、回収した Pu を平和利用に使用する方向で関係各国や IAEA と協議が進められている。

2. 第二段階：高速炉サイクル

ナトリウム冷却 FBR とその燃料サイクルの開発を担う IGCAR はカルパッカムにあり、職員数約 2,800 名で、2020 年代にはインドは FBR サイクル技術の世界のリーダーになるとの意気込みで積極的に開発を進めている。

1985 年から、炭化物燃料 (PuC/UC) を使用した高速実験炉 (FBTR; 4 万 kWt; ループ型) を運転し、1997 年から発電 (1.3 万 kWe) も行っている。蒸気発生器とタービン、燃料以外はフランスの高速実験炉ラプソディと同じ設計であり、炭化物燃料の最高燃焼度は 15.5 万 MWd/t を達成している。なお、設計当初は MOX 燃料を用いる予定だったが、1974 年の核実験により、高濃縮 U がフランスから入手できなくなったため、MOX 燃料に比べて高密度で、高 Pu 富化度が可能な炭化物燃料を独自技術で開発し使用している。現在、FBTR 炉心は炭化物燃料と MOX 燃料のハイブリッド化が進められている。この FBTR は 2011 年に 2030 年まで 20 年間の寿命延長が認められている。

現在、FBR を建設・運転するために 2003 年に設立された BHAVINI 社 (職員約 500 人) が IGCAR のサイト近傍に原型炉 PFBR (50 万 kWe; MOX 燃料; タンク型) を建設中で、今年 9 月に初臨界を予定している。ここで MOX 燃料を採用した理由は、これまでの海外 FBR での MOX 燃料の安全な運転実績、高燃焼度化、燃料製造・再処理実績などを踏まえてである。この PFBR に引き続き、PFBR の安全性・経済性を向上させ標準化した FBR のツインプラント (50 万 kWe × 2 基) をまずは PFBR と同一サイトに 2023 年までに建設する計画である。また、2025 年以降は、システム倍増時間の短縮化が期待される金属燃料を用いた商用 FBR (CFBR; 100 万 kWe) を導入する計画である。そのための金属燃料サイクルに関する研究開発も進めており、2020 年までに金属燃料の実験炉 MFTR (12 万 kWe) を建設する計画も持っている。なお IGCAR では、U-233 燃料を用いたカミニ研究炉 (30kWi) が 1996 年から運転されている。

FBTR の炭化物燃料は BARC で製造され、その使用済燃料は、2003 年から運転中の湿式再処理パイロットプラント CORAL で処理されている。現在建設中の湿式再処理実証プラント (DFRP; 1t/y) は、2014 年に試運転を予定している。また、PFBR 用の運転初期の MOX 燃料は AFFF で製造されているが、その後は、PFBR

と併設して (コロケーションで) 建設中の燃料製造・再処理・廃棄物管理を統合した実用高速炉燃料サイクル施設 (FRFCF) で製造され、その使用済燃料の再処理等も行う予定である。

3. 第三段階：先進炉サイクル

BARC は、ムンバイ近郊のトロンベイに設置された職員数約 5 万人を有するインド最大の研究機関で、インド各所にも研究施設を持っている。BARC では、原子炉物理、原子炉工学等を含めた各種新型炉と燃料サイクルの開発を行うとともに、原子力の熱利用技術、放射線育种、食品照射、核医学診断、放射性同位体の医療・農業・産業分野への応用、ビーム技術 (加速器・レーザー・プラズマ) など、原子力の基礎から応用までの広範囲にわたる先進的な研究開発を行っている。

Th 利用には多量の U-233 が必要となるため、まずは U-Pu 金属燃料 FBR の増設を図った後にそのブランケットに Th を装荷して U-233 を生産し、本格的な Th 利用は 2070 年以降と考えている。BARC では将来の Th 燃料の本格利用時代に備えて、受動的安全性を強化し経済性を追求した新型重水炉 (AHWR) の開発を進めている。AHWR は、同一燃料集合体内に (Th-U-233) MOX 燃料ピンと、(Th-Pu) MOX 燃料ピンとを配列した 30 万 kWe の自然循環除熱を採用した垂直圧力管型の重水減速・沸騰軽水冷却炉であり、運転寿命は 100 年とされている。既に詳細設計や、AERB による安全審査前の設計安全評価 (プレヒア) も終えており、2022 年までに運転を開始したいとしている。

さらに、将来 Th 燃料利用のため、1,000°C の高温熱源の小型高温炉 CHTR (鉛ビスマス冷却、被覆粒子燃料) や革新的高温炉 IHTR (溶融塩冷却、被覆粒子燃料)、これより温度の低い溶融塩増殖炉、Th 燃料からの U-233 の生産や、高レベル廃棄物の環境負荷低減のための加速器駆動未臨界炉 (ADS) の研究も行っている。

4. 原子力の人材育成

原子力の専門家を育成するためのトレーニングスクールが 1957 年に BARC (ムンバイ) に設置され、また同トレーニングセンターは 2000 年以降には IGCAR 等 4 カ所にも設置され⁸⁾、全国の大学卒業生を選抜し、1 年間、厳しく教育してインドの原子力界に優秀な人材を提供してきており、これまでに 8,300 人が卒業している。また、2005 年には、修士号や博士号を持った原子力の専門家を育成するためにホミ・バーバ国立研究所 (HBNI) が設立され、現在 1,200 名を超える大学院生が在籍している。さらに NPCIL では運転員の教育訓練を、NPCIL の各サイト、BARC、WANO のトレーニングセンターを利用して行うとともに、職場内訓練 (OJT) を行っている。

2017 年に完成予定の GCNEP には、先進原子力シス

テム, 核セキュリティ, 放射線安全, 原子力材料, 放射性同位元素 (RI)・放射線技術応用の 5 学部が設置され, 国際協力も進め, 国際的に通用する原子力の人材育成を図る計画である。

IV. 東電福島第一原子力発電所事故の影響

福島事故直後にインド政府は, 国内で稼働中の原子力発電所の安全性の再確認 (安全審査委員会を設置, IAEA の専門家の招聘等) の実施, 安全規制の一層の厳格化 (AERB を内包した独立の規制当局の創設等) を指示したが, 安全確保とセキュリティに十分配慮して, より透明性を高めて原子力を推進していくというインド政府の姿勢には変わりがない。

インドでは, 想定される地震のエネルギーの大きさ (マグニチュード M) で, 国内を 5 領域 (ゾーン I~V) に区分しており, ゾーン V (M8 以上) への原子炉設置は禁止されている。また, 運転中のプラントに対して, NPCIL と AERB による定期安全レビューが義務づけられており, 1993 年 3 月のナローラ原子力発電所での火災による 17 時間の外部電源喪失 (SBO) 事故や, 2004 年 12 月のインドネシア沖地震によるカルパッカムのマドラス原子力発電所での津波被害についての教訓が反映され, 各発電所では必要な対策が講じられている。福島事故後に, 運転中の 20 基と建設中の 6 基に対して安全レビューが実施された。その結果, 地震, 洪水, 津波等の外部事象に対しては, 更なる安全性強化のために, 非常時の冷却水供給ルートの確保, 可搬式ポンプや非常用ディーゼル発電機 (DG) の整備, 格納容器内の水素対策, 緊急時対策手順書の整備等の対策を図ることを要請した⁹⁾。

また, 建設中の PFBR についても安全レビューが行われたが, 工事中にインドネシア沖地震 (2004 年) による津波の被害を受けたため, 海拔 5.1m の津波壁等の津波対策が講じられていた。しかし, 福島事故を踏まえ, 津波壁の 9m へのかさ上げし, 床面高さを海拔 9.7m にしている。またドアや配管・ケーブル貫通部に海水浸入防止の対策工事を予定している。さらに, SBO に備えて 4 台の DG が設置されているが, 更に 2 台の可動式 DG を準備するとしている¹⁰⁾。

V. 日印原子力協力への期待

インドは, FBR を用いたクローズド燃料サイクルの

早期実用化を目指して, 原子力開発を最も積極的に進めている国の一つであり, 優秀な研究者も非常に多いと推測されるが, 我が国との原子力協力は, これまでかなり限られたものであった。しかし, 昨年 9 月, 日印原子力学会の協力覚書 (MOU) が締結され, また, 日印政府間の原子力協力協定もそう遠くないうちに締結されると思われる。世界の多くの国が今後も原子力の利用・拡大を図ろうとしている中で, 福島事故を起こした当事国である日本は, その経験と教訓を国際的に共有し, 世界の原子力の安全性向上に貢献することが求められている。2 度の原爆の悲劇を受けた中で原子力の平和利用に徹してきた日本だからこそ, NPT 未加盟であるインドに対して核不拡散を強く求めつつ原子力協力を進めることができ, これらの協力を通じて信頼関係を醸成できれば, 世界平和にも貢献すると信じている。

— 参考資料 —

- 1) World Energy Outlook 2013, OECD/IEA, (2013).
- 2) Twelfth Five Year Plan (2012-2017), Economic Sectors, Vol. II, Planning Commission (Government of India), (2013).
- 3) 核不拡散ポケットブック, JAEA/NPSTC, (2010).
- 4) A. Kakodakar, Nuclear Energy in India—Retrospect and Prospect, *Int. J. Nucl. Power*, Vol.18, No.2-3 (2004).
- 5) A. Kakodakar, Evolving Indian Nuclear Programme—Rationale and Perspective, AEC, India, (Jul. 4, 2008).
- 6) Indian Nuclear Power Programme, DAE Presentation to US Industry Delegation, IAEA, (Sep. 18, 2013).
- 7) R.k. Sinha, Founder's Day-2013, DAE, (Oct. 30, 2013).
- 8) R.B. Grover, *et al.*, Development of human resources for Indian nuclear power programme, *Sadhana* Vo. 38, Part 5, (Oct. 2013).
- 9) Safety evaluation of Indian nuclear power plants Post Fukushima Incident (Interim Report), NPCIL, (2011).
- 10) P. Kumar, Safety features of the PFBR, *Nuclear Engineering International*, (Sep.18, 2013).

著者紹介



佐藤浩司 (さとう・こうじ)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 高速炉と燃料サイクル, 高速炉の安全性, 国際協力



柳澤 務 (やなぎさわ・つとむ)
原子力システム研究懇話会
(専門分野/関心分野) 高速炉システム工学, 原子力・社会連携

談話室

インド訪問記

日本原子力研究開発機構 田中 淳

日本原子力学会とインド原子力学会との間で協力に関する覚書が結ばれたことから、2013年12月に行われるインド原子力学会年会(INSAC-2013)への参加依頼が当学会にあり、それに参加する機会を得た。今回のINSAC-2013のテーマは'Advances in Radiation Technology for Social Benefits'。本稿ではこの会合の様相を紹介する。

会合はインド原子力発電公社の会議場で開催され、参加者総数は約600人にのぼった。初日の会合ではインドの原子力学会会長はじめ、原子力委員会会長(兼原子力省長官)、インド原子力発電公社社長、原子力省放射線・RI技術庁長官などが挨拶を行った(写真)。ムンバイに本社を置き、インド最大の企業に育て上げたタタグループの元会長が本年会の特別ゲストとして招かれていた。

最も印象に残ったのはクマール・シンハ原子力委員会会長の挨拶で、原子力における放射線利用の重要性を具体的かつ極めて強く主張された。その中心は医学・医療への利用で、原子炉を用いたRIの製造や最近増加しつつあるサイクロトロンを用いたRI利用であった。

同会長のコメントに呼応するかのようにセッションが組まれており、がん治療のセッションをはじめ、医療用薬剤の開発、放射線育種などの新技術、食品照射や工業用ゴム製造などに用いる放射線プロセッシング技術や電子



写真右から、原子力学会会長、タタグループ元会長、原子力委員会会長、原子力発電公社社長、原子力省放射線・RI技術庁長官

加速器関連技術、工業や水文学への放射線利用、放射線防護や国民の放射線認知など多彩な内容で構成されていた。

年会ではあるものの一般講演やポスター発表などではなく、選ばれた方々が2日半にわたり、7つのセッションで22の講演を行った。海外からは日本のほかに、米国、ロシア、韓国、ポーランドの5カ国による招待講演が行われた。たまたま席を近くにしていただいていたインドの報道関係者からは、「福島事故で日本は大丈夫か」との質問をうけた。また、「インド人の3割は原子力エネルギーを前向きにとらえているが、7割が否定的だ。反対運動も常に起こっている」と話してくれた。

私の講演は、初めのセッションの「がん治療と健康管理の最前線」に組み込まれた。この講演は年会のテーマにはまったくなく、ロビーなどで、とても興味深かった、触発された、と何人にも呼びかけられた。なかには、その新しい技術を安全な食糧生産のためにインドに持ち込みたいと、会社社長や大学教授から相談されたこともあった。放射線を用いたバイオ技術や医療応用の分野では日本が世界をリードしていることを再認識するとともに、インドの研究開発もすぐそこまで来ていることを実感した。

一方、インドの方の講演は、RIを用いたがんの診断・治療技術やその薬剤開発、また加速器の開発など、多岐にわたっていた。日本ではあまり耳慣れないものとして、地熱利用や水源探索などに用いる水文学に関わる講演が行われた。インド、特にヒマラヤ地方などはインドの水源となっており、その水源がかなり枯渇して人々の生活を脅かすようになってきている。安定同位体等を用いて水の移行動態を調査し、水源にかつての水量を戻そうとする研究の話は、興味深かった。

初日の夜に開かれたウェルカムディナーには、地元ムンバイの原子力研究開発関係業者をはじめ、多くの人が集まってこられた。私と会話をかわした人たちからは、いかに日本人が実直丁寧で、だからこそ研究や技術のあらゆる面で進んでいると信じておられることが伺えた。今後も研究開発に邁進すべきである、と改めて気を引き締められる思いであった。

(2013年12月20日記)



CPD ノススメ

信頼される原子力技術者・研究者を目指して

第2回 様々な学協会が進める CPD

教育委員会 技術者教育小委員会 尾崎 章
(株東芝)

今回は、短期連載企画の第1回目として、日本工学会 橋谷フェローに、CPD 制度の解説、原子力学会への助言を頂いた。今回は、原子力学会会員各位に、他学協会の取組をより具体的に知って頂くことを目的に、技術者教育小委員会で実施した調査結果について報告する。大学教育と現場の実学の違い、ベテラン技術者の経験知・ノウハウの伝承などの課題は、多くの学協会でも共通と思われる、原子力の継続的安全性向上を支える技術者の継続研鑽への取組として参考になれば幸いである。

はじめに

前回、日本工学会橋谷フェローから継続研鑽 (CPD : Continuing Professional Development) を支援する学協会の在り方について、様々な角度から貴重なご指摘を頂いた¹⁾。我々、教育委員会技術者教育小委員会 (以下「小委員会」) としては、頂いたご指摘も勘案して CPD のあるべき姿を構築していかなければならないと考えている。そのための参考として、他の学協会が進められている CPD の取組について調査を行うこととした。調査は日本工学会 CPD WG の委員を務める様々な学協会の代表者の方々から回答を頂いたアンケートと公開されているウェブ情報をベースとして行い、結果をまとめた。

1. 調査項目・対象

原子力学会が今後 CPD の取組を進めていく際に参考になるであろう情報として、小委員会での議論を踏まえ、以下の項目を調査した。

- ・学会としての CPD 目標や CPD ガイドラインがどのように提示されているか。
- ・CPD を支援するためのプログラムがどのように提供されているか。
- ・CPD の「見える化」のための登録仕組みと運営。
- ・CPD 実績とリンクした資格制度。
- ・資格以外の CPD へのインセンティブ。

対象は、日本工学会 CPD WG 等に参画している学協会の中から、化学工学会、計測自動制御学会、情報処理

学会、電気学会、電子情報通信学会、土木学会 (順不同) とした。

2. 各学協会における CPD の調査結果

調査結果の概略を第1表に示す。その内容について以下に説明する。

(1) CPD の位置づけ

学協会は定款においてその活動目的と事業分野を定めている。今回調査した学協会においても、いずれもその事業分野として、人材育成や教育活動を規定している。しかし、CPD の取組を具体的に推進するには、学協会として明確な方針を提示し、周知する必要があると考えられる。調査したいずれの学会においても、学会のホームページで CPD への取組について説明されており、専用のページを設けて詳細な解説を行っている例も多い^{2)~7)}。原子力学会でも平成 25 年度の定款改訂により、事業内容に「教育」という文言が含まれることになった。この精神を具体的な事業活動にどのように反映して行くかについては今後の議論が待たれる。

(2) CPD を支援するプログラムの提供

CPD は、「技術者が自らの技術力や研究能力向上のために自分の能力を継続的に磨く活動」ではあるが、そのための機会の提供も必要である。このうち、学協会が提供するものを CPD プログラムと呼んでいる。CPD プログラムには、講習会、シンポジウム、講演会、研修会などがあり、多くの場合、各学会の支部、部門、専門委員会などが企画、運営している。

化学工学会では、技術者継続教育の体系化を図っている。化学工学技術者として必要な教育分野・項目を定めるとともに、教育対象の階層を4段階に分け、それぞれ分野・項目に対してそれぞれの階層で実施すべき教育

An Encouragement of CPD, Aspiring to Make Trustworthy Nuclear Engineers and Researchers (2) : The Outline of CPD Programs Promoted by a Variety of Professional Societies :
akira OZAKI.

(2013年12月23日 受理)

第1表 調査結果のまとめ

調査項目	化学工学会	計測自動制御学会	情報処理学会	電気学会	電子情報通信学会	土木学会
明文化された CPD 目標・ガイドライン (定款・倫理規定以外)	あり 「化学技術者の継続教育の紹介」の HP	あり 「継続教育 (CPD)」の HP	あり 「高度 IT 人材育成」の HP	あり 「CPD 部会」の HP	あり 「今こそ、今すぐ、一人ひとりが人材 CPD」の HP	あり 「技術推進機構 CPD」の HP
CPD プログラムを提供する学会組織	人材育成センター 継続教育委員会	教育・認定委員会 人材育成 WG	IT プロフェッショナル委員会 (予定)	CPD 部会 本部・支部・部門の委員会	CPD 委員会 生涯教育委員会	技術推進機構 各委員会, 支部
CPD 登録システム	あり 人材育成センターで 管理・運営	あり 会員管理システムに 組込	あり 電気電子・情報系 CPD 協議会で共同 運営 (予定)	あり 電気電子・情報系 CPD 協議会で共同 運営	あり 電気電子・情報系 CPD 協議会で共同 運営	あり 技術推進機構で運営
資格制度	あり 化学工学修習士 化学工学技士 (基礎) 化学工学技士 上席化学工学技士 の 4 段階	あり 計測制御エンジニア (アカデミック) 計測制御エンジニア (補) 計測制御エンジニア の 3 段階	試行中 認定情報技術者制度 (IT スキル標準 レベル 4 相当, 国際 資格とする予定)	あり CPD 認定技術者	検討中 2~4 ランクの資格 制度を計画	あり 2 級土木技術者 1 級土木技術者 上級土木技術者 特別上級土木技術者 の 4 段階
資格制度以外の CPD 奨励策	なし	所定の条件を満たした申請により年会費の一部を還付。所定の条件を満たした申請により、高得点者を表彰	なし	学会の出版物等を会員割引より有利な条件で購入可	なし	なし

を明示している (第2表)。入門レベルには科学技術振興機構 (JST) の WEB 教材を活用, 初級クラスは各支部で開催, 中級以上の教育をセンターで開催するなど, 参加者の利便性にも配慮した運営の工夫がみられる。また, リーダーシップを発揮できる経営者の育成を目的として「経営ゼミナール」を開講しており, 講師による講演と参加者相互間の討議を年4回, 泊り込みで行っている。

計測自動制御学会 (SICE) では, 特徴的な施策として, 現場に精通したプロセス制御関連技術者の育成を目的に「SICE プロセス塾」を開講している。当該分野で10年程度の経験を有する技術者を対象に, 通信講座 (1,000 ページを超えるテキストを各自が学習) と5回のスクーリング (宿泊つき研修) を組み合わせた教育を行っている。この講座は, 平成25年度, 日本工学会の ECE (Engineering Capacity Enhancement) プログラムとしても認定されている。

電子情報通信学会では, 先端オープン講座を開講しており, 分野/対象技術別に6つのコースが用意されている。各講座とも2~5日の間に複数のテーマの講義が準備されており, 電子情報通信分野における若手技術者から中堅技術者まで, 基礎的事項の理解から専門的事項, 最新動向の理解・習得まで, 幅広いニーズに応えることを目指している。

これらの講座に対しては, 各学協会ともに, 継続教育委員会などの運営組織 (約10名の規模) が設けられ, 企画・運営を行うとともに, 受講者へのアンケートなどによるフィードバックを受けて, 次年度の実施に向けた対策・改善を行っている。これらの活動は, 大部分が委員

のボランティア的な参画であり, 継続教育に対する熱意が感じられる。

CPD プログラムの情報提供については, 各学協会とも自前のホームページで行っている。いずれも学会のトップページからアクセスすることができるようになっている。

(3) CPD 実績登録の仕組み

今回調査した学会全てが CPD 実績登録の仕組みを有している。

登録ポイントは講習会・研修会への参加 (時間ベースの評価), 論文投稿, 学会の委員会活動などに対して付与されており, 概ね各学会共通である。また, 企業の一般業務に対してポイントを認める (化学工学会) など, 具体的な CPD の活動項目の決め方, およびそのウエートの掛け方, 登録ポイントの算出方法などに, 学会ごとの工夫がみられる。

登録は, 各人が学会のホームページにアクセスして入力するものがほとんどである。登録されたポイントの審査・監査としては, CPD 実績証明書の発行時などにエビデンスの提出を求めるケースが多い。土木学会では, 総合評価落札方式の公共事業の一部において CPD 実績が評価対象になる場合があり, 登録ポイントの審査・監査の体制を整えている。

電気学会・情報処理学会・電子情報通信学会は電気電子・情報系 CPD 協議会を作り, CPD 活動項目の分類, 区分, 項目を共通化した上で, 共同で CPD ポイントの管理システムを作って運営している。

土木学会では, 学会主催行事 (全国大会, 講習会など) への参加については, 会員証を会場に設置されたカード

第2表 化学工学会化学技術者継続教育体系(抜粋)

分類	CPD項目	L1(入門)	L2(初級)	L3(中級)	L4(高度,最新,経営)	
倫理	倫理一般					
	技術者倫理		センター	センター		
工学基礎	化学工学	物性	WEB教材*	各支部で開催		
		伝熱・蒸発				
		流動				
		攪拌・混合	WEB教材*			
		熱力学				
	移動現象					
	反応	反応工学				
安全	安全工学	プロセス安全思想				
		化学物質安全		実施		
		事故事例解析				
		安全性評価		実施		
		安全設計				
		変更管理		実施		
		緊急対応計画				
環境	環境技術	法規・規格				
		廃水処理				
		大気汚染処理		センター		
		廃棄物回収				
		土壌浄化				
技術教育	化学工学応用	分離プロセス		各支部で開催		
		吸収				
		吸着・イオン交換				
		抽出				
		蒸留	WEB教材*			
		固液・気固分離				
		膜分離	WEB教材*			
		粉粒体操作				
		調湿・乾燥				
		晶析				
	燃焼					
	プラント設計	プロセス設計		プロセス設計	P&ID・考え方と作成法	
		プロセス機器設計				
		反応器設計				
		プロセス制御	WEB教材*	プラント計装入門		
		最適化				
	プラント運転	パッチプロセスの制御				
		プラント運転				
	プロセス開発	プラント保守			センター	
		ユーティリティ・システム				
R&D						
スケールアップ				センター		
プロセス評価						
技術関連	F/S, 工業化計画					
	セルルス/マーケティング					
最新技術	パイロットプラント					
	仕様書の書き方			仕様書の書き方		
その他	技術動向			支部で実施	センター	
	社会動向				センター	
プロジェクトマネジメント	プロジェクトマネジメント					
	プロジェクト評価			センター		
	見積とコスト算出法					
経営	財務諸表					
	企業経営			センター	経営セミナー	

* JST からの委託で WEB 教材を作成したもので、無料で一般公開
(化学工学会ホームページ http://www.scej.org/RN_pages/katsudou_keizoku/keizoku-taikei.pdf から抜粋して作成)

リーダーに通すことにより、自動的に CPD 実績が登録されるようになっており、登録者の負担を軽減する工夫が行われている。

(4) 資格制度

今回調査した学会の多くが何らかの資格制度を有している。

資格認定時の条件を CPD 実績ポイントとリンクさせている例は少なく(電気学会/CPD 認定技術者制度あり)、多くは試験のみによっている。しかし、取得した資格を維持更新するためには、一定期間内の所定の CPD ポイントの取得を要件としている場合がほとんど

であり、CPD 実施のインセンティブになっている。資格試験の問題作成・試験の実施など制度の推進のための組織を設けて取り組んでおり、過去に出された問題をホームページに掲載して受験者の便宜を図っているケースも多い。資格制度を設けている多くの学会では、資格を取得している個人会員の割合は 10~20% とのことであった。

(5) 資格以外の CPD 奨励策

計測自動制御学会では、CPD 年間ポイント申請時に所定の条件を満たせば、年会費の一部が還付される、CPD 年間ポイント上位 3 名が特別総会で表彰される等のインセンティブを設けている。電気学会では、CPD 認定技術者は学会の出版物を会員割引より有利な条件で購入できる。

3. CPD 推進における課題など

CPD の活性化のためには、各学協会会員や代表的な所属組織のニーズに合ったプログラムが提供されることが必要である。そのためには、受講前・受講後のアンケートなどにより受講者側のニーズを吸い上げるとともに、次回のプログラムへのフィードバックなど、きめ細かなフォローが必要である。また、プログラムへの参加が、人的ネットワークの構築に役立つような仕掛けを作ることで、プログラムの魅力を高める工夫も必要である。さらには、プログラムの周知方法も工夫する必要がある。

CPD 登録システムの利用者数の割合は必ずしも高くなく、土木学会の約 20% が最大であった。資格取得者が、更新審査に備えて利用しているケースが多く、魅力ある資格制度や国内外の既存資格との連携が CPD ニーズの自覚につながり、システム利用登録の拡大につながる。一方で、土木学会で行われているようなポイント登録の負担軽減のための工夫、計測自動制御学会で行われているようなインセンティブ付与、更にはこれらを含めて登録システムを維持するためのリソースの確保・維持は、現実的な課題である。

これらの課題解決には、個々の学会の努力に加えて、学会間連携、ないしは日本工学会との連携等の活動が重要とされている。

おわりに

調査した各学協会とも、独自に必要な CPD の姿を描きそれに向けた独自の工夫を行って取り組んでいる。学協会として CPD を推進するためには、相当の準備と人的リソースの投入が必要であり、その多くは会員のボランティア的な活動に依存している。それぞれに異なる背景はあるものの、大学教育と現場の実学の違い、ベテラン技術者の経験知・ノウハウの伝承などの問題意識に基づく CPD の必要性の理解、推進への熱意が最も重要な

点であると思われる。原子力学会においても同様な問題は存在しており、特に、東京電力福島第一原子力発電所での事故の教訓から、継続的な安全性向上が強く求められている。それを実現するための技術者・研究者の継続的な研鑽を推進することは、学会の待ったなしの責務であると言えよう。原子力学会の CPD を再構築するにあたっては、この点に関する熟議と会員の理解が必要不可欠である。

－ 参考資料 －

- 1) 橋谷元由：原子力学会誌，Vol.56, No.3, pp.206-208 (2014).
- 2) 化学工学会
http://www.scej.org/RN_pages/katsudou_keizoku/継続教育の紹介.html
- 3) 計測自動制御学会
<http://www.sice.or.jp/~cpd/>

- 4) 情報処理学会
https://www.ipsj.or.jp/annai/committee/education/jinzai_ikusei/ed_jinzai_ikusei.html
- 5) 電気学会
<http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/16-committee/tech/index171.html>
- 6) 電子情報通信学会
<http://www.ieice.org/jpn/cpd/index.html>
- 7) 土木学会
<http://www.jsce.or.jp/opcet/cpd.shtml>

著者紹介



尾崎 章 (おざき・あきら)
株東芝(学会 教育委員会委員)
(関心分野)エネルギー技術開発、
人材育成

目安箱への投書のご案内

日本原子力学会 編集委員会

編集委員会は、読者・会員・投稿者等からのご意見、ご提案をいただき、よりよい学会誌編集活動を目指すべく、意見窓口「目安箱」を設けております。

- ・学会誌の企画、編集、掲載記事や論文に関すること。
- ・新刊図書の書評の推薦

などについてのご意見・ご要望がございましたら、学会ホームページ

<http://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>、または E-Mail : aesj2005meyasu@aesj.or.jpにてお寄せください。編集委員会にて検討後、担当者より回答させていただきます。

学会誌編集活動への皆様の積極的なご参加をお願いいたします。

新刊紹介

原子力の本当の話 利用より調和の原子力文明

藤家洋一著, 277p. (2013.9), 産経新聞出版.
(定価 1,500 円+税) ISBN978-4-86306-103-3

本書は以下の7章で構成されている。

- 第1章「東京電力福島第一原子力発電所事故」
 - 第2章「日本はなぜ原子力を選択したか」
 - 第3章「自然に学び、自然を真似る」
 - 第4章「整合性のある原子力システム」
 - 第5章「核反応に根ざす総合科学技術を展開」
 - 第6章「原子力は文明をその根幹で支えられるか」
 - 第7章「福島第一原子力発電所事故の国内外での説明と対話」
- 以上の7章に「はじめに」と「終わりに」が加わる。

著者、藤家洋一は、元・原子力委員長で、NPO 法人「ニュークリアー・サロン」の代表理事である。著者の視座は極めて高く、それ故に、考慮している時間と空間の範囲が相当に広い。常に、議論対象の時間と空間が明示され、それが論旨を明快にしている。

著書の題名にある「本当の」は「嘘ではない」ではなく「本来の当然の」と解釈すべきであろう。「本当」を論ずるには体系化が必須である。論旨が体系化されているので、本書を教科書として利用することも可能であろう。但し、内容の詳細まで理解するためには、かなりの理・工学の基礎知識を必要とする。そのことの引き換えが「正確さ」である。

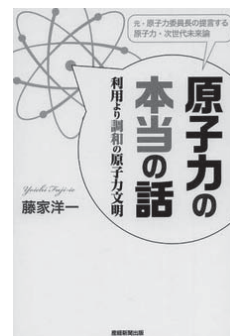
利用法はいろいろ考えられるが、やはり、本書は「学術書」であり、その中核は第4章である。第4章第2節で「整合性のある原子力システムの科学的成立性」を論じ、第7節で「原子力システムの整合性評価」を行なっている。第5章を経て、第6章へと論は展開される。

第6章まで読みすすめると、著者が、副題を、なぜ、単に「原子力」ではなく「原子力文明」としたかが、はっきりと浮かび上がってくる。

結果から原因を推定することに比較して、結果を予測することがいかに難しく、また、重要であるかは論をまたない。第7章は、福島第一原子力発電所事故発生直後から、本書の著者が、この事故をどのように見通していたかの記録であり、著者の識見と覚悟を読み取ることができる。

本書は、副題にあるように文明論である。勉強の種もちりばめられているが、基礎知識がそれほど多くなくても、それなりに内容は理解できるように記述されている。

現在の我が国は、国民一人一人が、原子力の「本当」は何かについて、真剣に考えなくてはならない状況にある。専門家、非専門家を問わず、多くの方々にぜひ読んでいただきたい良書である。 (東京工業大学名誉教授・瀧口克己)



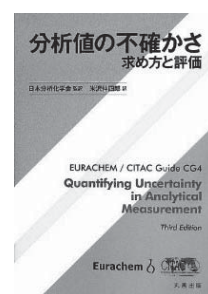
分析値の不確かさ 求め方と評価

Alex Williams, Steve Ellison 編, 日本分析化学会監訳, 米沢伸四郎訳, 220p (2013.9), 丸善出版.
(定価 2,800 円), ISBN 978-4-621-08707-7

本書は、ISO の「測定における不確かさの表現のガイド」に基づき、定量分析における不確かさの評価を解説したものである。簡易分析から精密分析まで、実験的な条件規定分析から論理的な分析まで、ほぼすべての評価への適用を網羅したものである。したがって、対象読者は、製造業の品質管理、法規制に関わる検査、標準と機器の校正、標準物質の開発と認証に伴う測定、化学分析を伴う研究をする人である。

本文は、規格に基づく厳密さが要求されるため、分析時のマニュアル表記になっており、学生や初心者とはとりつきにくいかもしれない。その代わりに、初心者向けに付録が充実している。本書の構成は本文が60ページで、後の160ページは

すべて付録である。付録には、不確かさの評価に関する事例、用語の説明、不確かさの要因解析、統計学的手法の具体例、検出限界または定量限界における不確かさの考え方、不確かさの共通要因表が掲載されており、分析に関わる技術者や研究者がすぐに利用できる有益な情報となっている。昨今は、製造業にとどまらず、あらゆる分析データや、大学におけるラボ試験データにいたるまで、これまで以上に、その品質や不確かさ評価が要求されるようになってきている。原子力分野では、限られた範囲で、高い精度の分析が要求されることがしばしばあるが、そのような要求は原子力に限ったことではないと思われる。化学分析に携わるすべての技術者、研究者に一読をお薦めしたい。



(東芝・鹿野文寿)