

インタビュー

- 1 核エネルギーの利用こそが、わが国の将来に希望を与える
—松浦祥次郎氏に聞く



聞き手 本誌 澤田哲生, 佐田 務

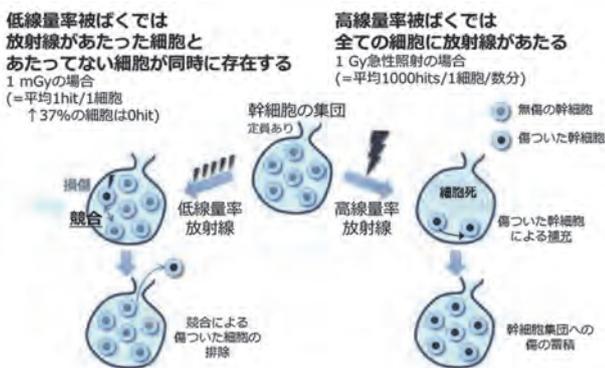
サイエンス

- 32 低線量率放射線影響における幹細胞競合の重要性

—腸管オルガノイドを用いた幹細胞競合研究

放射線による発がんリスクは、一般に線量に応じて高くなるとされているが、低線量率被ばくでは積算線量が増加しても発がんリスクが高くないという「線量率効果」が、高自然放射線地域住民の疫学研究から報告されている。この疫学研究の結果を生物研究によって検証した。

藤通有希



線量率効果メカニズムの仮説 —幹細胞競合—

解説

- 13 海外諸国と日本の廃止措置に係る仕組みについて

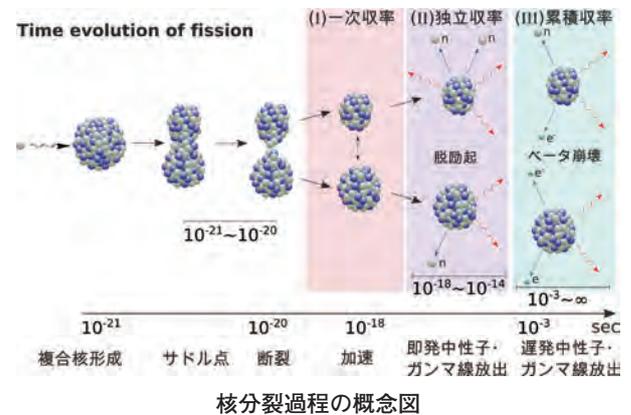
主要海外諸国における廃止措置に係る仕組みについて報告する。具体的には、廃止措置実施組織、放射性廃棄物の処分、廃止措置の規制等について、我が国の状況と比較する。

山内豊明

- 19 分裂片が核分裂生成物となるまで —即発中性子・ガンマ線放出

核分裂収率は、放射性廃棄物の組成を決定する最も基本的な物理量である。原子炉の臨界性や動特性を支配する即発・遅発中性子放出、あるいは福島事故の原因となった崩壊熱、宇宙における元素起源の解明、核セキュリティや核不拡散分野でもその重要性が認識されている。

奥村 森



連載講座 基礎から分かる未臨界 (2)

- 27 未臨界炉の中性子倍増

未臨界炉は一般に外部中性子源を伴い核分裂によって中性子を増倍させており、その増倍の度合いが問題となる。今回は臨界炉で用いられる実効増倍率は増倍を正しく表さない理由や、実効増倍率を用いて実効的に増倍を記述する方法を解説する。

西原健司, 千葉 豪

24 Column

- 「核燃料サイクル計画」映画制作プロジェクト 井内千穂
「仙台市を訪れて(1)」 妹尾優希
「物理の女はカッコいいの？」 鳥居千智
「五者であれ」を肝に銘じる 服部美咲
「リー・ラッセル博士」 坂東昌子
「原子力発電に対するイメージ」 マイケル瑛美

報告

37 我が国における大学等核燃およびRI研究施設の在り方について

大学等における核燃およびRI研究施設は原子力分野における基礎教育および基盤研究に不可欠な施設であるが、施設の老朽化や安全管理への対応が課題である。当分科会では現状の課題を抽出し、提言をまとめた。

「原子力アゴラ」調査専門委員会
大学等核燃およびRI研究施設検討・提言分科会

42 今後の高速炉サイクル研究開発 —原子力機構の取組

原子力関係閣僚会議は昨年末に、今後の高速炉開発を特定する「戦略ロードマップ」を決定。これを受けて原子力機構は、民間ニーズ対応型の研究基盤の整備やシーズ提供を目指した今後の取組方針を策定した。

早船浩樹, 前田誠一郎, 大島宏之

日々是好日～福島浜通りだより (6)

54 しあわせと叫びたい

吉川彰浩



楢葉町の花火

理事会だより

55 福島の実環境再生を目指して

布目礼子

7 NEWS

- 関西電、金品受領問題で会見
- 東京地裁、東電元経営陣に無罪判決
- 規制委が福島第一事故の調査・分析再開
- 海外ニュース

Short Report

48 高性能簡易型霧箱の開発とそれを利用した放射線教育の普及活動

放射線に対する理解を進めるためには、自然放射線の存在を知ることが必要だ。霧箱はその最も効果的な教材である。

戸田一郎



簡易ガラス霧箱

51 原子力をいかに物語として語るか PIME2019—他産業の経験に学ぶ

和田裕子



「宇宙開発」のストーリーのイラスト

18 From Editors

31 新刊紹介「腐植物質分析ハンドブック 第2版」

土肥輝美

50 新刊紹介「放射線の生体影響と物理」 泉佳伸

56 日本原子力学会「2020年春の年会」発表および参加申込受付のご案内

58 会報 原子力関係会議案内、「2019年秋の大会」学生PS受賞者一覧、主催行事、英文論文誌(Vol.56, No.11)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、「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.net/publish/atomos>

INTERVIEW

核エネルギーの利用こそが、わが国の将来に希望を与える

松浦 祥次郎 氏 に聞く

「福島第一原子力発電所(1F)事故は原子力関係者に、安全確保をめぐる根底的な問い直しという問題を投げかけた。ここからの教訓を安全確保における遺伝子として組み込むことが、原子力関係者に課せられた使命である。至近の問題では原子力規制委員会のような権限を行使する機関にはそれを監視する主体が必要であり、法律上は国会に設立されるはずなのに、いまだ設立されていない。なお、未来を展望するならば、この地球上でエネルギー密度がもっとも稠密かつ安定的に蓄積されている核力を利用した核エネルギーを利用することこそが、我が国の将来に希望を与えるものとなるだろう」



松浦 祥次郎 氏 (まつうら・しょうじろう)

京都大学大学院原子核工学修了。
日本原子力研究所理事、原子力安全委員会委員長、日本原子力研究開発機構理事長、原子力安全推進協会理事長などを経て、現在は同協会顧問。

聞き手 本誌 澤田 哲生, 佐田 務

1F 事故で安全確保のパラダイムが変わった

澤田 3.11 によって何が最も大きく変わったのでしょうか。あるいは変わらないといけないのでしょうか。

松浦 福島第一原子力発電所(1F)事故後、私たちは大きな問題に直面しました。安全確保はこのままでいいのかというものです。

米国機械学会(ASME)のイニシアティブで「New Nuclear Safety Construct」という検討会が開かれました。これまでの安全確保のパラダイムを変えなければいけないのではないのかというのがその根本にありました。それに私も呼び出されたのです。座長は USNRC(米国原子力規制委員会)前委員長ディアスさん(Nils J Diaz)でした。

そこでの認識は、今回の事故で最も重視すべきは、天災つまり外的事象で起った事故ということです。1F 事故前にはウィンズケール事故、米国の軍事用試験炉 SL-1 事故、スリーマイル事故、チェルノブイリ事故という四つの過酷事故が起きましたが、これらはいずれも内的事象に起因するものでした。しかし 1F 事故はそのきっかけが巨大地震とそれに伴う大津波という外的事象に起因する大事故でした。

また、国際原子力機関(IAEA)の INSAG(International Nuclear Safety Group: 議長 Richard A. Meserve 氏)では、2011 年次の最重要安全課題を 1F 事故対応と定め、集中討議の結果を年次レターとして IAEA 事務総長に送りました。その要旨は次の 2 項目であったと本人から後日、伺いました。

1) 現行の LWR 技術はあの事故を防止できるレベルにある。そのためには施設が必要十分に設備され、か

つ従事者が過酷事故防止の施設の運用に十分な訓練をもって習熟していなくてはならない。

2) ただし、極めて発生確率は低い、生じた場合の影響が巨大な外的要因事故とその対応については今後もなお研究が必要である。

想定外の外的事象も、「想定」する

澤田 パラダイム転換のポイントは何でしょうか？

松浦 その前提となるのが

- 1) 科学的・技術的合理性の追求
- 2) 不確かな事象への科学的・技術的対応
- 3) レジリエンス能力の強化
- 4) 社会・地元との協働

です。さらにパラダイム再構築の追加要件が、

- 1) 極めてまれな、かつ影響が巨大な外部要因の特性
 - 2) 実証性の困難な事象へのアプローチ
 - 3) 過酷事故時における周辺住民との協働体制構築
- だと思っています。

これらの中でもっとも重要なポイントになるのが、想定できないものに対してどう考えるかということです。考え方のスケールが拡大し、低頻度でも起きた時に影響が大きい外的事象を規制のスコープに入れたことが、今後のパラダイムチェンジの最大のことで、それがどこまでできるのかという問題は残ります。

澤田 今の原子力規制を見ていると、松浦さんが懸念された問題、これは「仕掛け」や「罠」と言ってもいいかもしれませんが、そこに嵌っている面がありそうです。自然現象なら、竜巻きでは想定しうる最大規模に対応せざるを得なくなっている。基準地震動も同様です。もっと深刻なのはいわゆるテロ対策です。このような隘路から

誰も抜け出せなくなっているのが現状ではありませんか？

松浦 テロはまだ、何とか防げると思います。けれども戦争が起こるようだったら、それはもう防ぎようがありません。

澤田 想定外の自然災害や戦争に対し、原発も含めた人工物はどう対応すればいいのでしょうか。新幹線は活断層の上を走っています。では万一、走行中に地震が発生して、ATSなど作動しても事故に至った場合はどうするか——それはもうしようがないということになります。要するに死亡リスクはゼロにはできない。それが人工物の前提ですし、人が築いてきた文明はそのこと込みで発展してきたと思います。では、原発だけが特別枠なのでしょうか？

松浦 原発にしても、万一の重大事故時に死亡リスクをゼロにしようとしても、それは不可能です。今までの人類の歩んできた人工物の歴史を見ても、死亡リスクゼロを前提に進めてきたようなことはなかった。

澤田 原子力規制委員会でも、原子力発電所の重大事故時にどこまで死亡リスクを許容できるかということについては曖昧なままですね。

松浦 米国流の考えを適用すれば、答えは出てくると思います。要するに全ての災害に対し、それを防ぐためのコストはどれぐらいかかるかなどを評価して、それを規制に反映していくということが、かなり明確です。

澤田 先ほどパラダイムシフトに言及されましたが、このうちの死亡リスクは安全目標の根幹に関わるのですが、この点のパラダイムはまだシフトしていないままですね。

松浦 日本はそうです。それに関連するのですが、冒頭に言いました ASME での「New Nuclear Safety Construct」は、米国では関係者から反対の声が上がったようで、これがうまく進まなかった。

澤田 米国はこれまでシビアな事故を経験しながらもそこそこうまくやってきているなかで、自然災害のリスクをこれまでと異なるパラダイムで規制に取り入れられたら、事業者は立ち行かなくなります。それに米国の場合は軍事である潜水艦の軽水炉技術が民生用の発電用軽水炉のルーツであるので、必要とあらば US Navy (米国海軍) のガバナンスが出動しますね。

松浦 そう。アメリカの民生用原子力は強くかつ効果的に Navy 経験者にサポートされています。

澤田 米国の民生原子力には、Navy がいわばジョーカーを握っている。ところが日本の原子力にはそれが無い。

松浦 だからその部分が、日本の現体制では原子力規制委員会にならざるを得ない。

澤田 松浦さんが今、最も心残りなのは何でしょうか。学生時代から関わってこられた原子力研究 60 年の

歴史の最後の方での事故が起こった。起こるべくして起こったような面はあるのでしょうか？

松浦 私が学生時代の頃から原子力の研究に邁進してきて、果たして大出力『軽水炉』志向がベストな選択だったかどうかということを考える時があります。一方で、例えば安全性に優れるガス冷却炉があります。専門家としての自信を持って、そのことを一般の人々も含めて広く訴えかけることができなかつたことでしょうか。

佐田 原子炉の安全性確保、リスクの観点から言うと、今話題になっている小型炉の方が安全性のパフォーマンスは高いのでしょうか。要するに 100 万 kW 1 基よりも、経済性が劣るとはいえ 20 万 kW 5 基の方が安全面は有利でしょうか？

松浦 1 基あたりの事故の発生確率の観点からは、そう大きな違いはないと思いますね。小型炉 5 基を同じサイトに置けば、1F の津波のような共通の要因によって複数基が不具合になることは避けられない。1 基あたりで見れば、事故が起こった後の影響は小型炉の方が小さくできるので有利と見ていいでしょう。

澤田 小型炉は固有の安全性を向上させることが、大型炉に比べて容易ですね。

松浦 100 万 kW 級以上がどうかという問題はありますが、私が 60 年間で養ってきたセンスでいえば、数 10 万 kW 級が良いのではないかと思います。昔、日本原子力研究所の理事長もやっていた物理学者の菊池正士先生が、30 万 kW 程度が最適なのではないかと言っていたのを覚えています。

大規模なテロ対策を行うのは事業者ではなく国

佐田 1F 事故の教訓は十分に活かされていますか？

松浦 一つ言えることは、現場のスタッフに関して言えば日々の心構えや具体的な作業、何か発生した時の対応手順に関してパラダイムが徹底し直されていることは確かです。

佐田 必ずしも合理的とは言えない反省も含まれていないでしょうか。特重施設(特定重大事故等対処施設)、つまりテロ対策施設はどうでしょうか。

松浦 あれは疑問に思う部分があります。いざという時に理屈通り動けばよいのですが、理屈通り動くことをどうやって担保しているのかがよくわからない。

澤田 特重施設では経済的合理性はもちろん、機器つまりメカニズムとしての合理性もない。では一体どのような合理性の要求の元にあるのでしょうか？

松浦 特別な外的事象への対応ですね。

澤田 地下に作っているようですが、であれば何かしらの飛来物への対策としか考えられない。

松浦 発電所に突っ込んでくる飛行機にまで対策しろと言われても、それは事業者には荷が重すぎます。

澤田 特重施設はグーグルアースで調べればその場所や開口部などはわかると言われてしています。そうすると武装した侵入者にどこまで対応できるのかよくわからない。過剰な対策の極め付けです。

佐田 安全の根幹が何なのかをとらえることなく、枝葉に走っているように見えます。

松浦 個人の異常行動や侵入者への対策は、事業者がやるべきことです。けれども国家的規模の異常事態、例えば大規模テロとか戦争に事業者が対応せよと言っても、それは無理です。

原子力規制を監視する主体がない

澤田 3.11後の原子力に対するガバナンスの強化ということでは、原子力規制委員会と原子力規制庁の発足がその最たるものです。ところで、規制委員会と規制庁が実際に発揮しているガバナンスはいかがでしょうか。端的に言えば、事業者が真つ当な異論を言えるようなカルチャーがない。

松浦 いや、もともとは異論が言える仕組みをきちんと作っています。規制委員会を設置するその法律の中に、規制委員会の監視機構を国会の中に作るということが付帯事項で明記してあります。

佐田 しかしそれは、実際にはあるのでしょうか。

松浦 いや、それが作られていない。

佐田 権限を行使する主体には、それをさらに評価し監視する主体が必須ですが、それがないとすれば、どうすればいいのでしょうか。

澤田 松浦さんは最近、前の原子力規制委員会委員長である田中俊一さんを訪ねられ、そこで田中さんがご本人の在任中の振り返りとして、上層部の科学的認識の不十分さと判断の遅さが原子力規制行政の運営にあたってある種の障害であったという趣旨のことを仰っています。この上層部とはどなたのことでしょうか。

松浦 これは私が田中さんの飯館村の山荘を訪れて聞いた際のことですね。行政の上層部ではないでしょうか。

澤田 霞が関の上層部のことでしょうか。しかし、霞が関の幹部は永田町のもとにあります。政治家はどうなのでしょう。

松浦 これは私の認識に過ぎませんが、政治家のことを言っているのではないと思います。

澤田 原子力規制委員会の初代委員長の田中さんは原研時代の松浦さんの後輩で、田中さんを支えた前規制庁長官の安井正也さんは京大原子核の松浦さんの後輩です。その規制委員会・規制庁自体がある種の隘路に陥っているのではないのでしょうか。

松浦 そうならないような仕組みは先に述べたように法律の付帯事項にきちんと書いてあるのですが、国会議

員の皆さんがその助言・監視組織を実際にまだ作っていないのが実情です。

澤田 その点はもっと広く認識が共有されるべきだと思いますし、松浦さんはじめ原子力関係者が議員の皆さんに訴える必要があるのではないのでしょうか。このままでは規制委員長一人が全責任を負わざるを得ないような状況で、非常に辛いのではないのでしょうか。助言・監視組織をきちんと立ち上げて、ある種の責任の分散をするべきではないのでしょうか。

脱炭素実現に核エネルギー利用は不可欠

佐田 核エネルギーの意義と行く末、その本質について最近松浦さんはいろいろところでご自身の考えを披露されていますね。

松浦 まず核エネルギーの利用なしに、脱炭素は無理だと思っています。太陽光や風力による発電はもし、非常に性能が高く、低コストの電池ができれば、それはそれで使い物になるかもしれません。

澤田 しかし、太陽光も風力も元は太陽の核融合による核エネルギーで、宇宙を旅し、地球の大気圏を旅して地上に届くまでにエントロピーが凄く増大してしまっていて非常に質の悪いエネルギーになってしまっています。量的に言っても質的に言っても最悪のエネルギー選択だと思っています。

佐田 核エネルギーは化学反応エネルギーの100万倍なんですね。

松浦 それは石炭などの化学燃料と核燃料の単位重さあたりの発生エネルギーで比較した場合です。化学反応は1反応のエネルギーは1 eV程度ですね。一方、核エネルギーは核分裂で言えば、1核分裂のエネルギーは200 MeVですね。200×100万(つまり1 Mega)ですので、20億倍ですね。

佐田 そうすると資源の有効活用という点からすると、この核エネルギーをうまく使っていくというのは私たちのオプションから外せない。

松浦 そうですね。原子力とその他のエネルギー源をうまく組み合わせて使っていくことが脱炭素の近道、というよりはそうしない限りは脱炭素は達成できないと思います。

佐田 小型炉と、いわゆる事故耐性燃料の組み合わせが、今後重要性を増していくのでしょうか？

松浦 事故耐性燃料は追求されるべきですね。しかしそれで異常や事故がまったくゼロになるわけではありません。

佐田 原子力が火力に置き換わるためには、変動する自然エネルギー電源(太陽光や風力発電)のバックアップの役割も果たさないとイケない。

松浦 いわゆる負荷追従ですね。これはフランスなど

の諸外国ではすでに普通に行われています。日本では原子力船『むつ』の動力源となった小型炉がいい例です。船は時々刻々変化する状況に合わせて動力を変動させなければなりません。つまり時間的に小刻みな負荷追従が本質的機能として要求されます。

原子力船『むつ』は試験航行を相当時間にわたって行いました。当時の船長は『むつ』の出力変動特性が非常に優れたものであったと記録に残しています。なお、原子力船『むつ』の原子炉は設計から製造まで全て純国産でした。

将来的に求められる原子力発電によるバックアップの可能性は、『むつ』が用いたような小型原子炉にあるかもしれないですね。

将来のカレイドスコープ(万華鏡)

澤田 科学技術の今後の超長期の行く末に対する松浦さんの見通しはどのようなのでしょうか？この混乱の時期をカレイドスコープに例えると、どのような色や形がその先に見えてきますか。

松浦 日本が原子力を使わなければ、日本の工業力がどんどん落ちていきます。日本はこのままだと中国に飲み込まれてしまうかもしれません。それでもいいのかもしれませんが、さらに200~300年経つと、中国の隆盛も終わるかもしれません。今の日本人のカルチャーや創造性をこの先も活かして行こうとするなら、この先も原子力を最高度に利用していくしかないでしょう。

これまでのリテラシーは“読み・書き・そろばん”的な域を脱していません。私は、それよりももう一段上のリテラシーを切り開いていかなければいけないと思っています。

佐田 それはどのようなものなのでしょうか。

松浦 新しい哲学、あるいはそういうものを創造していく能力のようなものがいいと思います。東大名誉教授で哲学者の一ノ瀬正樹さんが、3.11や原発事故関連死に関して論考しています。「放射線による被害」より「放射線を避けることによる被害」の方がずっと大きく、「もし無理な避難をしなかったならば、これほどの被害は発生しなかったらう」ということも考慮する価値があること、これらの問題の背後には、政府や電力会社への不信任と、原発行政を黙認してきた市民自身にも自己欺瞞があり、そのことが事態を泥沼化させ、道徳のジレンマをもたらしていることなどを述べておられます。

これからは、このような思考の背景にある哲学に基づいて新しいリテラシーを創造されるようなものを想起しています。

佐田 「放射線による被害」より「放射線を避けることによる被害」の峻別、そしてその背後にある道徳のジレンマ…。

松浦 1F事故では放射性物質によって周辺地域を広く汚染させるという災害が起きました。そのことは今後も継続したままです。このことによって人々に原子力利用を懸念する心情が生じました。その心情が長く続くのは当然です。とはいえ、この事故による放射線障害については早発性障害による死者は一人もなく、晩発性障害を発生する被ばく者もほとんどない、あるいはあるとしても極めてまれだと国際的には評価されています。

けれどもこの事故に伴う強制的な避難によって、2千人を超える死者が出ました。そのことをもたらした契機はもちろん、1F事故にあります。一方で、原子炉事故時避難の準備不足や対応判断の過誤がこの不幸な事態を引き起こしたこともまた事実です。その背景には、放射性物質や放射線に関する基礎的な知識が関係者に確実に習得されていなかったことがあるのではないかと思います。

安全な原子力利用を実現するためには社会構造の中に、確実な放射線防護の知識と技術体系をビルトインさせることが不可欠でしょう。

技術は社会を変え、価値観をも変える

澤田 AIについてはどのように見ておられていますか？

松浦 僕はまだ、懐疑的に見えています。

澤田 Life3.0という考え方があります。Life1.0はバクテリアのような原始生物、Life2.0はヒトです。Life3.0は超人類。その違いは、ヒトは自己の意志に基づくものづくりなどのカルチャー、つまりソフトウェアを創造してそれを高度に改善していくことを重ねてきたことにあります。しかしヒトの身体、つまりハードウェアはまだ自然の進化に基本的に委ねています。Life3.0は、このハードウェアも自己の意志に基づいて自在にデザインし改良していく。遺伝子操作やiPS細胞は、そのさきがけかもしれません。

松浦 ヒトだけでなく類人猿もカルチャーはあるのでは？

澤田 そうですね。カルチャーらしきものはあります。しかし、意志に基づいたデザインをしているかと言えばどうもそうではありません。チンパンジーに素朴な言語を教えることはできるかもしれませんが、自己発展的に自ずから言語(文字や文章など)を創造して改良していくようにはどうも思えない。その違いです。

松浦 私はカルチャーというのは価値の認識だと思うのですよ。僕は欲望がヒトのドライビングフォースだと思っていますが、欲望がどのようにして生まれるのかがとても不思議です。

佐田 技術は自律的に発展する、極端にいうと暴走するという宿命を持っていますので、技術そのものが逆に

人間に対してある種の支配力を持つてくる——そこにどう臨むか。

澤田 すでにそういう世界になっていますよね。例えばスマホは全世界を結ぶITネットワークの単なる端末だと思っていましたが、いつの間にか手放せなくなっているばかりか、スマホによって私たちの行動や嗜好がデータとして吸い上げられて行っています。

ところで、AIスピーカーを導入されていますか？

松浦 いや、うちにはありません。

澤田 AIスピーカーは私たちのリクエスト、例えば「米津玄師の“フラミンゴ”をかけて」というお願いを素早く実現してくれます。ただ、お願いを聞いてくれるだけではなく、時々向こうからも話しかけてくるのですよ。

松浦 例えばどんなことを？

澤田 あるとき5、6人でワイワイガヤガヤと雑談していました。すると突然、AIスピーカーが「汚い言葉は使わないでください」と言ってきました。誰かが“ふざけんー、やっつけるぞー”などと言ったのでしょうか。

佐田 なるほど。AIは人間に対する支援にとどまらず、ある種の介入を始めているわけですね。

澤田 AI 碁のアルファゼロは3千年の歴史がある碁をわずか8時間で学習し、トッププロを破りました。ですから、私は原子炉の運転や保守、それに規制も近い将来AIが行った方がいいのではないかと思っています。そういう世界が現実に来ると思っているのです。

佐田 それはそれとして、今の私たちの時代ではこれからの社会の目指す方向が見つけにくいような気がします。もっと豊かに、もっと快適に、を望むだけでは、社会は誤った方向に行くのではと懸念します。

松浦 それはそうだと思いますよ。厄介なことに人間の欲望には何段階かありますよね。最初は命の維持です。そして快適さを求め、言いたい意見を言い、やがては人を支配したくなってくる。この方向で動くは大変ですよ。

佐田 その代表はマズローの5段階説ですね。それ自体は前提だとしても、それを実現するツールとして、例えば、もっと速く移動したいということで新幹線や飛行機を開発する。しかし、いつのまにかより速い技術開発そのものが、自己目的化して行く。そうすると技術が私たちの価値観を侵食していくようになる。今や私たちは、すでに技術に支配されていませんか？

澤田 宇宙の開闢からこれまでの変化の流れをテクノロジーの本質だとすれば、残念だけどその流れを変える術を私たちは持っていない。技術が私たちの価値観を侵食しているのも、その流れのなかのひとつの出来事かもしれない。

松浦 ビッグバンからの冷却の過程で宇宙の中にいろいろなものが生まれてきました。核エネルギーもそのような流れのなかでウランやプルトニウムの原子核にパッキングされたものです。その核エネルギーが20世紀に再発見されて利用に供されるようになった。これはある種の必然であって、その現実からは逃れられない。であれば、今日私がお話ししたようなより良い利用の仕方これから追求して行くべきではないかと思えます。

佐田 いろいろな話が出てきました。読者の皆さんがそれぞれの立場で、今日の内容を受け止めていただければと思います。今日は長時間ありがとうございました。

(8月28日 実施)

エピローグ



電池の性能向上は今の100倍が限界

世の中では、再生可能エネルギーへの期待が高まっています。風力発電や太陽光発電など再生可能エネルギーに期待が寄せられる理由の一つは、脱炭素の面で優れるとともに、今後も量的

拡大の可能性が高いことにあります。

一方でその欠点は、エネルギー密度が低いことと、時間的な変動が激しい点にあります。この欠点を補うことができるのは、現行のものより決定的に質量エネルギー

密度が高い蓄電池が開発できるかどうかによります。

なお、電池の性能は年々上昇しており、現行の電池で最高の性能を誇るものは200 Wh/kgレベルに達しています。けれどもそれは、数10万kWクラスの風力や太陽光発電の不安定性を定常化するには全く適しません。それに対応する電池を開発しようとするれば、その価格は天文学的な数値になります。また、電池には充放電回数の制約もあります。充放電回数が数千回レベルでは、電源安定用には適しません。

他方で、今のリチウムイオン電池を超える高質量エネルギー密度電池の研究開発が進められています。固体電解質型や空気型電池がそれです。このためもし、超高質量エネルギー密度の電池が実現できるとするならば、石油や石炭を利用した炭素系発電も原子力も不要となる可能性があります。

とはいえ、これらの電池のしくみはすべて化学反応に

もとづいています。このため、その基本反応のエネルギーレベルはeV(電子ボルト)どまりです。化学反応の空間的サイズは原子、分子、イオンのレベルであり、質量エネルギー蓄積密度はこのサイズによって限界が決定されます。このため、仮に画期的な高性能電池が開発されたとしても、その性能は現在のリチウム電池の100倍を超えるのは不可能と考えられます。

核物質は膨大なエネルギーを貯蔵した「電池」

一方で、この地球上でエネルギー密度がもっとも稠密かつ安定的に蓄積されているのは、すべての物体の内部に「核力」として潜在させられているものです。そして、この核力を核分裂反応で利用できるようになったのが、原子力にほかなりません。現代の科学技術は、このように核内に蓄積された質量を核分裂によってエネルギーとして取り出すことを可能にしました。つまり、核物質はきわめて大量のエネルギーを長期間にわたり、安全安定に貯蔵している電池のようなものと考えてよいでしょう。

質量エネルギー密度でいうならば、核燃料と電池の差は桁外れの差があります。今の電池が究極まで進化したとしても、それは核燃料に安定的に蓄積されている値とは比べようもありません。再生可能エネルギーと原子力エネルギーのバランスよい組み合わせを、将来の人類のためにしっかり考え直し、社会の理解と信頼を得る努力をすべきでしょう。

核力の利用こそが、人類に福音をもたらす

ここで「エネルギーの本質」という、少し根源的な話をしたいと思います。その手がかりは、宇宙創成に求めることができます。

ビッグバン以前には電磁波も素粒子さえも存在できない超巨大なエネルギーが集積する極微宇宙がありました。また、その周辺には定義ができない無限真空空間(場)がありました。これらは同時に生起し、そしてその直後に極微宇宙は超高速で膨張します。それが「ビッグ

バン」です。

このビッグバンでは極微宇宙が光速より速く宇宙空間へ拡大し、その過程で時間と場が生まれ、空間におけるエネルギー密度の冷却に応じて素粒子(質量)、重力場、電場、磁場、核力場などが生じ、さらに核子が結合して元素の原子核が誕生して、現在の宇宙ができあがる準備ができました。

さらに原子核が電子と結びついて元素が誕生し、それらが電子を介して分子を構成しました。これらの分子はさらに結合し、やがて物質やエネルギーを代謝しそれを自動的に継続する生物を誕生させました。

地球をはじめ宇宙全体はエネルギーがビッグバン以後の冷却・膨張の結果として構築されたものであり、この経緯の中でこの宇宙の全現象を支配する科学的諸法則が成立しました。すべての現象はこの法則に従わざるを得ません。そして、その過程すべてにエネルギーが関わりました。

とはいえ、そのエネルギーはふつうの事物のように取り出すことはできません。

核力は、ウランのような原子核を構成する構造の中に蓄積されています。核エネルギーはウランやプルトニウムのような核燃料元素の結合エネルギーとして蓄積されており、それが核分裂で解放されます。この特質こそが、人類に貢献をもたらす根源です。このプロセスを電気エネルギーに変換し制御したものが原子力発電です。そして、近代文明所産であるこの核エネルギーを利用することこそが、我が国の将来に希望を与えるものとなります。

原爆攻撃や水爆実験、さらには1F事故からの災害が多くの悲劇をもたらしたことは事実です。一方で原子力という科学技術を正しく畏敬して理解し、活用する教育を行うことも必要だと思います。現代文明所産を駆使して世界の貧困を軽減し、平和が続く政策を打ち出し、その実現可能性を示すことこそが原爆被ばくから再生を果たした先進国としての責務であると考えます。



関西電、金品受領問題で会見

関西電力は10月2日、高浜町元助役の森山栄治氏から金品を渡されていた件について記者会見を行い、同社役員らの受領状況の詳細を報告するとともに、調査委員会を新たに設置することを明らかにした。同社の岩根茂樹社長は会見で、この問題の背景には「立地地域の有力者との間で問題を起こすと原子力事業に影響するという意識」があり、「対応が困難な問題に対し、組織として毅然と対応する仕組みが欠如していた」とした上で、前例踏襲主義の企業風土の改善など全社でコンプライアンス推進を強化するとした。

同社の報告書によると、森山氏と接点がありえる職位にいた26人のうち20人が同氏から、合計3億円超に相当する金品を受領。このうち約3千万円が未返却だとし

た。渡された対応者の多くはすぐに返却を申し出たものの、森山氏から激昂されるなどにより、返却をあきらめざるを得なかったと説明している。また、関電幹部が森山氏に、発注関係の情報を提供したり、工事発注で特別扱いや働きかけを行ったりしていた事実はなく、同氏が顧問を務めている吉田開発への工事発注プロセスや発注額にも問題となる点はなかったとした。

一方で、多額の金額を受領した行為やそのことが工事発注の適正性に疑義を生じさせたことなどについては会社全体を大きなリスクにさらすことへの認識の欠如とともにコンプライアンス上の問題があり、今後は組織としての対応方針の徹底や役員層の意識向上などを行うとしている。（原子力学会誌編集委員会）

東京地裁、東電元経営陣に無罪判決

東京地裁は9月20日、福島第一原子力発電所事故をめぐって強制起訴されていた東京電力の旧経営陣3人を無罪とする判決を言い渡した。争点となっていた津波の予見性について地裁は、「原発の運転停止を講じる結果回避義務を課すにふさわしい予見可能性があったと認めることはできない」と判断。仮に指定弁護士らが主張する時期に東電が津波対策工事に着手していたとしても、事故前に工事を完了し事故を回避できたとは言えず、事

故を回避するには原発を停止するほかなかったとした。さらに、地震発生前に当該原発の運転を相当期間、停止するためには社外の関係機関に停止することの合理性について具体的な根拠を示して了解を得ることが必須であり、3人の一存で容易に実行できるものではなかったとの見解を示した。

なお検察官役にあたる指定弁護士は9月30日、地裁判決を不服として東京高裁に控訴した。（同）

規制委が福島第一事故の調査・分析再開

原子力規制委員会は9月4日の定例会合で、福島第一原子力発電所事故に関する調査・分析を再開する方向性を示した。2020年内の中間報告書(第2次)取りまとめを目指す。同委では福島第一原子力発電所事故に関し、東京電力による廃炉に向けた取組を監視・評価する検討会を概ね月1回の頻度で開催しているが、事故の調査・分析を行う検討会は2014年の中間報告書取りまとめ以降開かれていない。

中間報告書では、国会事故調報告書で未解明問題とされた7項目の個別課題に関する検討結果を取りまとめているが、高線量などのため現地調査に着手できない事項もあったことから、廃炉作業の進捗や新たに解明された事実も踏まえ、引き続き長期的な検討が必要であるとし

ている。

4日の規制委員会会合では、今後の事故調査・分析に向けて、「現場の環境改善や廃炉作業の進捗により、原子炉建屋内部などへのアクセス性が向上し、必要な試料の採取や施設の状態確認が可能となってきた」などと、事故分析を再開できる段階に至ったとの見方が示された。その上で、事故分析の再開に際し、施設の状態や機器内付着物など、必要な現場状況が廃炉作業の進捗に伴い変貌・喪失する可能性もあることから、資源エネルギー庁や東京電力他、関係機関を交えた公開の連絡調整会議を設け、作業計画に係る情報共有やスケジュール調整を図りながら進めていくとしている。

（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)

【国際】

IAEA, 「持続的な開発に向け原子力設備の拡大必要」

国際原子力機関(IAEA)は9月10日、世界の原子力発電設備容量の長期的見通しを分析した年次報告書「2050年までのエネルギー、電力、原子力発電予測」の最新版を公表した。2018年に世界全体の総発電量の約10%、低炭素電源による発電量の3分の1を発電した原子力が、将来にわたって世界の発電量に貢献できるかについては、閉鎖される設備を新たな設備で相殺できるかという点にかかっていると指摘。プラスとマイナス面の入り交じった見解を提示している。

39版目となる2019年版は、2030年までに世界の原子力発電設備が低ケースで約8%低下する一方、高ケースでは25%上昇すると予測した。また、2050年までの予測では低ケースで6%の低下、これに対して高ケースでは80%の上昇を予測。昨年版との比較では、2050年に世界の原子力発電設備容量は低ケースで1,500万kW分増大するが、高ケースでは3,300万kW分減少するとしており、このような変化は主に、福島第一原子力発電所事故などへの対応を反映しているとした。

今回の最新版によると、一部の地域で既存炉の将来予測や長期的な拡大計画が公表されたことから、昨年版と比較して予測上の不確定要素は少なくなった。経年化や競争力の低下で閉鎖される原子炉の容量を補うため、相当量の新規設備が必要になる可能性を指摘した。

また、いくつかの地域では短期的に、低価格の天然ガスや助成を受けた再生可能エネルギーなどが、今後も原子力の成長見通しに影響を及ぼすとした。しかしそれでも、発展途上国などの地域では原子力への関心が依然として高く、パリ協定その他のイニシアチブにより原子力開発への支援が促進される可能性があるとしている。

IAEAのM. チュダコフ原子力エネルギー局担当次長は、「今後数年間でさらに一層の電力を必要とする国があるため、世界の電力需要量は急激に増大する」と明言。「原子力発電開発で大幅な拡大が見込めなければ、世界中で持続的な開発や温暖化の影響緩和に必要なエネルギーを十分確保することは難しくなる」との認識を表明した。

< 2018年の実績 >

同報告書によると、2018年末時点で世界全体で稼働可能な原子炉は450基あり、ネットの設備容量は記録レベルの3億9,970万kWだった。また55基、5,700万

kW分が建設中で、2018年中は新たに9基、1,035.8万kW分が送電網に接続された。これに加えて、5基、633.9万kWの原子炉が昨年1年間に新規着工したが、閉鎖された原子炉は7基、542.4万kWにのぼっている。

原子炉による2018年の総発電量は、2.4%増加して2兆5,630億kWhとなった。これにより、世界全体の総発電量に占める原子力の割合は約10%になったとしている。

< 2030年以降の予測 >

同報告書はまた、世界の原子力発電設備容量は2030年までに高ケースで4億9,600万kWに、2050年までには7億1,500万kWに増加すると予測。現行レベルからの増加率は、2030年で25%、2050年では80%に達するとした。

一方、低ケースの設備容量は2040年の3億5,300万kWまで徐々に減少していき、2050年には少し回復して3億7,100万kWとなる。これに対して世界の総発電設備容量は、2018年時点の71億8,800万kWから、2030年に97億8,200万kW、2050年には136億3,300万kWまで拡大。このため、原子力発電の設備容量シェアは、今世紀半ばまでに世界全体の約3%(低ケース)、あるいは約5%(高ケース)になると予測している。

< 閉鎖される原子炉と新規の原子炉 >

同報告書はさらに、現在世界で運転中の原子炉の半数以上で運転開始後30年以上経過していることから、今後数年間でこれらが閉鎖されることになることを指摘。2030年までに低ケースで1億1,700万kW分の原子炉が閉鎖される一方、新規に追加される原子力設備は8,500万kWだとした。またそれ以降、2050年までに新たに1億7,300万kW分の設備が閉鎖されるのに対し、追加で1億7,900万kW分が運転開始するとしている。

高ケースの場合は、閉鎖予定だった原子炉の多くで運転期間が延長されると想定。そのため、2030年までに実際に閉鎖される設備容量はわずか4,900万kW、その後2050年までに追加で1億3,700万kW分が閉鎖されるとした。同ケースでは、新規の原子炉も2030年までに1億4,800万kWが加わるほか、2050年までにさらに3億5,600万kWが追加されるとしている。

< 原子力による発電シェア >

このような予測から同報告書は、現在から2050年までの間に世界の原子力発電所による総発電量は継続的に増加していくとした。高ケースで2030年までに、2018年の2兆5,630億kWhから50%増えるとしたほか、その後の20年間でさらに50%増加。2050年までに、原子力発電量は現行レベルの2.2倍に達するとしている。

低ケースでは、2040年までに原子力の設備容量は低下していくが、発電量については2030年までに約11%、2050年まででは約16%増加する。ただし、このケースの原子力発電シェアは2030年に8.5%、2050年時点では6.1%に低下することになる。

これに対して高ケースの場合は、2030年に11.5%となるほか、2050年では11.7%に増大すると予測している。

フォーラム、原子力研究・技術革新に財政支援を提言

欧州15か国の原子力産業協会を代表するフォーラム(欧州原子力産業会議)は9月3日、新しいポジション・ペーパーを公表し、欧州連合(EU)域内における原子力関係の研究・技術革新(R&I)プロジェクトには、EUから一層手厚い財政支援が必要だと提言した。

このような支援を通じて、EUは地球温暖化防止とエネルギー問題の両方の目標を達成することが可能になると指摘。EU資金を提供すべき分野としては特に、最も付加価値の高いものやEU経済の脱炭素化に資する分野を挙げたほか、「ホライズン・ヨーロッパ」や「欧州原子力共同体(ユーラトム)研究訓練プログラム2021年ー2025年」など、EUにおける様々なR&Iプログラム間の相乗効果により、分野横断的な技術革新協力を確実にすべきだと強調している。

同ペーパーによると、近年は多数の国際組織が地球温暖化防止で原子力が果たさねばならない役割を強調しており、「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」は「世界全体の平均気温上昇を1.5度以内に抑える上で原子力は重要だ」との認識を表明した。国際エネルギー機関(IEA)も、「原子力発電の急激な縮小はエネルギー供給保証と温暖化防止、両方の目標達成を危うくする」とした。

欧州委員会(EC)が昨年公表した「2050年の戦略的長期ビジョン——万人のためのクリーン・プラネット」では、原子力は再生可能エネルギーとともに、欧州が2050年までに無炭素経済を達成する上でバックボーンになると明言。EUの「エネルギー同盟」も、その戦略として「原子力の技術分野でEUはリーダーシップを確実に維持すべきである」と指摘した。

EUは現在、原子力R&Iへの投資レベルで中国やロシア、米国などに後れをとっていることから、同ペーパーは、これは欧州にとって大きな課題になるとしている。

EUは昨年9月、全欧州規模の研究・技術革新促進に向けた第9次フレームワーク・プログラム(FP9)として「ホライズン・ヨーロッパ」を設定しており、これを実行

に移すために現在、複数の機関が戦略計画を策定中である。その中の個別プログラムと、将来的な複数年作業プログラム(2021年~2024年)を結びつけることが目的で、この戦略計画によりR&I支援を実施する主要な分野を特定。フォーラムとしてもこの機会に、EUが現在の課題に取り組む一助となるよう、以下のような政策項目を勧告している。

(1)「ユーラトム研究訓練(R&T)プログラム2021年ー2025年」の中で核分裂R&Dに対する財政支援の枠組を拡充し、EU域内全体で国際レベルと同等以上の原子力技術革新の促進を可能にする。

(2)「R&Tプログラム」と「ホライズン・ヨーロッパ」で互いに補完的役割を持たせ、共通のテーマや分野横断的側面を結びつける。

(3)EUにおけるエネルギー技術政策の中核的計画「戦略的エネルギー技術(SET)プラン」の「アクション10(原子力)」で設定されたR&Iを統合し、R&Iプログラム全体で恩恵を共有できるよう支援する。

(4)「R&Tプログラム」のカバー範囲を変更し、EU加盟各国や産業界、学界で実施中の活動を反映したものにする——である。

フォーラムのY. デバゼイユ事務局長は、「EUが2050年までに域内経済の脱炭素化に向けて本腰を入れるのなら、低炭素電源である原子力のR&Iに一層の財政支援を行うべきだ」と断言。「ホライズン・ヨーロッパ」などで原子力R&Iに一層の支援が行われれば、EU発電部門の脱炭素化が進むだけでなく、エネルギー輸入への依存が軽減され、域内のエネルギー供給保証も高まるとの認識を示している。

【米国】

ピーチボトム2, 3号機、80年運転の審査で環境影響面をクリア

米原子力規制委員会(NRC)のスタッフは8月8日、ピーチボトム原子力発電所2, 3号機(各BWR, 118.2万kW)における2回目の運転認可更新審査で、環境影響面の評価プロセスがクリアされたことを明らかにした。

両炉がそれぞれ追加で20年間、運転開始以降の合計で80年間運転を継続したとしても、「認可の更新を阻むほど大きな環境影響はない」との結論を、NRCは環境影響声明書(EIS)の案文に明記。同案文は7日付けの連邦官報に公表されており、NRCは9月23日までの期間にこの件に関する意見を一般国民から募集する。

NRCはまた、同発電所のEIS案文に関する公開会合を9月12日に地元で開催する予定。環境影響面の評価プロセスや、EIS案文の作業評価での判明事項、結論な

どを NRC スタッフが説明し、地元民と率直に意見交換できる場とする考えだ。

NRC はこのほか、両炉の安全性評価報告書(SER)の最終版を 10 月に発行する。その後、2020 年初頭に EIS 最終版を作成し、同年 3 月にも認可の更新で最終判断を下す見込みである。

ピーチボトム 2、3 号機はそれぞれ、1973 年 9 月と 1974 年 8 月に送電を開始しており、当初の運転期間 40 年の運転認可が初めて更新された 2013 年と 2014 年以降、追加で 20 年の運転期間に入っていた。

同発電所を所有・運転するエクセロン社は、両炉の運転期間をさらに 20 年間延長して 80 年とするため、2 回目の認可更新申請書を 2018 年 7 月に NRC に提出。承認されれば、それぞれ 2053 年 8 月と 2054 年 7 月までの運転継続が可能になる。

米国では現在、合計 97 基の商業炉が稼働中だが、NRC はすでに 94 基(※このうち 5 基は早期閉鎖済み)に対して 1 回目の運転認可更新を承認。これに続いて、2 回目の運転認可更新の申請を受理したものでは、ピーチボトム 2、3 号機のほかに、フロリダ・パワー&ライト(FPL)社のターキーポイント 3、4 号機、およびドミニオン・エナジー社のサリー 1、2 号機がある。

ドミニオン社はまた、ノースアナ 1、2 号機で 2020 年後半に 2 回目の申請を行う方針を 2017 年 11 月に表明したほか、ミルストーン 2、3 号機についても申請の可能性を示唆している。

【英国】

議会在報告書、「CO₂削減にはクリーン・エネルギー拡大政策を」

英国議会の超党派議員で構成される科学技術委員会は 8 月 22 日、温室効果ガスの排出量を削減しつつ国民所得を成長させる(=クリーン成長)ために必要な技術に関する報告書を公表し、「政府が現在の政策から転換するアクションを早急に取らない限り、2050 年までに CO₂ 排出量を実質ゼロにするという目標の達成は難しい」との見解を表明した。

これは今年 6 月、この目標に法的拘束力を持たせた法案が可決・成立したことを受けたもので、科学技術委はまず、CO₂ 削減に向けた長期的目標の強化で、政府が意欲的な判断を下したことを高く評価。その上で、英国は今の所、2023 年から 2032 年までの期間に設定した既存目標ですら、達成可能な方向に進んでいないと指摘した。

報告書は、政府が低炭素技術に講じてきた支援策のうち、遅れが生じたり効果の上がらなかった 10 分野を特

定する一方、2050 年までの CO₂ 実質ゼロ化を実現するため、輸送や暖房、エネルギー使用の効率化など、様々な部門が実施すべき 10 項目の優先事項を勧告。このなかで、原子力発電を維持しつつも新規原子力発電所の建設は一度に 1 発電所ずつ進めるべきだとしており、原子力産業やサプライ・チェーンを拡大させる必要はないとの認識を示した。

実際、異なる発電技術でコストを直接比較することは不可能であるものの、CO₂ を排出しない原子力発電への政府支援は、CO₂ の削減目標を達成する一助となるため、正しいことであると報告書は指摘。政府は年末までに原子力発電所建設計画への資金調達で「規制資産ベース(Regulated Asset Base = RAB)モデル」を取り入れるか、最終判断を下すべきであり、金額に見合った価値がもたらされることを条件に、原子力発電の維持のみを目指した新規原子力発電所建設支援の道を探るべきだとしている

<原子力の課題は新設コスト>

従来型の原子力発電について報告書はまず、既存の 8 サイト・15 基の原子炉が 2017 年に英国の総発電電力量の約 21 % を賅ったという事実に触れた。これらのうち、7 サイト・14 基までが 2030 年までに運転を終了するが、新規発電所の建設計画のうち、ヒンクリーポイント C 発電所の 320 万 kW 分が 2025 年の運転開始を目指して建設中、サイズウェル C とブラッドウェル B の両発電所で合計 550 万 kW 分が提案中であるとした。

しかし、ムーアサイド、ウィルヴァ・ニューウィッド、およびオールドベリーの各発電所建設計画は近年停止されており、報告書はエネルギー・クリーン成長担当大臣のコメントとして、「再生可能エネルギー源のコストが急激に低下している以上、これらの計画に対する財政支援に十分な価値はない」と述べていた点に触れた。また、英国エネルギー研究センター(UKERC)も、「東アジア地域以外で原子力発電のコストが低下した証拠はない」との見解だが、英国の主要な国際エネルギー企業が支援する技術革新センター「エネルギー・システムズ・カタパルト」は、将来的に見た場合、「英国内の新規原子力発電所建設では大幅なコスト削減の可能性はある」とした。

報告書によると、発電所の新設コストについては英国原子力産業協会(NIA)の T. グレイトレックス理事長が、「最も影響が大きいのは資本コストであり、今後の新設計画が上手くいくかどうかは、適切な資金調達モデルの適用がどれだけ進むかにかかっている」と説明した。ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)の G. クラーク大臣も 2018 年 11 月当時、政府が資金調達モデルの代替案を模索中であると発言。これに関して報告書は、政府が検討している RAB モデルについて、オックス

フォード大学のD. ヘルム教授が、「次善の策だが政府の直接的な資金調達を財務省が制約している以上、ヒンクリーポイントC計画で採用された差金決済取引(CfD)よりは好ましい」としていた点に言及した。

ただしこれとは対照的に、国内の主要インフラ関連で政府に専門的アドバイスを提供している国家インフラ委員会は、「原子力発電のように複雑かつリスクの高い事業にRABモデルを適用した経験はあまりない」と警告。新規原子力発電所の建設計画には、どのような資金調達モデルが最適であるか、明確ではないとの考えを同委員会が示したとしている。

< SMR の開発支援 >

同報告書はこのほか、従来型の原子力発電所より低コストな小型モジュール炉(SMR)の開発についても、政府が支援アクションをとるべきだと勧告した。SMR建設計画に資金調達するため、BEISが設立した「小型炉の資金調達に関する専門家作業グループ(EFWG)」の対政府勧告・7項目を取り上げており、知的所有権など投資家が期待するものと引き替えに、実証炉の初号機プロジェクトにリソースを提供してもらうことや、SMR用に先進機器のサプライ・チェーンを構築する、などの項目に言及した。

報告書はまた、政府と民間産業部門の戦略的かつ長期のパートナーシップとなる「部門別協定」の中で、政府がSMR開発に対する支援を打ち出したことを歓迎。政府は支援の新しい枠組として、新型原子炉技術の研究開発に最大5,600万ポンド(約72億2,300万円)を提供するほか、ベンダーと電気事業者、エネルギー多消費型の顧客、および金融部門を1つにまとめ、民間部門からの資金調達を通じて見込みの高い商業提案をしてもらうこと、などを挙げていた。

【ロシア】

海上浮揚式原子力発電所がペベクに向け出航

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は8月23日、世界で唯一の海上浮揚式原子力発電所(FNPP)の「アカデミック・ロモノソフ号」が、最終立地点である極東地域北東部のチュクチ自治管区内ペベクに向け、北極圏のムルマンスクから出航したと発表した。

このFNPPは出力3.5万kWの船用原子炉「KLT-40S」を2基搭載するパーシ型(タグボートで曳航・係留)原子力発電所で、全長144m、幅30m。燃料交換なしで3~5年間稼働するため、発電コストの大幅な削減が期待できるという。40年の運転期間は最大50年まで延長することが可能で、使用済燃料はロシア本土の特殊な貯蔵

施設で保管する予定である。

チュクチ自治管区では、1970年代から電力需要の約80%を賄ってきたビリビノ原子力発電所(1.2万kWのRBMK×4基)の1号機が今年1月に営業運転を終了。ペベクでの立地により世界最北端の原子力発電所となる同FNPPは、今年12月にも送電を開始し、順次閉鎖していくビリビノ発電所の原子炉やチャウンスカヤ熱電併給発電所に代わって、同管区に十分な電力と熱エネルギーを供給することになる。

同発電所の建設は2007年にモスクワ北部のセペロドピンスク市で始まったものの、造船所の都合により翌2008年にサンクトペテルブルクのバルチック造船所(BZ)に移された。2010年6月に船殻部分が完成したことから進水式を実施。その後、BZ社の破産などを経て、2013年10月に2基の「KLT-40S」がFNPPに組み込まれた。

このFNPPは当初、カムチャツカ半島のビルチンスクに係留予定だったが、ビリビノ原子力発電所の経年化が進んでいるため、2015年にロスアトム社はチュクチ自治管区政府と協力協定を締結、同FNPPをペベクに係留することが決定した。

ペベクでは2016年10月にFNPPの陸上設備建設が始まっており、ロシア建設省傘下の設計評価機関は2018年1月に「アカデミック・ロモノソフ号」の運転を承認した。このFNPPは同年4月、燃料を装荷しない状態でサンクトペテルブルクを出港し、ペベクまでの中継地点であるムルマンスクに到着。10月には同地で燃料の装荷作業を完了していた。

なお、ロスアトム社はすでに、第2世代の「最適化・海上浮揚式原子力発電ユニット(OFPUs)」を開発中。出力5万kWの小型炉「RITM-200M」を2基搭載した発電所とする計画で、出力が拡大する一方でサイズはこれまでのものより小さくなる見通しである。

同社としては、今日の小型炉市場の中でもFNPPプロジェクトは最も有望な部門であると認識。小型で軽量かつコストも固定化しているため、クリーン・エネルギーを安定的に必要とする遠隔地域や離島では特に適しているとした。

同社のFNPP技術については、これまでに中東や北アフリカ、東南アジア地域の国々が関心を表明。このためロスアトム社は、OFPUをシリーズ建設することや輸出用とすることを計画している。

【中国】

政府、初の原子力安全白書を発行

中国の国務院新聞弁公室は9月3日、中国政府が初め

て発行した包括的な「原子力安全白書」について記者会見を開催し、主な内容の紹介とその詳細説明を行うとともに、記者からの質問に回答した。

発表によると、6月末現在に中国では47基の商業炉（営業運転開始前の炉を含む）が稼働中だが、国際原子力事象評価尺度（INES）でレベル2以上の事象が発生したことは一度も無く、建設中の11基についても品質管理を徹底している。また、原子力発電の開発利用を開始して以降、中国は常に原子力安全を重要な国家責任と見なしており、安全性の確保を前提とした原子力技術の開発を遵守。世界で最も厳しい基準に従い、原子力安全の概念に基づいて、法律による規制と行政による管理・監督、原子力業界の自主管理、技術面や人材確保面の支援、社会参加、国際協力などを備えた原子力安全ガバナンス体制を強化中だと説明した。

さらに、福島第一原子力発電所事故を引き起こした極端な自然災害の発生確率は、中国の原子力発電所サイトでは非常に小さいとした。同時にこのような事故に関して、サイトの包括的な再評価も実施しており、原子力発電所の安全性を改善。電力と冷却水の供給、緊急支援で全体的な改善・強化の取り決めを行ったことを明らかにしている。

登壇した生態環境省・副大臣で国家核安全局（NNSA）の劉華・局長はまず、同白書の主な内容として、中国における原子力安全確保の歴史や、その基本原則と政策、規制の概念と実践状況などを紹介した。

2012年11月の中国共産党第18回全国代表大会以降、習近平・最高指導者を中核とする共産党中央委員会が、原子力安全を国の安全保障システム全体に組み込んでおり、そのコンセプトとして「開発と安全管理」、「権利と義務」、「自律性と共同作業」など、それぞれ2つの概念を平等に扱うとした。

また、原子力安全政策と規制を包括的に整備しており、国家の原子力安全戦略を実行しつつ安全管理要件を厳格化。安全規制慣行の包括的な共有が可能になるよう、安全監督システムの改善も継続的に行っている。

同白書ではさらに、中国の原子力安全レベルを客観的に評価することや、原子力安全文化と広報活動の有効性を積極的に実証することを提唱。これに加えて、世界の原子力安全の運命共同体構築に中国が貢献するため、安全性関連の国際交流を強化し、透明性が高く公正、協力的かつ参加国すべてに有益な原子力安全システムの確立を目指すとしている。

同白書はまた、全体状況の説明のなかで、原子力安全の「基本原則」として、法令の遵守や安全第1主義、明確な責任体制、厳格な管理、徹底した防護策、独立性の高い規制などを挙げた。中国は原子力利用の「開発」、「中程度の開発」、「積極的な開発」、「安全で効率的な開発」の4段階において、安全第1の原則を順守。5年毎に原子力安全計画も策定・実施しており、「開発と安全管理」の2つの目標の相互推進と統合を促進していると指摘した。

なお、劉華・局長は「開発と安全管理」のバランスに関する記者からの質問に答え、中国では商業炉47基のほかに19基の民生用研究炉と臨界装置、18の核燃料サイクル施設、2つの低中レベル放射性廃棄物処分施設が稼働中であることを明らかにした。これらの安全性は世界でも最高レベルにあるとした上で、原子力安全管理システムに関する国際原子力機関（IAEA）のピアレビューも、すでに4回受け入れ済みだと述べた。

同副局長はまた、今年初めに国務院が新たな原子力発電所開発プロジェクト2件を承認した事実に言及。これらは福建省の漳州原子力発電所と広東省の惠州太平嶺原子力発電所で、安全審査を実施した後、正式な建設プロセスに入るとの見通しを示している。

【韓国】

「APR1400」設計、米規制委の設計認証を取得

韓国水力・原子力会社（KHNP）は8月27日、韓国電力公社（KEPCO）の主導で開発した第3世代の140万kW級PWR設計「改良型加圧水型炉（APR1400）」が、26日付で米原子力規制委員会（NRC）の設計認証（DC）を最終取得したと発表した。

KEPCOとその子会社のKHNP社は、2014年12月に「APR1400」のDCをNRCに共同申請した。2018年9月に技術審査を終えた同設計は、NRCスタッフによる承認として「標準設計承認（SDA）」を取得しており、その後、米国の連邦法に則った11か月間の法制化過程を経て、このほど連邦規則集（CFR）の付録に記載されたもの。これにより、同設計はNRCの安全・規制要件をすべて満たした標準設計の1つとして、NRCの承認を取得。事業者が新規原子力発電所の建設・運転一括認可（COL）を申請する際にも採用可能となり、15年間にわたり米国内での建設が許されることになる。

海外諸国と日本の廃止措置に係る仕組みについて

日本原子力発電 山内 豊明

海外諸国における廃止措置に係る仕組みについて報告する。各国で廃止措置を取り巻く環境や仕組みはそれぞれ異なるものの、廃止措置の実施組織や放射性廃棄物の処分場の状況、規制ルール/組織体制等について我が国の状況と比較することにより、我が国が安全かつ効率的に廃止措置を完遂する仕組みを考える参考になると思われる。

KEYWORDS: *Decommissioning organization, Radioactive Waste Disposal Facility, Decommissioning Fund, Decommissioning Regulation*

I. はじめに

解説シリーズ「安全かつ効率的な廃止措置に向けて」で我が国の廃止措置の現状と課題、英国と米国の経験と教訓を紹介した。世界で原子力施設が作られて60年以上経ち、当初に導入された多くの原子力施設が廃止措置段階となっている。米国では民間専門会社を中心となって最も活発に廃止措置が進められている。英国では政府機関が中心になって計画的に廃止措置を進めている。フランスでは電力会社や研究機関が廃止措置部門を組織分離して戦略的に取り組んでいる。ドイツは政治的に原子力からの撤退を決めたため、電力と政府が役割分担して廃止措置を進めようとしている。スペインでは段階的脱原子力政策の下、政府機関が計画的かつ効率的に進めている。廃止措置を取り巻く環境と進め方は、各国でそれぞれ違いがあるものの、安全かつ効率的に廃止措置を完遂するための仕組みをそれぞれで工夫しつつ構築している。

本稿では上記各国の廃止措置の仕組みについて報告し、我が国の廃止措置の今後の進め方について検討を行った。

II. 廃止措置組織¹⁾

まず最初に、廃止措置の仕組みで最も重要な廃止措置組織について紹介する。廃止措置組織については、法的責任や資金制度の仕組みと密接に関係する。いずれの国も廃止措置組織は専門組織としているか、又は同一組織内であっても運転組織とは垂直分離して廃止措置を進め

Decommissioning Systems on Major Countries and its Consideration : Toyoaki Yamauchi.

(2019年5月29日 受理)

表1 主要国の廃止措置組織等の比較

	日本	ドイツ	英国(GCR)	米国	フランス	スペイン
廃炉施設のオーナー			NDA			
廃炉マネジメント		電力	PBO	電力又は廃炉会社	電力(EDF)	ENRESA
廃炉プレイヤー			SLC (Magnox)			
廃止措置の動機付け	特になし	早期解体し国に譲渡	政府系廃止措置専門組織	民間廃止措置専門組織	組織内垂直分離	政府系廃止措置専門組織
規制機関	NRA	BMU-州政府	ONR	NRC	ASN	CSN
廃炉資金源	電気料金		税金+事業益等	電気料金		電気料金の一定額
資金管理方法	内部引当		NDA予算	外部積立	内部引当	外部積立

ている。これは廃止措置が運転とはカルチャー、マインドが異なる業種であるからと考えられる。

各国の廃止措置組織、資金源(本稿IV参照)および規制機関(本稿V参照)の比較を表1にまとめ、以下で解説する。

米国では多くの民間会社によって電力が供給されており、1998年以降、州ごとに電力自由化が進められてきている。米国では廃止措置をより安くすることが利益に繋がるビジネスモデルが生まれている^{2,3)}。1990年代の複数の廃止措置プロジェクトの教訓で、電力会社がオーナーとして発電事業の中で、EPC会社(Engineering Procurement Construction Company)が請負う体制では上手く行かなかったことや、電力自由化によって電力会社は、より効率的に発電事業に集中する必要に迫られ、電力会社が経営資源を投入して自ら廃止措置管理を行うより、廃止措置専門会社に一括で任せの方が合理的との判断があったと考えられる。また、米国の社会環境は人材流動が活発であり、新しいビジネスモデルを構築したベンチャーが生まれやすい社会であること、過去の教訓を体験した人々が廃止措置専門会社やEPC会社に流れ

てきて、活発な廃止措置市場を形成していることが背景にある。なお、政府研究機関の廃止措置についてはエネルギー省(DOE)の下でEPC会社を中心に進められている。

英国の電力供給は、かつて中央電力公社(CEGB)が担っていたが、分割民営化された。また、原子力は1954年に設立された英国原子力公社(UKAEA)の下で開発研究が行われ、その後の変遷を経て、BNFLに統合された^{2,4)}。2005年のNDA(原子力廃止措置庁)設立はGCRやセラフィールドの廃止措置を効率的に進めるため、研究開発組織であったBNFLのカルチャーのままでは廃止措置を効率的に進めることは難しいと考えられたためと思われる。なお、NDAは200人ほどの組織であり、原子力分野の出身者は1割程度である。現在、GCR26基(セラフィールドの4基含む)の廃止措置はNDAの下でSLC(Site License Company)のMagnox Ltdが実施している。NDAは廃止措置を効率的に進めるため、PBO(Parent Body Organization)方式を導入している。この方式は、NDAが民間会社から入札でPBOを選定し、PBOにSLCの全株式を譲渡する。そして、NDAはSLCと廃止措置契約を締結してSLCが廃止措置を実施することになるが、SLCの経営権を握ったPBOが上手くコストダウンマネジメントをすることでSLCに利益が生まれ、その株式配当でPBOに還元される仕組みとなっている。このようなシステムで廃止措置実施組織にコストダウンのインセンティブを付与している。

フランスの電力供給は国営フランス電力公社(EDF)が担っており、2004年に民営化された。但し、民営化されても、その株式の80%以上をフランス政府が所有しており、分割等されていない。フランスでは、経済的理由で、9基が、また、政治的理由で高速増殖炉が、廃止となっている。EDFは、カルチャーとマインドが別物である廃止措置をより効率的に進めるため、2015年に原子力組織を開発建設部門/発電部門/バックエンド(廃止措置廃棄物)部門の3つに垂直分離し、予算や要員を部門別に独立させている。EDFのバックエンド部門であるDP2Dは、複数基のGCRの廃止措置を進めるにあたって、モデルプラントを選定して、最初にモデルプラントの廃止措置を先行させることで、同時並行でコスト上振れするリスクを回避して、PDCAを回すような全体戦略を立てて進める計画である。また、DP2Dは、廃止措置ビジネスを国際展開すべく、M&Aなど戦略的に活動している。なお、フランスの原子力研究機関であるCEAも、研究開発部門と廃止措置部門を組織内垂直分離して、廃止措置を進めている。

ドイツの電力は、かつて地域ごとの8大電力で供給していた。自由化後に電力の統合が進み、4大電力に再編されている。ドイツ国内では2011年の福島事故時点で17基の原子力発電所が運転していたが、直ちに7基を停

止し、その後2022年までに原子力からの撤退を政治的に決定した。その政策変更コストの負担責任について、電力会社と政府との間で、法廷論争が行われた。そして、脱原子力の費用負担に関する検討委員会(各党議員、産業界、法曹界、労働者代表)が設立され、議論の結果、廃棄物中間貯蔵と処分については政府が責任を持つなど、政府と電力会社とが共同責任で廃止措置を進めることが提案された。電力会社はこの提案を廃棄物処分に係るリスクを低減することができるとして受入れた。そして、施設解体を電力会社で実施していくとともに廃棄物中間貯蔵と処分費用を政府基金として積み立てることとなった^{5,6)}。ドイツの仕組みの背景は、政治的に原子力撤退が決められた特殊事情がある。委員会仲裁案に基づき、政府と電力が、その政策変更の共同責任を持つこととなった。現在電力会社は、経営コンサルティング会社等のアドバイスを受けながら、発電マインドを廃止措置マインドに転換して原子炉施設解体を進めている。廃棄物貯蔵以降については、政府機関が実施していくことになる。

スペインでは、かつて3,000社もの民間小規模電力会社があったものの、1995年までに大手4社に統合された。スペインの原子力発電所については、PWR7基、BWR2基、仏型GCR1基が導入されたが、1984年に政府が原子力発電所の新規設置はしないという段階的脱原子力政策を決定して、その受け皿として、原子力施設の廃止措置、使用済燃料および放射性廃棄物の処理処分をする放射性廃棄物管理公社(ENRESA)が設立された。スペインでは、運転を停止した原子力施設はENRESAに引き渡されて、廃止措置が終了すると当該土地が元の所有者に返還される仕組みとなっている。ENRESAは原子力発電所の廃止措置や使用済燃料の処分だけでなく、原子力研究施設の廃止措置の責任も負っており、複数のプロジェクトを計画的かつ前のプロジェクトでのPDCAを回しながら効率的に進めている。そして、廃棄物処分場の立地や運営も担っていることから、廃止措置～廃棄物輸送処分も含めたプロジェクト全体のコスト最適となるように廃止措置を進めている。現在、唯一のGCRであるバンデロスの周辺解体を終えて、原子炉本体を安全貯蔵し、小型PWRのホセカブレラの廃止措置の終盤である。ホセカブレラが終わったら次のプロジェクトに進むという計画である。

III. 廃棄物処分⁷⁾

廃止措置を進めるには廃棄物処分場の確保が必須である。多くのステークホルダーとの関係で処分場確保は最も難しい課題であるが、いずれの国も廃棄物処分場の立地、運営には公的機関が関与している。

主要国の低レベル放射性廃棄物処分システムの比較を表2に示す。また、表3に主要国の放射性廃棄物処分場

表2 主要国の低レベル放射性廃棄物処分システムの比較

	日本	英国	米国	フランス	ドイツ	スペイン
実施主体		NDA				
マネジメント	民間等 (JNFL, JAEA等)	PBO	民間(ES等) 及びDOE	政府機関 (ANDRA)	政府機関 (BGE)	政府機関 (ENRESA)
プレイヤー		SLC (RWM*) DSR**、LLWR)				
管理後の扱い	無制限解放	未定	州政府の管理	無制限解放	無制限解放	無制限解放
立地主体	民間等	NDA	州政府	政府機関 (ANDRA)	政府機関 (BGE)	政府機関 (ENRESA)
処分対象	個別施設毎		全ての放射性廃棄物(医療用Rも含む)			
クリアランス 制度	あり IAEAベース	あり IAEAベース	ケースバイ ケース	なし	あり IAEAベース	あり IAEAベース

* 放射性廃棄物処分の立地主体は、日本のみが民間個別、他国では政府機関

表3 主要国の低レベル放射性廃棄物処分場一覧^{7, 8)}

国名	処分場	埋設対象	容量 (m ³)	合計容量 (m ³)	運転中および運転終了 プラント数 (基)
米国	リッチランド	クラスA~C	170万	1575万	135
	バーンウエル	クラスA~C	88万		
	クライブ	クラスA	882万		
	WCS	クラスA~C	435万		
フランス	ラマンシュ	低中レベル	52.7万	217.7万	70
	オーブ	低中レベル	100万		
	モリビリエ	極低レベル	65万		
英国	ドリッグ	低レベル	210万	227.5万	45
	ドーンレイ	低レベル	17.5万		
ドイツ	モルスレーベン	低中レベル (非発熱性)	30万	33.8万	37
	コンラッド(計画中)	低中レベル (非発熱性)	3.8万		
スペイン ⁹⁾	エルカプリル	低中レベル	10万	22万	10
	エルカプリル	極低レベル	12万		
日本	六ヶ所(一部計画中)	低レベル	12.2万	15万	80
	東海(計画中と管理中)	極低レベル	2.8万		

注) 英国では一部極低レベル放射性廃棄物を一般廃棄物処分場に処分可

表4 主要国の使用済燃料処理・処分システムの比較

	日本	英国	米国	フランス	ドイツ ¹⁾	スペイン
実施主体		NDA				
マネジメント	民間等	PBO	連邦政府	政府機関 (ANDRA)	政府機関 (中間貯蔵, BGE)	政府機関 (ENRESA)
プレイヤー		SLC(RWM)	DOE			
立地主体	民間等	NDA	連邦政府	政府機関 (ANDRA)	政府機関 (中間貯蔵, BGE)	政府機関 (ENRESA)
処分形態	最終処分	最終処分	最終処分	最終処分	(中間貯蔵)	(中間貯蔵)
処分対象	ガラス固化体	ガラス固化体	使用済燃料	ガラス固化体	使用済燃料、ガ ラス固化体	使用済燃料 、ガラス固化体
(参考) SF政策	再処理 /中間貯蔵	今後は未定**	直接処分/ 中間貯蔵	再処理	今後は未定	直接処分/ 再処理

* 1: 脱原子力政策により2017年以降、順次、原子力発電事業者から連邦政府に段階的に移管する方針。
* 2: 英THORPは2018年に停止、2020年から廃止措置予定。
使用済燃料処分は政府機関が主体

一覧を示す。加えて、使用済燃料処理・処分システムの比較を表4に示す。

米国ではエネルギー省(DOE)関連施設で発生した廃棄物はDOEが立地も含めて実施責任を負って独自の廃棄物処分場(ハンフォード、サバンナリバー等)で埋設処分をおこなっている。DOE以外の政府機関および民間機関から発生するクラスA~C(概ね、日本のL3~L1廃棄物相当)までの低レベル放射性廃棄物は民間の処分場で埋設されている。国土の広い米国内では砂漠に立地しているクライブを始め、4か所の大規模処分場が運営されている。ただ、処分場の運営は民間であっても、立地責任は州政府が担っており、施設のオーナー又は最終的な跡地管理は州に委ねることとなっている。米国の発生者責任とは、一般の廃棄物の発生者責任と同様、適正な処理をして適切な処分をすることと処分費用を負担することであり、処分場立地までは課されていない。また、米国では複数の州政府がコンパクトという州間協定を締結して、原則としてコンパクト内の原子力施設および病

院等の放射性同位元素使用施設から発生した低レベル放射性廃棄物を特定の処分場に埋設している。なお、原子炉解体で数トン発生する炉内構造物等のクラスC超えの廃棄物(GTCC、日本のL1廃棄物相当)については、使用済燃料処分と同様、DOEが立地も含めて処分責任を担うこととなっているが、まだGTCC廃棄物処分場は決まっていない。そのため、GTCCは使用済燃料と同様に中間貯蔵施設で保管されている。

英国ではNDAが原子力産業および一般産業、病院等で発生する放射性廃棄物処分の責任を有している。ただ、実際の処分場の運営はPBOのマネジメントのもとでSLC(LLWR, Dounrey Restoration Ltd)が行っている。廃棄物は中レベル、低レベル、極低レベルに区分されている。現在、低レベル放射性廃棄物に対して、ドリッグとドーンレイ2か所の処分場が運営されている。ただし、英国ではイネイプリング規制(事業者の成長を促す規制)⁹⁾の一環として、0.1 m³ 辺り 400 kBq 未満のβγ核種のもの又は1品目 40 kBq 以下の極低レベル放射性廃棄物は産廃処分場での埋設も可能となっている。一方、中レベル放射性廃棄物処分場はまだ決まっておらず、GCRの黒鉛の処理処分が課題となっている。

フランスでは放射性廃棄物管理研究法に基づいて、全ての放射性廃棄物処分の実施主体として政府機関ANDRAが設立されている。廃棄物は放射性物質濃度によって中レベル、低レベル、極低レベルに、さらに半減期31年を境に短寿命と長寿命に区分されている。現在、短寿命の中低レベル放射性廃棄物をオーブ処分場、極低レベル放射性廃棄物をモリビリエ処分場で埋設している。なお、短寿命中低レベル放射性廃棄物を処分していたラマンシュ処分場は2003年から300年間の監視期間に入っている。ANDRAは、廃棄物処分場の建設/運営コスト分を埋設料金として廃棄物発生者から回収している。主な廃棄物発生者はEDF、CEAの他Oranoである。その他、病院等のRI廃棄物も受け入れ処分している。なお、極低レベル放射性廃棄物処分場は放射能レベルが低いことから、その規制は原子力規制庁(ASN)ではなく、地域環境整備住宅局の下で環境保護指定施設として許認可が行なわれている。中レベル放射性廃棄物処分場はまだ決まっておらず、当面中間貯蔵施設(ICEDA)で保管する予定。

ドイツでは原子力法で政府が放射性廃棄物処分場を設置する責任を有することとなっている。そこで、処分の実施主体として、環境・自然保護・建設・原子炉安全省(BMUB)の下に放射性廃棄物機関(BGE)が設置されている。ドイツでは放射性廃棄物は全て地層処分することになっており、廃棄物区分としては放射性物質濃度に関わらず、発熱性廃棄物と非発熱性廃棄物の2区分に分けられている。処分場としては、旧東ドイツにモルスレーベン処分場があったが、現在閉鎖されており、操業中の

処分場はない、そのため、廃棄物は中間貯蔵されている。現在、コンラッド処分場が操業準備中となっている。

スペインでは ENRESA が廃止措置のみならず、放射性廃棄物処分や使用済燃料の管理の実施主体となっている。そのため、使用済燃料搬出/保管、原子力施設の解体から放射性廃棄物処分まで同一組織で管理されていることから、廃止措置に関わる費用全体の最適化が図り易い体制となっている。廃棄物区分はフランス同様である。現在、短寿命の低レベル放射性廃棄物、極低レベル放射性廃棄物をスペイン中央部に位置するエルカプリル処分場でそれぞれ埋設している。

クリアランス制度¹⁰⁾について米国は、規制ガイドラインに基づきケースバイケースの運用がなされるようになってきているものの、実際は、クラス A 廃棄物の処分費用が安いこと、同制度を適用するメリットがなく、クリアランスレベル相当の廃棄物もクラス A 廃棄物として処分している。英国、ドイツ、スペインでは、IAEA ガイドラインを参考にクリアランス制度が運用され、クリアランス判断されたものは利用制限なしで再利用されている。フランスでは、ゾーニングが適用されており、クリアランス制度はない。

IV. 廃止措置資金制度

廃止措置が所有者と切り離されているスペインを除き、各国とも廃止措置費用は国際財務報告基準(IFRS)に従って、所有者の会計上資産除去債務として認識されている。そして、各国とも運転時点から廃止措置費用の積み立てをしているところも共通である。

米国では廃止措置資金は個別プラント毎に詳細に見積が行われ、規制当局 NRC がこれを認可している。同じ型式の原子炉であっても、汚染状況や州当局の規制によって見積金額は数倍違うことがある。NRC は廃止措置の実効性として、費用確保の重要性を認識している。そのため、廃止措置計画や保安管理については事業者自主または届出制としているのに対し、廃止措置費用見積は認可制として、外部基金化して資金確保に努めている。積み立てられた資金は利殖のため、運用されている。なお、計画通りに利殖ができないと、資金不足のため、廃止措置工程に影響することもある。また、外部基金化していることから、民間のビジネスモデルが生まれてきている。

英国の初期の Magnox 炉については、国営組織で運営されていたこともあり、予め資金積立がないまま廃止措置段階となった。そのため、セラフィールド等と併せて NDA が政府予算と再処理収入(2018年11月で THORP 停止により再処理終了)で廃止措置を実施することとなった。今後は、政府予算だけで資金確保していくこともあり、NDA の廃止措置計画は長期(GCR は 70 年、セラフィールドは 100 年)となっている。一方、運転中の

AGR と軽水炉については予め廃止措置費用を見積もった上で、NLF(Nuclear Liability Fund)として外部積立を行っている¹¹⁾。運転中施設の廃止措置費用見積額は、NDA がレビューしている。

フランス EDF は元々国営であり、現在も民営化されたとは言え、政府所有の会社である。廃止措置費用については法令に基づいて EDF が電気料金の中から内部引当での基金化がされている。具体的には、発電所の運転開始時点で一気に積立を行い、その後は利殖を行っているが、資金保全のため、運用先には制限が掛けられている。

ドイツでは元々廃止措置資金は電力会社の内部引当で積立てられていたが、前述したように脱原子力政策による政策変更コスト負担を国と電力で折半することになった。そのため、解体した後の中間貯蔵以降は廃棄物管理と合わせて処分見積費用とともに廃棄物処分実施主体に処分見積費用も移管されることとなっている。

スペインでは段階的脱原子力政策の受け皿として設立された ENRESA が原子力施設の解体や廃棄物処理処分、使用済燃料の処理処分費用などバックエンド費用一式を、電気料金の一定割合で直接徴収して基金化して、資金需要に合わせて廃止措置を進めている。すなわち、電気料金から徴収した資金を用いて、逐次廃止措置を行う仕組みである。なお、ENRESA の対象は発電にかかる原子力発電所だけでなく、原子力研究機関も対象となっている。

V. 廃止措置規制

各国とも実施機関とは独立の政府系組織で規制を行っているが、運転中とは格段に原子力/放射線リスクが低下していることから、原子炉施設の運転規制とは組織を分離して(ドイツを除く)、運転中のルールとは区別するなどして廃止措置を進めるような規制を行っている。とりわけ、米国においては、規制要求をする場合に、その規制によって安全リスク低減の実効性と追加費用を天秤にかけて判断している。具体的には、規制側が認可した費用見積りに影響するような規制要求は、安全リスクの低減効果を定量的に評価した上で慎重に行われている。また、規制機関は事業者と意見交換する努力を行っており、判断は独立して行うが孤立しないという考えである。

同様な考えは OECD/NEA などの国際機関においても進められて、廃止措置を安全かつ効率的に進めるため、事業者と規制機関が議論する場などが設けられている²⁾。

各国の規制機関はともに、不必要な規制を行うことで廃止措置活動が停滞して、反って国民の安全リスクを増やしてしまうことが無いように考慮して進めている。

VI. 我が国の廃止措置の仕組みについて

海外諸国の仕組みを踏まえて、我が国の廃止措置の仕組みと対応策の検討を試みた。

1. 廃止措置組織

日本では原子炉等規制法に基づき、事業者が廃止措置の実施責任を負わせ、廃止措置完了とともに許可が失効する仕組みとなっている。そのため、事業者は廃止措置完遂と施設の保安責任を負うことになっている。ここで、原子力施設の廃止措置費用の大部分は最終的に国民の負担になってしまうことから、事業者は廃止措置を完遂するマインドを持って合理的に進める必要がある。発電/廃止措置マインドの違いのポイントを以下に述べる。

①施設は発電所ではなく全て廃棄物

運転中は設備が壊れたら、修繕するのが当たり前であったが、廃止措置では例え維持管理するとしたものが壊れた場合でも、代替化等の臨機応変で合理的な対応が必要となる。例えば、恒設照明が壊れても直すのではなく、必要な時だけ仮設照明を付けたり、ヘッドライトで済ませるといった発想が重要。

②廃止措置はプロジェクト(完遂することがゴール)

目の前の工事を進めることより、廃止措置完遂のゴールを見据えて処分場の確保や廃止措置に相応しい規制にすることがより重要である。例えば、安易に保守的な規制要求に妥協して目の前の作業を進めてしまうことは、制度改革を遅らせ、ゴールを遠くしてしまうこととなる。

③常に現場、組織、ルールは変化

廃止措置では組織やルールも現場の状況に応じて柔軟に変えていく必要がある。定例業務は殆どないことから、ルーチン仕事をミスなく完璧にこなすという取組みから、変化する状況の中で常に最適解を探っていく取組みに変えていく必要がある。

上記マインドの違いだけでなく、今の個別会社毎に廃止措置を進める仕組みのままでは、同時並行に廃止措置を進めて、コスト上振れリスクがより大きくなってしまふ。前述した英 NDA や仏 EDF のように国全体での戦略を管理して進めることが重要である。また、米英のように、廃止措置実施者にインセンティブが発生するようなビジネスモデルの構築も必要である。廃止措置や放射性廃棄物処理処分過程で、合理的に費用低減が達成できた場合、低減分の一部を功労者に還元する仕組み等が考えられる。

2. 廃棄物処分先

廃止措置は廃棄物処分そのものであり、廃棄物処分場やクリアランス物の搬出先が確保されないと、引越し先のない荷造り作業をしているようなものである。表3に示すように、多くの原子力発電所を有する国として、廃棄物処分容量は極めて少ない。処分場確保を事業者任せ

にするのではなく、国や地方自治体も加えて、廃止措置を進めるために関係者が話し合い、協力し合う仕組み(例えば、英セラフィールドの G6 会議)がブレークスルーになるのではないかと。クリアランスについては、より効率的な規制手続きと、制度定着までとされている再利用先の制限解除が重要である。既に多くの再利用実績¹⁰⁾があるものの、制度定着の定義ははっきりしていない。

3. 廃止措置資金

廃止措置は利益を生まない行為であり、その資金確保は廃止措置を進める上で重要な要素である。商業炉においては、解体引当金制度が運用されているが、キャッシュとして積み立てられている訳ではなく、各社の各事業活動に展開されている。現在、廃止措置計画認可申請書に、廃止措置の必要費用見積額および資金確保状況を記載することになっている。しかしながら、処分場確保問題等のため、廃止措置完了を予見することは難しい。予見可能な廃止措置の見積りができるようになれば、米国のように新たなビジネスモデルも成立するかもしれない。まずは上述したモデルプラントの費用をみんなで分担し合うような仕組みも有効と考える。

4. 廃止措置規制

運転中の規制は、原子炉の核反応や冷却システムの制御の信頼性を確保するために、施設内の主要設備に対して設工認や施設定期検査を行う設備規制を適用している。廃止措置段階になっても、例えば廃棄物処理システムの性能等は運転中と変わらないため、規制の担当レベルでは規制を除外する積極的理由がないため運転中と同様の規制を要求することとなる。これが運転の延長で廃止措置を規制する例であるが、このような規制システムでは廃止措置作業を制約し、廃止措置の遅れに繋がってしまう。廃止措置の遅延は、残存施設のリスクを高めることになってしまう。従って、運転中と廃止措置では規制のルールと組織を分離して、廃止措置におけるリスク特性を適切に管理しつつ、廃止措置作業を進める規制システムに改善していくことが重要と考える。

以上、これから本格的に廃止措置を進め、完遂するために日本ではどのような仕組み(組織、処分場、資金、規制)が適切なのか、国内の利害関係者(政府政策担当部門、規制機関、事業者等)が話合っプロットプランを作って都度改善しながら進めていくことが重要と考える。

－ 参考資料 －

- 1) 一般社団法人海外電力調査会「海外諸国の電気事業 第1編(上巻)」2019年。
- 2) 山内豊明, 日本原子力学会, アトモス, Vol.61 No.2(2019) 128-132.

- 3) コリン・オースティン, 山内豊明, 日本原子力学会, アトモス, Vol.61 No.6(2019) 482-488.
- 4) キース・フランクリン, 山内豊明, 日本原子力学会, アトモス, Vol.61 No.5(2019) 408-412.
- 5) 渡辺富久子(2017)「ドイツ 廃炉に伴う責任及び費用分担を定める立法」(外国の立法)2017.2.
- 6) 桜井徹(2017)「研究ノート ドイツにおける原子力発電所廃炉・処理の新展開: 原因者負担原則の修正」.
- 7) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部廃棄物対策課「諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて」2018年版.
- 8) 一般社団法人日本原子力産業協会「世界の原子力発電開発の動向2019」2019年.
- 9) Office for Nuclear Regulation「HOLDING INDUSTRY TO

- ACCOUNT AND INFLUENCING IMPROVEMENTS A GUIDE TO ENABLING REGULATION IN PRACTICE」Feb, 2018.
- 10) 石井公也, 日本原子力学会, アトモス, Vol.61 No.7(2019) 522-524.
 - 11) 長山浩章「英国における信託を使った原子力発電廃炉スキームと我が国への教訓」(信託研究奨励金論文集第37号)(2016.11).

著者紹介

山内豊明 (やまうち・とよあき)
本誌, 61[2], p.52(2019)参照.



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－

(10月1日 第3回 論文誌編集幹事会)

- ・8月16日から9月15日までに英文論文誌に20報, 和文論文誌に2報の新規投稿があった。
- ・英文誌被引用利用の状況分析結果が報告された。国内機関は総じて被引用0回が多い。被引用の増加策について検討した。
- ・英文化WGの進捗状況が報告された。翻訳に関して理事会の了承が得られた。
- ・学会賞論文賞への推薦候補論文について報告された。
- ・第7分野の編集委員体制とPre-Screening 担当者を承認した。
- ・論文誌 Special Issue 実施要領の改訂案を検討した。

(10月1日 第4回 学会誌編集幹事会)

- ・伊藤副委員長より, 9/30理事会で学会誌アンケートについて報告したという説明があった。
- ・2021年3月号の企画案の検討を行った。引き続き検討していく。
- ・巻頭言, 時論, その他の記事企画の進捗状況を確認し, 掲載予定について検討した。
- ・学会誌発送の際の梱包材について事務局から説明があった。検討の結果, 現在使用しているビニール封筒で発送することとした。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

分裂片が核分裂生成物となるまで —即発中性子・ガンマ線放出—

国際原子力機関(IAEA) 奥村 森

核分裂収率は、放射性廃棄物の組成を決定する最も基本的な物理量である。原子炉の臨界性や動特性を支配する即発・遅発中性子放出、あるいは福島事故誘因となった崩壊熱、宇宙における元素起源の解明、核セキュリティーや核不拡散分野でもその重要性が認識されている。本稿では、核分裂現象の描像を出発点として核データの観点からみた核分裂収率、より精度の高い収率データを提供することを目標とした手法開発の取り組みを紹介する。

KEYWORDS: Nuclear Fission, Fission Product Yield, Statistical Decay

I. はじめに：核分裂現象

核分裂収率は、放射性廃棄物の組成を決定する最も基本的な観測量で、炉物理の教科書には有名な2山ピークの核分裂生成物の質量数依存の図が掲載されている。しかし、このような2山形状は普遍的なものではなく、核分裂性物質や入射中性子エネルギーにより大きく変化することはあまり知られていない。また、このような2山形状がどの段階で何によって決定づけられているのか、全体を定量的に説明できる理論・モデルはまだない。本稿では、核データの観点からみた核分裂収率と、より精度の高い収率データ予測手法開発の取り組みの一端を紹介する。

1. 核分裂の段階

核分裂の機構は、その発見以来、多くの研究がなされてきたがいまだ未解明の部分が多い。 ^{235}U の中性子入射による核分裂を例にとると、236個もの粒子が集団運動をする大規模な量子多体系であり、どうして1つの原子核が2つの大きな分裂片に分かれるのかという基本的な問題は今も非常に挑戦的な課題である。

図1に核分裂過程の概念図を示した。はじめに、 ^{235}U に熱中性子が入射し、複合核(^{236}U)が形成される。複合核の中では、最初は陽子や中性子が激しく動き回る。そのうち、陽子間のクーロン反発により2つに分かれようとする力と、表面エネルギーや体積エネルギーが最小に

The formation of fission products from fission fragments with prompt neutron and photon emissions : Shin Okumura.

(2019年8月31日 受理)

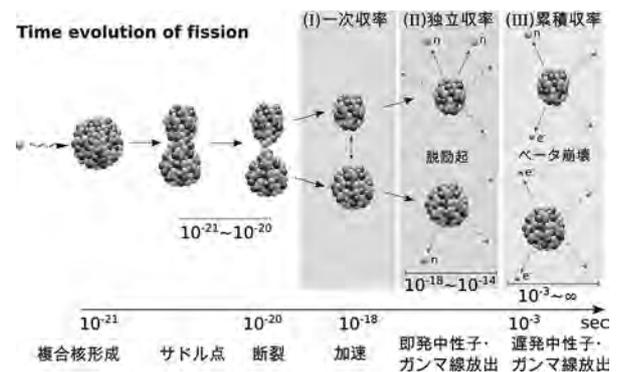


図1 核分裂過程の概念図

なる形状を維持しようとする力により、複合核は伸びたり縮んだり元に戻ったり変形運動をする。変形がある程度発達してクーロン反発力が勝ってポテンシャルの山を越えると、今度はちぎれる方向に向かう集団運動が生まれる。経過していくポテンシャルエネルギーの山のうち最も低い山の頂点をサドル点と呼ぶ。サドル点を越えると、あっという間にポテンシャルの坂を下り、ある点(断裂点)で2つに分かれる。サドル点を越えてから断裂に要する時間は、約 10^{-20} 秒程度。ポテンシャルの山を越えるまでが長く、越えると一気に反応が進行する。

ところで、熱中性子による ^{235}U の核分裂では、複合核が真っ二つに分裂することはほとんどない。できる核分裂片は、魔法数(20, 28, 50, 82)を持つ原子核ができやすいという制約を受けたりして、例えば二重閉殻核 ^{132}Sn 近傍($Z=50, N=82$)に代表される球形で安定な $A=130-140$ 付近の原子核などがよく形成される。その結果、相方の分裂片は $A=90-100$ 付近にできやすくなり、結果的に質

量数の重い分裂片と軽い分裂片ができる。これが有名な収率の2山形状を生む。ただしこの2山形状は複合核が ^{236}U のケースであって、 ^{258}Fm では1山であるし、 ^{226}Th では3山である。このような分布は、入射粒子のエネルギーによっても変化する。

生まれた2つの分裂片(図1(I))は、互いに正の電荷を持っているためにクーロン斥力により加速しながら高速で離れていき、非常に高い励起状態に至る。原子炉で熱源として回収可能な核分裂で放出されるエネルギー約200 MeVのうちの大半は、この核分裂片の運動エネルギーである。また、分裂片が大きなスピンを持っていることも知られている。このことは、核分裂の途中のどこかで角運動量が生じていることを意味しているが、詳細はわかっていない。

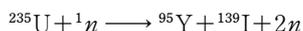
最大まで加速した核分裂片は、即発中性子やガンマ線を放出することで脱励起する。時々、核分裂のイラストで複合核から即発中性子が出てるように描かれることがあるが、実際には、即発中性子の大部分は軽い分裂片から約2個+重い分裂片から1個程度、その結果、1回の核分裂で平均約2.4個の中性子が分裂片から発生する。この脱励起に要する時間は、 $10^{-18}\sim 10^{-14}$ 秒程度。一瞬で即発中性子・ガンマ線放出により崩壊して別の核種の基底状態もしくはMetastable状態に至ってしまう。この段階から分裂片は、核分裂生成物(図1(II))と呼ばれる。

中性子過剰な核分裂生成物は、その後、安定核に向かってベータ崩壊を始める。この段階に至ってやっとミリ秒程度の時間スケールとなり、人間や装置が認知可能な時間スケールとなる。これまでの段階が観測できないほど一瞬で進行してきたのに比べると、突然のんびりとほとんど永遠とも言える半減期とともにベータ崩壊していく。この時点で、まだ中性子を放出するのに十分な励起エネルギーを持つ核分裂生成物は、非常に小さな確率で中性子を放出することがある。これが遅発中性子である。即発中性子に比べると非常に小さなこの遅発中性子の収率が、原子炉の制御には非常に重要な量となる。こうして、核分裂により生まれた核分裂片は、最終的にベータ崩壊を繰り返して安定核(図1(III))に至り、放射性廃棄物となる。

ここまで、正確さを度外視してざっくりと核分裂過程の描像を述べた。では、核分裂により生成される核分裂生成物は、何核種くらいあるのだろうか。

2. 核分裂生成物のバリエーション

1回の核分裂から生成される可能性のある核種は、1,000を超えると考えられている。核分裂によりどのような核種が生成されるかは確率的に決定されるため、



のような反応が生成核種を変えて何百パターンと起こっ

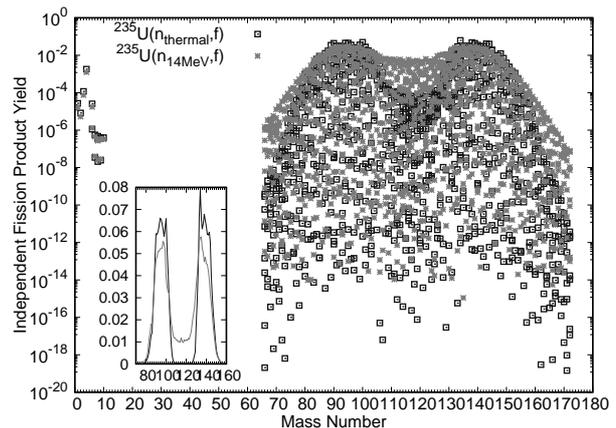


図2 JENDL/FPY-2011の核分裂収率の熱中性子と14 MeVの比較

ていることになる。

図2に最新のJENDL核データライブラリに収められている1回の核分裂あたりのその生成確率(収率)を、縦軸に核分裂収率、横軸に核分裂生成物の質量数で、2点の入射エネルギーでの比較を示した。枠内に示した質量数分布は、これら個々の核種の収率を同じ質量で足し合わせたものである。左右の山を積分すると2.0(確率200%)となるように規格化されている。14 MeVでは、熱中性子に比べて分布幅が広がり、ちょうど複合核が真っ二つに割れた対称核分裂に近いA=118付近の収率が増加し、入射中性子のエネルギーによっても収率分布が大きく変化することがわかる。

また、質量数がA=10に満たないようなトリチウムなどの非常に軽い核分裂片も生成されていることがわかる。これは、核分裂片が2つに分かれるのではなく同時に3つに分かれる3体核分裂という機構により生成されていると考えられている。「考えられている」と書いたのはこの3体核分裂も十分には理解されていないためである。

10^{20} 回近くの核分裂につき1回しか生成しないような収率の小さい核種もある。このようなごく小さな確率でしか生成しない核種の実験的な測定するのが非常に困難であることは想像に難くない。ここに核分裂収率を正確に予測することの難しさの根っこがある。現象をよく理解するための実験データが足りないのだ。

3. 核分裂収率の定義

上述した核分裂過程には、少なくとも3つの異なる物理過程がある。(I)複合核の形成から断裂、(II)高励起した核分裂片の即発中性子やガンマ線放出による脱励起、および(III)ベータ崩壊である。これらの3つの段階は異なる物理で成立しており、統一的な理論で取り扱うことができない。各段階の終点における核種の収率は、

- (I) 一次収率：核分裂直後で即発中性子放出前
- (II) 独立収率：即発中性子放出後で、ベータ崩壊前
- (III) 累積収率：ベータ崩壊後

として区別されている。他にも、崩壊系列上の最終安定

核の収率を系列収率と呼んだりもする。

JENDL や ENDF に代表される核データには、核分裂性アクチノイドごとに収率(II)と(III)が、3つの入射中性子エネルギー点(熱, 高速, 14 MeV)で与えられている。(I)は核データには含まれていない。人間活動にほぼ関係のないほどに短い寿命で脱励起して崩壊してしまうからである。実際、炉物理計算で使用されている収率は、一部の(II)を除いて大半は(III)である。

最も多く実験データが報告されているのは、原子炉等で照射したターゲットを化学分離により調べたベータ崩壊後の(III)である。エネルギー変化から直接(I)の質量数分布を調べる手法や、化学分離を必要とせず(II)や(III)を直接測定するオンライン測定法や Fission Chamber も進化しているが、いずれにしても核分裂の上流に行くほど実験データは非常に限られているのが現状である。

4. 核分裂収率と随伴する核分裂観測量

収率の他にも核分裂後の観測可能な観測量として、核分裂片の運動エネルギーや角度分布、即発中性子・ガンマ線の多重度(放出数)、それらのエネルギースペクトル、遅発中性子収率、崩壊熱などがある。これらの観測量は、全て核分裂で発生した核種から放出される積分値であることから、当然ながら収率と直接関係する。

例えば、図3(a)に、核分裂直後で即発中性子放出前の収率(I)の質量数分布を示した。この段階では、 $(Z, A) = (53, 140)$ ができれば相方は $(Z, A) = (39, 96)$ というように、必ず相方の核分裂片の (Z, A) が一意に決まる。このため、質量数分布は鏡面对称となる。図3(b)には、即発中性子多重度と呼ばれる平均放出数の質量数分布をいく

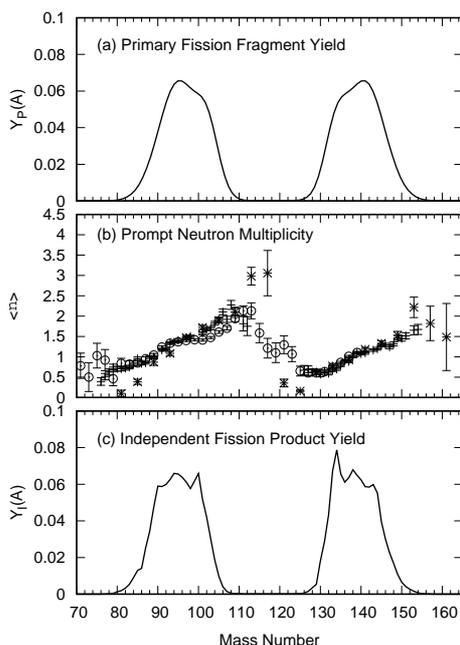


図3 一次収率, 即発中性子多重度, 独立収率の質量数依存

つかの実験データを拝借して示した。鋸歯のような構造を有することが知られており、 $A=110-120$ あたりで最大値となり、相方がある $A=120-130$ あたりで最小値となる。ちなみに、この鋸歯のような理由が原子核の変形と関連するという指摘もあるが、まだ完全な説明には至っていない。そして図3(c)には、即発中性子を放出により変化した収率(II)を示した。収率(II)には、特徴的な微細構造が現れている。特に $A=134$ に収率のピークは顕著で、多くのアクチノイド核の熱中性子による核分裂で同様のピークが現れる。これは、 $A=134$ より重い核分裂片が中性子を放出して崩壊してくる途中で、即発中性子を放出しにくい安定な核種が分布する質量数に至るとそこに収率が“溜まる”と考えることで説明できる。

II. 核分裂収率のための理論・モデル

1. 核分裂現象の理論的理解への取り組み

では、このような分裂片の質量数分布が2山になったり3山になったり、即発中性子放出により微細構造を持つ核分裂収率を、様々なアクチノイドや様々な入射エネルギーで正確に予測することはできるのだろうか？

核分裂を物理現象として理解するため、あるいは、観測量を再現することを目的として、実に多くの理論的枠組みや経験的モデルが開発されてきた。

代表的なアイデアとして、液滴模型だけでは観測値の説明が難しい核分裂に対し、Strutinsky は一粒子模型から計算される殻エネルギーの補正を加えて変形度を変数としたポテンシャルエネルギー(核分裂障壁)に2つの山があることを示した¹⁾(図4)。核分裂に向かう原子核は、基底状態から1つ目のポテンシャルの山のサドル点を越え、少し変形した少し安定な状態を経て、2つ目の山を登り次のサドル点に至り分裂していくというものである。

その後、Brosa らが Strutinsky の手法を適用して核分裂障壁を詳しく調べた結果²⁾、このような核分裂に至る変形の過程には複数の経路があり、代表的な長さや変形度によって例えば ^{235}U などには3つのモード(Superlong, Standard1, 2)に区別できることを見出した。各経路の最後でこれ以上伸びることができない限界の形状に至ると、ちぎれる首の位置が流体力学的不安定性によりランダムに決まって断裂する(Random neck rupture モデル)とすることで、収率の分布や即発中性子の放出パターンがよりよく説明されるとした。図5には、収率分布(I)への3

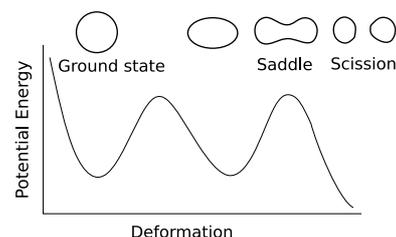


図4 核分裂過程での変形度による核分裂障壁のイメージ

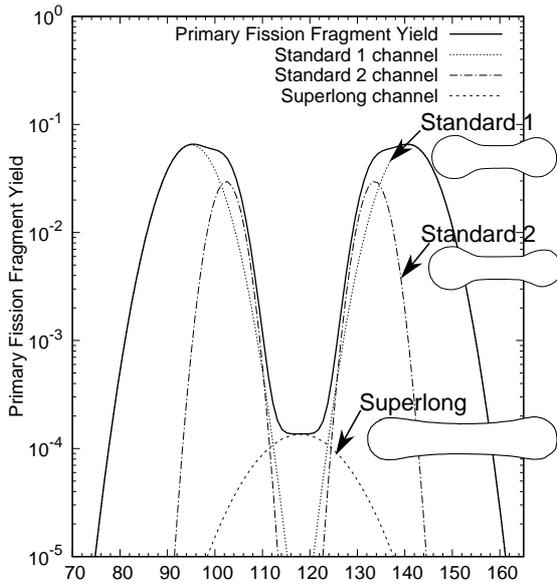


図5 Brosaによる3つの核分裂チャンネルの一次収率への寄与の例

つのモードからの寄与と伸長形状の例を示した。

図5中のSuperlongモードを見ていただきたい。原子核がにわかには信じがたいような伸び方をしている。しかも伸びきったところでランダムにちぎれるというのだ。実験事実や理論計算によりこのような考えは概ね支持されているものの、まだ実際にここまで伸びた原子核を見た人は居ないだろう。実験的に核分裂障壁を調べたり、実験的観測の難しい核分裂に至る変形過程やちぎれる瞬間の形状を微視的・巨視的な理論により調べる研究が現在も盛んに行われている。

2. 核データ収率に使用されているモデル

これまで見てきたように、核分裂という現象は、複数の物理過程を内包した複雑な物理現象ゆえ、単一の理論やモデルでの説明が難しい。さらに実験データも完璧な経験的モデルを構築するには、十分とは言えない。

このような状況の中、核データでは、それぞれの観測量に矛盾が無いように与える努力が成されている。しかし、例えば即発中性子スペクトルや多重度がその実験データから収率とは独立に評価されているなど、完全に物理的な整合性が取れているとは言えない現状がある³⁾。

収率以外の観測量についても、多くの理論的・経験的モデルが開発されて核データにも採用されている。詳しくは触れないが、例えば、即発中性子スペクトルではWattの経験的モデルや、ENDFの評価に用いられたLos Alamosモデルなどがある。

前述の通り収率の実験データは乏しく、実験データのみ頼って1,000を超える核種の収率を与えるのは不可能である。このため、ENDFやJENDLでは、比較的よく測定されている質量数分布や個別核種の収率を制約条件としながら、実験データの無い領域は経験的モデルを用いて補完している。たとえば、収率(II)については、

Wahlが開発した多変量解析による系統式⁴⁾が用いられている。質量数分布をBrosaが提案した3つのモードに対応するようなガウス分布を仮定し、それに電荷分布を加えて収率を与えている。基底状態とMetastable状態に至る比率であるアイソマー生成比は、Madland-Englandによる経験式⁵⁾で与えられている。ベータ崩壊後の収率(III)は、(II)と崩壊データとが整合するように与えられている。

3. 統計崩壊理論によるアプローチ

昨今の収率データへの幅広い需要に応えるため、より多様なアクチノイド核に対し、幅広い中性子入射エネルギーで、収率と随伴する観測量である即発中性子多重度やスペクトルなどを同時に計算・予測するモデルやコードの開発が盛んに行われている。半経験的なモデルを含んだGEF、断面積計算に広く用いられてきたHauser-Feshbach統計崩壊理論⁶⁾とMonte Carlo法を併用して核分裂片の脱励起過程に適用するCGMF⁷⁾やFIFRELIN⁸⁾などが知られている。

Hauser-Feshbach統計崩壊理論を核分裂片が即発中性子・ガンマ線を放出する脱励起過程に適用する手法⁹⁾は、現時点で物理過程をもっともきちん取り扱う手法である。しかし、このHauser-Feshbach統計崩壊計算には、核分裂で生成される分裂直後の全原子核の収率(I)、単位密度や核構造の情報、さらに中性子やガンマ線の放出の透過係数などが必要である。しかし、基底状態の原子核ならともかくとして核分裂直後の非常に変形し高い励起状態にある原子核についての情報は全くと言っていいほどない。

このような理由から、分裂片が有しているであろう初期状態の多重分布(収率、励起エネルギー分布、スピン・パリティ分布)を生成するためにMonte Carlo法が併用されてきた。しかし、Monte Carlo法による非常に小さな生成確率のサンプリングには、長時間の計算が要求される。このため、収率は小さいが強いガンマ線を放出するなど重要な核種が見逃される可能性や十分な精度が得られないという課題があった。

このような課題を解決すべく、我々は、Monte Carlo法を必要とせず多重分布をすべて決定論的に与えて解析的に積分する手法を開発している¹⁰⁾。この手法では、核分裂直後に生成した分裂片の多重分布を、実験データを参考に経験式から生成したものと、ある分布に従うと仮定した励起エネルギー、スピン・パリティ分布を組み合わせ生成する。このような分裂片の脱励起をHauser-Feshbach統計崩壊理論で丁寧に計算する。

図6には、統計崩壊のモードの例を示した。例えば、ある励起エネルギー分布とスピン・パリティ分布を持つ分裂片(Z, A)が1個の中性子を放出し、生成した(Z, A-1)からも1個の中性子を放出し、合計2個の中性子を放出

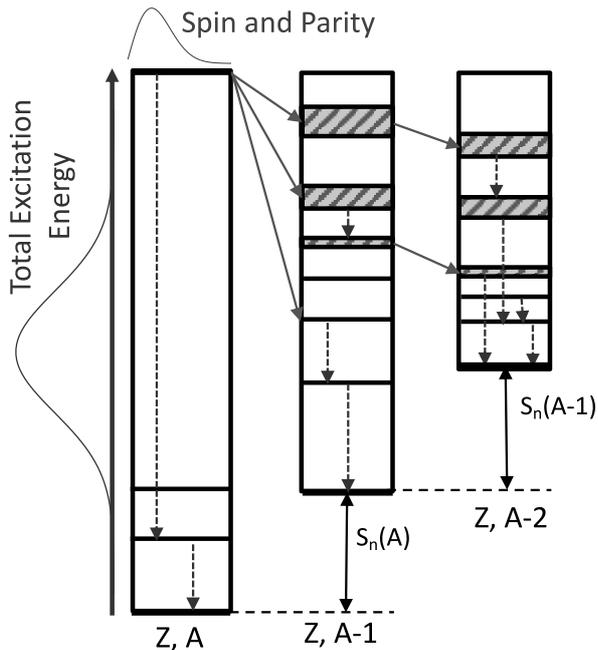


図6 統計崩壊の模式図

した後、 $(Z, A-2)$ になりガンマ線を放出して Metastable 状態か基底状態に至る、といった過程を中性子・ガンマ線放出の競合を勘案のうえ計算する。これを全ての核分裂片に対して行うことで、この核分裂による即発中性子・ガンマ線多重度やエネルギースペクトルが求まる。その結果、はじめに仮定した収率(I)から収率(II)が得られる(即発中性子の放出分、変化しただけだから)。得られた収率(II)は、随伴する他の観測量と整合性を有する。このようにして計算した ^{235}U からの収率は、図3で紹介したような $A=134$ の収率ピークなど微細構造をよく再現する。

我々の手法ではさらに、入射エネルギー5 MeV までの任意のエネルギーでの収率(II)、即発中性子・ガンマ線多重度やエネルギースペクトルの計算を可能にしている。例えば即発中性子多重度のエネルギー依存の実験データをよく再現することができた。

冒頭にて断裂直後の分裂片が大きなスピンを有していることを述べた。統計崩壊により至る基底状態と Metastable 状態の生成比を調べることで断裂時に付与された角運動量を推測し、間接的に分裂直後の分裂片の変形に関する情報が得られると考えられている。生成比の実験データは非常に数が少ないが、このような計算を用いることで実験的には測定が難しい短寿命の Metastable 状態との生成比も求めることもできる。

さらに、収率(II)とベータ崩壊情報(崩壊データ)を組み合わせて崩壊系列を追うことで、ベータ崩壊後の収率(III)、遅発中性子収率、崩壊熱といったベータ崩壊に伴う観測量の計算も行いつつある。これにより、これまで得られなかったきめ細かな入射エネルギーにおける核データに求められる様々な観測量を計算する手法の構築

を目指している。このためには、確度の高い実験データ、計算やモデルの高度化、核構造や崩壊データなど多様なデータの高精度化も同時に求められる。

本研究で開発した手法が実際に評価に活用されるにはまだ時間がかかるが、このような経験的手法と物理的モデルを活用することで、これまで個別に評価されてきた収率と収率に相関のある観測量が互いに整合性を持って、かつ細かいエネルギー点で与えられるようになることが期待される。

III. おわりに

核分裂過程の描像を非常に簡略に述べるとともに、収率の区別や、核データにおける収率の取り扱いの現状などを紹介してきた。核分裂という現象には、実験的にも理論的にもまだ十分に理解されていない挑戦的な課題が多数残されている。核燃料サイクルで重要な廃棄物の組成を決定しているのも生まれたばかりの核分裂片そのものであるし、マイナーアクチノイドの核変換もつまり核分裂なので核変換によって生まれてくるのはやはり核分裂生成物なのである。本稿では、細かい議論は端折って、できるだけ幅広い分野の方に理解していただけるよう核分裂の全体像と収率、随伴する観測量の解説に努めた。それゆえ不正確さが残る箇所があると思われる。

本稿を執筆するきっかけとなった、Hauser-Feshbach 統計崩壊理論による核分裂収率と即発中性子多重度の関係に関する研究は、東工大の千葉敏教授のグループおよび米国ロスアラモス国立研究所の共同研究で行った。

－ 参考資料 －

- 1) V.M. Strutinsky, Nucl. Phys. A, 95, 2, 420-442(1967).
- 2) U. Brosa, Phys. Rev. C, 38, 1944(1988).
- 3) P. Jaffke, J. Nucl. Sci. Eng. 190(3): 258-270, (2018).
- 4) A.C. Wahl, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13928(2002).
- 5) D.G. Madland and T.R. England, Los Alamos National Laboratory Report, LA-6595-MS (1994).
- 6) 河野俊彦 “統計理論備忘録 II 光学模型と Hauser-Feshbach 理論” 核データニュース No.117(2017).
- 7) P. Talou, B. Becker, T. Kawano, M. B. Chadwick, and Y. Danon, Phys. Rev. C, 83, 064612, (2011).
- 8) O. Litaize and O. Serot, Phys. Rev. C, 82, 054616(2010).
- 9) T. Kawano, P. Talou, I. Stetcu, and M. B. Chadwick, Nuclear Physics A 913, 51(2013).
- 10) S. Okumura, T. Kawano, P. Jaffke, P. Talou, and S. Chiba, J. Nucl. Sci. Technol. 55(9),1009-1023(2018).

著者紹介



奥村 森 (おくむら・しん)

国際原子力機関(IAEA)
(専門分野/関心分野)核データ, 廃棄物
処理・処分

「核燃料サイクル計画」映画制作プロジェクト

フリージャーナリスト 井内 千穂

8月某日。「核燃料サイクル計画」を問い直すドキュメンタリー映画制作のためにクラウドファンディングを始めるといふキックオフイベントに参加した。プロジェクト起案者の稲垣美穂子氏とは2013年に取材させてもらって以来のお付き合いである。ご無沙汰続きだったところへ、ふと案内が来た。よかった。考え方が少々違っても、ご縁が切れたわけではなかったようだ。

彼女の前作ドキュメンタリー映画『ザ・サイト』の冒頭、「それにしても人は現金だ。3.11まで高レベル放射性廃棄物の処分地が決まっていなかったことなんかに見向きもしなかったのに、急にこれを取り上げ…」という本人のナレーションは、当時、私の胸に突き刺さった。凶星だ。彼女は、学生だった2006年に六ヶ所村のPR施設を見学して疑問を感じたという。鋭い問題意識だ。以来、彼女は滋賀県の余呉町、北海道の幌延、霞が関界隈、某大学の研究室など、神出鬼没の取材を続け、2013年に完成させた『ザ・サイト』の上映会には、立場や意見を異にする様々な関係者や一般市民が集まっていた。

あれから6年。「もんじゅ」の廃止、原発の再稼働、最終処分場の選定など、難問が絡まり合って膠着している。今こそ「核燃料サイクル計画について考え直すべき時ではないのか」と問いかける稲垣氏は、今後、核燃料サイクル計画に翻弄されてきた地域の歴史と人々の状況取材する由。クラウドファンディングは、資金集めであると共に、話題性を高め、新たな仲間と繋がっていくためであると語った。

「今作では立場を鮮明にする。中間ということはない」と語った稲垣氏の周囲には、おのずと脱原発派が集まっていたが、推進側の人々の声にも耳を傾ける取材姿勢は変わらないようだ。意見の相違を超えて、若い世代の真摯な活動に世間の関心が高まることを期待しつつ、わずかばかりだが出資する。

Column

仙台市を訪れて(1)

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

毎年、大学の冬季休暇と夏季休暇に1~2ヶ月間ほど日本に滞在しています。今夏は、大学休暇中の課題である、内科・外科実習を受けに、宮城県仙台市に位置する仙台厚生病院に1ヶ月ほど滞在しました。全国屈指の治療数をほこり、循環器、消化器、呼吸器の3分野で東北地方の中核となっている病院での実習は、とても充実したものでした。同病院の近くには、日本初の水力発電所である三居沢発電所があります。設立100周年を記念して作られた三居沢電気百年館では、日本の水力エネルギーのルーツも学ぶこともできました。

日本の水力発電は、ニューヨークで世界初の水力発電が始まった1886年から2年後の、1888年7月1日に三居沢にあった紡績会社の経営者が、当時、紡績工場の動力として用いられていた水車タービンに発電機を取り付け、アーク灯に点火したことから始まります。この水車タービンは、ミュール錘紡績機というもので、明治時代初期の1878年に外国製の綿糸に国内の綿織物工業が圧迫されたことに危機感を持った明治政府が英国マンチェスターより購入したものです。初期には、紡績工場内の電灯のために発電がされていましたが、その後、民間の電気事業である「仙台電燈会社創立事務所」が市内に設立され、電灯事業が始まります。以降、三居沢発電所は「仙台電灯会社」「宮城紡績電灯株式会社」「東北配電株式会社」などを経て、1951年より東北電力株式会社に継承され、現在も小規模ながら発電を続けています。驚くことに、第二次世界大戦や東日本大震災でも大きな被害を受けることなく、震災後は設備点検をした3日後には発電が開始されたそうで、小規模ながら仙台の電力を長年支え続けています。

物理の女はカッコいいの？

京都女子高校3年生 鳥居 千智

とある友人たちが「物理で女の先生ってカッコいいよね。」と話していた。これを聞いたとき違和感を覚えた。その発言は「女子は理系に不向き」という考えを含んでいるかもしれないと思ったからだ。

他にも別の人の発言で違和感を覚えたことがある。またとある子が「男子と女子では脳が発達している部分が違うから女子は数学が苦手やねん。」と言って、その子の発言にうなずいた子もいたことだ。また、私と同じく物理の道を志す子になぜ女子大を志望校の候補外にしているのか聞いたら「物理の才能は女子より男子の方が高いから、そういう人と研究したい。」と返されたことなどだ。

これらの会話についてあなたは何を思っただろうか。私は女子が理系に向いてないという考えを含んでいると思った。しかしその説を信じる人に言いたい。しっかりと自分でその説について調べたことがあるのか、と。女子は理系科目についての成績が全体的に悪いとしても、才能以外の問題があることも考えられる。例えば周りの人が「これに関して女子はこう、男子はこう」と言うなどして、本人が無意識に苦手なものにしてしまっていると考えられないだろうか？そのような思考が身につくと伸びる子も伸びないと思う。また仮に女子が全体的に理系的な才能が低かったとしても、そこまで大きな差はあるのだろうか？

実はこの話で出てきた人たちは全員女子高生だ。なぜ自分で自分の道や可能性を狭めるのか。ジェンダーについての意識はもっと女子高生も変えるべきだ。

最後に、私は大学で物理を探究するつもりでいるのだが、「女子なのに物理ってカッコいい。」とは言われたくはない。何をしているのか、中身を見てから言ってほしい。

Column

「五者であれ」を肝に銘じる

フリーライター 服部 美咲

世に「教師は五者であれ」といわれる。学者、芸者、役者、易者、医者である。深く学び、愉しく教え、信頼に足る師の役を担う。進路を占い、学習法を処方する。「五者であれ」はメディアにも言える。よく学び、解りやすい記事や番組を作り、信頼に足る情報源としての役割を担う。社会の行く末を占い、公正な報道をする。

作家の井上ひさしは、学者、医者、易者を指して「自分の意見が他人の人生を左右する三職」とした。メディアもまた、他人の人生に影響する。東京電力福島第一原子力発電所の事故の後の福島では、未だ一部の「五者たらぬ」メディアが、被災者の人生に影響を及ぼしている。

あるテレビ局が、甲状腺がんの当事者支援をうたう民間団体と連携し、当事者が原発事故後の甲状腺検査について語る番組を繰り返し放映する。福島の甲状腺検査には、過剰診断など高度に専門的な問題が複数絡み合う。当事者とはいえ一般人が容易に理解し、テレビの前で語れるようなものではない。一方で、当事者の声が、政策や他人の受診行動を左右することもある。今を苦しむ当事者が、後の世で「検査の不利益を被る人を増やした」と責任を問われるような事態は避けねばなるまい。メディアが、当事者が不利益を被らないように慎重に学び、報じた責任を負うべきテーマだ。

ソーシャルメディアの時代である。我々一般人の安易な情報拡散が、他人の人生を左右する場合もある。目にした情報が「五者たる」メディアによるものかどうか、一瞬手を止めて考えたい。

リー・ラッセル博士

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

私たち物理屋が放射線の生体影響の研究に取り組んだのは、3・11 事故後。生物屋との異分野交流が始まりメガマウスの実験を知った。1927 年、放射線が突然変異を起こすというハエの実験は、かの有名なマラーによって発見され大騒ぎになった。そして総線量だけに依存して突然変異が誘起されることがわかり、LNT 仮説の基盤となった。日本の原爆被害者の遺伝的影響調査を担当した J. Neel は、マラーの実験を知っていて、「およそ 10 万人に 1 人出るくらいの確率の影響を検出するのは不可能だ」と、マラーに相談してハエよりヒトに近いマウスでの実験が提案され、ラッセル夫妻が 700 万匹ものマウスで（メガマウスプロジェクト）実験を開始した。最初の結果は 1951 年に、そして 1958 年サイエンスに発表。「線量率効果があるということは、突然変異は蓄積されるという常識が破られた！」と 1962 年にはライデン国際会議が開かれ大激論になった（日本から田島、近藤が蚕の実験を紹介）。この膨大な実験の情報を今では若い専門家の殆どが知らない、マラーの LNT との対決はどう決着したのだろう、生き物をこよなく愛したラッセル夫妻のお住まいでのリーとの会話を思い出す。メールが届いた。「リー・ラッセル博士のご逝去をお伝えしなければなりません。彼女のお仕事に大変興味を持って頂いたこと、彼女もとてもうれしかったと確信します。」95 歳だった。故ラッセル博士と一緒に行ったメガマウス実験の詳細を知りたいと、仲間の鈴木和代さんが思い切って出したメールに返事が来た。こうしてオークリッジにあるご自宅を、仲間たちと一緒に訪問したのが昨年 9 月だった。この詳しい内容は、ぜひどこかで皆様にお伝えしたいと思っている。

Column

原子力発電に対するイメージ

東京学芸大学附属国際中等教育学校 6年 マイケル 瑛美

選挙権を持つことができる年齢が 18 歳に引き下げられ、私も今月(11 月)以降の選挙に参加できるようになった。2011 年 3 月 11 日以降、原子力発電推進派か反対派かという論点が日本の選挙において重要な公約の 1 つになっている。この議論は、すぐに答えの出ないもので、慎重に考えていく必要があると思う。明確な答えがでない議論の中であるがふと、他の国は原子力発電についてどのように考えているのかと疑問に思った。そこで、オーストラリアに住む親せきに原子力発電についてどのように思うか聞いてみた。

オーストラリアは、自然豊かな国であり、選挙において自然保護に対する候補者の観点は重要なものとなっている。気候変動の原因とされる環境汚染の観点から、火力発電に頼ることに抵抗があり、原子力発電を代わりに使う方がよいと考える人が多いそうだ。一方で、“FUKUSHIMA”における原子力発電所の事故はオーストラリアでも大きく伝えられていて、原子力発電についてネガティブなイメージを持つ人も一定数いるそうだ。

原子力発電を、21 世紀の人類発展のための功績とみるのか、21 世紀が生み出してしまった負の産物とみるのか、その解釈は、これからの時代を担っていく私たちが決定するのだと思う。選挙権をもつ者として、広く、日本以外の国の考えも取り入れながら、原子力発電との付き合い方を模索していきたいと思う。

サイエンスよみもの

低線量率放射線影響における幹細胞競合の重要性 腸管オルガノイドを用いた幹細胞競合研究

電力中央研究所 藤通 有希

放射線による発がんリスクは、一般に線量に応じて高くなるとされているが、低線量率被ばくでは積算線量が増加しても発がんリスクが高くないという「線量率効果」が、高自然放射線地域住民の疫学研究から報告されている。この疫学研究の結果を生物研究によって検証するため、生体内の組織に類似した構造を持つミニ臓器(オルガノイド)を培養容器内で作製し、線量率効果をもたらす生物学的なメカニズムの一つと考えられている「幹細胞競合」について検討した。その結果、1 Gy 照射幹細胞は非照射幹細胞が存在すると増殖しにくいことが観察され、「放射線誘発幹細胞競合」が線量率効果に寄与する可能性を示した。

KEYWORDS: *Low-dose and low-dose-rate radiation, Dose rate effects, Cancer, Stem cells, Intestine, Organoid, Stem cell competition*

I. 背景

放射線によるがんのリスクは、国際放射線防護委員会(ICRP)の2007年勧告¹⁾において1 Sv あたり約5%であるとされている。この値の主な根拠は、広島・長崎の原爆被爆生存者の疫学研究によって得られた結果をもとに、実際に放射線作業従事者や公衆に生じうる被ばく状況が低線量・低線量率被ばくであることを考慮したものである。しかし、高線量率被ばくと低線量率被ばくにおいて、放射線応答にどのような生物学的な違いがあるのか、いまだに十分明らかにされていない。本稿では、当所が行っている放射線発がん影響の線量率効果に関する研究成果を紹介する。

1. 放射線疫学と放射線防護

高線量率で放射線被ばくした広島・長崎の原爆被爆生存者の疫学研究において、線量に応じて発がんリスクが高くなることがよく知られている²⁾。一方で、世界には、大地から数 mSv から 10 mSv/年を越える放射線被ばくを慢性的に受ける高自然放射線地域(HBRA)が存在しており、インド・ケララ州の疫学研究の場合は、一番高い線量群の積算線量の平均が約 600 mGy であった。この

地域住民の疫学調査の結果、原爆被爆生存者において有意な影響が観察されている線量を被ばくした群においても、統計的に有意な発がんリスクの上昇は認められなかった³⁾。放射線防護における計画被ばく状況や現存被ばく状況は低線量率被ばくを想定しており、HBRA 研究の結果を考慮すると、低線量率被ばくでは発がんリスクが線量に応じて上昇しない可能性も考えられる。しかしながら、低線量率被ばく集団を対象とした疫学調査が限られていることに加え、得られた結果は信頼区間が広く、そのばらつきでの低減も困難である。そのため、生物研究によるメカニズムの解明が重要になる。

2. 放射線生物研究により当所が明らかにした知見

細胞・分子レベルでは、放射線を照射した細胞のDNAにはDNA二本鎖切断(DSB)が生じるが、すみやかに修復される。このDSB修復経路を調べたところ、低線量率と高線量率では主に働く経路の違いがあることが明らかになった⁴⁾。また、放射線1 Gyを照射したマウスの腸管幹細胞集団の変化を調べたところ、高線量率照射では非照射の場合と比較して幹細胞の動態が有意に異なっていたが、1 Gy 低線量率照射では非照射の場合の幹細胞動態と有意な差がなかった⁵⁾。このことから、高線量率照射と低線量率照射で幹細胞動態が異なることが明らかになった。腸管幹細胞の遺伝子発現解析により、高線量率照射したマウスと低線量率照射したマウスで、

The importance of stem cell competition for low-dose and low-dose-rate radiation effects : Yuki Fujimichi.

(2019年8月19日 受理)

線量が同じであっても活性化する遺伝子群が異なることが明らかになった⁶⁾。以上から、高線量率のリスクから低線量率のリスクを直接推定するのは適切ではないことが示唆されている。当所以外からも、線量や線量率によって放射線応答が異なることが数多く報告されており、UNSCEARの報告書⁷⁾等にまとめられている。一方で、線量率に応じたDNA修復や細胞動態、遺伝子発現等の放射線応答の相違が、発がんリスクにどう結びつくのかは明らかになっておらず、更に研究を進める必要がある。

II. 線量率効果のメカニズム解明に向けた機構仮説の設定

1. 低線量率放射線の物理的特徴

放射線の線量分布を微視的にみると、標的であるDNAへの放射線のヒットがポアソン分布に従うと仮定した場合、全ての細胞に対して平均1ヒットの放射線があたるとき、実際には37%の細胞に放射線があたっていない。したがって、平均1ヒットが生じるよりも低い線量を低線量率で被ばくした場合、放射線がヒットした細胞とヒットしていない細胞が混在している。生体内で細胞は集団として存在しており、新陳代謝により排除されたり、細胞が分裂して増殖したりするため、細胞集団中に被ばくの影響(ヒットの結果)が蓄積しにくいと考えられる。一方で高線量率被ばくでは全ての細胞に多数のヒットが一度に生じることになる(図1)。この違いが、同じ線量でも発がんリスクが異なる理由の1つと考えられる。

2. 放射線による発がん幹細胞

臓器・組織には幹細胞と、幹細胞が分化した機能細胞が存在する。栄養を吸収したり、粘液を産出したりするような機能細胞は新陳代謝により組織から排除されていくが、幹細胞は幹細胞集団内に長くとどまる。幹細胞集団は組織の中で一定の数に保たれており、この幹細胞集団に突然変異を蓄積した幹細胞が定着し増えていくことが発がんにつながる。そこで、放射線発がんメカニズムを考える際には幹細胞の放射線影響を評価することが重要になる。

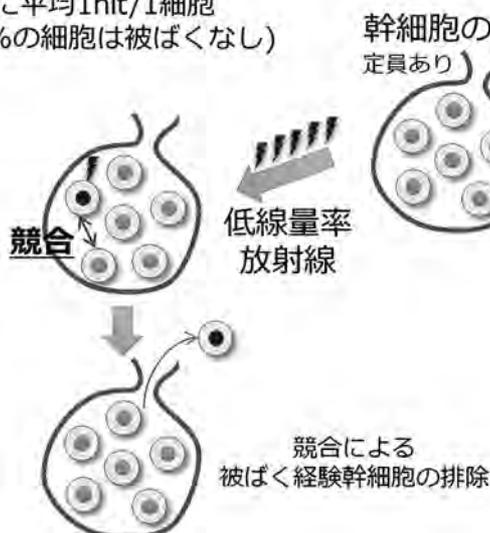
当所では、組織の中でも腸管(小腸・大腸)に着目した研究を進めている。腸管は全てのがんの中でも発症数が多く、放射線防護における組織加重係数も高い重要組織である。さらに、腸管は組織の中でもよく研究されており、幹細胞をはじめとする組織構造の同定が進んでいる側面もある。われわれは腸管の幹細胞が特異的に緑色蛍光(GFP)を発する遺伝子組換えマウスを用い、Ⅲ章で紹介する実験を行った。

3. 細胞競合と線量率効果メカニズム仮説

遺伝子の一箇所に突然変異を誘導した変異細胞のみを培養すると正常細胞と変わらず増殖していくが、この変異細胞が正常な細胞に囲まれると、変異細胞が排除されるという「細胞競合」が報告され、注目を集めている⁸⁾。さらに、照射した造血幹細胞と照射していない造血幹細胞の両方をマウスに移植すると、照射していない造血幹細胞が定着しやすいという結果も報告されている⁹⁾。そこで、放射線被ばくを経験した幹細胞と経験していない

低線量率被ばくでは 放射線があたった細胞と あたっていない細胞が同時に存在する

1 mGy/時の場合
(=1時間に平均1hit/1細胞
↑37%の細胞は被ばくなし)



高線量率被ばくでは 全ての細胞に放射線があたる

1 Gy急性照射の場合
(=平均1000hits/1細胞)

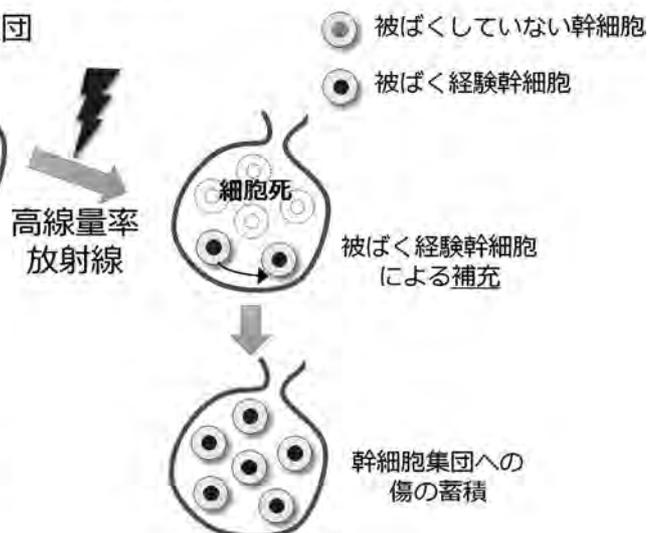


図1 線量率効果メカニズムの仮説 —幹細胞競合—

幹細胞が幹細胞集団内に同時に存在する低線量率被ばく状況下では、放射線被ばく経験幹細胞が優先的に幹細胞集団から排除されると仮定し(図1)、その検証に取り組んでいる。

Ⅲ. ミニ臓器(オルガノイド)を用いた幹細胞・がん研究

1. オルガノイドの培養

低線量率放射線を照射したマウスの体内で、放射線がヒットした細胞の運命を追跡することは現在の技術をもってしても難しい。そのため、従来は主に細胞を平板培養することにより放射線応答が解析されてきた。しかし、この一般的な細胞培養法では、幹細胞が増殖しても組織構造を作ることではなく、培養細胞での放射線応答と生体の放射線応答が、はたして同じなのか否かという議論が続いてきた。近年、幹細胞を特殊な環境下で培養することにより、培養容器内で生体の組織に類似した構造を持つミニ臓器(オルガノイド)(図2)を培養する技術が報告された¹⁰⁾。培養容器内で培養するオルガノイドは経時変化を観察することが容易であるため、より生体に近い条件で細胞の運命を追跡できると考え、この最新の手法を取り入れた¹¹⁾。

腸管幹細胞からオルガノイドを形成するために、まず、マウスの小腸からクリプト(図2)を取り出し、1個1個の細胞に分散させた。目的とする細胞のみを分取(ソーティング)できるセルソーターという装置で緑色蛍光を発する幹細胞のみを培養容器内にソーティングして培養すると、1~2週間でオルガノイドが形成された。当所では、培養条件を改良することにより、腸管の幹細胞からオルガノイドを高効率で作製することに成功した。

2. 1個の幹細胞からオルガノイドを培養

一般的なオルガノイド形成法では、1個の培養容器内で多数の幹細胞を培養し、複数のオルガノイドを形成する。この方法で培養したところ、培養容器あたりのオルガノイド密度にオルガノイドの形成能や増殖能が影響されることを発見した。放射線の影響をより正確に解析するためには、オルガノイド密度の影響を排除することが必要であるため、1個の培養容器に1個のオルガノイドを形成する手法を新しく構築した(図3)。その結果、1個の培養容器に1個の幹細胞を培養する条件においても、約20~30%の高効率でオルガノイドを形成させることが可能になった¹²⁾。

幹細胞は自己複製するとともに、機能細胞に分化できるという性質(幹細胞性)を持っているため、幹細胞がオルガノイドを形成できるかどうか、幹細胞の健全性を評価する指標のひとつとなる。幹細胞を培養容器内にソーティングしてから、放射線を1Gy照射すると、オルガノイド形成効率は非照射時の約0.8倍となった。すな

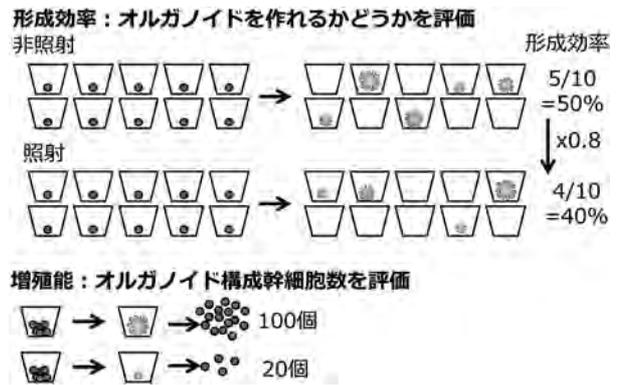
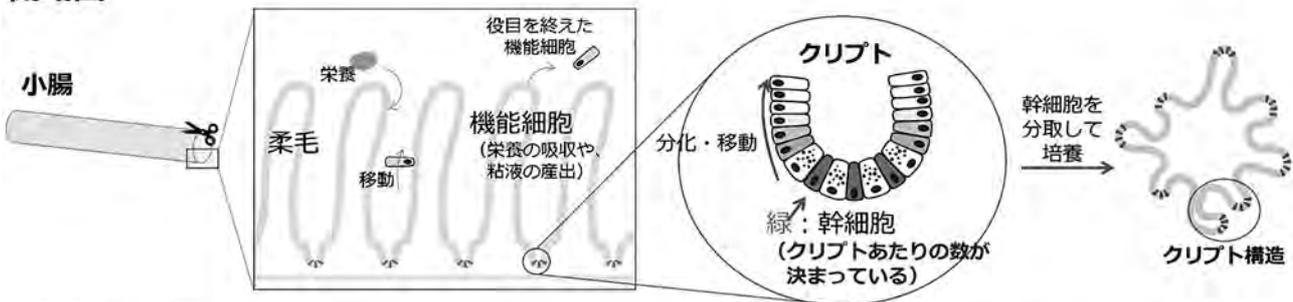


図3 オルガノイド形成効率と増殖能の例

概略図



実際の画像

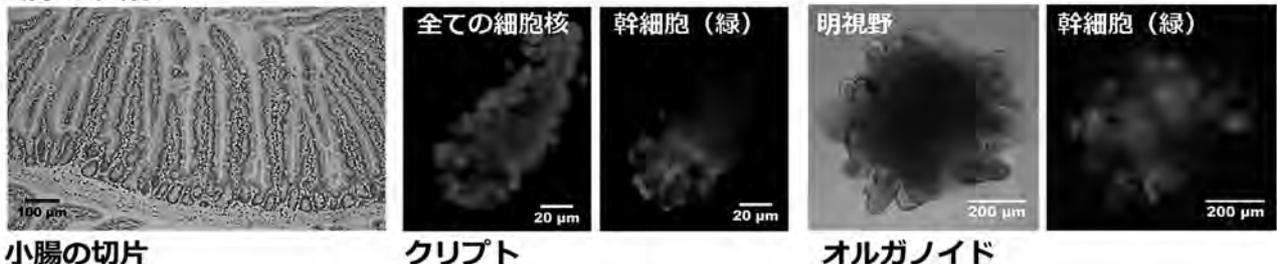


図2 小腸の構造とオルガノイド

わち 1 Gy で 2 割の幹細胞がその幹細胞性を失ったことが示唆された。

3. 複数の幹細胞から 1 個のオルガノイドを培養

幹細胞競合の評価は、2 種類の幹細胞集団から 1 個のオルガノイドを形成させ、観察することで可能になると考えた。そこで、複数の幹細胞から約 1 個のオルガノイドを形成し、そのオルガノイドを構成する細胞の数や種類を同定する手法を構築した。前項のオルガノイド形成効率の評価では、単に幹細胞がオルガノイドを形成できるかどうかのみを評価したが、オルガノイド中に何個の幹細胞が存在するかを評価することで、オルガノイドの増殖能の違いも評価可能になった(図 3)。照射幹細胞のみを培養し、オルガノイドのサイズやオルガノイド中の幹細胞数を評価したところ、非照射幹細胞のみを培養した場合と比較して、統計学的に有意な差は認められなかった¹²⁾。

4. 幹細胞競合の可視化と定量評価

放射線を照射した幹細胞とその子孫細胞、照射していない幹細胞とその子孫細胞を区別するために、幹細胞とその子孫細胞を赤色蛍光により標識する仕組みを導入した。これに、複数の幹細胞から約 1 個のオルガノイドを作る手法を組み合わせることで、蛍光色の異なる 2 種類の幹細胞集団に由来する混合オルガノイドを形成した。2 集団の培養開始時の幹細胞数の比とオルガノイド形成後の幹細胞数の比を比較することで幹細胞競合を評価する実験系を構築した(図 4)。

ソーティング直後に X 線 1 Gy を照射した幹細胞と非照射の幹細胞を混合培養し、混合オルガノイド中の構成幹細胞数を評価すると、照射幹細胞が増殖しにくいことが明らかになった。照射幹細胞のみを単独培養すると、非照射幹細胞と比べて増殖能に有意差はなかったが、非照射幹細胞と混合培養すると照射幹細胞が増殖しにくかった(図 5)ことから、「放射線誘発幹細胞競合」が存在することが示唆された^{12, 13)}。

5. 今後の展開

今回の幹細胞競合実験では、照射した幹細胞と照射していない幹細胞を混合培養してオルガノイドを形成したが、組織構造をもっている幹細胞の一部にのみ放射線がヒットする低線量率被ばくの状態とは異なることが欠点である。そこで、当所が開発したマイクロビーム X 線照射システムを用い、オルガノイド中の幹細胞を狙い撃ちして、その幹細胞の運命を評価する実験系の構築を進めている。今後、X 線で狙い撃ちしたオルガノイド中の幹細胞がオルガノイドから排除されるのかどうか、より直接的に評価する(図 6)¹⁴⁾。



図 4 混合オルガノイドと幹細胞競合

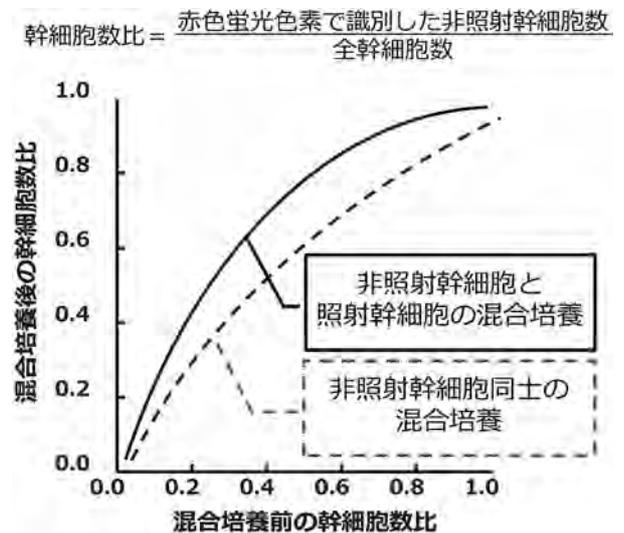


図 5 幹細胞競合実験の結果の概要

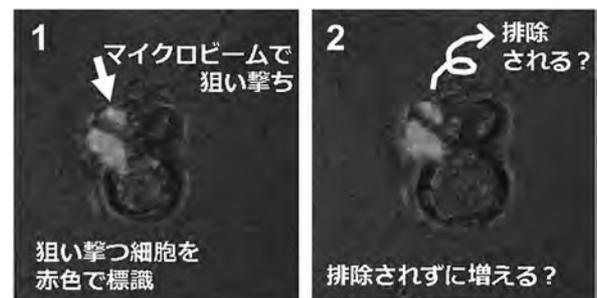


図 6 マイクロビームで照射した幹細胞の運命追跡

IV. 当所研究成果の意義と低線量率放射線影響研究の国内動向

1. 放射線誘発幹細胞競合に関する当所の研究成果と意義

これまで、変異細胞が排除されるという細胞競合は報告されていたが、放射線誘発幹細胞競合についてはその可能性が示されてはいたものの¹⁵⁾、報告されていなかった。本研究では、突然変異が生じていないと推測される放射線被ばくを経験しただけの幹細胞であっても、放射線被ばくを経験していない幹細胞が存在すると増殖しにくいという放射線誘発幹細胞競合をはじめて明らかにした。これは、幹細胞集団内に放射線被ばく経験幹細胞と放射線被ばくを経験していない幹細胞が混在する低線量率被ばくの場合、放射線被ばくを経験していない幹細胞が優先的に増殖することにより、幹細胞集団を被ばくしていない状況に近づけていることを示唆しており、HBRA 疫学研究で報告された低線量率被ばくでは発が

んリスクが上がらないという結果の解釈につながる重要なメカニズムのひとつと考えられる。

2. 低線量・低線量率放射線影響研究の国内動向

現在、オールジャパン体制で低線量・低線量率放射線影響を解明し、放射線防護に反映する取り組みが進んでおり、学会連携のワークショップ等が毎年開かれている¹⁶⁾。2019年6月21日には、日本保健物理学会と日本放射線影響学会の合同ワークショップとして「低線量リスクに関するコンセンサスと課題の明確化」が開催され¹⁷⁾、2020年には報告書が刊行される予定である。放射線誘発幹細胞競合に関しては、量子科学技術研究開発機構の今岡らによって乳腺に関する研究も進められており^{18, 19)}、当所も国内関係機関と協力しながら研究を進めている。

— 参考資料 —

- 1) ICRP Publication 103.
- 2) Grant et al., Solid cancer incidence among the Life Span Study of atomic bomb survivors: 1958-2009, *Radiat. Res.* 187 513-537, 2017.
- 3) Nair et al., Background radiation and cancer incidence in Kerala, India-Karunagappally cohort study, *Health Phys.* 96, 55-66, 2009.
- 4) Tomita et al., J. Role of DNA double-strand break repair genes in cell proliferation under low dose-rate irradiation conditions, *J. Radiat. Res.* 49, 557-564, 2008.
- 5) Otsuka et al., Effects of dose rates on radiation-induced replenishment of intestinal stem cells determined by Lgr5 lineage tracing, *J. Radiat. Res.* 2015.
- 6) Otsuka et al., Cellular responses and gene expression profiles of colonic Lgr5 + stem cells after low-dose/ low-dose-rate radiation exposure, *J. Radiat. Res.* 59, ii18-ii22, 2018.

- 7) 原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) 2012 White Paper, Biological mechanisms of radiation actions at low doses.
- 8) Kajita et al., EDAC: Epithelial defense against cancer-cell competition between normal and transformed epithelial cells in mammals, *J. Biochem* 158, 15-23, 2015.
- 9) Bondar and Medzhitov, p53-mediated hematopoietic stem and progenitor cell competition, *Cell Stem Cell* 6, 309-322, 2010.
- 10) Sato et al., Single Lgr5 stem cells build crypt-villus structures in vitro without a mesenchymal niche, *Nature* 459, 262-266, 2009.
- 11) Yamauchi et al., A novel in vitro survival assay of small intestinal stem cells after exposure to ionizing radiation, *J. Radiat. Res.* 55, 381-390, 2012.
- 12) Fujimichi et al., 論文修正中.
- 13) CRIEPI Annual Report 2017.
- 14) DEN-CHU-KEN TOPICS vol.26, 低線量率放射線影響の解明に向けた挑戦, 2018.
- 15) ICRP Publication 131.
- 16) 藤通, 日本放射線影響学会 第60回大会 印象記. 一放射線リスク・防護研究基盤構築に向けた動き一, *保健物理* 52 329-331, 2017.
- 17) http://www.jhps.or.jp/upimg/files/20190621_low_dose_WS.pdf
- 18) https://www.kenkyu.jp/nuclear/field/h28/jin_05.pdf
- 19) http://pfwww.kek.jp/acr/2017pdf/u_reports/pf17b0042.pdf

著者紹介



藤通有希 (ふじみち・ゆき)

電力中央研究所 原子力技術研究所 放射線安全研究センター
(専門分野/関心分野)放射線防護・放射線生物/特に線量率効果と幹細胞競合

我が国における大学等核燃および RI 研究施設の 在り方について

「原子力アゴラ」調査専門委員会
大学等核燃および RI 研究施設検討・提言分科会

大学等における核燃および RI 研究施設は原子力分野における基礎教育および基盤研究に不可欠な施設であるが、主要大学においては施設の老朽化や安全管理への対応が課題である。一方、福島第一原発事故に対する基盤研究や人材育成をはじめ、核燃および RI に対する新規制への対応などが求められている。そこで、原子力学会アゴラ調査専門委員会「大学等核燃および RI 研究施設検討・提言分科会」において、大学施設の状況を調査して、課題を抽出するとともに、それらに対する今後の在り方について提言をまとめたので報告する。

KEYWORDS: NUCLEAR FUEL, RADIOISOTOPE, UNIVERSITY FACILITY

I. はじめに

大学等の核燃および RI 研究施設では、老朽化対策や人材不足等安全管理への対応とともに福島第一原子力発電所事故や総合的規制評価サービス (IRRS)¹⁾ を受けた関連規制の強化、改正への対応が求められる²⁾。学会ではアゴラ調査研究委員会に、「大学等核燃および RI 研究施設検討提言分科会」を設立した。本分科会では、「今、大学の研究・教育現場から訴える」(2017 年春の年会)、「原子力研究に関わる法規制 (核燃および RI) の動向」(2017 年秋の大会)、「原子力分野における実験教育と研究炉等の在り方」(2018 年春の年会)のセッションを企画し、大学等の核燃および RI 施設の現状紹介や法規制の動向、法改正への対応について検討した。さらに既存施設の状況や新規制に関する情報を共有し、大学等における核燃・RI 施設の在り方と全国的な役割分担、さらには新規制への対応や施設維持管理に関して抽出した課題について各委員が分担してまとめてきた。2018 年 9 月に中間報告を踏まえて、提言としてまとめ、同年 9 月に原子力学会 HP 上に公開するとともに、その後、新たな規制の動向と、それに対する各大学、学会の対応を含めて検討し、今回最終報告の形をとることとなった。

II. 報告書の概要

1. 核燃および RI 施設の状況と課題

大学等核燃および RI 研究施設の現状を把握するために、国内の主な大学における施設の状況を調査し、課題を抽出した。本分科会に参加している委員の所属大学を中心とした 10 大学を対象として、核燃施設の概要、利用状況、管理体制、管理業務、老朽化の状況などを調査した。調査結果を表 1 にまとめて示す。同表に示すように、大学における核燃施設の多くは昭和 30-40 年代に申請・設置されており、多くの施設共通の課題として、老朽化があげられる。また、核燃料の使用の予定がなく、保管のみとしている施設があり、廃止措置を進めている施設が複数ある。さらに、管理体制、サポート体制は大学によって大きく異なり、専攻単位の組織で管理しているところ、全学組織で対応しているところがある。一方、新規制への対応に伴って、変更申請を含む整備業務や安全管理業務 (計量管理、保管廃棄物管理等) の負荷、これらに対応する人材の不足が共通する課題としてあげられている。これらの課題による、原子力分野における基礎・基盤研究への影響は大きく、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と考えられる。

2. 核燃および RI 施設に関する法改正の概要

平成 25 年 12 月 18 日に施行された、核燃料物質使用施設に適用される新規制基準は、二十九の条文から成っている。大学における核燃施設の殆どは、施設検査を要しない政令第 41 条非該当の使用施設であり、適用される新規制基準は、閉じ込めの機能、遮蔽、火災等による

Issues for security measures for nuclear fuel and RI facilities at universities : Mitsuru Uesaka, Masayoshi Uno, Takumi Saito, Nobuaki Sato, Tatsuya Suzuki, Takehiko Tsukahara, Ken Nakajima, Toshiaki Hiyama, Hiroaki Muta, Kouji Yasuda.

(2019 年 8 月 19 日 受理)

表1 大学における核燃施設の調査結果

大学名	北海道大学	東北大学	東京大学	長岡技術科学大学	東京工業大学	福井大学	名古屋大学	京都大学	大阪大学	九州大学
核燃施設数*	J:1, K:11	J:4, K:7	J:2, K:16	K:1	J:2, K:4	K:1	J:1, K:7	J:4, K:11	J:3, K:12	J:2, K:5
施設申請年**	昭和42	昭和40	昭和46	昭和56	昭和36	平成21	昭和35	昭和37	昭和43	昭和42
管理体制***	研究院専任無	全学専任無	研究科専任無	センター専任有	全学専任無	研究所専任無	全学専任有	全学専任有	全学専任有	全学専任有
施設老朽化	○	○	○	○	○		○	○	○	
変更申請	○	○	○	○	○	○		○	○	
計量管理業務	○	○	○		○			○	○	
廃棄物管理	○	○	○		○		○	○	○	○
人材不足	○	○	○	○	○			○		
その他	J施設は保管のみ	施設統廃合	核燃料規制対応	-	施設統廃合	地元の了解	廃止措置	炉規制対応有	施設統廃合	施設統廃合

* K施設は少量の核燃料物質(天然/劣化ウラン 300 g 以下, トリウム 900 g 以下)を取り扱う施設

** 施設が複数ある場合は最も古いものを記載

***管理体制が全学組織か研究科/専攻単位か, また専任教職員の有無について記載

損傷の防止, 立入りの防止, 自然現象による影響の考慮, 貯蔵施設, 廃棄施設, 汚染を検査するための設備についてである。これまでの技術基準と異なり, 新規制基準ではバックフィットを求めているので, 常に新知見を意識した新規制基準への適合性について注意が必要である。

なお, 政令第41条非該当使用者に対する法改正が令和2年9月に施行される予定であり, 同年同月から規制検査として運用が開始され, 保安のための業務に係る品質管理の体制整備の許可が必要となり, 体制整備について, 令和2年7月までに当該事項の届出を要することとなる。

RI施設における法改正において, 原子力規制庁は, IAEAによる総合規制評価サービス(IRRS)の結果および「放射性物質および関連施設に関する核セキュリティ勧告」³⁾を受け, 第59回原子力規制委員会において, 放射線障害防止法の条文(案)を決定し, 平成29年4月14日に公布され, 公布後1年以内又は3年以内に施行という段階的な施行となっている。

改正の概要は, ①報告義務の強化, ②廃棄に係る特例, ③試験, 講習等の課目の規則委任, ④危険時の措置の強化, ⑤放射線障害の防止に関する業務の改善の導入, ⑥教育訓練, ⑦記帳項目の見直し, ⑧事業者責務の取り入れ, ⑨法律名の変更および法目的の追加強化, ⑩防護措置(セキュリティ対策)の強化, である。

大学において, 予算措置が必要となる法令改正は, 特定許可使用者における防護措置の強化である。取り扱う線源, 放射線の危険性に依りて3つの区分設定が行われ, 検知機能, 侵入の遅延策, 盗取の際の対応策等が求

められている。例えば, 区分1および2では検知機能として侵入検知装置, 監視カメラ, 不正工作検知装置が, 侵入の遅延策として障壁機能が要求されている。(令和元年9月1日施行)

3. 核燃施設の在り方

昭和30年に「原子力基本法」, 昭和32年に原子炉等規制法が制定され, 同年東工大, 京大, 阪大に原子力を学ぶ大学院が, 昭和33年の京大を初めとして, 昭和47年までに旧七帝大に原子力関係学科が設立され, 多くの原子力関係の大学で核燃料物質を用いた実験が行われ, 特に「未臨界実験装置」には多量の天然ウラン酸化物が使用されてきた。しかし, TMI事故, チェルノブイリ事故等, 相次ぐ原子力発電所事故を契機に, 原子力関連学科の人氣が低迷し, 「未臨界実験装置」も姿を消すが, 使用された多量の天然の二酸化ウランを充填した燃料棒は, 核燃施設に保管されたままとなっている。また原子力に関連した研究室で使用した多量のU, Th, 廃棄物(液体, 固体)等を保有している核燃施設(J施設)がそのままとなっている。こうした施設では核燃料物質に関する研究を行い取り扱いに精通した教員が減少しており, 施設は既に5~60年を経過し老朽化が懸念されている。多くの核燃料物質は保管されたままで行き先がなく, 施設の老朽化と相まって, 人的, 予算的に危機的狀態にあり, 大学の大きな負担となっている。こうした施設の老朽化, 核燃料物質等の安全管理等を考慮すると, 使用していない核燃料物質等の引取り先の確保, 人的, 予算等の確保は喫緊の課題である。加えて, 核セキュリティ, セーフ

ティの観点より、こうした大規模保有施設の統廃合が望まれる。

K 施設は、天然/劣化ウラン 300 g 以下、トリウム 900 g 以下の使用施設であり、管理区域の設定は必要なく、核燃料物質による災害を防止する、という点では特に注意を要しないで取扱うことができることから、細胞の顕微鏡観察の前処理、分析の標準試料等のため多くの事業者が許可を取得している。一方で K 施設は排気・排水設備が不要であり、さらに以前は届出だけで設置、廃止が可能で、計量管理も年に 2 回のみで良かったため、施設によってはその取扱に問題のあった場合や廃棄物の紛失、特に未登録核燃料物質の発生の原因にもなっていた。しかしながら取扱の容易な K 施設は、後述する J 施設からの変更も含めて残すと同時に、その許可量の見直しや処分方法の記載の徹底など、取扱方法において大きな制約を設ける必要がある。あわせて、教育や管理は J 施設等を含む機関全体で一括して行うことが望ましく、単独でなく J 施設等のサテライトとして運営されるような在り方が望ましい。また、そのようなシステムを持っていない機関に対しては、例えば東西に 1 箇所程度、K 施設の共同利用施設を設け、全国から使い勝手の良い施設にするとともに、何らかの機関がしっかり管理することが望まれる。このようなシステムは、全国の核燃料物質の廃棄物の管理および試料の管理・配布についても行われるべきである。

核燃料物質の使用許可を受けている J 施設であるものの、実態としては少量しか使用していない、あるいは保管管理しかしていない施設も存在する。実態に合った核物質の使用や管理がされてない場合、少量であることによる使用の簡便さと、J 施設に求められる管理の厳密さとの間に大きな乖離があるため、不適切な作業者の被ばく管理や公衆の被ばく線量管理が行われる元になる懸念がある。無用な被ばくや事故を抑制するには、施設の実態にあった安全管理方法や使用者の教育が不可欠であることから、K 施設相当の少量使用 J 施設においては、核燃料物質や保管廃棄物を J 施設等へ払い出し、適切な管理区域解除を行うことにより、K 施設への変更を図る方策もある。このようにして、J 施設・K 施設の整理や統廃合を進めることにより、核燃料物質の安全管理、防護体制強化を図ることが望まれる。

4. RI 施設の在り方

RI 施設は、 α 核種を取り扱うことが出来る施設と β , γ 核種のみを取り扱う施設とに大分される。その大きな違いは廃棄物の問題にある。使用の終わった β , γ 核種およびその汚染廃棄物は、日本アイソトープ協会(以下、RI 協会)に廃棄委託することが出来る。しかしながら、 α 核種およびその汚染物質に関しては、それらを引き取り、処分を行う組織がないことから使用した機関が永久

にそれらを保管管理する必要がある。このことは α 核種を使用する上で大きなハードルとなっている。この α 廃棄物問題は大きな問題であったので、受入と処分について議論されてきたが、福島事故以降、議論が止まっている。早急に議論を再開しなければならない。

β , γ 核種の利用は、生物分野でのトレーサーとしての利用が多くなされてきたが、近年の分析技術等の発展により、RI を用いる必要が少なくなり、施設の利用が減少している。更には、施設の老朽化も進み、国立大学に於いても法人化以降、改修費用等の予算確保が難しく、維持が困難となり、RI 施設を廃止する大学も少なからず存在する。他方では医学分野では世界的に見て需要が増してきており、 α 核種を用いた治療の研究まで行われているところであるが、我が国の大学では施設の対応が追いついていない状況である。また、この医学の分野だけでなく、原子力の分野でも人材育成のため、 α 核種も含めた RI 施設が必要である。このような背景を鑑み、日本学術会議では「大学等における非密封放射性同位元素使用施設の拠点化について」の提言をまとめた⁴⁾。同提言では、大学に複数 RI 施設が存在する場合は統合すると共に、活発でない RI 施設は廃止し、拠点となる RI センターを国内にいくつか(学術会議は 10~20 と提言している)確保し、そこに活発に利用されている大学の RI 施設を結びつけるネットワーク型の共同利用 RI センターを作ることが一つの解決案になると提案している。

さて、もう一つ大きな課題となるのが RI 施設と核燃施設の共用である。両者の利用は異なる法により規制されている。程度の差こそあるものの、いずれの施設も管理区域等の安全・防護に係る規制が必要であり、核燃ではさらに保障措置への対応が不可欠となる。 β , γ 廃棄物は RI 協会による引取が可能であるが、 α 廃棄物は施設に保管し、核燃廃棄物と同様な対応となる。原子力分野の研究開発では、核燃および RI 両者が使用可能な施設が不可欠である。とりわけ、福島第一原子力発電所事故で発生した燃料デブリ等の対応や研究においては、両者が使用できることが必須条件となる。異なる法により規制されていることで RI と核燃を共用することが難しくなっているが、拠点形成などの方策も含めて、検討していく必要がある。現在、共用が可能な施設については、今後も存続が望まれる。また、K 施設相当の少量しか使用しない RI 共用の J 施設の場合、核燃料物質や保管廃棄物を他の J 施設等へ払い出すとともに、廃止措置の対象とはせず、K 施設へ移行することが有効な対策の一つである。

5. 放射性廃棄物の管理・保管・廃棄

保管廃棄している RI 廃棄物は、事業所の登録、内容物の記載など、所定の手続きを経た後、RI 協会に廃棄委託することが可能である。しかし、内容物の核種や放射

能濃度が不明の廃棄物、核原料・核燃料物質が混入した廃棄物、 α 放出を含む廃棄物等は、RI協会への引渡しが可能である。中でも、原子力関連の研究開発を行っている大学施設では、核燃料に分類されるウラン、トリウム等とRI物質を併用しなければならないケースがあるが、これらの作業過程で発生する容器類・フィルター類等は核燃廃棄物として事業所内で長期間(現状では永久に)保管せざるを得ない状況にある。なお、RI法改正により第三十三条の二に「廃棄の特例」で、RI廃棄物について炉規法の廃棄事業者において処理・処分できるものは、原子炉等規制法下の廃棄物とみなすことが示されたため、早期の炉規法の廃棄事業者の事業化を期待したい。

各大学の核燃施設は既に5~60年を経過しており老朽化が著しく、一部の大学では廃止措置が開始されている。このような状況にある各大学の核燃施設には、これまで教育、実験、研究で使用してきた核燃料物質によって汚染された液体、固体廃棄物(核燃料廃棄物)、設備・機器の解体に伴って発生した核燃料廃棄物が多く保管されている。これらの核燃料廃棄物はドラム缶等に収納され安全に管理は行われているが、ドラム缶の経年劣化に伴う詰替え作業等も行わなければならない、これらの保守管理にも人と予算が発生している状態である。

大学の核燃施設における安全確保の観点から、廃棄物処理事業を担当する公益法人の早急な事業開始を求めたい。また、廃棄物処理事業者への核燃料物質等の搬出には相当な予算確保が必要であるが、一大学で解決できる問題ではないことから、大学を所管する文部科学省に対し、集約に伴う予算の確保について、関連する大学が一致協力し、長期的な視野に立って要望して行かなければ解決しない問題である。

6. 全学および国内における安全管理体制の在り方

核燃施設やRI施設の安全確保のためには、線量率測定と作業環境測定、ならびに排気と排水の放射線測定の実測が求められているなど、維持管理に恒常的な費用が発生する。そこで、限られた予算、限られた人材でこれらの施設の運営を維持するための、合理的かつ有効な手法について検討した。代表例として、少量使用のJ施設のK施設への変更、使用していないK施設の廃止と核燃料物質等のJ施設への集約、さらには部局毎のRI施設のキャンパス単位での統合、といった施設の統廃合は、有効な手法となりうる。統廃合は、学内のみに限らず、個別の大学から地域の代表的な研究施設へと集約することもできる。統廃合による選択と集中は、費用面だけでなく、分野の縮小による管理人材の減少に対する対策としても合理的かつ有効である。

同様に、管理人材の育成や教育訓練等の共通化も、施設運営の合理化と安全管理の維持へとつながる。そのた

めには、学内の全学的な組織の確立とサポート体制の構築を行い、管理・教育にかかる負担を低減することが、安全管理等の観点からは望まれる。人材育成と教育訓練についても、長期的に見た国内施設の統合に向けて、学内外における教育訓練内容や被ばく管理の共通化を進めていくことが望まれる。一部の大学間では、教育訓練内容の統合へ向けた試行が、すでに進められている。特に気を付けるべきは、K施設においては、IAEAの国際基本安全基準(Basic Safety Standards: BSS)に基づいて、使用量や使用の基準等の見直しが行われる可能性があり、J施設に準じた安全確保や安全教育の実施が重要である。

核燃施設の管理に関わる品質保証は、今までは研究炉を除いて政令第41条該当J施設のみしか要求されていなかったが、近年では非該当J施設に対しても取り組みが口頭で要求されており、対応を準備しておいた方がよい。なおRI施設においては、法改正により予防規程に業務の改善に関する記載が求められている。核燃料施設の品質保証とは安全を確保するための活動であり、実施内容として、原因究明(Plan)、対策の実施(Do)、評価(Check)、改善(Action)といったPDCAのサイクルを廻す改善活動が求められる。一例として、品質保証計画書を作成し、その中に品質保証体制、文書および記録の管理、保安活動の実施、内部監査、是正措置および予防措置、教育・訓練、等について規定することで、保安のために必要な措置を体系的に実施することができる。一部の人材に対する負担が集中しないようなサポート体制を構築することが肝要である。

7. 提言

以上述べた現状の課題、今後の対応から、本報告では以下について提言した。

- (1) 福島原発事故対応を含めて、原子力人材の育成・確保に対応すべく、核燃およびRI研究施設の重要性および需要は高く、今後も長期的な視点に立った研究施設の維持・運用が望まれる。
- (2) IRRS勧告に基づく、原子炉等規制法等への新規規制基準への対応が求められている。核燃施設においては、K施設をJ施設等のサテライトとした統廃合を進め、管理、運営の合理化を図る。さらに将来的には人材および研究の需要を考慮しながら、大学間など、全国的に統廃合を進めていくことが望まれる。
- (3) 施設の老朽化に伴う維持管理の負担増に対して、施設の集約化を進める必要がある。また保管廃棄施設(設備)の容量逼迫に対しては、現状適用が難しいクリアランス制度の改善と利用、埋設廃棄の推進が望まれ、最終的には原子力バックエンド推進センター(RANDEC)等による全国的な集約・処分体制の構築が必要である。

- (4) 今後、大学等の基礎研究や人材育成を図りながら持続的に展開していくためには、核燃およびRIを取り扱える、より高度な研究施設を、福島復興に関連した原子力研究拠点として設置し、実験研究の展開と人材育成を図ることが望ましい。

Ⅲ. おわりに

以上、本報告では以下の点について紹介してきた。

1) 原子力工学分野における人材育成に関わる大学等の核燃およびRI研究施設について検討委員会設置の背景と経緯、必要性を示した。2) 大学等における核燃およびRI研究施設の現状について各大学の状況を調べ、それらに関わる課題を抽出し、在り方を検討した。3) 上記の検討に基づき、学内および国内の核燃およびRI施設の拠点化と統廃合による安全管理体制の確保に関する提言を行った。4) 全学的あるいは全国的な核燃料物質および核燃RI廃棄物の集約、保管によるセキュリティ対策を提言した。

これらの提言により、全国的な研究施設の集約を踏まえて、今後の大学等の研究環境や教育環境の状況を検討した結果、将来的には、さらに施設の集約と高度な実験研究施設の確保を図るために、福島復興に関連した原子力研究拠点を設置し、実験研究の展開と人材育成を図ることが望ましい。本分科会発足後、中間報告および最終報告のとりまとめを進めてきたが、この間においてもRI規制法の改正に基づく変更承認申請への対応や、核

燃施設における保管および廃止を含めた変更承認申請や保管する廃棄物の管理、報告など新たな対応を求められている。大学等における核燃およびRI施設については、人材育成や研究開発、安全管理、セキュリティ対策等、個々の大学における対応のみならず、国、大学、学協会を含めた全国的な検討が必要不可欠であり、本報告が今後の教育・研究へ貢献できれば幸いである。

－ 参考資料 －

- 1) IAEA "REPORT OF THE INTEGRATED REGULATORY REVIEW SERVICE (IRRS) MISSION TO JAPAN", (2016). <https://www.nsr.go.jp/data/000148261.pdf>
- 2) 規制庁「IRRSにおいて明らかになった課題への対応について」, (2018). <https://www.nsr.go.jp/data/000216875.pdf>
- 3) IAEA 核セキュリティシリーズ No.14, 「放射性物質および関連施設に関する核セキュリティ勧告」, (2011).
- 4) 「大学等における非密封放射性同位元素使用施設の拠点化について」, 日本学術会議, 基礎医学委員会・総合工学委員会合同, 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会, (2017). <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t249-4.pdf>

著者紹介

上坂 充(東京大学), 宇埜正美(福井大学), 斎藤拓巳(東京大学), 佐藤修彰(東北大学), 鈴木達也(長岡技術科大学), 塚原剛彦(東京工業大学), 中島 健(京都大学), 檜山敏明(九州大学), 牟田浩明(大阪大学), 安田幸司(京都大学)

今後の高速炉サイクル研究開発 —原子力機構の取組—

日本原子力研究開発機構 早船 浩樹, 前田 誠一郎, 大島 宏之

高速炉開発の今後10年程度の開発活動を特定する「戦略ロードマップ」が2018年12月の原子力関係閣僚会議で決定された。戦略ロードマップでは、長期的な開発スケジュール、開発方針、開発体制などと合わせて、「・民間が取り組む多様な技術開発に対応ができるニーズ対応型の研究基盤を維持していくことが必要である」等、原子力機構が果たすべき役割が示されている。本戦略ロードマップを受けて、原子力機構は今後の高速炉サイクルの研究開発への取組方針を策定した。ここではその概要について報告する。

KEYWORDS: *fast reactor, strategic roadmap, integrated design evaluation, codes & standards, plutonium management, radioactive waste reduction*

I. はじめに

2018年12月に原子力関係閣僚会議で決定された高速炉開発「戦略ロードマップ」¹⁾では、今後の10年程度の開発活動が特定され、その中で原子力機構(以下、JAEA)が果たすべき役割が提示された。これを受けて、JAEAでは高速炉サイクルの炉システム分野と燃料サイクル分野(再処理技術、燃料製造技術、燃料・材料開発)の当面5ヵ年程度の研究開発への取組方針を策定した。本報告では、当該研究開発計画の概要や今後の展開について述べる。

II. 戦略ロードマップを受けたJAEAの取組方針

2006年から開始された高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCTプロジェクト)では、2050年頃からの高速炉の商業導入を目標として、ナトリウム冷却高速増殖炉(酸化物燃料)、先進湿式法再処理および簡素化ペレット法燃料製造の組合せを主な対象として開発を進め、建設に向けた概念設計に入るための国のレビューを受ける段階に来ていた。2011年3月に発生した東日本大震災後の原子力政策の見直しを受けて、FaCTプロジェクトは凍結となった経緯がある。

新たに策定された戦略ロードマップでは、「JAEAは、民間が取り組む多様な技術開発に対応できるニーズ対応型の研究開発基盤を維持していくことが必要。設計手法や安全基準等の我が国の技術を国際標準化する。」とあ

り、さらに、実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に、国内外一体となって取り組むとしている。このため、高速炉のイノベーションを推進する民間との連携を進め、民間ニーズの先取りやシーズ提供に努めるとともに、国際協力も活用しつつ今後の開発支援や技術的知見などの提供に向けた準備を進める。

具体的には、高速炉のプラント設計や開発プロセスの変革を可能にする革新的な研究開発基盤の開発を進める。合わせて設計手法や安全基準等を国際標準化する取組を国際協力も活用して推進し、研究開発基盤として整備する。さらに、これまで蓄積してきたナトリウム冷却高速炉の研究開発知見をベースに、将来のシーズ技術として、高速炉の更なる安全性や信頼性向上に向けた革新技術の開発を進める。なお、これらの研究開発を進めるにあたっては、大学等の研究機関との協力を積極的に進める。

戦略ロードマップには、「21世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて、・現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待される」との記載がなされた。JAEAはそのような高速炉プラントの2050年の運転開始を目指すことを自らの目標とし、上述した“研究開発基盤”や“革新技術”開発の成果、および試験研究インフラを民間に提供することにより開発の効率化・加速化を図るとともに、今後、具体化される開発工程や将来の状況変化に柔軟に対応し、適時的確に開発が進められるよう貢献していく。

燃料サイクル分野では、機微技術を含む燃料サイクルの開発は、当面はJAEAが主体となって進める。軽水炉サイクルとの整合性を考慮し、プルトニウムマネジメント等の優先課題に対応した開発を進め、イノベーション

Outline of the R&D plan for the fast reactor cycle system development in JAEA: Hiroki Hayafune, Seiichiro Maeda, Hiroyuki Ohshima.

(2019年6月19日 受理)

ン促進に寄与する研究開発基盤の維持・強化を図る。

前述の取組方針に沿って、JAEA が主体的に取り組む具体的な研究開発項目の取組方針を策定した。以下でその内容を述べる。

III. JAEA が主体的に取り組む研究開発

1. 炉システム分野の研究開発

炉システム分野では、研究開発基盤として(1)先進的
設計評価・支援手法の整備、(2)規格基準体系の整備、革
新技術の開発として(3)安全性向上技術に集中し、これ
らの成果を民間が進める高速炉の原子力イノベーション
開発に提供していく。JAEA が保有する「常陽」、照射後
試験施設、液体金属試験施設、材料・構造試験施設など
は、民間の試験ニーズに応じて提供するとともに、上述
の(1)、(2)、(3)の研究開発に必要な試験インフラとして
維持・強化を進める。上述したような JAEA での研究
開発基盤の整備の成果は、図1に示すように民間が進め
る高速炉の原子力イノベーションに貢献できるように開
発を進めることとし、3年後には有望概念に対する成立
性などの性能評価、5年後には、さらに絞り込まれた有
望概念に対する詳細な概念検討に貢献できることを目標
とする。

以下では、上述の(1)、(2)、(3)の研究開発の概要を紹
介する。

(1)先進的 design 評価・支援手法の整備

本手法は、高速炉開発に係るナレッジベースと解析技
術を統合した先進的 design 評価・支援システムであり、「AI
支援型革新炉ライフサイクル最適化手法(ARKADIA：
Advanced Reactor Knowledge- and AI-aided Design

Integration Approach through the whole plant life cycle)」
と称する。全体概要を図2に示す。当面は、炉型共通性
が高く JAEA の強みを有する3分野として、炉心設計分
野、原子炉容器・原子炉構造設計分野、保全設計分野に重
点化して先進的 design 評価・支援手法の整備を実施する。
以下で ARKADIA を構成する各システムの機能を中心に
説明する。

①ナレッジベースシステム：常陽/もんじゅの設計・
建設、運転・保守の知見、FaCT プロジェクトや ASTRID
協力等の設計知見、規格基準類、解析評価手法を含むこ
れまでの R&D 知見を、暗黙知を含めてナレッジベース
化する。AI との連携により様々なニーズに対して適切
なナレッジを提供可能とし、従来の設計プロセスを大き
く高度化することを目指す。技術伝承ツールとしても活
用する。

②解析システム：定格運転状態から事故事象(シビア
アクシデント含む)までをマルチレベル(簡易～精緻)で
再現できるプラントシミュレーションシステムを開発す
る。精緻な解析の境界条件を全体解析との連成により適
切に扱う。核・熱流動・構造などの複合現象をそれぞれ
の物理に基づき連成して解く。これらによりこれまで不
可能だった評価に加え、連成を無視した従来の個別解析
より格段に高い精度を得る。これにより、代表ケースの
検証を経て大規模な実証実験を代替できるレベルのプラ
ント特性評価を可能とする。

③評価システム(設計最適化支援システム)：AI を活
用してナレッジベースの参照と解析評価技術の適用によ
り、設計最適化方策を効率的に設定し、安全裕度の適正
化や保守保全の最適化など、安全性、経済性、信頼性な

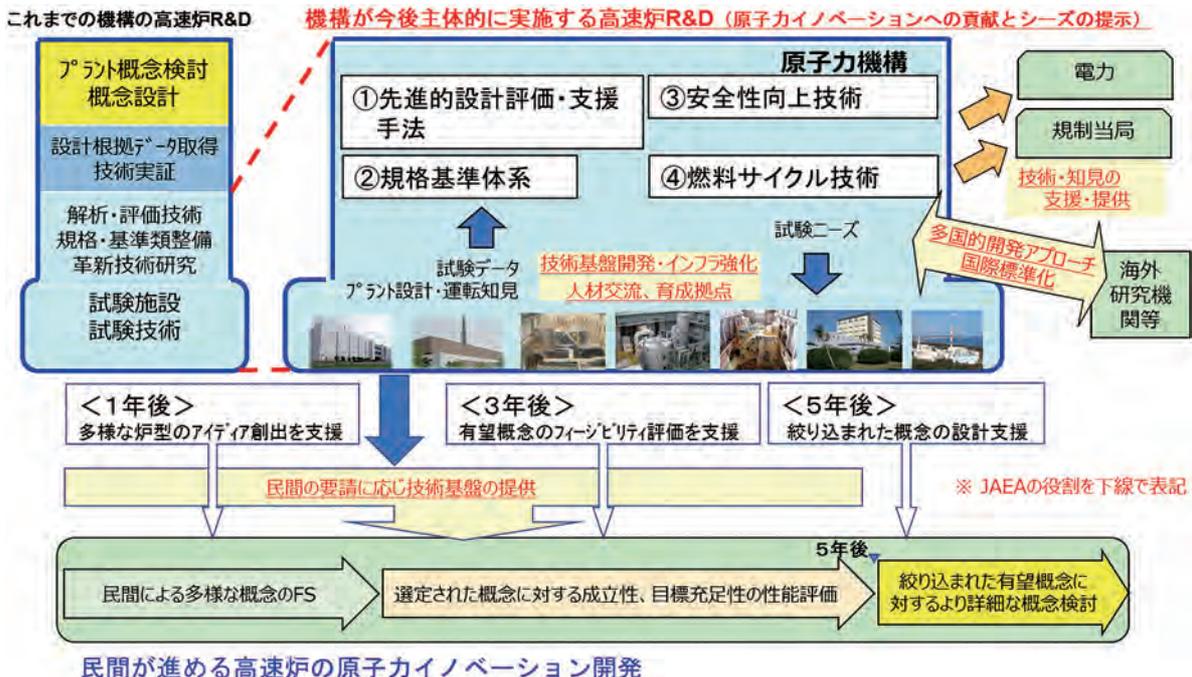


図1 JAEA での研究開発基盤の整備と民間イノベーションへの貢献

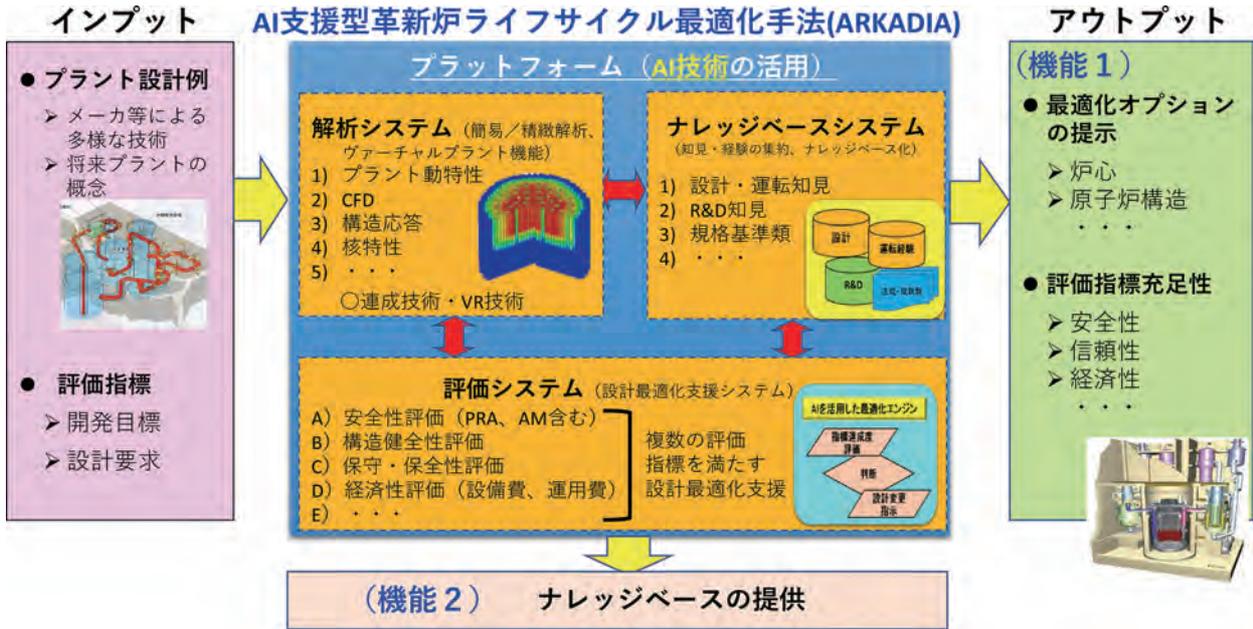


図2 高速炉プラントの先進的デザイン評価・支援手法の概要

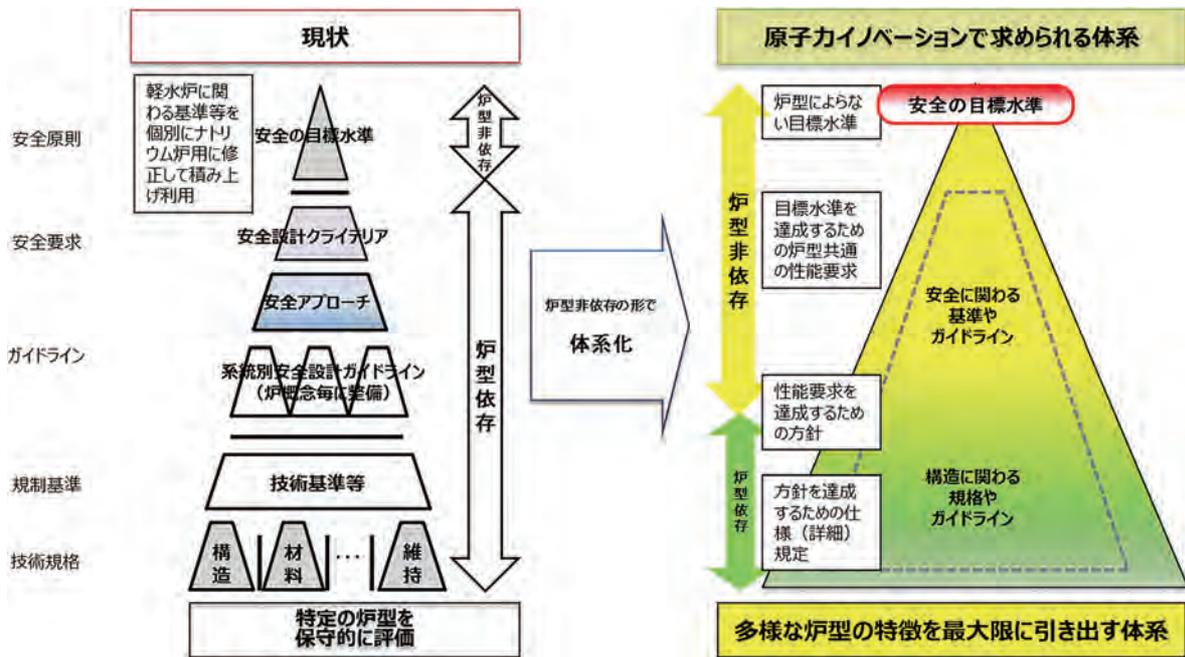


図3 規格基準体系の概念

と様々な評価軸を勘案した設計最適化支援を可能とする手法を構築する。

ARKADIA システムの整備の順序として、まずは炉心に集中し、炉構造に展開する。3年後には炉心周りの核・熱流動・構造の連成評価システムのプロトタイプを作成し、核と熱流動など分野間の連成評価による設計最適化と設計工程短縮の見通しを得る。さらに、安全性の強化やプルトニウムの増殖から燃焼への変更等、多様な要求に応じた炉心設計を短期間で導出できるツールを実現する。これらにより、設計プロセス変革の可能性を示すことを意図している。これらのシステム整備におい

て、左記と同時にライフサイクルとしての保全設計を考慮できるようにする。

(2) 規格基準体系の整備

ARKADIA システムの整備と連携しながら規格基準体系の整備を実施する。多様な高速炉について、次世代炉として適切な安全目標を満足し、かつ炉型の特徴を活かした設計や維持管理を柔軟に実現可能とするために、安全基準と構造規格(維持規格等も含む)を、リスク情報を活用してシームレスにつなぐ規格基準体系を構築する。図3に規格基準体系の概念を示す。本体系全体は、安全基準と構造規格をつなぐ、炉型を限定せず適用可能

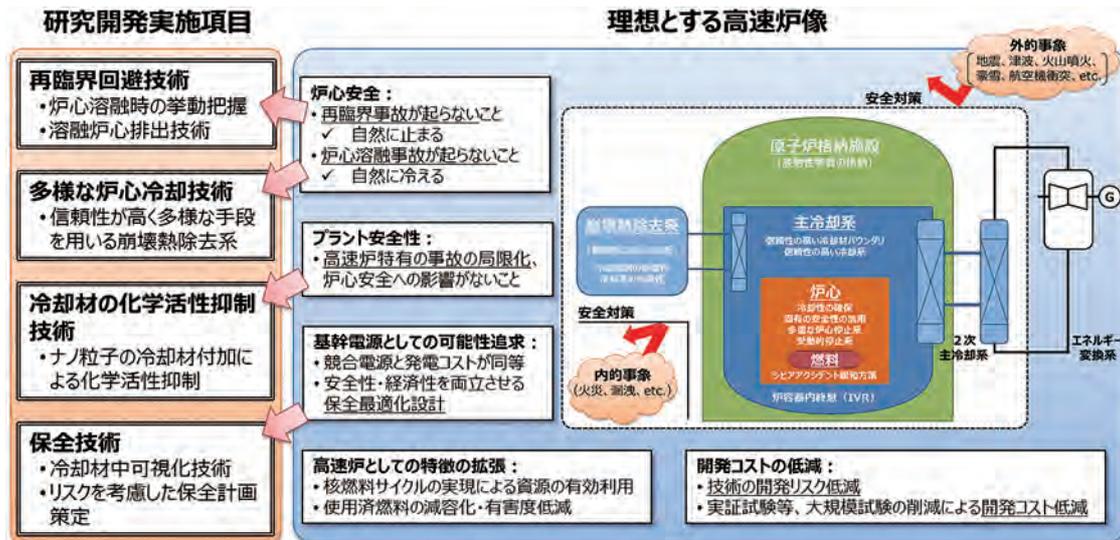


図4 JAEA が理想とする高速炉の実現に向けた安全性向上技術の開発項目の例

な基本論理と、炉型個別の技術的内容を取り入れた炉型依存の詳細規定から構成する。基本論理については、軽水炉や高速炉以外の革新炉分野を含めて適用可能なものとするを旨とし、システム化規格概念を採用し、裕度最適化の具体的ツールとして荷重・耐力係数法などの信頼性工学の手法を活用する²⁾。これにより、高速炉および新型炉の規制、産業界における適合性、ひいては社会的受容性の向上を図る。

個別の研究開発は、JAEA の研究開発基盤の整備の一環として実施し、規格標準化活動は、これまで第4世代炉国際フォーラム (GIF) や IAEA 等の国際機関で行ってきた安全設計クライテリアの標準化活動³⁾や、日本原子力学会、日本機械学会、米国機械学会等の国内外の学協会で推進してきた高速炉用規格やガイドラインの制定活動⁴⁾をより発展させ体系化する形で関係機関と連携しながら進めてゆく。

(3) 安全性向上技術の開発

将来高速炉では、安全性は元より経済性、信頼性、等多くの性能向上が求められる。特に、安全性・信頼性に関する性能向上が今後の高速炉には必要とされている。これまでの高速炉の研究開発の知見から、図4に示すように、安全性・信頼性を向上させるための技術として、再臨界回避技術、除熱系の信頼性を向上させる技術、冷却材の化学活性を低減する技術、保全技術、の開発が必要と考えられる。さらに、安全性向上以外に、信頼性の向上、投資金額の低減、再エネ等の他電源との共存、等社会のニーズを捉えた原子炉技術が求められている。このような安全性・信頼性を向上させる革新技術を研究開発し、将来高速炉の安全性、信頼性、社会的ニーズ適合性、等の性能を抜本的に向上させることが JAEA の役割である。ここで研究開発した技術は、民間に提供され、プラント概念の開発につなげる。

JAEA が革新技術の研究開発に取り組む分野として

は、原子力イノベーション公募事業において、高速炉・革新炉概念に必須の性能とされている安全性向上技術と経済性向上技術を中心とし、民間からのニーズに対応するだけでなく、JAEA が自ら技術を発案する技術に関しても研究開発を行い、革新技術として提供してゆくものとする。また、研究開発においては研究開発を合理的に進めること、開発リスクを低減することを考慮し、国際協力を活用して実施する。

当面の研究開発では、高速炉の安全性を向上させる以下の革新技術の検討、等を実施する。

- シビアアクシデントに対して「避難不要概念」を実現するための技術選択の提示
例：溶融炉心排出技術、多様な炉心冷却技術、等
- 冷却材の化学的活性を抑制する革新技術の成立性見通しを提示
例：ナノ粒子分散ナトリウム冷却材、等
- 建設プロジェクト化の容易性や社会的受容性の向上を考慮した原子炉技術の提案
例：中小型モジュール炉、再生可能エネルギーとの共存性を大幅に向上させる技術、等
- 安全性と経済性を両立した合理的な保全活動を実現のための先進的検査技術の提案
例：冷却材中可視化技術、AI および IoT を用いた異常診断技術等

ここでの研究開発の成果は、原子力イノベーション公募事業等に参画する民間事業者に提供し、プラント概念の性能向上に貢献する。また、民間事業者からの革新技術提案に対しても、その研究開発について計画の策定や解析・試験研究のための技術を提供してゆく。

2. 燃料サイクル分野の研究開発

高速炉を持続可能なシステムとするためには、燃料製造、再処理等の燃料サイクル技術が不可欠であり、戦略

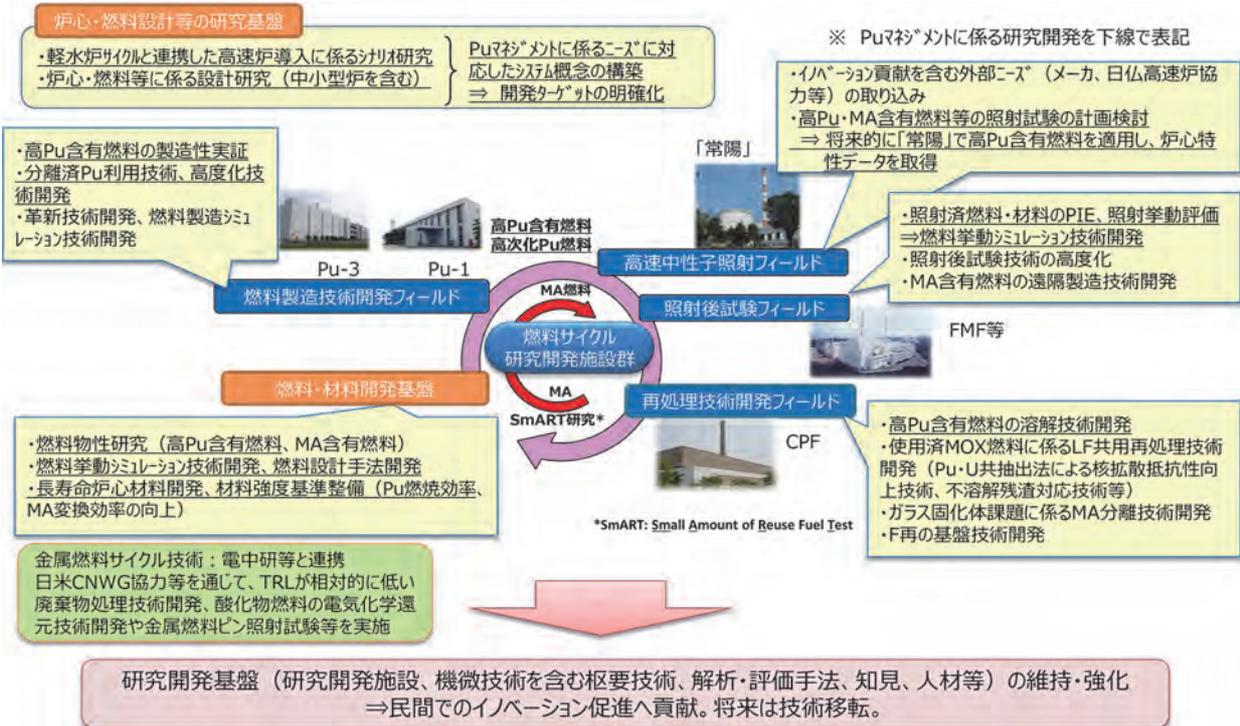


図5 燃料サイクル分野に係る研究開発の当面の進め方

ロードマップにおいても燃料サイクルに係る研究開発の取組の重要性が謳われている。JAEAは、図5に示すようにプルトニウム(Pu)マネジメントや高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の喫緊の課題に取り組み、高速中性子照射場としての高速実験炉「常陽」を含む燃料サイクル開発施設群、各種の解析・評価ツール、知見等からなる研究開発基盤を維持・強化し、民間での原子力イノベーションの促進に貢献する。この際に、民間からの要請に基づく研究開発を行うとともに、各炉システム候補の有望性判断に必要な燃料サイクルに係る知見の提供に努める。

六ヶ所再処理工場等は、東京電力福島第一原子力発電所事故後の新規規制基準に対応して、数年後に竣工することが期待され、核燃料サイクルが始動する段階を迎えている。ここで、原子力委員会は「我が国のプルトニウム利用の基本的な考え方」(2018年7月)において、分離Puの保有量を減少させること等を求めている。高速炉は、Pu増殖の用途のみならず、Pu燃焼が可能であり、軽水炉使用済MOX燃料から回収される高次化Pu(Pu-240等のfertile核種の割合が高いPu)を利用・改質できる柔軟性を有し、Puを管理(マネジメント)する鍵となり得る。中小型炉を含めた設計検討を通じて、これらの用途に適した炉心・燃料像の具体化を進める。従来の高速炉用MOX燃料では、再処理時の溶解性等の観点からPu含有率約30wt%が上限と考えられてきたが、高次化Pu利用やPu燃焼を行うためには、この限界を超えた高Pu含有燃料が新たに必要となる。このため、高Pu含有燃料の実現に向けて、硝酸溶液への溶解性の改善、燃料ペ

レット製造に係る実証、燃料物性の測定・機構論的物性モデルの開発、原子炉内の燃料挙動シミュレーション技術開発等を積極的に進める。将来的には「常陽」に高Pu含有燃料を適用して、Pu燃焼に係る炉心特性データの取得を目指す。ここで、近年の計算科学等の進展を活用し、燃料物性や照射挙動を可能な限り機構論的に記述することによって、従来の経験式を代替し、試験データや照射実績がない領域まで燃料挙動を評価し、その性能を保証するレベルまで高める新たな取り組みを行う。また、酸化物燃料の基本的な製造技術は成熟した段階に達しているが、更なる柔軟性、経済性等の向上を目指し、マイクロ波焼結等の新たな萌芽的技術について大学関係者と連携した研究開発を進める。

また、高速炉では長寿命かつ高発熱の核種を含むマイナーアクチニド(MA)を効率よく燃焼することが可能であり、高レベル放射性廃液からMAを分離・回収して、高速炉で利用することでガラス固化体の発熱や潜在的な有害度を低減することができる。このため、MA分離回収技術開発、MA含有燃料の物性研究、遠隔燃料製造技術開発、照射試験を含む燃料開発等を基盤研究として継続する。ここで、燃料の高燃焼度化は燃料サイクルの経済性を向上させるだけでなく、Pu燃焼、MA核変換の効率を高めるものであり、酸化物分散強化型フェライト(ODS)銅等の革新的な長寿命炉心材料の開発を進める。並行して再処理分野では、軽水炉用および高速炉用の使用済MOX燃料の双方に有効となる技術(核拡散抵抗性を向上させたPu・U共抽出技術等)の開発に取り組む。

IV. 国際協力の活用と人材育成

前述した研究開発の推進は国内開発を主体とするが、開発を効率化する観点、およびグローバル市場や技術の説明性を含む国際標準化の観点で、二国間、多国間の国際協力を活用するものとする。

二国間協力では、知財などの権利義務関係が明確にできることなどの特性を考慮し、R&D 協力や過去知見を含む情報取得・交換による開発効率化、技術の国際共通化を図る。特に日米、日仏間の協力による枢要技術開発は高速炉の実用化にむけて今後も重要となる。

国際標準化においては、GIF や IAEA の場を積極的に利用する。GIF では 2019 年から 3 年にわたって日本が議長国を務める。安全設計クライテリアの国際標準化の活動、試験インフラを使った国際協力の促進、再生可能エネルギーとの両立を含む市場課題への対応など、高速炉を含む第 4 世代炉開発の重要性を世界の共通認識にするための活動を展開する。

燃料サイクルに関しては、基本的には前述の考え方に沿うものの、核燃料物質を直接取り扱う技術であることから、国内自主開発を中心に国際協力として二国間(日仏、日米)を主体に基盤的な知見・情報の拡充、国際的なデータの共有等を図る。

また、2050 年の高速炉の運転開始に向けて、技術の維持発展に不可欠な人材育成について、JAEA 内のみならず、産業界、大学との連携は重要である。JAEA のもつ施設や解析評価コードの利用や共同研究についても積極的に展開するとともに、国際協力を進める中で国際的にも認められ、渡り合える人材の育成に尽力する。

V. 今後の展開

本報告で紹介した研究開発計画の方針に従い、民間ニーズの取込みを含む関係ステークホルダーとの意見交換を基礎として、研究開発を進める。炉システム、燃料サイクル分野の研究開発、および国際協力の活用では、3 年後や 5 年後などの適切な時期に評価を行い、その時点での研究開発成果や国内外の高速炉開発状況を勘案し

て研究開発計画の見直しを行うなど、柔軟な対応を図ることとする。また、今後の研究開発では、国内の他の研究機関・メーカ・大学・電力等の関係者との協力、特に原子力以外の他分野に範囲を拡大し、より広い協力関係を追究することで、社会の中でのその位置付けを発信し確認しながら研究開発を進めることとしたい。自らが設定した 2050 年の高速炉運転開始の目標実現に向けて、以上の取組を JAEA として積極的に進める。

－ 参考資料 －

- 1) 原子力関係閣僚会議、決定等、平成 30 年 12 月 21 日、https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kakuryo_kaigi/pdf/h301220_siryou.pdf (cited 2019 June 17).
- 2) Asada, Y., Japanese Activities Concerning Nuclear Codes and Standards – Part II, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME 128 (2006) 64.
- 3) GIF, "Safety Design Criteria for Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor System (Rev. 1)", (2017).
- 4) Asayama, T. et al, Codes and Standards Development for Next Generation Sodium-Cooled Fast Reactors in Japan, GIF Symposium – Paris (France) – 16-17 October 2018.

著者紹介



早船浩樹 (はやふね・ひろき)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 高速炉プラント設計



前田誠一郎 (まえだ・せいじろう)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 燃料サイクル技術開発、燃料設計



大島宏之 (おおしま・ひろゆき)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 高速炉技術開発、熱流動/安全研究、数値シミュレーション

高性能簡易型霧箱の開発とそれを利用した放射線教育の普及活動

有限会社ラド 戸田 一郎

安定したエネルギー供給，原子力発電，ウラン濃縮…。毎日のようにニュースで語られるこれらの言葉を正しく理解するには放射線に対する知識が必要である。国民の放射線に対する理解は，国家の経済や科学の発展と深くかかわっている。それゆえ放射線教育は重要であり，それにはまず「自然放射線の存在を知ること」が第一歩であり，「百聞は一見に如かず」の言葉のごとく，飛跡の見える霧箱はその最も効果的な教材であると考ええる。

I. 放射線教育の現状

私が主に携わってきた中学生・高校生を対象とする放射線教育の現状は，年とともに次第に先細りしている感がぬぐえない。特に2011年(平成23年)3月11日の東京電力福島第一原子力発電所の事故以来，一般人はともかく教師にも放射線に対する忌避の感が強くなったように思える。

1. 学校では…

教師自身が「自然放射線の存在」や「放射線の有効利用」，「原子力発電の有効性と発電原理」などの基本的な知識に乏しいことが主な原因であろうと思われ，まして放射線実験などは行われていない。

ほとんどの教師は「放射線は危険」であり，「自分の手に負える実験ではない」と考えている。

文部科学省が小学校・中学校・高校生，それぞれの理解度に応じて作成し配布(手元にあるのは平成23年度版および平成30年度版)した「放射線副読本」はほとんど活用されていない。

今から30年ほど前は私の所へも小・中・高校のみならず，大学や高専からも放射線実験の依頼が数多くあった。

授業に際して私は生徒が放射線に対して理解と興味を持ってくれること，と同時にその学校の理科の先生が私に代わって今後，この実験を行ってくれることを強く希望し，先生方には実験マニュアルを渡し，「質問があればいつでもどうぞ！必要な実験機材はお貸します。」と話してきた。

しかしその後，教師が放射線実験を継続的に実施している学校を，私はほとんど知らない。

2. 文部科学省の放射線教育方針の揺らぎ

かつて文部科学省が管理し，全国の教育現場の要請に

応じて貸し出していた放射線測定装置・愛称「はかるくん」や実験キットはどこに行ってしまったのだろうか。

平成元年に送料を含めて無料の貸し出し事業が始まり，価格が10万円を超える「はかるくん」をおよそ8,500台余り所持し，また実験キットは，材質の違いや厚さ，距離の違いによる放射線の強さの変化を手軽に測定できる装置であった。

しかし文部科学省は平成25年度でこの事業を終了し，これらの機材をすべて，各地方の教育委員会の管理に委ねてしまった。測定器の貸し出しや返却，測定値の校正など，降って湧いたようなこれらの煩雑な仕事に専門の管理者を置く余裕もなく，教育委員会は面食らったことであろう。

以来，私は「はかるくん」や「実験キット」にお目にかかったことはない。当時，ようやく教育現場に定着し始めていた放射線測定実験はこれによって途絶えてしまった。

II. 霧箱を利用した教育

中学生・高校生以上を対象とした放射線実験で私はほとんどの場合，以下の内容を主として90分の授業を行っている。

- ①班ごとに直径約18cmのガラス製の簡易霧箱を約1kgのドライアイス粉末で冷却し，容器内のスポンジに無水エタノールをしみ込ませ，板ガラスまたは料理用ラップで蓋をし，ティッシュペーパーで擦って静電気を起こした塩ビパイプで容器内の残留イオンを除去し，容器の周囲から4本のLED懐中電灯で内部を照らし，自然放射線の飛跡を観察する。
- ②学校内に1時間ほど前から作動をさせておいたダストサンプラーのサンプリング濾紙を，班の数に切り分けて配布し，ガラス霧箱の中に挿入し，濾紙が補足した空気中の放射性物質から放射される α 線および β 線の飛跡を観察する。



図1 簡易ガラス霧箱(著者撮影写真)

- ③ラドン 220 のガスを霧箱に注入し、 α 線の飛跡がV形に見えることから、ラドン 220 \rightarrow ポロニウム 216 \rightarrow 鉛 212 と α 壊変する際の半減期の短さを理解する。
- ④デンタルフィルムの上に鍵など金属製の小物を置き、その上にマントル(キャンプ用品のランタンに使う小さなネット・酸化トリウムがわずかに塗られており、 α 線・ β 線・ γ 線を出す)を置き、2週間ほど経過したフィルムを現像し、鍵が映っていることから放射線の透過性と感光作用を知る。
- 生徒実験は以上とし、次は教師によるデモ実験として高性能簡易型霧箱の観察面をビデオで撮影し、教室前面のスクリーンに投影する。
- ⑤ α ・ β ・ γ 線の密封線源を使い、霧箱のガラス蓋を透過するか否かを観察し、各線源の透過性の違いを見る。
- ⑥霧箱のガラス蓋に燐灰ウラン鉱を置き、そこから出る γ 線によって霧箱内にコンプトン散乱が起きることを、2次の電子線の発生によって確認する。また霧箱内にラジウム線源を入れ、線源から花火のように α 線が飛び出す様子を見る
- ⑦真空度の低いガイスラー管を霧箱の蓋の上にセット



図2 霧箱の上に置いた真空管(左上)

図3 霧箱の上に置いたX線管球(右下)
(著者撮影写真)



図4 X線管球からのX線で感光したフィルム
(著者撮影写真)

し、管の両極に約4万Vの電圧を掛けると霧箱内には何の変化も起こらないが、さらに真空度の高いクルックス管に置き換えて電圧を掛けると霧箱内に無数の2次の電子線が発生し、霧箱内に雪が降ったように白く見える。

これはレントゲンが、レナート(1905年ノーベル物理学賞受賞者)から借りたクルックス管によってX線を発見したことを確認する実験でもある。

- ⑧クルックス管をX線管に替えてコンプトン散乱を観察し、さらにX線管の真下にデンタルフィルムを置き、フィルム上に金属製のカギなどを載せてX線を発生させ、その場で現像し、X線により感光したことを確認する。
- ⑨ドライアイスの供給が困難な地域の学校には、観察面が大型霧箱より小さくなるが、100V電源さえあれば作動するペルチェ素子冷却による霧箱を使用する。電源を入れてからの立ち上がりも3分間と短く、自然放射線の飛跡の確認はもとより、大型霧箱で行う実験



図5 ペルチェ素子冷却型霧箱(著者撮影写真)



図6 科学館に設置された常設型霧箱(著者撮影写真)

の多くも可能である。また軽量(2.5 kg)なので持ち運びが簡単である。

- ⑩大人に対しては、科学技術館や県庁、市役所、駅の待合室などに、冷凍機を使って冷却する常設型の大型霧箱を設置し、常に自然放射線の飛跡が目に見えるよう

にする。

Ⅲ. これからの放射線教育

このように、霧箱の使用によって今まで見ることでできなかった放射線の世界が、理論だけではなく、「美しい」とすら思えるような振る舞いとして観察できることは、放射線の基礎を学ぶ者にとって興味を抱かせ、大いに理解を助ける装置である。

人類が持続的な発展を続けるためのエネルギーの安定供給の方法や放射線の利用、さらには環境保全を考える上で、霧箱をどのように活用していけばよいかを今後も考え続けたいと思う。諸賢のご指導を俟つ次第である。

(2019年7月27日記)

著者紹介



戸田一郎 (とだ・いちろう)

有限会社 ラド, 元・富山第一高等学校
(専門分野)物理教育

新刊紹介

放射線の生体影響と物理 —原発事故後の周辺住環境 問題を考える—

西嶋茂宏著, 288p. (2019.3)
大阪大学出版会(定価 2,700円 + 税)
ISBN 978-4-87259-683-0

東日本大震災、福島第一原子力発電所事故(以下、福島事故と書く)から8年以上が経過したが、今もなお汚染水の問題、廃炉に向けての様々な検討は原子力分野では最重要な課題に位置づけられる。一方、周辺住民の健康影響のほか、心のケアその他、社会的な影響は大きく、原子力のプラント、サイト内の問題だけではなく、周辺住民、一般公衆の防災についてもより一層深く考えねばならない。

本書の著者である西嶋氏は、元々は放射線物理学が専門であると認識しているが、西嶋氏が取り組んできた「超電導磁石の技術を駆使した環境浄化」の分野での知見を活かし、福島事故後は、福島での環境浄化、環境修復に取り組んできた。そういった経験と思いがあり、従来からある放射線物理学や放射線生物学のオーソドックスなテキスト、書物とは視点がいずれも異なり、特徴的なテキストに仕上がっている。

まず、「事故後の周辺住環境問題」に焦点を当て、食品による内部被ばくや20mSv/年とされた帰還基準の意味、除染作業、汚染土の問題汚染水などの具体的な問題提起から各章の

記述が始まるのが、何よりの特徴である。具体的な問題、事例に関心を持ちつつ学習する事はこれからの若い人たちにとっては益々重要性を増すと思うが、学部レベルの学生や高校生、中学、高校の先生方にもよい教科書として利用が広まる事と思う。また、例題や練習問題、章末問題も充実しており、巻末にはそれらの解答例も掲載されており、親切である。



「発刊にあたって」でも述べられている通り、15章で構成されていることから、西嶋氏の大阪大学での講義がベースになっているが、「量子線物理学」(一般的には放射線物理学のこと)の学部講義で、最初の6章分(6コマ分)が被ばく影響であったり汚染の事であったり、従来であればどちらかと言えば放射線生物学や放射線防護学(あるいは保健物理学)で教授されてきた内容が占めており、放射線物理学以外のウェイトが高いのが特徴であるとともに、各章を単独で、独立した内容の読み物として学習に利用できる。

これから放射線の事を学ぶ学生だけではなく、放射線分野以外の原子力プラント技術者にも手にとって頂きたい新刊である。

(福井大学附属国際原子力工学研究所・泉 佳伸)

原子力をいかに物語として語るか

PIME2019 –他産業の経験に学ぶ

日本原子力産業協会 和田 裕子

世界では、スリーマイルアイランド原子力発電所、チェルノブイリ原子力発電所、福島第一原子力発電所の事故を経て、原子力に対するイメージは揺れ動いてきた。福島第一事故から8年以上たった現在も、日本のみならず、一般市民の原子力に対する認識が否定的な国は多い。それは原子力が自分たちの生活にどう役立っているのか「物語」がないからではないか。原子力を他の産業と結びつけて将来の社会や生活にどう役立つか「物語」を紡ぐ必要がある。

I. PIME2019の概要

2019年6月、パリで開催されたPIME2019¹⁾に参加した。PIMEは、欧州の広報担当者が集まる会議で、欧州原子力学会のメンバーが毎年持ち回りで開催している。今回のPIMEはフランス原子力学会(SFEN)が主催したもので、「原子力をいかに物語として語るか」を課題として、他の産業の経験を聴くとともに、新しいベストプラクティスの試みについての紹介がなされた。また、約80名の参加者が少人数のグループに分かれ、選択したテーマについてそれぞれが一つのストーリーを作るという参加型の会議であった。

本稿では、原子力業界に教訓となると思われる他産業の経験と、新しいベストプラクティスの試みを紹介する。

II. 他産業の経験と原子力業界への教訓

1. NASA

1960年代の米国は、ケネディ大統領の「われわれは月に行くことを決めた」という演説に始まり、アポロ11号の月面着陸の成功、有人月飛行を可能にしたサターンVロケット開発など、宇宙開発は希望に溢れていた時代であった。しかし、1970年のアポロ13号のミッションが飛行中の事故により中止となったことを契機として、NASAに対する予算は大幅に削減されることとなる。さらに1986年のチャレンジャー号爆発事故、2003年のコロンビア号空中分解事故と失敗は続き、米国内でミッションの実現性や費用効率に対する懐疑的な見方が増えた結果、NASAは批判的となった。

こうした状況に対しNASAは、以下の4つの戦略を打ち立てている。①「Reach New Heights」：2033年までに火星に宇宙飛行士を着陸させる。②「Benefit All Mankind」：NASAが有する技術を、気候変動の影響の可視化、ロボットによる脳手術の実現、ワイン産業など



への応用、により人類全体の為に役立てる。③「Reveal the Unknown」：ソーシャルネットワークによる視覚体験やケネディスペースセンターでの没入型多感覚応用体験を提供するとともに、ハリウッドとのコラボレーションによる映画「The Martian(オデッセイ)」を制作する。④「With You When We Fly」：宇宙滞在が人体に与える影響の調査のため、宇宙飛行士スコット・ケリーが宇宙で1年を過ごす。これは大きな話題となった。

こうしたNASAの事例を踏まえ、世界原子力協会(WNA)のヘス氏は、原子力業界への教訓として、① Nuclear moonshot(人の心を動かすビジョンと野心的な目標を示す)、② Change the message(「一般の」人々に届くメッセージを考える)、③ More than energy(副産物や異なる分野での応用を最大限に活用する)、④ Get units “online”(ソーシャルメディアへの露出やマルチメディア作品を制作する)、⑤ Work with creative(映画やテレビ産業に働きかける)、⑥ Empowering ambassadors(原子力支持の活動家を支援する)、⑦ Communication first?(パブリックコミュニケーションが中心ではなく成功を称えるべき)を掲げ、聴衆にメッセージを送った。

2. IBM

IBMは、1960年代から70年代にかけて、国際的なコンピュータ企業として黄金時代を築いていた。しかし、

80年代になると、アップル、デル、マイクロソフトといった新興企業が参入、規模を拡大し、IBMのリーダーシップが脅威に晒される。90年代になると、ハードウェアをベースとしたビジネスモデルが崩壊寸前となり、IBMは93年に80億ドルの損失を出すに至った。

そこで93年、IBMは、社内カルチャーの転換による改革を断行するとのミッションを背負い、ルイス・ガースナー氏をCEOに抜擢した。同氏はソリューション型の企業へのシフトを目指し、94年に「Solutions for a small planet」キャンペーンを立ち上げたほか、96年には「e-business」のコンセプトを作った。こうした改革により、IBMは世界の最も象徴的な企業へと返り咲き、収益は1990年の250億ドルから2003年に800億ドルへ拡大した。さらに、その後は人工知能(AI)の開発に取り組み、97年チェスの試合で世界チャンピオンを倒した「IBM Deep Blue computer」、2011年テレビのクイズ番組でチャンピオンになり100万ドルを稼いだ「IBM Watson」などといったAIの開発に成功している。

もっとも、映画「2001年宇宙の旅」、「マトリックス」、「アイ、ロボット」に見られるように、AIに対する不安や懸念が次第に世間で取り沙汰されるようになると、IBMは人間と機械の相互関係の促進をアピールする方針を打ち出す。例えば、「Watson at Work」と題するショートビデオを作成し、医療、スポーツ、教育などでWatsonが活用されている様子を紹介したり、「NAO」というワトソンを人の形にしたロボットを作製した。また、「ワトソンが環境問題を解決する」として、AIが地球の大気汚染や水質問題等に貢献することをアピールしている。

これらの経験を基に、米原子力エネルギー協会(NEI)のヴェンゼル氏から、「物語をコントロールせよ。それは製品ではない。ソリューションである。現実の問題に結びつけよ」というメッセージが聴衆に送られた。原子力業界も、今後は技術の人々が心配していること、懸念していることにより強く結び付けるべきだとの示唆を得た。

3. オリンピック

古代オリンピックの夢を日常に取り戻すことをビジョンとして近代オリンピックが創設され、1896年にアテネで第1回が開催された。しかし、その後はオリンピックのイメージを損なう事件や不祥事が相次いだ。例えば、1996年のアトランタオリンピックでは、コカ・コーラ社の大規模なPRに「大金」がすぎ込まれているとの批判が高まったほか、2016年のリオデジャネイロオリンピックは予算を大幅に超過し、大会後は120億ドルの使われぬ施設が放置されるといった事態が生じた。また、2017年にはブラジル・オリンピック委員会のスズマン会長が投票関係者買収の贈賄容疑で逮捕されたことも記憶に新しい。さらに遡れば、1960年のローマオリンピックでは

自転車競技のイェンセン選手がドーピングで死亡するなど、その後のソウルやリオオリンピックでもドーピングが後を絶たない。こうしたこともあって、オリンピックの存在そのものが脅威にさらされ、どこもホストをしたがらない状況が続いた。

そこで、批判を克服するために国際オリンピック委員会は以下の4つの対応策をとった。①「シンボルを通して意味を創造する」：2000年のシドニーオリンピックではグレートバリアリーフをシンボルとして環境を、2002年のソルトレイクオリンピックはユニオン・パシフィック鉄道の機関車をシンボルに、米国の開拓者精神をアピール。②「オリンピックを通じてホストシティを拡大する」：2008年の北京オリンピックによる都市の近代化、1992年のバルセロナオリンピックによるツーリストシティとしての発展。③「選手をオリンピックの長年にわたるアンバサダーに」：白人至上主義のヒトラー時代のベルリンオリンピックで4冠を達成した黒人のオーウェンス選手やルーマニア革命で亡命したコマネチ選手など。④「共通の価値観を共有する仲間のネットワークを構築する」：スポーツを通じて「持続可能な開発目標(SDGs)」を達成しようというビル・ゲイツ氏は、2020年東京オリンピックのパートナーシップをスポーツ庁と提携。P&Gはロンドンオリンピックをテーマに「母の愛」というCMを制作し、世界中の感動を呼んだ。

原子力業界にも、1950年代のアトミック・ドリーム時代には、男女平等のシンボルであるマリー・キュリーや天才のシンボルであるアインシュタインというアイコンがいた。現在の原子力には、新しいアイコン、ヒーロー、ストーリーが必要であるとコンサルタントのゴードン氏より教訓が示され、深く頷いた。

III. 新しいベストプラクティスの試み

新しいベストプラクティスとして、米国や欧州での最近の試みが紹介された。

米原子力エネルギー協会(NEI)では、ストーリーが人々を結びつけるという考えのもと、ハリウッドコミュニティに働きかけている。米CBSが制作したテレビドラマ「Madam Secretary」²⁾では、ヒラリー・クリントン国務長官を模した主人公が、大統領に地球温暖化に対する原子力のメリットを進言し、原子力政策の変更を訴える、というストーリーが放送されたことが紹介された。

またオランダでは、エンターテイナー兼ライターであるArjec Lubach氏が自身のコメディ番組³⁾の中で、ジョークを交えながら原子力に対する批判に反論し、気候変動対策のために原子力が必要だと訴え世論に影響を与えた例が紹介された。

米国の建築設計事務所Genslerは、シンクタンクThird wayと一緒にしているプロジェクト、「Nuclear Reimagined」⁴⁾を紹介した。これまで一般の人々は、原

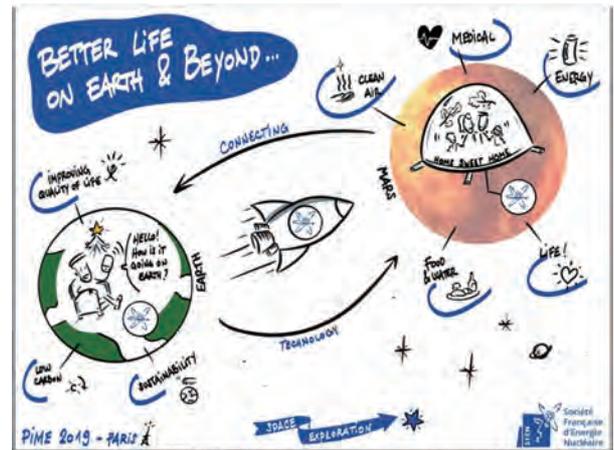
子力がどのように自分たちのコミュニティにフィットするか、というイメージをほとんど持つことはなかった。そこで6つのコミュニティシナリオを作成し、先進的な原子力のストーリーをビジュアルで語る、というプロジェクトを進めている。

日本では、映画やドラマ、コメディ番組などで同様の取り組みを行うと、かえって原子力業界が批判を浴びる恐れもあり、どのように日本に合う戦略として取り込んでいくかは熟慮が必要である。しかし、理論だけでなく映像やビジュアルを使って原子力のベネフィットをストーリーやイメージとして提示し、感情に訴えかけることが必要であると感じた。

IV. 所感

PIMEでは、他産業がイメージダウンやビジネスの失敗の経験から、どのような戦略を打ち出し克服して来たのか、置かれている状況は異なるものの、原子力業界にも大変参考になるキーワードが随所に散りばめられていたように感じる。「『普通の』人々に届くようにメッセージを変える」、「なぜ重要か日々の生活に役立つことを訴える」、「エネルギーの分野以上に役立つことを示す」、「製品をアピールするのではなく、人々が懸念・心配していることへの解決策として技術を結び付ける」、「理性ではなくエモーションに訴えることが大事」、「映画やテレビといったクリエイティブ産業とコラボレーションする」、「新しいアイコン、ヒーロー、ストーリーが必要」等、非常に考えさせられる教訓であった。

今回の会合の中では、参加者が少人数のグループに分かれ、「宇宙開発」、「スマートシティ」、「インダストリー4.0」の3つの中からそれぞれ選択したテーマについて、今回紹介された他産業の教訓や新しいベストプラクティスを参考にしながら一つのストーリーを作るというワークショップが行われた。原子力がわれわれの将来の生活において、他の産業と結びついてどのように役に立つのか。正解はないものの、各グループでアイデアを出し合ってストーリーを作り、そのストーリーをもとにプロのデザイナーが作成したイラストを提示しつつプレゼンするというのは新たな試みであった。ただ、分野にもよるが、他の産業と結びつけたときにそこになぜ原子力が必要なのか、一般の人々の腑に落ちるようなストーリーになるにはまだまだブラッシュアップが必要だとも感じた。



「宇宙開発」のストーリーのイラスト

各国とも、原子力が低炭素だと言うだけでは、一般市民の原子力への支持にはつながらないという行き詰まりを感じており、「原子力がどう自分たちの生活につながるのかを示していかなければ変えられないのではないか」との悩みを抱えていることがはっきりと窺えた。「原子力でなくてはならない」ということではないにしても、「原子力も必要だ」という納得感を持ってもらえるようになるためには、「原子力をいかに物語として語るか」、引き続き国内外で協力、連携して知恵を絞っていく必要があるだろう。

— 参考資料 —

- 1) PIME2019 ホームページ
https://www.sfen-pime2019.org/?utm_campaign=DEM_Oct18&utm_medium=email&utm_source=SFEN_Events
- 2) 米 CBS テレビドラマ「Madam Secretary」
<https://www.cbs.com/shows/madam-secretary/>
- 3) Arjec Lubach 氏「Sunday with Lubach」
<https://www.youtube.com/watch?v=YjFWiMJdotM>
- 4) 「Nuclear Reimagined」プロジェクト
<https://www.thirdway.org/blog/nuclear-reimagined>

著者紹介

和田裕子 (わだ・ゆうこ)

(一社)日本原子力産業協会

(専門分野/関心分野) エネルギーセキュリティと環境・社会情勢、コミュニケーションと社会意識

(2019年8月2日記)





～福島浜通りだより～(6)
しあわせと叫びたい

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

福島県双葉郡川内村で開かれる「天山祭り」に参加してきた。この天山祭りは蛙の詩人とも称される草野心平が、村の人々と作った天山文庫で毎年開かれているものだ。心平亡きあとも続き、詩の朗読を通して氏を偲び、また川内村なるものを集まった人達が思い馳せる。蒸し暑さの中、詩を通して川内村の情景に心預けると「今年も夏が来た」と感じる。

祭りの冒頭、歷程同人の大人達の指導を受けた子供たちから詩の朗読が披露された。それぞれが素晴らしい発表であった。その中の一つをご紹介します。

村の人に会うと あいさつをする『こんにちは!』
『こんにちは!』とてもあたたかな返事 いい気分
空にむかって しあわせ と 叫びたい!

しあわせと叫びたい!

しあわせと叫びたい!

子供たちの「しあわせと叫びたい!」が会場に響き渡った。少しの間を置き、大きな拍手に包まれた。

大人達による詩の朗読が続き、その後子供たちによる「三匹獅子」の舞が披露された。お囃子に合わせてすっぽりと獅子頭を被った子供たちが伝統の舞を踊り続ける。思わず見入る。普段は外を走り回り、元気よく「おはようございます!」と無邪気な姿を見せる子供たちが、脈々と受け継がれた「大切なもの」を見せてくれているのだ。

舞が終わり、子供たちが舞台袖に戻っていく。袖に入るまでのわずかな距離を凜とした顔で歩いている。村の婦人会のお母さんたちが総立ちになった。拍手で送っていた。私もつられて拍手を送る。みな笑顔だ、素晴らしいかと声をかける人もいる。しきたりのような拍手ではない、みな力がこもって賛美していた。

隣にいたおばあちゃんから声をかけられた。「あれがうちの孫なのよ」と、とても自慢げな顔だ。こちらも頬が緩んでしまい、なぜだか他人の孫だというのに誇らしくなくなってしまった。

この日、隣町の檜葉町の天神岬ではサマーフェスティバルが開催されていた。毎年アーティストを呼び、出店が立ち並び小さな夏フェスを感じさせるイベントだ。締めには大きな花火があがる。妻と連れ立って、一人の双葉郡民として遊びに行ってきた。

高校時代から付き合いのある友人に電話をかけた。彼



は今や親になっている。会場につくと 90 年代一世を風靡したアーティストが当時の流行り歌を歌っていた。

身体を揺らしながら、友人夫婦が楽しんでいる。子供たちは、子供たちどうし、どこか広い公園の中を走り回っているようだった。

芝生のひかれたシートにどかっと座り話し込む。暑さをかき消すようにビールを流しこむ。今日のお目当ては、自分達が高校生時代、20 代にハマったアーティスト、それに最後の花火だ。昔のサマーフェスティバルでは誰が出たとか、あの時はどう盛り上がったとか、あの頃は楽しかったねとお互いが昔に戻ったような気持ちで話をしている。

目当てのアーティストの歌が始まった。気持ちはあの頃の自分に戻っている。子供そっこのけでステージに向かった。合いの手を返し飛び跳ねる。周りを見ると同じような大人達が大勢いた。はしゃいでいる。声をあげ、アーティストに向かってめいめいが私を見てと手をふる。

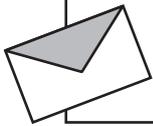
歌が終わり祭りも終盤。花火が始まるとアナウンスが流れた。子供たちがシートに戻ってきた。どれだけ走り回ってきたのだろうか、汗をびしょりかきながら「ジュースちょうだい!」と急かす、ぐっと飲み干し「じゃ、行ってくる!」とまたも走っていく。

火の粉が目の前に落ちるような距離で大きな花火があがった。これでもかとあがる。その都度、歓声があがる。

あの日から沢山の時間が流れた。この日、聴いたことばが心をめぐった。「しあわせと叫びたい」

(7月27日記)

理事会だより



福島環境再生を目指して

本会では、東京電力福島第一原子力発電所事故(福島事故)後、事故を真摯に反省し二度とこのような事故を起こさないために、発電所外の地域で、福島の住民と国や県の間立つインターフェースの役割をすることを目的に、理事会直結の組織として「福島特別プロジェクト」を創設した。住民にとって切実かつ喫緊の課題であった除染作業へのサポート、放射線の健康影響等に関する情報提供など住民の視点に立った活動を行ってきた。

除染作業へのサポートとして、チェルノブイリ事故後に欧州連合が取りまとめた除染技術に関するデータシートを調査・翻訳し、汚染地域の環境修復に適用可能な技術例を「除染技術カタログ」として作成し公表した。また、海外の知見が乏しい水田の除染については、JA そうま(現 JA ふくしま未来)や農地所有者の協力の下に、現地における除染技術実証試験を行っている。住民の関心が高い放射線の健康影響については、正しい知識を伝えるため、対話活動を中心に疑問や不安に答えてきた。さらに、事故炉の状況や環境修復などもシンポジウム等を通じて情報提供してきた。

これまで、その時々福島の状況、住民の関心に合わせた活動を行ってきたが、震災後8年が経過し、除染もほぼ終了し帰還困難区域を除いて避難指示が解除され、特定復興再生拠点区域を設定した除染などが進められていることから、さらに住民との密接な、対話を重視した小規模な活動が必要と考え、今年度は、浜通りにおいて対話型の交流イベントを実施することとした。

富岡町では、一昨年4月の避難指示解除後、復興・再生に向けたさまざまな取り組みがなされているが、町民の1割程度しか帰還しておらず、帰還が進まないという課題がある。福島特別プロジェクトでは、住民の不安や今後の町への期待などを聞き、町の復興・再生に向けた取り組みの一助となるよう、住民と富岡町や環境省が意見交換を行う場を設けた。

7月13日(土)に、富岡町の文化交流センター「学びの森」にて、交流イベント「富岡の環境再生を目指して」を開催した。富岡町に帰還された方やいわき市に避難されている富岡町民、近隣地域の方など20名ほどの参加となった。プログラムは、2部制とし、前半で富岡町と環境省、本会からそれぞれの取り組みについて説明し、後半は5~6名によるテーブルトークを行った。テーブルトークは、コーディネーターとして川内村と富岡町で放射線について相談対応をされている長崎大学の折田真

紀子さんが進め、「今の生活で困っていることや放射線対策に対する疑問」「これからの町づくりの課題や対策」をテーマに意見交換を行った。4テーブルを設置し、各テーブルのファシリテーターはプロジェクトメンバーが務めた。

参加者からの意見などは以下のとおり。

- ①今の生活で困っていることや放射線対策に対する疑問
- ・復興住宅での住民のネットワークが希薄
 - ・生活に必要な施設が十分でない(飲食店、医者等の不足)
 - ・娯楽施設がない
 - ・放射線・放射能に関する情報の入手が困難
 - ・放射線教育の必要性(県外の人にきちんと説明できるようにしたい)

- ②これからの町づくりの課題や対策

- ・地元産業の活性化が見えてこない
 - ・女性の職場が少ない
 - ・帰還困難区域にある自宅の今後に対する不安
 - ・帰還を促す施策が必要(若い人が戻るための富岡高校の復活)
 - ・震災前からの住民と震災後に入居した住民との融合
- 双方向の対話は、シンポジウムなどでは聞くことのできない話を聞くことができる。特に、町づくりに対する意見は、町民の帰還につながるものであり、自治体や国にとっても必要な情報となる。今後の取り組みに向け、住民の意見を引き出すことができる場が必要であると思う。本会としてこのような活動を継続するのはもちろんだが、いろいろな組織が幅広い試みをするのも重要と考える。一方、今回はコーディネーターの知名度と尽力により、20名程度の参加者を集めることができたが、避難先で定住を決めている住民が多い中、どのようにこの活動を続けていくかを再考する必要も感じた。

今回のイベントと直接関係はないが、6月に環境省主催の「みちのく潮風トレイル開通記念シンポジウム」に参加した。このトレイルは、青森県八戸市から福島県相馬市までの太平洋沿岸をつなぐロングトレイルで、東北の食や文化にふれながら、地域住民との交流により東北の復興につなげようというもの。現在トレイルの終点は福島県相馬市だが、「みちのくのトレイル」である、是非福島県の沿岸を通りいわき市を終点としてほしい。これも福島環境再生を目指す取り組みのひとつになるのではないだろうか。(理事 布目礼子)