

巻頭言

1 異分野からの挑戦

坂東昌子

時論

2 原子力施設を町が支援する意味

大洗町は、原子力施設での研究開発の成果と人材が地域の産業にイノベーションを生み出す可能性に期待している。

小谷隆亮

Column

- 4 暗いドイツで考えたこと
東欧の国スロバキアから
リスク対策のコストと効率性
信頼のメタメッセージの伝え方

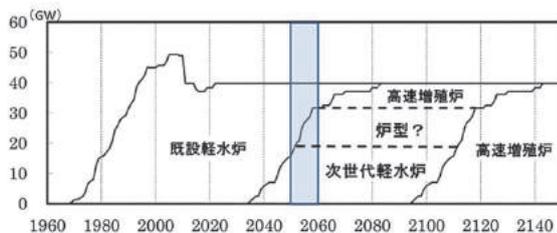
川口マーン恵美
妹尾優希
竹内純子
渡辺 凜

解説

26 原子力と核燃料サイクルの将来に向けて

世界経済全体の見通しと環境制約の強化から、今世紀後半には原子力の世界的な拡大は必至で、それによる天然ウラン需給の逼迫を回避するためには日本も高速炉とその核燃料サイクルに移行する必要がある。

田中治邦



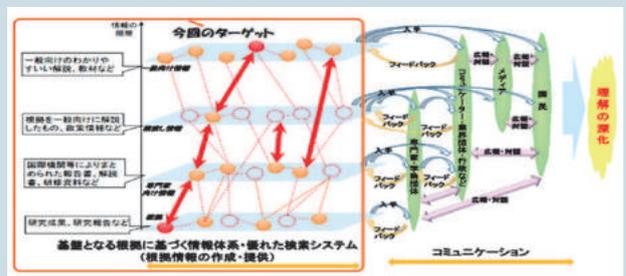
炉型シェアの見通し

特集 原子力利用に関する基本的考え方と平成 28 年版原子力白書

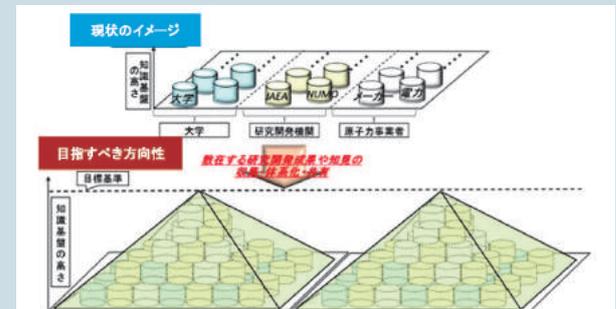
12 今後の原子力利用に向けて

原子力委員会は、今後の原子力政策の長期的な方向性を示唆する「原子力利用に関する基本的考え方」と、原子力利用に関する現状や取り組みの全体像をまとめた平成 28 年版原子力白書を公表した。

川淵英雄, 飯塚倫子, 望月 豊,
辻 政俊, 曾佐 豊



理解の深化—根拠に基づく情報体系の整備について



研究開発機関と原子力関係事業者の連携・協働のイメージ

解説シリーズ

31 地政学的リスクとエネルギー 第 5 回 ロシアのエネルギー資源開発情勢

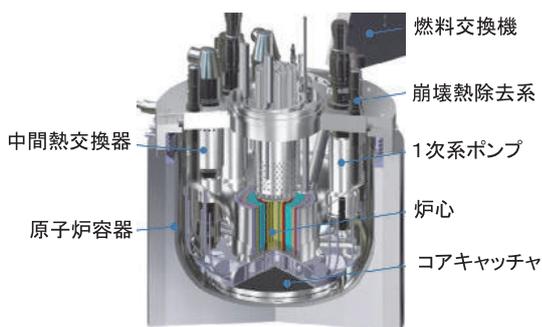
世界屈指のエネルギー資源大国であるロシア。ウクライナ問題による欧米の対ロシア制裁の中、ロシアはエネルギー生産増強・維持を図るため、東部や北極圏の開発を進めている。

小宮山涼一

36 全体概要

第4世代原子炉システム国際フォーラムで次世代の原子炉システムとして選定されたナトリウム冷却高速炉、鉛冷却高速炉、ガス冷却高速炉、熔融塩炉、超臨界圧水冷却炉、超高温ガス炉の開発動向を紹介する。

佐賀山 豊, 安藤将人

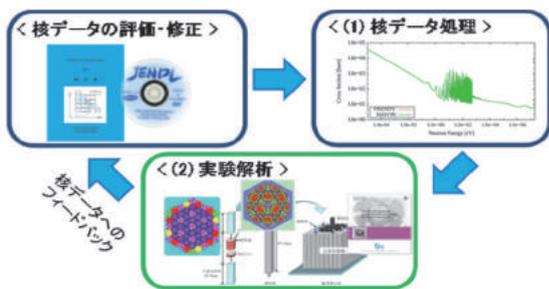


ASTRIDの原子炉概念図

42 核データ利用のために —マイクロからマクロへの橋渡し—

放射線輸送計算コードは評価済み核データを直接取り扱えない。このためコードが使える形式に変換する核データ処理と呼ばれるプロセスが必要となる。

多田健一, 横山賢治, 今野 力, 小迫和明



積分実験を用いた核データの妥当性評価の流れ

52 幌延探訪記—原子力専攻の学生が見た核のごみの行方は?—

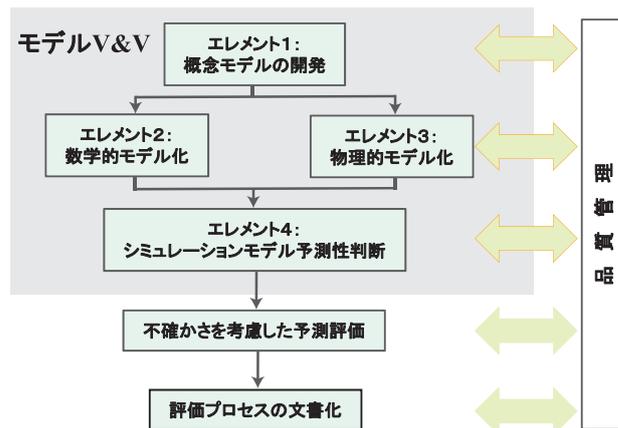
原子力を専攻する大学院生が、泊原子力発電所と幌延の地層処分研究所を訪問した。

三島理愛, 梅澤征悟, 吉永恭平, 塚 俊之, 濱村 肇, 澤田哲生

47 シミュレーションの信頼性確保に関する 取り組みの現状と課題

原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」が発行された。これはモデルV&Vに基づいて、不確かさを考慮した予測評価、品質管理を加えたモデリング&シミュレーションの方法論の考え方をまとめたものである。

計算科学技術部会/
シミュレーションの信頼性分科会



M&Sの流れ及び品質管理との関係

55 国際会議 Actinides2017

芳賀芳範, 山村朝雄

56 大学における原子力研究教育と研究施設

佐藤修彰

- 6 News
- 25 From Editors
- 57 会告 平成30年度新役員候補者募集のお知らせ
- 58 会報 原子力関係会議案内, 新入会一覧, 次年度会費請求のお知らせ, 寄贈本一覧, 「原子力学生国際交流事業」派遣学生募集, 英文論文誌 (Vol.55, No.3) 目次, 和文論文誌 (Vol.17, No.1) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(<https://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>)にお寄せください。

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

異分野からの挑戦

巻頭言



NPO 法人 知的人材ネットワーク あいんしゅたいん理事長

坂東 昌子 (ばんどう・まさこ)

京都大学理学部卒業，同大学院(湯川研)博士課程卒，同助手・講師を経て，愛知大学教養部教授，男女共同参画推進委員長を経て2007年より日本物理学会長。現在 NPO 理事長。

「福島第一原子力発電所事故を経験した日本が，どうしてこの課題を真正面に取り上げないのか」元 UNSCEAR の議長で MELODI(Multidisciplinary European Low Dose Initiative)の立役者のワイズさん(Dr. Wolfgang Weiss)に言われた。「除染」に莫大な国費が使われる一方，地道な基礎研究への国家プロジェクトの予算処置は殆どなされていない。一方 EU では，MELODI が2010年に組織された。「損失をもたらす知識の落差解消」という標語のもと，低線量・低線量率被ばくによる健康リスクを研究する一大プロジェクトが動き出し，科学者が専門分野を超えて挑んでいる。MELODI の国際会議が毎年開かれていることも知った。

私は以前から，この課題に対する市民の混乱の原因は，マスコミや声高に叫ぶ一部の科学者だけではなく，科学者コミュニティ全体の責任であると思っていた。物理学と生物学，疫学と実験，防護実務と基礎研究との間で見解の相違が生じ，その相違が社会に広がり，結果として，科学者はその社会的責任を果たすことができなかつた。分野を超え，偏見を排し，自由な批判精神に基づいた共同研究とアカデミックな議論を行う場を科学者自らが組織するべきではないか。専門化し短期的な競争資金獲得に奔走する一方，総合的・長期的研究を通じて社会的責任を果たせる研究環境がない現状の中で，低線量被ばくに関して科学的な合意がどこまで可能なのか。私はもともと素粒子論が専門で，故湯川秀樹博士の研究室出身である。湯川は基礎科学研究所創立に際して，「素粒子研究所」とか「原子核研究所」とはせず，広く基礎物理学をカバーする分野横断的研究所とした。この気風が，生物物理学や宇宙物理学への挑戦に駆り立てた。

私を3・11以後，線量放射線の生態影響の研究へと向かわせたのもこの湯川精神だったかもしれない。こうして仲間が知恵を絞って新しい分野に挑戦し，放射線量に変異細胞率の生成(インプット)と消滅(アウトプット)という2つの機構が働く『WAM(もぐらたたき)モデル』を提唱したのである。ごく常識的なモデルだが，線量率効果が数値的に求められる。一般に低線量率と高線量率照射で生じる細胞の変異に差があることはラッセル等のメガマウス実験で知られていたが，当時は高線量率照射では低線量率照射の場合の何倍になるかという1つの数字，「DDREF」としてしか問題にされなかつた。

これに対しては，論文の発表から学会の発表まで苦労が絶えなかつた。まずは「too mathematical」「生物はそんな単純なことでわかるはずがない」など反応は様々だった。何しろ，この分野では「新参者」である。「学会発表しても新参者は無視される学会が多い。物理学会では，上下の区別なく平等に質問し議論する。こういう事態の打破には，まず海外に打って出て逆輸入するしかない。これが，私の過去の経験だ。とにかく MELODI 関連の国際会議に WAM モデルを持ち込むこととした。そして最初はポスター発表から始め，3年目の昨年，パリの会議でオーラルトークに選ばれるまでになった。国際舞台で WAM モデルの認知度が高まったのである。これが日本に逆輸入されるためには，もうひと頑張りさらに研究を推し進めなければと思うこの頃である。

さらに，国際ワークショップ(BER2018(3/19~21，大阪大学中の島センター))と国際市民フォーラム(3月18日)が開催される。放射線防護と医療，そして市民との連携が広がることを期待している。

<https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~ber2018/presympo.html#presympo>

(2018年1月4日記)



原子力施設を町が支援する意味



小谷 隆亮 (こたに・たかあき)

茨城県大洗町長

1958年大洗町役場に奉職し、1988年助役。1996年町長に就任し、6期目。全国市町村職員共済組合連合会理事長、全国市町村水産業振興対策協議会会長など兼務。町職員時代に日本原子力研究所(当時)の誘致に携わり、原子力行政との関係も深い。

大洗町には、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)が保有する3基の研究用原子炉(JMTR、常陽、HTTR)があり、その研究を支えるとともに成果を活用するため、大学の研究施設や関連企業が周辺に立地している。これにより「大洗」の名は、世界をリードする原子力の知の拠点として、国内はもとより国際的にも知られるものとなっている。

町は、1963年に民有地約40万坪を買収して日本原子力研究所(JAEAの前身)の誘致を実現したことを嚆矢に、この地での原子力研究に対し、半世紀以上にわたり有形無形の支援を行ってきた。また、1984年に制定した町民憲章では、前文で「わたくしたちはこの海をひらき 原子の火を育て 水と緑を愛する 健康で明るい大洗の町民です」と謳い、町を挙げて原子力と共生する姿勢を明確にした。

大洗に拠点を果たした原子力関係者も町のこの姿勢に共鳴し、町との間には緊密な相談・協力体制が築かれた。また、施設の職員は町のコミュニティに積極的に溶け込んでいった。こうした双方の努力が奏功し、誘致当初こそ町民の間には離農対策や環境汚染を危惧する声があったものの、次第に「原子力とともに歩むまち」の町民意識が醸成されるに至った。現在では、原子力施設の関係者と町の住民とが、ともに海岸を清掃し、祭りを盛り上げ、スポーツ・レクリエーションで汗を流す光景を普通に見ることができる。

ここで改めて、町にとって原子力施設の立地を受け入れることのメリットを整理してみたい。

まず、固定資産税の財源や、雇用・消費に対する期待があるのは、自治体として当然であろう。また、国からの電源立地地域対策交付金等によって町民の安全・安心や福祉、教育等が充実することも事実である。しかし、決してそれだけではないことを強調しておきたい。原子力施設の立地自治体に対して「交付金目当てだろう」という批判を耳にすることもあるが、(全否定はしないものの)一面的な見方に過ぎるだろうというのが、当事者としての感覚である。

町が原子力施設を誘致し、支援する最大の理由を一言で表すならば、「施設は町にとって有用な資源であるから」と言えるだろう。世間一般には、原子力施設と言えばすぐに原子力発電所をイメージする向きがあるが、原子力は現在進行形で発展と進化を続けている学問でもあり、原発も含め、すべての施設が最新の研究開発とセットで運営されている。町は、この研究開発の成果と優れた人材が地域の産業にイノベーションを生み出す可能性に期待しているのである。これは、わが町のように研究開発に特化した原子力施設を有する自治体では、一様に語られていることである。

具体例を挙げる。町内に有する材料試験炉JMTRは、原子炉の燃料・材料の耐久性や健全性の試験を行う、いわば「原子炉を作るための原子炉」として、原発の安全技術の向上に多大な貢献をしてきたが、その効果は原発などのエネルギー政策に留まらない。JMTRを活用するために東北大学金属材料研究所に代表される研究施設や研究開発系企業が大洗に集積し、その研究成果は原子力基盤技術の向上に生かされている。また、がんの画像診断に用いられる核医学検査薬は現在全量を輸入に頼っているが、この国産化に向けた技術開発のためにもJMTRの機能は不可欠といわれている。かように、原子力の裾野は広いのである。

もうひとつ、原子力施設に集積する研究者や関連企業の方々が町のなかで様々な場面に関わることにより、町の教育・文化水準を押し上げてくれる効果も忘れてはならない。

日本原子力研究所の誘致をリードした初代大洗町長の加藤清は、原子力施設誘致のメリットをいくつか挙げるなかで「大洗は観光地であるから、大きな観光資源、特に科学観光の一つになるであろう」と当時の思いを書き記しているが¹⁾、それから40年近い時を経て2001年にJAEAが開館した「大洗わくわく科学館」は、次代を担う子どもたちに向けて、魅力ある展示や実験教室等を通じて科学技術の知識を啓発する拠点として、大洗港周辺の賑わいづくりにも貢献している。まさに先人の慧眼と言

えるだろう。

また、町内に事業所を有する小型線量計メーカーの千代田テクノは、2013年に新設した測定センターに300人収容の多目的ホールを併設し、国際ワークショップのみならず、国際音楽祭ヤング・プラハに参加する一流若手音楽家を招いたコンサートを毎年開催して下さっている。

こうしたことまで含めて、町は原子力施設を支援することに意味を見出しているのである。

さて、改めて言うまでもないことだが、原子力政策は国が責任をもってリードすべき「国策」である。国策である以上、国家百年の計を考え、大局的な見地に立った責任あるビジョンを示してほしいと思う。自治体は、公共事業や交付金といった短期的なメリットよりも、最終的にはこのビジョンに賛同すればこそ、国策に協力し、その効果に期待するのである。

近年の原子力政策の趨勢を見ると、反原発を唱える声が大きく聞こえるなかで、政府もマスコミも原子力のあるべき姿について説明することに及び腰になってはいないだろうか。原発の是非に関する議論に巻き込まれないために、研究開発や他分野への応用を含めた「原子力そのものの持つ可能性」さえも脇に押しやられてしまうとすれば、原子力研究を支援する町としても残念である。

福島第一原子力発電所の事故以来、国内の原子炉のほとんどが停止しており、再稼働に際しては原子力規制委員会の新規規制基準に基づく安全審査に合格することが必要になっている。しかし、原発の再稼働には徹底した安全確保が必須であることは当然だが、発電用原子炉よりもはるかに出力の小さい研究用原子炉にも同じ基準を当てはめて審査することが適当かどうかについては、もっと議論があってよいと思う。

前述のとおり「原子力＝原発」ではないし、安全性が最も重要なのは当然だが、それだけで原子力の方向性すべてを決めてもいけないと思う。そこに残るものは「原子力研究開発の必要性」であろう。

要するに、「国としての原子力研究開発について、『どんな研究機能を』『どこに』『どれだけ』持っていないか」という冷静な議論が、いま求められているのではないだろうか。

再びJMTRを具体例に引く。2016年、JAEAは停止中のJMTRについて、再稼働申請を断念し廃止する方針を示した。これには、ユーザーである東北大学金属材料研究所や千代田テクノが反対の意思を示しており、町も同じく反対の姿勢である。

当初にJAEAが示した廃止の理由は「新規規制基準に合

格するためには莫大な費用がかかり、経営に差し支えるため」というものであった。しかし本来、原子力を国策として考えるならば、「JMTRは今後も大洗に(あるいは日本に)必要か」という観点のほうが、費用面の問題よりも先に論じられるべきであろう。町ではこの点を国やJAEAに繰り返し要望し、現在では、JMTRがそれまで有していた照射炉の機能は国内において維持する方向で検討されているようである。

こうした「原子力のあるべき姿」については、その時々世論に流されず、臆せず、堂々と国民に訴えてほしいと思う。原子力に関する世論は賛成と反対に二分されているように見えるが、実際には声の大きい人たちは少数派で、大多数の国民は賛成でも反対でもなく様子見をしている(あるいは、二元論では解決しないことを分かっている)と指摘する人もいる。こうした大多数の国民に対して原子力の有用性を訴えるには、原子力の安全性向上のために関係者は弛まぬ努力を重ねていること、そのための研究開発は、原発をめぐるエネルギー政策の動向に関係なく必要であること(蛇足だが、そのために最も役立つのがJMTRであること)について、繰り返し丁寧に説明し、不安感を払拭することが大事である。

もちろん町は、今後もJMTRの代替機能は必ず大洗で担ってほしいと考えている。理由はすでに述べたとおり、優れた研究開発成果は地域に還元されるからである。

2017年6月、JAEA大洗研究開発センター内の燃料研究棟で作業中に汚染が発生し、作業員5名が内部被曝するという事故が起きた。町でも、JAEA及び文部科学省の幹部に対し、安全を最優先に、再発防止策の徹底を厳しく申し入れている。

しかし、これらの事態に際しても町民からは、町の情報提供のあり方などへの意見はいただいたものの、原子力施設の存在自体を危険視するような声は聞かれなかった。町全体が冷静に対応したこともあってか、いわゆる風評被害についても、夏の海水浴などの観光客が大洗を忌避するような動きはなかったと見ている。これも、長きにわたって町が原子力と手を携えてきた賜であり、町の無形の財産であると思う。

これからも町は、国が中心となって進める原子力研究開発を変わずに支援していきたい。それは、国の未来、そして大洗町の振興のために必要と信じるからである。

(2017年12月4日記)

－ 参考文献 －

- 1) 大洗町史(通史編) 1986.3.

暗いドイツで考えたこと

作家 川口マーン 恵美

去年の大晦日にグンドレミンゲン原発のB基が止まった。私の住む南ドイツのバーデン-ヴュルテンベルク州の原発だ(総出力134万kW)。残るC基も4年後に停止するというが、ちなみに、どちらもまだ30代の働き盛り。

環境保護団体の老舗、バイエルン自然保護同盟によれば、「原発は技術的に問題が多い」。とくにグンドレミンゲンは「福島第一と同タイプだし、危険なプルトニウムを多く含むMOXを使用」。バイエルン州の緑の党も、「原発はスイッチの入った時限爆弾」であり、C基も即刻止めるよう要求。B基が止まっただけでは「爆破威力が半分になったにすぎず」、しかも「同地の放射線は100万年の間検出され続けるので、喜ぶ気分ではない」とか。ひょっとして、原爆と勘違いしている？

いうまでもなくドイツの原発は、福島第一の事故後に急遽決まった「エネルギー転換」政策により2022年までに全て止まる予定だ。でも、心配はないらしい。「1,000本も風車を新設すれば、グンドレミンゲンの両原発など十分代替できる」とは、風力エネルギー連盟の幹部の言。

我が家は去年のクリスマスは旧東独のライブツィヒで過ごした。気象庁によると、12月1日から22日まで、同地の22日間の日照時間は合計6時間。私たちが向かった23日も薄暗い日だった。アウトバーンを走っていると、左右に広がる大地に次々と巨大な風車が現れる。ただし、この日はドイツの冬に多い典型的な風。いつの日か、ドイツの南北を結ぶ大送電線が完成しても、こういう日には流すモノがなさそうだ。

Column

東欧の国スロバキアから

コメニウス大学 妹尾 優希
医学部英語コース

みなさん、初めまして。私は、スロバキアの国立コメニウス大学で、医学を英語で学んでいます。本号から、原子力学会誌「ATOMOS」のコラムを通して、スロバキアの医療・科学技術やエネルギー問題について、日本人医学生の日線より発信させて頂きたいと思います。まず今回は、皆さんにあまり馴染みのない東欧の国、スロバキアについてお話したいと思います。

スロバキアの国土は北海道の5分の3程度、人口は550万人、人口密度は鳥取県とほぼ同じ110.66人/km²と比較的小規模な内陸国です。北西にはかつて同じ国だったチェコ、北にポーランド、東にウクライナ、南にハンガリー、南西にオーストリアと隣接しています。隣接する国の影響を大きく受けているため、小さな国ではありますが、地域によって文化や雰囲気微妙な違いがあります。

1993年の分離独立当時、農業国であったスロバキアの経済は、不況からのスタートを切りました。しかし、他の中欧・東欧の国々へのアクセスの良さから、事業展開をする最適な地として注目され、自動車産業や電気電子産業を中心に輸出業が拡大されました。現在のスロバキアの一人当たりのGDPは約16,498 USDで、日本の約38,882 USDの半分弱ではあるものの、過去10年間の経済成長率はEU圏内で最大です。

資源に乏しいスロバキアは、エネルギー自給率が低いです。1994年の時点の自給率は28%ほどでしたが、1998年から2000年にかけて新しく2つの原子力発電所の運転開始を機に上昇し、昨年2017年は50%程でした。そのため、スロバキアの原子力発電の総発電電力量を占める割合は77%と、震災前の日本の32%と比べても非常に高いです。近年のスロバキアのエネルギー戦略は、さらに新しい原発開発など、原子力が要となっています。

リスク対策のコストと効率性

国際環境経済研究所
理事・主席研究員 竹内 純子

昨年末、ある地方での講演会に向かおうとしたところ、飛行機が大幅に遅れるという。じりじりしながら SNS に愚痴を投稿したところ、多くの友人知人から、これを教訓に交通機関の遅延リスクに備えて前泊するなり 1 本早い便に乗るなり余裕を持つようにというアドバイスを頂いた。本当にそうだ。最近交通機関のトラブルも多いし、前泊して温泉にでも浸かりゆったりとした心持ちで講演会場に向かうことができればパフォーマンスも上がるだろう。

しかしリスクに備えるには、何かを負担しなければならない。前泊すれば宿泊費がかかるし、その時間であろうと思っていた仕事はできなくなる。愛犬との朝の散歩ができないのは精神的リラクスの観点から大きな損失だ。人は日々の活動の中で、リスクの大きさとそれに備えるために必要な負担を比較衡量し、選択を積み重ねている。「リスクに備えるべき」というのは簡単だが、そのための負担には他人はなかなか思い至らない。

いま原子力の現場では事故リスクへの備えが積み重ねられている。事故が許されない原子力においては当然ではあるが、そのためにコストを無尽蔵に費やしたのでは、少なくとも経済性の観点から原子力は国民に貢献しえない存在となってしまう。さらに言えば、安全対策は、足し算を重ねれば重ねただけ安全性は高まるのか。輻輳化・多層化しすぎた安全対策が「滑稽な安全の姿」に陥り、いざという時のレジリエンスを損なう可能性はないのか。

リスク対策の中に効率性という観点を取り込むことは、福島事故を経験した国民感情からは飲み込みづらいことかもしれないが、そろそろ足し算の呪縛から逃れ、安全目標についての真摯な議論をすべき時ではないだろうか。

Column

信頼のメタメッセージの伝え方

東京大学大学院
工学系研究科 原子力国際専攻 渡辺 凜

小さい頃から猫やカラスを相手に磨いてきたコミュニケーション法がある。こちらからアイコンタクトをとり、立ち止まって、ゆっくり目をつむる。相手の様子を見る。空を仰ぐようにあくびをする。また目をつむる。これを繰り返すうち、大抵の相手は警戒を解き、目をつむり返して、近寄らせてくれる。

人間同士でも、「あなたと信頼関係を構築したい」というメッセージは、発言の意味内容ではなく、こちらが相手を警戒していないからこそ取れる行動のメタメッセージとして伝わっていると思う。初対面で「これからは私たち友達だよ」と一方的に言い放たれて真意を疑うことはあっても、こちらより景色を見ながら、返事を辛抱強く待ちつつ話しかけてくる人がいたら、かけられた言葉の意味が分からなくても、応じる気持ちになるのではないかな。

今後、原子力関係者が人々と信頼関係を構築するための第一歩は、「あなたと信頼関係を築きたい」というメタメッセージを届けることである。そのためには、意見交換の場に参加する市民の「無知」や「無理難題」や「不信」を警戒してはならない。参加者に交じって座り、返事を待ち、どんな返事でも言われればなしではなく、それに応じた反応をする。国際機関も市民参加のベストプラクティスとして奨励するこれらの行動は、どれも「そちらは知らないけど、こちらは警戒していません」という信頼のメタメッセージを帯びている。

もちろん、信頼はその瞬間だけの話ではない。今後も一貫して、相手の返事を待ち、その返事に応じた言動を交わし続けるだろう、と双方思い合っている人たちの関係だ。そのような関係の実現を、まず原子力業界側から信じたい。



原子力機構の研究炉 2 基が審査に合格

原子力規制委員会は1月31日、日本原子力研究開発機構の研究炉と臨界実験装置が新規規制基準に適合しているとして、原子力機構が申請している二つの施設の原子炉設置変更を許可した。

規制委員会の審査に合格したのは定常臨界実験装置(STACY)と、原子炉安全性研究炉(NSRR)。STACYは福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出しの際の臨界

評価手法の整備に活用され、運転開始は2019年末の予定。NSRRは原子力発電所で事故がおきた際の燃料挙動研究に活用され、運転開始は今年5月の予定。

これにより規制委の審査に合格した研究炉は、近畿大の研究用原子炉と京大の臨界実験装置 KUCA、KUR をあわせた5基となった。(原子力学会誌編集委員会)

エネ庁長官が新潟県知事と面談

資源エネルギー庁の日下部総長官は1月10日、新潟県の米山隆一知事を訪れ、東京電力柏崎刈羽原子力発電所6、7号機の再稼働に理解を求めた。日下部長官は米山知事との面談で、政府の方針としてエネルギー基本計画に基づき両機の再稼働を進めることを明記した世耕弘成経済産業相名の文書を手渡した。これに対し知事は、県として「福島第一原発の事故原因」、「原発事故が健康と生活に及ぼす影響」、「万一原発事故が起こった場合の安全な避難方法」の3つの検証を進めていくことを伝えるとともに、検証に向けた情報提供や避難計画策定に関する協力などを要請した。

知事に手渡された文書では、福島第一原子力発電所事故による再稼働に対する国民の不安、一方で国際的な地球温暖化問題の認識、非化石電源である原子力発電の重要性の高まりがあげられた上で、「原子力政策が直面している最大の課題は社会的信頼の回復」、「先頭を立て

最前を尽くす」として、柏崎刈羽6、7号機再稼働に対する理解を求めている。これに向けて政府として、審査の結果やエネルギー・原子力政策、原子力災害対策の内容などを丁寧に説明していくとともに、避難計画を含む地域防災計画についても支援・改善強化に継続して取り組むとしている。

柏崎刈羽6、7号機の再稼働に向けては12月27日に、原子力規制委員会による約4年間の審査を経て、新規規制基準に適合しているとする結果がBWRとして初めて取りまとめられた。これを受け東京電力は、発電所のさらなる安全性、信頼性の向上に努めていくことを改めて述べ、「地元本位の経営を実践していくとともに、新潟県が進める3つの検証についても全力で対応していく」とコメントした。一方で、新潟県の米山知事は、「3つの検証がなされない限り、再稼働の議論は始められない」との姿勢を示している。(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】

ジョージア州の公益事業委、ボーグル増設計画の継続を承認

米ジョージア州の公益事業委員会(PSC)は昨年12月21日、国内で約30年ぶりの新設計画として州内で進められているA.W.ボーグル原子力発電所3、4号機(各PWR、110万kW)増設計画の継続を全会一致で承認した。

サザン社傘下のジョージア・パワー社(GPC)を含む

同計画のオーナー企業が昨年8月、建設工事を続行して両炉とも完成させるべきだと提案書を提出したのに対し、約3か月間の評価審査の結果、条件付きでこれを認める判断を下した。提案書の中でオーナー企業らは、想定される潜在リスクの1つとして、東芝がウエスチングハウス(WH)社の親会社保証金を支払うことが可能かという点を挙げていたが、東芝は分割支払いを予定していた保証金の残額32億2,500万ドルを昨年12月14日に一括で早期弁済。PSCの今回の裁定に、少なからず影響を及ぼしたと見られている。

建設サイトでは、エンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約を請け負っていた WH 社が倒産申請した後も、サザン社の子会社がプロジェクト管理を引き継ぎ、間断無く作業を続行。最近では、3、4号機両方で遮へい建屋にパネルを取り付けたほか、重さ 52 トンの大型モジュールや最初の蒸気発生器を 4号機に据え付けた。現在の日程では、3号機が 2021 年 11 月、4号機は 2022 年 11 月に運転開始する見通しである。

PSC がオーナー企業らに新たに課した主な条件は、完成の遅れにともなうコスト増のペナルティとして、3、4号機の建設期間中に顧客の電気料金から徴収する金額を 17 億ドル以上削減し、同企業らの利益率を下げるという内容。これにより、PSC としては引き続き、顧客の利益を守ることができると述べた。一方、GPC は、東芝から数年前倒して親会社保証金がすべて支払われた点を強調しており、同社の総コストが約 27 億 5,000 万ドル削減されるとの見通しを示している。

GPC はこのほか、同計画の成功に重要な役割を果たす発電税控除(PTC)の適用期限延長を求めて、今後も議会等への積極的な働きかけを続けていくとした。新規原子力発電所の支援策として 2005 年に政府が設定したこの控除は今のところ、2021 年 1 月 1 日までに原子炉を送電可能な状態にすることが条件となっている。同社はまた、9 月に米エネルギー省(DOE)の R. ペリー長官が同計画への追加の融資保証として、最大 37 億ドルを提案していた事実に言及。同計画に 45.7%出資する GPC 分として、16 億 7,000 万ドルの追加保証が最終承認されるよう DOE と交渉を続け、必要な規制上その他の承認もすべて得たいとしている。

【カナダ】

深地層処分場建設計画、候補地を 5 地点に絞り込み

カナダで使用済燃料処分の実施主体となっている核燃料廃棄物管理機関(NWMO)はこのほど、地下 500m の深地層に建設する最終処分場のサイト選定プロセスにおいて、候補地を 5 地点に絞り込んだと発表した。

同プロセスは現在、「潜在的な適合性の予備評価」段階にあり、受け入れに関心を表明した 22 地点のうち 9 地点が第 1 フェーズの机上調査を終え、初期ボーリング調査の実施を含む第 2 フェーズに進んだ。NWMO はこのうち 2 地点を昨年 6 月に除外したのに続き、今回オンタリオ州のブラインドリバーとエリオットレイクの 2 地点を除外したもの。使用済燃料を安全に処分する上で最も好ましい 1 地点を 2023 年までに決定するため、今後も試掘抗の掘削や採取した試料の分析等を行っていく。残

りの 5 地点はいずれもオンタリオ州内で、イグナス、ヒューロン=キンロス、サウスブルース、ホーンペイン、マントウェッジである。

ブラインドリバーら 2 地点で調査を打ち切る理由として NWMO は、技術調査や住民関与の面で問題の生じるファクターが複数特定されたと説明。具体的には、地層が複雑であることや、地形が岩だらけで立入が制限される点、プロジェクトの実施で必要となる住民との幅広いパートナーシップの構築可能性が低いことなどを挙げた。

それでも NWMO のサイト選定担当副理事長は、これら 2 地点の自治体がこれまで、カナダの全国民に代わって立地活動を積極的に牽引してくれたと評価。そうした協力に報いるため、地域の持続的開発と福祉向上のための支援金 60 万カナダドル(約 5,270 万円)を両地点の自治体と先住民に提供するとした。また、これらの近隣に位置するスパニッシュおよびノースショアの両自治体に対しても、予備評価の第 1 フェーズで除外された後も協力してくれたことに感謝の意を表明。30 万カナダドル(約 2,635 万円)を福祉向上準備金として提供する考えを明らかにしている。

NWMO が進めている「サイト選定プロセス」は、連邦政府や州政府、すでに原子力施設が立地する地方自治体、先住民、政党など、様々な関係者との緊密な協議を通じて 2008 年に共同設計された。「処分場の建設・操業」に至るまで 9 つの段階で構成されており、NWMO は 2009 年に同プロセスの第 1 段階を開始した。現在の「適合性の予備評価」は第 3 段階にあたり、NWMO は昨年 11 月、その時点で残っていた候補地点のうち、オンタリオ州イグナスで初めて初期ボーリング調査を開始した。

コストについては、処分する使用済燃料の量により変動すると NWMO は説明しており、既存の商業炉すべてが運転終了した時点の使用済燃料集合体は最大で 540 万体制になると計算。これらを処分する経費は、2015 年時点の価値で 236 億カナダドル(約 2 兆 730 億円)になると述べた。処分場の建設スケジュールについては、2023 年までに建設サイトを特定した後、詳細な特性調査や許認可活動で約 8 年が必要と NWMO は予測。約 10 年の建設期間を経て、2040 年~2045 年あたりで処分場の操業を開始できると見込んでいる。

【英国】

原子力規制当局が日立 GE 社の ABWR 設計を認証

英国の原子力規制庁(ONR)は昨年 12 月 14 日、日立製作所がウェールズ地方アングルシー島で建設予定の「英国向け ABWR 設計(UK - ABWR)」が同国の規制要

件をすべて満たしていることを認め、英国国内での建設に適していると結論付けた。

同国の事前設計認証である包括的設計審査(GDA)で約4年半の綿密な審査活動を終え、ONRが同設計の安全・セキュリティ面について設計容認確認書(DAC)を、環境庁(EA)とウェールズ天然資源省(NRW)が環境影響面について設計容認声明書(SoDA)を日立GEニュークリア・エナジー社に発給したもの。これにより、同島でUK-ABWRを2基建設するウィルヴァ・ニューウィッド(ウェールズ語で「新しいウィルファ」)計画は、実現に向けて大きく前進した。

日立製作所は今後、英国国内で所有するホライズン・ニュークリア・パワー社を通じて、原子力サイト許可(NSL)を含むすべての許認可の取得を目指す。NSLの申請書は昨年4月にONRに受理されており、19か月にわたる厳格な審査が進行中。初号機の運転開始は、2020年代前半が目標として掲げられている。

GDAは、英国国内で初めて採用・建設される原子炉設計に対して義務付けられており、審査範囲は土木建築から原子炉化学まで20の技術分野にわたる。これまでに、EDFエナジー社がサマセット州のヒンクリーポイントC計画で採用した仏アレバ社製欧州加圧水型炉(EPR)、および東芝がNuGen社を通じてカンブリア州西部のムーアサイド計画に採用予定だったウェスチングハウス社製AP1000がGDAをクリア。日立GE社製UK-ABWRのGDA審査は2013年4月に開始され、英国初のBWRとなる同設計が英国の厳しい基準を満たしているか、安全・セキュリティと環境保護および放射性廃棄物管理の側面から審査が行われていた。

ホライズン社は135万kWのUK-ABWRをアングルシー島で2基建設するのに加え、イングランド地方グロスターシャー州南部のオールドベリーでも、同出力のUK-ABWRを2基建設する計画。同社のD.ホーソンCEOは、両サイトでこれらが完成すれば、今後数十年にわたってクリーンで安定した電力を英国に供給することになると述べた。また、低炭素エネルギーを安定的に大量に生み出せる原子力は、英国のエネルギー・ミックスにおける重要電源である点を強調。ABWRでは確証済みの技術が使われていることや、同社と日立GE社およびGE日立ニュークリア・エナジー社によるチーム連携がスケジュール通りのGDA完了につながったと述べた。

日立製作所の東原敏昭・社長兼CEOは、ホライズン社のプロジェクトで同社が非常に重要な一歩を踏み出したことを歓迎。日立GE社の久米正・社長も、「運転実績を有する第3世代+の原子炉であるABWRが、英国の非常に高い基準を満たしたことは大きな成果だ」とコメ

ント。同プロジェクトのNSL取得に向けてホライズン社を支援していく方針を改めて表明している。

【フランス】

仏電力、アレバ社原子炉部門の株式75.5%を購入

財政難に陥った仏アレバ社(現:ORANO)を救済するため、同社の原子炉部門買収取引を進めていたフランス電力(EDF)は昨年12月22日、現行のアレバNP社の子会社として設立される「NewNP社」の株式75.5%を購入する最終契約書に正式に調印したと発表した。

約2年間におよんだ作業手続の末、同月13日と14日にそれぞれの理事会による承認を受けて、原子炉機器や燃料集合体の設計・製造、および関連サービスを専門とするNewNP社の排他的支配権を、株式とともにEDFが2018年1月1日以降、保有することになったもの。残りの株式のうち、19.5%を三菱重工業が、5%は国際的な原子力エンジニアリング・研究開発サービス企業のアシステム社が購入予定で、これらの購入手続は、アレバ社とEDF間で売買手続が行われるのと同時に取られるとしている。

三菱重工業は、トルコへの輸出が決まっている第3世代+(プラス)のPWR設計「ATMEA1」を、アレバ社との折半出資による合併事業体「ATMEA社」で協同開発。この関係で、NewNP社にも出資を行い、同社およびEDFとの連携を強化していく考えを昨年7月に表明していた。同社はまた、原子炉部門の切り離し後にアレバ社が燃料サイクル関連部門を統合して設立した「NewCo」に対しても、日本原燃とともに5%ずつ出資している。

EDFによると、NewNP社の株式100%分の取引価格である24億7,000万ユーロ(約3,318億円)は、2017年度で予想される金利・税金・償却前利益(EBITDA)の約8倍に相当。昨年12月31日に予定されている取引手続完了日の最終的な財務諸表に応じて、多少上下することが予想されるとした。また、手続完了日の後に計算される特定の業務目標の達成状況により、最大で2億4,500万ユーロ(約329億円)分の価格補完が考えられると述べた。

なお、この契約にはアレバ社の債務の移転は含まれておらず、完成の遅れにより建設費が増大したフィンランドのオルキルオト3号機(アレバ社製欧州加圧水型炉「EPR」)建設プロジェクト、および同プロジェクトの補完に必要な財源などは除外された。また、アレバ社傘下のクルーソー社が製造した、問題のある機器関連の契約も、親会社であるアレバ社の管轄に留め置かれる予定である。

今回の最終契約についてEDFは、原子炉容器の鋼材

組成で異常が認められたフラマンビル3号機(EPR)について、仏原子力安全規制当局(ASN)が「運転に適している」との肯定的見解を示したことを受けて調印に至ったと説明。また、クルーゾー社の機器製造記録問題についても、包括的審査で満足のいく結論が出たことによるとした。EDFグループのJ. B. レビィ会長は、NewNP社をEDFグループに統合することで、既存炉の運転期間延長を目的とした改修計画「グラン・カレナージュ」などの大規模プロジェクトで、作業効率を上げる一助にしたいと指摘。さらに、低炭素経済への移行で原子力が重要な役割を果たすと認識している国では、新規建設計画の受注競争力を強化していきたいとの抱負を述べた。

【フィンランド】

オルキルオト3号機で温態機能試験開始

フィンランドのティオリスーデン・ボイマ社(TVO)は昨年12月18日、同国5基目の商業炉として建設中のオルキルオト原子力発電所3号機(OL3)(PWR, 172万kW)で温態機能試験を開始すると発表した。

2005年の着工当時、同炉の完成は2009年春に予定されていたが、世界で初の仏アレバ社製第3世代設計「欧州加圧水型炉(EPR)」ということもあり、土木工事や規制手続などが遅延。TVOは昨年10月、最新スケジュールとして2018年末に予定していたOL3の本格運転開始が、5か月先の2019年5月に繰り延べられたと発表していた。建設現場では6月に冷態機能試験を開始したのに続き、試運転の一部でもある温態機能試験の段階に移行。TVOは数か月間かけて一連の試験を成功裏に終え、2016年4月に申請した運転認可の取得につなげたいとしている。

温態機能試験は、原子炉系統やタービン系統などのシステム全体が設計通り機能することを、プラント・レベルで確認する最初の試験。燃料を装荷せずにOL3の1次系冷却水の圧力と温度を、実際の運転時と同レベルまで徐々に上げていき、様々な圧力レベルの下で試験を実施。冷却水の温度は、原子炉冷却ポンプで発生する熱エネルギーを利用して上昇させるとしている。

なお、フィンランド放射線・原子力安全庁(STUK)は昨年12月19日、製造過程上の不確実要素による原子炉の安全性を脅かす可能性のある部品は、OL3には使用されていないとの見解を公表した。

STUKによると、建設工事を請け負っているアレバ社は2016年6月、傘下のクルーゾー社らが仏国の内外に納めた原子力発電所用部品の中に、完全に確認されていない材料物質を使ったものがあることを察知した。このためSTUKは、フィンランド国内の原子力発電事業者

に対して、それぞれの原子力発電所で部品の製造過程を調査するよう要請。OL3においても、クルーゾー社製部品の中にそうした疑いがあったという。

TVOは昨年11月、OL3で実施した調査の最終報告書をSTUKに提出しており、STUKは同報告書に基づき、安全性に影響する部品のすべてについて、製造と据付に関する試験と点検が行われたことを確認。その上で、「OL3に使われた部品の材料物質は十分な品質を有している」と結論づけた。

TVOはこのほか、稼働中のオルキルオト1、2号機についても、すでに最終調査報告書を2016年秋にSTUKに提出しており、フォータム社も、ロピーサ1、2号機に関する最終報告書を昨年春に提出済み。STUKはこれらの報告書から、稼働中原子炉においても疑わしい機器すべてで再点検が行われ、問題のないことが判明したとしている。

【ロシア】

初の海上浮揚式原子力発電所の運転を承認

ロシア建設省傘下の設計評価機関である国家専門家審査会(Glavgosexpertiza)は1月9日、同国初の海上浮揚式原子力発電所(FNPP)として建設されている「アカデミック・ロモノソフ」の運転を承認した。

同発電所建設プロジェクトの設計文書や工事測量結果を同審査会の専門家が審査した結果、技術的な規制要件やその他の要件を満たしていると結論付けたもの。これにより、出力3.5万kWの「KLT-40S」原子炉を2基搭載したアカデミック・ロモノソフは、2019年にも極東地域北東端に位置するチュクチ自治管区のペベクで運転開始が可能になった。

同地区では、1970年代から電力需要の約80%を賄ってきたピリピノ原子力発電所の4基(各1.2万kWのRBMK)が2019年から順次、閉鎖予定であるため、アカデミック・ロモノソフはこれらに代わり、40年にわたって同地区に電力や熱エネルギーを供給していくとしている。

国家専門家審査会は、建設プロジェクトの設計評価分野について建設省の権限行使を許された非営利の専門家団体で、FNPP建設プロジェクトの見積コストについても適正であると判定した。同審査会によると、ロシアの統一エネルギー・システムは国土のすべてをカバーしているわけではなく、ロシア領の約半分を占める北部の遠隔地域や、それに類する地域に電力や熱エネルギーの供給を行うには、原子力利用が最も適した方法だと評価。また、FNPPは一日当たり最大24万立法メートルの海水脱塩に利用できるとの見方を示している。

FNPPの建造プロジェクトには民生用原子力発電会社のロスエネルギー・アトム社が出資しており、原子力潜水艦など軍需建造物を専門としていたセブマッシュ造船所が、2007年にセペロドピンスク市で建造を開始した。しかし、軍需関係の契約が急増したため、作業は翌年に砕氷船の建造経験を持つサンクトペテルブルクのバルチック造船所(BZ)に移管され、2010年6月に船殻部分が完成。進水式も行われたものの、BZが破産したため新たな契約がBZの新オーナーとの間で締結された。

2基のKLT-40Sは2013年10月に船体に据え付けられ、ロスエネルギー・アトム社の親会社であるロスアトム社は2015年、チュクチ自治区政府と結んだ協力協定の中で、最初のFNPPであるアカデミック・ロモノソフを同地区のペベクに係留すると明記した。2016年7月からアカデミック・ロモノソフに係留試験が始まったほか、同年10月からは、ペベクに係留用の陸上設備を含む港湾インフラの建設工事が開始されている。

ロスアトム社の昨年12月18日付け発表によると、アカデミック・ロモノソフでは係留試験に続いてタービン・ローター調整機器のセッティング作業が行われている。機器・システムに関するこれらの試験や曳航準備が今年の春に完了し次第、同発電所をノルウェーとの国境に近い北極圏のムルマンスクに移し、秋から燃料の初装荷と起動作業を実施。発電所として全体的に完成させた後、北極海経由でペベクまで曳航するとしている。

【中国】

商業用再処理工場の年内建設に向け ニュー・アレバ社と覚書

中国核工業集団公司(CNNC)とフランスのニュー・アレバ(現:ORANO)社は1月9日、中国で今年中に商業規模の再処理工場建設プロジェクトを開始できるよう、商業契約の交渉完了に向けて双方の意向を再確認する覚書に調印した。

CNNCは2007年、甘粛省で商業用再処理工場を建設するためのフィージビリティ・スタディ実施をアレバ社に依頼しており、2010年になると両者は、この件を商業契約に進めるための協力支援で合意した。2013年には、処理能力800トン/年の商業用再処理・リサイクル施設を建設するプロジェクトについて、協力意向書を調印。その翌年に長期の協力覚書を結んだ後、2030年の操業開始を目標に、双方のタスクや責任の配分を特定する技術協議を2015年に完了したが、これまでのところ商業契約の締結に至っていない。

今回、フランスのE.マクロン大統領が就任後初めて訪中し、習近平国家主席と会談したのを機に、契約交渉

を早期に終わる方針を両者が改めて確認したもの。覚書への調印は、両首脳立ち会いの下で行われており、ニュー・アレバ社はこの交渉が過去数か月間で大きく進展したことを強調した。

現地の報道によると、依然として交渉上の障害となっているのは技術移転の価格であるという。また、B.ルメール経済・財務相が北京の記者団に対し、「今春に契約締結に至れば、契約額は100億ユーロ(約1兆3,348億円)にのぼる」と述べたことが伝えられている。

中国の商業用再処理・リサイクル施設は、ニュー・アレバ社のラアグ再処理工場とメロックスMOX燃料加工工場をモデルに建設される予定。これらの工場では確認済みの技術が活用されているほか、厳しい安全・セキュリティ基準が遵守されていること、および産業界におけるこれまでの実績が認められたことによるとニュー・アレバ社は説明した。同社のP.クノルCEOも、同社とCNNCはともに契約締結に向けた努力を一段と強化したと指摘。「近いうちに交渉がまとまり、CNNCをパートナーとするこの重要プロジェクトが年内に始まることを期待する」とコメントした。

【韓国】

第8次電力需給基本計画：原子力の段階的削減へ

韓国の産業通商資源省(MOTIE)は昨年12月14日、2031年までの15年間の電力需給見通しと電力設備計画を盛り込んだ「第8次電力需給基本計画案」を国会に報告した。

原子力と石炭火力を段階的に削減していく一方、再生可能エネルギーを大幅に拡大するなど、エネルギーの転換を推し進める内容。現在建設中の原子炉はそのまま完成させるものの、新規の建設計画を白紙化すること等により、総発電量に占める原子力シェアを現在の30.3%から、2030年までに23.9%まで削減することを目指す。同計画案は今後、電力政策審議会での検討を経て、最終確定する予定である。

この方針は、文在寅大統領が座長を務める閣議で昨年10月に決定していたもので、その際に公表されたエネルギー転換(脱原子力)のロードマップに沿って、新たな計画案が策定された。現行の第7次計画が需給の安定性と経済性を中心に策定されたのに対し、第8次計画案では環境影響と安全性を重視しているのが特徴だとMOTIEは強調。発電所の建設推進よりも、需要管理を通じて合理的な需要目標を設定することに主眼を置いたと述べた。

新規の発電設備は、大規模な原子力と石炭火力の開発一辺倒から脱却して、環境に優しい分散型の再生可能エネルギーおよびLNGを優先。現在、総発電設備容量の

うち、原子力と石炭の合計が全体の2分の1を占めているが、2030年には全体の3分の1レベルに減少する。その一方で、9.7%だった再生エネの比重を拡大し、約3.5倍の33.7%とする計算。これにより、発電シェアについても、原子力と石炭の合計が15.6ポイント減少するのに対し、再生エネとLNGの合計が15.7ポイント増加することになるとしている。

原子力発電については、昨年6月に同国の商業炉としては初めて古里1号機が永久閉鎖され、現在24基、約2,250万kWが稼働中だが、このうち経年化が進んだ10基、850万kWの運転期間延長は禁止するとした。すでに10年間の運転期間延長が認められて稼働中の月城1号機については、脱原子力ロードマップおよび原子力発電設備現状調査の結果として、2018年から発電設備から除外することを明記。同年の上半期中に経済性など運転の妥当性を総合的に評価した上で、閉鎖時期等を決定する。その後、永久停止のための運転変更許可申請などの法的手続に着手するとした。

また、2007年～2010年にかけて着工していた新古里4号機と新ハンウル(新蔚珍)1,2号機は、そのまま完成させる。また、昨年4月に原子炉建屋で最初のコンクリート打設が行われた新古里5号機と、来年4月のコンクリート打設に向け準備作業中の同6号機については、国民の意見を集約した公論化委員会の勧告により建設を継続。それぞれ2021年と2022年に竣工予定である。

しかし、後続の新ハンウル3,4号機と天地1,2号機、およびサイトと呼称が未定の2基は、建設計画を全面的に白紙化。2022年の原子力発電設備は27基、約2,750万kWと、一旦拡大するが、2030年には18基、2,040万kWに縮減される見通しとなる。

政府、原子力R & D戦略で廃止措置関連の技術開発と輸出支援強化へ

韓国の未来創造科学部(省)を改編して7月に設置された科学技術情報通信部(MSIT)は昨年12月19日、文在寅政権による原子力研究開発の方向を示した「将来的原子力技術の発展戦略」を公表した。

5つの主要戦略、すなわち(1)原子力安全技術の改善、(2)廃止措置技術の研究開発強化、(3)医療分野と、(4)環境分野における放射線技術の利用拡大、(5)原子力技術の輸出支援強化——を重点的に推進するという内容で、「原子力研究開発によりエネルギーの転換政策を下支えしていく」と説明。将来的な研究開発パラダイムを、国民の生命や安全の確保を中心としたものにシフトし、原子力分野で総合的な技術力を確保するとしており、このために2018年に総額2,036億ウォン(約213億円)を投

資する方向で予算要求するほか、「原子力研究開発5か年計画」を修正する方針を明らかにしている。

MSITによると、同戦略は昨年8月以降、産官学の研究者を対象とした説明会や原子力学科長の協議会などにおける意見集約、原子力利用開発専門委員会での検討等を経て策定された。(1)の原子力安全技術の改善については、稼働中の原子力発電所で安全性確保のための技術を高度に改善するとともに、使用済燃料の安全管理で技術開発を推進するとした。

また、廃止措置の中心的技術の開発、廃止措置インフラの拡充を通じて、(2)に掲げた廃止措置技術を高度化し、海外市場への進出を図る。具体的には産業通商資源省(MOTIE)との連携により、重要な基盤技術38件(MSIT担当)と商業化技術58件(MOTIE担当)の開発を2021年までに完了する計画。安全性改善と廃止措置技術の研究開発合計で2018年度に687億ウォン(約72億円)を投資することになる。

(5)の原子力技術の輸出支援に関しては、中小型炉の輸出実績を元に、ハードウェアとサービスを組み合わせた海外進出を支援するとMSITは強調。原子力発電所用の国産燃料や解析用ソフトといった要素技術の輸出を支援していくとした。この関連でMSITは、12月9日から次官がサウジアラビアやヨルダン、アラブ首長国連邦(UAE)などの中東諸国を歴訪し、輸出に成功した熱出力0.5万kWの「ヨルダン研究訓練炉(JRTR)」の利用拡大など、ヨルダンと原子力協力の強化について協議したことを明らかにした。

また、サウジアラビアとは中東諸国向けモジュール式小型炉「SMART」を建設する可能性の模索で、2015年に協力覚書を締結していたことから、建設前の設計やその後の事業展開について議論を行った。同国におけるSMART建設の実現に向けて政府が支援し、その建設・運転等に韓国企業が参加できるように、同国との協力を強化していくとしている。

このような戦略で示された研究開発の推進方向を具体化するため、MSITは短期的な課題を2018年度の原子力研究開発事業施行計画に反映させる方針。2021年までの「5か年計画」も2018年上半年期までに修正するとともに、研究開発事業の構造改革も進めるとした。韓国原子力研究所(KAERI)は原子炉の利用研究と基礎研究強化の方向で組織改編し、未来志向型の研究機関を目指す。

また、「原子力安全研究専門人材育成事業」を新規に起ち上げ、大学における安全技術教育を強化。原子力人材育成の方向性を、安全技術中心に切り替えていく。さらに、原子力技術の産業化や他分野への利用拡大、輸出促進を目的に、国内外の有望なパートナーとの協力関係も強化する予定だとしている。

今後の原子力利用に向けて

原子力委員会事務局 川淵 英雄, 飯塚 倫子, 望月 豊, 辻 政俊, 曾佐 豊

新しい原子力委員会は、自らの役割に鑑み、かつて策定してきた「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」や「原子力政策大綱」のような網羅的かつ詳細な計画を策定しないものの、今後の原子力政策について政府としての長期的な方向性を示唆する羅針盤となる「原子力利用に関する基本的考え方」を 2017 年 7 月 20 日に策定し、翌 21 日には閣議決定された。

また、原子力白書は、原子力委員会が発足した 1956 年から継続的に発刊してきたが、2010 年 3 月の発刊以降、東電福島事故対応及び原子力委員会の見直しの議論と新委員会の立ち上げといった最重要業務に専念する中、休刊をしていた。今般、我が国の原子力利用に関する現状及び取組の全体像について、国民の方々に説明責任を果たしていくため、原子力白書を 7 年ぶりに発刊した。

KEYWORDS: *Basic Policy for Nuclear Energy, White Paper on Nuclear Energy, Japan Atomic Energy Committee*

I. 原子力委員会について

我が国の原子力の研究、開発及び利用(以下「原子力利用」という。)は、1955 年 12 月 19 日に制定された原子力基本法(昭和 30 年法律 186 号)に基づき厳に平和の目的に限り、安全の確保を前提に、民主、自主、公開の原則の下で開始された。同法に基づき、原子力委員会は、国の施策を計画的に遂行し、原子力行政の民主的運営を図るため、1956 年 1 月 1 日に設置された。原子力委員会は、様々な政策課題に関する方針の決定や、関係行政機関の事務の調整等の機能を果たしてきた。

II. 原子力委員会の役割の改革

東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故(以下「東電福島第一原発事故」という。)を受けて、原子力を巡る行政庁の体制の再編が行われるとともに、事故により原子力を取り巻く環境が大きく変化したことを踏まえ、「原子力委員会の在り方見直しのための有識者会議」が 2013 年 7 月に設置され、原子力委員会の役割についても抜本的な見直しが行われ、2014 年 6 月に原子力委員会設置法が改正された。

その結果、原子力委員会は、関係組織からの中立性を確保しながら、平和利用の確保などの原子力利用に関する重要事項にその機能の主軸を移すことになった。その

“Basic Policy for Nuclear Energy” and “White Paper on Nuclear Energy 2016”: Hideo Kawabuchi, Michiko Iitsuka, Yutaka Mochiuduki, Masatoshi Tsuji, Yutaka Sosa.

(2017 年 11 月 20 日 受理)

上で、原子力委員会は、原子力に関する諸課題の管理、運営の視点に重点を置くとともに、原子力利用の理念となる分野横断的な基本的な考え方を打ち出しながら、我が国の原子力利用の方向性を示す「羅針盤」としての役割を果たしていくこととなった。

このような求められる役割を踏まえ、2014 年 12 月に新しい原子力委員会が発足し、岡芳明委員長、阿部信泰委員、中西友子委員の 3 名で活動を開始した。新しい原子力委員会では、東電福島第一原発事故の発生を防ぐことができなかったことを真摯に反省し、その教訓を活かしていくとともに、より高い見地から、国民の便益や負担の視点を重視しながら、原子力利用全体を見渡し、専門の見地や国際的教訓等に基づき、課題を指摘し、解決策を提案し、その取組状況を確認していくといった活動を行った。こうした活動などを通じて、原子力委員会は、原子力利用における「羅針盤」としての機能を果たせるよう、今後も努めていく。

III. 我が国の原子力利用の方向性

このような原子力委員会の役割に鑑み、かつて策定してきた「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」や「原子力政策大綱」のような網羅的かつ詳細な計画を策定しないものの、今後の原子力政策について政府としての長期的な方向性を示唆する羅針盤となる「原子力利用に関する基本的考え方」(以下「基本的考え方」という。)を策定することとした。

新しい原子力委員会が発足して以降、東電福島第一原発事故及びその影響や、原子力を取り巻く環境変化、国

内外の動向などについて、有識者から広範に意見を聴取するとともに、意見交換を行い、これらの活動等を通じて国民の原子力に対する不信・不安の払しょくに努め、信頼を得られるよう検討を進め、その中で様々な価値観や立場からの幅広い意見があったことを真摯に受け止めながら、今般、2017年7月20日に「基本的考え方」を策定した。さらに、翌21日の閣議において、政府として「基本的考え方」を尊重する旨が閣議決定された。

「基本的考え方」では、原子力政策全体を見渡し、我が国の原子力の平和利用、国民理解の深化、人材育成、研究開発等の目指す方向性や在り方を分野横断的な観点から示している。この中では、特に、東電福島第一原発事故の教訓と反省の上に立ち、安全性の確保を大前提に国民の理解と信頼を得ながら進めていくことの重要性を改めて強調した。今後、「基本的考え方」で指摘した原子力政策の本質的な課題や、幅広い国民の方々の声ともしっかりと向き合っていくことで、国民の理解と信頼を得られるよう努めていく。

IV. 「原子力白書」の再開

このような考えから、「基本的考え方」では、原子力利用に求められる高い透明性の確保や説明責任について、真摯に対応することとともに、国民の方々の声に謙虚に耳を傾けるとともに、原子力利用に関する透明性を確保し、国民一人一人ができる限り理解を深め、それぞれの意見を形成していくことのできる環境を整えていくことの必要性を指摘した。加えて、そのために、原子力関連機関は、科学の不確実性やリスクにも十分留意しながら、双方向の対話等をより一層進めるとともに、科学的に正確な情報や客観的な事実(根拠)に基づく情報を提供する取組を推進することの必要性も指摘した。

この点について、原子力委員会としても、真摯に対応していきたいと考えている。原子力委員会が設置されて

以来、継続的に発刊してきた「原子力白書」が、原子力利用に関して国民の方々に説明責任を果たしていく役割の一端をこれまで担ってきたと考えているが、東電福島第一原発事故の対応及びその後の原子力委員会の見直しの議論と新委員会の立ち上げを行う中で、これまで約7年間休刊してきた。しかしながら、我が国の原子力利用に関する現状及び取組の全体像について、国民の方々に説明責任を果たしていく重要性を再認識し、この度、「原子力白書」を再開することとした。

今般の「原子力白書」では、まず、今後の原子力利用全体の長期的方向性を示す「基本的考え方」を掲載し、原子力を取り巻く環境や国際的な知見等に関するデータを示しながら、我が国の原子力の平和利用、国民理解の深化、人材育成、研究開発等の目指す方向性やあり方を分野横断的に紹介している。

加えて、原子力白書の発行は7年ぶりであることから、第1章では、東電福島第一原発事故の教訓や反省に基づき実施された取組を俯瞰的に見られるよう、現状の取組だけではなく、その経緯や進捗を概説した。さらに、国会事故調や政府事故調等による提言等を踏まえて、新たに実施された原子力安全に関する体制や制度の見直し、その後の取組状況等を概説し、加えて、原子力事業者による安全性向上への不断の努力について紹介した。事故後、実施してきた福島復興・再生、東電福島第一原発の廃炉・汚染水対策の進捗についても概説した。

第2章以降では、平和利用の担保、原子力安全対策、国民理解の深化、放射性廃棄物の処理・処分、人材育成、研究開発、放射線利用、核セキュリティ、国際連携といった原子力利用全体の現状や継続的な取組等の進捗について俯瞰的に説明した。

なお、本書では、原則として、2016年12月までの取組等を記載している。ただし、一部の重要な事項は、2017年8月までの取組等を記載した。

来年以降についても、継続的に「原子力白書」を発行

原子力白書の構成

「原子力利用に関する基本的考え方」について

- ◆ 今般、原子力委員会が策定し、政府として尊重する旨を閣議決定した「原子力利用に関する基本的考え方」について、原子力を取り巻く環境や国際的な知見等に関するデータを示しつつ解説。

東電福島原発事故の経験及び教訓とこれらに基づき実施された諸施策

- ◆ 国会事故調や政府事故調等による提言等を踏まえて実施された原子力安全に関する体制や制度の見直し、その後の取組状況等を概説。加えて、原子力事業者を含む産業界における安全性向上への不断の努力を紹介。
- ◆ 事故後、実施してきた福島復興・再生、東電福島原発の廃炉・汚染水対策の進捗について概説。

定点観測的に我が国の原子力研究、開発及び利用に関する現状及び実施された諸施策等

- ◆ 平和利用の担保、原子力の安全対策、国民理解の深化、放射性廃棄物の処理・処分、人材育成、研究開発、放射線利用、核セキュリティ、国際連携といった原子力利用全体の現状や継続的な取組等について俯瞰的に説明。

図1 原子力白書の構成

し、我が国の原子力に関する現状及び国の取組等について、国民の方々に対し説明責任を果たしていくとともに、「原子力白書」や原子力委員会の活動を通じて、「基本的考え方」で指摘した事項に関する原子力関連機関の取組状況について、原子力委員会自らが確認し、専門的見地や国際的教訓等を踏まえながら指摘を行うなど、今後にも必要な役割を果たせるよう努めていく。

V. 白書のポイント

【はじめに】「原子力利用に関する基本的考え方」について

原子力委員会の見直し後、初めての本格的な政策提言となる「原子力利用に関する基本的考え方について」を、平成29年7月20日に原子力委員会にてとりまとめ、翌21日に政府は本文書を尊重する旨を閣議決定した。

本白書では、関連する図表を示すとともに、本文全体を掲載している。

【第1章】東電福島第一原発事故への対応と復興・再生の取組

1-1 東電福島第一原発事故の調査・検証

東電福島第一原発事故の後、国会事故調や政府事故調、IAEAなどの国内外の諸機関が事故の調査・検証を行い、多くの提言等を取りまとめて公表した。

放射線量率が非常に高く、現地調査に着手できない事項などがあり、事故原因について解明できていない点があるとともに、事故の社会への影響は現在も続いていることから、事故原因や被害の実態を明らかにする取組が引き続き必要である。

1-2 原子力安全に関する東電福島第一原発事故後の取組と体制見直し

国会事故調及び政府事故調の提言等を受け、国における原子力安全規制及び原子力災害対策に関する体制が強化された。

原子力規制委員会は、原子力利用における安全の確保の事務を一元的に実施し、国民の安全を最優先として活動している。特に、シビアアクシデント対策の強化等を盛り込んだ、世界で最も厳しい水準の新規制基準を制定し、適合性の審査を実施している。

原子力災害対策特別措置法の改正により、大規模な自然災害等による原子力災害の発生も想定し、対応策の整備等原子力災害の防止に関し万全の措置を講ずることを国の責務として明確化した。原子力基本法の改正により、原子力防災に関する平時からの総合調整を行う原子力防災会議の設置など体制を強化した。安全確保に第一義的な責任を有する原子力事業者は、より高いレベルの安全を目指し、自主規制組織の設立やリスク評価の活用、シビアアクシデント対策の強化をはじめ自主的かつ

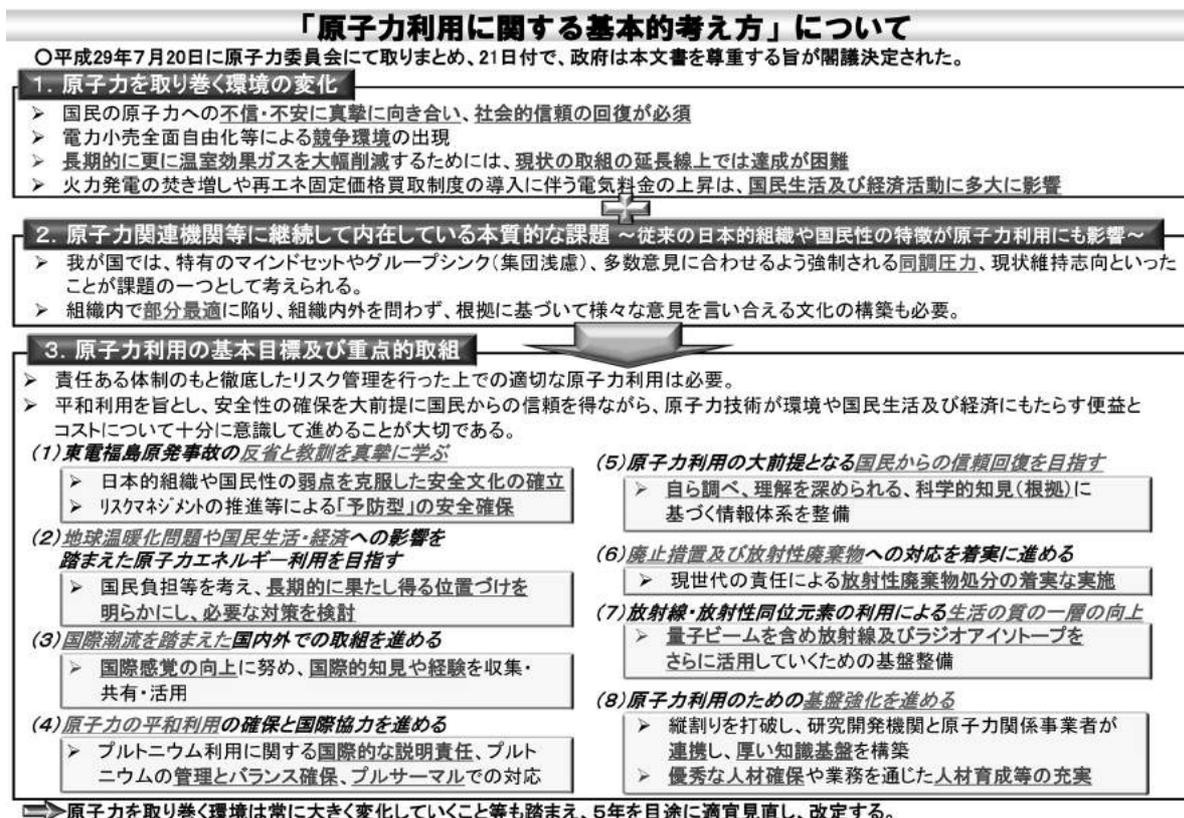


図2 原子力利用に関する基本的考え方の構成

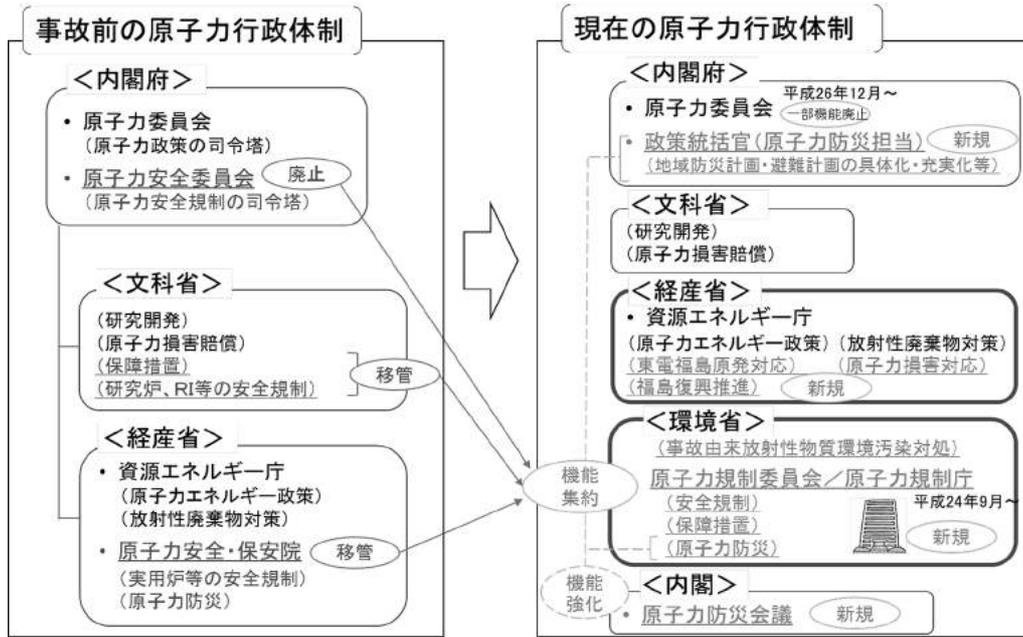


図3 原子力安全に関する事故後の行政体制の見直し

継続的な安全性向上活動を実施する。国も「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」も策定するなど、原子力事業者の自主的原子力安全性向上を促進する。

1-3 福島復興・再生に向けた取組

東電福島第一原発事故により原子炉施設から放出された放射性物質による環境汚染が発生した。

この事態を受けて、政府は避難指示や食品の出荷制限等、放射線影響に対する緊急的な防護措置を実施した。また、人体及び環境への放射線影響を把握するために、事故直後から空間線量率等のモニタリングや健康影響の

調査・評価を実施した。

2016年12月末時点においても、多数の住民の方々が避難を余儀なくされ、一部食品の出荷制限が継続するなど、事故の影響が継続されている。そのため、被災地では避難指示の解除や、復旧・復興に向けた以下のような取組を推進している。

- ・ 除染、放射性物質に汚染された廃棄物の処理、中間貯蔵施設の整備の実施
- ・ 避難住民の方々の早期帰還に向けた安全・安心対策、事業・生業の再建や風評被害対策といった生活再建に向けた支援への取組の実施

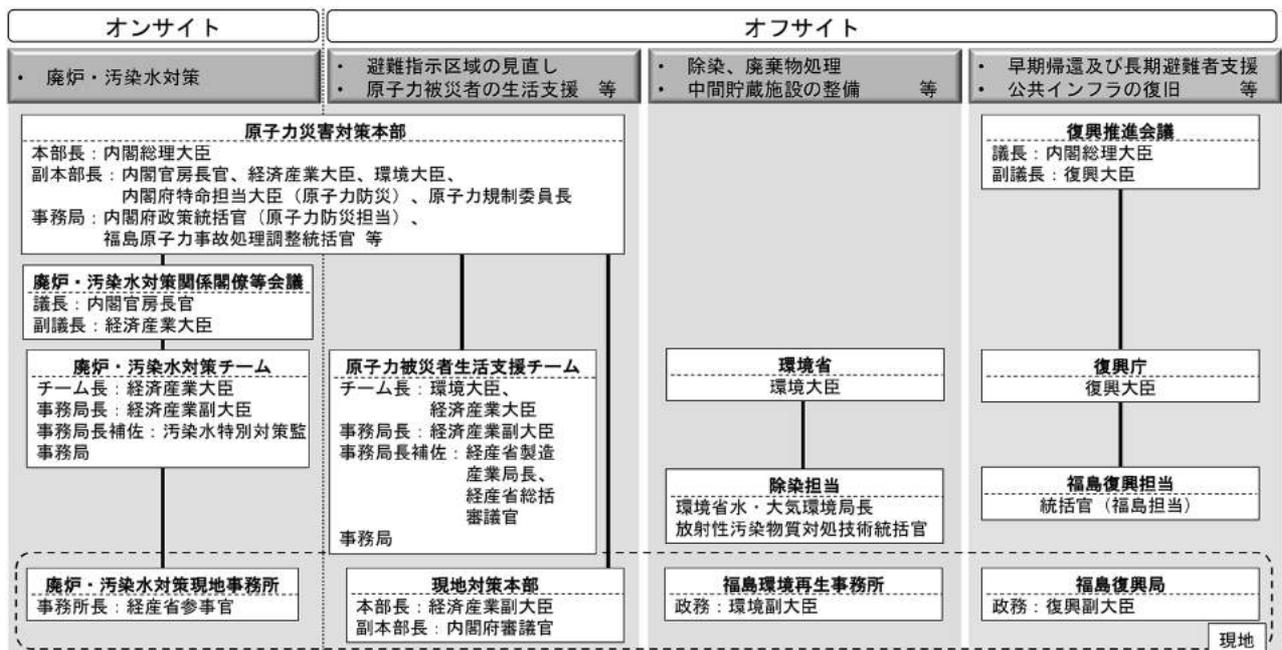


図4 福島の復興に係る政府の体制(2016年12月末時点)
 (出典)復興庁「福島の復興に向けた取組」(2015年)に基づき作成

2011年4月時点
(事故直後の区域設定が完了)

2013年8月時点
(避難指示区域の見直しが完了)

2016年10月時点

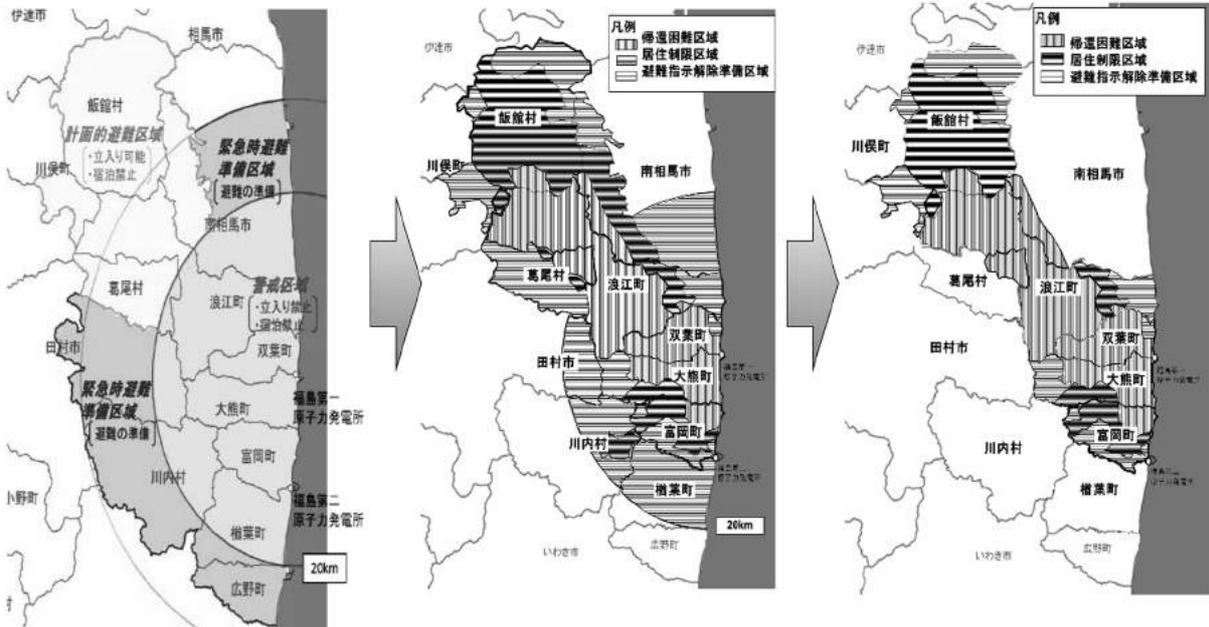


図5 避難指示区域の変遷(2011年4月から2017年4月まで)

(出典)内閣府原子力被災者生活支援チーム「避難指示区域の見直しについて」(2013年)及び経済産業省「避難指示区域の概念図」(2016年)等に基づき作成

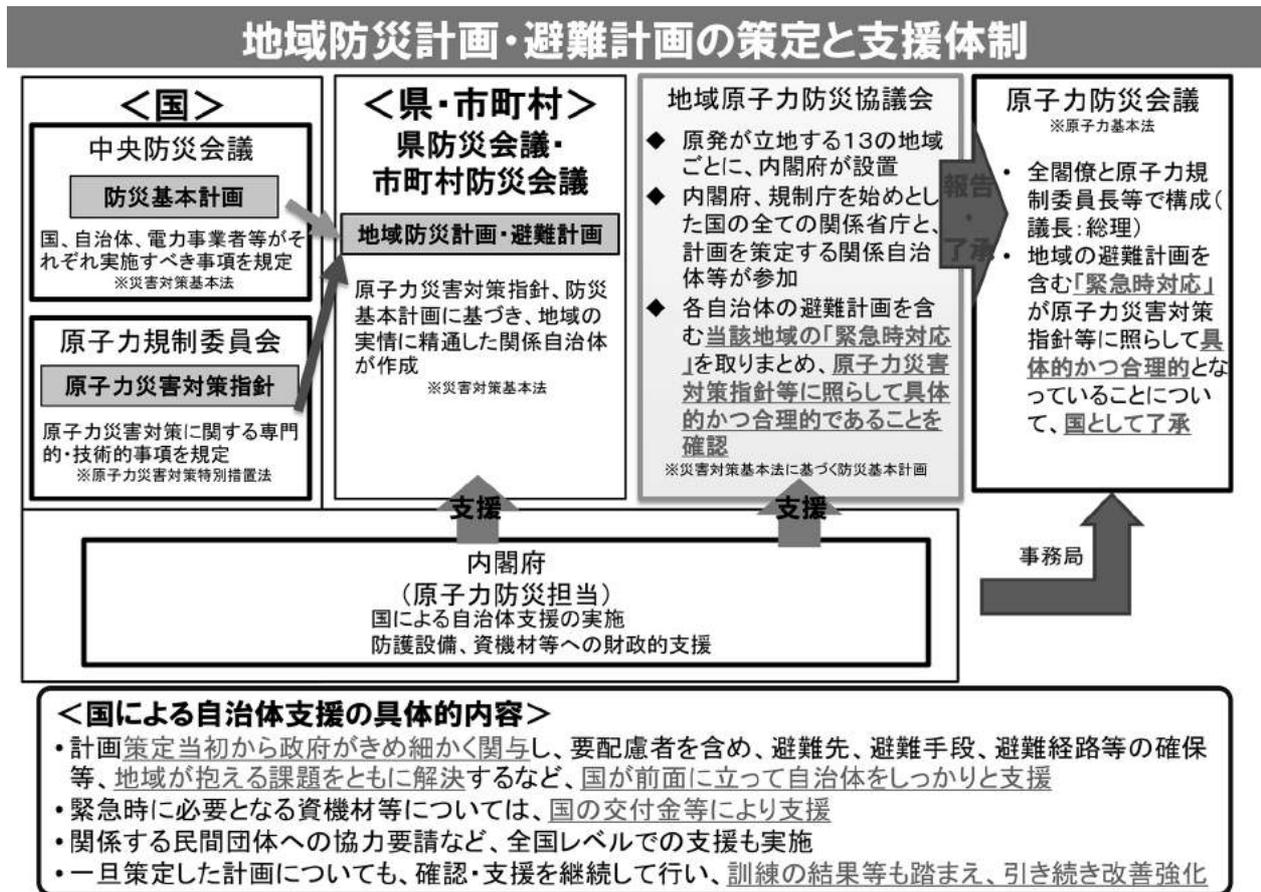


図6 地域防災計画・避難計画の策定

(出典)内閣府政策統括官(原子力防災担当)ウェブサイト「地域防災計画・避難計画策定支援」

・福島イノベーション・コースト構想をはじめとした、復興・再生に向けた取組

1-4 東電福島第一原発の廃炉への取組

東電福島第一原発の廃炉及び汚染水対策は、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」に基づいて、安全かつ着実に取組が実施されている。ロードマップでは、廃炉に向けた中長期の取組を実施していく上での基本方針と主要な目標工程等を定め、2011年12月に初版が作成された後、取組の進捗状況を反映して随時改訂している。

また、中長期にわたる廃止措置を実施するには、国内外の幅広い分野の英知を結集し、研究開発を進めていくことが必要である。また、廃炉作業や研究活動を維持、継続していくためには、研究者やエンジニアなどの人材育成・確保のための取組を進めることも重要であり、国は廃炉に関する技術的難易度の高い課題に対する研究開発や、基礎研究、人材育成の取組に関する事業を立ち上げて、これらの取組を推進するとともに、研究施設等の整備も推進していく。

【第2章】原子力利用に関する基盤的活動

2-1 原子力安全対策

IAEA や OECD/NEA、米国などの各国において、事故の教訓を踏まえて原子力安全を強化するための取組を実施している。

我が国では、原子力安全規制体制を再編するとともに、重大事故(シビアアクシデント)対策の導入、最新の知見の取り入れ等により原子力安全規制を強化している。原子力規制委員会は、新たな原子力安全規制の枠組みに基づき、原子力事業者による安全確保の取組を監視・監督するとともに、最新知見を踏まえた規制の継続的な改善を実施している。

原子力災害対策指針では、「防災は、新たに得られた知見や把握できた実態等を踏まえ、実効性を向上すべく不断の見直しを行うべきもの」とされ、継続的に改定するとともに、地域の原子力防災充実に向けた取組を実施している。

2-2 核セキュリティ

我が国は、「核物質及び原子力施設の防護に関する条約」の義務を遵守しており、原子炉等規制法により原子力施設に対する妨害破壊行為や核物質の輸送や貯蔵、原子力施設での使用等の各段階における核物質の盗取を防止するための対策を事業者に義務付けた。国は、事業者が講じる防護措置の実効性を定期的に確認する。

従来は、核物質の不法移転及び原子力施設や核物質輸送への妨害破壊行為に対する防護対策であったものが、放射性物質の盗取及び関連施設又は輸送への妨害破壊行

為、さらに規制管理外の核物質やその他の放射性物質への対応にまで、防護の対象が拡大した。

2-3 平和利用の担保

IAEA は原子力の平和利用を促進するとともに、平和利用から軍事利用への転用を防止するため、各国と保障措置協定を締結して保障措置を実施している。

我が国においては、IAEA 保障措置の厳格な適用やプルトニウム利用の透明性向上等により平和利用を担保している。例えば、2003年8月に原子力委員会が決定した「プルトニウム利用の基本的考え方について」に基づいて、原子力委員会では、電気事業者に対してプルトニウム利用計画の公表を求めるなどのプルトニウム利用の透明性向上を図るための独自の取組を行っている。また、2016年5月に、拠出金制度の創設等を内容とする再処理等拠出金法が成立し、同法に基づき、認可法人である使用済燃料再処理機構が設立するなど、国は、再処理事業におけるガバナンス強化を図っている。なお、使用済燃料再処理機構の実施中期計画を経産大臣が認可する際には、原子力の平和利用やプルトニウムの需給バランスの確保の観点から、原子力委員会の意見を聴取することとなっている。原子力委員会としては、利用目的のないプルトニウムは持たないとの原則の下、プルトニウムの需給バランス確保について、中立的・俯瞰的立場から適切に確認を行い、その結果を公表するとともに、必要に応じて経産大臣、電気事業者、再処理関連事業者等に対して意見を示すこととしている。

この他に、我が国のプルトニウム保有量に対する諸外国の関心が高まっていることなども踏まえ、原子力委員会は、着実なプルトニウムの利用には、プルスーマルが、現在では、唯一の現実的な手段であるとの見解を指摘している。

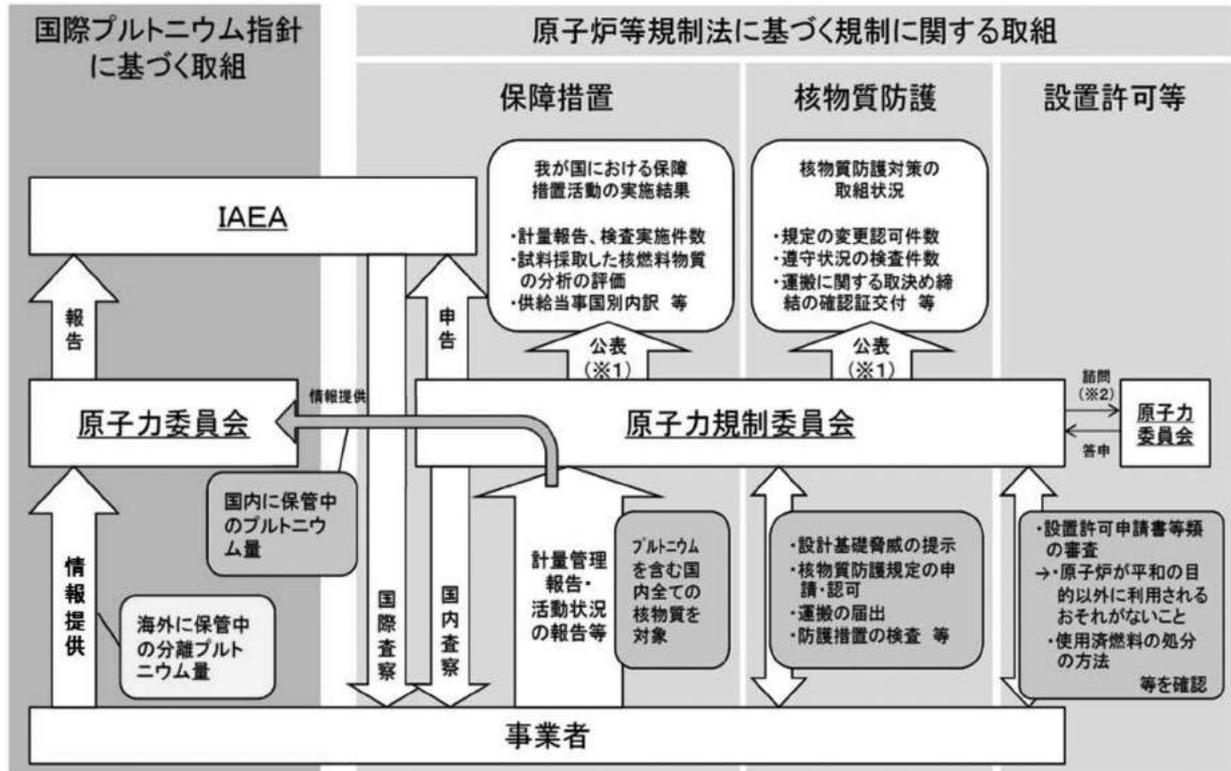
2-4 放射性廃棄物の処理・処分

放射性廃棄物は、原子力発電所や核燃料サイクル施設、大学、研究所、医療機関等における原子力のエネルギー利用や放射線利用、関連する研究開発、施設の解体等に伴って発生する。これらの放射性廃棄物を人間の生活環境に有意な影響を与えないように処理・処分することは、原子力利用に関する活動の一部として重要である。

高レベル放射性廃棄物の最終処分や低レベル放射性廃棄物の処理・処分に向けた取組等を概説した。

2-5 原子力人材の育成・確保

事故の教訓を踏まえ、更なる安全性の高みを追求していくためには、高度な技術と高い安全意識を持った人材の確保が必要である。また、使用済燃料の再処理及び放射性廃棄物の処理・処分、廃止措置、さらに、東電福島第一原発の廃炉を確実に実施するためには、様々な技術



※1 法令に基づく手続きではない。
 ※2 原子炉、貯蔵施設、再処理施設について実施(法定手続き)。

図7 原子力の平和利用を担保する体制

(出典)第5回原子力委員会の在り方見直しのための有識者会議 資料第5号 原子力規制庁「平和的利用等に係る原子力規制委員会の取組(原子力委員会との関係等)」(2013年)

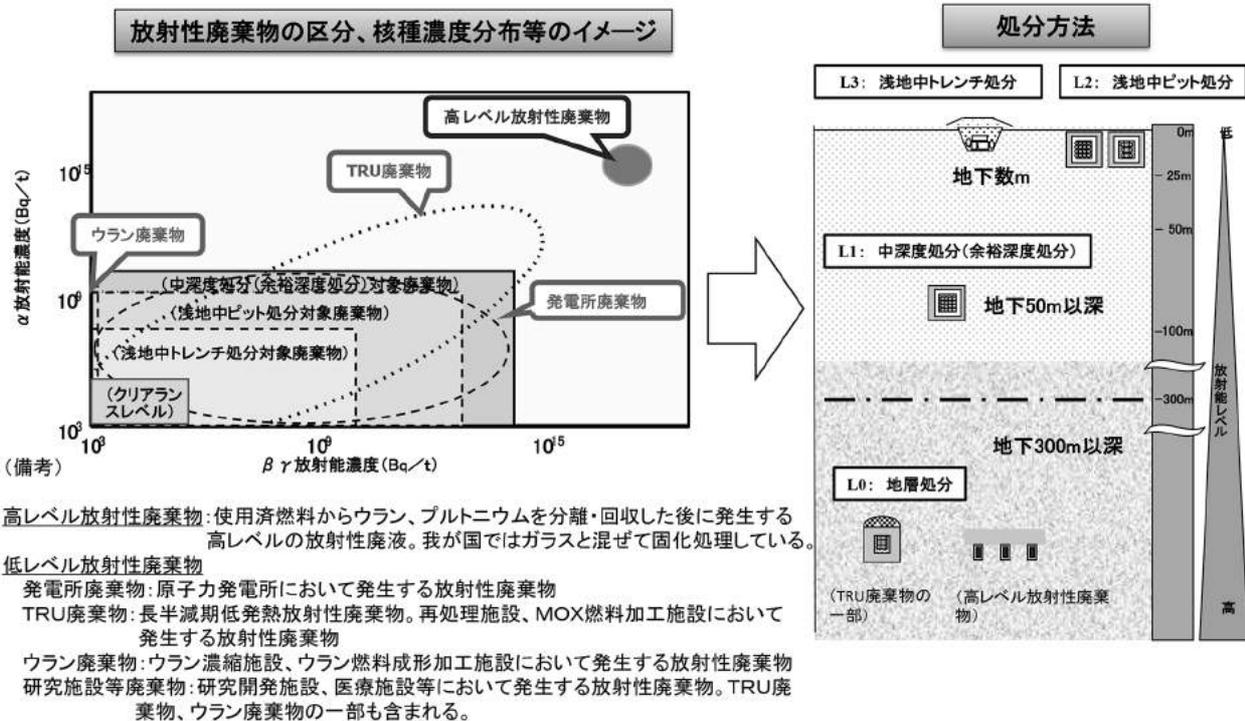


図8 放射性廃棄物の処分方法

(出典)総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会「低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について」(2007年)等を基に内閣府作成

の確立が必要であり、これを担う人材の育成と確保が必要である。

原子力を志望する学生は、1994年度をピークに減少し、近年は、750人程度の横ばいで推移している。また、工学系人材の原子力関連企業の合同企業説明会への参加者数や電力事業者における採用者数は、東電福島第一原発事故後に減少したままである。

2-6 原子力と国民・地域社会との共生

事故調査報告書では、事故の状況や放射線の人体への影響などについての政府や東京電力から国民に対する情報提供の仕方や内容に多くの課題があったことを指摘している。また、事故が発生した際の緊急時だけでなく、平時の情報提供の在り方についても指摘している。

これらの課題は、国民の原子力に対する不信・不安を招く主原因の一つとなったと考えられ、その回復に向け

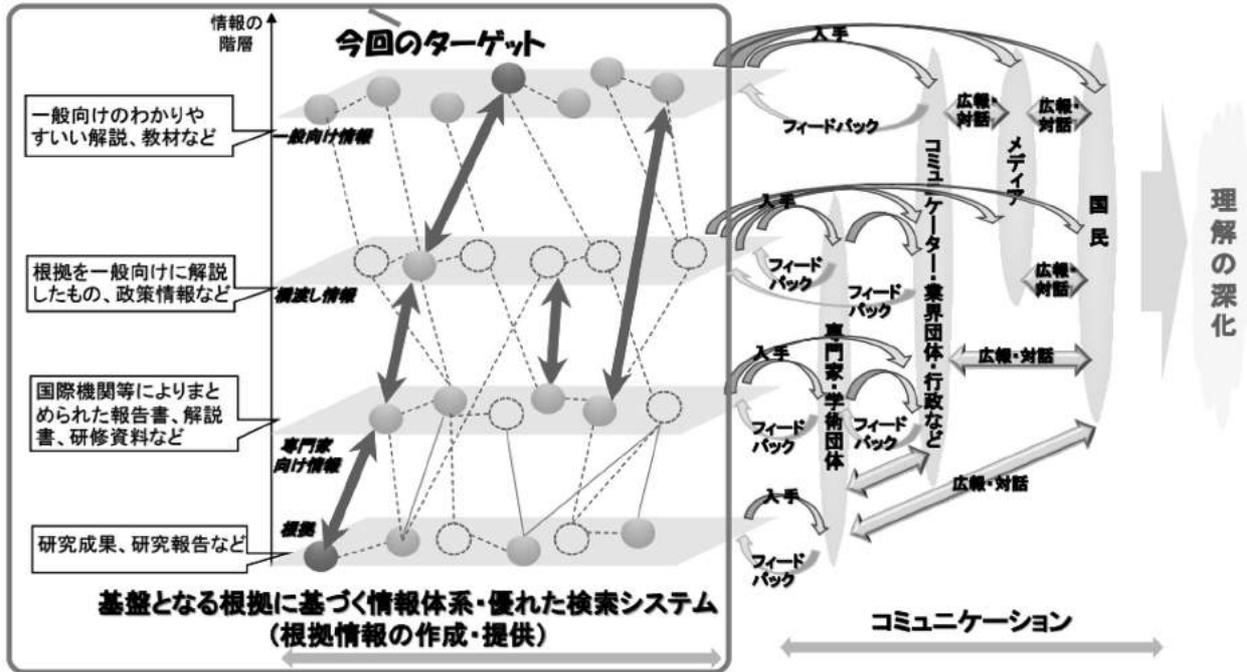


図9 理解の深化～根拠に基づく情報体系の整備について～
(出典)原子力委員会「理解の深化～根拠に基づく情報体系の整備について～(見解)」(2016年)

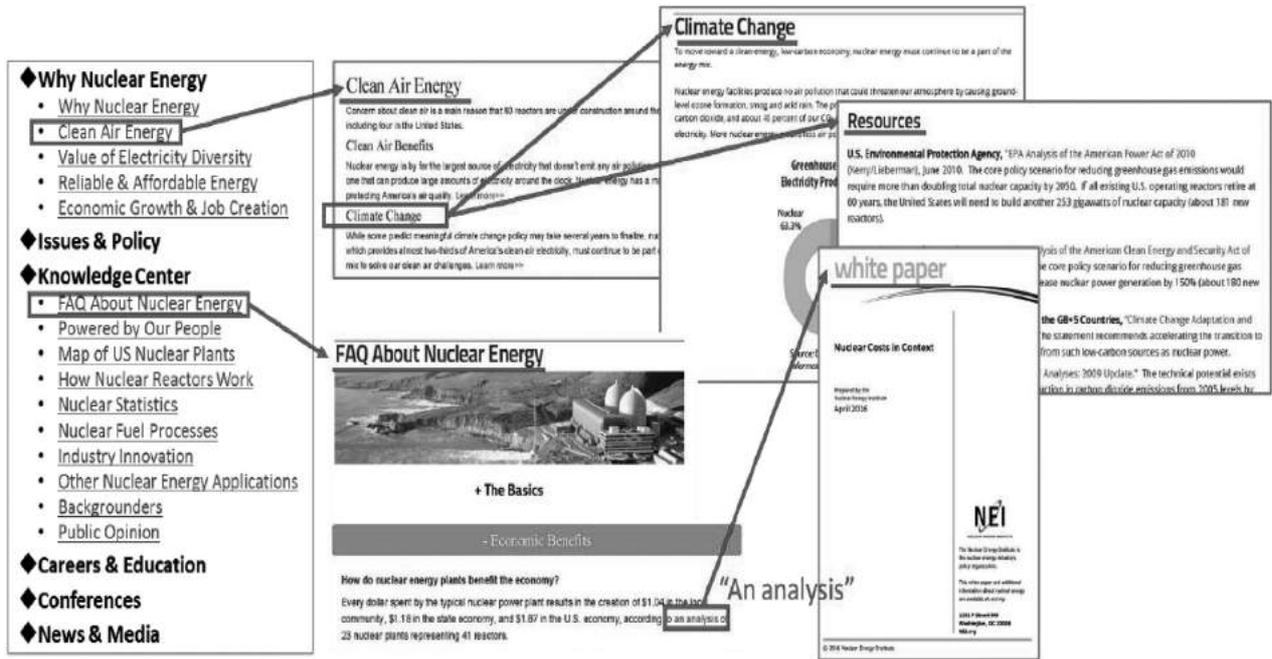


図10 NEI ウェブサイトの情報提供の事例
(出典)第25回原子力委員会資料第1-3号「参考資料」(2017年)

て、住民向け説明会への参加をはじめとして、立地地域に加えて電力消費地域も含めて丁寧な対話や情報共有などを実施する。

原子力委員会は、自ら調べ、理解を深められる、科学的知見(根拠)に基づく情報体系の整備の必要性を指摘した。

コラムでは、根拠に基づく情報体系の構築と情報提供の在り方の海外事例として、米国原子力規制委員会(NRC)と米国原子力協会(NEI)の取組を紹介している。

【第3章】原子力のエネルギー・放射線利用

3-1 エネルギー利用

(1)原子力発電

東電福島第一原発事故は、福島県民をはじめ多くの国民に多大な被害を及ぼし、原子力への不信・不安が高まった。こうした不信・不安に対して真摯に向き合い、その軽減に向けた取組を一層進めていくことにより、社会的信頼を回復していくことが必須である。

原発依存度については、省エネルギー・再生可能エネルギーの導入や火力発電所の効率化などにより、可能な

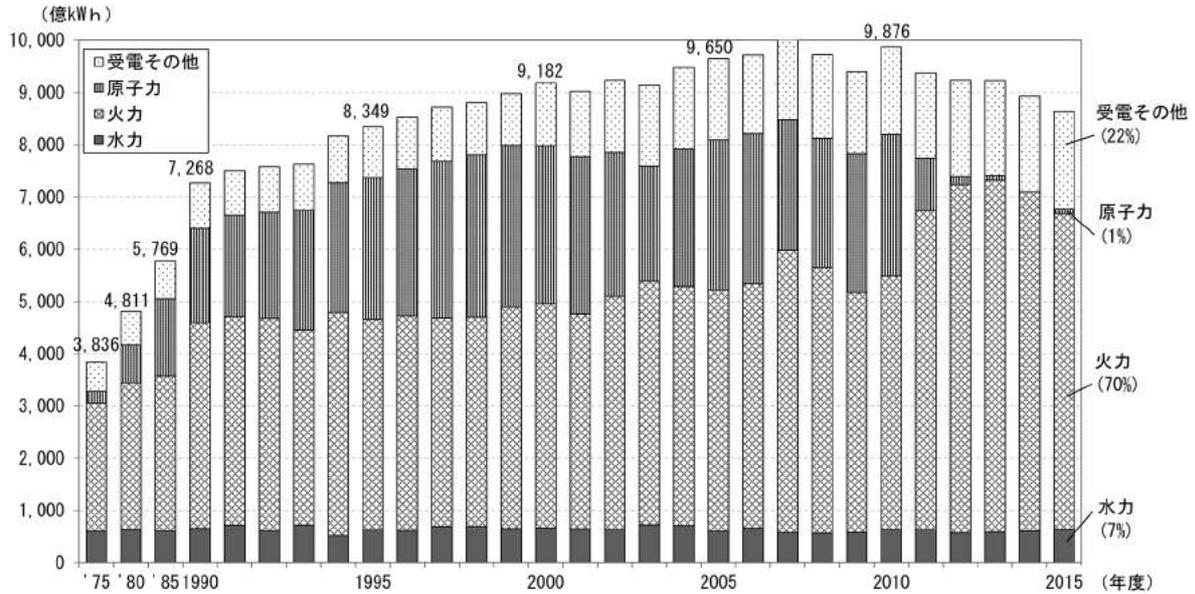


図11 我が国の発電電力量の推移
(出典)電気事業連合会「INFOBASE2016」(2016年)に基づき作成

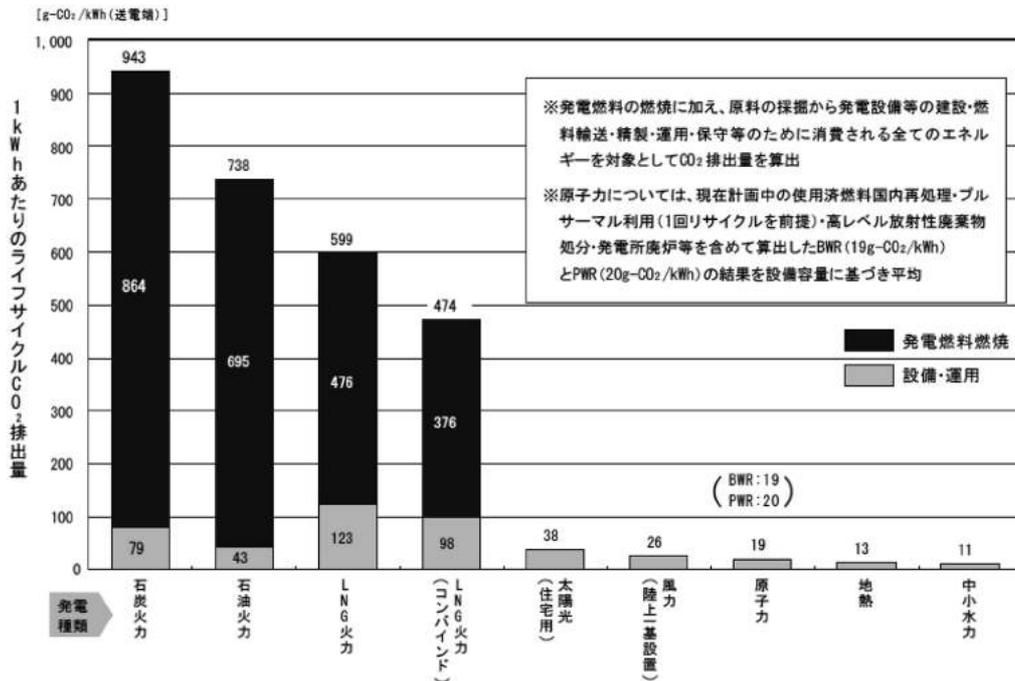


図12 各種電源別のライフサイクルCO2排出量
(出典)日本原子力文化財団「原子力エネルギー図面集2016」(2016年)

● 東電福島第一原発事故以降、我が国の電気料金は産業用(電力)で約3割、家庭用(電灯)で約2割上昇している

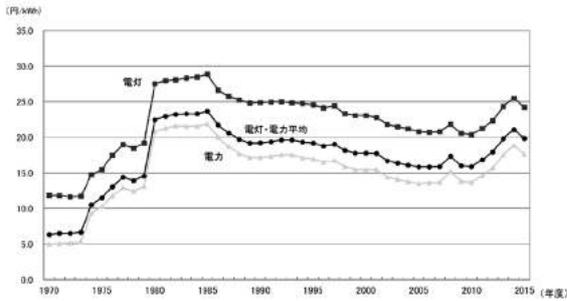


図13 我が国の電気料金の推移
(出典)経済産業省「平成28年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2017)」

限り低減させるということが国の基本方針である。
 以下のような直面する課題の解決に向けた取組を進めていくことも必要である。

- ・我が国のエネルギー資源の輸入依存度は94.4%と、先進国の中でも極めて高い水準
- ・原子力発電所を代替する火力発電の焚き増しに伴う化石燃料の輸入増加や再生可能エネルギー固定価格買取制度の導入が、電気料金の上昇といった国民負担の増加につながっている
- ・地球温暖化対策の観点から、温室効果ガス発生量低減の努力が求められている

(2)核燃料サイクル

我が国では、原子力発電所で発生する使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を再び燃料として有効利用する「核燃料サイクル」の確立が国の基本方針である。

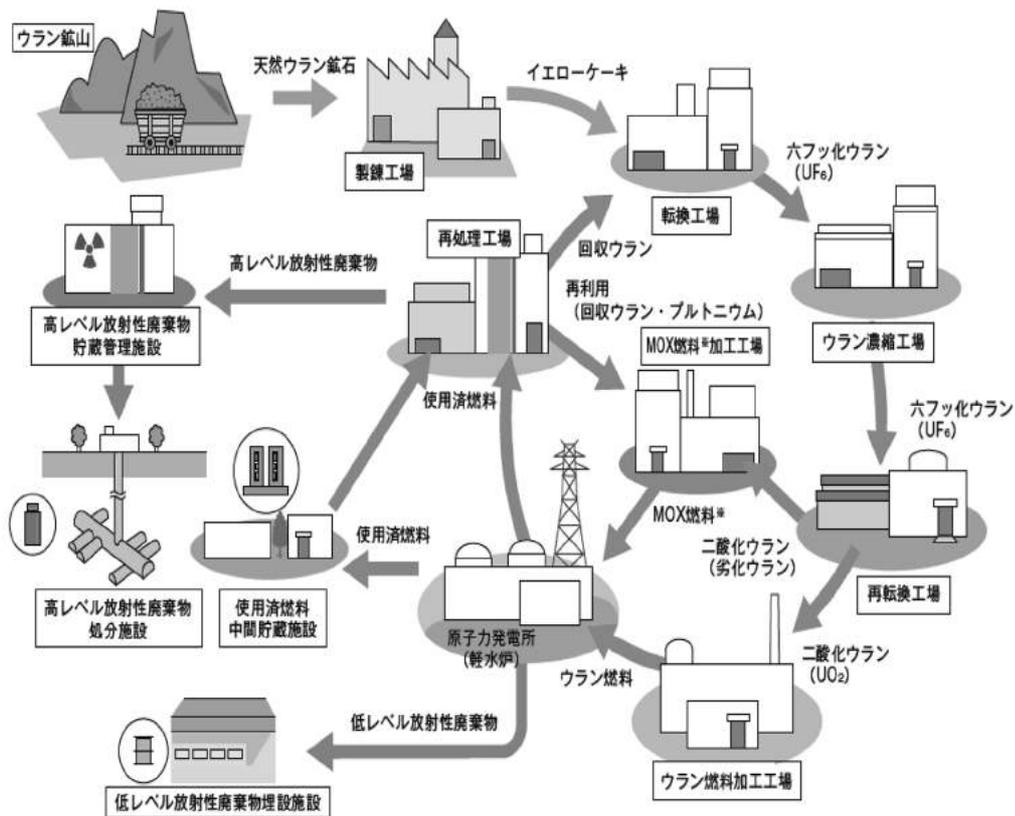
この基本方針に基づき、立地地域を始めとする国民の理解と協力を得るとともに安全の確保を大前提に、国や事業者等による取組を実施する。

ウラン濃縮施設や使用済燃料の再処理施設は核兵器の材料になる高濃縮ウランやプルトニウムの製造に転用される可能性があることから、原子力利用は原子力基本法に則り、厳に平和の目的に限り行うとともに、国内的び国際的懸念を生じさせないよう平和利用に係る透明性を向上させる。

3-2 放射線利用

我が国では放射線による人体への障害を防止するために、放射線を安全に取り扱う技術や放射線防護の法規制を整備している。

放射線の有益な性質を学術研究や産業技術に活用する研究開発が進められ、今日では医療、工業、農業、医療、科学技術など様々な分野の活動に放射線を効果的に利用し、その経済規模は、約4兆円と試算されている。



※MOX (Mixed Oxide) 燃料：プルトニウムとウランの混合燃料

図14 核燃料サイクルの概念
(出典)日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集2016」(2016年)

| | 2009 | 2011 | 2013 | 2015 | 200~2015 の変化量 (1,000tU) | 変化割合 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|------|
| 確認埋蔵量(1,000tU) | | | | | | |
| < USD 260/kgU | 6306.3 | 7096.6 | 7635.2 | 7641.6 | 1335.3 | 0.2 |
| < USD 130/kgU | 5404.0 | 5327.2 | 5902.9 | 5718.4 | 314.4 | 0.1 |
| < USD 80/kgU | 3741.9 | 3078.5 | 1956.7 | 2124.7 | -1617.2 | -0.4 |
| < USD 40/kgU(注3) | 796.4 | 680.9 | 682.9 | 646.9 | -149.5 | -0.2 |
| 推定埋蔵量(1,000tU) | | | | | | |
| < USD 260/kgU | 4004.5 | 4378.7 | 4587.2 | 4386.4 | 381.9 | 0.1 |
| < USD 130/kgU | 3524.9 | 3455.5 | 3698.9 | 3458.4 | -66.5 | 0.0 |
| < USD 80/kgU | 2516.1 | 2014.8 | 1211.6 | 1223.6 | -1292.5 | -0.5 |
| < USD 40/kgU(注3) | 569.9 | 493.9 | 507.4 | 478.5 | -91.4 | -0.2 |
| 予想埋蔵量(1,000tU) | | | | | | |
| < USD 260/kgU | 2301.8 | 2717.9 | 3048.0 | 3255.1 | 953.3 | 0.4 |
| < USD 130/kgU | 1879.1 | 1871.7 | 2204.0 | 2260.1 | 381.0 | 0.2 |
| < USD 80/kgU | 1225.8 | 1063.7 | 745.1 | 901.1 | -324.7 | -0.3 |
| < USD 40/kgU(注3) | 226.6 | 187.0 | 175.5 | 168.4 | -58.2 | -0.3 |

注1)四捨五入のため数値が一致しない場合がある

注2)詳細な積もり値がない、あるいは、対外秘とした国もあるため、埋蔵量がデータよりも高い可能性がある

図15 世界のウラン資源埋蔵量

(出典)OECD/NEA & IAEA「Uranium2016:Resources, Production and Demand」(2016年)及び「Uranium 2011:Resources, Production and Demand」(2012年)に基づき作成

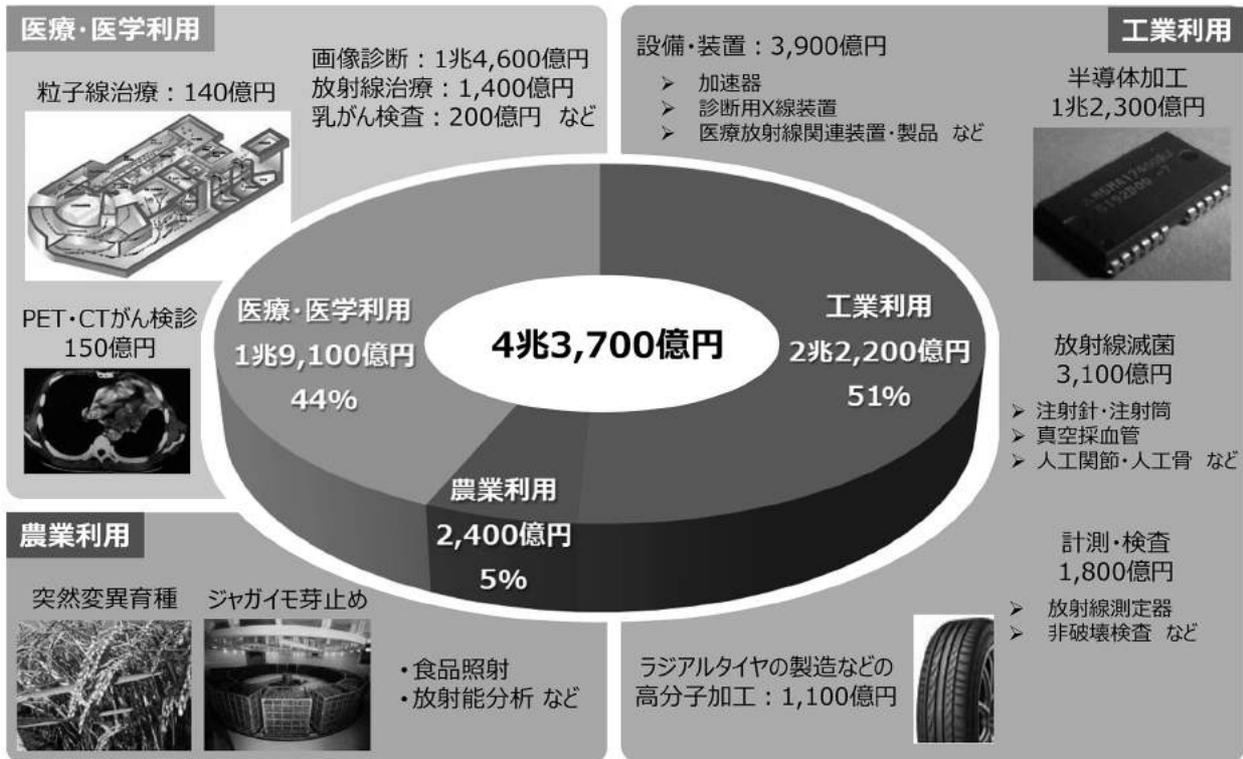


図16 2015年度の我が国における放射線利用の経済規模
(出典)第29回原子力委員会 資料第1-1号 内閣府「放射線利用の経済規模調査」(2017年)

【第4章】原子力の研究開発

東電福島第一原発の廃炉・汚染水対策や汚染された環境の回復に関する研究開発、原子力安全研究を推進している。また、事故の教訓を踏まえ過酷事故対策を含めた安全性向上に資する技術や、使用済燃料を含む放射性廃棄物処

分に資する研究開発にも取り組む必要がある。

日本原子力研究開発機構等では、新しい原子力科学・技術を実用化していく観点から、核工学・炉工学、燃料・材料などの基礎基盤的な研究開発を総合的に推進するとともに、核融合研究開発、高温ガス炉研究開発等を推進

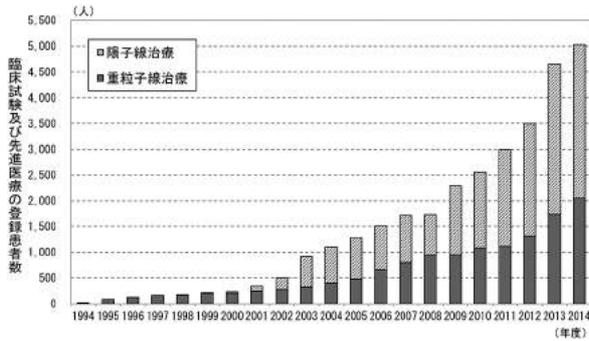


図 17 粒子線治療の登録患者数(1994年6月～2015年3月)
 (出典)公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団「各粒子線施設における治療の登録患者数(年度別)」2017年6月、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所「放医研における重粒子線治療の登録患者数」のデータに基づき作成

している。

高速炉サイクル技術については、2016年12月、高速炉開発会議において、「もんじゅ」の運転再開はせず、廃止措置へ移行し、あわせて「もんじゅ」の持つ機能を今後の高速炉研究開発においてできる限り活用していく等の方針が決定された。

日本原子力研究開発機構は、研究用原子炉を含む全原子力施設の集約化・重点化を図り、安全対策を進める計画を取りまとめた。

研究開発の推進においては、新しい技術を市場に導入する産業界と、新たな知識や価値を生み出す研究開発機関や大学の連携や協力が重要。原子力委員会は産業界と研究開発機関・大学をまたぐようなネットワークを構築し、厚い知識基盤の構築等を検討すべき旨指摘している。

【第5章】国際的取組

5-1 国際協力

東電福島第一原発事故後も、発電を含め原子力利用を維持する先進国、導入・拡大する途上国が存在する。このため我が国は、グローバル化の中での原子力利用において、平和利用と核不拡散の担保、安全の確保及び核セキュリティの担保を前提として、戦略的な国際協力・連携を進め、核不拡散、核セキュリティ分野で世界をリードする位置付けの確立が求められている。

我が国は東電福島第一原発事故後も、途上国、先進国との間で、二国間、多国間の協力を推進するとともに、国際機関の活動にも積極的に関与する。

5-2 核軍縮・核不拡散体制の維持・強化

我が国は、核兵器のない平和で安全な世界の実現のために、核軍縮外交を進めるとともに、国際的な核不拡散体制の維持・強化に取り組んでいくとしている。

核兵器不拡散条約(NPT)や核軍縮に向けた取組、北朝鮮やイランをめぐる動き等を含めた核不拡散に向けた取組、核セキュリティ・サミットや核物質及び原子力施設の防護に関する条約などの核テロリズムに対する取組や最近の動向を概説した。

5-3 国際的な原子力の利用と産業の動向

東電福島第一原発事故は、世界の原子力利用国に大きな影響を与えたが、多くの原子力利用国では、原子力を継続的に利用する方針を維持している。米国や英国、中国などの各国の原子力政策・産業動向を概説した。

我が国の原子力産業が国際展開する上で、国や事業者は、国際的な核不拡散体制の枠組みに沿って、各種手続

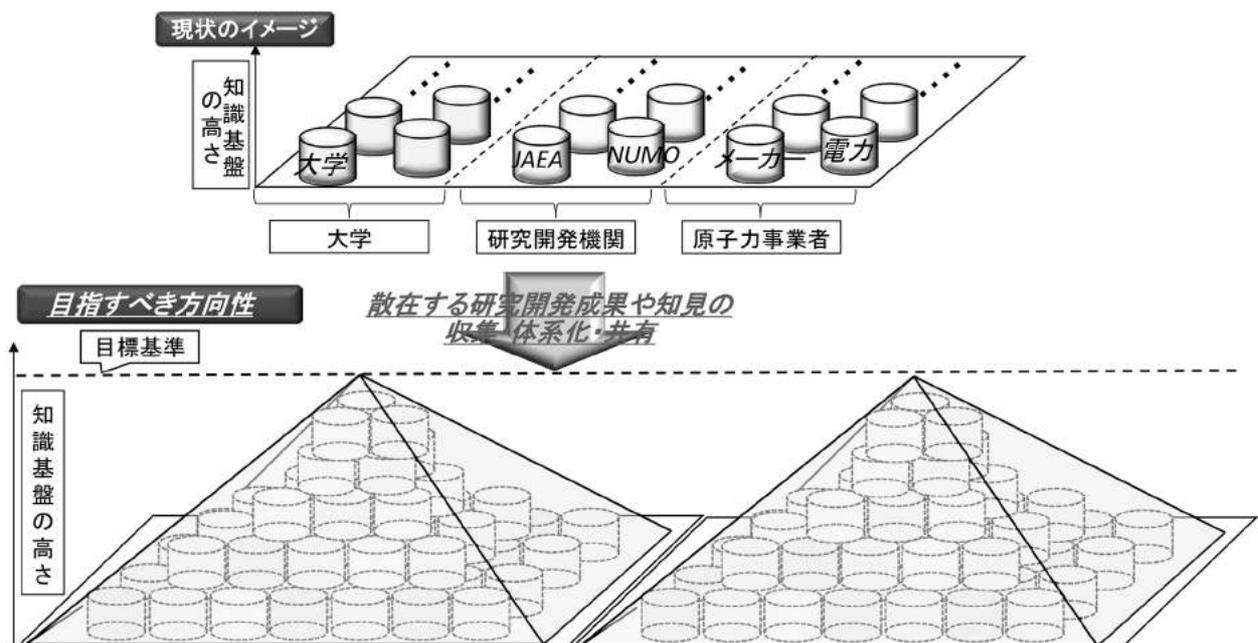
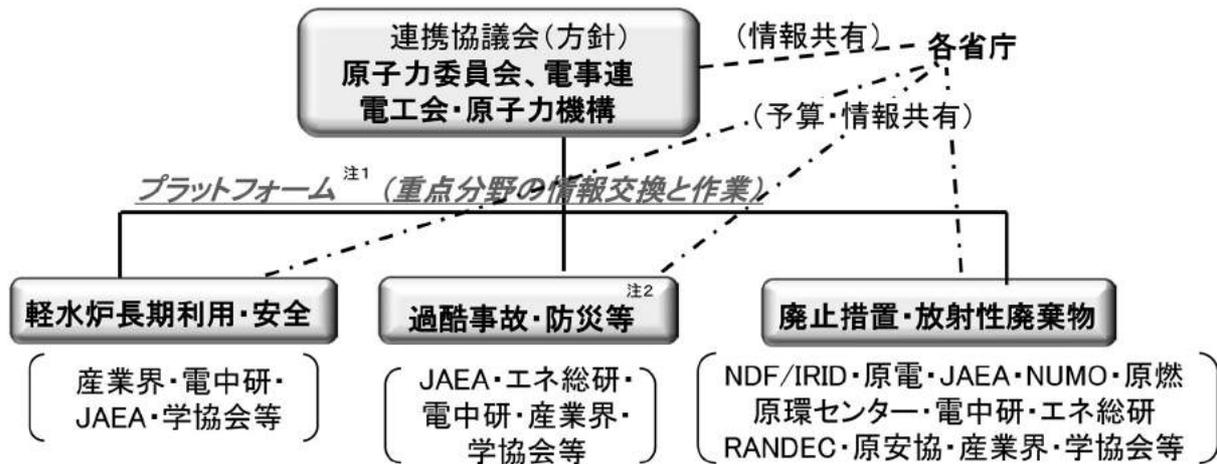


図 18 研究開発機関と原子力関係事業者の連携・協働のイメージ



目標・ビジョンの例：①知識力・技術力向上、②専門家と国民の理解増進、③経営力増進

注1) プロジェクトではなく、プログラム。似た目的の連携活動として欧州委員会のNUGENIAがある。

注2) プラットフォームには自立を求める。原子力委員会は立ち上げに協力し、経過を監視する。

作業内容：国内外の情報の収集と共有・公開。報告書、解説、研修資料などの作成。

情報交換、人材育成、役割分担して研究開発

作業費用：各組織の費用、外部資金(各省庁の予算、競争的資金など)

期待する成果：実務・ニーズに対応する研究開発、国民理解増進、厚い知識基盤の構築、根拠情報の明示・俯瞰、研究や利用の進展、

図19 原子力関係組織の連携プログラム【案】

や輸出管理等を厳格かつ適切に行うことが必要である。公的信用を付与する場合には、国は、輸出相手国において安全確保等に係る国際的取り決めが遵守されているか、国内制度が整備されているか等の安全配慮等確認を行い、情報提供することとしている。

－ 参考文献 －

- 1) 原子力委員会，原子力白書，2017年。
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/index.htm>
- 2) 復興庁，福島への復興に向けた取組，2015年。
http://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-1/20150707_jikankouenshiryo_douyuukai.pdf
- 3) 内閣府原子力被災者生活支援チーム，避難指示区域の見直しについて，2013年。
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131009/131009_02a.pdf
- 4) 経済産業省，避難指示区域の概念図，2016年。
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131009/131009_02a.pdf
- 5) 内閣府政策統括官(原子力防災担当)，地域防災計画・避難計画策定支援。
http://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/pdf/02_sakuteitaisei.pdf
- 6) 原子力規制庁，平和利用等に係る原子力規制委員会の取組(原子力委員会との関係)，2013年。
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kaigi/dai5/siryoy5.pdf
- 7) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会，低レベル放射性廃棄物の余裕震度処分に係る安全規制について，2007年。
http://www.rwmc.or.jp/law/file/shiryo_28.pdf
- 8) 原子力委員会，理解の深化～根拠に基づく情報体系の整備について～(見解)，2016年。
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/161201.pdf>
- 9) 原子力委員会，資料第1-3号「参考資料」，2017年。
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryoy2017/siryoy18/siryoy1-3.pdf>
- 10) 電気事業連合会，INFOBASE2016，2016年。
<http://www.fepc.or.jp/library/data/infobase/pdf/infobase2016.pdf>
- 11) 経済産業省，平成28年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2017)，2017年。
- 12) 日本原子力文化財団，原子力エネルギー図面集2016，2016年。
http://www.ene100.jp/map_2
- 13) 日本原子力文化財団，原子力・エネルギー図面集2016，2016年。
http://www.ene100.jp/map_2
- 14) OECD/NEA, & IAEA Uranium 2016: Resources, Production and Demand, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1787/uranium-2016-en>
- 15) OECD/NEA, & IAEA Uranium 2011: Resources, Production and Demand, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1787/uranium-2011-en>
- 16) 原子力委員会，資料第1-1号「内閣府「放射線利用の経済規模調査」」，2017年。
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryoy2017/siryoy29/siryoy1-1.pdf>
- 17) 公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団，各粒子線施設における治療の登録患者数(年度別)，2017年。

http://www.antm.or.jp/05_treatment/info/ryuusisen-kanja_2014.pdf

- 18) 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所, 放医研における重粒子線治療の登録患者数.
<http://www.nirs.qst.go.jp/rd/cpt/index.html>.
- 19) 原子力機構, 施設中長期計画の概要, 2017年.
<https://www.jaea.go.jp/02/press2016/p16101801/s01.pdf>

著者紹介



川淵英雄 (かわぶち・ひでお)
 内閣府 原子力委員会事務局



飯塚倫子 (いいつか・みちこ)
 内閣府 原子力委員会事務局



望月 豊 (もちづき・ゆたか)
 内閣府 原子力委員会事務局



辻 政俊 (つじ・まさとし)
 内閣府 原子力委員会事務局



曾佐 豊 (そさ・ゆたか)
 内閣府 原子力委員会事務局



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 —

(1月16日第6回論文誌編集幹事会, 第7回学会誌編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・平成29年11月16日～12月15日に英文誌へ16論文, 和文誌へ1論文の投稿があった。
- ・掲載論文から注目論文を選び Editor's Choice として宣伝することとした。
- ・英文誌の International Advisory Board メンバーの中国からの委員の交代と米国から1名追加することを承認した。
- ・英文誌投稿論文の予備審査時の掲載否判定理由の再検討をした。
- ・東電福島第一事故関連和文論文及びアトモス掲載解説記事の英訳出版WGの進捗が報告された。次回の総務財務委員会に諮ることとした。
- ・和文論文誌の日本語引用文献の英語表示方法を検討した。

【学会誌関係】

- ・巻頭言, 時論, その他記事の企画の進捗状況ならびに掲載号について検討した。4月号に座談会記事を掲載の予定。
- ・2018年春の年会の理事会セッションを特集記事として学会誌5または6月号に掲載の予定との報告があった。
- ・1月号記事の誤記について報告があり, 2月号に誤記訂正を掲載の予定。

(2月6日第7回論文誌編集幹事会, 第8回学会誌編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・平成29年12月16日～平成30年1月15日に英文誌へ20論文, 和文誌へ2論文の投稿があった。
- ・第2分野の新委員について報告された。

- ・Editor's Choice の実施要領を検討した。
- ・しばらく休止していた英文誌の Editorial Summary を復活させることとした。
- ・福島第一原発廃止措置に関する論文誌の特集号が提案された。次回, 詳細を再検討することとした。
- ・福島第一原発事故関連和文論文及びアトモス掲載解説記事の英訳出版WGの進捗が報告された。翻訳作業に入ることが理事会で承認された。著者への承諾を得る手続きを進めることとした。
- ・JNST Most Popular Article Awards の基礎となるダウンロード数に不自然な点があり, 再確認することとした。

【学会誌関係】

- ・編集理事より1月末の理事会の報告があった。次年度予算, 編集委員会運営細則が承認され, 5月末開催予定の国際シンポジウムの内容を学会誌に投稿予定であるとの報告があった。
- ・6～12月号のアンケート結果のサマリ案の説明があった。一部修正を加え, 至近号に掲載予定。
- ・1月号アンケート結果の報告があった。キッズ向けの記事企画についても検討していくこととした。
- ・巻頭言, 時論, その他記事の企画の進捗状況ならびに掲載号について検討した。
- ・2018年春の年会の企画セッションで学会誌記事に適しているセッションを確認した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

原子力と核燃料サイクルの将来に向けて

日本原燃 田中 治邦

世界経済全体の見通しと環境制約の強化から、今世紀後半には原子力の世界的な拡大は必至で、それによる天然ウラン需給の逼迫を回避するためには高速炉とその核燃料サイクルに移行する必要がある。エネルギー資源の乏しいわが国が2030年以降も原子力による発電比率を20%以上とするためには、既設軽水炉を再稼動して60年運転するとともに、2040年運転開始を目指して新規建設による設備容量の確保、更にウラン資源争奪回避のために2050年代のできるだけ早期に高速炉とその核燃料サイクルの本格導入が必要である。

KEYWORDS: *Light Water Reactors, Fast Neutron Reactors, Natural uranium demand, Spent fuel reprocessing, Plutonium recycling*

I. はじめに

本稿が掲載される頃には新しいエネルギー基本計画改定の方向性は見えているであろう。おそらく原子力に対する扱いは、前回以降に作られた「長期エネルギー需給見通し」の2030年の発電比率22~20%を取り込むだけに留まり、新增設の必要性は言及されず「エネルギー情勢懇談会」のテーマで終わるのではないかと危惧している。

しかし世界経済全体の見通しと環境制約の強化から、今世紀後半に向けた世界的な原子力の拡大は必然的なもので、日本でも次世代原子力技術の開発ニーズはもはや猶予の無いものであるが、福島第一事故以降の報道論調に躊躇するのか、この当然の帰結を積極的に主張する専門家や研究者は多くない。本稿は、この分野の者であれば誰にも検証できる基礎的な計算から原子力の将来像を解説するものであり、読まれた学会員諸氏の奮起を促したい。なお、長期的な見通しを論ずるので、現行許認可や既存契約の条件を考慮しないことをお断りしておく。

II. 世界の原子力容量の見通し

IAEA 総会で決められた定期的な報告の任務に基づき、事務局は2017年7月末に開かれたIAEA 理事会に対して、2050年までの世界の原子力容量の見通しを2ケース報告した¹⁾。その内、Low projection は、2016年末の392GW から今後一時的に15%程度下がるものの2050年

Future Perspective regarding Nuclear Power and Fuel Cycle in Japan and the World: Harukuni Tanaka.

(2017年11月6日 受理)

までには現状レベルまで回復するというもので保守的でもっともらしい予測としている。また High projection は、2050年には874GWまで倍増するとしている。

2050年より先の予測は、信頼できる国際機関から最近に公表されたものが無いが、パリ協定の締結へ結びついたIPCC第5次評価報告書(AR5)²⁾が検討の基礎となる。AR5は様々な機関の研究報告を俯瞰して幅を示し、主として新興国の人口増加と経済発展により2100年の世界全体の一次エネルギー総供給量は現状の数倍(1,300~1,800EJ/年)となり、それに由来する温室効果ガス(GHG)排出量の増加を抑制する対策の導入について4つのシナリオを纏めている。特にパリ協定で今世紀末までに人為的なGHG排出を正味ゼロにするとの目標合意に至ったケースでは、一次エネルギー供給の90%以上を低炭素エネルギーにしなければならない可能性が高いとしている。その割合は現状では僅か10数%に過ぎない。

英仏でガソリン車を許さず電気自動車に替えて行く政策が発表されるなどの情勢から電化率は著しく伸びるであろうし、それを不安定な太陽光や風力に大きく依存することは出来ず、また火力発電はCCSが必要条件となるが、CO₂を地中に埋蔵する立地点の確保は、その地域の理解獲得に原子力における固体の高レベル廃棄物の処分を上回る困難さが伴うものと予想する。従って2100年の原子力容量を想定するに、一次エネルギー総供給量を1,300EJ/年、原子力比率を10%(現状は5%)とすることは控え目なものと言え、それに設備利用率80%、熱効率33%、所内率4%を考慮すれば、

$$1,300 \times 10^{18} \text{J/年} \times 10\% \times 0.33 \div 3,600 \text{ 秒/h} \div 0.8 \\ \div 0.96 \div 8766 \text{h} = 1,770 \text{GW}$$

これは2016年末の447基392GWの4.5倍で、1基が150万kWとしても1,180基が必要ということである。IPCCのGHG排出を最も厳しく抑制するシナリオで9割を低炭素エネルギーとすべき時代に原子力が10%だけ、他は再生可能エネルギーとCCS付き火力発電ということはとても困難で、この1,000基を越える原子力でも実際には全く足りないと考えられる。

Ⅲ. 天然ウラン需給の見通し

では、これらの原子力容量の見通しに対してウラン資源に問題が無いか、次の3ケースを調べる(図1)。

- ケース(1)：2100年まで現状のまま固定(IAEAのLow projectionの単純延長)
- ケース(2)：2050年の倍増から2100年まで固定(IAEAのHigh projectionの後、予測の与えられていない今世紀後半を水平に延長)
- ケース(3)：2050年の倍増から2100年の4.5倍まで単調増加(今世紀前半はIAEAのHigh projection、後半はパリ協定の目標2100年GHGゼロを意識)

これら3ケースの原子力容量に必要な天然ウラン需要を以下の仮定の下に計算する。

- 初装荷燃料濃縮度 2.5%
- (平衡炉心模擬取出となるよう濃縮度をグルーピング)
- 新設炉の初装荷ウラン重量 103t/GW
- 取替燃料濃縮度 4%
- 取替燃料平均取出燃焼度 45GWd/t
- 天然ウラン 0.711% 濃縮のテール濃度 0.3%
- 燃料加工ロス 2.5% 燃料転換ロス 0.5%
- 所内率 4% 熱効率 33% 設備利用率 80%

発電電力量から必要な熱エネルギーを計算し、取出燃焼度から低濃縮ウラン燃料の重量を求め、濃縮におけるFeed/Product比を乗じる計算に適切にロスや効率を考慮すれば誰にでもできる単純な計算である。具体的な数値の選択に異なる意見があるかも知れないが、濃縮度と平均取出燃焼度を整合して同時に変えれば結果はほとんど変わらないし、ロスや利用率の数値を常識的な範囲で

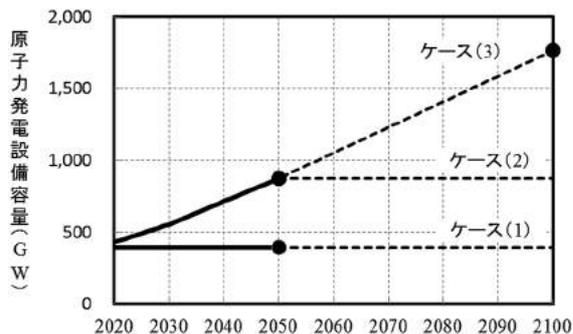


図1 世界の原子力発電容量の想定

変えても結論は同じである。世界の炉型は軽水炉が圧倒的であり(447基中352基)、初装荷炉心を臨界にするウラン重量は経験的なものでバラツキは小さく、今の計算目的にこれ以上の詳細化は意味が乏しい。結果を図2に示すが、比較するウラン資源量はOECD/NEAとIAEAが毎年共同で発行する有名なRed book 2016年版³⁾に載る次の値である。

- ・確認埋蔵量としてUS\$100/lbU₃O₈まで含め764万t
- ・未発見の予測資源量(期待資源)まで含め1,506万t

図2の示唆するところは；

- ・確認埋蔵量764万tとの比較において、今世紀半ばに原子力容量が倍増するケース(2),(3)では2070年の前に使い切る。現状固定のケース(1)でも2120年の前に使い切る。
- ・全ウラン資源1,506万tとの比較において、原子力容量を2050年以降は増やさないケース(2)でも2120年の前に使い切る。2100年に4.5倍の原子力容量を目指すケース(3)では今世紀中に使い切る。

ということであり、実際にこのような事態に至ればウラン資源を巡る争奪戦は尋常でないことは必至である。需要が増えれば販売価格が上がり、地下資源採掘の採算性が向上し(収支均衡点が移動して)可採埋蔵量が増えるのがこれまでの化石燃料における経験知であるが、そもそも未発見のウラン資源量の信頼性には疑問がある。

一方UxC社などの集計によれば今世紀に入って高騰したウラン精鉱、濃縮、転換などの上流側のスポット市場価格は近年著しい低迷が続いている⁴⁾。これは福島第一事故の全世界的な影響のみならず、その前のリーマンショックとその後のシェール革命による原油・天然ガス価格の低下がウラン価格にも及んでいるものである。しかし事故や経済危機は歓迎できないし、逆に儲かるとの見通しがあれば核燃料事業とは無関係なトレーダも参入して来るので、2007年頃まで続いたウラン価格のうなぎ登りの単調増加を再び生じさせないために、火力燃料におけるシェール革命と同様に原子力分野でも適切なタイミングで適切な技術開発が必要で、それが高速炉とその核燃料サイクルによる燃料の増殖・自給の体制である。

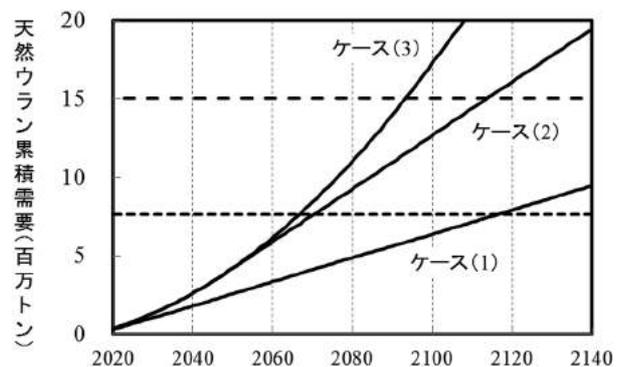


図2 天然ウラン累積需要の見通し (軽水炉ワンスルー、世界合計)

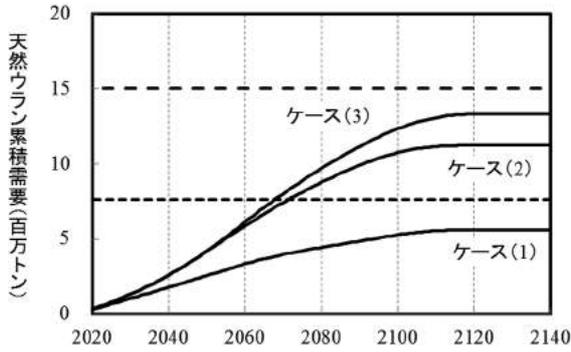


図3 天然ウラン累積需要の見通し
(2060年高速炉導入, 世界合計)

図3は2060年以降全ての新規建設を高速炉に限定し、残存する軽水炉は60年運転に絞った場合の天然ウラン需要を示している。2100年に4.5倍の原子力容量を目指すケース(3)でも全ウラン資源1,506万tに達することは無く、残存する軽水炉を助けることが期待できる。

IV. 国内原子力の見通し

ところで国内の原子力再稼働は、福島第一事故の教訓を反映して圧倒的に安全性を向上し、原子力規制委員会の新規基準に適合した原子炉のみが許される。2017年11月現在、新規基準への適合性審査にかけられた原子力発電所は26基である。2030年に原子力比率を最低限20%とする原子力設備容量は、前述の「長期エネルギー需給見通し」と同一の条件で計算して：

$$(1.065\text{TWh} \times 20\%) \div (8,766\text{h/年} \times 70\%) = 35\text{GW}$$

であるが、図4に示した通りこの26基では全く足りず、残る既設炉(未申請14基)の全てを再稼働してもまだ足りず、既設炉を全て再稼働しかつ60年運転とすることでようやくクリアできる。なお建設工事が進捗しているものを除けば、12年後に迫る2030年に新規建設を間に合わせることはこれまでの建設経験から見てもはや困難である。

2030年20%供給を果たしたとしても、その後原子力設備容量は再び急坂を駆け落ちるが如くに減少する。

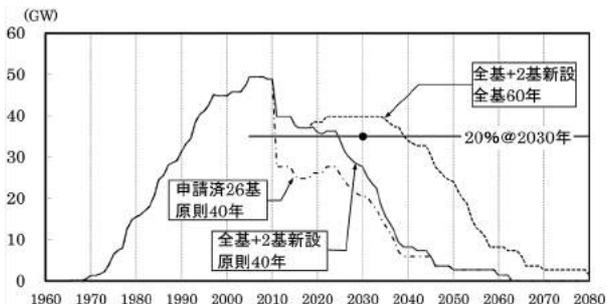


図4 原子力発電設備容量の見通し

- ・地元の理解獲得が難しい福島第二1~4号と、福島第一事故前に設置許可申請されたが本格着工していない敦賀3・4号、上関1号を除いた。
- ・工事が大きく進捗している島根3号と大間が含まれている。

2030年以降の電力需要の公式見解は無いが、わが国の人口減少と一方では自動車の電化が進むことから先ずは大きく変わらないと考え、更に2030年以降も原子力発電比率20%を維持するとすれば、図5のように2040年には新規建設による大量リプレースを実現する必要がある。それらの運転開始までに現在から22年の時間余裕がある。廃炉の跡地を利用するのは間に合わないとしても、福島第一事故の前に名前が出ていた新規建設計画の内、キャンセルされていないものが約10基あること(跡地利用ではない)を考えれば、2040年以降の運転開始、更に社会受容性を高めた次世代型軽水炉の新規立地による2050年までの運転開始(全合計10数基)は見通しが無いことではあるまい(30年程度の時間余裕)。

次の課題は高速炉の本格導入時期である。次世代軽水炉であれ高速炉であれ、既設炉の設備容量を置換する原子炉の建設時期と導入パターンは、研究開発セクターの都合を考慮しない。電力供給手段としての位置付けから、既設炉の寿命が来ればそれに間に合って運転開始できないものは採用されないし、必要な設備容量を超えて追加的に新規建設するニーズも無い。このことを念頭に図6を見ると、高速炉の導入が2060年まで遅れてしまう場合、前節で示した通り今世紀後半には全世界で高速炉が必要にもかかわらず、わが国では2100年頃まで高速炉が少数派ということになり、それではウラン調達上大変に不利である。すなわち2050年代のできるだけ早くには、既設炉をリプレースする新設として軽水炉を避け、全て高速炉とする必要がある。高速炉の研究開発を担当する研究開発機関と炉メーカーの役割は重大で、時間スケールの短さを肌身に感じて貰わねばならない。なお本節に示した図は公開データだけに基き誰にでも作れるものである。

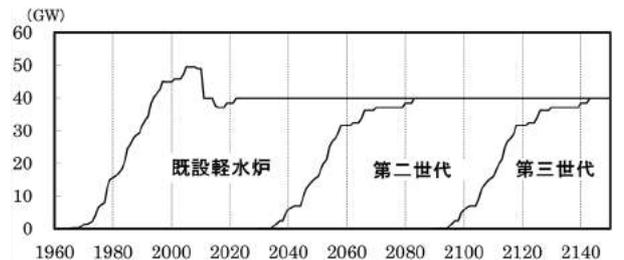


図5 原子力リプレースの長期見通し

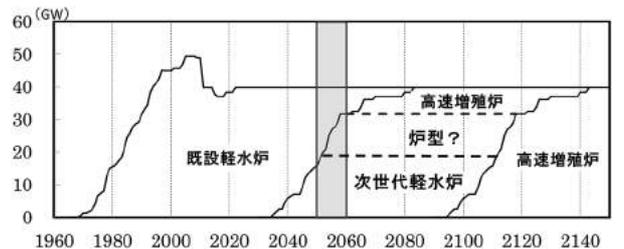


図6 炉型シェアの見通し
(2050年代の早期に高速炉本格導入が必要)

既設炉を40年の2倍、80年間運転するという選択肢もあるが、その場合はもはや軽水炉の新規建設、次世代軽水炉の開発は止め、2060年本格運転開始を目指して高速炉実用化に集中投資すべきということになる。

V. 軽水炉核燃料サイクルの見通し

原子炉の運転を支える核燃料サイクルの見通しを論ずる。六ヶ所工場は国内軽水炉から発生する使用済ウラン燃料を年間800t再処理する能力を有する。これまでの試運転(アクティブ試験)で既に425tを再処理した。ところで2030年の原子力比率20%から発生する使用済燃料は「長期エネルギー需給見通し」の計算条件に従うと：

$$(1,065\text{TWh} \times 20\%) \div (45\text{GWd/t} \times 24\text{h/d} \times 34.7\%) = 570\text{t/年}$$

となり800t/年よりも少ない。一方国内の各原子力発電所と六ヶ所工場には未処理の使用済燃料が合計17,800t保管されている⁵⁾。そこで既保管分と今後40年間の発生分の合計を考えると、

$$17,800 + (570 - 96 - 40) \times 40\text{年} = 35,160\text{t} > 32,000\text{t}(=800 \times 40\text{年})$$

となり、実は六ヶ所工場をフル操業したとしても再処理し切れず、収支均衡状態(570t/年)に下げる余裕は無いのである。なお使用済ウラン燃料中に残存する核分裂性Puの割合を0.6%とすると、800t/年の再処理から核分裂性Puが4.8t/年発生し、これを5%富化度の軽水炉用MOX燃料に成型加工するとすれば、六ヶ所MOX燃料工場から96t/年のMOX燃料が生産されて国内のプルサーマル対象炉に出荷される。上の式で570tから96tを差し引いたのは、六ヶ所工場では使用済MOX燃料を再処理しないことになっているためである。また英仏にある日本のPuからMOX燃料を作り、海上輸送して日本の軽水炉に装荷する将来の安定状態の量は核分裂性Puで1~2t/年であろうから、MOX燃料集合体で20~40t/年ということとなり、その最大値として40t/年を上式の式から除いている。

原子力比率20%が、国内外で製造されるMOX燃料を装荷する余裕を持っているかチェックする。1基はフルMOX炉(取替率23t/年)、普通のプルサーマル対象炉は1/3ないし1/4プルサーマルであるから平均1/3.5として；

$$(96 + 40 - 23) \times 3.5 = 396 < 547(=570 - 23)\text{t}$$

となり、十分なMOX装荷枠を持っていることが分かる。プルサーマル対象炉は福島第一3号炉を除いて廃炉対象とはなっていないし、長期的には炉寿命到達に応じた対象炉の調整(選手交代)をすればよいものである。

図7は、原子力発電所を原子力比率20%で、また六ヶ所再処理工場を800t/年で定常稼働する場合の国内核燃料物質フロー、必要天然ウラン量などを示したものである。なお回収ウランの濃縮度を天然ウラン相当

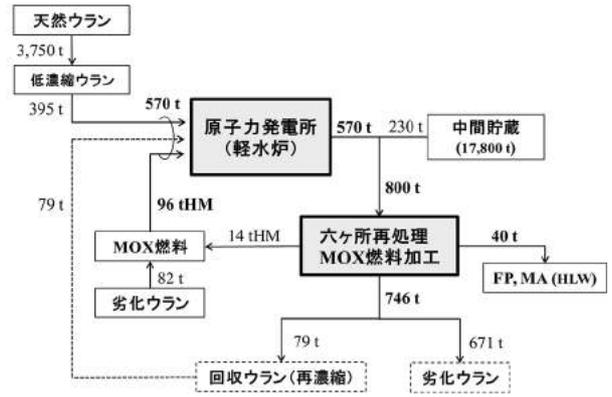


図7 国内核燃料サイクルの物質フロー

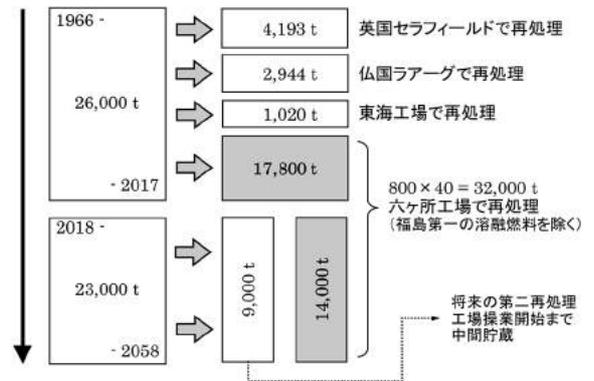


図8 日本の使用済燃料再処理の実績と将来

(0.711%)として、再濃縮し軽水炉へ供給する流れを考慮に入れている。また図8には国内の使用済燃料の再処理実績と今後の見通しをまとめた。

VI. 高速炉導入に向けた核燃料サイクル

IV節で述べた通り軽水炉の設備容量の急速な低下を補償すべく2050年代のできる限り早くに高速炉を運転開始するためには、その高速炉が自ら増殖するPuを回収し再び新燃料として炉心装荷できるまでの間、初装荷燃料および初期段階の取替燃料の製造に大量のPu供給が必要である。六ヶ所工場は2060年頃まで40年間操業することになるので、操業末期にはプルサーマル供給を止め、軽水炉から発生する使用済MOX燃料を集中的に再処理することが必要となる。使用済MOX燃料は使用済ウラン燃料より多くのPuを内蔵し、高速炉への効率的なPu供給源となるからである。高速炉用のPu燃料製造工場は、1基目の高速炉の初装荷に間に合うように操業開始しなければならず、これは高速炉の使用済Pu燃料を扱う第二再処理工場よりもはるかに早いこととなる。なお、六ヶ所工場が軽水炉の使用済MOX燃料の再処理を終了した後は、中間貯蔵された使用済ウラン燃料ならびに運転継続している軽水炉の使用済ウラン燃料を再処理してPuを高速炉に供給することが、高速炉の使用済Pu燃料の再処理と共に第二再処理工場の重要な任

務となる。

もし将来の高速炉が金属燃料炉心であれば、軽水炉の使用済 MOX 燃料は六ヶ所工場ではなく乾式再処理技術によって処理し Pu 燃料を製造することとなり、その場合には第二再処理工場は高速炉の導入に間に合うようはるかに早く建設されねばならない。

なお、高速炉用の Pu 燃料を製造するための母材となる劣化ウランは、六ヶ所濃縮工場の副産物として十分な量が蓄積されつつある。また六ヶ所再処理工場で回収されたウランを再濃縮した新燃料は、第二世代の軽水炉へ供給してこの時代の天然ウラン調達量の削減に貢献させるという考え方もあろう。

VII. Pu 保有量について

現在わが国は六ヶ所工場に 3.6t、原子力発電所に 1.6t (完成 MOX 燃料)、原子力機構に 4.6t、合計 9.8t の Pu (全同位体計)を「分離プルトニウム」として保管している⁶⁾。実際には全てウラン酸化物との混合状態にある。また海外には英国に 20.8t、仏国に 16.2t、合計 37.1t を保有している。このうち特に六ヶ所工場にある 3.6t の Pu が論議的となる。Pu 型原爆で何千発分と言った具合である。しかし熱エネルギーを安定かつ継続的に取り出す燃料として使う場合の量と、爆発力だけ持つ原子爆弾とを単純に比較して議論することは大きなミスリードである。

エネルギー資源の乏しいわが国には、高速炉とその核燃料サイクルが必要であり、その高速炉の導入には現在の議論とは比較にならない量の Pu が必要である。例えば 20GW の高速炉の立ち上げには 160t 程度の Pu (核分裂性 Pu で 120t)が必要である。再処理で回収された Pu はできるだけ早く高速炉用の Pu 燃料に成型加工したとしても「分離プルトニウム」にカウントされ、炉心で燃え始めるまで帳簿からは消えない。

燃料としての Pu の保管は IAEA の厳しい査察を受けており、日本の誠実な平和利用の姿勢は IAEA から高く

評価されている。プルサーマル対象炉が順調に MOX 燃料を受け入れることが大前提だが、そのもとで六ヶ所再処理と MOX 燃料工場を安定に稼動するために貯蔵設備容量を生かした柔軟なランニングストックの確保が重要である。現在の僅か 3.6t の Pu 保管も、また今後の再処理稼動も議論となるようでは、日本のエネルギー確保は覚束ない。

資源の乏しいわが国にとって、安定かつ長期に持続可能なエネルギー供給を確立できる原子力と核燃料サイクルの組み合わせが最良の選択肢であるという単純明快な原理をいくら説明しても理解しただけでなく、開発の遅延を嬉々として報道ネタに取り上げるマスコミの態度には甚だ嫌気を感じるころであるが、原子力分野に取り組む研究者、専門家、そして先見的な有識者の方々には、本稿で述べたような長期のビジョンを念頭に一般社会の理解獲得に協力して頂きたいと願うものである。

－ 参考資料 －

- 1) IAEA ; International Status and Prospects for Nuclear Power 2017.
- 2) 環境省 ; <http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/>
- 3) OECD/NEA, IAEA ; Uranium 2016 : Resources, Production and Demand.
- 4) UxC 社提供データ ; <https://www.uxc.com/p/prices/UxCPriceChart.aspx?chart=spot-u3o8-full>
- 5) 電気事業連合会 ; 使用済燃料貯蔵対策への対応状況について (2017 年 10 月 24 日).
- 6) 原子力委員会 ; わが国のプルトニウム管理状況 (2017 年 8 月 1 日).

著者紹介



田中治邦 (たなか・はるくに)

日本原燃
(専門分野/関心分野) 炉心設計,
安全解析, リスク評価, 核燃料サイクル,
原子力発電の経済性

地政学的リスクとエネルギー

第5回 ロシアのエネルギー資源開発情勢

東京大学 小宮山 涼一

ロシアは世界屈指のエネルギー資源大国である。ウクライナ問題による欧米の対ロシア制裁の中、ロシアはエネルギー生産増強、輸出先多様化を図るため、ロシア西部の油田・ガス田の老朽化も踏まえ、東部や北極圏の開発を進めている。日本はロシアとの関係に関して、東シベリアやロシア極東の石油・ガス調達によるエネルギー安全保障上のメリット、対ロシア制裁をはじめとする国際情勢等を総合的に考慮し、引き続き慎重な対応が求められる。

KEYWORDS: *Russia, 2014 Crimean crisis, economic sanction, crude oil, natural gas, East Siberia, Sakhalin, Arctic coast, ESPO oil pipeline, Nord Stream pipeline*

I. はじめに

ロシアはエネルギー賦存量、生産量、輸出量において世界屈指のエネルギー資源大国であり、世界のエネルギー消費を満たす上で重要な役割を担う。特に原油や天然ガスの輸出先の大部分が欧州であり、エネルギー貿易上においてロシアと欧州の関係は深く、欧州のエネルギー需給安定化に不可欠な供給国である。そして近年のロシアの資源開発は、資源供給力のさらなる増強や需要の伸びるアジアへの輸出先多様化を目指して、現在の生産拠点であるロシア西部での油田・ガス田の老朽化も踏まえ、従来の西部から東部へシフトしつつある。

一方、2014年のクリミア併合に伴うウクライナ問題をうけた欧米の経済制裁発動により、ロシア経済の展望が不確実性を増している。現在、原油価格が徐々に持ち直し、ロシア経済の回復が予想される中、米国の制裁対象としてロシアのエネルギー事業に従事する企業も含まれており、制裁がさらに強化され、長期化すれば、ロシア経済の持続的な発展に影響を及ぼす可能性もある。

また日本にとってロシアは、石油・ガス資源の調達面での中東依存度低減で重要な役割を担う一方、領土問題といった政治的に難しい問題を抱えており、慎重な外交政策が求められる状況にある。本稿では、ロシアのエネ

ルギー情勢と地政学的影響に関して解説する。

II. ロシアの経済情勢

1. 経済の概況

ロシアの石油・ガス輸出収入は輸出総額の半分を占め、財政面でも石油・ガス部門の税収が歳入の多くを占め、ロシアの経済や財政上で重要となっている。

ロシア経済は近年、原油価格低迷や為替安(ルーブル安)により、経済成長率が鈍化していた。これまで2014年にかけて、原油価格高騰等をうけ、ロシアは石油・ガス輸出収入の増加、内需拡大により経済発展を遂げた。輸出総額に占める石油・ガス輸出比率も一時7割に達し(図1)、ロシア経済に貢献してきた。しかし2014年後半からシェール革命による国際的な油価低迷をうけて、ロシアの景況が悪化し、GDP成長率は2015年にマイナス2.8%、2016年はマイナス0.2%となった(図2)。今後

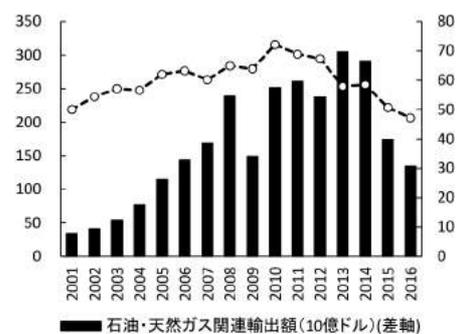


図1 ロシアの石油天然ガス輸出額の推移 (出所)文献¹⁾を基に筆者作成

Geopolitical risk in energy market (5) ; Energy resource development in Russia : Ryoichi Komiyama.

(2017年12月11日 受理)

■前回のタイトル

第4回 中東産油国の情勢と地政学的リスク

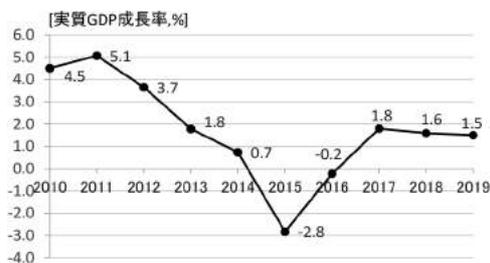


図2 ロシアの経済成長率の推移と短期見通し
(出所)文献²⁾を基に筆者作成

は、現在持ち直しが見られる原油価格の緩やかな回復を受けて、ロシア経済も徐々に回復基調に入ると予測されている。しかし長期的には、国際的な気候変動対策を受け、化石燃料の消費は以前ほど伸びが見込めないため、ロシアのエネルギー産業にとって以前より厳しい事業環境になる可能性もある。原油・ガス輸出収入を源泉とした経済発展戦略の実効性にも不確実性が増す可能性もあり、エネルギー資源に依存する経済構造を少しでも是正し、経済の高度化を図ることがロシアにとって重要な課題として位置づけられている。

2. ウクライナ問題とロシアへの経済制裁

ウクライナ問題を巡り、ロシアは欧米との政治的対立を深めている。2014年2月のウクライナでの政権崩壊をうけ、ロシアはウクライナへ内政干渉、軍事介入し、国際社会の批判の中で、クリミア共和国を併合した。これに対して、国際社会はロシアに対する安全保障上の懸念を強め、米国や欧州、G7諸国は2014年にロシアへの経済制裁を発動して³⁾段階的に強化しており、厳しい姿勢を見せている。最近では2017年8月、米国議会で対ロシア制裁強化法が承認され、米国企業によるロシア企業への投資制限、ロシア側の権益比率の高いエネルギー事業への米国企業の参入制限が定められたが(第232条⁴⁾)、注目を集めた点は、ロシアのガス輸出パイプライン建設などエネルギー開発へ参画する外国企業への制裁が定められた点にある。制裁対象には欧州企業が協力するロシアの欧州輸出向けガスパイプライン建設事業(Nord Stream 2: 2019年完成を目指すドイツ・ロシア間を直結する海底パイプライン、輸送能力LNG換算年間約4千万トン⁵⁾(参考: 日本の2016年のLNG輸入量は8千4百万トン))も対象となる可能性があり、米国の制裁に対して、ドイツ等から欧州域内のエネルギー安全保障に影響を与える可能性があるとして懸念が示されている。また、欧州も対ロシア制裁を強化しているが、欧州域内では旧東欧諸国がクリミア併合でロシアの政治的影響が強まることを危惧する一方、ロシアへのエネルギー輸入依存度や貿易依存度が高い国は、対露制裁による自国へのエネルギー調達や経済への間接的影響を懸念する面もあり、欧州諸国の制裁への姿勢は様々である実態も

ある。いずれにしても、欧米のロシアに対する厳しい経済制裁の解決の糸口は見えない不確実な状況にある。

Ⅲ. ロシアのエネルギー資源情勢

ロシアの石油・ガス資源は豊富であり、原油とガスの確認埋蔵量は2016年現在、世界6位、世界2位にある⁶⁾。またロシアは世界2位の原油生産量、世界最大の石油輸出量(図3)、世界2位の天然ガス生産量、世界3位の石油製品生産量⁶⁾、世界3位の石炭輸出量⁵⁾にあり、国際市場に大きな影響力をもつエネルギー資源大国である。原子力設備容量も世界5位で新規建設も積極的に進め、建設中容量は中国に次ぐ世界2位にあり⁷⁾、石油、天然ガス、原子力、石炭をエネルギー戦略上の重要オプションとしている。

一方、ロシアは石油、天然ガス共に生産能力最大限で生産しているが、西シベリア等の主力の既存油田、ガス田は老朽化等により、長期的な生産能力の減退が見込まれている。そのため、持続的な生産維持の実現、エネルギー産業の発展には、東シベリア、ロシア極東や北極圏などでの資源開発が重要な課題として位置づけられている。また販路として、既存の主力市場である欧州への安定した輸出の継続や、アジア市場を重視した新規開発・輸送ルート整備が課題となっている。ロシアの石油・ガス輸出先は現在、CIS諸国を含めると欧州がそれぞれ7割、9割を占め(図4、図5)、欧州への依存度が高い。しかし欧州の需要は気候変動対策、経済成長の飽和を受け大きな伸びが見込めず、輸出先の多様化を進めるロシアにとって、アジア市場の重要性が増している。原油は、サハリン事業とESPO(東シベリア-太平洋)パイプラインが2010年に稼働してアジアへの輸出が増加し、LNGに関しては輸出総量の7割を日本向けが占め、日本の関与が大きい。

1. ロシアの石油開発情勢

ロシアは国際石油市場の生産調整役であるサウジアラビアとは異なり、最大生産能力で原油生産を行って

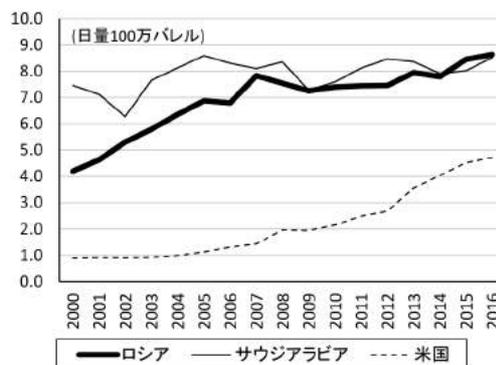


図3 ロシアの石油輸出量の推移
(出所)文献⁶⁾を基に筆者作成

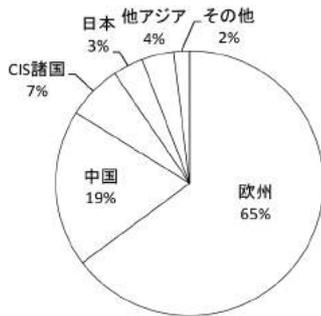


図4 ロシアの石油輸出先の内訳
(出所)文献⁶⁾を基に筆者作成

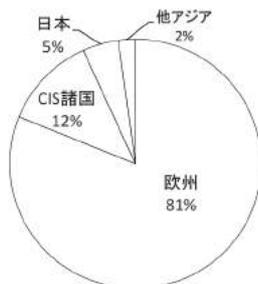


図5 ロシアの天然ガス輸出先の内訳
(出所)文献⁶⁾を基に筆者作成

り、原油輸出による安定的な輸出入確保が重要となっている。ロシアの石油生産の大部分は現在、欧州に地理的に近く資源量の大きい西シベリアなどロシア西部で行われているが、長期的な石油生産量維持には、老朽化が見込まれる西シベリア既存油田の回収率向上とともに、開発余地の大きいロシア東部や北極圏、カスピ海地域の開発が重要となっており、現在、これらの地域の生産量は総生産量の約1割であるが⁵⁾、徐々に増加している。

現在、ロシアの原油生産日量1100万バレルのうち、同400万バレルを国内消費、残りの同700万バレルを輸出しており、輸出の7割が欧州向け、3割がアジア向けである。ロシアの原油輸出に関しては、欧州が輸出先の中心にあるが、アジア太平洋市場の開拓による原油輸出先の多様化を図っている。特に東シベリアから極東にかけて油田の探鉱開発が進められ、東シベリアのアジア向けパイプラインの輸送能力を強化している。ロシアの原油輸送パイプライン(図6)は、ロシア西部に輸送能力日量570万バレル、東部に同370万バレルが操業しているが、ロシア東部地域を中心に同140万バレルの増強が計画されている⁵⁾。特にアジア向けの輸出能力は、東シベリア-太平洋原油パイプライン(ESPO)の2010年の稼動開始により強化され、ロシアの原油パイプラインは東西両方向に本格的な整備が完了した。ESPOパイプラインは、東シベリア産原油をナホトカ付近の輸出ターミナル港まで輸送し、さらに同港よりアジアへ輸出する重要な役割を担い、現在の輸送能力は日量約100万バレルであるが、2020年に同160万バレルへ増強、中国向け支線は同



図6 ロシアの原油パイプライン
(出所)文献⁸⁾より転載

40万バレルから2018年に同60万バレルへ拡張予定である⁵⁾(参考：日本の2016年の石油消費量は日量400万バレル)。ESPOの完成によりロシアの中国向けの輸出比率が徐々に増加し、中国の石油輸入に占めるロシア産原油の比率は伸びており、中国の原油輸入の分散化が進み、原油貿易でのロシアと中国の関係が深化しつつある。また、ロシア極東のサハリン産原油を輸送するサハリン1パイプライン(サハリン東岸の沖合油田の原油を間宮海峡対岸の輸出ターミナル港へ輸送。サハリン1原油の性状は軽質、低硫黄であり品質が高い)やトランス・サハリンパイプライン(サハリン東岸の油田の原油をサハリン南端の輸出ターミナル港へ輸送、輸送能力は日量20万バレル)も整備され、ロシアの原油輸出のアジアシフトが進展している。加えてロシアは、原油生産基盤強化を目指し、シェールオイル開発事業を進めているが、ウクライナ問題をめぐる欧米の経済制裁に伴う石油開発技術の輸出制限をうけ、シェールオイル開発は停滞している状況にある。

2. ロシアの天然ガス開発情勢

ロシアは、世界の天然ガス資源の4分の1を保有する世界最大のガス資源国、世界最大のガス輸出国であり、世界2位の輸出国であるカタールの輸出量に比べ7割も大きい(図7)。また米国に次ぐ世界2位のガス生産国であり、生産はヤマル地域など西シベリアを中心に行われている。現在、ガス生産の7割を国内消費、残りの3割を輸出し、輸出先の9割が欧州、残りはアジア向けのLNGとなっている。また欧州のガス消費の3割をロシア産ガスが占め、フィンランドなどほぼ全量をロシア産ガスに依存している国があること、北海ガス田の枯渇化の影響により欧州域内のガス生産が減産傾向にあることから、ロシアは欧州にとって最も重要な天然ガス供給国として位置づけられ、欧州のガス安定供給確保に貢献している。

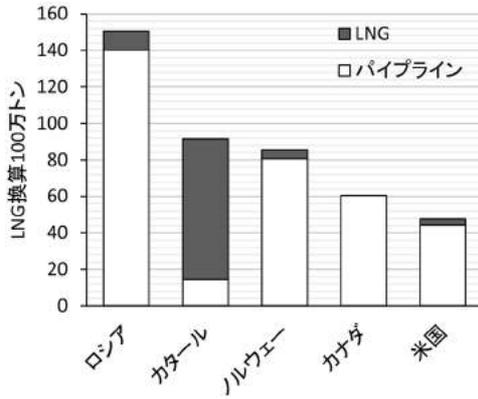


図7 世界の天然ガス輸出货量上位5ヶ国(2016年)
(出所)文献⁶⁾を基に筆者作成



図8 ロシアの天然ガスパイプライン
(出所)文献⁸⁾より転載

インフラ面では、天然ガス生産の中核拠点である西シベリアからの欧州向けパイプラインが主として整備されている(図8)。現在、操業中のパイプラインのガス輸送能力は欧州向けのロシア西部で年間12兆立方フィート(LNG換算2.5億トン)、アジア向けのロシア東部で0.5兆立方フィート(同1千万トン)で、欧州向けパイプライン輸送能力が大きいが、東部では現在2.2兆立方フィート(同4.6千万トン)の容量が新規建設中、増強中にあり、輸出先の多様化を図るため、東部でのアジア向けの輸送能力強化が計画されている。またロシアの東西のパイプラインは未接続であるが、将来、接続する計画もある。

これまでロシアから欧州への天然ガス輸出パイプラインは、その多くがウクライナを経由しているが、2009年にはロシアとウクライナ間のガス取引価格交渉の決裂等をうけたロシアからウクライナへの天然ガス供給停止により、欧州諸国へのガス供給も停止に至った。ウクライナ経由を回避してドイツとロシアをバルト海経由ルートで直接結んだNord Streamパイプラインが2011年に稼働を開始しているが、これを踏まえ、この増強計画であるロシア主導のNord Stream 2パイプライン計画の進展を促した。しかし、同計画に対する欧州諸国の姿勢は異

なっている⁸⁾。温室効果ガス削減などで天然ガス需要の増加が見込まれ、ロシア産ガスが供給面で一定量が必要となるドイツ、フランス等は支持する一方、ウクライナはNord Stream 2パイプライン建設により、領内を通過するロシア産ガス減少、通過料収入低下を懸念し、反対の姿勢を示している。東欧諸国、北欧諸国の一部も天然ガスのロシア依存上昇は、欧州のエネルギー安全保障上のリスクとして消極的である。

また、Nord Stream 2建設の問題は国際問題に変容した。2017年8月、米国で成立した対ロシア制裁強化法では、米国、域外国を問わずロシアのエネルギー輸出パイプラインへの投資や資材提供の禁止条項が定められた。Nord Stream 2建設に従事する欧州企業にも適用可能性が言われており、ドイツ等の欧州企業や欧州諸国の一部の政府も米国の対露制裁法へ反対している。

3. 東シベリア、ロシア極東、北極圏のガス開発情勢

ロシアの最大輸出先の欧州のガス消費は大きな伸びが見込めないこと、西シベリアの天然ガス生産は資源制約により拡大が見込めないこと、中国などアジアの需要増大が期待できることから、原油同様、ロシアのガス開発投資は東シベリアやサハリン等で伸びており、ガス開発拠点はロシア東部へシフトしている。ロシア東部のガスパイプライン建設も徐々に進み、ロシア極東では、トランス・サハリンパイプライン(サハリン北端から南端のサハリン2のLNG輸出基地への輸送パイプライン)、サハリン-ハバロフスク-ウラジオストクパイプライン(サハリン北端からウラジオストクへのガス輸送、LNG輸出計画中のパイプライン)が2011年に完成し、ロシアと中国を結ぶPower of Siberiaガスパイプライン計画は、完成すれば輸送能力は最大でLNG換算4千5百万トンに達する計画であり、ロシアと中国のエネルギー貿易上の関係が深まりつつある。

また、ロシアは輸出先の多様化を視野に入れて、LNG開発も極東や北極圏で進めている。サハリン2事業は、現在稼働中のロシアの唯一のLNG輸出事業であり、日本と関連の深い極東LNG事業であり、日本から最短距離にあるLNG輸出基地である。LNG船による輸送日数は中東からの場合約3週間であるが、サハリンからは3日間のため、安定供給上のメリットが大きい。液化輸出能力は1千万トンにおよび、日本の電力・ガス会社向けにその7割が輸出されて日本のLNG需要の1割を担い、残りは韓国、台湾、中国向けに輸出されている。

またロシアは、北極圏のヤマル半島でガス田開発、およびヤマル東岸でLNG基地・輸出港の建設を進め、北極海航路等によるLNG輸送も検討している。このヤマルLNG事業は、ロシアの他、フランス、中国等が進めており、液化輸出能力は最大で年間1,650万トン(550万ト

ンを3系列)に達すると見込まれる。またヤマル半島からの出荷航路は欧州向け航路やスエズ運河経由にてアジア向けに輸出する航路、それに加え、夏季に北極海航路⁵⁾にて砕氷LNG船にてアジア向けに輸出する航路が検討されている。その他にも現在、建設中、計画段階にあるLNG事業は計約5千万トン、構想段階にあるLNG事業も約5千万トンもある⁵⁾。一方、近年のシェール革命の影響をうけて、米国の新設LNG基地より欧州向けをはじめとしたLNG輸出が今後増加する見込みであり、ロシアをはじめ米国、オーストラリアなど主要LNG輸出国間で、欧州市場をはじめ国際的なLNG市場の競争化が進むと考えられる。

IV. 日本への示唆

日本の石油輸入の中東依存率は約8割で依然高止まりしているが、ロシアの資源開発がロシア東部へシフトする中、サハリンでの石油開発や東シベリア・太平洋パイプライン(ESPO)の完成により、ロシアは第4位の原油輸入先となり、ロシア産原油の輸入比率も約1割まで増加⁹⁾、中東依存度の低減に貢献している。ロシア産原油輸入による中東依存度抑制は、ホルムズ海峡やマラッカ海峡といった海洋チョークポイント通航の回避、原油輸送日数の大幅な短縮など、エネルギー安全保障上においてもメリットがある。また天然ガスについても、サハリンでのLNG事業により、日本のLNG輸入総量の約1割に達している。日本の現在の主要なLNG輸入先はインドネシアやマレーシアなど東南アジア諸国が含まれるが、内需の増加、資源生産の頭打ちで輸出余力が将来抑制される可能性もあるため、日本の天然ガス安定供給確保の上で、ロシアのLNG事業への日本の協力は意義がとて大きい。

日本とロシア間では2016年、北方領土交渉と同時に、東シベリアやサハリンでのエネルギー開発等への協力の合意¹⁾が成立した一方、日本は同年、ウクライナ問題を受けてロシア制裁継続の方針を確認している。日本はロシアとの関係に関して、東シベリアやロシア極東の石油・ガス調達によるエネルギー安全保障上のメリット、

対ロシア制裁をはじめとする国際情勢等を総合的に考慮し、引き続き慎重な対応が求められる。

－ 参考資料 －

- 1) 経済産業省, 通商白書 2017 (2017),
< <http://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2017/index.html> >
(アクセス日: 2017年11月10日).
- 2) IMF, World Economic Outlook, October 2017 (2017),
< <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2017/09/19/world-economic-outlook-october-2017> >
(アクセス日: 2017年11月10日).
- 3) U. S. Department of State, U. S. Relations With Russia, December 2016 (2016),
< <https://www.state.gov/r/pa/ei/bgn/3183.htm> >
(アクセス日: 2017年11月1日).
- 4) U.S. Department of State, CAATSA/CRIEEA Section 232 Public Guidance, October 2017 (2017),
< <https://www.state.gov/e/enr/275195.htm> >
(アクセス日: 2017年11月1日).
- 5) US DOE/EIA, Russia Country Analysis Brief, October 2017 (2017),
< <https://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=RUS> >(アクセス日: 2017年11月1日).
- 6) BP, Statistical review of world energy 2017, 2017,
< <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> >
(アクセス日: 2017年7月25日).
- 7) 日本原子力産業協会「世界の原子力発電開発の動向 2017 年版」(2017).
- 8) 本村真澄「ロシア・CISにおけるパイプライン地政学」(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)石油・天然ガスレビュー, Vol.46, No.6(2012),
< https://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/4/4790/201211_001_a.pdf >(アクセス日: 2017年11月1日).
- 9) 経済産業省「平成 28 年度エネルギーに関する年次報告」(エネルギー白書 2017) (2017),
< <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/> >
(アクセス日: 2017年11月10日).

著者紹介

小宮山涼一 (こみやま・りょういち)

本誌, 59[7], p.57(2017)参照.

第4世代原子炉の開発動向

第1回 全体概要

日本原子力研究開発機構 佐賀山 豊, 安藤 将人

第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)では、安全・信頼性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性などに優れた次世代の原子炉システム(第4世代原子炉)として、ナトリウム冷却高速炉、鉛冷却高速炉、ガス冷却高速炉、熔融塩炉、超臨界圧水冷却炉、超高温ガス炉の6つの革新的原子炉システムが選定され国際的な研究開発が進められている。一部のシステムについては既の実証段階にあり、GIFの目標である2030年代以降の実用化が視野に入りつつある。

KEYWORDS: *Generation IV International Forum (GIF), Sodium-cooled Fast Reactor (SFR), Lead-cooled Fast Reactor (LFR), Gas-cooled Fast Reactor (GFR), Molten Salt Reactor (MSR), Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR), Very High Temperature Reactor (VHTR)*

I. はじめに

現行の軽水炉等に続く次世代原子炉である第4世代原子炉は、今後の世界のエネルギー需要に対応するため、安全・信頼性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性などを総合して他のエネルギー源に対して十分な優位性を備えた原子力システムである。

第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF: Generation IV international Forum)では、第4世代原子炉が備えるべき要件として開発目標を設定し、それら目標に適合しうる概念として、ナトリウム冷却高速炉(SFR: Sodium-cooled Fast Reactor)、鉛冷却高速炉(LFR: Lead-cooled Fast Reactor)、ガス冷却高速炉(GFR: Gas-cooled Fast Reactor)、熔融塩炉(MSR: Molten Salt Reactor)、超臨界圧水冷却炉(SCWR: Supercritical Water-cooled Reactor)、超高温ガス炉(VHTR: Very High Temperature Reactor)の6つの革新的原子炉システムを選定し、2030年代以降の実用化を目標とした技術ロードマップが作成されている。本稿では第4世代原子炉の最近の開発動向について概説する。

II. 第4世代原子炉の開発目標

GIFでは第4世代原子炉の開発目標として、表1に示すように、安全・信頼性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性の4分野について8項目を設定している。

安全性・信頼性については、安全かつ信頼性が高い運

The development status of Generation IV reactor systems (I); Overview : Yutaka Sagayama, Masato Ando.

(2017年11月28日 受理)

表1 GIFの開発目標と設計仕様の例¹⁾

| | 開発目標 | 設計仕様の例 |
|--------|--------------|---|
| 安全・信頼性 | 安全・高信頼な運転 | ・通常運転時における高い安全性・信頼性 |
| | 炉心損傷の防止 | ・事故頻度の最小化、事故時でも炉心損傷を発生させない設計 |
| | 施設外の緊急時対応が不要 | ・放射性物質放出の可能性・量を最小化するようにシビアアクシデントの制御、緩和が出来る安全系 |
| 経済性 | ライフサイクル・コスト | ・革新技術・材料によるコンパクトなプラントの追求 ・高燃焼度、高稼働率 |
| 持続可能性 | 放射性廃棄物最小化 | ・MA燃焼、長寿命FP蓄積防止 |
| | 高い燃料利用効率 | ・MA燃焼によるウラン資源有効利用(軽水炉から高速炉サイクルへ) |
| 核拡散抵抗性 | 核不拡散 | ・核物質拡散や制度悪用に対する制度的・技術的対策 |
| | 核物質防護 | ・IAEA指針・法規、サイクル概念に適した防護システムの採用 |

転ができること、炉心損傷の発生頻度が極めて低く炉心の損傷程度も小さいこと、敷地外の緊急時対応を不要とすることを目標としている。経済性については、ライフサイクル・コストが他のエネルギー源を凌駕すること、金融リスクが他のエネルギープロジェクトと比肩するレベルであることを目標としている。持続可能性については、燃料の効率的な利用、廃棄物減容と有害度低減を目標としている。核拡散抵抗性については、軍事転用の魅力度が低く盗取困難であること、テロリズムに対する核物質防護を強化することを目標としている。

これらの意欲的な開発目標を設定することで、GIFメ

ンバーによる国際的な研究開発協力を活性化するとともに、開発目標を達成するために必要な原子炉、エネルギー変換システム等に関する革新技術の研究開発が促進されることが期待されている。

Ⅲ. 各概念の開発状況の概要

第4世代原子炉の開発では、使用済燃料の再処理で得られたプルトニウム、ウラン、マイナーアクチニド(MA)を高速炉でリサイクルすることにより、ウラン資源の利用効率を向上するとともに放射性廃棄物を最小化するという考え方で、高温システムとすることで発電効率を向上させるとともに、プロセス熱利用や水素製造等の多目的利用を可能とするという考え方の概ね2つの目的でシステムの開発が進められている。表2に第4世代原子炉の各概念の概要を示す。

また GIF では「技術ロードマップ」を作成し、各システムの開発段階を「成立性確認段階(Viability Phase)」、「性能確認段階(Performance Phase)」、「技術実証段階(Demonstration Phase)」の三段階に分類し、開発目標を達成する第4世代原子炉を2030年以降導入していくために必要な研究開発項目を明らかにしている。技術ロードマップは2002年に初版が完成し、その後の進捗を反映して適宜見直されており、最新のものは2014年版が発行されている(図1)。

表2 第4世代原子炉の概要²⁾

| システム | 中性子スペクトル | 冷却材 | 出口温度 ℃ | 燃料 サイクル | 電気出力 MWe |
|------|----------|-------|-----------|----------------|-------------|
| SFR | 高速 | Na | 500-550 | クローズド | 50-1,500 |
| LFR | 高速 | Pb | 480-570 | クローズド | 20-1,200 |
| GFR | 高速 | He | 850 | クローズド | 1,200 |
| MSR | 熱/高速 | フッ化物塩 | 700-800 | クローズド | 1,000 |
| SCWR | 熱/高速 | 水 | 510-625 | オープン/ クローズド | 300-1,500 |
| VHTR | 熱 | He | 900-1,000 | オープン | 250-300 |

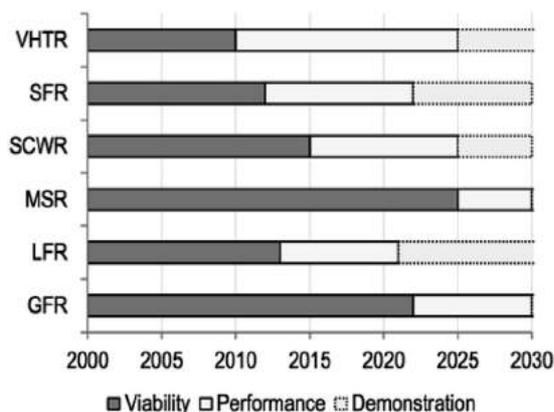


図1 GIFの技術ロードマップ(2014年版)³⁾

1. ナトリウム冷却高速炉

ナトリウムは中性子の減速が少なく、かつ、熱除去能力に優れており炉心の出力密度を高くすることができ、安価であることから高速炉に適した冷却材である。燃料形態として酸化物燃料(UO₂-PuO₂)、金属燃料(U-Pu-Zr)、窒化物燃料(UN-PuN)等が検討され、燃料増殖、使用済燃料に含まれるMAの燃焼が可能である。

ナトリウムは、沸点が約880℃と高く冷却系を低圧で設計できる、系統温度差を大きくとることができ空気を最終ヒートシンクとした自然循環による崩壊熱除去が可能、構造材との共存性に優れる、燃料の高燃焼度化や長期運転サイクルによる燃料費の低減が可能、稼働率向上による運転費の低減が可能、原子炉出口温度が500-550℃と高温であり高い熱効率を実現可能、等の利点を有している。

一方、ナトリウムは化学的に活性であり、水や空気と反応し大きな機械的エネルギーを発生したり燃焼したりする、不透明である、エネルギー変換システムとして蒸気発生器を採用する場合には、ナトリウム-水反応の影響が炉心に及ばないように2次ナトリウム系を設置する必要がある等の欠点を有している。

ナトリウム冷却高速炉の炉型としてはタンク型、ループ型が検討されており、出力規模は50-150MWeの小型炉から300-1,500MWeの中・大型炉まで開発されている。各国で実験炉、原型炉、実証炉の建設が進んでおり、GIFのロードマップでは2020年代から第4世代炉の実証段階に移行すると見込まれている。以下にナトリウム冷却高速炉の最近の主要な開発動向を示す。

(1) フランス

フランスは実験炉 Rapsodie (40MWt, ループ型)、原型炉フェニックス (250MWe, タンク型)、実証炉スーパーフェニックス (1,240MWe, タンク型)の開発を通じてナトリウム冷却高速炉の豊富な経験を有している。2006年の大統領宣言に基づき、第4世代原子炉を開発推進するための工業的実証を目的とした第4世代原子炉 ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)の開発を進めている。ASTRIDは1,500MWt(600MWe相当)、MOX燃料を採用したタンク型のナトリウム冷却高速炉であり、2030年代の運転開始を目指している(図2)。先行炉の経験を反映しつつ、課題であるナトリウム-水反応を排除するため窒素ガスタービン発電を主概念として採用する等、革新技術を採用した概念である。また、試験施設の整備も進められており、水ループ試験装置(GISEH)、小規模ナトリウムループ試験装置(PAPIRUS)が運転を開始し、高速臨界実験装置(MASURCA)の改造、大規模ナトリウムループ試験装置(CHEOPS)の設計・建設、シビアアクシデント時の熔融燃料挙動に関する試験装置(PLINIUS-2)の設計が進め

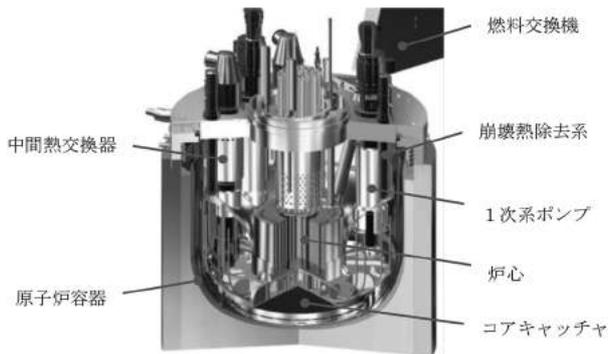


図2 ASTRIDの原子炉概念図⁴⁾

られている。

(2) ロシア

ロシアは実験炉 BR-5/10(8MWt, ループ型), BOR-60(12MWe, ループ型), 原型炉 BN-350(130MWe, ループ型), BN-600(600MWe, タンク型), 実証炉 BN-800(880MWe, タンク型)の開発を通じてナトリウム冷却高速炉の豊富な経験を有している。

2010年に策定した連邦目標プログラムに基づき2011年に開始されたProryv(ブレイクスルー)プロジェクトとして、鉛冷却高速原型炉 BREST-OD-300とナトリウム冷却高速実用炉 BN-1200の開発が進められている。

BN-1200(1,220MWe, タンク型)はBN-350, BN-600, BN-800等の開発と運転経験を基にして安全性、経済性の向上を図った概念であり、2030年頃の実用化を目指して設計が進められている(図3)。安全性向上のため、自然循環による崩壊熱除去系、受動的炉停止機構等が採用され、経済性向上のためには、軽水炉(VVER)と同等の発電コストの達成を目標として、BN-800までに採用されてきたモジュール型の蒸気発生器をユニット型の大型蒸気発生器に変更する、燃料取扱系を簡素化する等の革新技術を採用し建設費の低減を目指している。

また、照射試験炉 BOR-60の後継機である、多目的ナトリウム冷却高速試験炉 MBIR(150MWt)が2015年に着工され2020年頃の運転開始を目指して建設が進められている。MBIRは試験ループを3チャンネル装備し、異なる冷却材環境での照射試験が可能となっている。

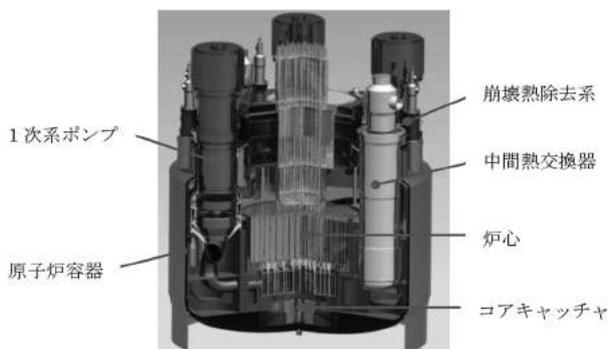


図3 BN-1200の原子炉概念図⁵⁾

(3) 中国

中国はエネルギー需要の大幅な拡大に備えて、増殖炉としての高速炉の早期の実用化を目指している。ロシアの技術協力を受けて、実験炉 CEFR(20MWe, タンク型)を建設し、2010年7月に初臨界、2014年12月に定格出力運転を開始した。CEFRの初装荷炉心はウラン酸化物燃料であるが、将来的にはMOX燃料を装荷する予定である。

中国は現在、自主技術によって実証炉 CFR600(600MWe, タンク型炉)を開発中であり2023年頃の運転開始を目指している。CFR600はMOX燃料炉心で、炉停止機構2系統の内1系統を受動的炉停止系とし、自然循環による崩壊熱除去系を採用することで安全性向上を図っている。続く実用炉 CFR1200(1,200MWe)は2020年に建設を判断し、2035年頃の運転開始を目指して概念検討が行われている。

また、米国 TerraPower社の進行波炉 TWR(Travelling Wave Reactor)の導入も検討されている。TWRはナトリウム冷却高速炉であり、金属燃料炉心に高濃縮ウランと劣化ウランや天然ウランを装荷し、順次内部転換しながら燃料交換しなくても長期運転を可能とする概念である。初号機の出力を300MWeとし600MWe, 1,200MWeに順次スケールアップする計画である。

(4) インド

インドは国内に豊富に存在するトリウム(Th)資源を有効活用するため、「U-Thサイクル」をベースとしたインド独自の原子力開発計画(熱中性子炉サイクル→高速炉サイクル→新型重水炉サイクルの3段階の開発計画)を1950年代前半に策定し、原子力開発を進めてきており、現在は第2段階の高速炉サイクルの開発を重点的に進めている。当面はMOX燃料サイクルの開発を進めるが、将来的には増殖性の観点から金属燃料サイクルに移行する方針である。

インドは実験炉 FBTR(13MWe, ループ型)を1985年から運転している。また、原型炉 PFBR(500MWe, タンク型, MOX燃料)は国産技術で開発され、2004年10月に着工、2015年7月に建設完了し、2018年に初臨界を達成する予定である。

今後は、PFBRに比べて安全性、経済性を向上した実用炉 FBR1&2(600MWe, タンク型炉, MOX燃料)をツインプラントとして建設し、2020年代後半に運転を開始する予定であり、将来的に金属燃料サイクル技術が成熟するまで、このFBR-600を実用炉として導入する計画である。また、金属燃料高速炉については、2030年以降の実用化を目指して開発が進められている。

2. 鉛冷却高速炉

鉛や鉛ビスマスは中性子の減速が少なく、かつ、熱除

去能力に優れており炉心の出力密度を高くすることができることから高速炉に適した冷却材である。燃料形態としては酸化物燃料(UO₂-PuO₂)、窒化物燃料(UN-PuN)等が検討され、燃料サイクルと組み合わせることで、燃料増殖、使用済燃料に含まれるMAの燃焼が可能となる。

鉛や鉛ビスマスは沸点が高く(鉛：約 1,750℃、鉛ビスマス：約 1,670℃)、ナトリウム冷却高速炉と同様に冷却系を低圧とすることができ、高温システムのため高い熱効率を実現可能であり、自然循環によって崩壊熱除去が可能である。また、ナトリウムと異なり、化学的に不活性であり、水や空気との反応を考慮する必要がない。そのため、鉛の1次系から中間系を介さずタービン系に熱を伝えることが可能という利点を有している。

一方、高温の鉛や鉛ビスマスは構造材料を腐食浸食する、さらにビスマスは中性子捕獲によってアルファ放射性核種の²¹⁰Poが生成する、比重が大きく厳しい地震条件下では大型化が難しい等、プラント健全性や保守性の観点で難点を有している。

鉛冷却高速炉としては出力規模 50-150MWe の可搬型小型炉、300-600MWe の中型炉が開発されている。GIFのロードマップではロシアでの意欲的な計画を考慮して2020年代から第4世代炉の実証段階に移行することが見込まれている。

最近の開発動向として、ロシアでは連邦目標プログラムに基づき、鉛冷却高速原型炉 BREST-OD-300 (300 MWe、窒化物燃料)、鉛ビスマス冷却高速炉 SVBR-100 (100MWe、ウラン酸化物燃料)の開発が進められている(図4)。BREST-OD-300は窒化物燃料製造施設と乾式燃料再処理施設を併設する PDEC (Pilot Demonstration Pyrochemical Complex) と呼ばれる施設に建設が予定されているが、最近では BN-1200 に続く将来炉の位置付けとされており、以前よりもその開発ペースはやや後退している。鉛ビスマス冷却高速炉 SVBR-100 は受動的な安全システムを採用した小型モジュール炉であり、遠隔地向け電源、熱供給、海水淡水化等の多目的利用を目的

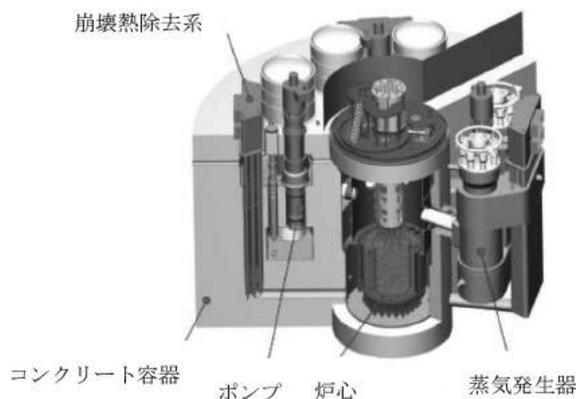


図4 BREST-OD-300のプラント概念図⁵⁾

に開発されている。

この他の鉛冷却高速炉としては、EUが開発している大型炉 ELFR (600MWe、MOX燃料)とその実証炉 ALFRED (125MWe、MOX燃料)、米国が開発している小型炉 SSTAR (20MWe、窒化物燃料)等がある。また加速器駆動方式(ADS: Accelerator-driven System)としてEUのMYRRHA、中国のCiADS等が開発されている。

3. ガス冷却高速炉

ガス冷却高速炉は高速炉心とヘリウム冷却材を用いた高温システムを組み合わせた概念である。燃料形態は混合炭化物燃料(UC-PuC)が検討され、燃料増殖、使用済燃料に含まれるMAの燃焼が可能となる。

炉心出口温度約 850℃の高温を活かし、プロセス熱利用や水素製造などの多目的利用が可能であり、また、ヘリウムが化学的に不活性、透明である利点を有している。

一方、ヘリウムは分子量が小さく、高圧システムであるため、漏えいを防止し難く漏えい監視が必要であること、高温ガス炉と異なり炉心領域に黒鉛減速材を持たないため熱容量が小さく燃料溶解に配慮が必要、などプラント設計上の配慮が必要となる。

ガス冷却高速炉としては出力規模 1,100MWe の大型炉が開発されている。GIFのロードマップでは2020年代前半に第4世代炉の性能確認段階に移行することが見込まれている。

最近のガス冷却高速炉の開発動向としては、EUのGFRが挙げられる。GFRは当初、熱出力 600MWt のヘリウムガスタービンによる直接サイクルの概念が検討されていたが、現在は実用化時期を早めるため開発課題を軽減した概念として、蒸気タービンを用いた間接サイクルを採用し、炉心の増殖性能を達成するため熱出力 2,400MWt に大型化した概念が主概念とされている(図5)。また、EUではGFRの実証炉として熱出力 75MWt の小型炉 ALLEGRO の開発が進められている。この他

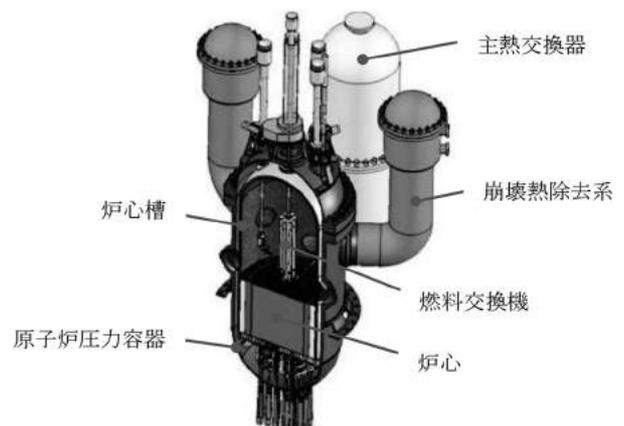


図5 GFRのプラント概念図³⁾

にも米国 General Atomic 社が小型炉 EM2(電気出力 265MWe)を開発している。

4. 溶融塩冷却炉

溶融塩冷却炉としては、2種類の概念が検討されている。1つは、燃料溶融塩が冷却材を兼ね核分裂生成物とともに炉心タンク及び1次系内を循環する概念。もう一つは、燃料に高温ガス炉の TRISO 燃料(炭化物燃料を低密度多孔性熱分解炭素(PyC)層で覆い、その外側を高密度等方性 PyC 層、SiC 層、高密度等方性 PyC 層の三層で被覆した被覆粒子燃料)を使用し溶融塩で冷却する概念。前者を MSR、後者の固体燃料を用いる概念を FHR (Fluoride salt-cooled High-temperature Reactor)と呼んでいる。

中性子スペクトルは熱中中性子と高速中中性子を利用する概念が検討されており、前者は主にトリウム燃料サイクルと組み合わせることで、後者はウラン-プルトニウム燃料サイクルと組み合わせることで計画されており、後者の概念では、燃料増殖、使用済燃料に含まれる MA の燃焼が可能である。

溶融塩は沸点が高く(約 1,400℃)、低圧系とすることができ、炉心出口温度が 700-800℃となる高温の熱源を活かし高い熱効率の実現が可能であり、プロセス熱利用や水素製造などの多目的利用も可能、という利点を有している。GIF のロードマップでは 2025 年以降に第 4 世代炉の性能確認段階に移行することが見込まれている。

最近の開発動向としては、溶融塩燃料を採用する概念として、ロシアの MOSART(1,000MWe)、EU の MSFR (1,400MWe)(図 6)、中国の TMSFR-LF、米国 TerraPower 社の MCFR 等が検討され、固体燃料を用いる FHR として、中国の TMSFR-SF(10Mwt)、米国 Kairos Power 社の FHR 等が検討されている。

5. 超臨界圧軽水冷却炉

超臨界圧水冷却炉は、原子炉冷却材に高温高压の超臨界圧水を用い、超臨界圧水を直接タービンへ送り発電する直接サイクルを採用する概念である。軽水炉のような原子炉冷却材循環ポンプや蒸気発生器が不要であり、プラントシステムを簡素化することが可能である。また、

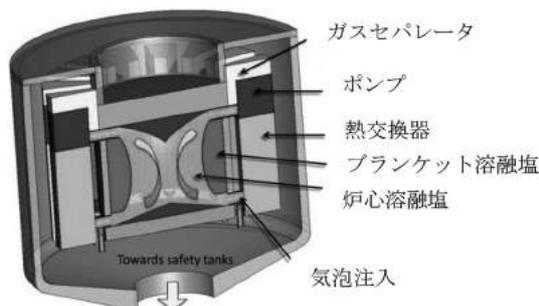


図 6 MSFR の原子炉概念図⁶⁾

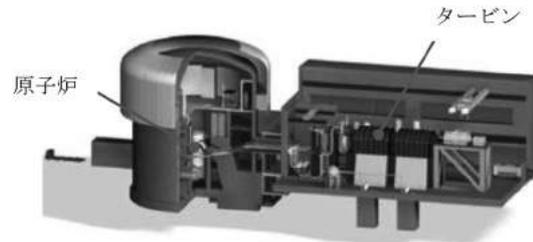


図 7 圧力管方式 SCWR プラント概念図⁷⁾

原子炉出口温度は 500~600℃と高温であり高い熱効率を達成できる、という利点を有している。

炉心は熱中中性子と高速中中性子を利用する概念が検討されており、プラント設計は、圧力容器方式(BWR タイプ)と圧力管方式(CANDU 炉タイプ)が検討されている。GIF のロードマップでは 2020 年代に第 4 世代炉の性能確認段階に移行することが見込まれている。

最近の超臨界圧軽水冷却炉の開発動向として、炉型については、カナダで圧力管方式の熱中中性子炉(SCWR)(図 7)、EU で圧力容器方式の熱中中性子炉が、日本で圧力容器方式の熱中中性子炉と高速中中性子の両者が、中国で圧力容器方式の熱中中性子(CSR1000)、ロシアで圧力容器方式の高速中中性子炉が検討されている。出力規模については、日本の高速中中性子炉の概念を除き、全て 1,000MWe 級の大型炉となっている。

6. 超高温ガス炉

超高温ガス炉はヘリウムガスを冷却材として用い、炉心出口温度が 750℃を超える高温システムを目指した概念である。燃料は TRISO 燃料を用い、燃料要素や炉心支持構造の多くに、減速材であるグラファイトを使用、燃料要素に高温耐性があり、かつ、炉心の出力密度が低いため、炉心からの熱輻射で崩壊熱除去が可能であるとともに、炉心燃料の熱容量が大きく、過渡変化時の挙動が緩慢という炉心安全上の特徴を有している。高温の熱源を活かし、高い熱効率の実現とともに、発電以外に、水素製造などのプロセス熱利用が可能である、という利点を有している。

ただし、この概念は再処理を行わないオープンサイクル概念のシステムである。

当初 GIF では、超高温ガス炉の炉心出口温度の目標を 1,000℃とし、ヘリウムガスタービンによる直接サイクル発電と水素製造と組み合わせた概念が検討されていたが、最近では早期に実現する概念として、炉心出口温度を 700-800℃に下げ蒸気タービンによる間接サイクルを採用することで開発リスクを抑制した概念が検討されている。GIF のロードマップでは 2020 年代に第 4 世代炉の実証段階に移行することが見込まれている。

超高温ガス炉の最近の開発動向として、中国における積極的な開発が挙げられる。中国は実験炉 HTR-10

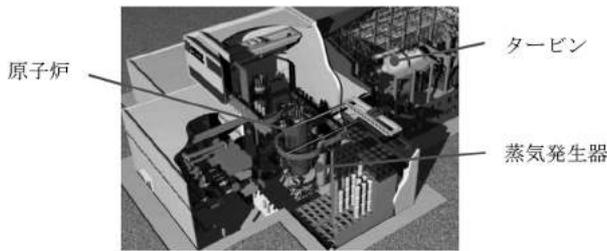


図8 HTR-PMのプラント概念図⁸⁾

(2.5MWe)を2003年から運転している。また実証炉HTR-PM(200MWe)を2012年から建設中であり、2018年の運転開始を目指している。HTR-PMは250MWtのペブルベッド型原子炉2基で200MWeの蒸気タービン発電を行う概念であり、原子炉出口温度は750℃である(図8)。

IV. 今後の計画・展開への期待

第4世代原子炉は、将来世界のエネルギー需要に対応するため、安全・信頼性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性などに優れた概念として各国で研究開発が進められている。ナトリウム冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス炉は実証炉の建設が進められており、特にナトリウム冷却高速炉に関してはGIFの目標である2030年代の実用化が視野に入りつつある。また、超臨界圧軽水冷却炉、熔融塩冷却炉、ガス冷却高速炉についても実用化に向けた研究開発が進められ、それぞれの特徴を活かした概念の検討が進められている。

第4世代原子炉を含む次世代炉の開発に関する国際的な枠組みとしては、GIF以外にも、IAEAのTWG、INPRO、

CECD/NEAのNI-2050、EURATOMのHorizon 2020等のプログラムがあり、今後もそれらと協調しながら革新技术の研究開発が促進されることが期待される。

－ 参考資料 －

- 1) 佐賀山豊, GIFの今後の10年について, 日本原子力学会 2013年秋の大会 新型炉部会セッション, 2013.
- 2) GIF Portal Site, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public (2017年11月20日).
- 3) Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF, 2014.
- 4) S.Pivet, et. al., Status of the French Fast Reactor programme, CN245-586, IAEA FR17, 2017.
- 5) E.Adamov, Proryv Project as a technological basis of large-scale nuclear power, CN245-342, IAEA FR17, 2017.
- 6) Status of innovative Fast Reactor designs and concepts, IAEA, 2013.
- 7) 2016 GIF Annual Report, GIF, 2016.
- 8) Li Fu, VHTR System, GIF Symposium, 2015.

著者紹介



佐賀山豊 (さがやま・ゆたか)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) システム設計, 安全設計/高速炉の国際協力・共同開発



安藤将人 (あんどう・まさと)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子炉の運転・保守, 安全管理, 炉心管理/海外の原子力開発動向

核データ研究の最前線

～たゆまざる真値の追及,そして新たなニーズへ応える為に～

第6回 核データの利用のために
—ミクロからマクロへの橋渡し—日本原子力研究開発機構 多田 健一, 横山 賢治, 今野 力
清水建設 小迫 和明

放射線輸送計算コードは評価済み核データを直接取り扱えず、コードが使える形式に変換する、核データ処理と呼ばれるプロセスが必要となる。核データ処理は単なる形式の変換だけでなく、放射線輸送計算で用いる物理量を求めるための様々な処理を含んでおり、評価済み核データ(ミクロ)と放射線輸送計算(マクロ)を繋ぐ重要な役割を担っている。本稿では、核データ処理の概要と核データの妥当性評価について解説する。

KEYWORDS: Nuclear Data Processing, Cross Section Library, FRENDY, NJOY

I. 核データ処理とは？

評価済み核データは中性子やガンマ線などの粒子と原子核の相互作用を数値データとして評価したものである。核データは様々な目的で利用されることから、評価済み核データは汎用性を重視した ENDF 書式 (Evaluated Nuclear Data File)¹⁾で格納されている。ENDF 書式では、入射粒子の反応断面積と放出粒子のエネルギー・角度分布が表形式またはパラメータで表されており、目的に応じて必要なデータを取捨選択することができる。放射線輸送計算コードは放射線の反応過程を効率的に取り扱うために専用の形式(断面積ライブラリ)を使用する。そのため、評価済み核データを放射線輸送計算コードで利用できる断面積ライブラリに変換する必要がある、この変換を核データ処理と呼ぶ。

核データ処理は放射線輸送計算コードが利用する断面積ライブラリの提供を目的に、核データ評価が始まると共に開始された。初めは単純な断面積の群定数化であったが、米国で核データが ENDF 書式で格納されるようになると専用の核データ処理コードの開発が始まり、単機能の処理コードを経て、1972年に米国 ORNL から

AMPX が中性子とガンマ線の結合群定数作成システムとして世界で初めて公開された。AMPX は現在も開発と整備が継続されており、連続エネルギー断面積ライブラリも作成可能な最新版の AMPX-6 は、2016年に米国の原子力施設の公式許認可申請コード SCALE に組み込まれ、公開されている。また米国 LANL では1976年に MINX (Multigroup Interpretation of Nuclear X-sections from ENDF/B) が、1978年にその後継コードである NJOY (M \Rightarrow N, I \Rightarrow J, N \Rightarrow O, X \Rightarrow Y と MINX の文字を一文字ずつずらして命名)が開発された。NJOY は NJOY83 において連続エネルギー断面積ライブラリ作成機能を世界で初めて実装し、その後種々の機能が追加された NJOY99 を経て世界標準の核データ処理コードの地位を確立した(最新版は NJOY2016)²⁾。特に1990年代以降は ENDF-6 書式を処理可能な核データ処理コードとして世界中で広く利用されている。

国内では JENDL の評価活動と共に群定数ライブラリを作成する核データ処理コードの開発が進められ、1977年に RADHEAT-V3、1986年に PROF-GROUCH、1989年に RADHEAT-V4 などが日本原子力研究所で開発されたが、既に開発は終了している。その後 NJOY などの諸外国の核データ処理コードを長年に亘って利用してきたが、2013年から JAEA で FRENDY (FRom Evaluated Nuclear Data library)の開発が進められている³⁾。

核データ処理は群定数処理と連続エネルギー定数処理に大別され、群定数処理は多群エネルギー構造で断面積を適当な荷重関数により平均化するもので、連続エネルギー定数処理は近似をせずに断面積を連続エネルギー形式に編集し直すものである。中性子入射核データの処理

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need (6); Processing and Validation of Nuclear Data: Kenichi Tada, Kazuaki Kosako, Kenji Yokoyama, Chikara Konno.

(2017年11月10日 受理)

■前回タイトル

第5回 IAEAの核データ事業

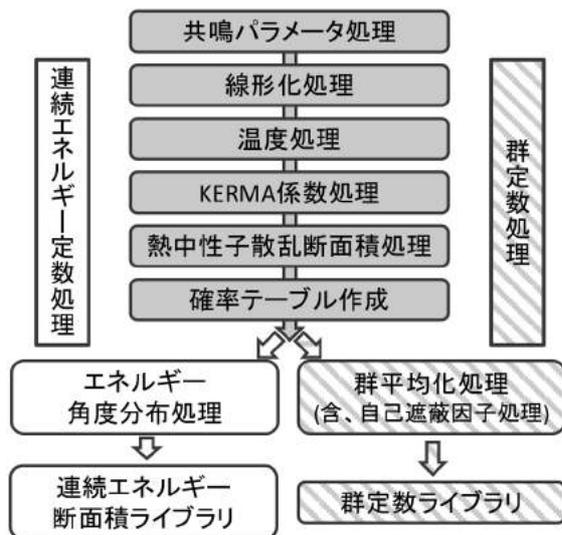


図1 中性子入射の核データ処理の例

は、図1に示すように6つの共通な工程とその後に続くそれぞれの専用工程で構成される⁴⁾。

核データでは共振領域の断面積が共振公式のパラメータ(共振パラメータ)で与えられている。また、共振領域以外の断面積は両対数や片対数など様々な内挿形式で格納されている。共振パラメータ処理及び線形化处理では、共振領域の断面積を計算し、内挿形式を直線内挿に統一する。評価済み核データは、通常絶対零度で作成されているので、絶対零度以外の断面積を計算するためには、温度処理で原子核の熱運動を考慮したドップラー拡がりの処理を行う必要がある。核発熱や放射線損傷などを評価するためには物質に付与される運動エネルギーを表すKERMA(Kinematic Energy Released in MAterials)係数と原子当りの弾き出し(DPA: Displacement Per Atom)断面積が必要となり、これらはKERMA係数処理で計算される。水中の水素や黒鉛など、原子・分子や結晶格子の運動や配置が熱領域の中性子の散乱に影響を及ぼす場合がある。そのような場合には、熱中性子散乱断面積処理において、その影響を取り込む必要がある。非分離共振領域では個々の共振を分離することはできないが、共振による吸収で中性子束が減少し、実効的な反応率が減少する共振の自己遮蔽効果を考慮しないと放射線輸送計算の精度が悪化することが知られている。そこで非分離共振領域の自己遮蔽効果を考慮するため、確率テーブルを作成する。

確率テーブル作成以降は連続エネルギー定数処理と群定数処理で処理工程が分かれる。連続エネルギー定数処理では、断面積と同様に放出粒子のエネルギー・角度分布の内挿形式を直線内挿に統一する。また、これらのデータをモンテカルロ法に基づく計算コードが利用しやすい確率分布関数に変換する。群定数処理では、連続エネルギーの核データを多群エネルギー構造に平均化し、散乱後の二次粒子の角度分布を低次数のルジャンドル多

項式で近似する。また、共振領域の自己遮蔽効果を補正するために、自己遮蔽因子を計算する。

このように核データ処理コードで取り扱う処理内容は多岐にわたり、核データを処理するためには幅広い知識を持った専門家が必要である。しかし、核データ処理を担う人材の育成には以下の問題点が指摘されている。

- ① 評価済み核データとその処理を理解している人材が不足し、適切な処理を実施できる人が少ない
- ② 核データ処理のニーズは新しい評価済み核データの公開時に限定されるため、技術伝承が困難
- ③ 核データ処理コードの開発と整備は研究成果に直結しない裏方作業であるため、その継続性の確保に課題がある

後述するように、これらの問題については、FRENDYの開発などを通じて現在解決が図られている。

II. 核データ処理の現状と今後の動向

NJOYは世界中で広く利用されているが、米国の評価済み核データファイルであるENDF/Bを処理し、MCNPなどの米産の放射線輸送計算コード用の断面積ライブラリを作成することを目的として開発・改良が進められている。そのため、ENDF書式には定義されているものの、ENDF/Bに採用されていない入力形式やモデルは適切に処理できないことが多く、また問題点を指摘してもタイムリーに修正されることはほとんど無かった。このNJOYで適切に処理できない問題は、JENDLの処理を行う際に顕在化することが多く、JENDLの新バージョンが公開されてもそれを処理できないことや、処理できたように見えても輸送計算結果に問題があって調べると根本原因がNJOYにあった、ということが繰り返されてきた。

また、2009年にMCNPのソースコードが非公開になり関係者に衝撃が走ったことは記憶に新しいが、諸外国の輸出規制によって、新しいコードが入手不可能になる、もしくは実行ファイルのみの配布になり、従来のようなソースコードの独自修正による対応ができなくなることが懸念されている。実際、NJOY2016の前バージョンであるNJOY2012ではソースコードの公開が厳しく制限され、またソースコードの提供を受けた場合でも変更が認められていなかったため、JENDLの新バージョンがリリースされた時に適切に処理できない可能性が懸念されていた。

現在、半世紀に亘って利用されてきたENDF書式からGNDS書式(Generalized Nuclear Data Structure)と呼ばれるXML形式の全く新しい書式へと核データ書式を一新することが検討されている。NJOYなどの従来の核データ処理コードはENDF書式と強く結びついており、GNDS書式のような全く新しい核データ書式に対応

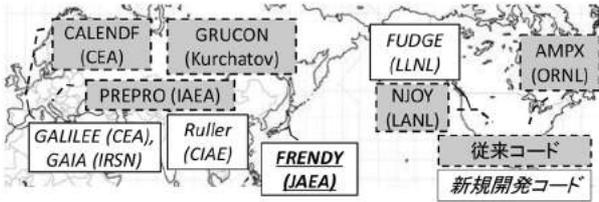


図2 各国の核データ処理コード開発

するためには、ほとんどゼロから書き直す必要がある。このような NJOY に対する不満と、GNDS 書式の登場により、図2に示すように各国で GNDS 書式に対応した独自の次世代核データ処理コードの開発が開始され、国際会議などでその開発状況が報告されている⁵⁾。このような状況に危機感を覚えたのか、NJOY は従来の方針を大きく変更し、最新版の NJOY2016 は Github 上でソースコードを公開している。また、GNDS 書式に対応した NJOY21 の開発を進めている。

我が国でも NJOY に代わる次世代の国産核データ処理コード開発の重要性は長年に亘って指摘されてきた。近年でも原子力学会炉物理部会の炉物理ロードマップ(2012年版, 2017年版)や経済産業省の軽水炉安全技術・人材ロードマップ(2015年度)で最重要課題として挙げられており、FRENDY の開発に対する期待は非常に大きい。FRENDY は現在、世界に先駆けて MCNP 用の連続エネルギー断面積ライブラリである ACE ファイルを作成することに成功しており、世界で最も開発が進んでいる次世代核データ処理コードの一つである。FRENDY の開発では、NJOY の処理上の問題点を発見・解決し、核データ処理の高精度化にも取り組んでいる。また、JENDL 委員会核データ処理プログラム WG 経由でユーザーのニーズを聞き、開発に逐一反映するなど、オールジャパン体制で開発を進めている。

図3に FRENDY の構造を示す。FRENDY はオブジェクト指向プログラミングの手法に基づいて C++ 言語で開発されており、将来の拡張性や保守性を見据えた開発を行っている。例えば、核データを NuclearDataObject という独自のデータ形式に変換した上で処理を行うことで、ENDF 書式と強く結びついた従来の核データ処理コードでは非常に困難であった、核データ書式に依存しない処理を実現している。

前章で述べた核データ処理に関する知識を持った人材の不足という問題に対する解決策の一つとして、FRENDY では核データファイル名と温度など、必要最小限の入力データのみで核データ処理を実行できるように、入力簡略化に取り組んでいる。このように、核データ処理の初心者でも簡単かつ適切な核データ処理が可能となるなど、ユーザーの利便性も考慮した開発を進めており、今後我が国の放射線輸送計算コードの基礎をなすモジュールの一つとして利用されることが期待されている。

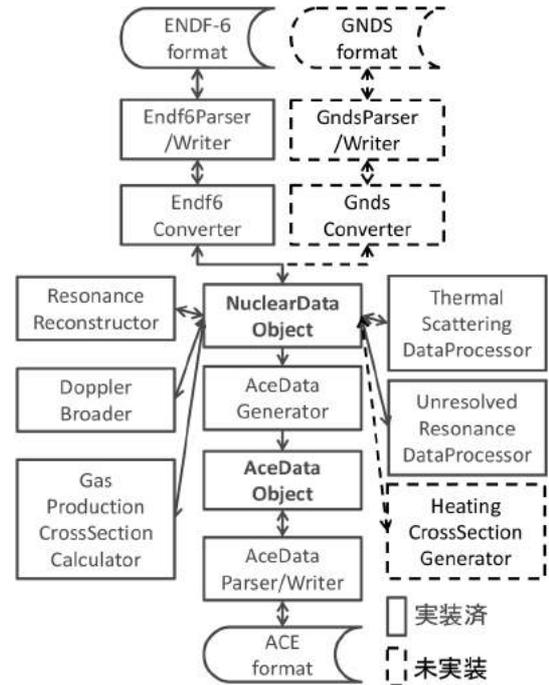


図3 FRENDY の構造

Ⅲ. 核データの妥当性評価

ユーザーが評価済み核データを使う上で、その精度がどの程度なのかを明らかにすることは重要である。核データの妥当性評価は微分実験(着目した反応の断面積測定実験など)と積分実験(原子炉炉心や厚い遮蔽体のように、種々の反応が多数起こる体系を用いた実験など)によって行われている。微分実験では実験値を核データと直接比較することにより核データの信頼性評価を行うことができるが、積分実験では種々の反応が多数起こっているため、実験値と評価済み核データを直接比較することはできず、断面積ライブラリと放射線輸送計算コードを用いて実験のシミュレーションを行い、実験値(例えば、原子炉の臨界実験では実効増倍率、遮蔽実験では中性子束)と計算値の一致の良し悪しから、核データの妥当性を評価している。以下では、積分実験を用いた核データの妥当性評価について詳述する。

積分実験を用いた核データの妥当性評価は図4に示すように、以下の二つのステップで構成される。

- (1) 核データ処理
- (2) 積分実験解析及び解析結果の編集・解釈

(1)についてはI, II章でその概要について説明した。以降では(2)の例として、遮蔽及び炉物理の実験を用いた核データの妥当性評価について紹介する。

まず、遮蔽実験を用いた核データの妥当性評価の一つとして JAEA の D-T 中性子源 FNS(Fusion Neutronics Source)での積分実験を用いた核データの妥当性評価について説明する⁶⁾。FNS では、1981年8月のファース

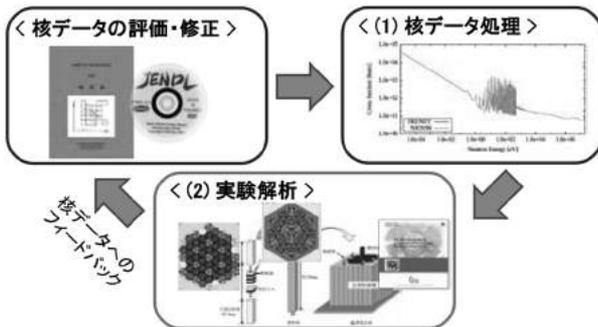


図4 積分実験を用いた核データの妥当性評価の流れ

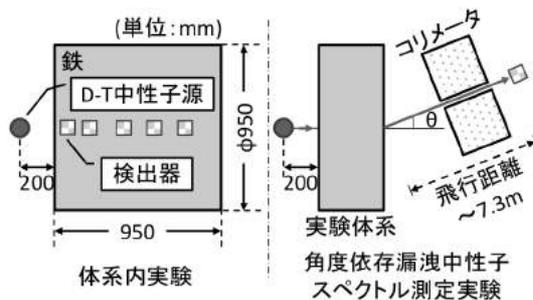


図5 FNS 積分実験概念図

トビームから2016年2月の停止までの34年半の間に核データの妥当性評価のため、種々の積分実験が多数実施された。FNSでの実験では、主に1ないし2元素(例えば、窒素、酸素、酸化リチウム、ベリリウム、黒鉛、SiC、チタン、バナジウム、鉄、銅、モリブデン、タンガステン、鉛など)の物質でできた擬似円筒あるいは直方体の実験体系内の中性子、ガンマ線測定(中性子スペクトル、反応率、ガンマ線スペクトル、核発熱率などの測定)及びTOF(Time of Flight)法による実験体系からの角度依存漏洩中性子スペクトル測定が行われ(実験概念図を図5に示す)、JENDLの精度向上に貢献してきた。

一例として、FNSで行われた鉛体系からの角度依存漏洩中性子スペクトル測定実験の測定値とMCNPを用いた計算値の比較図を図6に示す。JENDL-3.3を用いた計算値では測定された中性子スペクトルの形を再現できなかったが、鉛の(n,2n)反応の断面積と二次中性子データが大幅に修正されたJENDL-4.0を用いた計算値では測定値をほぼ再現できるようになった⁶⁾。このように評価済み核データは無条件に正しいわけではなく、微分実験、積分実験のデータを用いて地道な改良が行われている。JENDLに限らずENDF/BやJEFFでも銅、チタン、モリブデン、鉛の核データに何らかの問題がある可能性がFNSでの積分実験で指摘されており、核データを改良するための研究が各国で続いている。

続いて、炉物理実験を用いた核データの妥当性評価について説明する。炉物理実験を用いた核データの妥当性評価では、臨界安全や原子炉設計への応用を想定して、臨界集合体や実験炉などで得られる積分実験データ(臨

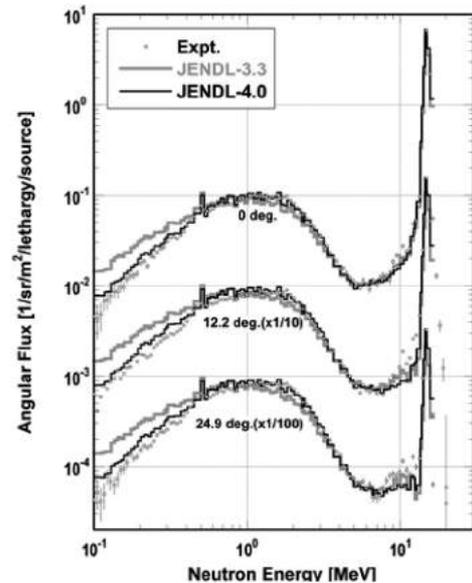


図6 FNSでの鉛体系(20cm厚)からの角度依存漏洩中性子スペクトル

界性、反応率比、反応率分布、反応度値など)を用いた妥当性評価が精力的に行われている。このような積分実験データとしては、最近では、OECD/NEAの国際協力の下で過去に世界で実施された積分実験を集め、積分実験解析がしやすいように整理された国際臨界安全ベンチマーク問題(ICSBE⁷⁾や国際炉物理実験ベンチマーク問題(IRPhEP⁸⁾などが広く用いられている。特に臨界性は原子炉の設計や臨界安全解析などにおいて重要なパラメータであるため、臨界性に着目した妥当性評価が広く行われている。

一方で、核データの妥当性評価における積分実験データの効果的な利用方法については、現在も研究が進められている。例えば臨界性に対しては、複数の核種・反応の変化が総合すると打ち消し合う効果を持つため、問題のある核種・反応を特定することができない場合があることが指摘されている⁹⁾。この指摘は今後、異なる種類の積分実験データをより多く活用することで更なる精度向上が得られることを示唆している。また、積分実験データを用いた核データの妥当性評価では、モンテカルロ法に基づく計算コードが利用されることが多いが、モンテカルロ法では積分実験体系の幾何形状を忠実に模擬でき、幾何形状のモデル化による誤差が含まれないという利点がある反面、幾何形状データが正確であることを検証することが難しいという問題がある。この問題についても最近広く認識されるようになり、OECD/NEA/NSCの専門家会合において、今年から核データの妥当性評価プロセスに関する検討(WPEC SG-45)が始まることになった。

一方、我が国では、特に高速炉開発の分野では、1990年頃から積分実験データを群定数ライブラリに反映することで核設計の予測精度を向上させる炉定数調整法が検討されており¹⁰⁾、長年に亘って積分実験データのデータ

ベースを自前で整備してきた経緯がある。この高速炉用の積分実験データベースでは、臨界性だけでなく、増殖比に対応する反応率比、出力分布に対応する反応率分布、安全解析上重要となるNaボイド反応度などの積分実験データを蓄積してきており、現在では600種類にわたる特性データとなっている¹¹⁾。その品質の高さが認められ、一部の積分実験データは前述のIRPhEPにも登録されている。この高速炉用の積分実験データベースは、高速炉の設計研究に利用されるとともに、JENDLの妥当性評価にも用いられてきた。また、高速炉以外の積分実験データベースに関しても、より高い品質で妥当性評価を行っていくために、ICSBEPやIRPhEPの積分実験データを利用する際にも、ベンチマーク問題に含まれる体系情報の詳細度や信頼度、不確かさ評価の品質などを改めて一つずつ精査した上で、核データの妥当性評価に用いるべき積分実験データのデータセットを決定するという細心の注意が払われている¹²⁾。

積分実験を用いた核データの妥当性評価は、評価済み核データの解析精度や信頼性を向上させるために重要であるが、これらの作業には核データ処理や積分実験解析に関する専門的な知識と経験を必要とする。そのため、積分実験を用いた核データの妥当性評価を核データ評価者だけで実施することは困難であり、JENDLの妥当性評価については、炉物理、遮蔽の専門家が担当してきた。

JENDL-4.0では400核種以上の核データが用意されており、また妥当性評価に使うベンチマーク問題は数百に上ることから、入力の実験データや解析、解析結果の考察など、核データの妥当性評価には多くの手間と時間が必要となる。そのため、積分実験を用いた核データの妥当性評価を頻繁に行うことはできず、核データ評価者にタイムリーなフィードバックを行うことは困難であった。そこで、次期JENDLに向けた効果的な核データ検証サイクルを実現するため、JAEAではこれらの作業を自動化し、核データ評価者自身も積分実験を用いた核データの妥当性評価が行える自動核計算実行システムVACANCEを開発している¹³⁾。VACANCEとFRENDYを組み合わせることで、効果的な核データの検証サイクルが実現され、次期JENDLの更なる精度向上が期待できる。

IV. 終わりに

核データを使った解析には核データ処理が必要不可欠であり、また妥当性評価無しには核データを信頼して使

うことはできない。このように核データ処理や核データの妥当性評価は普段はほとんど注目されないが、核データを利用する全ての解析の根幹を成している。本稿が核データ処理や核データの妥当性評価に興味を持って頂けるきっかけになれば幸甚である。

— 参考資料 —

- 1) A. Trkov, et al., BNL-90365 2009 Rev.2 (2011).
- 2) R. E. MacFarlane, et al., LA-UR-17-20093 (2016).
- 3) K. Tada, et al., J. Nucl. Sci. Technol., **54**, 806-817 (2017).
- 4) 小迫和明, 炉定数の作成方法, 核データ・チュートリアル (2003).
- 5) 多田健一, 核データニュース, **113**, 7-23 (2016).
- 6) C. Konno, et al., Prog. Nucl. Sci. Technol., **2**, 346-357 (2011).
- 7) J.B. Briggs(Editor), NEA/NSC/DOC(95)03 (2013).
- 8) J.B. Briggs(Editor), NEA/NSC/DOC(2006)1 (2013).
- 9) G. Palmiotti, et al., NEA/NSC/R(2016)6 (2017).
- 10) M. Ishikawa, et al., Proc. M&C + SNA'93, **1**, 593(1993).
- 11) 杉野和輝, 他, JAEA-Research 2012-013 (2012).
- 12) JENDL 委員会リアクタ積分テスト WG, JAEA-Data/Code 2017-006 (2017).
- 13) K. Tada, K. Suyama, Proc. ICAPP2017 (2017).

著者紹介



多田健一 (ただ・けんいち)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)原子炉物理, 計算コード開発, 核データ, 国際協力



小迫和明 (こさこ・かずあき)

清水建設 技術研究所
(専門分野/関心分野)放射線工学, 核データ, 廃炉



横山賢治 (よこやま・けんじ)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)原子炉物理, 核データ, 計算コード開発



今野 力 (こんの・ちから)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)放射線工学, 核データ

シミュレーションの信頼性確保に関する取り組みの現状と課題

計算科学技術部会／
シミュレーションの信頼性分科会

国内外においてV&Vの重要性および必要性が広く認識され、シミュレーションの信頼性の確保に関わるガイドラインや標準を作成する動きが活発になっている。2016年7月に日本原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」が発行された。これは、シミュレーションの信頼性の確保に関する重要性が高まる状況に鑑み、モデルV&V(Verification and Validation)に基づいて、不確かさを考慮した予測評価、品質管理を加えたモデリング&シミュレーションの方法論の考え方をまとめたものである。このガイドラインの発行に至った背景及び経緯、ガイドラインの概説、取り組みの現状と課題について述べる。

KEYWORDS: *Modeling and Simulation, Verification and Validation (V&V), Credibility, Model V&V, Uncertainty, Conceptual Model, Physical Model, Mathematical Model, Computational Model, Prediction*

I. 緒言

1. ガイドライン策定の背景

近年のシミュレーション技術の進歩とコンピュータ性能の急速な向上によって、原子力分野におけるシミュレーションの役割が増大し、シミュレーションの信頼性確保が重要な課題となっている。また、2011年に発生した福島第一原子力発電所の事故の教訓¹⁾としてシミュレーション技術の重要性が再認識され、モデリング&シミュレーションに係る検証及び妥当性確認(V&V: Verification & Validation)の議論が発展するとともに、その方法論が注目されている²⁻⁴⁾。シミュレーションの予測性能を担保し、その信頼性を確保するためには、V&Vの確実かつ継続的な実施のための仕組みを確立することが重要である。すでに国外では、米国及び欧州においてV&Vに係る活動が活発であり、標準(ガイドライン)の発行に加え、その追補及び改定作業も進んでいる。

計算科学技術部会では2002年の設立以来、計算結果の精度の確保などシミュレーションの信頼性確保に関する活動を推進してきた。2012年5月に標準委員会の基盤・応用技術専門部会(当時)に「シミュレーションの信

頼性分科会」が設置され、計算科学技術部会の設立から10年にわたる議論のとりまとめとして、日本原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン2015」(以下、「ガイドライン」という)の制定に向けた活動を行ってきた。

2. ガイドラインの発行

(1) ガイドライン発行の経緯

2002年4月の計算科学技術部会設立と同時に「計算結果評価法研究専門委員会」が設置され、3年間の活動を通じて計算結果の精度評価の考え方が整理された。その後、2009年1月に標準委員会の基盤・応用技術専門部会(当時)に「シミュレーションの信頼性検討タスク」が設置され、シミュレーションの信頼性の技術的なガイドライン策定に向けた検討が開始された。2010年から「シミュレーションの信頼性ワーキンググループ」が計算科学技術部会に設置され、モデリング&シミュレーション(以下、「M&S」という)のV&Vに関する標準(ガイドライン)を制定するべく報告書がとりまとめられた。これを受けて、標準委員会基盤・応用技術専門部会(以下、「専門部会」という)に、「シミュレーションの信頼性分科会」(以下、「分科会」という)が設置され、このガイドラインの制定に向けた活動を開始した。

(2) 「シミュレーションの信頼性分科会」の活動

ガイドラインの策定を目的とするこの分科会では、中

State-of-the-art approach and issue to establish simulation credibility : Kotaro Nakada, Yoshiro Kudo, Seiichi Koshizuka, Masaaki Tanaka.

(2017年11月22日 受理)

性子工学，熱流動や構造分野など多くの技術分野の専門家が産官学から幅広く参加し，関連する国内外の標準（ガイドライン）を参照して用語を含めたV&Vの基本的な考え方の整理が行われた。また，熱流動，燃料機械設計，核設計，核熱流動，放射線，構造，化学反応の個別分野毎にタスクチームが設置され，第Ⅱ章で説明するガイドライン本体を構成するエレメント1からエレメント4までの4つの主要項目に対する現時点での到達度の調査と，このガイドラインの適用に対する課題抽出と適合性の検討が行われた。ガイドラインの制定に際しては，専門部会並びに標準委員会にて計12回の分科会活動の報告とガイドライン草稿の審議，及び公衆審査でのコメント対応を行った。2015年12月の標準委員会で制定決議を受け，2016年7月15日にこのガイドラインが発行された。

Ⅱ. ガイドラインの紹介

1. ガイドラインの目的

原子力分野でのシミュレーションの信頼性の確保は，原子力関連施設で想定される現象，これが種々複合した事象などに対するシミュレーションの予測性能を，高い説明性，追跡可能性及び透明性をもって，所期の利用目的に即した判断基準の範囲にあることを客観的に示し，さらに必要に応じて最新の技術的知見に照らしてモデル化を適時見直すとともに，その予測性能向上のための取組みを実施することを通じて達成されるものである。そのためには，必要な予測性能で対象を模擬できるだけでなく，最新知見を反映できる必要がある。このようなシミュレーションの信頼性の確保のためには，そのモデルの検証及び妥当性確認を的確に実施でき，合わせてその信頼性を適時に改善できるための仕組みが必要となる。

ここで，所期の利用目的とは，対象とする原子炉システムなどの実在システムについて，その型式，使用条件，機能及びシミュレーションへの要求，要求にかかわる判断条件，これらに関連する事象及び外部環境に対する所定の条件を，モデルの予測性能を明確化するための基本情報として具体的に整理し構成したものである。

このガイドラインは，原子力分野におけるシミュレーションの予測性能を確保するうえで必要となる共通の方法論を提示することを目的として策定したものであり，その信頼性の確保を図る仕組みを検討するうえでの基本的な考え方を整理している。

2. ガイドラインの位置づけ

このガイドラインは，核・熱流動・構造などの幅広い技術分野のシミュレーションの信頼性を確保するための仕組みに共通する検証，妥当性確認及びモデルの予測性能判断のための方法論の枠組みをまとめ，その基本的な考え方などの技術要件をまとめたものである。

今後，個々の技術分野におけるシミュレーションを軸とした設計，安全評価などに向けたより仕様のな規格・基準などを策定するに当たって，このガイドラインがその信頼性確保のための上位指針となることが期待されており，例えば，原子力学会標準“統計的安全評価の実施基準：2008”に対して，このガイドラインで規定した考え方及び不確かさの取扱いに従う方向で，現在，改定作業が進められているところである。

3. ガイドラインの概要，適用範囲及び用語

このガイドラインは，図1に示すように，シミュレーションの信頼性確保のための基本的なガイドラインを規定した本体，AからEまでの附属書（参考），並びにこのガイドラインに係る補足情報及び本体などに記載した事項の補足説明からなる解説から構成されている。

このガイドラインの規定の適用範囲は，外部環境に関する所定の条件の下で，原子力関連施設の設計，建設及び運転に適用される核，放射線，熱流動，化学反応及び構造分野，並びにこれらの複合分野におけるモデリング&シミュレーション（以下“M&S”という）にある。

M&Sとは，対象とするシステムについて，その内部で生じる現象に対するモデルを系統的に構築して計算機に実装し，モデルV&Vを実施した上で，当該システムのシミュレーションを行うまでの一連の実施プロセスである。また，モデルV&Vとは，モデル検証及びモデル妥当性確認の二つの方法論の使用を柱として，M&Sの基礎となる概念モデルの開発，同モデルに従った数学的モデル化及び物理的モデル化，並びに総括不確かさの定量化及びその統合に関するそれぞれの実施プロセスにおいてなされる一連の検証及び妥当性確認の実施活動を加えて構成されるモデルの予測性能を評価するための方法論をいう。さらに，総括不確かさとは不確かさ及び推定誤差の総称であり，不確かさ及び推定誤差とは，測定及び/又はシミュレーションの結果としての標本に付随した量であり，前者は測定量又はシミュレーションの結果

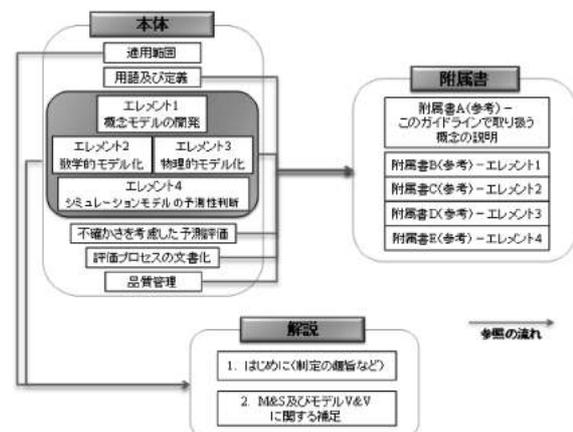


図1 ガイドラインの構成

に合理的に結びつけられ得る値のばらつきの特徴付ける符号なしパラメータ、一方、後者は測定量又はシミュレーション結果及び/又はその期待値と真値との差についての統計的な符号付き推定量を表す。なお、不確かさには、現象に固有なランダムさに起因する偶発的な不確かさ及び知識不足による不確かさの2種類があり、後者は知見の進展などにより減少可能な不確かさ成分に相当する。

4. ガイドラインの内容

このガイドラインに規定されたシミュレーションの信頼性確保のための基本的な考え方は、原子力分野で実施されるシミュレーションの対象をモデル化して計算機プログラムに落とし込み、一方で実験を実施するか又は実験データを用意して、比較を実施してその差異を定量化して同プログラムの予測性能の可否を判定し、予測計算を実施できる一連の適切な仕組みを整理したものである。この“適切さ”を達成する仕組みを具体的に実現するためには、図2に示されるように、モデルV&Vを中核としてM&Sを実施する必要がある。このガイドラインでは、M&SにおけるモデルV&Vの手順として、

- ・エレメント1：概念モデルの開発
- ・エレメント2：数学的モデル化
- ・エレメント3：物理的モデル化
- ・エレメント4：シミュレーションモデルの予測性能判断

の4基本要素の実施によって、シミュレーションモデルの予測性能が要求を満たすか否かを判断する基本手順を構成することで信頼性が確保される仕組みを構築した。

また、モデルV&Vに続く実施プロセスとして、

- ・不確かさを考慮した予測評価
- ・評価プロセスの文書化”の2基本要素

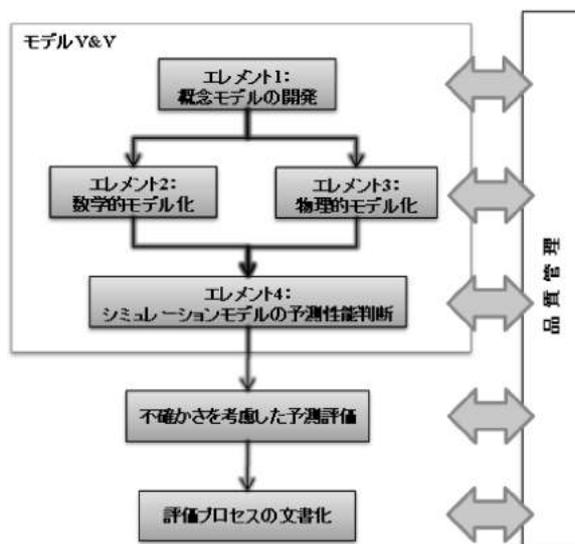


図2 M&Sの流れ及び品質管理との関係

を追加し、さらにこれらの基本要素のすべてに“品質管理”を不可欠な要素として関係付けることで、M&Sの実施に必要な要件を完備させている。

続いて、それぞれの基本要素で実施される手順及び要件に対する考え方の概略を示す。

(1) エレメント1(概念モデルの開発)

このエレメントでは、シミュレーションの所期の利用目的を特定し、これに基づいて、システムの範囲及び外部環境を含む環境条件、時間発展シナリオ、構成要素、並びに有意と想定される関連するすべての物理・化学現象及びそれらを構成する重要な物理プロセスについて整理し、注目するパラメータ(注目システム応答変量)及びその予測性能に関する要求を明確にする。さらに、これらに基づき、当該システムの分析を行って、現象に従った概念的なモデル(概念モデル)を作成することがこのエレメントの成果となる。なお、附属書Bにおいて、これらの考え方、留意点などについて説明している。

(2) エレメント2(数学的モデル化)

このエレメントでは、エレメント1で作成した概念モデルを数学的表現に変換し、さらにデジタル計算機によって解を求めるために数値モデルとして実装することが要求される。また、概念モデルに対する数学的モデル化の忠実度を確認するために、数理モデルへの変換に関する検証、並びに数理モデルに対する数値モデルの忠実度を評価するコード検証及び離散化した数値モデルから得られる収束解の適切性を評価する解検証の二つの検証プロセスから構成されるモデル検証を実施する。さらに、これらを通じてシミュレーション結果における不確かさ上の影響度の大きな入力データの特定及びその感度並びに数値解の不確かさを定量化する。なお、附属書Cにおいて、これらの考え方、留意点などについて説明している。

(3) エレメント3(物理的モデル化)

このエレメントでは、エレメント1で作成した概念モデルに従い、総括不確かさを評価済みの妥当性確認用データの有無を確認し、存在しないか又は不十分な場合には概念モデルに従って実験計画を作成して実験データを取得する。このとき、妥当性確認のために用いる実験データベースに取得データを追加するとともに、実験の総括不確かさを定量化する。さらに、物理的モデルを検証し、概念モデルに対する物理的モデル化の忠実度を確認する。なお、附属書Dにおいて、これらの考え方、留意点などについて説明している。

(4) エレメント4(シミュレーションモデルの予測性能判断)

このエレメントでは、妥当性確認実験の結果とシミュレーション結果とを比較し、総括不確かさを定量化するとともに、注目システム応答変量に対するこれら総括不確かさの影響について整理する。さらに、妥当性確認実験が存在しない条件におけるモデルの予測性能を、不確かさの拡大を定量化することで評価する。次いで、この評価結果に基づいて、所期の利用目的に即して合否判断を実施し、併せて合否判断についての検証も実施する。なお、附属書Eにおいて、これらの考え方、留意点などについて説明している。

(5) 不確かさを考慮した予測評価の実施

M&Sの最終段に当たるこの実施プロセスでは、所期の利用目的にて対象としたシステムに対して、モデルV&Vの4エレメントを通じて定量化したモデルの予測性能に基づく総括不確かさを考慮した予測計算を実施するとともに、注目システム応答変量に対する総括不確かさを定量化する。これによって、例えば、多数回の計算を実施し、注目システム応答変量に対する制限値又は限界値のデータの分布及び不確かさを考慮したモデルの予測値の分布を算出し、所期の利用目的及び/又は一般的な判断基準に従って合理的に評価される安全率を考慮した予測値の上限と限界値の下限とを比較し、有意な差の有無をもって当該システムの性能上の合否を判定する。このとき、予測に用いるシミュレーションモデルには、モデルV&Vの4エレメントにおける必要な検証及び妥当性確認が完了している必要がある。なお、附属書B及びCにおいて、この実施プロセスで用いる手法、留意点などについて説明している。

(6) 評価プロセスの文書化

M&Sの効果的な運用のために、モデル予測性能に対する判断の検証プロセス及び不確かさを考慮した予測評価プロセスの実施内容について、規定への適合性に関する評価及び判断に対する追跡ができるように文書化する。

(7) 品質管理

M&Sの各構成要素、すなわちエレメント1からエレメント4の各要素、不確かさを考慮した予測評価及び評価プロセスの文書化は、いずれも優れた品質管理の下で実施し、これに十分な文書及びその一部としての品質記録を作成する。さらに、M&Sの実施に当たっては、これにかかわる解析者、コード開発者、実験者及び全体設計者の緊密な連携体制を構築するとともに、これらの技術者の力量についても管理し記録することが重要である。なお、附属書A.6にM&Sの効果的な運用のための

品質管理システムの考え方を詳しく説明している。

5. ガイドラインの解説

解説には、このガイドラインに関する補足情報、本体及び附属書に記載した事項に関連する補足説明などを記載している。具体的には、ガイドラインの制定の趣旨、経緯及びその適用範囲について解説している。また、シミュレーションの“信頼性”の定義に関して米国航空宇宙局が策定したM&Sの規格で用いられるcredibilityの概念に従った解説がなされ、関連する現行の指針体系との関係、留意点などについても整理している。さらに、M&S及びモデルV&Vに関する補足説明として、米国の規格、指針などにおけるM&S及びモデルV&Vの考え方及び定義の変遷について解説している。不確かさの考え方、評価手法などについても、計測分野における国際的な指針における不確かさの取扱い、米国の諸学会における規格、指針などの不確かさの取扱いなどを整理している。

III. 策定後の啓発活動

講習会は東京会場(2017年1月16日、聴講者25名)と大阪会場(同年2月13日、聴講者18名)の2回で合計43名の参加があった。第I章で紹介したガイドライン制定の背景及び経緯、第II章で概説したこのガイドラインで示されるシミュレーションの信頼性確保の考え方を紹介するとともに、その背景にあるV&Vの考え方の変遷及び動向について紹介した。また、個別分野でのV&Vに関連する事例紹介として、以下の4つの分野からご講演を頂いた。

①核計算分野における事例(JAEA 大釜和也 氏)

題目：次世代高速炉核設計手法のモデルV&VおよびUQ⁵⁾

②熱流動分野における事例(JAEA 田中正暁 氏)

題目：ナトリウム冷却高速炉の熱疲労解析評価を対象とした実機評価までを含めたVVUQ実施手順(V2UP)の構築⁶⁾

③構造分野における事例(福井大学 月森和之 氏)

題目：汎用非線形構造解析システム(FINAS: FInite element Nonlinear structural Analysis System)⁷⁾。

④環境影響分野における事例(CRIEPI 佐田幸一 氏)

題目：日本原子力学会標準「発電用原子炉施設の安全解析における放出源の有効高さを求めるための数値モデル計算実施基準:2011」におけるV&Vの導入・検討状況と、このガイドラインで示す考え方との対応(整合性)⁸⁾

講習会后、参加者にアンケート調査を行った。表1にアンケート結果と聴講者から頂いた意見の一部を示す。

表1 主なアンケート項目に対する結果と意見

| Q. 標準講習会は今後の役に立つと思いますか？ | | | |
|--|--------|--------|------|
| | (東京会場) | (大阪会場) | (合計) |
| ・役に立つ： | 24名 | 17名 | 41名 |
| ・役に立たない： | 1名 | 1名 | 2名 |
| 【自由記述で頂いた主な意見】 | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・V&Vの考え方を総合的に理解するのに良い機会 ・今後の自分自身が行う解析業務に活かせる ・今後どう使っていくのか(効率性, 有効性)が重要 ・コード体系化, 整備, 実験拡充等のコスト心配 ・解析コードのユーザの立場での内容が薄い | | | |
| Q. 講習はわかりやすかったですか？ | | | |
| | (東京会場) | (大阪会場) | (合計) |
| ・分かり易い： | 16名 | 13名 | 29名 |
| ・分かり難い： | 9名 | 5名 | 14名 |
| 【自由記述で頂いた主な意見】 | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・個別事例などがあり理解の助けとなった。 ・事例紹介に関して, 専門外の分野には難しい。 ・事例紹介に関する情報は有益である。 ・V&V自体が概念的で理解しにくい。 | | | |

アンケート結果と合わせ, 講習会での意見交換及び質疑について今後の分科会活動に反映していく。

IV. 結言

シミュレーションの信頼性確保に関する共通する方法の枠組み及びその基本的な考え方などの技術要件をまとめたガイドラインの制定を行った。核・熱流動及び構造分野など原子力に関わる幅広い分野のシミュレーションに関する技術者及び研究者による分科会活動により, 2016年7月に日本原子力学会標準から「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン: 2015」として発行された。このガイドラインは, 不確かさの定量化を基盤とした一連のモデルV&Vのプロセスの考え方を詳細に展開するとともに, 妥当性確認のための実験データベースの構築に重点を置いたものになっている。このガイドラインの発行後に講習会を開催し, M&S及びモデルV&Vに係わる基本的な考え方を広く認識していただくとともに, 適用研究が活発化することが期待される。このガイドラインがモデルV&Vに加えてシミュレーションの予測性能の確保にまで踏み込んだものとして世界に先駆けてとりまとめられたのは, 計算科学技術部会の設立以降, 信頼性WGや本分科会等の活動を通じて, 原子力学会での約10年間のシミュレーション信頼性確保に関する技術活動に参画された非常に多くの方々から

多大なご尽力, 貢献を頂いた結晶であることをここに記したい。

現在, モデルV&Vの重要性及び必要性は, 多くの文献や講演等により広く知られるところとなっている。具体的な適用も行われているが, 今後, 個々の技術分野あるいは評価課題に対し, 持続的に実施できる実施基準(具体的手順)を策定するためにも, モデルV&Vに関する多くの適用研究と十分な議論が必要である。本記事が, このガイドラインの意図するシミュレーションの信頼性確保に対する技術活動の活性化と, 更なるシミュレーション技術の高度化の一助となれば大変幸いである。

(執筆担当: 中田耕太郎(東芝), 工藤義朗(電中研), 越塚誠一(東大), 田中正暁(JAEA))

— 参考資料 —

- 1) 日本原子力学会, 福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言-学会事故調 最終報告書-, 丸善出版株式会社, 第8章, (2014).
- 2) 中村均, シミュレーションのV&Vの現状と課題(第3回・最終回)V&Vに関わる技術標準の動向: モデルV&Vと品質V&V, 日本原子力学会誌 57 (2), 99-103, 2015.
- 3) 堀田亮年, 中田耕太郎, 佐田幸一, シミュレーションの信頼性確保のあり方とは?—当学会としての Verification & Validation への取り組み, 日本原子力学会誌, 52(11), 727-731, (2010).
- 4) 中田耕太郎, 工藤義朗, 田中正暁, (計算科学技術部会企画セッション)シミュレーションの信頼性確保のためのガイドラインの策定, 日本原子力学会 2015年春の年会予稿集, TN21, (2015).
- 5) K. Ohgama, et al., "Model Verification And Validation Procedure For A Neutronics Design Methodology of Next Generation Fast Reactors", Proceedings of ICAPP 2017, April 24-28, Fukui & Kyoto, Japan (2017), No.17178.
- 6) M. Tanaka, et al., "Development of V2UP (V&V plus uncertainty quantification and prediction) procedure for high cycle thermal fatigue in fast reactor-Framework for V&V and numerical prediction", Nuclear Engineering and Design, 299 (2016), pp.174-183.
- 7) K. Tsukimori, et al., "Development of constitutive models for fast reactor design", Nuclear Engineering and Design, Vol. 269 (2014), pp.23-32.
- 8) 日本原子力学会, 日本原子力学会標準 発電用原子炉施設の安全解析における放出源の有効高さを求めるための数値モデル計算実施基準: 2011(AESJ-SC-A004: 2011).

談話室

幌延探訪記

—原子力専攻の学生が見た核のごみの行方は？—

東工大学生チーム，東京工業大学 澤田 哲生

原子力を専攻する大学院生が，泊原子力発電所と幌延の地層研究所を訪問した。この訪問は原子力発電の現場と高レベル放射性廃棄物処分の研究現場を訪れて，その実態を見聞きして理解を深めるというもの。果たして、『マンションのトイレ』の姿をうかがい知ることができたのか……。

澤田 みなさんは東工大の院生ですが，まずは自己紹介をお願いします。

三島 修士2年の三島です。フェロシアン化物の白金族元素，モリブデンに対する吸着特性に関する研究をしています

吉永 修士2年の吉永です。ガラス固化体を製造する際に使うガラス溶融炉の運転の際に，炉の中で起こっている化学反応についての研究を行っています。

堺 修士2年の堺です。インフォという核種の挙動評価を行っています。

梅澤 同じく修士2年の梅澤です。セシウム133とヨウ素127の中性子捕獲断面積の測定を行っており，これは核変換を行う際に必要となる核データとなります。

濱村 修士2年の濱村です。高レベル放射性廃棄物から放射性の熱核種であるストロンチウムを，クラウンエーテルを使って抽出する実験をしています。

何が印象的だったか

澤田 今回，泊原子力発電所と幌延の地層研究所を見学して，最も印象に残ったことを言ってください。

三島 幌延深地層研究センターで何百メートルという地下深くの世界に実際に行ってみて，実物スケールの模擬体で温度変化や挙動を見ている試験を大がかりでやっていたのが印象的でした。

吉永 私も深地層研究センターはすごく印象的で，想像以上にとても大きいという印象を受けました。実際に建築するものはさらにこの数十倍の規模になると聞いて驚くとともに，その大きさを肌で感じられました。

濱村 前に，事故後の東京電力の福島第一原子力発電所を見学したことがあるのですが，記憶の中で今回見学した泊と比較してみたところ，両発電所ともとても似通っているなという印象をもちました。

梅澤 泊原子力発電所は福島第一原子力発電事故と同じレベルの津波や地震が起きた場合に対しての備えが，

充実されているなど感じました。新規基準に対応するためなどの対策費用として2千億円ほどかかったと聞いています。

堺 泊原発では燃料を移動する時に放射線の影響をほぼ完全に遮蔽するようなくみがあり，機器としては最新だということが印象に残りました。

澤田 皆さんは今回は発電という上流のところと，廃棄物という最後の処分地に関連する施設を見学しました。その両方を見て，総合的な流れの中に自分たちがどう関与しているかというイメージはわきましたか。

濱村 どちらも，何百年後でも廃棄物をきちんと安全なまま管理しようとしている姿勢を感じます。

澤田 原子力発電所は60年運転も可能になりつつあります。一方，廃棄物については処分場を探すのにこれから2，30年かかるし，受け入れ地点が決まった後でもそこに搬入して閉じるまでに100年ぐらいかかるという時間スケールになります。そうした時間スケールの中に，皆さんの研究があるということは，ふだんは余り考えないのでは。

三島 幌延では岩盤を削って地層や地下水の浸透を調べていますが，そこに至るまでには多くの知見，基礎研究があり，それが現場の作業を支えていると思います。自分がやっている基礎研究もいずれは大きな応用研究につながることを期待しています。

梅澤 僕は逆に，そんな時間スケールが長い後処理に自分の人生をかけられないなと思い，就職先は原子力関係ではないところにしました。

澤田 泊ではいろいろな追加的な安全措置を加えた発電施設を見学しました。こういう見学会をすると，原子力発電所ではこんなことまでやっているのかと驚く人が結構います。そんなことがテレビや新聞からは伝えられていない。こんなことをできるだけ広く知ってもらえばいいと思いますが，何かいいアイデアはありませんか。

三島 一般の人は受動的な面が多いので、メディアから受ける情報のほうが多いと思います。そのメディアは、事故や不祥事を中心にとりあげることが多く、企業などが社会的にどんな役割を果たしているかについてはあまり紹介してくれない。こんな技術開発があるよ、というような良い側面にもメディアは目を向けてくれればと思います。

吉永 泊原発は見学コースがガラス張りで上から見られるようになっており、見学環境が整っていると感じました。一方、原発は地方にあることが多いので、もっと手近な場所にある、例えば科学館と連携して、同様の趣旨を説明できたらという印象も持ちました。

梅澤 僕はやはり、百聞は一見にしかず、現場で見ってもらうのが一番だと思います。現場の人に一つ一つの設備について説明してもらったことで、現場の人は安全になるように頑張っているという熱意が伝わってきました。これだったら任せられると思いました。原発の近くにある学校が社会科見学で原発を見学し、その際にレポートを書いてもらうようにすれば、現場の人が安全のためにがんばっていることが伝わると思います。

吉永 原発の周辺の住民は原子力についてかなり知識を持っているし、理解している人が経験上多かったです。けれども、原発から遠く離れた東京のような場所に住んでいる人にとって原発は遠い存在だし、実情を知らないことが多いです。

処分地問題の難しい点は何だろうか？

澤田 処分の試験現場を見て、処分地問題の一番難しい点は何だと思いましたか。なお、日本原子力研究開発機構は2000年レポートというものを発行しており、科学的、工学的見地から処分地を日本につくることはできるということを報告しています。それを受けてNUMOが、処分地の選定に向けて動き出しました。しかし、処分地選定までには多くの課題があります。

三島 2点思うことがあります。1点目は、科学的有望地を出したところで、自治体が引き受けてくれないと話が進まない。もう1点は、長期間見据える必要があることです。放射性核種の減衰と地中の挙動のスパンが長過ぎて、実スケールで調べることができません。

澤田 使用済燃料が自然のウランのレベルまで下がるのに2万年かかると言われています。一方、核燃料サイクルをすれば、一番厄介なプルトニウムを取り出して使っていくことになるから、さきほどの管理期間は2万年から8千年ぐらいに縮む。さらに核変換や分離・変換をうまくやり、さらにTRUなどを取り出せば、もっとずっと短い管理期間ですむようになります。

三島 どうしても、生きている間に実感が得られない話になりますね。今やっていることが本当に大丈夫だったかどうかは、何百年も何千年もたった後じゃないとわ

からない。

吉永 見学の事前勉強として専門家から話を聞きました。地層処分については技術的な部分についてはすでに問題ないところまで進展しているが、問題は場所が決まらないことにあると。

澤田 ガラス固化体がもし、地層の変動で破損すれば危ないという人がいるけれども、仮に砕けたとしても、そのガラスの中に相変わらず閉じ込められているから心配なくていいという人もいます。

吉永 私はまさにガラス固化体をつくる研究に携わっており、仮に砕けた際の安全性についてもそれなりに理解しています。一方、国やNUMOや原子力事業者は、原子力施設や地層処分場では安全基準をはるかに上回る安全性を確保しているとアピールしますが、一般の人の中には、そもそもその基準が大丈夫なのかと思っている人もいます。その基準は科学的に決められたと思うのですが、その裏づけの話を説明するのは誰か。本来は国がそれを、ていねいに説明する義務があるはずですが、国民が、このレベルなら大丈夫だと思うレベルに規制の基準を作るのが理想だけれども、今の国の規制はそれとは無関係にあって、国民はその規制の意味するところがよくわからないという状態になっています。

澤田 それはよい指摘です。リスクはゼロではないから、一定の基準をつくることになる。しかし、その基準で大丈夫なのかという説明が十分になされていないと感じます。技術者は全然問題ないと思っても、一般の人から見ると、不安を解消できないでいる。

梅澤 その不安を解消するためには、現場を見ってもらうのが一番だと思います。現場の人は一生懸命やっており、そのことで技術も信頼できるよくなると思います。

澤田 フィンランドにオンカロというところがあり、そこでは社会的な受容がうまく進みました。あそこでは教育の中に、そういうことを織り込んでいます。また、現場には、どんな質問に答えてくれるベテランの広報担当者がいて、その人がどんなことでも受け止めてくれることで、信頼感が醸成されてきているとか。また「あの人が言うんだったら、信じてもいいか」というオーソリティーがいるとも。そういうオーソリティーが仮に原子力界にいないとなかなか難しい。

さて、若手の研究者としてこれからはどうしていこうという感じでしょうか。

吉永 原子力の上流から下流までをテーマに見学し、原子力の施設は本当に複合的な科学でできているのだと感じました。しかも、それは建築や材料や地球科学などいろいろな分野にまたがっている。原子力分野では人材が足りないという話がよく出ますが、それは原子力を全体的に知っている人だけでなく、むしろ原子力の周りの人も必要ではないかなと思っています。

伝えていきたいこと、将来への展望

澤田 上流から下流側まで見ると、原子力はかなりいろいろな科学技術の集合体みたいになっています。それはある種の深さと言ってもいいかもしれない。あなたたちは多かれ少なかれ専門知識を獲得しており、原子力の総合的な広がりを感じている。であれば、いろんな機会を通じて一般の人たちに、原子力のことを伝えるような何かをできればと期待します。

三島 原子力関係者でお子さんがいらっしゃる方は、もっと原子力について教えると良いと思います。そのお子さんが同級生などに伝えることで、子供間で話題になり、主婦層にも大きな影響を持つと思います。また、将来はその子供たちが原子力を担う人材になる可能性もあります。

澤田 福島第一原子力発電所の近くに住んでいた高校生の話ですが、その子は避難対象地域に住んでいたのですが、今は別の場所に住んでいる。けれどもお父さんは、原子力発電所で働いている。「自分はそういう父親のやっている姿を見ており、原子力発電所は将来も必要だと思う」としっかりと発言していた。それは多分、家庭の中でそういう情報なり情熱が共有されているところから自然に出てきたと思います。

見学会や学会に対する要望

澤田 今回の見学会は原子力文化財団の企画なのですが、参加した感想や、注文などをお願いします。

三島 今回の企画の提案者は私です。原子力のことがある程度わかっている学生のみで見学したのですが、やはり見学だけでなく、より理解を深めるために勉強会や対話をする時間が必要だと感じました。

吉永 人材問題については、原子力に関わっていない人たちにも声をかけて、そういう人たちだけでツアーをやるのはおもしろいと思います。

澤田 例えば理系の学生と文系の学生を半々ずつぐらい集めていくとかですね。

濱村 いろんな分野の人を呼ぶと、いろいろな話ができるのかなと思います。また、今回見た北海道の施設だけでなく、ほかの施設と見比べたりすることで、どういうものが大切な部分か勉強になると感じました。

梅澤 原子力のことを知らない人たちが、逆に原子力を勉強している人たちのことをどう思っているかに関心があります。それぞれの意見を聞くことで、理解が深まるということですね。

澤田 日本原子力学会に対するリクエストはありますか。原子力学会はどう見えていますか。

濱村 専門的過ぎている感じがします。もっとソフトな面があればと思います。

梅澤 原子力学会は、それぞれの専門分野では知り合っているのですが、その外側との交流が少ない。コミュニティーをもっと広げられる機会があればいいと思います。

澤田 部会を超えた横のつながりや広がりが少ないということは大きな課題ですね。

吉永 事故があったので、原子力学会はすごく沈んでいるのかなと思っていたのですが、そういう感じが無い。

澤田 原子力には上流から下流まで総合的にいろんなものが詰まっているけれども、学会の中のそういう部会単位で固まっていると、総合的視点がなかなか持てない。でも、現場へ行けば、感じる部分がある。原子力発電所はいろんな要素技術が集まってきて、トータルでうまくマネジメントし、コントロールしないと事故が起きる。だからこそ、より総合的な視点というのが重要ですね。

三島 物事を改良していくには試行錯誤が重要です。けれども原子力関連の場合はスパンが長過ぎて、人間ひとりが生きていく間に何度も何度も試行錯誤を繰り返さないというのは問題だと感じました。

澤田 いい指摘だと思います。世の中にある多くのプロダクトは車にしても、それこそクラッシュテストをやって潰せる。ただ、自分が技術者、車製造、設計とかにかかわっている技術者だとすると、30~40年という技術者生命の中で、車をどんどんバージョンアップしていくことができる。けれども原子力発電所は、40年などというサイクルだから、自分のキャリアの中でバージョンがドラスティックに変わることを見ることはできない。そのもどかしさはあるかもしれませんね。

皆さんのこれからの活躍に期待しています。

今日はありがとうございました。

<参加者>

三島 理愛 (みしま・りあ)

東京工業大学理工学研究科原子核工学専攻竹下研究室

梅澤 征悟 (うめざわ・せいご)

東京工業大学理工学研究科原子核工学専攻井頭研究室

吉永 恭平 (よしなが・きょうへい)

東京工業大学理工学研究科原子核工学専攻竹下研究室

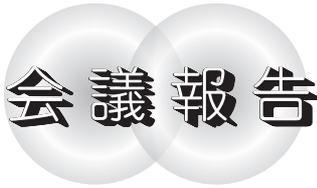
堺 俊之 (さかい・としゆき)

東京工業大学理工学研究科原子核工学専攻塚原研究室

濱村 肇 (はまむら・はじめ)

東京工業大学総合理工学研究科環境理工学創造専攻竹下研究室

(所属は2016年12月時点のものです)



国際会議 Actinides2017

2017年7月9～14日(仙台市, 日本)

2017年7月9日から14日まで、仙台市片平の東北大学百周年記念会館(萩ホール)において Actinides2017 国際会議が開催された。本会議は、アクチノイドの科学と応用に関する最大の国際会議であり、1975年のバーデンバーデン(ドイツ)以来、ほぼ4年に一度開催されている。日本での開催は、2001年の葉山以来16年ぶりであり、また、2011年の東日本大震災及び福島第一原子力発電所の事故後初めての開催であった。アクチノイドとは切っても切れない原子力関係者の大きな関心が集まる中での開催であることから、プログラム編成には、物理、化学、燃料、環境など従来から取り上げられていたトピックスや、最近急速に進展している核医学への応用、新元素の発見が相次いだ超重元素に加え、現在まさに進行中の廃炉及び核鑑識に関する話題が取り込まれた。

会議冒頭には、小川徹組織委員長より Actinides 会議を軸としてアクチノイド研究を取り巻く状況が、また共催の原子力機構三浦幸俊理事、東北大金研の高梨弘毅所長からはアクチノイド研究への貢献が述べられた。

これに続く5日間のセッションは基調講演(7)、招待講演(19)、一般講演(116)及びポスター講演(83)から構成され、このうち、招待講演及び一般講演は2会場を用いたパラレルセッションとして行われた。ポスター会場となった2階ピロティでは、約50面のポスターセッションが2回開催された。以下に分野毎に内容をまとめる。

化学分野では、水素製造を目指したウランの錯体触媒に関する基調講演(K. Meyer)の他、軽アクチノイド(U, Np, Pu)の化学、錯体の合成や性質、反応性や相互作用の観察、天然に由来する配位子との錯形成などの報告があった。物理分野では、単結晶 UO_2 で発見された新現象(K. Gofryk 氏の基調講演)や、強磁性との共存など、特異な超伝導特性及びそのメカニズム解明に向けた報告があった。また、新物質探索、放射光を利用した測定手法の発展に関する話題が提供された。抽出分離分野では、再処理工程に関する化学の問題、抽出剤としてアミド配位子、ピリジン含有配位子、ゲル、樹脂を用いた分離法、結晶析出法等の報告があった。燃料分野では、金属・酸化物の燃料の製造方法、剛性、熱物性、拡散、照射損傷や、ADSのための窒化物燃料、福島事故との関連でシビアアクシデントに関する研究があった。新たな方向性として薄膜・表面を用いた酸化物反応性の研究が報告された。材料科学では、保管に関連してUやPuの合金やその腐食、老化、ウラン水素化物に関する研究が報告された。ま

た、配位化学を利用したアクチノイドナノ物質合成制御に関する基調講演(S.G. Minasian)にあるような金属有機物フレームワークの提案や活用が増えている。スペクトロスコピー分野では、アクチノイドの錯体や酸化物について、XAFS や光電子イメージングによる共有結合性検討、検出や構造解析を目的とした時間分解レーザー誘起化学発光分光法、構造や常磁性効果の検討のためのNMR、圧力依存性や非化学量論性の検討のためのラマン分光、陽電子消滅による欠陥研究について報告があった。環境分野では、アクチノイドを含む長寿命核種に関する熱力学及びデータベース(D. Rai 氏の基調講演)、超微量分析と事故後の汚染状況、固定化・取着の研究が報告された。今回新設された廃炉分野では、廃止措置との関連で期待されるアクチノイド研究の新たなアプローチ(山名元氏による基調講演)のほか、福島事故と関係したデブリの状況、除去、処分、環境水からのCsやアクチノイドの除染、周囲の環境汚染やその相互作用が報告された。核医学分野では、標的型放射性同位体治療の基調講演(東達也氏)、医療用同位体の製造、標識化合物、生体への投与について報告があった。核鑑識では、基準物質やスパイクの保管、ウラン鉱床の異質性、レーザー分光や粒子・トラック分析について報告があった。超重元素では新元素ニホニウムの発見(工藤久昭氏の基調講演)、新元素や「安定の島」、超重元素の化学や分光について報告があった。

これらの講演に加え、会議2日目には、廃炉に特化した特別セッションが、原子力安全研究協会と共同で開催された。一般講演の終了後、遅い時間の開催だったにも関わらず、参加者の関心は極めて高く、用意された座席はすぐに埋まり、立ち見が出るほどの盛況であった。

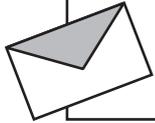
会議の最後には、学生ポスター賞がプログラム委員長から発表され、続いて、G. Lander 氏及び D. Clark 氏によるサマリーでは、会議のトピックスの包括のみならず、核燃料・RI 研究のアクティビティや施設の難しい状況を踏まえた上で、今後のアクチノイド研究への展望が述べられた。

会議の参加者は約250名であり、最近の Actinides 会議とほぼ同規模であった。過半数は外国からの参加者であり、特に中国からの参加者数が増えつつあった。研究活動の活発化が反映されている。次回は、2021年にフロリダ州タラハシーにおいて開催されることが決定した。

(日本原子力研究開発機構 芳賀芳範, 東北大学 山村朝雄,

2017年11月30日記)

理事会だより



大学における原子力研究教育と研究施設

2年前の6月に部会推薦により本会理事となり、昨年6月より2期目を務めている。企画委員会を主として、福島復興プロジェクトや学協会連絡会、教育委員会などの活動に参加している。特に、春の年会や秋の大会では、理事会セッションの企画や、学生ポスター発表などに対応している。昨年より、原子力アゴラ調査専門委員会に「大学等核燃およびRI研究施設検討・提言分科会」が設置され、活動に参加している。現在、国内大学や研究機関における核燃およびRI施設について、老朽化、人材の確保、改修・移動等への規制対応、廃棄物の取扱い、施設の統廃合などの課題とともに、核燃料研究自体の縮小や原子力分野における基礎・基盤研究の実施、さらには、次世代への研究展開への影響が懸念されており、原子力分野における教育および研究環境の整備と次世代への人材育成が喫緊の課題となっている。この分科会では、大学等における核燃およびRI研究施設の現状の調査と、対応すべき課題の整理、さらには今後への対応について提言を行うこととしている。ここでの活動を紹介しながら大学の現状と、今後の対応について考えてみたい。

本分科会には、核燃施設を保有する原子力関係の大学および研究機関からの委員が参加し、各大学における核燃施設の現状(施設内容、保有量、管理体制、核燃管理状況、廃棄物保管状況など)について情報収集するとともに、各大学における核燃施設の在り方、全国規模での在り方、規制への対応などについて意見交換している。それらをまとめる形で、昨年、秋の大会(北大)では理事会セッション「原子力研究に関わる法規制(核燃およびRI)の動向」を教育委員会とともに開催した。ここでは、原子規制庁の担当の方々から、原子力研究に関わる核燃およびRIに関する法規制の現状および動向についての講演を受け、今後の大学等の研究施設の在り方と、法規制への対応について大学関係者を含めたパネルディスカッションを行った。

ウラン等核燃料物質を扱う施設では、核燃料物質の種類、使用設備とともに、研究の目的の許可を必要とする。私の所属する東北大学多元物質科学研究所においても、東北地方にて発見されたウラン鉱の製錬や燃料製造、再処理研究を行うために核燃施設が設置された。また、核分裂生成物やアクチノイド核種の研究のためにRI使用の許可も有し、核燃料サイクルに関わる研究を半世紀にわたって展開している施設である。1978年6月には宮

城県沖大地震を、2011年3月には東日本大震災を受け、施設の老朽化対策が必要であった。2012年に改修されることになり、震災直後の7月から翌年2月にかけて文科省の原子力規制室および放射線規制室へ変更申請手続きに伺い、許可を得て、改修工事を行った。このとき、従来のウランおよびトリウム鉱石の研究や、燃料製造、再処理研究に加え、新たに核燃料廃棄物の研究を取り上げた。これは、福島第一原子力発電所事故に対応して必要となる研究項目である。その後、規制庁による、核燃料物質等の使用状況調査や放射線障害防止法による立入調査の他、IAEAによる補完アクセス調査やランダム在庫調査にも対応している。国立大学法人化以降は、労働安全衛生法に基づく安全管理への対応が必要とされ、各大学において、経費や人材の確保を含めて放射性物質を扱う施設・設備の維持に苦勞している。

原子力規制委員会はIAEAが実施した総合的規制評価サービス(IRRS, Integrated Regulatory Review Service)の結果に基づく規制法の整備を進めており、原子炉等規制法等の改正法が昨年4月14日に公布となり、一部法令が7月10日に改正されるとともに3年以内の全面施行する予定である。このような新規制に対して、研究炉に関しては国や学協会などで議論され、大学の研究炉が再稼働し始めている。一方、大学等核燃およびRI研究施設についてはこれからの対応が重要となる。それらは、例えば(1)核燃に関わる課題として施設の統廃合や核燃廃棄物管理、老朽化と新規制対応を、(2)RIに関わる課題としては老朽化と施設統廃合、 α 核種を含む放射性廃棄物、セキュリティ対策、さらに(3)今後の研究展開と施設のあり方については①研究施設拠点化と共同利用研究、②核燃およびRI施設の役割分担と安全管理対応強化、③大学内および国内における保管施設拠点化とセキュリティ強化、などがあげられる。

これらの大学等における核燃およびRI施設の維持・整備は、原子力研究教育の根幹に関わるとともに、将来の若手研究者の研究活動の強化や人材育成を見据えた今後数十年にわたる。震災後ほぼ8年が経過し、専門家集団である本学会が今後の原子力の在り方に真摯に向き合うとともに、各大学や研究機関、関連学協会が連携して大学等の研究施設に対応する段階に来ている。私自身も、専門家の立場を踏まえて企画委員としての理事2期目の活動を通じて貢献したいと考えている。

(理事 佐藤 修彰)