

巻頭言

1 原子力とマスコミの現場

竹内 薫

時論

2 福島イノベーション・コースト構想が 目指すもの

小沢喜仁

4 2020 年に向けて検討すべき セキュリティ対策

サイバー対策として検討すべき事項はステガノグラフィと偽旗作戦、ドクシングである。

名和利男

解説

12 事故時の核分裂生成物挙動解明への 挑戦 「シビアアクシデント時の核分裂生成物 挙動」研究専門委員会の活動状況

核分裂生成物 (FP) を研究する研究者の数が減少しており、技術の空洞化が懸念される。今後の廃炉プロジェクトを考えるならば、FP の化学的挙動研究に対する新たな取り組みが必須である。

勝村庸介, 他

17 米国における原子炉監督プロセス (ROP) 開始と定着に学ぶ —日本の検査制度改革を成功させるために

米国では、規制当局による検査制度設計に対し産業界とパブリックの双方が関与することで原子力の安全性向上を論じる共通理解が深められた。そのことが検査制度に対する信頼と公衆の信頼獲得の土台となっている。

近藤寛子, 山口 彰

22 Column

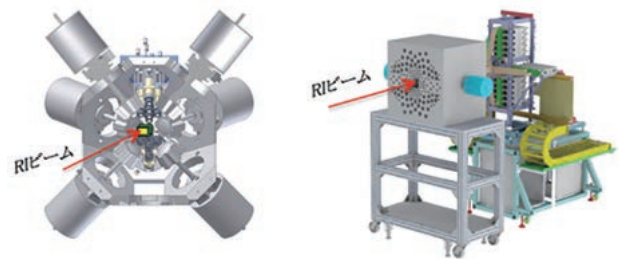
- 「プルトニウムをどうしよう?」 井内千穂
- 「[よーい・どん] と [オレンジフラッグ]」 北岡哲子
- 「モロッコのエネルギー事情」 妹尾優希
- 「原発の新設・建替えとエネルギー基本計画」 竹内純子
- 「表裏一体」 渡辺真由
- 「ケアと日本社会」 渡辺 凜

サイエンス

35 放射性核種の短寿命半減期測定 —エキゾチックな不安定核の崩壊と元素合成

放射性崩壊をする放射性核種 (RI) の数は、理論的に 7,000 種以上にものぼる。これらの生成を含む研究は、太陽系に存在する元素の起源を探る手掛かりともなる。それらの RI 崩壊に着目した核分光国際共同研究について紹介する。

西村俊二



RIBF の崩壊測定装置 EURICA (左) と BRIKEN (右)

40 超微量分析より見えた超新星爆発から の飛来物

海底より採取された試料より過去 1000 万年の間に 2 回の ^{60}Fe の流入が検出された。これは超新星爆発の中で生成したものが地球上に飛来したものだ。

木下哲一

解説シリーズ

25 ミクロ～マクロレベル現象の粒子ベース シミュレーション～課題と展望 第3回 最先端粉体シミュレーション技術

粉体の数値シミュレーションでは、離散要素法と呼ばれる粒子ベースの数値解析手法が広く使用されており、シビアアクシデントの現象把握や燃料デブリの取り出しなどに応用できる可能性がある。

酒井幹夫

30 WEO2017 と内外エネルギー情勢への 示唆 第3回 天然ガス・LNG 需給の長期展望

環境負荷が相対的に低い天然ガスや LNG は、温室効果ガス排出制約の中でも唯一、需要が長期的に増加する化石燃料となる。

小宮山涼一

部会トピックス

50 バックエンド分野における人材育成・知識継承にかかわる取り組み—技術分野間の交流・世代間の交流への試み

バックエンド部会は技術分野間の交流と世代間の交流を図ってきた。夏期セミナーと週末基礎講座での試みを紹介する。

小畑政道, 山岡 功

53 核融合原型炉開発の動向—アクションプランと核融合工学研究の進展

我が国の核融合開発の経緯, 今後の計画, 原型炉概念設計の現状を紹介する。現在は実験炉ITER(建設中)を軸として核融合連続燃焼の実現を目指しており, 今後は原型炉を建設し運用する段階を目指す。

岡野邦彦, 飛田健次



Short Report

58 首都圏の学生が見た原子力発電所の今! 文系学生が浜岡原子力発電所で見えたもの, 感じたこと

若杉和彦, 松永一郎, 三島理愛

会議報告

61 Physics of Reactors (PHYSOR2018) 報告

山中 正朗, 和田 怜志

62 原子力分野の若手・女性が一同に会する

堀尾健太, 小林容子

理事会だより

65 ゴッホと未熟な葡萄, 熟れた葡萄と干し葡萄

千葉 敏

6 NEWS

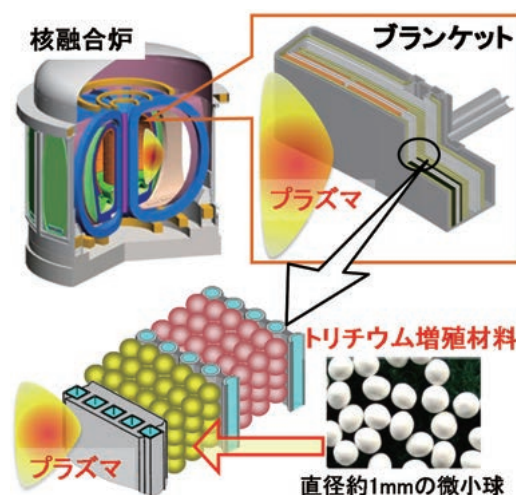
- 秋の大会で福島復興などを議論
- 原子力委がPu利用の基本的考え方
- NDF, 廃炉国際フォーラムを開催
- 海外ニュース

連載講座 核融合トリチウム研究最前線—原型炉実現に向けて (第4回)

45 固体増殖材開発の最前線

日本と欧州で核融合原型炉の早期実現を目指す幅広いアプローチ(BA)活動の一貫として行っている, 先進トリチウム増殖材開発の最新の研究成果を報告する。

星野 毅



微小球として核融合炉ブランケットに装荷するトリチウム増殖材

科学コミュニケーション 第4回

63 共感・共有の手法

岸田一隆

- 34 From Editors
- 64 新刊紹介「湿式プロセス」 塚田毅志
- お知らせ 原子力学会誌, 学会誌「ATOMOS Σ」J-STAGE 電子アーカイブ化に伴う過去記事の登載・無料公開について
- 66 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 主催・共催行事, 英文論文誌 (Vol.50, No.10) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧
- 68 日米欧原子力国際学生交流事業派遣学生レポート「カリフォルニア大学ロサンゼルス校滞任記」 浅野 翔

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

原子力とマスコミの現場

巻頭言



サイエンス作家

竹内 薫 (たけうち・かおる)

1960年東京生まれ。東京大学で科学史と物理学を学ぶ。マギル大学大学院修了(高エネルギー物理学専攻)。Ph.D.

四半世紀にわたってマスコミで科学技術を伝える仕事をしてきた。長年、新聞雑誌やテレビ・ラジオの報道・情報番組、科学番組を担当してきた経験から、感じていることを書いてみたい。

マスコミが情報を伝える際の「現場」を見回してみると、ほとんど科学が専門の人がいないことに気づかされる。大学の理系学部を出ている人は、NHK、新聞社、出版社にはいるが、民放のテレビ・ラジオの制作担当者では、ほぼゼロパーセントだ。そもそも科学部すら存在しない所も多い。朝や夜のニュース報道の現場では、事実上、科学の専門知識をほとんど持たない人々が、科学技術の情報を好き勝手に「加工」して国民に提供している。それは、エネルギー関連の報道も例外ではない。

地球温暖化について、「北極の氷が溶けても海面が上昇しない」ことすら理解してもらえないし、「化石燃料という言葉は、意味不明だから使わないように」などと言われ続け、こりゃあ自分一人がマスコミの最前線で頑張っても、報道の偏りは改善されないなど、やがて匙を投げた。

人間は、自分が知らない事柄に対して、「怖い」と感じることが多い。原子力についても、そもそもの仕組みが理解できていないのだから、たしかに不安で怖いのであろう。その結果、マスコミが加工する情報のほとんどは、「原子力＝悪」、「自然エネルギー＝善」という短絡的な構図に落ち着くこととなる。

私は特定のエネルギー源を推進する立場は取っていないが、「どうして今すぐ原子力発電をやめて太陽光と風力発電にしないのか。なんらかの陰謀があるのではないかと、頻繁にマスコミの現場から問いかけられ、少々、面倒くさくなってきた。

基本知識の欠如は、漠然とした不安感、恐怖心、嫌悪感、そして陰謀論へとつながる。

単位発電量あたりの死者数にしても、水力発電が群を抜いているわけだが、「原子力の方が人が死ぬはずだ」と、統計数字すら陰謀にされてしまう。また、木々を根こそぎ伐って、太陽光パネルを敷き詰めた場所で起きた土砂災害も、そもそも「太陽光パネル＝善」というイメージと矛盾するためほとんど報道されない。

いったいどうしたら、このような報道の偏りをなくすことができるのか。おそらく、報道現場で働いている100名につき、最低5名くらいは、科学技術を理解している人材が必要だろう。また、チーフプロデューサーの下デスクくらいの地位にも、最低一人は、科学技術畑の人がいないと、お話にならない。十年くらいの時間をかけ、ゆっくりとマスコミの現場に「科学技術がわかる人々」を増やしていくしかない。原子力に対する、根拠のないデマや恐怖心をなくすには、マスコミの現場の人間が入れ替わるしかない。それが、四半世紀、科学技術を伝える仕事をしてきた私が至った結論である。その具体策であるが……そろそろ、私より若い科学の伝達者におまかせしようかと思うのである――。

(2018年8月6日記)



福島イノベーション・コースト構想が目指すもの



小沢 喜仁 (おざわ・よしひと)

福島大学 共生システム理工学類・教授
 専門は機械工学, とくに材料力学, 破壊力学,
 複合材料工学。大震災直後より, 復興・地方
 創生の促進, イノベーション・コースト構
 想の研究・検討, 科学理解活動などに貢献した。
 現在(一財)福島イノベーション・コースト構
 想推進機構理事も務める。

東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所の事故から7年3ヶ月が経過したが、福島県、とくに原子力発電所が立地する浜通り地域の復興と創生の様子は、宮城県や岩手県など他の地域と大きく異なる。本稿では、ふくしまの今の様子と、福島イノベーション・コースト構想が目指す地方創生の姿などについて紹介する。

福島復興再生特別措置法の一部を改正する法律案が平成29年5月に制定された。これにより、帰還困難区域内の復興・再生に向けた環境整備、被災事業者の生業の復興・再生を担う組織「官民合同チーム」の体制強化、「福島・国際研究産業都市(イノベーション・コースト)構想」推進の法定化による浜通り地域の新たな産業基盤の構築、福島県産農林水産物等の風評払拭などに必要な措置を講ずるとしている。立ち入りが制限されている地域内における住民の帰還や生活を取り戻すこと、福島から避難した子どもへのいじめについて国が防止策を講じることなども明記されている。復興から、地方創生へと大きくステージを移すこととなり、新しいモノづくり、コトづくりへの取り組みが進もうとしている。

ふくしまの復興の複雑さは、歴史的、社会的な課題に加えて、首都圏以外の地方都市が負う課題が背景としてあり、それに千年に一度という未曾有の大災害、そして人類が経験したことのない原子力発電所事故という複合的な災害の影響により、これらが大きく加速され「課題先進地」化していることにある。

それら背景や特徴を整理すると、次の項目が挙げられる。①人口減少・高齢社会が先行する地域を襲った大災害であること、②地域の基幹産業である第1次産業に大きな打撃を与えた事故であること、③グローバル化や金融経済へシフトする中で地方都市が衰退する傾向にあること、④基礎自治体のマンパワー不足が指摘される中、復興から創生への取り組みが求められる主体としての基礎自治体における政策能力形成や合意形成の重要性が顕在化していること、⑤原発災害と放射線汚染による災害と避難において広域性・長期性・複合性があることである。

8年目を迎えている今、避難指示区域等は県全体面積

の2.7%へと縮小し、避難からの帰還が徐々にその数を増してきている。さらに廃炉技術開発をはじめとする取り組みに新たな担い手として多くの就業者を迎える状況となり、交流人口も増加する傾向にある。例としてあげれば、第一原子力発電所の構内は作業環境が大きく改善し一般作業服での業務が可能となり、一日あたり4,500名の方が働く状況である。大型商業施設も開業・計画されるなど、住居・生活環境は整備されつつあるが十分とは言えず、いわき方面からの通勤渋滞も生じている。新たな産業創出を目指して、交流人口の増加からふくしまへの住民の定着が大きく期待されている。

このようななか、「コミュニティ・イン・コミュニティの課題」が顕在しつつある。住民の緊急避難時には、避難者が所属していた基礎としての社会との連接が存在する中で、受入側としての避難先の社会の中で新たな社会が形成できるかという課題があった。これが第1ステージである。このような状況と避難生活の長期化が新たな悩ましい問題を生じさせたことは、読者の皆さまもすでにご存じの通りと思う。このような状況において、災害の被害者である被災者らに接する場合には、彼らの心理にいていねいに寄り添いながら、被災者が新たな地域における生活を可能にするとともに、個として自らの力で自立することへのサポートを行うことが不可欠となっている。

福島県の人口は平成30年5月の段階で、186万7千人(男924千人、女943千人、748千世帯)である。県内での避難者数11,613人、県外への避難者数は33,791人、不明を合わせると45,417人が避難をしている状況である。帰還した住民を中心に、交流人口としての新たな居住者の協働により“地域社会の再生”を進める必要がある、これが「コミュニティ・イン・コミュニティの課題」の第2ステージである。ふくしまにおいては、現在182万人が住み、実際に生活をし、さらにダメージを受けた地域への支援や協力を行っている状況である。ただ単に、「元に戻す」というのではなく、住民らの新たな協働と連携による“地域社会構築の最前線”となっており、新たなアイデアをもとに先駆的な実験を行ってよりスマートな

社会の構築が期待されている。

改正された特別措置法に盛り込まれた「福島イノベーション・コースト構想」は、原発事故の被害を受けた双葉8町村及び周辺地域の15市町村を対象とする浜通り地域等の産業や雇用を回復するため、地域の新たな産業基盤の構築を目指すものである。廃炉を進めながら、ロボット開発・実証拠点や国際産学連携拠点を整備して、ロボットやエネルギー、農林水産等の分野におけるプロジェクトの具体化を進めるとともに、産業集積、人材育成や研究者の定着、住民帰還の促進と交流人口の拡大等に取り組んでいくものである。

東京電力福島第一原子力発電所廃炉への道は決して簡単なものではない、現時点でも廃炉には40年の期間が必要になると想定されている。廃炉手法に係わる技術開発においては、今回の廃炉技術開発は事故を起こした原子炉の取束をはかるものであることから、いわゆる原子炉産業のバックエンドに相当する技術開発ではなく、周辺分野の産業や科学の大きな発展ができる応用問題として、世界の英知を集めた共同作業が不可欠である。

東京電力の廃炉への取り組みには、その技術研究開発を担う、日本原子力研究開発機構 JAEA、国際廃炉研究開発機構 IRID 及び原子力損害賠償・廃炉等支援機構 NDF 等の研究機関、高等教育機関、関連企業群等との協働関係構築による取り組みが必要である。さらにイノベーションを起こすために国内外のベンチャー企業との関与や地域の中小企業の自己改革的な挑戦が求められる。

構想は2つの取り組みフェーズを持っている。一つは政府主導の取り組みであり、

- ・福島第一原子力発電所廃炉基盤技術開発の取組み
- ・産業と学術機関の国際的産学連携ハブ構築
- ・ロボット研究技術共同実証拠点の創設
- ・アーカイブ機能の創設
- ・スマートエコパークの設置

もう一つは、県が自治体として主導する取り組みとして、

- ・再生可能エネルギー開発・導入の推進
- ・農業の再生と高度化に関する研究
- ・県における重要産業の創出

(たとえば、医療福祉関連機器製造産業など)

両者が適切に役割分担を行いながら、効果的に最大限の成果が得られるように有機的連携が期待されている。すでに、浜通り周辺地域には、9カ所の研究センターや実証施設が整備され、国や県の事業経費や、企業の主体的な取り組みとして多くの研究プロジェクトが実施され、成果報告会も開催されてきている。

震災後におけるイノベーション創出の契機とすべく、科学技術振興機構 JST、産業技術総合研究所 AIST

や新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO による支援活動により大きな仕掛けづくりや寄与がなされている。廃炉技術開発などにおける基礎研究や基盤技術開発研究へのニーズが十分に届いていないことから、これに呼応し新たな挑戦に参加する企業数は必ずしも多いとはいえないのが現状である。

一方で、JST 復興促進センターの設置と復興促進プログラム(マッチング促進)等におけるマッチングプランナーの活躍により、中小企業等が持つ基盤的な強みをもとにしたビジネスプロジェクトには多くの成功事例がある。新たな付加価値創出を目指した共同研究の実施によるビジネス創出と研究を連携させる取組みが不可欠であることが指摘された。さらに、被災地における産業の高度化においては、廃炉技術開発関連のニーズをもとにした「ニーズ・オリエンテッドな協働」により、地域に所在する中小企業が受注生産型産業モデルから開発型企業へのシフト、及びこれらの取り組みによる「人材育成・創出」が求められることも明らかとなっている。

構想推進の中核となる法人として「福島イノベーション・コースト構想推進機構」が福島県によって平成29年7月25日に設立され、本年4月には機構事務組織が本格的に活動を開始した。上記のような多様で複雑な課題を解決しながら、構想が目指す姿の先は、福島県浜通り地域のみを対象とする新たな産業の創出を意味するのではなく、開発内容の新規性と課題解決のための高度な連携、そして創出される特徴ある成果は、そのボリューム感とともに我が国の中で「平成の殖産興業」とも呼べる大きな影響力と発信力をもつものとなる。企業連携を促進するため浜通り地域における産業情報をオープン化しながら、市場ニーズを適切に捉えるニーズ・オリエンテッドな発想で、挑戦的な技術開発とともに自己変革を促進していく企業の参集が求められている。我が国にとどまらず、外国からも、研究機関、高等教育機関、開発ベンチャー企業や異業種企業、さらには金融・報道機関等を含めた有機的連携とその推進こそが、構想実現の原動力になると考えている。

(2018年06月15日記)

－ 参考資料 －

- 1) 福島県 福島・国際研究産業都市(イノベーション・コースト)構想, <http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/list275-1006.html>
- 2) 経済産業省 福島・国際研究産業都市構想について, <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/kinkyu.html>
- 3) ふくしま復興ステーション, <http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/>



2020 年に向けて検討すべきセキュリティ対策



名和 利男 (なわ・としお)

サイバーディフェンス研究所 専務理事
防衛省・自衛隊において通信及びプログラム業務に従事した後、JPCERT コーディネーションセンターの早期警戒業務を経て、サイバーディフェンス研究所でサイバー演習、サイバーインテリジェンスに従事。現在、捜査機関等のアドバイザーを兼務。

I. はじめに

平成 30 年 3 月 23 日に開催された第 196 回国会外務委員会第 4 号において、末松義規議員による原子力発電所におけるサイバーセキュリティ対策に関する質問に対して、原子力規制庁長官官房の片山啓核物質・放射線総括審議官が、次のような答弁をしている。

「原子力発電所についてのサイバーテロ対策は、原子炉等規制法に基づきまして、IAEA の最新の基準を取り入れた規則に基づいて実施をしているところでございます。具体的には、発電用原子炉施設及び特定核燃料物質の防護のために必要な設備又は装置の操作に係る情報システム、これが、電気通信回線を通じて妨害破壊行為を受けることがないように、外部からのアクセスを遮断することを求めています。」

これに続く答弁でも触れられているが、同年 3 月 20 日に開催された第 74 回原子力規制委員会において「原子力施設情報システムセキュリティ対策ガイドライン」の策定と今後の対応の説明がある。特に、この策定意図は、「事業者自身がセキュリティ対策を継続的に改善していくことを促す」ことであると強調されている。

筆者は、このような重要施設におけるサイバーセキュリティの取り組みが推進されていくことは、昨今の増大かつ巧妙化するサイバー攻撃の脅威を鑑みる限り、必要不可欠かつ非常に重要なものであると認識している。そこで、今後、事業者自身がサイバーセキュリティ対策を継続的に改善していく中で、日本全体が世界のショーケースとなる 2019 年の G20 とラグビーワールドカップ及び 2020 年の東京オリンピックにおいて、発生が懸念されるサイバー攻撃の対策の一助にさせていただくべく、次の 3 つの要検討事項を紹介する。

II. ステガノグラフィ (Steganography)

2017 年 12 月から 2018 年 1 月まで、平昌冬季オリンピックの準備の一環として実施された対物理テロ対策訓練中、インフラ提供や支援業務を行うオリンピック関連の組織に対して、韓国の国家対テロセンターを詐称したメールアドレスで、不正な Microsoft Word 文書を添付した電子メールが送りつけられた。PC ユーザーがこの文

書を開いてしまうと、文書内に隠されていた不正スクリプトが動作し、外部サーバにある「画像」を読み込んで、Windows OS の正規プログラムを悪用した不正挙動を行う仕組みとなっていた。また、このメールは通常のもので異なるものであったが、テロ対策訓練という特殊なイベントに関連したものであったため、多くの PC ユーザーが開いてしまった可能性があると見られている。

この攻撃で利用されたのが「ステガノグラフィ」である。データ隠蔽技術の一種であり、単にメッセージを読み取るのでなく、メッセージの存在自体を隠す技術である。このため、単に外部通信先の IP アドレスだけでは、外部の専門家が調査及び分析することが困難となる可能性があるため、実際に送りつけられた不正文書を共有する必要がある。また、2017 年 11 月、Invoke-PSImage というステガノグラフィツールがオープンソースとして広く公開されたが、攻撃者はこのツールを利用して「画像」に不正スクリプトを埋め込んでいたことが明らかになっている。

このような発生状況から得られる教訓は、次のとおり。

- (1) オープンソースツールで実現可能であるため、攻撃手口として利用しやすい。すでに、2018 年春から、ステガノグラフィ技術により、不正スクリプトが埋め込まれた「画像」を利用したサイバー攻撃が増加傾向にある。
- (2) 「画像」の共有が急増するイベントにおいて、監視強化として、すべての画像に埋め込まれたスクリプトを確認することは不可能である。2020 東京オリンピックにおいては、スマホから Instagram 等の SNS に大量に画像投稿する応援者や観光客が急増するとともに、それを閲覧するネットユーザーやオリンピック関係者が広範・多岐にわたる。被害拡大防止のために不正通信を遮断するのが一般的であるが、「画像」が投稿された SNS のサイトは正規サイトであるため、遮断することは容易ではない。
- (3) デイファクトスタンダードとなっているセキュリティソリューションで検知できない場合がある。一般的なウイルス対策ソフトは、ディスク上にある不正なファイ

ルを検知及び駆除するものである。Invoke-PSImage は、Windows 7 から 10 まで標準で搭載されている PowerShell と呼ばれるスクリプト実行環境で動作するスクリプトを「画像」に埋め込むものである。そして、このスクリプトはメモリ上で直接実行する。そのため、ディスク上にある不正なファイルを検知及び駆除する仕組みになっているウィルス対策ソフトでは、検知することが出来ない場合がある。

(4)PC 内に、不正スクリプトが埋め込まれた「画像」が残らない場合がある。Invoke-PSImage は「画像」をディスク上にダウンロードして処理するのではなく、外部サーバ上の「画像」を閲覧した状態で不正スクリプトを抽出することができる。そのため、インシデント発覚後の PC 調査における、攻撃経路の特定のために行う不正スクリプトが出現するメカニズムの解明が困難になり、被害の拡大を許してしまう可能性がある。

Ⅲ. 「偽旗作戦(False Flag)」

2018 年 2 月 9 日、平昌冬季オリンピック開会式においてサイバー攻撃が発生し、インターネットサービス、放送システム、オリンピックの Web サイトの一部で混乱が生じた。この影響により、チケットを印刷することができなくなった出席予定者が発生したため、開会式の会場の一部が空席となる事態となった。即座に行われた分析の結果では、北朝鮮による仕業であるとされたが、その後の再分析によりロシアである可能性が高いと修正された。

このような行為は「偽旗作戦」といい、あたかも他の主体によって実施されているように見せかける秘密作戦のことであり、偽の国旗を掲げて敵方を欺くという軍の構想に由来している。主な目的は、結果の責任を相手側或いは第三者に擦り付けることである。

サイバー領域における「偽旗作戦」では、攻撃発信元、攻撃主体、展開又は感染方法、コード/エクスプロイト(ソフトウェアの脆弱性を利用して不正な挙動を再現するプログラム)のアトリビューション(帰属性/行為の原因や因果関係を特定すること)を欺く、或いは特定の環境や調査用ツールの使用による出力データを異なるものにして誤判断を誘導させるという手段が用いられる。

このような「偽旗作戦」を見極める能力を確保するために、次のような対策強化が求められる。

- (1)さまざまなサイバー脅威インテリジェンス専門会社から提供されるサイバー攻撃キャンペーンの分析レポートの内容を理解し、自組織のシステムや運用に対する関係性や影響可能性について説明できる人材を育成又は確保する。自組織において発生したサイバー攻撃の見極め及び即座の対処方針を立案する必要がある。
- (2)掌握すべき攻撃技術の対象範囲を拡大して、「欺瞞技術」「アンチフォレンジック(フォレンジックの証拠となるセキュリティ侵害の痕跡を残さない技術)」、「アンチ

デバッキング(プログラムの誤りやバグを見つける技術を利用して、構造分析、動作、ソースコードなどの調査を回避する)技術」に関する最新情報の収集を強化する。

(3)外部のサイバーセキュリティ専門家及びサイバートロ(大規模サイバー攻撃)対処に関連する公的機関との緊密な連携を確立し、継続的な信頼関係の醸成を図る。

Ⅳ. 「ドクシング(doxing)」

以前から国際的なネットワークを持つハッカー集団である Anonymous が、特定の組織に所属する構成員の個人情報等をネット上に晒すことで、それらの信用を貶め、社会生活に深刻な影響を与える攻撃が頻発している。コンピュータシステムではなく、「人間」に対するサイバー攻撃と言えるものである。

このような攻撃形態を「ドクシング」といい、特定の個人を攻撃するために、さまざまな手段で収集及び集約した、その個人のメールアドレス、パスワード、SNS アカウント、住所、電話番号、写真、プライベート文書、家族の情報等を無断で公開する。言葉の由来としては、doc(document/特定の情報が記述された文書)が動詞化した語と解釈されている。日本では、このようなネット上の晒しを行うことで、ネットリンチ(インターネット上で行われる陰湿で一方向的いじめを行う私刑行為)に繋がることもある。

「ドクシング」の発生を抑制するためには、次のような事前対策が考えられる。

- (1)組織における全ての構成員に対して、それぞれがプライベートで利用している SNS を含む外部 Web サービスのログイン情報が第三者に乘っ取られないように、全てのインターネット通信を暗号化或いは暗号化されたサイトを利用する、ログインに使用しているパスワードを推測不能なものにする、2段階認証の利用を強く推奨する。
- (2)インターネット上に不用意にコメントや写真を投稿しない。投稿した場合は一定期間後に削除する。
- (3)不安全なコンピュータシステムやデバイスを利用している相手とは、直接的なやり取りを避ける。

Ⅴ. さいごに

上記の攻撃技術に加えて、施設内にサイバー攻撃が仕掛けられる経路は、「電気通信回線」だけでないことに留意する必要もある。例えば、施設内に出入りするシステム保守が持ち込むデバイスや可搬型記憶媒体、内部関係者や訪問者のポケットやカバンの中にあるスマートフォンやタブレット端末、そして、施設内部にある IoT (WiFi 接続可能な空気清浄機、プリンター等)も、見落とされがちな攻撃経路となる可能性がある。

今後、施設内において IP アドレスが付与されたすべてのデバイスに対して細心の注意を払う必要がある。

(2018 年 7 月 3 日 記)



学会，秋の大会で福島復興や1F 廃炉などを議論

原子力学会は9月5日から7日までの3日間、岡山大で秋の大会を開いた。理事会セッションでは、原子力学会の提案により一昨年発足した36学協会の集まりである「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」で繰り広げられたこれまでの議論を総括。100ミリシーベルト以下の低線量域については、放射線被ばくによる確率的影響を疫学的に検出することは極めて難しいが、統計的な有意差が得られないことと影響がないことは異なるものであり、国際放射線防護委員会(ICRP)は低線量域でも線量に依存して影響(直線的な線量反応)があると仮定して、放射線防護の勧告を行っていることを注意深く説明することが重要だと指摘した。

また、福島県での子どもの甲状腺検査でがんが見つ

かっていることについては、高精度の調査が大規模に行われたことによるスクリーニング効果や過剰診断の可能性が高く放射線の影響は考えにくいものの、現時点ではその影響を完全に否定するまでには至っていないとした。

さらに低線量のしきい値については疫学や統計上の限界があることや、放射線の影響が小さいためにそれが体質・生活習慣の個人差に埋没してしまうとの意見があるほか、生体には防御能力が備わっていることなどを理由に、しきい値そのものがないという説があることも紹介された。

(原子力学会誌編集委員会)

原子力委がプルトニウム利用の基本的考え方

原子力委員会は7月31日の会合で、新たな「わが国におけるプルトニウム利用の基本的考え方」を決定した。プルトニウム利用を進めるにあたっては国際社会と連携し、核不拡散の観点も重要視しつつ、平和利用に係る透明性を高めるという考えに基づき、「プルトニウム保有量を減少させる」と明記。関係行政庁や事業者により以下の措置が実現されることで、プルトニウム保有量は「現在の水準を超えることはない」とした。

1. 再処理等の計画の認可(再処理等拠出金法)にあたっては六ヶ所再処理工場、MOX燃料加工工場およびプルサーマルの稼働状況に応じて、プルサーマルの着実な実施に必要な量だけ再処理が実施されるよう認可を行う。その上で、生産されたMOX燃料については、事業者により時宜を失わずに確実に消費されるよう指導し、それを確認する。

2. プルトニウムの需給バランスを確保し、再処理から照射までのプルトニウム保有量を必要最小限とし、再処理工場等の適切な運転に必要な水準まで減少させるため、事業者に必要な指導を行い、実現に取り組む。

3. 事業者間の連携・協力を促すこと等により、海外保有分のプルトニウムの着実な削減に取り組む。

4. 研究開発に利用されるプルトニウムについては、情勢の変化によって機動的に対応することとしつつ、当面の使用方針が明確でない場合には、その利用または処

分等の在り方についてすべてのオプションを検討する。

5. 使用済み燃料の貯蔵能力の拡大に向けた取組を着実に実施する。

また、原子力委員会では資源エネルギー庁、文部科学省、外務省、電気事業連合会、日本原燃、日本原子力研究開発機構からヒアリングを実施し、今後のプルトニウム利用に関して5月末までに論点を整理した。このうち電事連は、「全国の16~18基の原子炉でプルサーマルの導入を目指す」という現行方針を堅持。発電所の再稼働を前提とした上で、2021年度上期の再処理工場のしゅん工を目途にプルトニウム利用計画を公表するとしている。

日本は2017年末時点で国内に約11トン(商用:約6トン、研究用等:約5トン)、海外に約36トン(英国:約21トン、フランス:約15トン)のプルトニウムを保有している。一方で現在、プルサーマル発電が実施されているのは関西電力高浜3、4号機、四国電力伊方3号機、九州電力玄海3号機の4基となっている。

(資料提供:日本原子力産業協会、以下同じ)

「福島第一廃炉国際フォーラム」を開催

原子力損害賠償・廃炉等支援機構は8月5、6日、福島県いわき市と楢葉町で「福島第一廃炉国際フォーラム」を開催した。福島第一原子力発電所の廃炉に向けて、国内外の専門家が参集し技術的成果を共有するとともに地元住民と対話するのがねらいで、今回で3回目の開催となる。

1日目は開沼博氏をファシリテーターに迎え、福島第一原子力発電所の廃炉について地元住民が「知る」、「話す」、「問う」セッションが行われた。2日目は遠隔技術・ロボット技術を中心に、海外での取組事例を紹介し話し合う技術セッションが行われた。技術セッションでは米国サバンナ・リバー国立研究所副所長のジェフ・グリ

フィン氏が、ハンフォードとサバンナ・リバーにおけるサイト環境浄化の取組を紹介。大量のタンク廃棄物など、福島第一原子力発電所の場合との類似点をあげたほか、次世代の労働力確保、地元とのコミュニケーション、何よりも「やればできる」という姿勢の重要性を強調した。また、英国セラフィールド社修復部技術部長のサイモン・キャンディ氏とフランス原子力・代替エネルギー庁民生施設解体措置本部調査・国際協力連携課長のクリスティーヌ・ジョルジュ氏が、それぞれ自国の取組について報告。サプライチェーン総合力の強み、再処理施設の廃止措置における遠隔操作技術などを披露した。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】

GEH社、エネ省とSMRプロジェクトでチーム結成

米国のGE日立ニュークリア・エナジー(GEH)社は7月16日、同社が開発している出力30万kWの小型モジュール炉(SMR)「BWRX-300」が、米エネルギー省(DOE)による先進的原子力技術開発支援プロジェクトの対象に選定され、そのための専門家チームを産業界の主要企業で結成したと発表した。

DOEは7月10日、民間との費用分担により米国内で先進的原子力技術の研究開発を進めるというイニシアチブの第2弾として、約2,000万ドルを追加拠出すると発表。GEH社が主導する「LNG火力との競合に向けた原子力プラントのコスト削減プロジェクト」は、9件の支援対象プロジェクトの一つとなった。GEH社のチームには、大手の原子力発電事業者であるエクセロン社、総合エンジニアリング・建設とプロジェクト管理の専門企業のベクテル社、日立GEニュークリア・エナジー(HGNE)社、およびマサチューセッツ工科大学(MIT)から専門家が参加。プラントの設計や建設工法、発電所運営などを専門とする各社が結束して「BWRX-300」設計の簡素化を進めるとともに、建設コストや運転・保守(O&M)コストを大幅に削減する方法を模索していく考えだ。

DOEは同プロジェクトに対して約190万ドルを提供

予定である一方、産業界側からは約48万ドルを拠出。商業炉の建設は2030年代初頭を目指しているとした。GEH社は今年5月、「BWRX-300」の商業化促進で、潜在的な顧客の1人であるドミニオン・エナジー社が出資参加を決めたと発表していたが、現段階ではドミニオン社の原子力発電所サイトでの「BWRX-300」建設計画はない点を明らかにしている。

GEH社によると、「BWRX-300」設計は米原子力規制委員会(NRC)が2014年に認証した出力150万kWの同社製「ESBWR(高経済性・単純化BWR)」の設計とライセンスをベースとしている。設計の飛躍的な簡素化により、ほかの軽水冷却式SMRや既存の大型炉と比べて出力あたりの資本コストは最大60%の削減を目指しており、達成できれば「BWRX-300」はコンパインド・サイクル・ガス発電や再生可能エネルギーとも経済的に競合可能になると見込んでいる。

また、大規模な冷却材喪失事故(LOCA)の発生率をゼロにすることも同設計の目標の一つであるため、その発生に関わる大型の構造物を排除。これにより設計の簡素化がさらに進み、製造・建設と運転・保守が容易になるほか、必要な敷地占有面積もわずかになるとした。同設計ではさらに、自然循環を活用した受動的安全系を採用しており、深さ約20mの立て坑に設置するため、天然の防護効果も得られると説明している。

ホルテック社と SNC ラバリン社が 廃止措置専門会社設立

米国のホルテック・インターナショナル社とカナダの SNC ラバリン社は7月18日、米ニュージャージー州を本拠地とする原子力発電所の廃止措置専門企業「コンプリヘンシブ・デコミッションング・インターナショナル(CDI)社」を合併で設立したと発表した。

米国内では稼働中の商業炉約100基で経年化が進んでいるほか、低コストなエネルギー源が台頭していることから、両社は今後10年間に米国の廃止措置市場が140億ドルを超える規模に成長すると予測。双方が蓄積してきた専門的知見を統合することにより、廃止措置期間の大幅な短縮を実現しつつ、作業を安全かつ経済的に遂行する方針だ。

なお、この発表の数日後に SNC ラバリン社は、カナダ・サスカチュワン州で昨年12月から原子力安全委員会の廃止措置手続が始まったプール型研究炉「SLOWPOKE-2」に対し、子会社の CANDU エナジー社が2~3年にわたり廃止措置サービスを提供することになったことを明らかにした。

ホルテック社は使用済燃料管理を専門とするエネルギー総合ソリューション企業であり、すでに世界中の原子炉110基で同社が開発した使用済燃料の貯蔵・輸送技術が活用されている。一方、SNC ラバリン社は、2011年にカナダ原子力公社(AECL)の CANDU 炉(カナダ型加圧重水炉)事業を買収した大手のエンジニアリング・プロジェクト管理企業。両社はすでに協力関係にあり、ホルテック社が世界的展開を目指して進めている小型モジュール炉(SMR)開発に、SNC 社は許認可支援を含めたエンジニアリング・サービスを提供中である。

なお、ホルテック・インターナショナル社は7月31日と8月1日の両日、同国内で数年以内に早期閉鎖が予定されている商業炉3基で廃止措置作業を行うため、事業者からサイトごと発電所を購入することになったと発表した。

これにより同社は最新技術を駆使した廃止措置作業を、迅速かつ作業員の被ばく線量も低く、完璧な安全性を備えたプログラムに変えることができると指摘。同社はこのほか、ミシガン州で解体作業が終了し、使用済燃料乾式貯蔵施設のみが残存するビッグロックポイント原子力発電所(BWR, 7.5万kW)についても、サイトを購入予定となっており、廃止措置業務を担当するサイトは合計4か所になった。

機器の解体や除染など実際の作業は、今年7月にカナダの SNC ラバリン社との合併で設立した廃止措置専門企業「コンプリヘンシブ・デコミッションング・イン

ターナショナル(CDI)社」が行うことになる。この分野で両社が培ってきた経験や知見を最大限に活用して、発電所サイトを早期に生産的な目的に利用可能な状態に戻していくが、使用済燃料についてはすべて、それぞれのサイトの乾式貯蔵施設に移送。米エネルギー省(DOE)が使用済燃料の引き取り義務を履行するまでの間、監視付きでサイトに保管される見通しである。

ホルテック社は様々な事業のなかでも使用済燃料の管理が専門で、2014年に閉鎖されたパーモントヤンキー発電所(BWR, 65.2万kW)も含め、国内外の原子炉100基以上に対して、同社が開発した使用済燃料の乾式貯蔵・輸送技術を提供している。米ニューメキシコ州南東部では、州内の複数の自治体との協力で集中中間貯蔵施設(CIS)を建設する計画も進めており、2017年3月に建設許可申請書を米原子力規制委員会(NRC)に提出済み。完成すれば、全米から使用済燃料を受け入れて、発電所サイトを全面的に開放状態に戻すことができるとしている。

【カナダ】

ニュー・ブランズウィック州が 溶融塩炉の SMR 建設

カナダ東部のニュー・ブランズウィック(NB)州政府は7月13日、世界的水準の小型モジュール炉(SMR)開発で同州がカナダのリーダー的立場を確立することを目的に、英国籍の Moltex エナジー社が開発している燃料ピン型溶融塩炉(SSR-W)の商業規模の実証炉を、2030年までに州内のポイントルプロー原子力発電所敷地内で建設することを目指すと発表した。

SMR 技術の研究開発促進のため、NB 州政府が1,000万カナダドル(約8億4,800万円)を投じて州立大学内に設置した「原子力研究クラスター」の一員として、新たに Moltex 社を迎えたもの。この合意により、同社は500万加ドルの財政支援を受けて同州の最大都市であるセント・ジョンに北米本部を起ち上げるとともに、開発チームを設置する方針だ。

NB 州はすでに7月9日、米デラウェア州のアドバンスド・リアクター・コンセプツ LLC(ARC ニュークリア)社とも、州営電力の NB パワー社を通じて協力することで合意。NB パワー社は州内唯一の原子力発電設備であるポイントルプロー発電所の所有者であり、ARC 社が開発中の SMR でナトリウム冷却・プール型高速中性子炉となる「ARC-100」についても、同発電所敷地内で初号機の建設可能性を探るなど、商業化を進めることになっている。

NB 州では、エネルギー部門が GDP の6%以上を占

めており、州経済に大きく貢献している。このため州政府は、同州の地理やエネルギー資産を活用して、エネルギー製品やサービスを輸出する機会を模索中。昨年5月に州政府とNBパワー社が合併で起ち上げたニュー・ブランズウィック・エナジー・ソリューションズ社(NBEC)は、この目標の実現を目的としたもので、Moltex社との今回の合意もNBECが窓口となっている。

Moltex社によると、同社のSSR-Wは既存炉の使用済燃料を低コストで新燃料に転換することが可能なため、NB州内で将来、使用済燃料の処分問題の解決に役立つことになる。また、物理的に小型である一方、エネルギーの貯蔵が可能であり、日中の需要がピークになる時間帯には出力を2倍、3倍に増やすことができるという。最も重要なのは、燃料ピン型熔融塩炉の技術が非常に低コストなクリーン・エネルギー源である点で、CO₂の排出抑制目標を満たすと同時に顧客の電気代も削減することが可能だと強調している。

【英国】

政府のエネルギー統計、 低炭素電源では原子力が最大シェア

英ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)は7月26日、英国内の2017年のエネルギー生産量や消費量について詳細に分析した4種類の国家統計結果を公表。同年に英国で発電された電力量のうち、原子力が単一の低炭素電源としては引き続き最大シェアを占めていることが明らかになった。

これらの統計の中で、「英国におけるエネルギー統計ダイジェスト(DUKES)」は、エネルギー生産に関する情報を政府が1970年代から毎年取りまとめているもの。英国原子力産業協会(NIA)のT.グレイトレックス理事長は、「DUKES最新版により、原子力発電が総発電電力量の約21%、低炭素電源による電力量では41%を占めるなど、国内の低炭素電源ミックスの中で継続的に重要な役割を果たしていることが明確に確認された」と強調している。

DUKESによると、英国の2017年の総電力供給量は合計約3,530億kWhで、2016年実績から36億kWh減少したものの、概ね安定的に推移している。このうち4.2%は、輸出分の電力量を差し引いた純輸入量(148億kWh)であるため、国内での総発電量は3,390億kWh。石炭離れの傾向が続く一方、再生可能エネルギーによるシェアは過去最高の29.3%になったとした。

これと原子力のシェア20.8%を合計した低炭素電源の発電シェアは、前年実績の45.6%からさらに増加、過去

最高の50.1%となった。再生エネのうち、最も数値が大きいのは風力の14.8%であることから、原子力は英国内では、天候と無関係に安定的に信頼性の高い電力供給が可能で、最大の低炭素電源ということになる。ただし、原子力による2017年の総発電量は703億kWhで、前年実績の717億kWhから1.9%減少。発電シェアも前年実績の21.1%からわずかに減少したが、DUKESはその理由として、2016年よりも定期検査が若干多かった点を指摘している。

このような統計結果について、グレイトレックス理事長はまず、「電気自動車の普及や熱供給の電化で拡大が今後予想されるなど、英国はCO₂排出量の削減目標達成に向けて大きく前進している」とコメントした。需要の高まりに合わせて信頼性の高い低炭素電源を確保することは非常に重要だとしており、2017年は風力発電から特に、大きな恩恵が得られた一方、過去28日間の発電量はわずか5.8%で、非常に低出力の期間が長期化している点を指摘。エネルギーの供給を保証するには、CO₂の排出抑制目標を満たしつつも、バランスの取れた電源ミックスが必要になることが実証されたと述べた。

その上で同理事長は、BEISが6月末に公表した民生用原子力部門との戦略的パートナーシップ「部門別協定」の中で、新たな原子力発電インフラに対する投資が、英国の将来のエネルギー・ミックスにとって重要不可欠なものとして認識されていた事実にも言及。とりわけ、1基を除いて既存の原子力発電所すべてが、2030年までに閉鎖されるという背景を強調した。

DUKESではこのほか、英国の電力輸入量が2017年に9.2%低下したのに対し、輸出量が49.9%上昇していたことを紹介。最終的に英国は、これまでどおり電力の純輸入国に留まっているが、純輸入量は前年実績より16.8%削減された。原因の1つとしては、2016年11月に英仏間の海底送電線が船の錨で一部損傷し、昨年の第1四半期に修理が行われていたことを挙げた。これに加えて、同年の第4四半期に仏国の原子力発電所で実施された定期検査により、仏国内の電力価格が上昇。英国からの輸出量が増加したと説明している。

【フランス】

フラマトム社、製造記録上の不正は 機器の有用性に「問題なし」

仏国の原子炉機器メーカーであるフラマトム社(旧アレバ社)は7月18日、傘下のクルーゾー・フォルジュ社による原子力用鍛造品の製造記録を分析した結果、現段階では、仏国内の既存の原子力発電所に納入・設置された機器の有用性に問題がないことを確認したと発表し

た。

クルーゾー社の製造記録 1,925 件について、発覚した不正が各種要件からの逸脱に当たるか、またその特徴を検証する作業をフラマトム社の特別チームが完了したものの。フラマトム社の親会社であり、国内の商業炉全 58 基を所有するフランス電力(EDF)は、今年の 9 月までにこの件に関する全基分の概要報告書を原子力安全規制当局(ASN)に提出すると見られている。ASN はそれらの審査を行った上で、燃料交換のために計画停止した原子炉の再稼働が可能か判断するが、これまでに 31 基について再稼働を承認済みとなっている。

2015 年 4 月にアレバ社(当時)は、国内で建設中のフラマンビル原子力発電所 3 号機で原子炉容器上蓋と下鏡に鋼材組成の異常が見つかったと ASN に報告した。これらを製造したクルーゾー社を調査したところ、1965 年以降に製造された原子力部品約 400 点の品質証明書で製造記録の不正が認められるなど、大掛かりな組織的、技術的欠陥が生じていたことが判明。EDF は 2016 年 9 月、詳細試験の結果等から、クルーゾー社製の耐圧機器を装備した原子炉の安全性に影響は及ばないとの分析結果を ASN に報告した。

しかし ASN は 2017 年、製造記録で認められた不正が、製造技術上の要件や規制上の要件、発電所内部の要件などからの逸脱に当たるかについて、2018 年 12 月までに調査するよう EDF に指示。EDF は昨年夏からこの調査を開始しているが、燃料交換のための計画停止に入った原子炉が再稼働する 2 か月前までに、製造記録の調査結果を ASN に提出するよう義務付けられている。

その一方で、ASN は今年 1 月、監督活動を強化するなど一定の条件下であれば、クルーゾー社が国内原子力施設向けの操業を再開することを許可するとフラマトム社、および EDF に通達。クルーゾー社の操業再開に関しては、フラマトム社も 2016 年初頭から、安全文化や技術的能力、製品品質、組織など、各側面の改善計画をクルーゾー社内を開始していた。

今回の発表の中でフラマトム社は、この改善計画が完了したため機器製造能力が増強され、国内原子力発電所の取替用機器のみならず、世界中の新設計画用に主要な原子力鍛造品を提供可能になったと強調。安全性と品質の確保を最優先に、作業チームや製造スキルを強化し、製造設備への投資も実施中だとしている。

フラマトム社としてはクルーゾー社の工場を、原子力産業界のニーズに特化した鍛造サービスを提供する「中核的拠点」とすることに意欲を燃やしており、D、エモン副社長は「品質保証システムの全面的な見直しを終えて、クルーゾー社に対する顧客や安全規制当局の信頼度は向上しつつある」と指摘。クルーゾー社も原子力関係

のプロジェクトに最も重点的に取り組んでいるが、これは安全性と品質、および顧客の満足度を高めるため、複数のチームが実施している熱心な活動によるものだと述べた。

このような「未来工場プロジェクト」に沿って、フラマトム社はクルーゾー社の工場でデジタル設備の設置も進めている。これにより、得られたデータの信頼性を高めるとともに、鍛造作業中の追跡調査を改善することが可能となる。さらに、新たな鍛造技術を開発するため、研究開発プログラムを進めていることも明らかにしている。

【ウクライナ】

ロシア製商業炉で WH 社製燃料を全炉心装荷

ウクライナは稼働中の商業炉 15 基すべてがロシア型 PWR(VVER)だが、このうち南ウクライナ原子力発電所 3 号機(100 万 kW)は同国で初めて、米国籍のウェスチングハウス(WH)社が製造した燃料集合体 163 体が全炉心に装荷された原子炉になった。

これは、ウクライナの民生用原子力発電公社であるエネルギーアトム社が 7 月 19 日、WH 社と開催した会合で明らかにしたものの。同公社は 20 年以上前から WH 社と協力関係にあり、南ウクライナ 3 号機を含めて 15 基中 6 基ですでに、WH 社製の燃料を装荷している。

南ウクライナ 3 号機は WH 社製燃料の装荷試験用として使われていたが、ザポロジェ原子力発電所では、2016 年 6 月時点で 5 号機(100 万 kW)の炉心に WH 社製燃料を 25%、TVEL 社などロシア製のものを 75%装荷。2017 年 6 月にこの比率が 50%対 50%となったのに続き、今年は 75%対 25%に逆転することになっている。1、3、4 号機(各 100 万 kW)でも現在、WH 社製とロシア製の燃料が混合で装荷されており、エネルギーアトム社は WH 社製燃料の比率を徐々に拡大していく方針。2019 年から 2021 年にかけて、ザポロジェ発電所の 4 基でも、全炉心に WH 社製燃料を装荷するとの見通しを示している。

1991 年に旧ソ連邦から独立したウクライナでは、旧ソ連時代の原子力発電所が稼働しているのに加え、1986 年のチェルノブイリ事故後もロシア製の原子力発電所が複数基、建設された。しかし、近年はクリミアの帰属問題や天然ガス紛争などを原因に、ウクライナ政府のロシア離れが急速に進展。ロシアへのエネルギー依存を軽減するため、建設途中の原子力発電所の完成計画で契約先をロシア企業から韓国企業に変更したほか、燃料についてもロシア企業以外からの調達策を進めている。

WH 社が製造する VVER 用燃料は、ウクライナのこのような戦略の中で重要な役割を果たしており、2005 年に同社製の試験用先行燃料集合体が初めて、南ウクライナ 3 号機に装荷された。現行の燃料売買契約は 2020 年に満了予定であるため、両者は今年 1 月、この契約を 2025 年まで延長することで合意。対象原子炉の基数も現行契約の 6 基を 7 基に拡大するという内容で、WH 社はウクライナによる燃料調達先の多様化支援という点で同社の能力が証明されるとともに、戦略的パートナーとしての役割が強化されたと強調している。

【バングラデシュ】

ルプール 2 号機が本格着工

バングラデシュ初の原子力発電設備となるルプール発電所について、建設工事を請け負ったロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は 7 月 14 日、首都ダッカの北西 160km のサイトで 2 号機の建設工事を開始したと発表した。

同サイトでは昨年 11 月に 1 号機が本格着工したばかりだが、7 月 8 日に同国の規制当局が 2 号機の設計・建設許可を発給したのを受けて、ロスアトム社は原子炉建屋部分に最初のコンクリートを打設した。記念式典には、同国の S. ハシナ首相に加えて、ロシアの Y. ポリソフ副首相やロスアトム社の A. ロクシン第一副総裁が出席した。現在の予定では、1 号機の営業運転開始は 2023 年、2 号機については翌 2024 年となっており、同国における電力不足の解消と経済成長に寄与すると期待されている。

ルプール発電所の 2 基では、国際社会の安全要件すべてに適合するという第 3 世代+（プラス）の 120 万 kW 級ロシア型 PWR(VVER)設計を採用。同型の原子炉としてはすでに、ロシアのノボボロネジ原子力発電所 II 期工事 1 号機が昨年 2 月に営業運転を開始している。設計・建設工事はロスアトム社のエンジニアリング部門であるアトムストロイエクスポルト(ASE)社が主契約者として担当しているほか、原子炉系統やタービン系統などの機器製造は、同じくロスアトム社傘下のアトムエネルギーゴマシ社が実施している。

ロシアがバングラデシュに原子力発電所の建設協力を提案したのは 2009 年のことで、翌 2010 年に両国政府は原子力の平和利用に関する 2 国間協力協定、2011 年にはバングラデシュ国内の原子力発電所建設に関する協力協定を締結した。総工費については 2 基分で 126 億 5,000 万ドルとの情報があり、バングラデシュ内閣は 2016 年 6 月、このうちの 113 億 8,000 万ドルをロシア政府から信用取引の形で受け取るための政府間協定案を承認した模

様。担当銀行としては、ロシアの対外経済銀行とバングラデシュ最大の国有商業銀行であるソナリ銀行がそれぞれ、承認されたと伝えられている。

【中国】

39 基目が営業運転、基数で日本と並び世界第 3 位に

中国広核集団有限公司(CGN)は 7 月 13 日、広東省の陽江原子力発電所で建設中だった 5 号機(PWR, 108 万 kW)が、12 日の午後 9 時頃、フル出力による連続 168 時間運転という営業運転開始条件をクリアしたと発表した。

事業許可などの諸手続は CGN がこれから手配するが、通例通り 12 日が最終的に同炉の営業運転開始日に認定されると見られている。

これにより、中国の商業用原子力発電設備は 39 基、3,780 万 kW に到達しており、容量ではまだ日本より 80 万 kW ほど少ないものの、基数では日本と並んで世界第 3 位に躍進。中国ではこれに続いて、WH 社製 AP1000 を採用した三門 1 号機(PWR, 125 万 kW)とフラマトム社製欧州加圧水型炉(EPR)の台山 1 号機(PWR, 175 万 kW)も 6 月末に送電開始していることから、年内にも基数・容量ともに日本の開発規模を追い抜く見通しである。

合計 6 基の 100 万 kW 級原子炉建設が計画されている陽江原子力発電所は、中国でも最大規模の原子力発電サイトになる予定。1~4 号機には仏国の PWR 技術をベースとする第 2 世代改良型の「CPR1000」が採用され、それぞれ 2014 年 3 月、2015 年 6 月、2016 年 1 月、および 2017 年 3 月から営業運転中である。

5、6 号機では第 3 世代の技術特性を有するという「ACPR1000」が採用され、CGN はそれぞれ 2013 年 9 月と 12 月にこれらを本格着工した。同設計では、「CPR1000」設計に基づいて 31 項目の改良を安全分野で加えたと CGN は説明。特に、CGN 子会社の広利核会社が独自に開発したという国産デジタル式計測制御(I & C)系を初めて装備している点を強調した。今年 5 月に臨界条件を達成して送電網に接続された 5 号機は、「ACPR1000」設計として初めて、営業運転を開始したことになる。

CGN によると、同発電所で稼働中の 1~4 号機は 2017 年だけで約 300 億 kWh を発電。これにより、926 万トンの石炭が節約され、約 2,400 万トンの CO₂ の排出を削減できたとしている。同発電所最後の 1 基として建設中の 6 号機も、2019 年中に運転開始が可能になると見られている。

事故時の核分裂生成物挙動解明への挑戦

「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」 研究専門委員会の活動状況

日本アイソトープ協会 勝村 庸介, 他

核分裂生成物(FP)は、原子力では最も基本的なものとして古くから研究されてきたが、福島第一原子力発電所(1F)の事故に際し、研究人口減少の最も著しい分野であることを改めて強く認識した。今後40年以上にわたる廃炉プロジェクトの推進においても、FPに向き合うことは避けられない。このため、FPの化学的挙動研究に対する新たな取り組みが必須である。昨年6月に発足した題記研究専門委員会の狙い、実施計画を紹介し、会員諸氏のご批判を受けつつ、目標達成に向かって注力する所存である。

KEYWORDS: *fission products, severe accident, accident analysis, decommissioning, source term*

I. はじめに

本研究専門委員会は水化学部会内での2年間の準備会活動後、水化学、熱流動、核燃料、保健物理・環境科学、計算科学技術、原子力安全、再処理・リサイクルおよびバックエンドの各部会のサポートを受け、2017年6月に発足した。本文は、本研究専門委員会の目指す方向について、日本原子力学会2018年春の年会企画セッションでの発表と討論を受けて、必要な軌道修正を施してまとめたものである。

「福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会」での調査活動において、事故時のソースタームの評価に、従来の評価ベースでは説明できない事象が散見されることが示された¹⁾。一方で、1990年代後半以降、ソースターム関連の研究が衰退し、技術を支えてきた研究者、技術者の多くが第一線を離れ、技術的な空洞化が顕著となっている。かかる現状を踏まえ、日本原子力学会2014年及び2016年春の年会で、核燃料、水化学、熱流動、計算科学技術、保健物理・環境科学の5部会合同企画セッ

ションで、ソースターム研究のあり方について議論した。この議論の結果は、以下のように総括された。

- (1) 従来のシビアアクシデント(SA)研究では、原子炉から格納容器内までの現象を主対象としていたが、福島事故では炉心インベントリに対し、無視できない量の放射性物質の環境および汚染水への放出が確認された。原子炉建屋から環境まで広範な領域での事象を的確に把握し、その結果をソースタームの予測技術の向上に反映させることにより、原子炉安全の一層の向上に繋げることができると見られる。
- (2) ソースターム評価では対象、課題が、広い技術分野にまたがるため、学会全体の英知を結集して、問題の再整理、解決に当たることが重要であり、部会の枠を超えた検討組織(研究専門委員会等)の設置が望ましい。原子力学会全体として、組織的、計画的にソースターム研究を推進し、この活動を通して、ベテランから若手への確実な技術伝承を図る。

本研究専門委員の具体的な活動内容としては、以下の4つの項目を掲げた。

- ① Phébus FPプロジェクト関連論文他の調査報告書²⁾をベースに、新たな技術サーベイを加え、核分裂生成物(FP)挙動に関する情報の共有化を図り、共通技術基盤上に新たな技術者集団を構築する。
- ② 福島第一原子力発電所(1F)事故で見られたSA

A Challenge to Understand and Control Fission Product Behavior under Severe Accidents ; Latest Activities of Research Committee on Fission Product Behavior under Severe Accident : Yosuke Katsumura, Hidetoshi Karasawa, Koichi Nakamura, Junichi Takagi, Masahiko Osaka, Shunsuke Uchida.
(2018年5月17日 受理)

時のFP挙動をサーベイし、FP挙動評価の視点から、従来技術で予測されたものと、予測できなかった現象を区分し、新たな技術課題を整理する。

- ③ 上記①と②にFP挙動に係る新しい技術課題を加えて、技術報告書(応用編)としてまとめ、現場での実務者、若手技術者との協働をも通して、FP挙動に関する技術伝承に資する。
- ④ 上記③をベースに、40年超の長期にわたる技術継続、継承に資する。

II. Phébus FP 実験から得られた知見

設立準備会では、Phébus FP 実験についてサーベイした。Phébus FP プロジェクトは1988年に設立され、1993年から2004年にかけて仏 Cadarache 原子力センターのPhébus 実験炉を用いて大規模FP放出・移行実験が計5回実施された。900MW-PWRを模擬した1/5000スケールの体系で、模擬炉心、上昇管、水平管(ホットレグ、700℃に保持)、蒸気発生器を模擬したU字管(SG)、水平管(コールドレグ、150℃に保持)、模擬格納容器(PCV)から構成された(図1)²⁾。

模擬炉心には、中央に制御棒を配し、その周りに18本の照射済燃料棒と2本の新燃料棒を装荷した。水蒸気を模擬炉心下部より供給し、炉出力を燃料が溶融するまで増加させた。燃料から放出したFPは一次系に沈着・移行して、PCVに蓄積した。その後、PCVを隔離して、エアロゾルとヨウ素の挙動を調べた。これらFP挙動を評価するため、温度・圧力などの熱水力データを取得し、γ線スペクトロメータによりFP濃度の経時変化をオンラインで測定した。また、エアロゾル濃度やヨウ素化学形もオンラインで測定した。実験後には、燃料領域に残存した放射能と上昇管に付着した放射能を測定し、γ線放出核種のマスバランスを求めた。

得られた主な知見は以下の通りである。

- ① 燃料溶融時に揮発性FPは100%放出する。
- ② Ba, Te, Ce, Laの燃料からの放出割合は従来知見より少なく、Ru, Moは従来知見より多い。

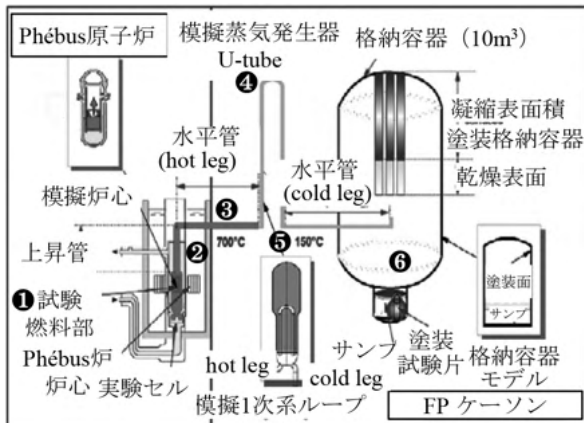


図1 PhébusFP 実験ループ(主要構造とFP移行パス)

- ③ Csの化学形にCs₂MoO₄を考慮する必要がある。
- ④ PCV内のヨウ素の化学形には不確実性が大きい²⁾。

III. 実機と Phébus 実験情報とのギャップ

1Fでは、3つの号機の炉心に装荷されていた約280トンのUO₂の一部がメルトダウンし、燃料中に蓄積していたFPのうちヨウ素とセシウムの過半が原子炉容器(RPV)から格納容器(PCV)に放出された。さらに、この一部が原子炉建屋(R/B)、タービン建屋(T/B)に漏出し、汚染水として除去、処理され、また一部が環境大気中に放出された。図2に燃料からPCV、R/B、さらに汚染水として放出される主要経路及び環境への放出経路を概念的に示した³⁾。

Phébus FP 実験では、燃料(UO₂総量:10kg)の溶融により放出されたFPが機器、配管系統を通り、最終的には模擬格納容器まで到達した。FPのすべてが、図2の破線で示した領域内、すなわち格納容器までに閉じ込められた。FPの燃料からの放出量、移行量および途中の機器、配管への沈着量、また格納容器内のヨウ素を主としたFPの量と化学形態に及ぼす燃料材料、制御棒材料の影響が詳細かつ定量的に測定されているが、格納容器からの漏出は完全に阻止されているため、漏出量についての情報は得られない。このようにPhébus FP 実験では、FPのマスバランスが定量的に評価され、主要な核種については、放出されたFPの80%以上が回収されている。

1Fの事故では、Phébus FP 実験に比べて燃料総量もFPの総量も膨大であり、RPV、PCVの容積、FPの沈着する機器、配管の表面積も膨大であるが、燃料から放出されるFP挙動は定性的には模擬されているものと考えられる(表1)。FP挙動のスケール依存性については、SA解析コードでの外挿が不可欠である。現状では、格

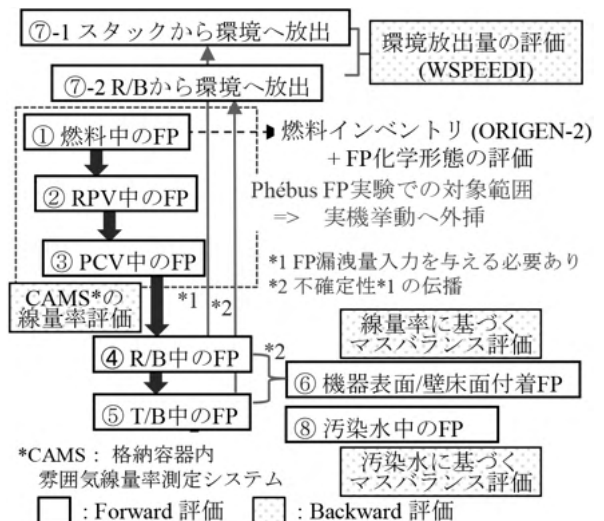


図2 SA時のFP移行の主要プロセス

表1 BWRプラントとPhébusFP実験

項目	PhébusFP 実験	実機 BWR
1. スケール効果		
1.1 PCV 体積	~10m ³	~1000m ³
1.2 PCV の S/V 比*	~0.5m ⁻¹	2~300m ⁻¹
2. 時間効果	実験~50h 破壊測定~1000h	~7y
3. FP 移行経路		
3.1 未知経路	全て設計通り	FP 漏えい箇所一部不明
3.2 実験対象	格納容器まで	環境, プラント敷地内
4. 測定	主要部連続測定 実験後破壊測定	放射線測定は限定的 S/C, D/W CAMS ² 放管関連測定
* S/V 比: 表面積/体積比		
² 圧力抑制室(S/C), ドライウエル(D/W)の CAMS		
		モニタリングポスト (環境データ膨大量) 追加(機器汚染, 汚染水)

納容器内に残存する FP 量の定量が困難であるが、Backward 評価により、セシウムについては、環境に放出されたもの、汚染水から回収されたものは定量化されている²⁾。また一部格納容器ほかに残存しているものは CAMS(格納容器雰囲気モニタリングシステム)ほかの測定値から推定可能である。

IV. 研究専門委員会における WG 活動

Phébus FP 実験での知見を共通の知識ベースとして活動を進めるにあたって、表2に示す3つのワーキンググループ(WG)を編成し、お互いに協力して、問題解決に当たることにした。

さらに、3つのWGの相関、すなわち成果を生み出すための役割分担と期待される成果、協力関係を、図3に示した。

WG3「技術課題抽出」では、Phébus FP 実験での知見を、SA 解析コードを十二分に活用して、実機条件に外挿すると共に、プラントデータを駆使して、FPのマスバランスを定量的に評価し、廃炉に係るFPの所在箇所とその量を可能な限り定量化して、作業計画に反映させることに注力する。このために、WG2「ベンチマーク(BM)評価」からは、モデル解析による実機でのFP挙動

表2 3WGの活動概要と目標成果

WG 名称	活動概要	目標成果
1 FP 実験	FP 放出・移行・環境動態に係る現象を理解し、物理現象を的確に表現するモデル構築のための実験/解析を提案	①新たな実験の提案 ②FP挙動の検討 課題リスト
2 BM 評価	Phébus 実験の BM 評価を通して SA 解析コードの FP モデルを理解 Cs 解析技術の課題把握	③Cs解析改善点提案 ④改良FPモデル提案
3 技術課題抽出	Phébus 実験と実機での FP 挙動を比較検討し、FP 挙動の相違を抽出新たな技術課題の抽出	⑤実機FPマスバランス ⑥実機測定提案 ⑦新たな実験提案

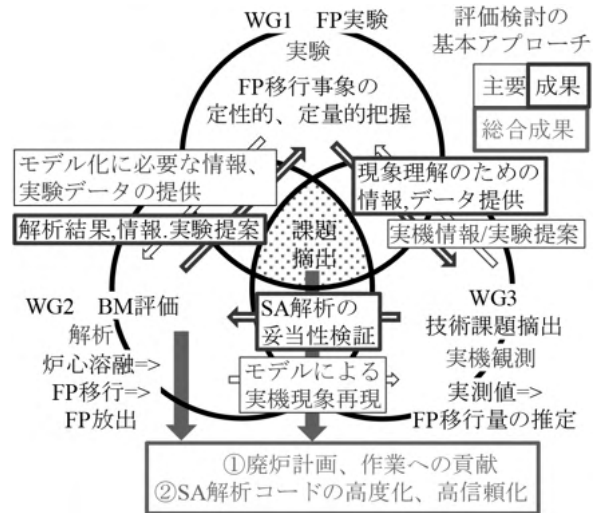


図3 3WGの役割分担と主要成果

に関する現象再現の情報を入手すると共に、FPの流れの下流側からのBackward評価を通して、SA解析コードの結果の妥当性及び精度の確認に貢献する。一方、WG1「FP実験」からは、実機評価のためのFP挙動に係る情報、データの提供を受けると共に、実機評価のために不可欠な事象解明のために必要な実験を積極的に提案する。WG2はWG1から解析に欠かせない基礎情報を入力すると共に、WG1に解析に必須の実験を積極的に提案する。このように3つのWGが有機的に結合して、目標とする廃炉作業、計画への貢献、と同時に運転中のプラントの安全性確保のための解析コードの高度化、高信頼化を目指して活動する。

V. Phébus FP 実験に基づくベンチマークで得た知見と SA 解析コードへの反映

WG2「ベンチマーク評価」は、SA解析コードの信頼性を確認し、実機でのFP挙動を読み解く重要なツールの確保を目指している。SA時のプラント内のFPの挙動は、格納容器(PCV)内あるいは原子炉冷却材系統における熱水力、デブリ挙動、エアロゾル、及び化学挙動が絡む複雑現象である。このような挙動の評価ツールとしてはSA解析コードが開発されてきた。既存のSA解析コードとしては、米国のMAAP、MELCORの他、欧州のASTEC、国内ではSAMPSONなどが存在する²⁾。コードごとに、試験解析や実機事故のベンチマーク解析を通じた改良が精力的に進められてきた。一方でSA現象やFP挙動はそもそも不確かさが大きく、依然未解明な点が多く存在し、コードごとに様々なモデルアプローチや特徴が存在するのが現状である。SA解析コードのユーザーは、各コードの現象論的な特徴を十分に理解し、目的を踏まえた適切な境界条件に基づき解析を行う必要がある。

OECD/NEA BSAF プロジェクト⁴⁾では、各国各機関

が参加してベンチマーク解析が実施された。1F プラント内の放射線量分布の計測値と SA 解析コードによる解析結果の比較により、SA 解析コードの FP 挙動モデルの特徴を整理/比較し、SA 解析コードの 1F 廃炉作業への活用方法や、SA 解析コードの精度向上策が検討された。

SA 解析コードを取り巻く状況は、1F 事故を契機に大きく変化した。SA 解析コードは、1F 廃炉計画の検討、既存炉の設置許可申請における重大事故対策の有効性評価の他、原子力防災のシナリオ検討、レベル 2PRA 等、幅広い分野への適用されるようになった。個々の目的に応じて、SA 解析に求められる精度は当然異なる。WG2 では目的の違いも踏まえて、知見と課題の整理を進め、適切な情報発信を行う。

VI. FP 挙動の統合的な評価技術基盤構築に必要な実験の検討

1F 廃炉に向けたデブリ取出し等のための研究開発においては、主な線源となる放射性 Cs 等 FP の高精度かつ精緻な空間分布とその時間変化(高度化ソースターム)を評価することが不可欠である。この評価は、Cs の環境放出量に係る性能目標を踏まえた評価など、軽水炉安全性向上においても重要である。WG1「FP 実験」では、WG2 および 3 からの実験提案を受け、FP に関する現象の特定、モデルの高度化、及び解析の検証に必要となる FP に関する実験の提案を目的とする。活動においては、国内外の関連アクティビティも踏まえ、高度化ソースタームのために必要な FP 挙動評価のための技術基盤(以下、FP 技術基盤)を構築していくため、FP 現象・挙動についての課題リストの作成も行う。

事故時 FP 化学挙動の解明等、これまでにソースタームの重要課題として挙げられていたもの以外に、1F 事故においてはいくつかの新たな課題が明らかとなった。FP 技術基盤は、これら新たな課題をカバーし、燃料放出から環境放出までを整合的かつ統合的に取り扱えるようなものを念頭に構築していくことが肝要である。このために必要な、現時点における FP 現象・挙動についての検討課題を表 3 に示す。このうち、1F 廃炉に関連が

深いと思われる②③及び⑨に関して以下に補足する。

②ホウ素(B)の影響評価

B₄C ピンが配された Phébus-FPT3 実験においてはガス状ヨウ素の割合が大きくなる等 B の影響と思われるいくつかの結果が示された。しかしながら、この実験は 1F のような BWR とは B/Fe 比や炉内配置が異なるため、これだけでは 1F の現象解明・解析は困難である。また、B の化学的影響を考慮するためには、化学的に結合しやすい他の関連元素を含めた Cs-I-B-Mo-O-H 系として速度論を考慮した上で総合的に評価していく必要がある。

③Sr, Cs 等の水相を介した長期にわたる移行・環境放出挙動と水位変化による水相内線源の再露出予測

1F 炉外放出の大部分を占める水相(炉心冷却を経て汚染水として炉外に放出される経路)における年オーダーでのソースタームの評価が必要であり、特に水相中における FP のソース(デブリや FP 沈着物等からの FP 溶出)及びシンク(構造材表面等への沈着)の評価が重要となると考えられる。

④炉内沈着 FP 等の年オーダーでの物理化学性状変化と構造材等への沈着・遊離挙動評価

酸化・湿潤雰囲気中に長期間晒されたデブリや FP 沈着物等に関して、表面における酸化や水和等の化学反応による沈着物の安定性低下と FP 遊離、遊離 FP 化合物の水和による性状変化と構造物への再沈着など、さらにこれらに影響を与える沈着物等の崩壊熱やラジオリシス影響の評価が重要である。

FP 技術基盤の構築により、様々な 1F 由来サンプル分析結果から SA 時 FP 挙動を逆解析するための方法論の構築に役立つことが期待される。これは、高度化された SA 解析コードと組み合わせつつ、今後取得される 1F 由来サンプルの分析結果から炉内 FP 挙動を評価するための手法であり、1F 廃炉の進展に合わせて継続的に手法の高度化がなされることが重要である。

VII. 研究専門委員会の今後の方向性についての総括

本研究専門委員会は、1F 事故を契機とし、事故時の

表 3 実験の検討の対象とする現象・挙動(現時点でのリスト)

現象・挙動	概要	場所	時間
① MOX/高燃焼度燃料影響	FP 放出挙動への影響	RPV	短期
② FP 化学挙動(高温)	B の化学的影響、Cs 等の鋼材との化学反応等	RPV-RCS	短期
③デブリ/廃棄物中 FP 分布	Sr, Ba, B 等の残留・分布	RPV~ R/B	短期
④ FP リーク経路	パッキン、隙間、スクラビング	PCV	短期
⑤ FP 化学挙動(低温)	I/Cs/Ru 化学	PCV	短期
⑥ FP 挙動(低温)	FP エアロゾルのコンクリ等への沈着・浸透・再浮遊	PCV, R/B	短期
⑦水分・酸化等影響(低温)	スプレー、スクラビング、吸湿・溶解	PCV, R/B	短期
⑧水相移行	デブリ・沈着物からの FP 溶出、壁面等への沈着、水位変化時の移行	RPV, R/B	短期~長期
⑨物理化学性状変化	デブリ・沈着物の水分等との反応、酸化など、性状変化による FP 溶出・再浮遊・再固着(4)	RPV, R/B	長期

FP 挙動について 1F 廃炉計画と SA 解析との双方への適用を目的として Phébus FP 実験の知見を改めて取り纏め、さらに具体的な実機への適用を図ることを目的として発足した。現在、3つの WG を設け、FP 挙動実験の提案、解析ベンチマークの高度化、実機と Phébus FP 実験とのギャップ検討の観点から活動を開始している。

それぞれまだ緒に就いたばかりであるが、WG1 では、FP に関する現象の特定、モデルの高度化、及び解析の検証に必要となる FP 実験の提案を目的としている。さらに、国内外の関連アクティビティも踏まえ、FP 挙動評価のための技術基盤を構築していくための課題リストの作成についても検討する予定である。

WG2 では、SA 時の FP 挙動に関する国際的な重要知見を調査することにより、今後の FP 挙動研究の実施、SA 解析コードの開発または様々な分野への適用に際して参考となる情報の抽出を目的としている。Phébus FP 実験に基づく知見と SA 解析コードへの反映状況の調査、1F 事故解析の知見の調査、さらに SA 時の FP 移行挙動に関する現状知見、解析コードのモデリング及び課題の抽出を行う。

WG3 では、プラントデータを用いて FP のマスバランスを定量的に評価し、廃炉に係る FP の所在箇所とその量を可能な限り定量化して作業計画に反映させたい。このため、WG1 からは評価のための情報提供を受け、実機評価に不可欠な事象解明のための実験を提案する。

1F 事故のソースターム評価に当たっては、実機データを忠実にフォローする姿勢が重要であり、前提として今後の PCV 内部調査、RPV 内部調査の調査結果の共有と反映が必須である。それにより、今後の 1F プラント廃炉プロセスの確立に FP 挙動の知見を十分に反映する必要がある。この役割は主に WG3 が担って行くことになる。

さらに、再稼働プラントへのフィードバックとして、既存の SA 解析モデルの枠組みに固執せず、柔軟に入力条件、解析プロセスを見直していくことが重要である。WG2 においてはこのようなダイナミックな活動が期待される。

そして、インプットが不足している状況においては模擬実験を立案し、新規にデータ取得を行うことにより、実機情報を適切に補完し、解析精度の向上に寄与すべきと考える。そのための新たな実験とモデルの提案は WG1 が担うこととなる。

VIII. まとめ

本研究専門委員会では、今後の WG 活動を充実させ、

1F 廃炉推進と SA 解析精度向上の両輪の目標達成に向けて注力して行く所存である。2つの大きな課題の解決に向けては、現状、現実とゴールとのギャップが大きく、努力目標を明確に示すことが求められる。すなわち、WG 活動、委員会活動の推進に向けて適切な目標設定が重要となる。そして、その目標達成に向けては、学会内の部会横断での連携、協力が不可欠であると考え。また、目標の一つとして、廃炉計画、作業への貢献を謳うからには、1F の現状データ入手とその評価に注力することが必須となる。今後、本研究専門委員会から適切に情報発信を行い、各部会からのフィードバックを仰ぎたいと考える。

－ 参考資料 －

- 1) 日本原子力学会「福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言」、丸善出版(2014年3月)。
- 2) 日本原子力学会水化学部会「核分裂生成物挙動」研究専門委員会準備会、「Phebus FP プロジェクトにおける核分裂生成物挙動のまとめ－福島プラント廃炉計画およびシビアアクシデントと解析への適用」、水化学部会報告 #2017-0001 (2017)。
- 3) S. Uchida, M. Naitoh, M. Pellegrini and H. Nagai, "Fission product behavior in Fukushima Daiichi NPP under severe accident conditions", Int. Conf. On Water Chemistry of Nuclear power Systems, NPC2016, Paper #44H, Oct. 2-7, 2016, Brighton, UK, Nuclear Institute (2016)。
- 4) OECD/NEA report, "Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (BSAF Project)," NEA/CSNI/R(2015)18, 2016。

著者紹介

勝村庸介 (かつむら・ようすけ)

日本アイソトープ協会
(専門分野/関心分野)水化学, 放射線化学
唐沢英年 (からさわ・ひでとし)

エネルギー総合工学研究所
(専門分野/関心分野)原子炉安全, FP 挙動
中村康一 (なかむら・こういち)

電力中央研究所
(専門分野/関心分野)原子炉安全, シビアアクシデント
高木純一 (たかぎ・じゅんいち)

東芝エネルギーシステムズ
(専門分野/関心分野)水化学, 放射線化学, 福島廃炉
逢坂正彦 (おおさか・まさひこ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)核燃料, FP 挙動
内田俊介 (うちだ・しゅんすけ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)水化学, プラント信頼性

米国における原子炉監督プロセス (ROP) 開始と定着に学ぶ

日本の検査制度改革を成功させるために

マトリクスK 近藤 寛子
東京大学 山口 彰

本稿では日本の原子力規制委員会が参照する米国の原子炉監督プロセス (ROP) に関し、その開発の背景と開発思想を論じる。ROP のメカニズムがどう働くかについて、関係者の共通理解と検討が進むプロセスを米国原子力規制委員会が構築し続けたこと、産業界とパブリックもこのプロセスに関与し続け、それぞれが原子力安全性向上を論じられる共通言語ができたことは、ROP 開発から 18 年たった今もなお、検査制度に対する信頼、原子力安全に対する公衆の信頼獲得、ならびにそれが容易に揺らがない実績の土台となっている。

KEYWORDS: *inspection, ROP, SALP, risk informed, performance based, collaboration, change management, dialogue, industry, public safety*

I. 検査制度改革を米国に学ぶ

平成 32 年度には原子炉監督プロセスが運用される予定である。原子力規制庁は「検査制度の見直しに係る詳細な検討事項と進め方」を示すとともに、検査制度の見直しに関する検討チームを設置し、(1)新たに事業者に義務付ける検査等に係る規制要求事項の整理・明確化、(2)規制機関による確認時期の設定と確認方法の明確化、(3)監視・評価の対象範囲、(4)監視・評価の実施に係るプロセス、基準の明確化、(5)規制判断に係るプロセス・基準の明確化を実施するとした。さらに、被規制者の実務担当からなるワーキンググループ (WG) を設置し、その場で詳細な検討を行っている。原子力規制庁の取組みは、新しい検査制度のベースとする考え方、米国の Reactor Oversight Process (ROP) における監視・評価の対象範囲やプロセス・基準を調査し、それを参照して我が国の枠組みを構築するというものである。新検査制度の効果的な運用と定着に大いに期待するところである。

さて、日本原子力学会ではリスク部会を平成 29 年に

設置し、本年 3 月には、「自主的安全性向上のためのリスク評価技術活用に関する PRA への期待と活用のための取組」の講演会を開催した。新検査制度において積極的な活用を期待されている確率論的リスク評価 (PRA) に関し、自主的安全性向上の活動における PRA の役割、国内外の PRA の活用事例を整理するとともに、米国動向を参考にしつつ PRA の現状と改善の方向性について議論した。これにより関係者の共通理解を深めたいと期待しての開催である。PRA は我が国において多くの手法開発研究や応用研究がなされてきた。しかし、残念ながらリスク活用を実務において効果的かつ実用的に行うまでには至らなかった。この反省を踏まえ、新検査制度が着実に成果をあげるためにはどのような準備が必要であろうか。すでに述べたように原子力規制庁は多様な活動を展開している。また電気事業者はリスク情報活用の実現に向けた戦略プラン及びアクションプランをこの 2 月に発表した。このような活動に支えられて試運用、実運用と進めれば新検査制度は定着しこの改革は成功するのであろうか。

近年、日米の PRA の関係者の交流が一段と深まってきた。米国が ROP を開始してそれが定着するまでには多くの失敗と試行錯誤を繰り返してきたと思う。その失敗教訓を糧とし、改善の道標として 20 年にわたって ROP を進化させているのではないだろうか。2000 年の

Learning from the start and establishment of the ROP (Reactor Oversight Process) in the United States, How to achieve successful oversight reform in Japan : Hiroko Kondo, Akira Yamaguchi.

(2018 年 5 月 23 日 受理)

ROP 施行直後に Davis Besse 発電所で原子炉压力容器上蓋の腐食劣化事象が発生している。この事象は米国原子力規制委員会の検査体制に重大な疑問を投げかけた。しかし、この事象が発生してもなお ROP の制度が定着し成功に至ったのは、ステークホルダーたちが互いに歩み寄り批判しあい不断の改善をつづけ、実効あるコミュニケーションをとったからである。米国の経験を奥深いところまで読み解いて正しく理解することは、我が国において新検査制度が定着し、実効性あるものとするために不可欠であると考え、当時の書物の調査と関係者への聴き取りに基づき本解説はとりまとめられた。

(山口 彰)

II. 検査制度改革を成功させるために

1. ROP 開発の歴史

(1) TMI 事故の反省に基づく検査制度変更

(a) 2 度にわたる米国原子力検査制度の変化

NRC 発足後、米国原子力発電所の検査制度は 2 度にわたり大がかりな変更が実施された。最初の変更は、スリーマイルアイランド原子力発電所事故(以下、TMI 事故)の反省から生まれた。2 度目は、1990 年代後半の NRC 改革時の SALP (事業者パフォーマンスへの体系的評価: Systematic Assessment of Licensee Performance) から ROP への変更である。

(b) SALP の誕生と追加措置

TMI 事故に関する大統領委員会が NRC に対し、規制の在り方について厳しい指摘を行ったことを背景に、事故の翌年 1980 年に、NRC は制度を刷新し、SALP を開始した。SALP は、それまでのケースバイケースで行われていた事業者のパフォーマンスを長期視点で総合的に評価しようと NRC が開発した制度である。

しかし、SALP は、主観的評価であることや、2 年前後に 1 度の検査という、結果が出る頃には発電所の状態が変わっているという適時性(timeliness)がないという弱点を抱えていた。1985 年に、デービスベッセ発電所における給水喪失事象が発生した。同発電所は SALP において、SALP の Operations で 3 段階中 2 (良好なパフォーマンス)を得ており、SALP において NRC は事象の予兆を見逃していたという指摘を受けることになる。問題に対する措置として NRC 幹部らが事業者のパフォーマンスを議論するシニアマネジメントミーティング(SMM)や問題ありのプラントをリスト化した「ウォッチリスト」が相次いで加わるなど、SALP 制度は複雑化の一途を遂げる。

(c) 原子力安全に関する産業界の取組

規制当局が制度見直しに取組んだ同時期、産業界も、自主的なプラント運転・保全力強化の取組に注力した。

原子力事業者は、TMI 事故後、原子力事故の深刻さから産業界全体での取組みを開始した。それは、1 社の問

題が業界全体に重大な影響を及ぼすことを踏まえ、事業者が一体となった安全性向上の取組である。「(原子力事業者は)互いが人質である(hostage of each other)」と INPO(Institute of Nuclear Power Operations: 原子力発電電運協)初代 CEO の Walter J. MacCarthy は述べる。個社に加え、産業界としてパフォーマンス向上を目指し、エクセレンスの実現と継続的な取組がスタートした。米国海軍原子力プログラムの原子力安全の原理原則に基づく普遍性を有する原則(principles)と具体的施策の検討および実施である。その一例に指標(performance indicator)策定とその運用(ベンチマーク化)を挙げることができる。

(2) SALP 廃止に至る経緯

米国検査制度の 2 つ目の変更は、SALP 廃止および ROP 開発である。SALP は、NRC 内外からの批判を受け、何年もの間改良検討が行われたのち、最後の 2 年で ROP 開発へと抜本的な見直しに向けて検討の舵が大きく切り替わったことで今日の ROP が生まれた。

(a) タワーズペリンレポートが明らかにした産業界と規制当局との関係が引き起こす根本問題

SALP 開始から 14 年後の 1994 年、“Nuclear Regulatory Review Study(仮訳: 原子力規制のレビュー研究)”と題するレポートがコンサルティング会社であるタワーズペリン社(当時)から発行された。同レポートは「規制プロセスに対する産業界の評価」を分析したものである。500 頁に及ぶ同レポートはプラント勤務の管理者から本社幹部まで幅広い層のアンケートおよびインタビューを通じて作成され、検査の実態が明るみとなった。

同レポートの要旨は以下の通りである。

1. 産業界が原子力安全に対する一義的責任を果たそうとも、強く、公正な規制機関は必要である。
2. 産業界だけでなく NRC もプラントの安全性強化に取り組んできたことは理解できる。
3. しかし NRC と産業界の関係は、重要課題の解決に効果的・効率的に取り組む関係ではない。
4. 産業界は、NRC の多くの活動が、公衆の健康と安全を高めるものになっていないと捉えている。

同社のレポートは委託元である NEI(Nuclear Energy Institute)を通じ NRC に提出された。2 か月後の 1994 年 12 月、NRC がレポートの著者と産業界の代表者ら 3 名を招集し、同レポート発行について質問を投げかけるパブリックミーティングを開催した。レポートの影響は産業界と NRC との間にとどまらず、上院議員による公聴会開催の引き金となった。

同レポート発行の狙いが何であったかと言えば、SALP 見直しではなかった。レポートの著者である元タワーズペリン社の L.Wass 氏は、当時のことを次のように振り返る。「レポートで我々が主張しようとしたのは

SALP 批判ではない。SALP は規制の問題が顕在化した症状にすぎない。レポートを通じ伝えたかったことは、より深い問題、規制が貧弱であることを根本原因分析したことにある。(略)レポートは、産業界と規制当局が、自らに問いかけ、協力し、自ら改善しようとするのを後押ししたに過ぎない。アメリカ国民が原子力安全という結果を享受できるよう、我々は、レポート作成を通じて、産業界と規制当局双方に有益な変化 (advantageous change) を導きだせるよう、橋渡ししようとした。」

NRC による同ミーティングの4か月後の1995年には、NRC が産業界とのコミュニケーションに関する方針を発行。事業者がNRC とのコミュニケーションにおいて、事業者が拘束感を持たなく (unconstrained) なるようNRC が取組むことが明示された。

(b) 会計検査院の指摘

米国会計検査院 (General Accounting Office) は、NRC の活動評価を定期的に評価し、必要に応じ勧告を出している。1997年「原子力安全規制：プラントにおける安全上の問題を防ぐためには、NRC がより効果的アクションをとる必要がある」と題した報告書を発行した。NRC が長年モニタリングしているパフォーマンス指標や追加検査は、安全パフォーマンス向上をもたらしていない現状など制度の有効性に対する懸念を指摘した。

(3) 議会によるNRCのオーバーサイト

議会の分科会において、NRC に対する公聴会が数度にわたり開催され、検査、許認可の現状、NRC 内部の検討状況を確認する議員によるオーバーサイトが行われた。アーカンソー州出身のティムハチンソン議員は、「原子力施設の安全性を確保する責務をもつ独立機関として、NRC は、原子力発電の重要な役割を担っている。原子力の重要性和厳重な保護と安全性を維持することに対する疑う余地のない要請があるからこそ、私は、原子力発電所が評価される今の方法に深い懸念を抱いている。原子力施設に対する評価が一貫性のある客観的な方法で管理されて (administered) いないという報告に対し心配している。」と述べた。

(4) 公衆の安全確保のための客観的基準を求めるパブリック

パブリックの概念は、多岐にわたるがここでは、「NRC にも産業界にも属さない第三者」を含めた広義の言葉として用いる。前項で公聴会に召集されたパブリックである UCS (Union of Concerned Scientist) の D. Lochbaum 氏は、公衆の安全確保の観点から検査制度の問題を指摘し、予見性ある客観的基準策定の必要性を訴えた。同氏の主張は以下の通りである。「公衆の保護に必要な安全システムについて、ある程度の確度でわかることができないなら、我々は発電所を運営すべきではない。いくつかのプラントで、安全システムが十分機能せず運転されてきたことが、近年発行された多くの報告書

からわかる。(略)産業界はNRCが過剰規制だというのが、同様に過少規制もある。両方の例が存在するのは、NRCの規制が主観的で一貫性がないからである。発電所を停止すべきか、再稼働してよいのかという決定ができるための客観的な基準をNRCは策定すべきである。」

(5) 改革派委員長の就任によるNRC改革、そして内部検討の行き詰まり

NRC に対する関係者からのプレッシャーが強まり始まる1995年、S.Jackson氏が委員長に就任する。同氏は、B.Clinton大統領に指名された初のアフリカ系、初の女性委員長であった。Jackson委員長は、「NRCが健康と安全の確保というファンダメンタルなミッションを再認識し、規制組織としてのミッションをもっと発揮できるようになること」を目指し、改革に乗り出す。1997年には、「健康と安全の確保」という目的を実現できる監督プロセスの策定に向け、外部コンサルティング会社による外の目も活用し、複雑化した検査プロセスの統合化 (IRAP; Integrated Review Assessment Processes) 検討を開始する。しかし、外部関係者の期待に応えた成果を示せるようになるまでの間、前項で論じたような批判を浴びることになる。

2. ROP 開発の経緯

(1) 先例となった産業界のメンテナンスルール

ROP が誕生できたのは、「公衆の健康と安全の確保」を実現するため、その方法として、原子力安全の一義的責任者であり産業界をあげて原子力安全性向上とマネジメント力強化に取り組んだ事業者の知見をNRCが取り入れ、制度化したことにある。

TMI 事故後、産業界では長年にわたる不断的努力が成果を出し始めた。リスク情報の活用や、指標を活用したパフォーマンスベースドのマネジメントノウハウを蓄積する中、リスクインフォームドの規制としてメンテナンスルール策定にも取り組んでいた。この策定方法は、規制当局、産業界双方がリスク情報活用を活用した検査制度を検討する際に参照可能なものであった。産業界で技術的検討や規制検討を行う NEI (Nuclear Energy Institute) の CEO (当時) J.Colvin 氏は次のように述べる。「リスクインフォームドでパフォーマンスベースドの規制の中身をどうつめていくかについて、我々には優れた事例がある。(略)最初にとりかかることは、包括的に、つまりハイレベルでのプロセスについて共通認識をもつことである。」

(2) 産業界による包括提案

1998年7月、Jackson委員長を議長とする「関係者の懸念」と題したパブリックミーティングが開催される。同ミーティングで、NEI はNRC に対し包括 (over-arching) 提案である「新しい規制のオーバーサイトプロセス」を提示した。同提案は、それまでNRC内の

統合検討とは異なるコンセプト (fundamentally and philosophically different) であった。同提案において、放射性核種放出に対するバリアを維持し、バリア上の課題 (challenge) となりうる事象を最小化し、システムの機能が意図する形ではたらくよう、階層化された事業者のパフォーマンスが示された。各階層のパフォーマンスはまず高次レベルの客観的指標で評価できるようになっており、各指標は、閾値を設定することで事業者対応の領域 (response band)、規制対応領域、許容できないパフォーマンス領域で評価される。安全の閾値および規制の閾値に応じた規制のアクションモデルに加え、実際の検査業務体制へモデルを実装できるよう、検査計画から結果のアセスメントにわたる検査のプロセス案も含まれていた。

(3) ラウンドテーブル型議論の成果

NEI が行った NRC への提案の場には、NRC 内外の関係者も同席していた。NRC 内では、Jackson 委員長、検査ガイドの策定および実施に関する NRC 本部の総責任者、事務総長等に加え、NRC の助言機関である ACRS の元議長、そして、産業界からは、WANO 議長、原子力事業者幹部、パブリックの代表者が参加していた。

議論は、制度の方向性に関するものから、制度の移行における重要成功要因、運用上の懸念まで広範にわたった。ACRS の元議長である Remick 氏は、「NEI 案を検討するにしても、目指す目的を明確にすべきだ。関係者が結集して (collegially) 目的や目的への到達状況を確認できるように指標を設定すべき」と述べている。新制度への移行について、Callan 運営総局長は、良好かつ十分な基準が必要であることを認めつつも、実現性について懸念を表明する。「それは組織文化の変革、職員の行動変容を必然的に伴うものである。その変革の過程においてとても多くのやるべきことがある。変化が起きなければ、我々がここで議論しているような画期的な改善は起こせないのではないだろうか。」

実現性に関し、事業者も「サイトの検査官にとって役立つロバスタなガイダンスが不可欠である」ことが強調された。これらに対し、原子炉向けガイド策定および検査実施の総責任者である Collins 原子炉規制室長は、「本当に重要なことへ事業者も規制当局も注力するという共通の理念 (philosophy) について反対しない。いかなる指標も相互に同意される必要がある。我々は、結果をもとに取り組むのであって、今、やられているプロセスでありがちな、ただ情報のみをみるだけ、ということではない。」という見解を示した。

同会議の終わりに Jackson 委員長は、これからの検査制度検討の方向性を示す。「ここにいる方々は今日の議論がラウンドテーブル型の議論であったと感じただろう。(略)今日の会議そのものが、われわれが議論した内容のエッセンスを形作っていくための一つのチャレンジ

でもある。特に NRC 内のマネジメント問題、NRC 活動の適時性、リスクインフォームドの規制に対する洞察、検査に対する調整やプロセス見直しの必要性、サイト対応における規制プロセスの乱用といったことについて、さらに言えば、こうした機能的問題を規制監督体系において、論理的でまとまったものにしていくよう注視する」

(4) 議会への説明と ROP 開発の加速化

同パブリックミーティング直後に開催された議会の公聴会において、参考人として呼ばれていた Jackson 委員長は、「NEI の提案は NRC の原子炉アセスメントプロセスに関する我々の見解を補完し、適合するもの」「この種の提案をもって前に進み出る産業界は有益である」と説明した。ROP 案は、「あらゆる関係者が関わることで出てきた提案」と述べている。

NRC 委員会は NRC 本部に対し、それまで個別に行われていたオーバーサイトプロセスの見直し検討を一本化検討するよう方針を出し、ROP 開発と開始に向けた変革のコミュニケーションが急ピッチで進められることとなった。

組織行動研究者の M. Ferdig 氏によれば、NRC の ROP 開発に見られる特徴は、異なる視点を持つ関係者が協働し、オープンなコミュニケーションをとったことであるという。NRC の ROP 開発プロセスを調べると、コラボレーションとオープンなコミュニケーションが浮かび上がる。

2 か月後の 1998 年 9 月下旬から 10 月上旬にかけて、ROP の理念について議論と合意形成を行う ROP 開発のためのワークショップが開催された。NRC から本部、リージョン、内部監視組織、産業界からは、事業者、NEI/NPO、パブリックから複数の団体、その他行政機関 (自治体、他省) 等、総勢 300 名が参加し、ROP の目的を確かめ合い、根幹となるコーナーストーンを定義した。

3 か月後の 1999 年 1 月には、現行制度を見直すための勧告書 (SECY99-007) が発行される。今回の制度変更が「プラントの安全運転に大きな影響を及ぼすパフォーマンスの側面により大きな焦点をあてるためのものである」ことを関係者が正しく理解できるよう促すものであった。500 頁近くにわたる同書では、制度の移行計画にも触れられており、NRC は、新しい制度が産業界とパブリックとの協働 (work closely) によって作成されたことを明らかにした。

(5) 開始時の困難を乗り越え進化できるプロセスを備えた検査制度へ

ROP はその後 9 プラントにおける半年のパイロットプログラムを経て、導入へと進められた。パイロットプログラムを適切に進めるためのオーバーサイト機能として、独立した第三者委員会が設置され、入念なコミュニケーションプログラムが広範囲の関係者向けに展開され

た。ROP の本格開始に向け、産業界、パブリックの関与も得ながら検討を進めた。

しかし NEI の提案からわずか1年半という極めて短期間での検査制度開発と運用開始は、いかに入念なコミュニケーションプログラムを計画し実行しようとも、数多くの課題を顕在化させることになった。

会計検査院は、「NRC 職員は今回の計画的変更を完全に受け入れたわけではない」という報告書を発行し、チェンジマネジメント戦略の必要性を指摘している。

ROP 開始時の NRC 委員長である R.Meserve 委員長は、ROP 開始にあたり以下のように述べている「4月からの ROP 開始に向け我々の作業は進展しているが、職員に対するトレーニングや関わりを含め、今後も継続的に調整をしながら(ROP の運用を)進めていくつもりである」

同時期、産業界も、規制当局のルールを満たせばよいという発想から抜け出そうと取り組んだ。NEI の当時副社長であった S. Floyd 氏は NRC に対しこのように述べる「よりリスクインフォームドでパフォーマンスベースな制度にしていくために、立ちはだかる諸問題に取り組む。産業界はさらにパフォーマンスを高めるつもりである」

3. 小括

1. 米国の ROP は、官産民による検討を通じ、「原子力安全に対し公衆から信頼を得ること」が基本理念として合意されたオーバーサイト(監督)制度で、2000年4月から開始された。
2. 開発前の1980年代～1990年代前半にかけ、米国において原子力発電オーバーサイトプロセスが公衆の健康と安全を確保するものになっているかについて、NRC をとりまくステークホルダー(産業界、他の政府機関、議会、パブリック、世論など)から疑問符がついた。
3. NRC に対するステークホルダーからのプレッシャーが強まる中、NRC は「公衆の健康と安全の確保」という目的を実現できる監督プロセスを策定しようと、内部検討チームを立ち上げるが、行き詰まりを見せた。
4. ROP が誕生したのは、「公衆の健康と安全の確保」という目的実現のために、その方法として、原子力安全の一義的責任者であり、産業界をあげて原子力安全性向上とマネジメント力強化に取り組んだ事業者の知見を NRC が取り入れた制度を作ったことにある。(近藤寛子)

III. まとめ

米国では ROP へと検査制度の転換を遂げた今もなお、本来の目的を忘れることなく制度改善に取り組んで

いる。関係者の共通理解と検討が進むプロセスを NRC が構築し、産業界とパブリックもこのプロセスに関与するメカニズムが機能し、原子力安全性を向上させようとの共通の目的に向けて取り組む。この検討の土台には、産業界が原子力のパフォーマンス向上に信念をもって長年取り組み、安全性向上の成果を出そうとし、NRC が産業界に見られる変化を徐々に認識した経緯がある。このことが意味するのは、ROP という制度になれば、自動的に原子力安全性が向上するということではない。我々は米国の経験を表面的に眺めるだけでは不十分である。日本においても、検査制度の改革は産業界による不断の努力にかかっている。それこそが、自主的・継続的安全向上の取組みにほかならない。

— 参考資料 —

- 1) D. Lochbaum, Reactor Oversight Process, Disaster by Design/Safety by Intent, Union of Concerned Scientists, 2016.
- 2) GAO, Nuclear regulation, preventing problem plants requires more effective NRC action, GAO/RCED 97-145, 1997.
- 3) GAO, NRC staff have not fully accepted the planned changes, GAO/RCED 00-29, 2000.
- 4) Hearing before the subcommittee on clean air wetlands, private property and nuclear safety and the committee on environment and public works United States Senate, 1998, 2000.
- 5) Joseph V. Rees, Hostages of each other, the transformation of nuclear safety since three mile island, the University of Chicago Press, 1994.
- 6) M. Ferdig and J. Ludeman, Transformative interactions: qualities of conversation that heighten the vitality of self-organizing change, Research in Organizational Change and Development, 2015.
- 7) NRC, Inspector manual 0308.
- 8) NRC, Public meeting on stakeholders' concerns, 1998.
- 9) NRC, Recommendations for reactor oversight process improvements, SECY 99-007, 1999.
- 10) Towers Perrin, Nuclear regulatory review study, 1994.

著者紹介

近藤寛子 (こんどう・ひろこ)

マトリクス K

(専門分野/関心分野)業務改革, チェンジマネジメント/原子力安全行政, ステークホルダーダイアログ



山口 彰 (やまぐち・あきら)

東京大学大学院

(専門分野/関心分野)原子炉工学, システム安全, リスク学など



プルトニウムをどうしよう？

フリージャーナリスト 井内 千穂

かつての核実験により世界中にまき散らされ、そこら中にあるらしいプルトニウム。

日本は、核実験ではなく原子力発電の使用済み燃料から取り出したプルトニウムを国内外合わせて47トン保有しているとか。それが「原爆6,000発分に相当する」のか、軽水炉の使用済み燃料から抽出されたプルトニウムでは不純物が多く実用的な核爆弾は製造できないのかはともかく、核兵器になりうる47トンの塊(?)は一般市民の感覚では怖いと言うほかない。どこにどうやって保管してあるのだろうか？

折しも、1988年に発効した現行の「日米原子力協定」が30年の満期を迎え、7月17日に自動延長された。日本の「核燃料サイクル政策」の基盤であったこの協定の自動延長に際し、米側からプルトニウムの適切な利用・管理を求められたことを受け、日本政府が7月3日に閣議決定した新エネルギー基本計画には「プルトニウムの保有量削減に取り組む」と初めて明記された。どうやって削減するのか？

プルトニウムを使うはずだった高速増殖原型炉もんじゅは既に廃炉が決まっている。そこで、原発を再稼働しプルサーマル発電を一層推進する方針が掲げられているが、原発から発生したプルトニウム削減のための原発再稼働とは、何とも本末転倒に聞こえる。しかも、プルサーマル発電で消費されるプルトニウムの量は、120万キロワット級の大型原発でも年間0.4トン程度だという。それでは大して減らないのではないのか？やはり、プルトニウムも核燃料サイクルも高速増殖炉あってこそだと思うが、もんじゅに代わる高速増殖炉がいつの日か実用化されることはあるのだろうか。それまで再処理を進めなければ使用済み燃料は各原発に溜まったままだし、再処理を進めれば当面使い切れないプルトニウムが増えていく。一体どうすればいいのか？エネルギー、安全保障、発電コスト、最終処分地、そして、災害列島日本。諸々のパラメーターを入れ込んだAIに聞いてみたいぐらいだ。いや、それは人間が考えるべきことか・・・。

Column

「よーい・どん」と「オレンジフラッグ」

日本文理大学 工学部 北岡 哲子
特任教授

津波は怖い。東日本大震災後の被害調査により、海域海岸利用者には防災無線やサイレンが聞こえないくい事実が判明した。迅速な避難を促す聴覚より視覚に訴える合図の必然性が、オレンジの旗を、行政が指定した海から見える津波避難ビルやタワーに掲げるといふサインを生んだ。「津波が来る。海から上がれ」という警告と、安全な避難場所を示す2つの意味が解れば、外国人や難聴者の方も、直ちに旗を掲げた建物に逃げ込み安全を確保できる。この鎌倉発祥のアイデアに基づく取り組みはオレンジフラッグ・プロジェクトと名付けられ、全国に拡がりつつある。

そもそも合図とは、予め取り決めた方法で物事を知らせる方法や信号であり、交通信号も青で進み赤で止まる約束が広く認知されているため、皆その行動がとれる。

以前、拙著「スポーツをテクノロジーする」執筆の際、日本人なら誰もが知っている陸上競技の「いちについて、よーい」のスタート合図は、一体いつ誰が決めたのか関心を持った。

資料から「位置について」は、明治11年頃、英語の「アテンション」が当てられていたが、英語が解らない人は、「合点承知」をもじり「合点しょん」と理解していた。また、明治末から大正にかけては、「腰上げてまてえ」や「おんちやなけつあげえ」等が使用されていた。驚くことに「オン・ユア・マーク、ゲット・セット」という英語も用いられており、これに代わる日本語の合図用語を、全日本陸上競技連盟が一般懸賞募集をし、当選作が「いちについて、よーい」だった。昭和3年のことである。

長い時が流れ、いつしかオレンジフラッグも誰もが知る合図になり、防災効果を上げていると期待したい。

モロッコのエネルギー事情

コメニウス大学
医学部英語コース 妹尾 優希

モロッコよりこんにちは。交換留学プログラムにて、モロッコのフェズ市の病院に外科実習のため、1ヶ月間ほど滞在しております。本稿では、モロッコのエネルギー事情についてお話します。モロッコ王国は、アフリカ北西部に位置し、北西部はジブラルタル海峡と地中海、西部は大西洋、東部はアルジェリアに面しています。西サハラを除くと、国土は日本の約1.2倍のおおよそ44.6平方キロメートルで、人口は3,528万人(2016年世界銀行調べ)です。資源の乏しいモロッコのエネルギー輸入依存度は91%、エネルギー自給率は9%ほどと、日本のエネルギー輸入依存度の88%、自給率の6%とほぼ変わりません。主なエネルギー源は、石油と天然ガスでエネルギー資源の62%をしめています。近年、金融業や製造業の発展が進み、世界の対アフリカ投資国として注目をされているモロッコでは、脱石油依存にむけて現在再生可能エネルギーの推進が注目されています。2016年11月にCOP22(国連気候変動枠組み条約22回締約国会議)が開催された、マラケシュから200キロほど離れたアトラス山脈に位置するドアラ＝タフィラルト地方では、450ヘクタールもの集中型太陽光発電所「ノア1」が今年2018年より発電を始めました。この世界最大の太陽光発電プラントは、モロッコの全人口の約3%に該当する100万世帯に電力を供給することができます。「ノア1」プロジェクトの他にも、家庭用の太陽光発電の設置が進んでおり、私の滞在先のアパートの屋上にも、導入されています。日照時間の長いモロッコでの、CO₂の排出量を大幅に抑えつつ経済発展を支える要となる太陽光発電の今後の発展は見逃せません。次の投稿では、モロッコの原発事情について触れたいと思います。

Column

原発の新設・建替えとエネルギー基本計画

国際環境経済研究所
理事・主席研究員 竹内 純子

4年ぶりに改訂されたエネルギー基本計画で最も注目されたのは、前回の基本計画では言及されなかった原子力発電所の新設・建替えに関して、政府がどのような方針を示すかであったろう。結論から言えば読者の皆さまもご承知の通り、前回計画と同様、新設や建替えと言った言葉は一切登場しなかった。「依存度を低減する」と言いながら「重要な電源」であるといい、「安全性・機動性・経済性に優れた炉を追求」という。前に進むのか後ろに退くのかもわかりづらい表現に留まった。原子力事業をこれ以上不透明な状況に置くのは「生殺し」にも近く、国民も立地地域も事業者も疲弊してしまうだろう。できるだけ早くわが国にとっての原子力技術の在り方を政府が明確に示すことを期待したい。

しかし、その上であえて原子力技術の関係者にも申し上げたい。政府の基本計画に書かれなかったからといってそれが何なのか。現在発電事業は完全に自由化されている。事業が市場に委ねられたいま、政府が基本計画を策定することの意義は従前とは全く異なっている。この技術が国民にメリットをもたらすと信じるのであれば、「政府の計画に書かれていようがいまいが関係ない、我々は市場で選ばれる電源であり続ける努力をするまでだ」という言葉が聞かれないのは余りに寂しい。今次計画には新設・建替えを「する」あるいは「させる」と言った言葉は出てこないが、「させない」とも書かれていない。

もちろん原子力が単なる発電の一方途を超えた技術であり、政府の事業環境が必須であることは私自身繰り返し申し上げている通りである。しかしエネルギー基本計画に書かれていないからもうダメだ、ではあまりに情けない。今こそ関係者の矜持が問われるときなのではないだろうか。

表裏一体

東洋大学社会学部 渡辺 真由

「もしこうだったら、自分はどうなっていたかな？」

誰もが一度は考えるフレーズ。これを震災と事故に当てはめてみる。

もし“あの震災と事故”がなかったら、何万もの人が自分の故郷で当たり前の生活をし、穏やかな海を砂浜で眺めていただろう。あんなことなかったら・・・と思う反面、本当に「もし」の世界だったら、という怖さもある。

「もし本当にあの出来事がなかったら」、私は、避難してきた友達と出会うことはなかったし、震災をきっかけとした活動にも参加することもなかった。こんなにも東北に注目が集まることもない。誰も原発の安全性を気にすることはないし、様々な人がこのコラムのコーナーで原子力・原発について、こんなにも真剣に語ることもない。今読んでいるこのページも存在しない。もしかしたら復興に当てられた分のお金で、東京スカイツリーがあと5本くらい建っていたかもしれない。

震災後、外で遊ぶ事ができない福島の子を思いっきり遊ばせたい！という趣旨のプログラムがあった。交通費以外、全て寄付などで成り立っている。親に勧められ、私は参加した。同じ地元の子、ホームステイ先の家族、ボランティアで参加した大学生、一緒に海で遊び、トウモロコシを丸ごとかじり、北海道の夏を堪能した。八年経った今でも、ホームステイ先から北海道の野菜が贈られてくる。そういった人との繋がりが、震災後より強く感じられるようになったと思う。

嫌な思い出、だけではないって事を知ってもらえたなら。

Column

ケアと日本社会

東京大学大学院
工学系研究科 原子力国際専攻 渡辺 凜

ある人ができること、できないことについて、何を「本人の努力の問題」と捉えるかは信条の問題だ。

たとえば、「やる気が出なかった」「時間を守れなかった」ということを、イスラーム教では常に「神の思召し」と捉えるが、日本では「本人が努力すれば、そうならなかったはず」と受け止めることが多い。出来事だけでなく、本人の素質についても、「朝が弱い」「簡潔に話せない」など仕事の効率に直結する場合は特に、「世の中こんな人もいるよね」とならず、本人の努力による改善を求める雰囲気が、日本にはある。そんな日本で努力不足の責めを逃れられるのは、病気くらいではないか。このためか、書店やネットには「～症候群」についての書き物があふれている。それらの書き物によれば、一般的な癖や性格の特徴も、生活に著しい困難をもたらす場合は病気で、本人の努力だけでなく、周囲の助けや専門家の介入が求められる。たとえば、刺激に敏感で消耗しがちな人は“Highly Sensitive Person(過敏性症候群)”である可能性が示されている。

こうした状況を「～症候群の多用」と批判する声もあるが、ただ困っているだけでは「本人の努力の問題」とされてしまう社会において、当然の帰結ではないか。そして、「本人の努力」説の偏重は、「オレも苦勞してるんだから、他の人も自分でどうにかすればいい」という負の連鎖を通じて社会に蔓延する。各人が自ら頑張るだけの社会は、そもそも形成する意味があるのだろうか。

病的な症状や経済的困窮に対して、原因(「本人の努力不足」など)を明らかにするだけでは足りない。「どうすれば困らなかったか」だけでなく、「困ったときにどうすれば良いか」を答えられる社会でありたい。

ミクロ～マクロレベル現象の粒子ベース シミュレーション～課題と展望～

第3回 最先端粉体シミュレーション技術

東京大学 酒井 幹夫

粉体の数値シミュレーションでは、離散要素法と呼ばれる粒子ベースの数値解析手法(ラグランジュ的手法)が広く使用されている。粉体の数値シミュレーション技術は、シビアアクシデントの現象把握や燃料デブリの取り出しをはじめとする原子力分野の重要な課題に応用できる可能性がある。本解説では、離散要素法の概要とともに、離散要素法を用いた粉体および混相流の数値シミュレーションについて述べる。最先端の粉体シミュレーション技術は、実現象の再現性が極めて高い水準にあることを示す。

KEYWORDS: *computational granular dynamics, discrete element method, solid-fluid coupling problem, signed distance functions, immersed boundary method*

I. はじめに

著者の専門は、ラグランジュ的手法(粒子法)の離散要素法を用いた粉体シミュレーションである。離散要素法¹⁾は、ニュートンの第2法則に基づいて個々の固体粒子の挙動を模擬する計算手法である。粉体シミュレーションは、原子力工学ではなじみがないと思う本誌の読者も少なくないと思う。ところが、皆さんの予想を裏切り粉体シミュレーションの原子力工学への応用は少なくない。具体的には、軽水炉や MOX 燃料の製造プロセス、高温ガス炉で使われる TRISO 燃料のコーティング、ガラス固化体製造プロセスの微粒子の挙動、シビアアクシデントの燃料デブリ挙動、燃料デブリの取り出し時の切り粉の流動、などがあげられる。

粉体は、空気や水のような連続体ではなく不連続体であり、その挙動は連続体のものとは全く異なる。また、不連続体の力学はまだ確立されていない。従って、粉体の挙動を予測するには、離散要素法のような個々の固体

粒子の挙動を模擬するプリミティブな手法を用いざるを得ない。本報では、離散要素法や離散要素法を用いた固体-流体連成解析手法の概要および応用事例について紹介したい。

II. 粉体シミュレーション

1. 離散要素法

まず、離散要素法の基礎式について述べる。先に述べたように、離散要素法はプリミティブな計算手法であり、ニュートンの第2法則に従って、個々の固体粒子の挙動を計算する。固体粒子に作用する力は、固体粒子間もしくは固体粒子-壁間に作用する接触力および重力であり、固体粒子の並進運動に関する運動方程式は、

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \sum \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_g \quad (1)$$

のように表される。ここで、 m 、 \mathbf{v} 、 \mathbf{F}_c 、および \mathbf{F}_g は、それぞれ、固体粒子の質量、固体粒子の速度、固体粒子に作用する接触力および重力である。

離散要素法では、固体粒子は剛体であるが、固体粒子の接触時に固体粒子間にオーバーラップが生じることを許容し、このオーバーラップを変位として接触力を計算する。具体的には、固体粒子に作用する接触力は、ばね、ダッシュポットおよびフリクションスライダーにより模擬される。式(1)における接触力の算定に際して、注目する固体粒子に接しているすべての固体粒子の接触力の

What can be achieved with particle simulation? -challenge and foresight- (3) ; State-of-the-art numerical technologies for granular and multi-phase flows : Mikio Sakai.

(2018年5月2日受理)

■前回タイトル

第2回 第一原理原子・分子シミュレーションの現状と原子力分野での研究進展

総和を計算する。 F_c は法線方向成分と接線方向成分に分けられ、接触力の法線方向成分は、

$$F_{c_n} = -k\delta_n - \eta v_n \quad (2)$$

のように与えられる。ここで、 k 、 δ および η は、それぞれ、ばね定数、変位および粘性減衰係数である。下付きの n は、法線方向成分を意味する。式(2)において、右辺第1項は弾性力であり、右辺第2項は粘性減衰である。式(2)の η は反発係数と関係づけられる。接触力の接線方向成分は、

$$F_{c_t} = \begin{cases} -k\delta_t - \eta v_t & |F_{c_t}| \leq \mu |F_{c_n}| \\ -\mu |F_{c_n}| t & |F_{c_t}| > \mu |F_{c_n}| \end{cases} \quad (3)$$

のように与えられる。ここで、 μ および t は、それぞれ、摩擦係数および接線ベクトルである。下付きの t は、接線方向成分を意味する。 F_{c_t} は、式(2)に示すように、固体粒子が固体粒子または壁面において滑る場合と滑らない場合とで場合分けがなされる。

離散要素法では、固体粒子の回転運動も考慮し、回転運動に関する方程式は、

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{F}_{c_t}}{I} \quad (4)$$

のように表される。ここで、 ω 、 I および \mathbf{r} は、それぞれ、固体粒子の角速度、慣性モーメントおよび固体粒子の中心から接触点までの位置ベクトルである。

上記のモデル化を行い、固体粒子に作用する接触力を評価して、全ての固体粒子の位置および速度の情報を更新する。多くの場合、陽的なスキームで固体粒子の情報を時間積分して、固体粒子の速度および位置を更新する。

2. 離散要素法を用いた固体-流体連成解析手法

マクロスケールを対象とした固体-流体連成解析手法について述べる。ここで述べるマクロスケールとは、固体粒子周りの流れ場を詳細に模擬するのではなく、固体粒子よりも大きなスケールの流体の挙動を模擬することを意味する。このようなマクロスケールを対象とした固体-流体連成シミュレーション手法には、離散要素法と数値流体力学を連成したDEM-CFD法²⁾があり、世界標準の数値解析手法として知られている。固体-流体連成シミュレーションにおける固体粒子の基礎式の並進運動については、式(1)に示した接触力に固体粒子-流体間相互作用が追加される。固体粒子の並進運動の運動方程式は、

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \sum \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_a - V \nabla p \quad (5)$$

のように与えられる。ここで、 \mathbf{F}_a 、 V および p は、固体粒子に作用する抗力、固体粒子の体積および流体の圧力である。式(5)における \mathbf{F}_c は式(3)と同様に与えられ、 \mathbf{F}_a は、

$$\mathbf{F}_a = \frac{\beta}{1-\epsilon} (\mathbf{u} - \mathbf{v}) V \quad (6)$$

のように与えられる。ここで、 β 、 ϵ および \mathbf{u} は、それぞれ、固体粒子-流体運動量交換係数、空隙率および流体の速度である。 β は固相の体積分率に影響を受けることが知られており、固相の空隙率が80%以下または80%より高い場合で、それぞれ、Ergunの式³⁾およびWen-Yuの式⁴⁾が使われる。すなわち、 β は、

$$\beta = \begin{cases} 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon} \frac{\rho \nu}{d^2} + 1.75(1-\epsilon) \frac{\rho}{d} |\mathbf{u} - \mathbf{v}| & \epsilon \leq 0.8 \\ \frac{3}{4} C_d \frac{\epsilon(1-\epsilon)}{d} \rho |\mathbf{u} - \mathbf{v}| \epsilon^{-2.65} & \epsilon > 0.8 \end{cases} \quad (7)$$

のように与えられる。ここで、 ρ 、 d 、 ν および C_d は、それぞれ、密度、固体粒子の粒子径、動粘度および抗力係数である。もちろん、固体-流体連成問題であっても、固体粒子の回転を考慮する(式(4)を用いる)。

連続相である流体の基礎式は、局所体積平均法を導入した連続の式およびナビエ-ストークス方程式であり、

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\epsilon \rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon \rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\epsilon \nabla p - \frac{\sum \mathbf{F}_a}{V_{grid}} + \nabla \cdot (\epsilon \tau) + \epsilon \rho \mathbf{g} \quad (9)$$

のように与えられる。DEM-CFD法では、CFDの格子サイズは固体粒子径よりも大きく設定する。式(6)および式(9)の右辺第2項より、固相と連続相の間の運動量は保存される。このように、DEM-CFD法では、局所体積平均に基づく基礎式を用いて、固相および流体の間の運動量交換を行うことにより、マクロスケールの固体-流体連成シミュレーションを実行できる。

III. 粉体の数値シミュレーション

粉体の数値シミュレーションの事例として、粉末金型充填の数値シミュレーションを紹介する。原子燃料の製造プロセスにも粉末金型充填が使用される。著者のグループでは、符号付距離関数⁵⁾を用いて固相の任意形状の壁面をモデル化する手法を開発した。符号付距離関数を用いると、計算対象領域の内外を意味する符号(正および負)と粒子と壁面までの距離を掛け合わせたスカラーフィールドにより離散要素法の壁面を作成できる。本研究では、東京大学の校章の銀杏型の構造物が矩形容器に挿入された金型に粉体を充填する体系⁶⁾を選定した。計算および実験の体系を図1に示す。金型の大きさは、25 mm × 25 mm × 25 mmであり、その内部に東京大学の校章である銀杏の構造物が挿入されている。金型をはじめ構造物は符号付距離関数でモデル化されており、粉体が流動できる領域の符号が正となり、銀杏の構造物の内部の符号は負となる。本研究では、粉体が入ったボックスを0.052 m/sで移動させ、金型に粉体を充填した。シミュレーション結果の妥当性を検証するために

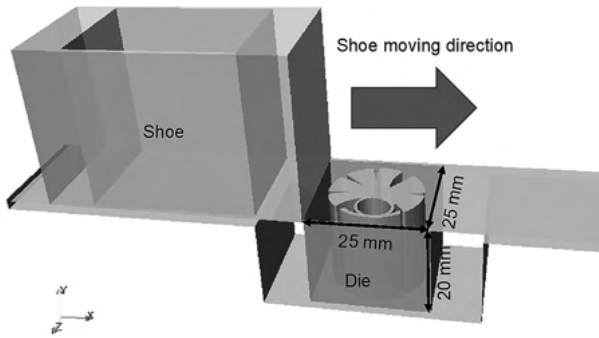


図1 粉末金型充填体系

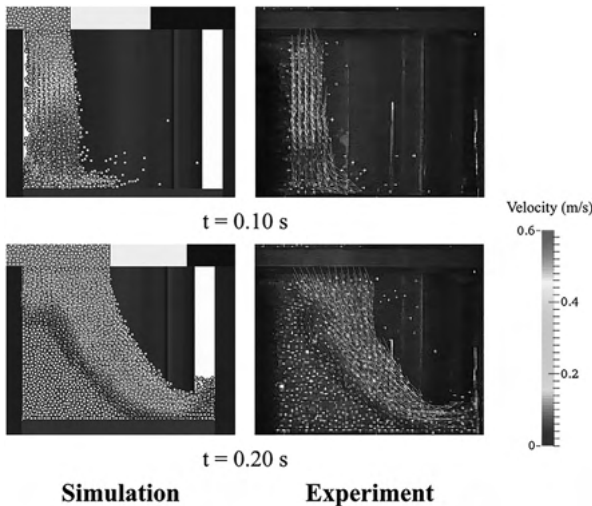


図2 粉末金型充填における Validation test の結果

実験を実行した。図2にシミュレーション結果および実験結果を示す。図2では、固体粒子の空間配置および固体粒子の速度ベクトルを示している。実験における速度ベクトルは、Particle Image Velocimetry より得た。図2から明らかなように固体粒子の空間配置および速度分布は両者でよく一致していた。ところで、著者らは、ほとんどの場合、検証実験を行う前に計算を実行しており、特別なチューニングを行っていない。物性が既知の粉体(ガラスビーズなど)を使用すれば、最先端の粉体シミュレーション技術により、実験結果をきちんと再現できる結果が得られることがわかっている。

IV. 混相流の数値シミュレーション

混相流の数値シミュレーションの事例として、噴流層および流動層の数値シミュレーションを紹介する。

1. 噴流層

混相流の数値シミュレーションの事例として、噴流層の数値シミュレーションについて述べる。原子力分野に造詣の深い方には釈迦に説法ではあるが、噴流層は、原子力分野では、高温ガス炉のTRISO燃料のコーティングプロセスなどで用いられる。

本節では、著者のグループで取り組んだ噴流層の数値

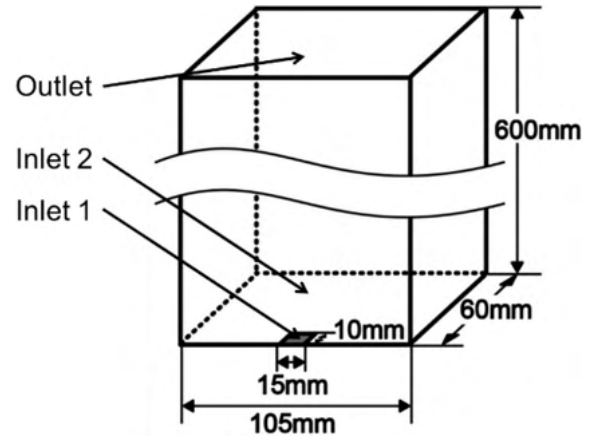


図3 噴流層

シミュレーションに関する研究成果⁷⁾の一部を紹介する。ところで、著者のグループでは、離散要素法のスケーリング則モデルとして、DEM粗視化モデルを開発している。DEM粗視化モデルは、実際の粒子群を大きなモデル粒子(粗視化粒子と呼ばれる)で代表する計算手法であり、実際の粒子のM倍大きな粗視化粒子を使用すれば、粒子数をM³分の1にすることができる。DEM粗視化モデルでは、実際の粒子群(粗視化粒子に含まれる)と粗視化粒子との間に、運動エネルギーおよびポテンシャルエネルギーが一致するように定式化がなされているため、並進運動ばかりでなく、回転運動もスケーリング則を考慮することができる。

解析体系は図3であり、底部に2カ所の流入境界が設けられ、inlet 1 および inlet 2 から、それぞれ、20 m/s および 0.50 m/s で空気を流入させた。固体粒子はガラスビーズであり、本研究では、実際の固体粒子の体系で540,000個とし、粗視化率を3倍にした体系で20,000個とした。粉体の混合状態が可視化できるように、2種類の色の固体粒子を用いた。

図4は、噴流層における実際の粒子の体系とDEM粗視化モデル(粗視化率M=3)の体系の計算結果(空気流入後から1秒後および3秒後のスナップショット)である。図4の左側の実際の粒子体系右側のDEM粗視化モデル体系の固体粒子の空間分布が一致していた。Lacey's mixing index⁸⁾という粉体混合に関する指標を導入して、白色と橙色の固体粒子の混合状態を評価すると、実際の粒子体系とDEM粗視化モデル体系でよく一致していた。このように、実際の粒子体系とDEM粗視化モデル体系の混合状態が一致するのは、両者の固体粒子のマクロ挙動が一致するからにはほかならない。そこで、圧力損失および固体粒子の速度分布(底部から45mmの高さ)について、実際の粒子体系とDEM粗視化モデル体系を比較した。粉体層の圧力損失および固体粒子の速度分布ともに、実際の粒子体系とDEM粗視化モデル体系で一致した。また、DEM粗視化モデルのようなスケー

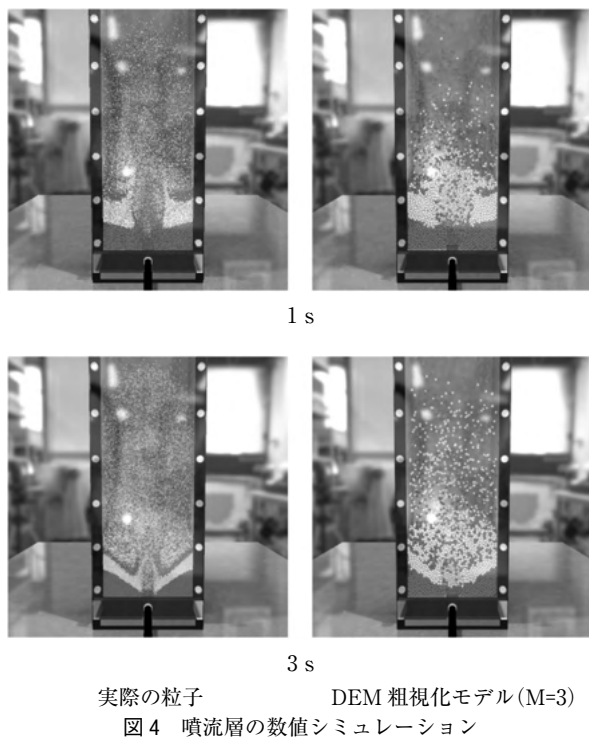


図4 噴流層の数値シミュレーション

リング則を導入すれば、実際の体系よりも高速に計算できることも示した(図5)。図5は粗視化率と計算時間の関係であり、本図より粗視化率が大きくなれば計算時間(特に、固体粒子の計算時間)を著しく低減できることがわかる。DEM-CFD法では、固体粒子である離散要素法の計算負荷が大きい(なお、著者のグループでは、流体計算において高速な前処理付きマトリックスソルバーを使用している)ので、DEM粗視化モデルを導入して、計算粒子数を減らすことは極めて合理的であることも示された。

2. 流動層

前述のDEM粗視化モデルについて、「いったい粗視化率をどれだけ大きくできるのであろうか?」と思う読者も少なからずいらっしゃるであろう。粗視化率の上限値は、基本的に現象によるので明言できなが、経験的には実際の粒子よりも5倍、10倍大きな粗視化粒子を使用しても、実現現象を再現できることを実験的に確かめている。数値計算同士を比較するVerificationの場合、粗視化率が高い体系においてDEM粗視化モデルの結果が妥当であることを示そうとすると、現実的な時間内でももとの体系の計算を完了させることができない。従って、粗視化率が高い値の場合、数値解析結果は実験結果と比較すると効率的である。そこで、粗視化率が高い場合のDEM粗視化モデルの妥当性検証においてValidation⁹⁾を行った。DEM粗視化モデルのValidationは、矩形容器(幅×奥行×高さ=50mm×20mm×200mm)内にガラスビーズ(平均粒子径:150 μ m程度)を入れた流動層において行われた。数値解析において、実

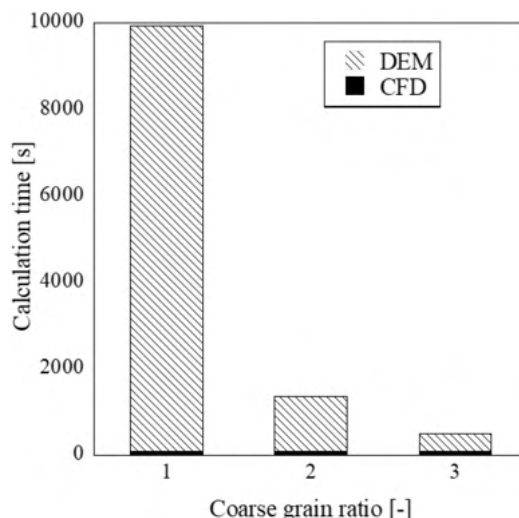


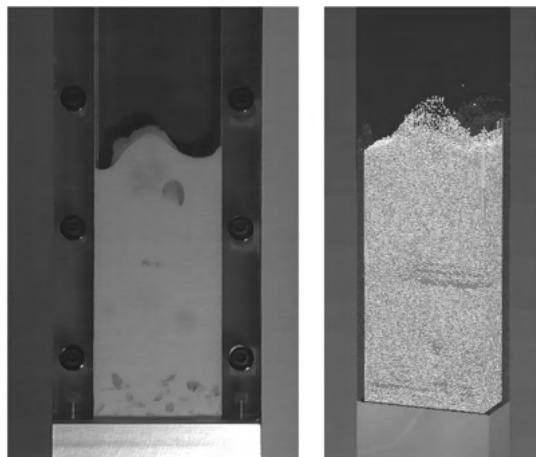
図5 噴流層内の固体粒子の速度分布

際のガラスビーズの粒子径を150 μ m(単分散)とし、粗視化率を5とし、計算粒子径を750 μ mとした。流体解析の格子サイズは、2.5mm×2.5mm×2.5mmとした。DEM粗視化モデルを使用しているため、計算粒子数は、実際のものが3,000万個程度に対して著しく少なくすることができ、23万個程度ですむ(両者で粉体の重量が一致するように設定した)。容器の底部から0.070 m/sで空気を流入させた。実験と数値解析は公平な条件の下で実施された。準定常状態における流動層の実験および計算結果を図6に示す。実験および計算結果において、粉体層内部での気泡の発生や粉体層上部での気泡の破裂が観察された。粉体層の高さを実験および計算結果を比較したところ、両者でよく一致した。さらに、図7に示すように粉体層の圧力損失を実験結果および計算結果で比較したところ、両者が一致することが示された。従って、粉体および流体のマクロパラメータが、実験および計算の両方で一致することが示された。また、本報には載せていないが、粉体層が流動しない速度(0.015m/s)で空気を流入させても、両者の圧力損失は一致した。このように、DEM粗視化モデルは粗視化率が3以上であっても、実現現象を再現できることが示された。なお、DEM粗視化モデルの粗視化率の上限は、このような流動層の体系では、格子サイズである。

DEMの粗視化モデルに関する研究は、近年になって世界的に取り組みられており、粉体のような不連続体の力学を確立する上で、今後も重要な研究テーマになると予想される。

V. おわりに

本報では、不連続体である粉体の数値シミュレーション技術の概要と応用事例について述べた。最先端の粉体シミュレーション技術は、実現現象の再現性が高いレベルにあり、信頼性が高いと言える。現在、世界的に取り組



(a) 実験結果 (b) 計算結果
図6 流動層の妥当性検証

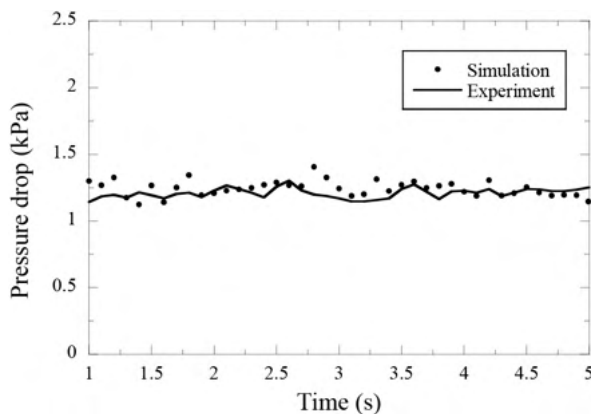


図7 粉体層の圧力損失

まれている課題として、非球形粒子のモデル化(効率のよい計算アルゴリズムを含む)、大規模体系のモデル化があげられる。これらはDEMの産業応用に係わる課題であり、主に化学工学において研究が活発になされ新しい物理モデルが開発されている。本分野は研究者数が充実しており、日進月歩の勢いで、新しい研究成果が生まれているので、近未来的に現在の不可能が可能になると期待できる。

冒頭で述べたとおり、原子力分野には、粉体を取り扱うプロセスがいくつもある。とくに、シビアアクシデントの現象解明や燃料デブリの取り出し時の切り粉の挙動といった、現在の原子力分野において極めて重要な問題を解決するために、粉体シミュレーションを活用する場面があるかもしれない。本報には記載しなかった、固気液三相流¹⁰⁾や湿潤粉体の流動¹¹⁾は、シビアアクシデントや燃料デブリの取り出しにおいて重要な技術になりうる

が、化学工学(例えば、リチウムイオン製造や製剤などを研究対象)において優れた研究成果(実験、シミュレーション問わず)が既に報告されている。化学工学で培われた技術は、原子力分野で役立てられるものは少なくないと思う。粉体のような不連続体の挙動に興味のある方は、是非、化学工学の最先端技術も調査していただければと思う。既存の問題を解決するきっかけとなる技術を発見できる可能性は十分あると思う。

— 参考資料 —

- 1) P. A. Cundall and O. D. L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29, 47-65, Elsevier, 1979.
- 2) Y. Tsuji, T. Kawaguchi, T. Tanaka, Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed, *Powder Technol.*, 77, 79-87, Elsevier, 1993.
- 3) S. Ergun, Fluid flow through packed columns, *Chem. Eng. Progr.*, 48, 89-94, Elsevier, 1952.
- 4) C. Y. Wen, Y. H. Yu, Mechanics of fluidization, *Chem. Eng. Progr. Symposium Series*, 62, 100-111, Elsevier, 1966.
- 5) Y. Shigeto, M. Sakai, Arbitrary-shaped wall boundary modeling based on signed distance functions for granular flow simulations, *Chem. Eng. J.*, 231, 464-476, Elsevier, 2013.
- 6) Y. Tsunazawa, Y. Shigeto, C. Tokoro, M. Sakai, Numerical simulation of industrial die filling using the discrete element method, *Chem. Eng. Sci.*, 138, 791-809, Elsevier, 2015.
- 7) K. Takabatake, Y. Mori, J. G. Khinast, M. Sakai, Numerical investigation of a coarse-grain DEM in solid mixing in a spouted bed, *Chem. Eng. J.*, 346, 416-426, Elsevier, 2018.
- 8) P. M. C. Lacey, Developments in the theory of particle mixing, *J. Appl. Chem.*, 4, 257-268, Wiley, 1954.
- 9) M. Sakai, M. Abe, Y. Shigeto, S. Mizutani, H. Takahashi, A. Vire, J. R. Percival, J. Xiang, C. C. Pain, "Verification and validation of a coarse grain model of the DEM in a bubbling fluidized bed," *Chem. Eng. J.*, 244, 33-43, Elsevier, 2014.
- 10) X. Sun, M. Sakai, "Numerical simulation of two-phase flows in complex geometries by using the Volume-of-Fluid/Immersed-Boundary method," *Chem. Eng. Sci.*, 139, 221-240, Elsevier, 2016.
- 11) X. Sun, M. Sakai, Direct numerical simulation of gas-solid-liquid flows with capillary effects: An application to liquid bridge forces between spherical particles, *Phys. Rev. E*, 94, 063301, APS, 2016.

著者紹介



酒井幹夫 (さかい・みきお)

東京大学大学院工学系研究科

(専門分野/関心分野) 粉体の数値シミュレーション, 混相流の数値シミュレーション, 不連続体の力学

WEO2017 と内外エネルギー情勢への示唆

第3回 天然ガス・LNG 需給の長期展望

東京大学 小宮山 涼一

環境負荷が相対的に低い天然ガスや LNG の需要は現在、拡大を続け、WEO2017 の長期予測では、きわめて厳しい温室効果ガス排出制約の中でも唯一増加する化石燃料となる。国際的な低炭素化政策の強化の中、今後も需要拡大が見込まれ、世界のエネルギーシステムの低炭素化に重要な役割を果たすことが期待されている。その中で日本の場合、LNG 情勢の変化を踏まえ、原子力発電は引き続き、LNG 価格高騰や LNG 調達リスクへの対応、LNG 調達の交渉力強化に貢献し、そして燃料価格高騰の影響が少ない安定的なベースロード電源として、重要な役割が期待される。

KEYWORDS: natural gas, LNG, unconventional natural gas, shale gas, LNG trade, LNG price, Asian premium

I. はじめに

石油や石炭に比べ環境調和性のある天然ガスは、国際的な低炭素化政策の強化の中で、現在、需要が大きく拡大している。WEO2017 の長期予測でも、きわめて厳しい温室効果ガス排出制約の中でも、2040 年にかけて今後も増加すると見込まれており、中長期的に世界のエネルギーシステムの低炭素化に貢献することが期待されている。米国では、コスト競争力のある巨大なシェールガス資源量を背景に、天然ガスの生産および消費が拡大を続け、WEO2017 では今後のさらなる伸長の可能性が指摘されている。旺盛な経済成長によりエネルギー需要が増大するアジアにおいても、大気汚染対策、二酸化炭素排出削減対策として、天然ガスの需要増加が予測されている。しかしエネルギー供給面で見ると、天然ガスは、再エネ、石炭、原子力等との燃料間競争にさらされると共に、需要拡大に対応するためのパイプラインや LNG 関連施設増強への巨額のインフラ投資が必要となる。天然ガスの普及が進むためには、環境適合性の他にも価格競争力向上が必要であり、天然ガスの長期展望においても不確実性が存在するといえる。

Implication from WEO 2017 for energy system (3) ; Long-term outlook of natural gas and LNG : Ryoichi Komiyama.

(2018 年 6 月 11 日 受理)

■ 前回のタイトル

第 2 回 石油情勢の長期展望と不確実性

WEO2017 は、化石燃料の中で特に天然ガスに焦点を当てており、2040 年には世界のエネルギー構成において第 1 位もしくは第 2 位の燃料になるとの見方も示されている。本稿は WEO2017 での天然ガス需給の長期展望を紹介し、原子力エネルギーへの示唆等について考える。

II. 天然ガス需給の長期展望

1. 世界の天然ガス需要

各国のエネルギー政策を踏まえた蓋然性の高い WEO2017 の新政策シナリオでは、世界のガス需要は、2040 年までの今後 25 年間で 5 割近くも増加する(図 1)。そして天然ガスは、2040 年までに世界エネルギー需要の 4 分の 1 を占めるまで拡大し、世界のエネルギー構成に

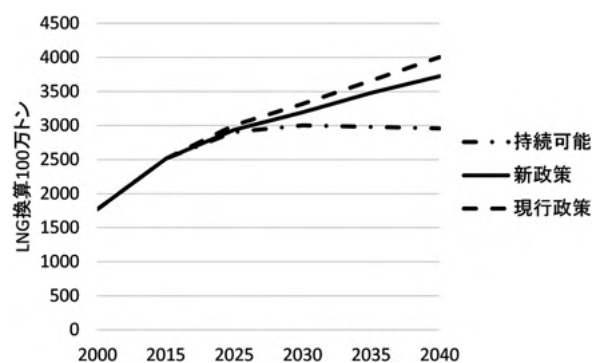


図 1 世界の天然ガス需要の展望

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641~)をもとに著者作成

において石油に次ぐ第2位の燃料になる。2℃目標と整合性があり環境制約の厳しい持続可能な開発シナリオでは、石油と石炭が減少して再生可能エネルギー比率が着実に増加する中でも、天然ガスの消費量は2030年までに約20%増加し(図1)、その後は2040年まで大きく減少することも無くほぼ一定水準で推移し、天然ガスは2040年には世界のエネルギー構成の中で最大の比率を占める燃料となる(図2)。年平均伸び率で見ると、過去25年間、世界のガス需要は年率2.3%であるが、今後25年間は1.6%でやや伸びが鈍るが、これは再エネ導入拡大により発電部門でのガス需要が抑制されるためである。

部門別にガス需要の伸びを見ると、今後の世界の天然ガス需要の伸びの3分の1を産業部門、3分の1を発電部門が占め、両部門を中心に増加する(図3)。産業部門では、熱源利用用途で石炭や石油からの燃料転換が急速に進み、低炭素化に貢献する。特に今後10年間は産業用での燃料転換を背景にガス需要が大きく増加し、長期的には発電部門での石炭からの燃料転換が国際的に進んで、ガス需要の増加が継続する見込みである。しかし、天然ガス発電の高効率化により、天然ガスによる発電量は2040年までに50%以上増加するのに対し、電力部門の天然ガス消費量の増加は3分の1程度の増加に抑制さ

れる。そのため電力部門でのガスへの燃料転換は、天然ガス火力の高効率化による省エネとも相まって、低炭素化に大きく貢献する。

しかし、世界のエネルギー市場では、価格競争力のある石炭や、コスト低下が進む再生可能エネルギーの影響もあり、燃料間の競争環境は厳しい。WEO2017の持続可能な開発シナリオでは、一部の国々では2020年代半ばに再エネ電源は天然ガス火力よりも安価な電源となり、ガス火力は稼働率が低い需給バランスを調整する需給調整電源に役割がシフトする。厳しい環境制約下では、電力部門での天然ガスは需給調整電源で主として消費され、再エネ大量導入下での電力システムの安定供給確保に貢献する。

2. アジアの天然ガス・LNG 需要

アジア地域では現在、大気汚染問題への対応等により、LNG 需要の増加が続いている。WEO2017では、国際的にみても中国、インド、その他アジア諸国などでの2040年までの天然ガス需要の伸びが世界の8割を占めるため、新興国でのガス需要の伸びが鮮明となる(図4)。

現在、世界最大のLNG輸入国である日本の需要は、2017年はほぼ前年比横ばいであったが、新興国において需要が旺盛な状況にある。中国のLNG需要は大幅な需要拡大を見せており、2017年には5割も伸張して韓国を抜き、世界第2位のLNG輸入国になった。

WEO2017では、天然ガスがエネルギー供給に占める比率は地域、部門、時点ごとに異なり、石炭比率が高い中国とインドのエネルギーシステムや、再エネ導入拡大が再エネ資源量が乏しい等の理由により困難な地域や、自然変動電源比率が高く需給調整電源が必要な地域では、天然ガスが重要な役割を果たす。

中でも、エネルギー需要が旺盛で石炭に大きく依存するアジアの新興国では、地域・地球環境問題への対応の上で、天然ガスは重要なエネルギー源となり、持続可能な開発シナリオでは、特に中国とインドで天然ガスが石炭を大きく代替し、天然ガス火力はベースロード電源と

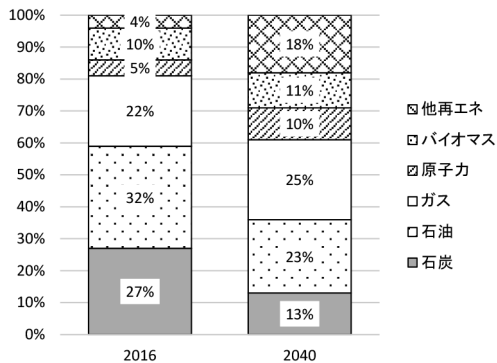


図2 世界のエネルギー構成(持続可能な開発シナリオ)
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641~)をもとに著者作成

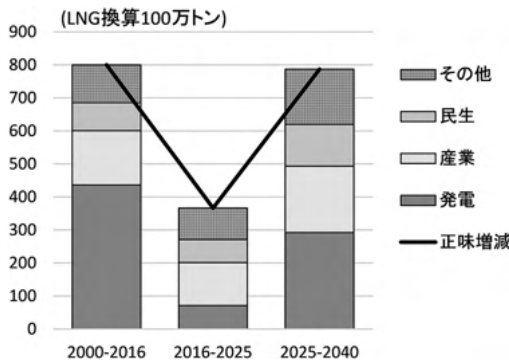


図3 世界の部門別ガス需要増加量(新政策シナリオ)
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641~)をもとに著者作成

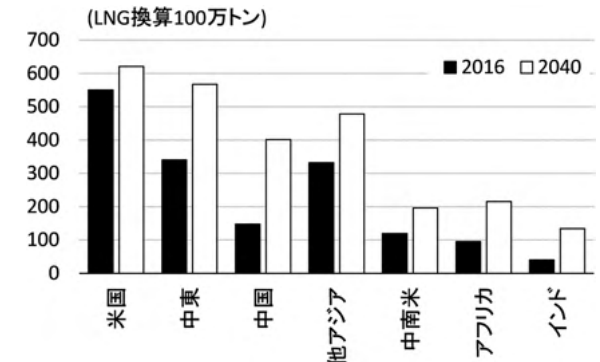


図4 世界各地の天然ガス需要の展望(新政策シナリオ)
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections (p.641~)をもとに著者作成

しての利用が増加する。現に中国などでは、天然ガスが他の化石燃料よりも二酸化炭素と大気汚染物質の排出が少ないため、環境政策を強力に推進する上で、天然ガスによる燃料転換政策が最も現実的で重要な環境政策オプションとして位置づけられている。

しかし、アジアでのガス需要拡大のためには、インフラ面の課題を克服することが必要となる。天然ガスインフラが整備されている米国や欧州や、ガス資源が豊富な中東やロシアでは、天然ガスの利用拡大は相対的にみて難易度は低いと思われる。しかし、アジア地域では状況が異なり、天然ガス需要の大部分を輸入に依存し、インフラ整備が不十分であることが一般的なため、インフラ投資による輸送コストが天然ガスの競争力に影響を与える可能性がある。アジアでは過去、現在、そしてWEO2017の予測のとおり将来も、天然ガス価格が安価な石炭価格を上回るため、ガスの価格競争力の観点から見ても、輸送コストの増大は、燃料間の競合、ひいてはガス需要の伸びに影響を与える可能性があると指摘されている。さらに急速にコスト低減が見られる再エネとの競合も予見されるため、天然ガスはその競争力向上がアジアでの需要拡大が進展するうえで必要となる。

3. 世界の天然ガス供給・貿易

需要が世界的に拡大する天然ガスの供給を展望すると、今後25年間、米国の天然ガス供給が世界で最も大きく伸び、中国、ロシア、イランを上回る。そして2040年までの世界のガス供給増分のうち、非在来型ガス、特にシェールガスが拡大し(図5)、世界のガス供給の伸びの半分以上を占める。WEO2017では、北米がシェールガスなど非在来型ガス供給の拠点となるが、中国、アルゼンチン、オーストラリアでも非在来型ガスの伸びが増加する見通しとなっている。ガス供給の増加に伴い、ガスインフラの拡張、維持運営が重要となるが、例えば持続可能な開発シナリオでは世界で年間3,200億ドルものガスインフラへの投資が必要であると試算されており、ガ

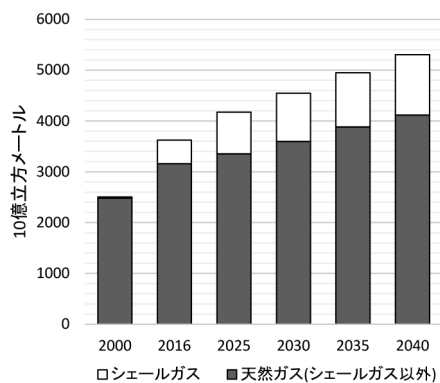


図5 世界の天然ガス供給の展望(新政策シナリオ)

(出典)IEA, World Energy Outlook 2017¹⁾, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

ス供給の拡大に際しては、ファイナンスの確保も重要な課題となる。

またWEO2017によれば、世界の天然ガス貿易量は、非産ガス国でのガス需要の大幅な拡大に伴い、長期的に増加する。2040年までにガス貿易は現状比で7割近く増加する。アジア新興国でのLNG需要の増加を反映して、特にLNG貿易が増加し、LNGは2040年までにガス貿易の増加分の90%を占め、ガス貿易全体に占める比率は2016年の39%から2040年には60%まで拡大する。地域的にみると、2040年まで欧州が天然ガスの最大の輸入地域になるとみられるが、世界の輸入量増加の9割近くをアジアが占め、アジアのLNGを中心とした天然ガス輸入量が急増する。インドや東南アジア地域でも輸入が増加する見込みであり、LNG輸入国の数は2005年は15カ国であったが、現在は約40カ国に増えており、ガス貿易の多極化が一層進展すると予測されている。

WEO2017では、LNG貿易の増加が見込まれているが、LNG供給設備は現在、国際的なLNG需要の伸びを見越して大幅な建設が進められており、短期的にはLNG供給が需要を上回り、需給バランス上の問題はないと見られているが、2020年半ばまでには国際的な輸入増加で、LNG需要と供給はほぼ均衡するとみられている。そのため2020年以降、LNG供給施設が主に米国とオーストラリア、次いでロシア、カタール、モザンビーク、カナダ等で新設され、その数は2040年までに2倍に増えると予測されている。そのためLNG供給国間で競争原理が働くため、LNG価格は従来の石油価格連動ではなく、様々な天然ガス供給源の間での競争で決まる傾向が強まり、天然ガス市場での価格決定メカニズムに変化をもたらすと見込まれている。

4. LNG市場の展望

WEO2017では、アジアのLNG需要の増加が、2040年までの世界のガス需要の拡大を強力に牽引し、石炭代替を通じて温室効果ガス排出量の削減に大きく貢献する。別の見方をすれば、LNG需要の拡大がアジアで停滞すれば、温室効果ガス削減が進まず、大気汚染問題や地球環境問題のリスクを高めることになる。

実際のこれまでのLNG取引は固有の問題を抱えており、その解決がLNG普及拡大のために必要となる。その中心的な問題は、LNG市場取引の硬直性にかかる問題であり、そのため、LNG市場取引の流動性の確保が、LNG貿易増加の必要条件となる。周知のとおり、天然ガスは液体燃料である石油とは異なり、エネルギー密度が低い気体燃料であるため、生産地から消費地への運搬過程での輸送コストが相対的に高い。特にLNGの場合、流通を拡大させるためには、液化施設、長距離輸送タンカー、貯蔵施設、タンクローリー等のLNG流通チェーンを支える一連のインフラ整備のための投資額が

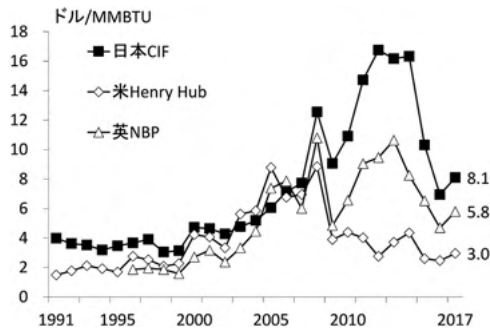


図6 世界の天然ガス価格の推移

(出典)BP Statistical Review of World Energy²⁾をもとに著者作成

極めて大きくなる。そのため、LNG インフラへの巨額投資の費用回収の予見性を高めるため、ガス生産国、消費国間でのLNG取引では、数十年にわたる長期契約が重要な取引条件とされ、伝統的なLNG消費国である日本、韓国等での基本的な契約方式となっている。このLNG長期契約形態は、天然ガスの安定供給に貢献する一方、LNG市場取引の流動性を低下させる要因となった。また、アジア地域での長期契約では一般に、燃料間競争の中でのLNG取引の経済的優位性を維持するため、従来より、LNG取引価格を原油価格に連動させる契約形態が採用されてきた。しかし、原油価格が高騰した際、アジアと他地域との天然ガス・LNG価格の国際的な値差の拡大が問題とされてきた(アジア・プレミアム問題)。近年では、原油価格が2012年～2014年に100ドルを上回る水準まで高騰した際、ガス需給バランスのみでガス価格を決定する方式を採る米国ではシェール革命でガス価格が急落した結果、例えば日本・米国間での値差は、10ドル/MMBTU(原油価格50ドル/バレル相当)以上まで拡大した(図6)。2014年後半の油価下落以降の2016年時点でも日本・米国間の値差は4ドル/MMBTU(原油価格20ドル/バレル相当)以上も存在する。

このようにアジアでの一般的なLNG価格決定方式は、LNG市場の問題点として認識されており、LNG取引の流動性確保に関して議論が進められている。また他のLNG取引の問題点として仕向地制限条項があり、是正が求められている。これは、値崩れの防止等を目的として、LNG供給国が消費国に対して転売を制約するといった条項であり、消費国側の需給調整が難しくなるため、改正に向けた動きが見られている。特にシェール革命で国際的なガスの供給過剰化が指摘される中、2017年6月に日本の公正取引委員会が仕向地制限条項が独占禁止法に抵触する可能性があるとの報告書を発表し、LNG契約形態の問題への関心が高まっている。

5. 米国の天然ガス需給

現在、米国のシェールガスは、同国の天然ガス供給の半分に達している(図7)。WEO2017によると、2040年にかけても米国のガス生産はシェールガスにより40%

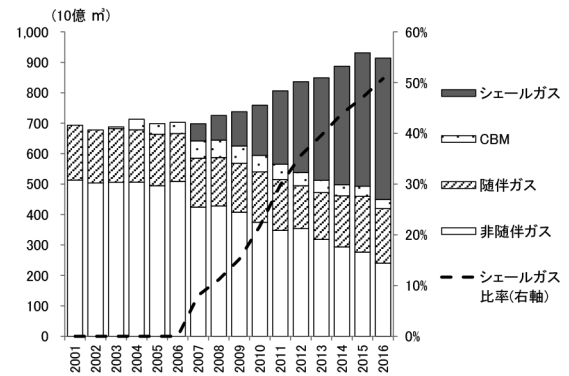


図7 米国の天然ガス供給の推移

(出典)EIA/DOE, Natural Gas³⁾をもとに著者作成

も増加し、特に今後10年間で飛躍的に拡大して、世界のガス増産量の半分以上を占めると推計されている。このように米国では、価格競争力のあるシェールガスの生産が長期的に継続するため、石炭の使用を制限する環境政策がなくても、豊富なシェールガス供給により、エネルギーミックスにおけるガス比率が拡大・維持される。米国では電力部門や産業部門を中心にガス需要が大きく増加するが、国産ガスで十分に供給可能であり、余剰分は、カナダ等隣国へのパイプライン輸出のほか、長期的にはLNGとして海外へ輸出され、米国は世界最大のLNG輸出国となる可能性がWEO2017で指摘されている。

またWEO2017では、米国産LNGは仕向地制限要件が緩やかであること、LNG価格が米国の天然ガス価格(ハブ価格)と連動した価格決定方式が採用されていることから、米国のLNG輸出国としての存在感が高まる中で、国際的なLNG市場構造に変化をもたらす可能性があるとしている。現在、米国トランプ政権は化石燃料を重視し、LNG輸出も国益最大化に資するとして、徐々に本格化しており、日本のLNG政策を考える上でも、米国市場の動向を注視することが重要であると考えられる。

III. 結語

国際的な天然ガス需給、および日本のLNG調達環境にも変化が現れはじめている。米国は世界最大の原子力発電設備量を保有しているが、シェール革命の影響により、天然ガス価格および電力価格が下落し、既設原子力発電所の閉鎖の動きがある一方、LNG輸出が本格化し始め、世界のLNG市場構造に影響を与えつつある。一方、石炭がエネルギー供給の太宗を占める中国をはじめとするアジア新興国は特に大気汚染問題への対応上、天然ガス・LNG需要が急増しており、LNG需要が予想以上のスピードで拡大すれば、WEO2017の想定よりも早いタイミングで需給がひっ迫し、天然ガス価格の高騰を招く可能性もある。また中国は2017年にLNG輸入が5割近く増加し、世界第2位のLNG輸入国となり、今後も需要拡大が続くと見込まれる。日本は現在、世界

最大の LNG 輸入国であるが、省エネや原発再稼働を踏まえば、LNG 輸入量の増加余地は限定的である。そのため中国など新興国の LNG 輸入量の増加により、LNG 輸出国から見た日本の地位は長期的に低下し、調達リスクが上昇する可能性もある。

日本は福島事故以降、LNG 火力の電源比率が上昇し、LNG 価格高騰が電気料金の上昇を招くリスクが高まっている。一方、日本は現在、太陽光発電(Photovoltaics, PV と呼称)が急増して世界第 3 位の PV 導入国になっているが、PV の出力変動を緩和するには、調整力としての LNG 火力の確保が不可欠であり、LNG 安定供給は再エネを主力とした電力の低炭素化にも不可欠である。LNG 情勢の変化を踏まえ、原子力発電は引き続き、LNG 価格高騰や LNG 調達リスクへの対応、LNG 調達の交渉

力の強化に貢献し、そして燃料価格高騰の影響が少ない安定的な電力供給源として、重要な役割が期待される。

－ 参考資料 －

- 1) International Energy Agency(IEA)/OECD ; World Energy Outlook 2017 (WEO2017), OECD/IEA, 2017.
- 2) BP ; BP Statistical Review of World Energy 2018, 2018.
- 3) EIA/DOE, Natural Gas, Production (アクセス日: 2018 年 5 月 23 日).
< <https://www.eia.gov/naturalgas/data.php#production> >

著者紹介

小宮山涼一 (こみやま・りょういち)

本誌, 60[8],P29(2018)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 －

(9月3日第2回論文誌編集幹事会)

- ・平成 30 年 6 月 16 日～7 月 15 日に英文誌へ 22 論文, 和文誌へ 3 論文の投稿があった。また, 7 月 16 日～8 月 15 日に英文誌へ 17 論文, 和文誌へ 5 論文の投稿があった。
- ・英文誌エディターズチョイスの実施に関して確認した。
- ・英文誌特集号(ADS ベンチマーク)の提案を承認した。また, 編集委員会企画の特集号を戦略的に提案することとし, 関連書式を改訂することとした。
- ・福島廃止措置に関する特集号論文の締め切りを 10 月末まで延期することとした。
- ・福島事故関連記事の英文化作業の進捗状況が報告された。
- ・掲載否後に再投稿を繰り返された場合の対応に関して検討した。

- ・著者による査読候補者・担当編集委員候補者の推薦は不可として, 編集委員会規程等から削除することとした。

(9月3日第3回学会誌編集幹事会)

- ・60 周年記念号の部会・連絡会および一部委員会への執筆依頼状況について確認した。執筆予定者の連絡メ切りは本日であるが, まだ半数以上回答がない。時期を見て再度督促する。
- ・巻頭言, 時論, その他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。
- ・2018 年秋の大会企画セッションの打診状況について確認した。
- ・J-STAGE 登載に関する進捗状況の報告と, J-SATGE 公開日程について事務局から確認があった。公開開始は来年 1 月 8 日を予定。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

サイエンスよみもの

放射性核種の短寿命半減期測定 エキゾチックな不安定核の崩壊と元素合成

理化学研究所 西村 俊二

私たちの周りには鉄や金など安定した原子核が約 200 種程度存在するが、放射性崩壊をして放射線を発する不安定な核種も存在する。これら放射性核種(RI)は、大質量の恒星が終焉時に起こす超新星爆発や中性子星同士の衝突など特殊な環境において大量に生成されたと考えられている。RI の数は、理論的に 7,000 種以上にもものぼるとされ、大規模な RI 研究が理化学研究所の世界最高性能・大強度重イオン加速器において推進されている。現在、線形加速器 RILAC を利用した低エネルギー原子核融合反応による超重元素の生成、さらにサイクロトロン 4 台を連結させた高エネルギー原子核破砕反応・核分裂による新放射性同位元素の生成が可能となり、多くの研究者が熱い視線を注いでいる。陽子や中性子のバランスが大きく違うエキゾチックな原子核は、生成後に次々と崩壊しながらその姿を変えていく。太陽系に存在する元素の起源を探る上でも、これら放射性核種の性質を精密かつ効率的に調べる必要がある。ここでは、放射性核種の崩壊に着目した世界最高水準の核分光国際共同研究について紹介する。

KEYWORDS: *Unstable nuclei, β -Decay, Proton radioactivity, Delayed neutron, r-process nucleosynthesis*

I. はじめに

1896 年、アンリ・ベクレルは、ウランから放出された放射線が写真乾板を露光させることを偶然発見し、キュリー夫妻らがその放射線の研究を行った。自然界に存在する天然放射性核種を利用した最初の放射線研究の業績により、1903 年に彼らにノーベル賞が授与された。その後、原子炉や粒子加速器を利用した核種の変換により人工的な放射性核種(RI)の生成が可能となった。放射線の発見から 120 年を経て、これまでに約 3,000 種類もの核種が発見された。極端な陽子と中性子比を持つエキゾチックな RI はどこまで存在するのか？酸素などの軽い RI の存在限界とそのドリップラインに関する検証が行われている。理論的には 7,000~10,000 種もの RI が存在すると予想されており、超重元素を含む重い RI の存在限界は未だよく分かっていない。

最近の研究では、中性子過剰な He, Li, Ne など軽い RI において中性子スキンやハロー構造¹⁾、魔法数の出現・消失の発見²⁾など、従来の常識を覆す様々な描像が次々

と明らかにされてきた。原子核がドリップラインに近づくにつれ核子の多体系がもたらす核構造はどのように変遷していくのか？放射性核種を生成し、様々な手法による核構造の研究が行われている。

RI の振る舞いは、宇宙の特殊な環境における元素合成においても非常に重要な役割を果たす。金やウランなど重元素の起源は中性子密度が非常に高い環境において作られたと考えられている。2017 年 8 月、LIGO と VIRGO の重力波観測により中性子星同士の合体が発見され、光学望遠鏡との組み合わせによりランタン希土類元素生成の証拠とされるキロノバが観測された。太陽系の重元素起源を探る上でも今後様々な知見が期待される。一方、中性子が大量に存在する爆発的環境における元素合成を理解するためには、数千種もの RI の性質を把握する必要がある。これまでは原子核理論に大きく依存していたが不確定性が大きく、その実験的な検証が必要となる。

埼玉県和光市の理化学研究所において大強度重イオン加速器施設 RIBF は稼働している。大強度ビームを利用し、重元素合成において重要な役割を持つ RI を生成し、その性質を調べる本格的な研究が始まった。同様に、海外では米国や独、さらに韓国や中国において大型の重イ

Half-lives of radioactive isotopes ; Decay of exotic nuclei and nucleosynthesis : Shunji Nishimura.

(2018 年 5 月 6 日 受理)

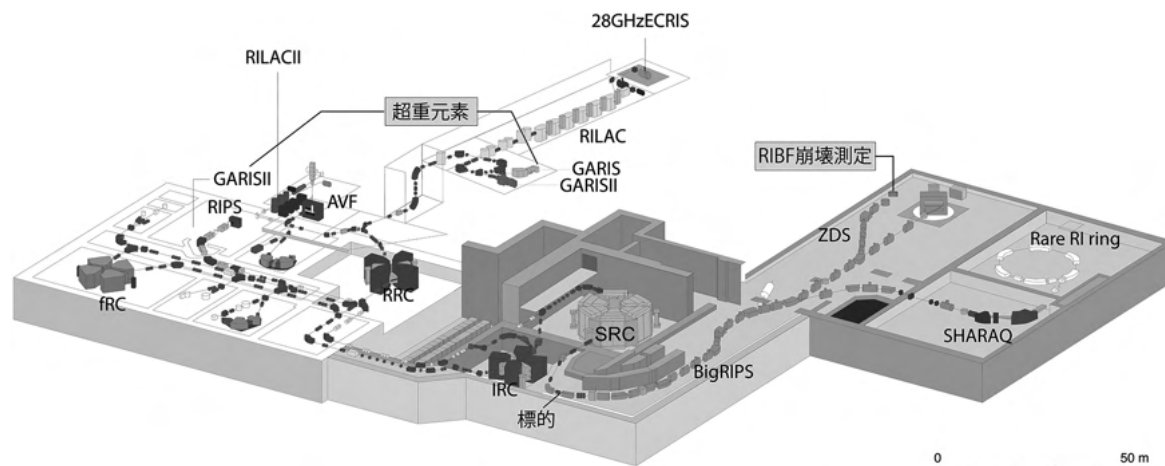


図1 理研のRIBF加速器施設

オン加速器の建設が進められている。不安定核の核構造に加え、宇宙核物理の幕開けを迎えつつある。ここでは、理研の加速器施設において推進されている超重元素に加え、世界最高水準の崩壊測定実験プロジェクト (EURICA, BRIKEN)における崩壊測定実験、特に半減期に着目した最新の研究成果について紹介する。

II. 理研における崩壊測定実験

最先端の不安定核研究では、RIの生成能力、分離能力、識別能力、さらに効率的な測定手法が必要不可欠となる。極端な例では、1日に1個、超重元素に至っては100日に1個という条件のもとでの研究が要求される。短時間に次々と崩壊する希少RIの測定において最初に得られる重要な情報として、崩壊に要する時間がある。また様々な崩壊モードから放出される放射線の種類とエネルギーから、RIの励起状態、魔法数、変形の知見も得られる。最高性能の加速器と最高性能のスペクトロメータや崩壊実験装置を組合せることにより、(1)超重元素や(2)陽子と中性子のバランスが大きく異なる希少RIの崩壊測定実験が行われている。

1. 最先端施設におけるRI生成

(1)原子核融合を利用した超重元素生成

崩壊測定の代表として森田氏らが線形加速器RILACとガス充填型反跳分離装置GARISを組合せた超重元素実験施設がある(図1)。同様にロシア・米国・ドイツのグループも超重元素実験を行っている。理研・超重元素グループの特徴は、大強度ビームに加え、生成した超重元素の立体角が大きく分離能力が高いGARISスペクトロメータにある。このGARISの利点を活かし、亜鉛とビスマスの原子核融合反応により超重元素・原子番号113の生成に成功した。すでに、国際純正・応用化学連合(IUPAC)により認められ、新元素・ニホニウム(nihonium: 元素記号「Nh」)と正式に決定されたことは

記憶に新しい³⁾。さらに104番元素ラザホージウムなどの化学実験(羽場氏)、原子番号112のコペルシウム(^{283}Cn)合成と116番元素リバモリウム合成(^{292}Lv , ^{293}Lv)の検証(加治氏, 森本氏)、メンデレビウムの同位体などの超ウラン同位体の質量測定(和田氏, 伊藤氏)と大きな成果を出している。

RILACにサイクロトロン(RRC)を組合せた大強度バナジウムビームの開発に成功した。標的としては、オークリッジ国立研究所からキュリウム標的(^{248}Cm)が供給された。RILACからGARIS-IIスペクトロメータを移設し、119番元素生成プロジェクトが開始される。

(2)核破碎・核分裂を利用した放射性核種生成

RILAC-RRCを利用し加速された重イオンは後段に接続される3台のサイクロトロン(fRC, IRC, SRC)で構成される重イオン加速器施設RIビームファクトリー(RIBF)により更に加速される。このRIBF加速器は2006年末に完成し、翌年から本格的にRI生成をスタートした。核子当たり345 MeV/uまで加速した重イオンを超伝導RIビーム分離生成装置BigRIPS上流に設置したベリリウム標的(^9Be)に照射し、核破碎反応によりRIを生成する。目玉となるウランビーム(^{238}U)では、核分裂反応を利用する。生成したRIは、BigRIPSにより分離されたのちに粒子識別を行う。

RIBFの性能は、始まった当初からすでに他施設の100倍程度のRI生成能力を持つ。さらに10年を経た現在では、さらに7,000倍ものRI生成能力(70 pA)にまでビーム強度の増強に成功している。この世界最高性能の施設から、これまでに132種の新放射性同位元素の生成に成功しており、さらに62種の新RI候補が確認されている。RIBFのビーム強度はさらに10倍以上を予定しており、4,000種のRI生成に関する研究が可能となる。

2. 半減期測定

放射能を持つRIは時間と共に放射性崩壊により別の

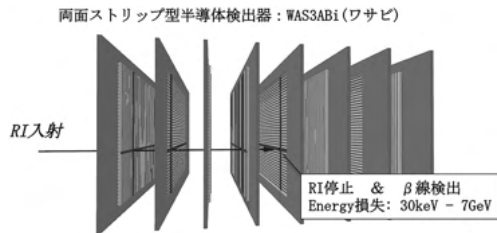


図2 表と裏がストリップ構造となっている崩壊測定装置 WAS3ABi

核種に変換される。個数(N_0 個)のRIが半分まで崩壊する時間を半減期($T_{1/2}$)と定義する。

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N(T_{1/2}) = N_0/2$$

$$T_{1/2} = \log_e(2)/\lambda$$

RIが崩壊により安定な娘核に変換される場合、単純に崩壊のレートを調べることで半減期を決定できる。安定核から遠く非常に不安定なRIは、娘核、孫核と次々に崩壊するため、親核の崩壊の分析が難しくなる。ここでは、様々な崩壊モードを持つ短寿命のRIについて、その測定条件、測定精度に関する統計的な処理方法を述べる。

(1) 超重元素の α 崩壊と半減期測定

超重元素は、原子核融合反応により生成される。効率的に超重核を分離するためにHeガスを充填したGARISスペクトロメータにより選別されたRIは、スペクトロメータ下流に設置した位置検出型シリコン半導体検出器の表面に打ち込まれる。超重元素は主に α 線を放出し、そのエネルギーは10 MeVにも及ぶ。検出器の表面に停止したRIから放出される α 線が表面から飛び出す場合もあるため、周囲にシリコン検出器を箱型に配置している。約10 cps程度の低バックグラウンド環境での測定により、超重元素崩壊からの α 線の同定が可能となっている。理研で生成した113番元素は、娘核の崩壊エネルギーと半減期が分かっているため、1個の崩壊事象による半減期を決定することが可能となる⁴⁾。

(2) β 崩壊と半減期測定

RIBFでは重イオンビームをベリリウム標的に照射し、原子核反応で多種類のRIが混在するビームを生成する。BigRIPSビームラインでは、RIの持つ質量と電荷により磁場中の軌道の違いを利用し、選別されたRIは、核子当たり約150 MeV程度のエネルギーを持ったカクテルビームとして下流の検出器に輸送される。粒子識別したRIは、エネルギー減衰板により減速させ、3~8層の位置検出型シリコン半導体検出器(厚み: 1mm¹)に停止させる(図2)。

一般に安定な原子核から遠く離れたRIほど不安定となり、より短時間に崩壊する($T_{1/2} \propto Q$ 値⁻⁵)。

図3は、⁹⁸Rbの β 崩壊の崩壊経路を示している。非常に中性子過剰なRIは、Q値が大きいため崩壊時に中

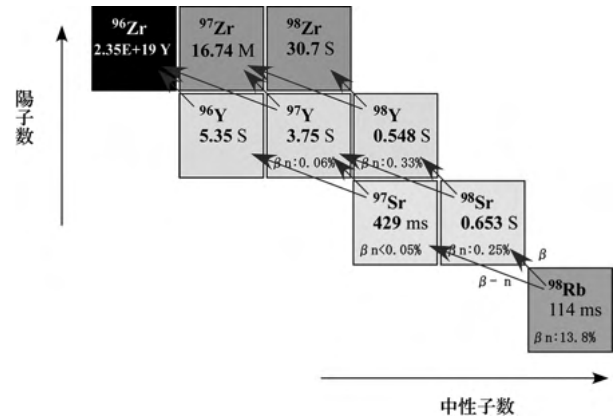


図3 中性子過剰な⁹⁸Rb^{*}が β 崩壊と遅発中性子放出をしながら安定核に変換される崩壊経路
* ⁹⁸Rbは高スピン核異性体(半減期: 96 \pm 3 ms)を持つ

性を放出する現象が出現する。1個の中性子を放出する確率を遅発中性子放出確率(P_{1n})と定義する。⁹⁸Rbの場合は約13.8%の確率で遅発中性子を放出し⁹⁸Srではなく⁹⁷Srに変換される。

3. β 崩壊測定装置

α 崩壊と違い β 崩壊時に放出される β 線エネルギーは、ニュートリノが持ち出すエネルギーの不確定性により、不連続なエネルギーを持つ。また、 β 線が1mm厚のシリコン検出器中で損失するエネルギーは数百keV以下と小さい。希少なRIの崩壊を確実に測定するためには、低エネルギーの β 線検出器の高感度が必要となる。

RIBFでは、約40種程度のRIが混在するビームを利用した崩壊測定により半減期の一括測定が可能となる。一方、全体のRIの打ち込みの頻度が高くなるため、幾つものRIが連続して埋め込まれる確率が無視できなくなる。どの種類のRIがどの位置に停止したのかを捉えるために高位置分解能のシリコン半導体検出器を導入している。RIが停止する際に半導体に発生する信号が非常に大きいに対して、 β 線の信号は微弱となるため、高感度で広いエネルギー領域に対応した読み出し回路を必要とする。そこで、増幅率の異なる前段増幅回路(0.01~10 MeV, 0.01~7 GeV)を並列に配置する手法を導入している。さらに、信号の大きさの違いにより生じる0.1ナノ秒程度の時間のズレを利用した新しい測定法を導入している⁵⁾。

図4は、⁹⁸Rbの埋め込み位置において検出された β 線の時間分布を示す(図4)。娘核、孫核の半減期が既知である場合は、その値を使用することが可能となる。⁹⁸Rbの崩壊経路は1つとは限らないため、親核の崩壊後は幾つかの崩壊成分が含まれる(図3)。非常に中性子過剰なRIは、崩壊時に遅発中性子放出がある確率で出現するため、娘核の崩壊成分、さらに孫核の崩壊成分比

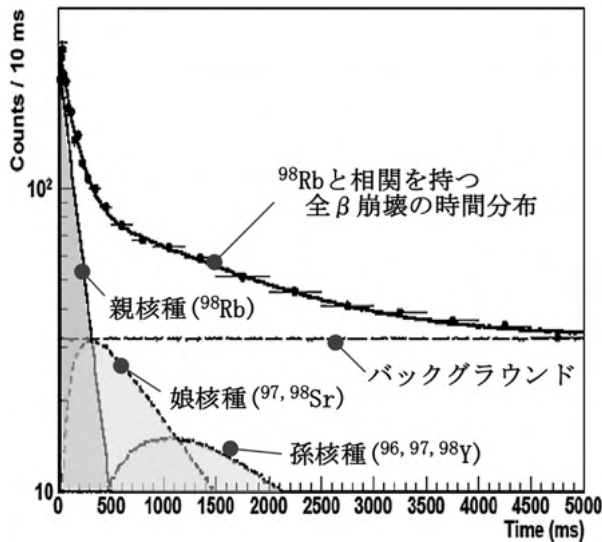


図4 親核種、娘核種、孫核種の崩壊の成分が混在したβ崩壊の時間スペクトル

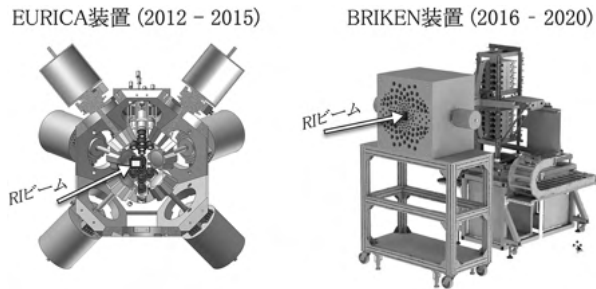


図5 RIBFの崩壊測定装置EURICA(左)とBRIKEN(右)

が混じり合う。一般に、遅発中性子放出確率 P_n 値が既知であることは殆どないため P_n 値の系統的な誤差を考慮に入れる必要がある。

4. γ線測定装置(EURICA)

RIのβ崩壊により励起された娘核、孫核から遅発γ線が放出される。十分な統計量の原子核崩壊データに関しては、β崩壊に伴い娘核の励起状態から放出されるγ線を同定した核分光法が適応できる。この場合は、娘核などの崩壊成分などの不確定性を最小限に抑えた半減期測定が実現できる。そこで、2012年から欧州ガンマ線検出器委員会が運用するクラスター型ゲルマニウム半導体検出器12台と理研が開発した高感度β線検出器「WAS3ABi(ワサビ)」を組合せた世界最高水準の核分光研究プロジェクト「EURICA(ユーリカ)」を実施した(図5左)。導入したクラスター型ゲルマニウム半導体検出器により、例えば ^{137}Cs が放出する662 keVのγ線に対し約15%の効率でエネルギー測定を実現しており、2016年6月までの4年間に非常にエキゾチックなRIの核分光研究を完了した。図6はEURICAを利用して測定したRI(440種)をしめしている。この実験から62種の新同位体元素、278種の半減期を報告している。

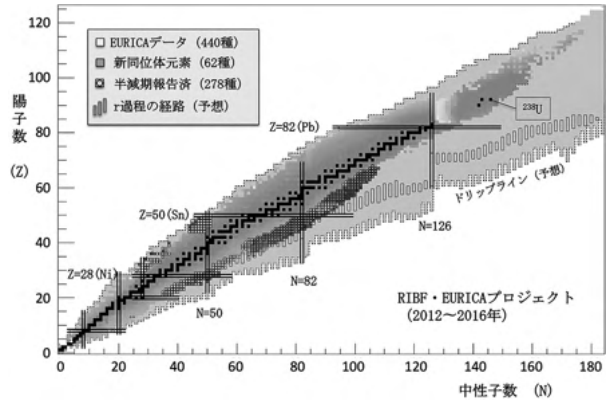


図6 RIBF・EURICA装置で収集した440種のRI

5. 遅発中性子放出測定装置(BRIKEN)

EURICAでは、β崩壊と同期したγ線を測定することにより間接的にはあるが中性子放出確率の情報を抽出することができる。しかし、最も中性子過剰なRIの半減期を精度よく決定する際に、中性子放出確立の不確定性が非常に大きい。そこで、理研と米国・オークリッジ国立研究所、スペイン・カタルーニャ工科大学が所有する計140本のヘリウム-3(^3He)ガス検出器を持ち寄り、最高水準の中性子検出器を導入したBRIKENプロジェクトが始まった。1 MeV以下の中性子検出効率は、約65%と非常に高いため、少ない統計量で遅発中性子の個数を測定できる。RIBFの大強度ウランビームを利用し、数百種もの中性子過剰核の遅発中性子放出確率を一挙に測定する計画が開始された。2017年に実施した実験により、すでに268種のRIの半減期と遅発中性子放出確率の測定を完了しており、内165種は、初めての遅発中性子放出確率測定となる。BRIKEN装置には、β崩壊と中性子放出の測定に加え、2台のゲルマニウム半導体検出器を導入したγ線の同時測定も可能となっており、 $\beta\gamma_n$ の核分光研究が可能である。

6. 陽子放出(WAS3ABi, BigRIPS)

陽子に対して中性子をこれ以上減らすと陽子の分離エネルギーが小さくなりゼロとなる核種は、核力によって陽子を束縛できなくなり存在できなくなる。この境界を陽子ドリップラインという。この陽子ドリップライン領域のRIが崩壊する際には、陽子を放出する崩壊現象が出現する。1981年に最初の陽子を放出する崩壊が発見され、2002年には鉄(^{45}Fe)が同時に2つの陽子を放出する新しい放射性崩壊様式が報告された。

RIBFでは ^{78}Kr と ^{124}Xe ビームの核破砕反応により、陽子ドリップライン近傍のRIの生成と崩壊測定に成功した。EURICAでは、WAS3ABi検出器を利用し ^{67}Kr が(半減期:7.4ミリ秒)2個の陽子放出をすることを明らかにした。さらに、BigRIPSを利用し、 ^{72}Rb , ^{89}Rh , ^{93}Ag の生成に成功し、このRIの生成量が、周囲のRIと比較

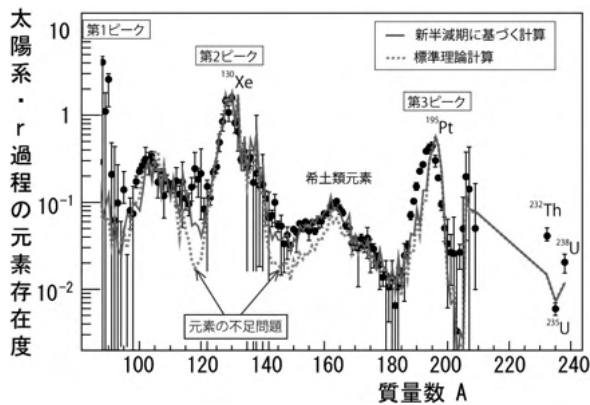


図7 新半減期データを取り入れることにより、太陽系のr過程元素の元素不足問題が改善された

し系統的に少ないことから、BigRIPS ビームラインの輸送中(約0.5マイクロ秒)に陽子放出して崩壊する現象を見出し、数百ナノ秒の半減期測定に成功した。

III. RIの β 崩壊と重元素合成

金やウランなど鉄より重い元素の約半数は超新星爆発や中性子星同士の衝突時に大量に生成されたと考えられている。このような爆発環境においては、種となる原子核が周囲に存在する大量の中性子を次々と吸収し不安定となった中性子過剰核が β 崩壊を起こす。この一連の重元素合成過程は、高速(rapid)に連続して起こるため、rapidの頭文字をとって「r過程」と呼ばれている⁶⁾。

r過程に起因する元素は質量数 $A=80, 130, 195$ 近傍にピーク構造を持つ。これは、原子核が安定となる中性子魔法数 $N=50, 82, 126$ において停留したRIが β 崩壊してできた痕跡と考えられている。r過程で大量に作られる千種以上もの中性子過剰核の半減期情報は、重元素合成の起源の解明において重要な鍵を握る。図7は天体観測などから導かれた太陽系の元素存在度を示している。r過程で生成されたRIの情報は理論計算に大きく依存しており、その不確実性が問題となっている。現在の原子核理論に基づき計算したr過程の元素存在度分布の予想は、第2ピーク前後(質量数 $A=130$ 近傍)において太陽系の元素量と比較し「元素の不足」という食い違いがある。そこで、大強度ビームを利用した大規模なEURICA崩壊測定プロジェクトを実施し、実験的な検証を行った。このEURICAでは、440種のRIの崩壊データの収集を完了した。これまでに、r過程において重要な役割を果たす2百種以上ものRIの半減期を報告した⁷⁾。得られた半減期の系統性を調べたところ、中性子数が魔法数 $N=82$ となるr過程の停留原子核の半減期が理論予想の約30%程度も短いことが分かった。さらに、2重魔法核 ^{78}Ni (陽子数 $Z=28$, 中性子数 $N=50$)で安定であったRIから更にエキゾチックな $^{78,80}\text{Ni}$ や ^{77}Co の崩壊速度が2倍から10倍と急激に速くなることを明らかにし、魔法数が健在であることを示唆する結果を得た。以上、最新

の半減期データを取り入れたr過程の計算を行った結果、「元素の不足問題」が改善されることを明らかにした(図7)。r過程が提唱されて60年を経て初めて、元素合成の大規模かつ定量的な議論ができるようになった⁸⁾。

IV. 今後の研究

重力波観測と組合せた天文観測により、中性子星同士の衝突、中性子星・ブラックホールの衝突など様々なr過程の現場を直接観測する時代が到来している。宇宙の極限環境において生成される中性子魔法数 $N=126$ 近傍の非常に中性子過剰なRIの性質と放出されるエネルギーは金やウランの起源を探る上で必要となる。理研では、BigRIPSを利用した重いRI(質量数 $A>180$)の生成と崩壊測定が始まろうとしている。また、核子移行反応を利用したKEK-WNSCのKISSプロジェクトによる重いRIの研究がスタートした。 $N=126$ を超える中性子過剰な超重元素(陽子数 $Z=114$, $N=184$ 近傍)の領域は、理論的に比較的安定した「安定の島」と呼ばれる超重元素が予想される。超重元素とその核分裂により生成される原子核片も、r過程の重元素存在度(質量数 $A=130\sim 200$)に大きな影響を与えると考えられている。今後、原子核の研究を交えた学際的研究の重要性が高まり、元素の起源に関する興味深い研究成果が期待される。

— 参考資料 —

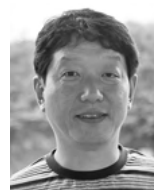
- 1) I. Tanihata, H. Savajols, R. Kanungo, Prog. Par. and Nucl. Phys. 68 (2013) 215-313.
- 2) 「中性子過剰核における魔法数の異常性の発見」仁科記念賞(平成27年:本林透氏, 櫻井博儀氏).
- 3) 113番元素の名称・記号が正式決定 (http://www.riken.jp/pr/topics/2016/20161130_1/).
- 4) K. Morita et al., Jour. Phys. Soci. Jpn 73, No. 10 (2004) 2593-2596.
- 5) S. Nishimura et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 46, 182 (2013).
- 6) E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, and F. Hoyle, Rev. Mod. Phys. 29, 547 (1957).
- 7) 世界最高水準の核分光研究プロジェクト「EURICA(ユーリカ)」完了 (http://www.riken.jp/pr/topics/2017/20170105_1/).
- 8) G. Lorusso, S. Nishimura et al., Phys. Rev. Lett. 114, 192501 (2015) 1-7.

著者紹介

西村俊二(にしむら・しゅんじ)

理化学研究所

(専門分野/関心分野) 原子核物理, 宇宙核物理



サイエンスよみもの

超微量分析より見えた超新星爆発からの飛来物

清水建設 木下 哲一

太陽系外での天体物理研究において、従来の光学観測のみならず、爆発的現象に由来するニュートリノや重力波が検出されたのと同様に、地球上より超新星爆発からの飛来物を検出すれば、太陽系近傍での超新星爆発活動、爆発的環境の中での核反応や元素合成の理解、地球環境への影響に関する知見を深めることができる。海底より採取された試料より過去1,000万年の間に2回の ^{60}Fe の流入が検出され、この流入は超新星爆発の中で生成したものが地球上に飛来したことを示された。地球上より検出された ^{60}Fe と超新星爆発の地球への影響に関する研究成果について紹介する。

KEYWORDS: *Accelerator mass spectrometry, Deep-sea samples, Iron-60, Supernova, Nucleosynthesis, Astrophysics*

I. はじめに

夜空を見上げると、赤ちゃん星、年老いた星、青い星、赤い星など無数の天体が見られる。これらの天体の内部では、様々な核融合反応により炭素や酸素など、地球上にも存在する多くの元素が作られている。星の一生の最後は質量によりおおよそ運命が決まり、大きくは、超新星爆発する天体と外層を失いしぼんで白色矮星になる2つに分けられる。超新星爆発では、天体内の燃焼過程では作られない中性子過剰な原子核やウラン(U)やプルトニウム(Pu)などの原子番号の大きな原子核も作られる。我々の住んでいる地球も天体内の燃焼過程で作られた元素や超新星爆発により作られてばらまかれた元素から構成されている。超新星爆発のイベントは、天体望遠鏡を使った光学観測により探することができる。一方で、大マゼラン雲の中で起こった超新星爆発(SN 1987A)からのニュートリノが地球上で検出された。ブラックホールや中性子星同士が融合するときにも爆発的なイベントが起こり、その際に発生する重力波も、近年、検出された。光、ニュートリノ、重力波が地上に届いている状況で、超新星爆発の中で作られた元素も地球上に飛来するのか、飛来しているのならばそれはどこからやってきたのか、地球への影響はあったのか、様々なことが興味となる。

Supernova remnant detected using ultra-sensitive analysis :
Norikazu Kinoshita.

(2018年5月30日 受理)

これまで不安定核を超高感度に測定可能な加速器質量分析を用いて、超新星爆発からの飛来物の探索が行われてきた。II章に示すように、 ^{244}Pu (半減期: 8.00×10^7 年)や鉄-60(^{60}Fe)(半減期: 2.62×10^6 年)が超新星爆発からの飛来物のプローブとして利用可能な核種である^{1, 2, 3)}。これまで、超新星爆発の中でつくられた ^{244}Pu と ^{60}Fe を地球上の天然試料から探索する研究が行われてきた。 ^{244}Pu は過去に行われた大気圏内核実験においてUやPuへの多重中性子捕獲により少量生成するため、検出された ^{244}Pu は核実験起源で説明づけられている。 ^{244}Pu の他には、天然試料からの ^{60}Fe の検出も試みられており、 ^{60}Fe は明らかな超新星爆発に由来するものと結論づけられている。ここでは、元素の成り立ちと共に、 ^{60}Fe を用いた太陽系近傍での超新星爆発の活動について紹介する。

II. 元素の成り立ち

原子炉内の中性子の連続捕獲反応により燃料内にマイナーアクチニドが増殖するのと同様に、天体内での核反応も核融合反応と放射壊変が連続して起こる反応である。水素同士の弱い相互作用により重水素が生成し、重水素と水素の融合によりヘリウム-3(^3He)が生成する。 ^3He の融合により ^4He が生成する。 ^4He がたまると、3つの ^4He 原子が融合し炭素-12(^{12}C)が作られる。そして、 ^{12}C への水素の融合、 ^{12}C 同士の融合反応、その生成物への ^4He の融合などにより、最終的には鉄までが作られる。原子番号がマグネシウム(Mg)から鉄までの

元素では、24に4の倍数を足した質量数を持つ核種の存在量が多い。これは、 ^{12}C と ^{12}C の融合で作られた ^{24}Mg への ^4He の捕獲により作られたと考えても矛盾がない結果となっている。

鉄よりも重い元素は中性子捕獲により作られる。天体内の燃焼過程において、プロトンの捕獲過程で作られた ^{13}C やネオン-21 (^{21}Ne) に ^4He が融合する際に、中性子を放出する $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応と $^{21}\text{Ne}(\alpha, n)^{24}\text{Mg}$ 反応が起こる。これらの核反応の Q 値は正であるため閾値が存在せず、主な中性子源となる核反応とされている。これらの核反応により生じた中性子の捕獲と生成核の放射壊変が連続して起こることにより、核図表上の安定核の近くを経由しながらビスマスまでの元素が作られる。例えば、 ^{58}Fe が中性子を捕獲し ^{59}Fe が生成し、放射壊変によりコバルト-59 (^{59}Co) になる。 ^{59}Co がまた中性子を捕獲し ^{60}Co が生成し、放射壊変が起こる。 ^{60}Fe や ^{244}Pu が生成されるためには、複数の不安定核が中性子捕獲しなければならないが、天体内における中性子密度環境では中性子捕獲前に放射壊変が起こるため作られない。

太陽質量のおおよそ8倍を超える重い星は、超新星爆発により一生を遂げる。その爆発時の高中性子密度下において、無数の中性子が短時間に捕獲され、核図表上では中性子過剰側のドリップラインの近くが経路となる。その後、放射壊変が進み、中性子過剰な原子核と U や Pu などの原子番号の大きな原子核が作られる。 ^{60}Fe や ^{244}Pu はこの速い中性子捕獲反応により作られる核種である。太陽系誕生時の46億年前には ^{60}Fe や ^{244}Pu の他多数の放射性核種が存在していたことが隕石中の壊変生成物の分析により知られている。現在ではこれらの半減期の数十倍以上の時間が経過したため、半減期が約1億年以下の核種は存在しない。第二次世界大戦後に世界各地で行われた核実験などで人為的な現象で作られたものを除けば、天然に ^{60}Fe や ^{244}Pu が存在すれば、それは超新星爆発の際に作られたものが検出されたことを示す。これまで、地球上の天然試料から ^{60}Fe や ^{244}Pu を探そうと様々な研究者が挑戦してきた。

III. 超新星爆発の残骸 ^{60}Fe の探索

1. 加速器質量分析による ^{60}Fe の分析

超新星爆発から地球までの距離が離れるほど、超新星爆発からの飛来物の地球への流入量は少なくなる。放射性核種の測定には、質量分析と放射能測定の2種類の測定方法が挙げられる。一般的に、短寿命核種の分析は、放射能測定の方が質量分析よりも高感度であり、長寿命核種の分析は、質量分析の方が高感度な分析法である。また、質量分析では同重体の影響を受けるため、同重体の分離が可能な分析を行わなければならない。加速器を分析装置として利用する加速器質量分析では、同重体の分離が可能で高感度な分析法であるが、通常はベリリウ

ム-10 (^{10}Be)、炭素-14 (^{14}C)、アルミニウム-26 (^{26}Al)、塩素-36 (^{36}Cl)、カルシウム-41 (^{41}Ca)、ヨウ素-129 (^{129}I) の6核種に限られている。2000年代に入ってから加速器質量分析が通常は測定されない核種にも拡張されるようになり、 ^{244}Pu やサマリウム-146 (^{146}Sm) の分析も行われるようになってきた^{1, 4)}。 ^{60}Fe も加速器質量分析を用いて分析可能になり、本稿における地球上からの ^{60}Fe の探索にも利用された。

^{60}Fe の加速器質量分析では、試料から化学的手法を用いて精製された数 mg の酸化鉄を Ag 粉末と混ぜ合わせ、カソードにプレスし、イオン源に装填する。当研究グループが利用したオーストラリア国立大学 HIAF 施設の 14UD ペレトロン加速器を用いた加速器質量分析のビームラインと検出器の配列を図1に示した。セシウムパツタにより生成した FeO^- 負イオンは、入射電磁石を用いて、目的とする質量電荷比を持つイオンが静電加速器に入射される。ターミナル部まで 14 MV で加速された負イオンは、ストリッパーを通過する際に多価の正イオンに荷電変換され、再加速される。分析電磁石で目的とする質量電荷比を持つイオンがビームラインを通じて検出器まで運ばれる。入射電磁石と分析電磁石の磁場、加速器のターミナル電圧を変えることで安定同位体の $^{54}\text{Fe}^{11+}$ と目的核種の $^{60}\text{Fe}^{10+}$ を交互に検出器まで誘導する。 ^{54}Fe は、ファラデーカップでビーム電流として測定し、 ^{60}Fe はガス充填磁石で同重体のニッケル-60 (^{60}Ni) との分離が行われる。ガス充填磁石では窒素ガスをイオンが通過しながら、磁場により軌道が曲げられる。質量は同じであるが、原子番号が違うため、ガス中での僅かな平均電荷や阻止能の違いがガス充填磁石出口では位置の違いとなる。Fe と Ni の原子番号はそれぞれ 26 と 28 で Ni の方が大きい。そのため、ガス中での平均電荷も Ni の方が大きく、Ni の方が Fe よりも軌道半径が小さい。位置とエネルギー損失を電離箱を用いて測定をする。位置とエネルギー損失を詳細に解析すること

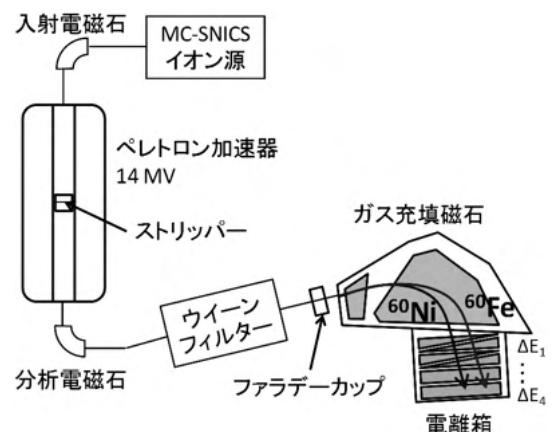


図1 オーストラリア国立大学 HIAF 施設の 14UD ペレトロン加速器を用いた加速器質量分析のビームラインと検出器の概略

により、 $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ 比が 10^{-17} の測定まで可能となった。試料の前処理で Ni を取り除き Fe を精製しているが、使用した試薬、実験器具類、空气中、除去しきれなかった Ni など、様々な要因の Ni が検出される。 $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ 比が検出限界に近い試料を分析する際は、慎重な前処理と試料の取り扱いも検出限界を大きく左右する。

2. ^{60}Fe 流入量の経時変化

世界各地で採取されたマンガンクラスト(太平洋より採取)、海底堆積物(インド洋より採取)、マンガンノジュール(大西洋より採取)を一定厚みにスライスし、マンガンノジュールとマンガンクラストは ^{10}Be で年代測定、海底堆積物は ^{10}Be と ^{26}Al で年代測定された。年代が得られた部分の $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ 比の分析を行い、図2に示すような ^{60}Fe スペクトルが得られた。 ^{60}Fe が少ない試料では数 cph(count per hour)、 ^{60}Fe が多い試料でも数十 cphの極めて少ない量の ^{60}Fe の分析である。この測定データを解析することにより図3に示す地球への ^{60}Fe フラックスの時間変化を得た。海洋に降下した ^{60}Fe は徐々に沈降し最終的には海底堆積物に取り込まれる。マンガンクラストとマンガンノジュールは海水成分を取り込みながら少しずつ成長するため、一部の ^{60}Fe しか取り込まれない。堆積物への ^{60}Fe フラックスと比較することにより得られたマンガンクラストとマンガンノジュールへの Fe の取り込み率を用いて、図3のような地球への ^{60}Fe フラックスが見積もられた。

1900年代中盤に世界各地で大気圏内核実験が行われた。降下物の中に U や Pu への中性子の多重捕獲と β

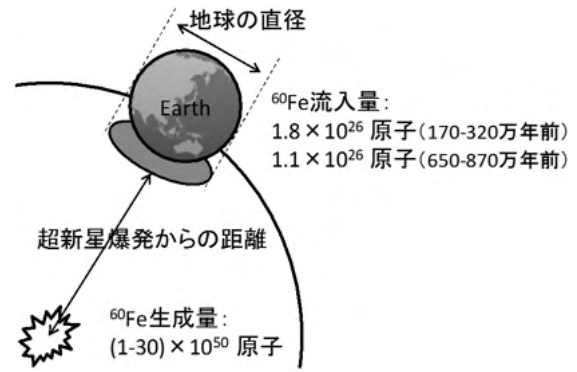


図4 ^{60}Fe 生成量と流入量と立体角の関係

壊変で生成した Es や Fm が見つかったのと同様に、鉄への中性子の多重捕獲により ^{60}Fe も生成すると思われる。図3に示されているように、各試料の現在の年代の部分から ^{60}Fe は微量検出されているが、核実験に由来する有意量の ^{60}Fe は検出されていない。一方で、 ^{60}Fe は自然界では、超新星爆発の際の高中性子密度下における中性子捕獲過程のみならず、高エネルギーの宇宙線とニッケルや銅との核破砕反応により少量生成する。宇宙空間で長期間にわたり宇宙線に照射された星間塵にはこれらの元素が含まれる。地球の近くに存在している星間塵に含まれる核破砕反応由来の ^{60}Fe も地表に降下している。核破砕反応に由来する ^{60}Fe の地表へのフラックスは $0.06 \text{ atom cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と見積もられ、図3に示した ^{60}Fe 流入量の測定値よりも十分小さい。これより、核実験や宇宙線との核破砕反応の影響は無視可能で、測定された ^{60}Fe 流入量は太陽系近傍での超新星爆発の活動からの流入を評価していることになる。太平洋、大西洋、インド洋から採取された全ての試料より170~320万年前の部分に ^{60}Fe 濃度のピークが検出された。この年代の流入は Knie らにより行われた先行研究とも一致する²⁾。また650~870万年前のマンガンクラスト試料からも ^{60}Fe 濃度のピークが検出された。過去1,000万年の間に2回の超新星爆発からの物質の流入があったことが示された。

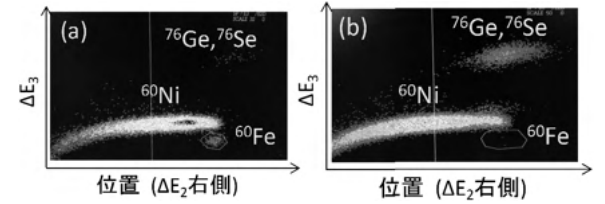


図2 標準試料(a)とマンガンクラスト試料(b)の ^{60}Fe のスペクトル

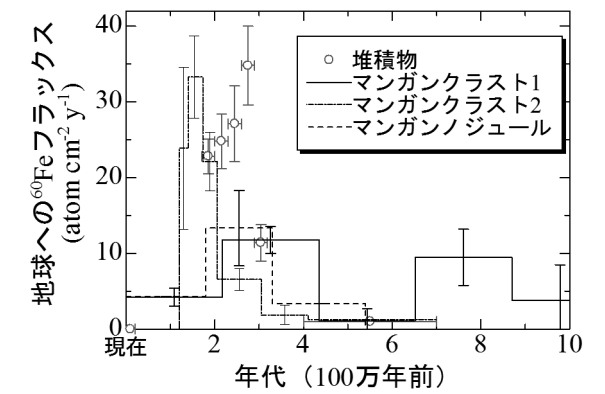


図3 堆積物、マンガンクラスト、マンガンノジュールより検出された地球への ^{60}Fe 流入量経時変化

3. ^{60}Fe 起源の推定

超新星爆発のシミュレーションに基づく、 ^{60}Fe の生成量はモデルにはいくらか依存するが、天体質量には大きくは依存せず、 $(1-30) \times 10^{50}$ 個の ^{60}Fe 原子が作られる。この ^{60}Fe は他の生成した元素と共に30~150 km/sの速度で拡散する。等方的に拡散した元素が太陽系を通過し、そのときに地表に積もったとすると、生成量と流入量には式(1)と式(2)に示す関係式が得られる。

$$\frac{\pi r_{\text{earth}}^2}{4\pi r^2} e^{-\lambda t} = \frac{I}{P} \quad (1)$$

$$r = vt \quad (2)$$

ここで、 λ は ^{60}Fe の壊変定数、 t は ^{60}Fe が作られてか

ら流入するまでの時間, r_{earth} は地球の半径, I は地球に流入した ^{60}Fe 総量, P は超新星爆発の中で作られる ^{60}Fe 量, v は作られた ^{60}Fe の移動速度を示す。170~320 万年前には地球全体で 1.8×10^{26} 原子の ^{60}Fe が流入し, 650~870 万年前には 1.1×10^{26} 原子が流入した。これは超新星爆発の際に作られた ^{60}Fe 原子数の $(6-180) \times 10^{-26}$ と $(4-110) \times 10^{-26}$ に相当する(式(1)の I/P)。170~320 万年前のイベントは, 流入が始まる 47 万年前から 610 万年前に 60~330 pc (パーセク; 1 pc = 3.26 光年) の距離で作られた ^{60}Fe が流入したと見積もられた。また, 650~870 万年前のイベントは, 流入の始まる 60 万年前から 680 万年前に 70~380 pc の距離で作られた ^{60}Fe が流入したと推定された。

現在の太陽系は直径が約 100 pc のローカルバブルと呼ばれる星間物質の空洞の中心付近に位置している。このローカルバブルの境界付近は高温のガスからなり, 10~20 発分の超新星爆発の影響によりローカルバブルが作られたことが知られている。地球上で検出された ^{60}Fe はこのローカルバブルの外から飛来したことになる。

4. 最近の ^{60}Fe の研究

当研究グループは, 3 大洋から採取された海底試料より ^{60}Fe を探索したが, 他の研究グループも様々な試料から ^{60}Fe の検出を試みてきた。また, 以前の Knie ら²⁾ が行った研究成果に基づいて, 300 万年前の流入量を再現可能な超新星爆発の位置の推定もシミュレーションを用いて試みられてきた。2016 年はこれらの成果がまとめて公表された年でもある。更に 2017 年には, 超新星爆発からの ^{60}Fe 流入による地球への影響をシミュレーションした研究成果も公表された。ここでは, 他グループによる ^{60}Fe が関連する研究について紹介する。

Ludwig⁵⁾ らのグループは太平洋で採取した海底堆積物のコア試料から, 年代間隔をより細かく ^{60}Fe を分析した。200 万年前に ^{60}Fe の流入イベントがあることを検出し, 我々のグループ³⁾ や Knie ら²⁾ による研究成果と矛盾がない結果が得られている。また, Fimiani⁶⁾ のグループは, 過去のアポロ計画の際に月より持ち帰られた試料より, ^{60}Fe の検出を試みた。月面表面は大気がないため, 常に宇宙線に晒されている。宇宙線と岩石中の構成元素との核破砕反応で ^{60}Fe の他に ^{53}Mn も生成する。試料の様々な深さより ^{60}Fe と ^{53}Mn の相関を分析し, 岩石への宇宙線照射により生成する $^{60}\text{Fe}/^{53}\text{Mn}$ 比よりも多い ^{60}Fe が検出された。これにより, 地球上だけでなく, 月面にも ^{60}Fe が蓄積していたことが明らかになった。Binns⁷⁾ のグループは, 人工衛星に搭載した検出器を用いて, 銀河宇宙線として飛来する ^{60}Fe を dE-E 測定により分析した。銀河宇宙線の中には安定核種の Fe のみならず, ^{60}Fe の明確なシグナルも検出された。超新星爆発の

際に作られたものが, 高エネルギーの宇宙線として飛び交っていることも明らかになった。

Breitschwerdt⁸⁾ のグループは, 超新星爆発の際の残骸が宇宙空間でどのように拡散するのかシミュレーションした。太陽系を含め全ての天体は銀河系の中を移動しており, 様々な位置で起こった超新星爆発からの残骸がどのタイミングでどのように流入するのか推定した。サソリ座-ケンタウルス座-南十字座の方向に 90~100 pc 離れた位置で, 少なくとも 2 発以上の超新星爆発が起こると, 300 万年前の流入のイベントはよく説明がつく。先行研究の Knie ら²⁾ が報告したデータを再現するために行われた研究であるが, 図 3 に示した我々の研究グループに照らし合わせても同様なことが言える。また我々の研究グループでは, 170~320 万年前に流入した ^{60}Fe が作られた場所を太陽系から 60~300 pc 離れた位置と推定したが, Breitschwerdt らにより推定された位置とおおよそ一致する。

一方で, 超新星爆発により発生した γ 線や X 線, 紫外線, 高エネルギーの宇宙線も地球に飛来する。宇宙線は, 大気と核破砕反応により, ミューオンなどの二次粒子を生成する。Melott⁹⁾ らのグループは, 太陽系から 50~100 pc 離れた位置で起こった超新星爆発からの光子や宇宙線による地球への影響をシミュレーションした。超新星爆発に由来する γ 線や X 線はフラックスが小さすぎるため, 地球へ何らかの影響を及ぼしたとは考えられないようである。また紫外線や可視光線も地表に到達するが, 影響を及ぼすほどではないと推定された。超新星爆発による TeV から PeV レベルの高エネルギー宇宙線フラックスは平常時よりも数百倍増え, 地表に到達するミューオンフラックスも数百から数千倍に増加する。これにより, 170~320 万年前と 650~870 万年前の超新星爆発の残骸の流入が始まる前の宇宙線が地球に到達したときに, 生命体にとっては, 突然変異や病的影響を引き起こした可能性があることが指摘されている。

IV. おわりに

超新星爆発の残骸を探索する研究は, 1971 年の Hoffman らによる研究にさかのぼる¹⁰⁾。希土類鉱物であるバストネサイトから希土類元素を濃縮する工程途中の廃液より ^{244}Pu が質量分析計を用いて検出されたことが報告された。この起源を巡り, 超新星爆発由来の ^{244}Pu が定常的に流入しており, バストネサイトの形成過程で太陽系外起源の ^{244}Pu が濃縮され検出されたなどいくつかの仮説が立てられた。2012 年に Lachner¹¹⁾ らにより加速器質量分析を用いてバストネサイト中の ^{244}Pu の再測定が行われ, 1971 年の Hoffman らによる結果と相反する結果が得られ, バストネサイト中の ^{244}Pu については決着がついた。一方, 2001 年に Paul らは, 深海堆積物表層に含まれる ^{244}Pu を加速器質量分析を用

いて測定し、 ^{244}Pu は 1 カウント検出された。 ^{244}Pu は過去に行われた核実験において U や Pu への多重中性子捕獲で生成する。検出された ^{244}Pu は大気圏内核実験で説明できる結果となった¹⁾。その後も、いくつかグループが加速器質量分析を用いて ^{244}Pu の検出を試みたが、いずれの測定結果も大気圏内核実験由来で、超新星爆発由来の ^{244}Pu の検出は依然として難しい状況であった。その中で、2004 年に Knie のグループ²⁾ がマンガクラスト中の ^{60}Fe 蓄積量の経時変化を測定し、超新星爆発由来の流入の明らかなイベントとして測定に成功した。1971 年の初めての試みから様々な ^{60}Fe の研究成果が公表された 2016 年までに 45 年が経過し、その間に加速器質量分析の劇的な進歩があったことが、成功理由の一つに挙げられる。

超新星爆発のイベントは、鎌倉時代の藤原定家が残した明月記に「後冷泉院・天喜二年四月中旬以後の丑の時、客星鶩・参の度に出づ。東方に見(あら)わる。天関星に孛(はい)す。大きき歳星の如し。」と記載がある。ここでの客星は、2,000 pc (およそ 6,500 光年) の距離で起こったカニ星雲となる超新星爆発を示しており、昼間でも充分見えるくらい明るく輝いたようである。地球上で検出された ^{60}Fe を作った超新星爆発は、太陽系からカニ星雲までの 20 分の 1 の距離で起こっており、明月記の記載よりも数百倍更に明るく輝いて見えたはずである。

本稿では成果のまとまっている ^{60}Fe について紹介したが、超新星爆発のシグナルとして使用可能な核種には、 ^{244}Pu や ^{237}Np 、 ^{247}Cm なども挙げられる。分析試料からこれらの元素を精製する前処理法、加速器質量分析におけるイオン化の方法、検出方法など実験部分の課題も多いが、今現在、これらの核種の探索にも挑戦している。

— 参考資料 —

- 1) M. Paul et al., "Experimental limit to interstellar ^{244}Pu abundance," *Astrophys. J.* 558, L133-L135 (2001).
- 2) K. Knie et al., " ^{60}Fe anomaly in a deep-sea manganese crust and implications for a nearby supernova source," *Phys. Rev. Lett.* 93, 171103 (2004).
- 3) A. Wallner, N. Kinoshita, et al., "Recent near-earth supernovae probed by global deposition of interstellar radioactive ^{60}Fe ," *Nature* 532, 69-72 (2016).
- 4) N. Kinoshita, et al., "A Shorter ^{146}Sm Half-Life Measured and Implications for ^{146}Sm - ^{142}Nd Chronology in the Solar System," *Science* 335, 1614-1617 (2012).
- 5) P. Ludwig, et al., "Time-resolved 2-million-year-old supernova activity discovered in Earth's microfossil record," *Proc. Nat. Acad. Sci.* 133, 9232-9237 (2016).
- 6) L. Fimiani, et al., "Interstellar ^{60}Fe on the surface of the moon," *Phys. Rev. Lett.* 116, 151104 (2016).
- 7) W.R. Binns, et al., "Observation of the ^{60}Fe nucleosynthesis-clock isotope in galactic cosmic rays," *Science* 352, 677-680 (2016).
- 8) D. Breitschwerdt, et al., "The locations of recent supernovae near the sun from modelling ^{60}Fe transport," *Nature* 532, 73-76 (2016).
- 9) A.L. Mellot, et al., "A supernova at 50 pc: effects on the earth's atmosphere and biota," *Astrophys. J.* 840, 105 (2017).
- 10) D.C. Hoffman, et al., "Detection of plutonium-244 in nature," *Nature* 234, 132-13 (1971).
- 11) J. Lachner, et al., "Attempt to detect primordial ^{244}Pu on earth," *Phys. Rev. C* 85, 015801 (2012).

著者紹介



木下哲一 (きのした・のりかず)

清水建設株式会社 技術研究所
(専門分野/関心分野) 加速器質量分析, 核データ利用, 宇宙地球科学, 原発廃炉

核融合トリチウム研究最前線
—原型炉実現に向けて—

第4回 固体増殖材開発の最前線

量子科学技術研究開発機構 星野 毅

日本と欧州で核融合原型炉の早期実現をはかることを目的として行う研究開発である幅広いアプローチ(BA)活動の一環として、先進トリチウム増殖材料(リチウム含有セラミックス)の製造技術開発及び特性評価を行なっている。日本は微小球の大量製造法としてエマルジョン法を選定し、従来材よりリチウム原子密度が高く、且つ化学的安定性の高いリチウム添加型チタン酸リチウム($\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_{3+y}$)や、リチウム添加型チタン酸リチウムにジルコニウム酸リチウム(Li_2ZrO_3)を固溶した新材料(LTZO)開発の最新成果を報告する。

KEYWORDS: Fusion Reactor, Tritium Breeder, Broader Approach (BA), $\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_{3+y}$, $\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_{3+y}$ with Li_2ZrO_3 (LTZO), Pebble Fabrication Technique, Emulsion Method, Tritium Release Property

I. はじめに

核融合炉は、重水素と三重水素(トリチウム)のほぼ無尽蔵な資源を利用した、次世代ベースロード電源として期待されており、現在、国際協力により、国際熱核融合実験炉(ITER)をフランスに建設中である。重水素は海水から回収可能だが、トリチウムは自然界にほとんど存在しないため、リチウムと中性子の核反応にて人工的に製造(増殖)する必要がある(図1)。

このトリチウム増殖材料としては、トリチウム放出特性等が優れている、チタン酸リチウム(Li_2TiO_3)が日本の第1候補材料であり、核融合炉ブランケットに、微小球形状で装荷される。しかし、 Li_2TiO_3 は、トリチウムを回収するために必要な水素を含むヘリウム雰囲気中、中性子照射環境下にて高温・長時間保持されることで、Liの蒸発及びLiの核的燃焼(トリチウムへの変換)により、

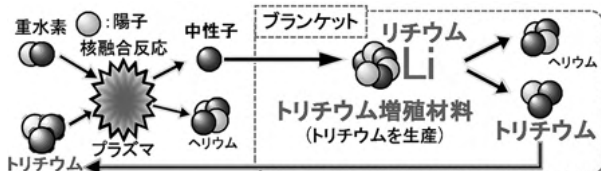


図1 トリチウム増殖材料による核融合燃料製造

Research frontier of tritium for fusion reactor- toward the DEMO reactor- (4); Recent Status of Solid Tritium Breeder : Tsuyoshi Hoshino.

(2018年4月17日 受理)

■前回タイトル

第3回 トリチウムの調達方法

トリチウム増殖材料中のLiが損失する。加えて、Tiの水素還元による酸素欠損も生じ、 Li_2TiO_3 、 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 及び LiTiO_2 の三相混合物に変化することによる各種特性への悪影響が懸念されていた。そこで、Li損失に伴う材料特性劣化を低減するため、 Li_2TiO_3 に予めLiを多く添加した先進トリチウム増殖材料として、Li添加型 Li_2TiO_3 ($\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_{3+y}$)を開発した。また、更なる化学的安定性の高い材料として、 $\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_{3+y}$ にジルコニウム酸リチウム(Li_2ZrO_3)を固溶した新材料も発案した。

これらのトリチウム増殖材料は、核融合炉のプラズマの周りを覆う、ブランケットと呼ばれる箱の中に装荷され、トリチウム燃料製造を行う。ブランケット内には多くのトリチウム増殖材料を装荷したいが、生成したトリチウムを水素添加したヘリウムガスで回収するため、粉末状では充填できない。そこで、直径1mm程度の微小球状態にて、ブランケット内に装荷する(図2)。

核融合原型炉では、大量のトリチウム増殖材料微小球が必要となるが、その製造技術は確立されていない。本連載講座では、大量製造が見通せる微小球製造法としてエマルジョン法を選定し、微小球製造試験を行った結果を報告するとともに、製造した材料のトリチウム放出特性評価結果について紹介する。

II. エマルジョン法による微小球製造

1. Li添加型 Li_2TiO_3 微小球

Li添加型 Li_2TiO_3 の微小球の試作を行う上で、まずLi添加型 Li_2TiO_3 の原料粉末の合成法の探索を行った。従来の Li_2TiO_3 では、炭酸リチウムと二酸化チタンを始発原料とする固相法が用いられてきたが、本合成法でLi

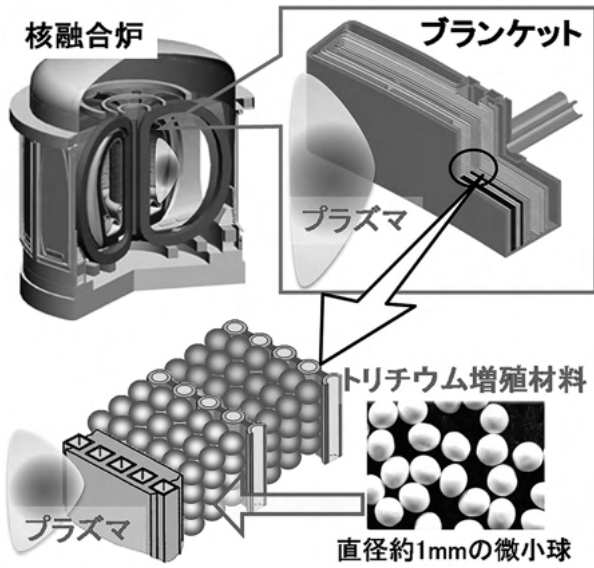


図2 微小球として核融合炉ブランケットに装荷するトリチウム増殖材

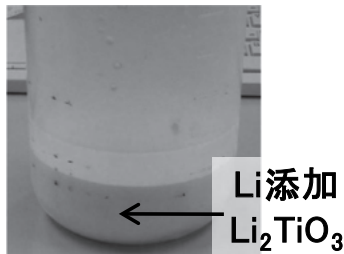


図3 ゲル状に合成されたLi添加型 Li_2TiO_3

添加を試みた場合、未反応の炭酸リチウムが残るため、Li添加型 Li_2TiO_3 を合成できなかった。

そこで、始発原料や合成手法の選定など、一からプロセスを見直し、試行錯誤の結果、全く新たな合成手法を提案した。本法は、水酸化リチウム一水和物($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$)とメタチタン酸(H_2TiO_3)を数日間混合させることにより、常温にて始発原料同士の固相反応が進行し、ゲル状とするものであり(図3)、目的とするLi添加型 Li_2TiO_3 ($\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_{3+y}$ 単一相)の原料粉末の合成技術を確認することに成功した¹⁾。

次に、微小球製造技術開発として、従来材である Li_2TiO_3 微小球製造法のゾルゲル法を試みた。しかしながら、本造粒法では、原料調整時における添加Liの減損、トリチウム放出特性に悪影響を及ぼす結晶粒径の肥大化が生じることが明らかとなった。

そこで、これらの課題を解決するため、新たな微小球製造法として様々な造粒法を試行した結果、ミクロンサイズ微粒子の大量製造法の一つであるエマルジョン法に着目し、世界で初めてミリサイズの微小球製造に成功した²⁾。本法は、まずシリンジ(注射器)の一方に油を、もう一方には原料となるスラリー(Li添加型 Li_2TiO_3 原料粉末を含む液体)を充填する。そして、スラリーの流速を油より遅くすることで、T字型流路でスラリーを油に

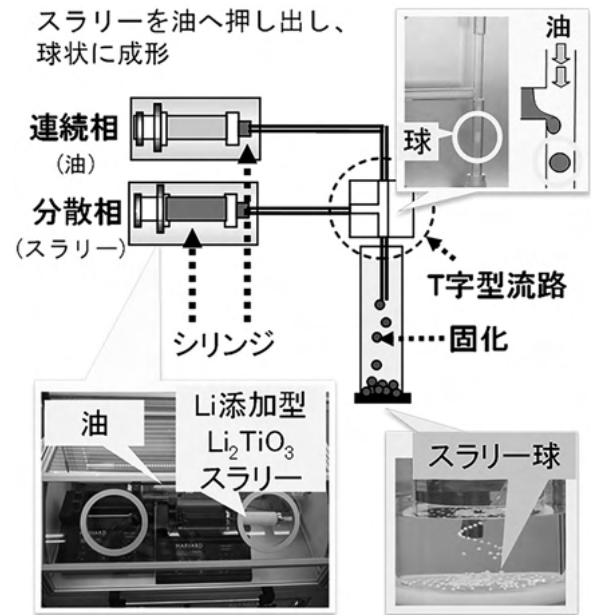


図4 エマルジョン法によるトリチウム増殖材料の微小球製造

より球状にせん断した後、焼結処理して微小球を得る手法である(図4)。スラリー粘度、流路、流速などをパラメータに、造粒条件の探索試験を行った結果、目標とする直径約1mmで、造粒前後でのLi/Ti比もほとんど変化しない試作球を得ることに成功した。

トリチウムを放出しやすくするため、トリチウム増殖材料微小球の結晶粒径は5ミクロン以下を目標値として設定したが(結晶粒内のトリチウム拡散が律速となるため)、この試作球の断面をSEM観察したところ、粒径は10ミクロン以上であった(図5(a))。そこで、結晶粒径が大きくなる原因を調べた結果、エマルジョン法では、スライム状のスラリー球を加熱してセラミックス球にする際、スラリー球の液体成分から発生する炭酸ガスが作用して結晶粒径が大きくなることを明らかにした。

次のステップとして、加熱時に発生する炭酸ガスを効率的に除去できるように、様々な加熱雰囲気を探した。その結果、真空及び水素雰囲気における加熱処理が最も適しており、目標とする粒径が5ミクロン以下の小さな結晶粒が集まった改良球の製造に成功した(図5(b))。

2. 新たな固溶体増殖材料(LTZO)

高温長時間使用時においても化学的安定性に優れたLi添加型 Li_2TiO_3 は、焼成時に添加したLiが大気中の CO_2 と反応し、トリチウム放出特性に影響を与える10ミクロン以上の大きな結晶粒を有する微小球となるため、簡易な大気中での製造が不可能であり、複雑な真空及び水素雰囲気中における焼成が必要であった。核融合原型炉では大量のトリチウム増殖材料が必要であり、大量製造にはより簡単な焼成プロセスにて製造可能な材料が求められる。

そこで、高いLi原子密度を維持しつつ、大気中でも目

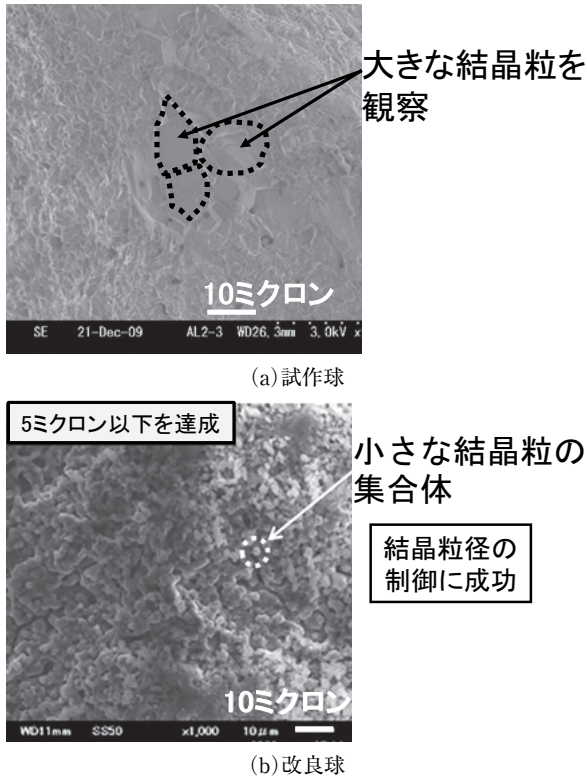


図5 Li添加型 Li_2TiO_3 微小球の断面SEM写真

標とする5ミクロン以下の結晶粒径を有する新たなトリチウム増殖材料開発として、Li添加型 Li_2TiO_3 に20wt%のジルコニウム酸リチウム(Li_2ZrO_3)を固溶した材料(LTZO)の微小球製造を、エマルジョン法にて試みた³⁾。

製作したLi添加型 Li_2TiO_3 (Li_2ZrO_3 添加なし)及びLTZO微小球表面の電子顕微鏡観察結果を図6に示す。Li添加型 Li_2TiO_3 の場合は、10ミクロン以上の大きな結晶粒を有する微小球であるのに対し(図6(a))、LTZOの場合は、20wt% Li_2ZrO_3 を固溶するのみで、トリチウム放出特性に優れている5ミクロン以下の結晶粒を有する微小球製造に成功した(図6(b))。また、LTZOのエクス線回折測定では、20wt% Li_2ZrO_3 を添加したにもかかわらず、 Li_2ZrO_3 は第二相として観察されず、Li添加型 Li_2TiO_3 と同一の単一相の結晶構造を示した(図7)。これは、 Li_2ZrO_3 がLi添加型 Li_2TiO_3 に固溶した特殊な状態(固溶体)であることを示している。

また、Li添加型 Li_2TiO_3 中のLi/Ti比の限界は2.15であったが、核融合原型炉ではより高リチウム原子密度を有する増殖材料が求められるため、Li原子密度の更なる向上を狙ったLi/Ti比2.25及び2.35における微小球製造も試みた。製造した微小球表面の電子顕微鏡における観察結果を図8に示す。

Li添加型 Li_2TiO_3 中の始発原料調整時におけるLi/Ti比を2.15(図8(a))、2.25(図8(b))及び2.35(図8(c))と高めた結果、結晶粒径はLi/Ti比とともに大きくなったが、トリチウム放出に対する最大の阻害要因と考えられる表面炭酸リチウム層は全く観察されず、かつトリチウ

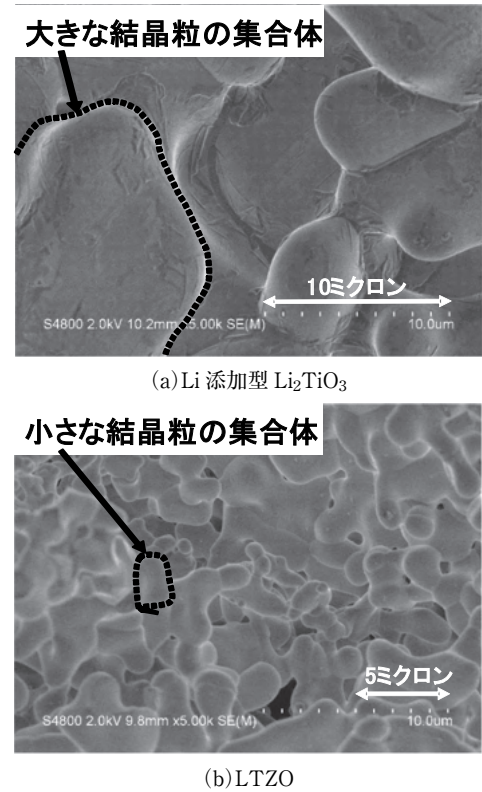


図6 大気焼成したトリチウム増殖材料微小球の断面SEM写真

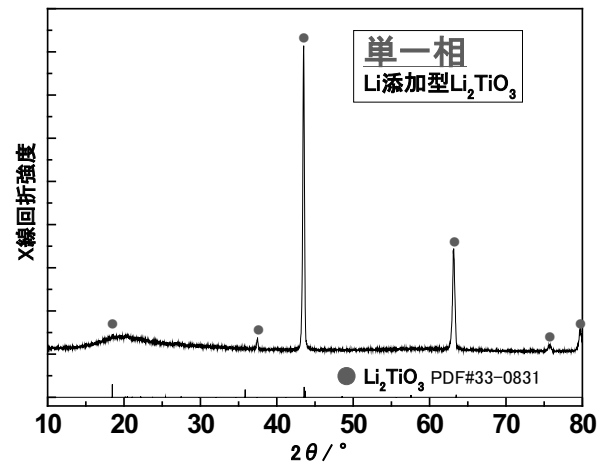


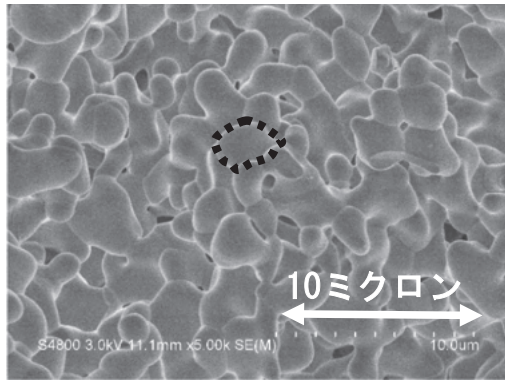
図7 LTZO微小球のXRD測定による結晶構造解析結果

ム放出速度に関する因子の一つである微小球内の結晶粒界が明快な、従来よりもLi原子密度が高い微小球製造に成功した。

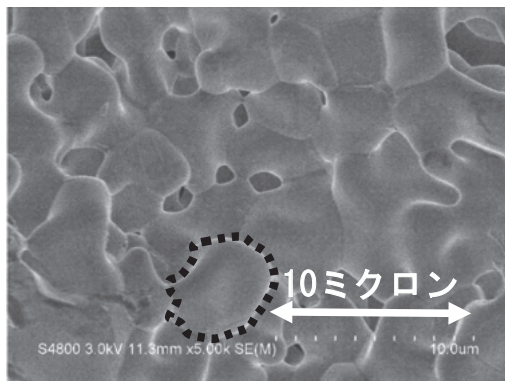
Ⅲ. トリチウム放出特性

1. 核融合中性子源における実験

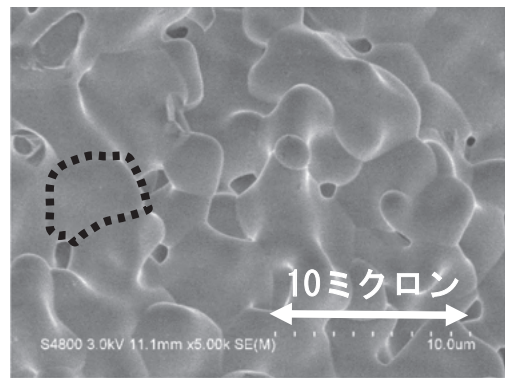
高いLi原子密度を維持しつつ、トリチウム放出特性に優れた5ミクロン以下の結晶粒を有する新たなトリチウム増殖材料として開発したLTZO(Li/Ti=2.15)のトリチウム放出特性を評価するため、高温照射試験が可能な新たな照射容器を製作し、装荷した固溶体微小球541gを、ブランケット最高使用温度である900℃に加熱した



(a) Li/Ti=2.15



(b) Li/Ti=2.25



(c) Li/Ti=2.35

図8 LTZO中のLi含有量の増加に伴う結晶粒径の変化

がら、核融合中性子であるDT中性子を照射した(図9)。

トリチウムを回収するガスとして、1%水素-ヘリウムの混合ガスを、照射容器内の微小球充填部に通気した。回収されたトリチウムの化学形としては、HTガス成分とHTO水成分の2種類が存在する。そこで、HTO水成分は1番目の水バブラーにより回収し、残ったHTガス成分は水バブラーでは回収不可能なため、白金系の酸化触媒にてHTガスをHTOに酸化した後、2番目の水バブラーにて回収した。回収したトリチウム量は、液体シンチレーションカウンターにより測定した⁴⁾。

2. トリチウム放出特性の評価

核融合原型炉ブランケットにおいて、トリチウム増殖

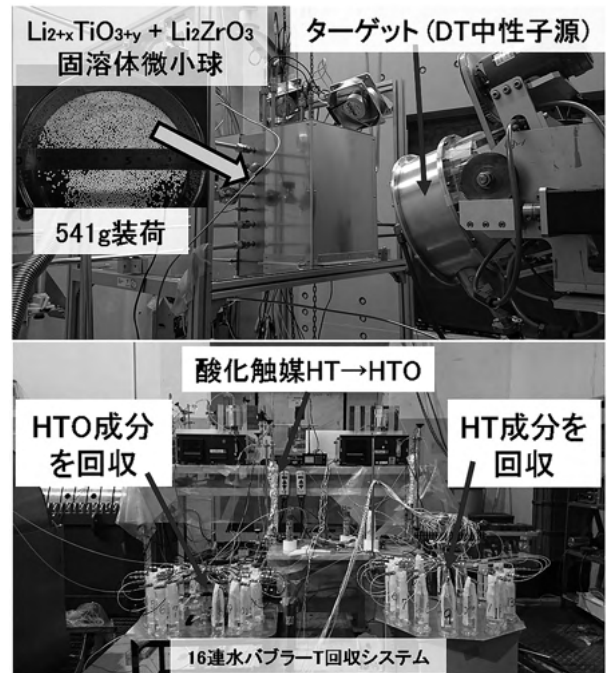


図9 DT中性子照射によるLTZO微小球のトリチウム放出特性評価

材料は300~900℃の温度範囲にて用いることが検討されている。そこで、LTZO微小球を装荷した照射容器を、300、450、600及び900℃に加熱し、これらの温度におけるトリチウム放出特性を評価した。DT中性子の照射時間は5時間であり、照射後は評価温度に照射容器を加熱維持し、トリチウム放出量の経時変化を観察した結果を図10に示す。

トリチウムの放出速度は照射試験温度に依存し、生成トリチウムのほぼ全量回収には、300℃では照射後5時間要するのに対し、450℃では4時間、600℃以上では3時間と、高温ほどトリチウム放出速度が速くなることを明らかにした。低温領域におけるトリチウム放出速度が遅い理由としては、増殖材料微小球中のトリチウム拡散速度が遅いためと考えられる。しかしながら、その速度はやや遅い程度であり、且つ優れたトリチウム放出特性を有すると言われる従来材の Li_2TiO_3 と同等の結果であったことから、新たな固溶体微小球は、核融合原型炉ブランケットにおいて利用可能な、有力な候補材料であることを明らかにした。

また、放出トリチウムの化学形としては、HTガス成分とHTO水成分の2種類が存在するが、新たな固溶体微小球は、全温度範囲(300~900℃)において、トリチウム回収処理が容易なHTガス成分が99%であることも明らかにした。従来材 Li_2TiO_3 の600℃における結果では、HTO水成分が約30%であったことから、LTZO固溶体微小球を核融合原型炉ブランケットで用いる際の、新たな優位性を示す結果を得た。

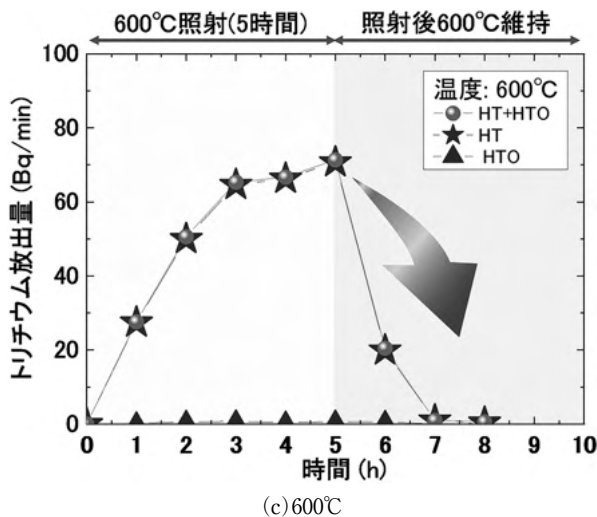
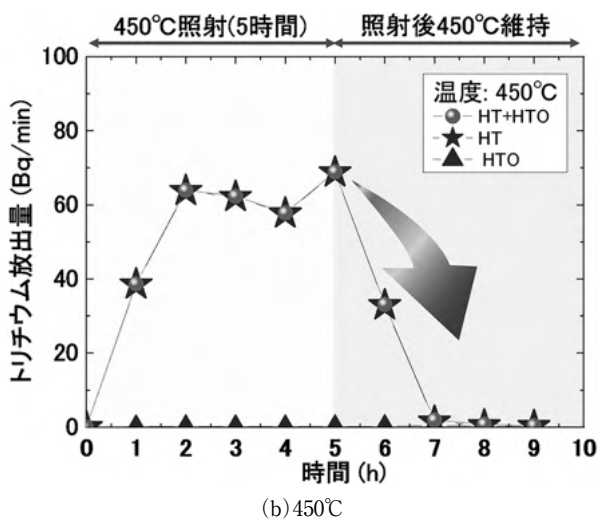
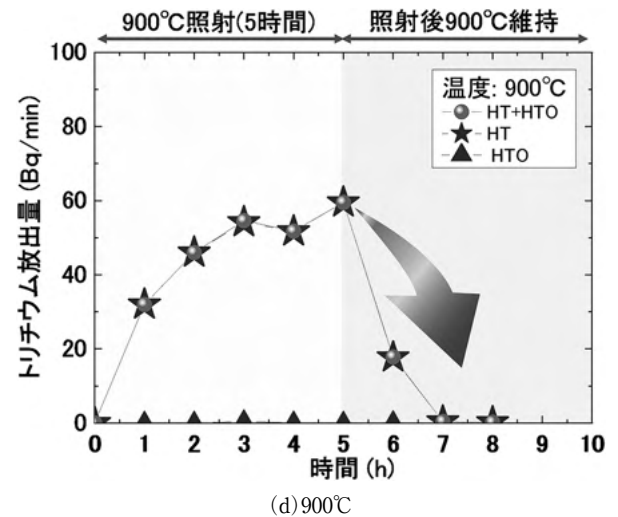
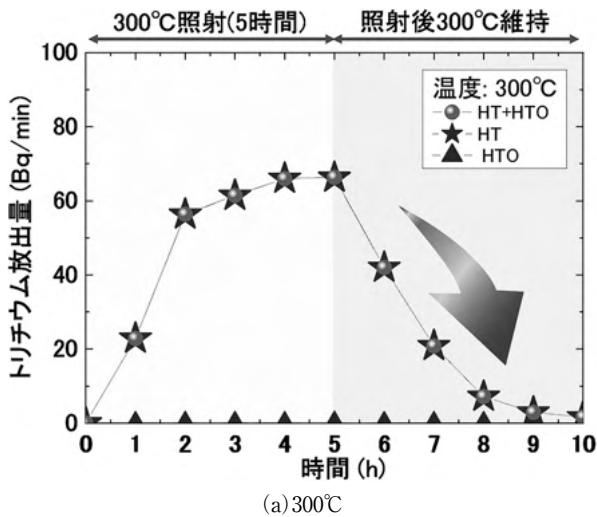


図10 DT中性子5時間照射試験におけるLTZO微小球のトリチウム放出量の経時変化

IV. 固体増殖材開発の展望

トリチウム増殖比(TBR)の向上が期待できる高いLi原子密度を有し、且つトリチウム放出特性に優れた新たなトリチウム増殖材料として、LTZO微小球の開発に成功した。本研究成果は、核融合原型炉使用環境下においても、従来材より化学的安定性の高い先進トリチウム増殖材料を開発することを目標とした、約10年間におけるBA活動の集大成であり、固体トリチウム増殖材料の特性は、飛躍的な進展を遂げた。

いよいよ、国際熱核融合実験炉(ITER)にて、固体トリチウム増殖材料をテストブランケットモジュール(TBM)に充填し、評価するフェーズが迫ってきた。ブランケット開発や原型炉設計との研究連携をより強化することで、核融合炉を実現に導けると確信している。

— 参考資料 —

- 1) Hoshino, F. Oikawa, Fusion Engineering and Design, 86, 2172-2175, (2011).
- 2) T. Hoshino, M. Nakamichi, Fusion Engineering and Design, 87, 486-492, (2012).
- 3) T. Hoshino, Nuclear Materials and Energy, 9, 221-226, (2016).
- 4) T. Hoshino, K. Ochiai, Y. Edao, Y. Kawamura Fusion Science and Technology, 67, 146-149, (2015).

著者紹介



星野 毅 (ほしの・つよし)

量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門
(専門分野/関心分野) 東京大学大学院工学系研究科博士課程を修了。核融合炉用材料や発電する海水リチウム回収技術の研究に従事。

部会トピックス

バックエンド分野における人材育成・知識継承にかかわる取り組み

技術分野間の交流・世代間の交流への試み

東芝エネルギーシステムズ 小畑 政道,
原子力安全推進協会 山岡 功

バックエンド部会は、1985年から夏期セミナーを開催し、また、1994年からはバックエンドに関連するレポートや論文を集めた部会誌を発行し、更に2003年からは週末基礎講座を開催して、技術分野間の交流と世代間の交流とを図ってきた。本稿では、2017年度に実施した夏期セミナーと週末基礎講座での試みと結果を紹介する。

KEYWORDS: AESJ NUCE(Division of Nuclear Fuel Cycle and Environment), NUCE Summer Seminar, NUCE Week-end Lecture Course of Basics

I. はじめに

バックエンド部会は、放射性廃棄物処理処分に関連する技術の検討が進むにしたがって技術分野が細分化され、各分野の技術者が他の分野の技術の進展を理解できない、あるいは関心がないといった状況になってきている可能性を認識している。

このような状況からは、各分野に部分最適化された技術やシステムを生むことはできるものの、放射性廃棄物処理処分の全体を俯瞰し大局的な観点から全体を最適化するシステムは生まれにくいと懸念している。

また、バックエンド部会は、原子力利用で生じる放射性廃棄物の長期にわたる処理処分を担う人材を継続的に育成していく必要があることも認識している。

そこで、バックエンド部会は、技術分野間の交流と世代間の交流との両者を積極的に進めることとし、その方策について継続的に検討し活動を試みてきた。バックエンド部会誌の発行、夏期セミナー・週末基礎講座の開催、といった取り組みである。

ここでは、2017年度に実施した夏期セミナーと週末基礎講座での、技術分野間の交流・世代間の交流への試みと結果を紹介する。

Activities and Trials for communication across different technical area and for human resources development:
Masamichi Obata, Isao Yamaoka.

(2018年5月22日 受理)

II. 取り組み

バックエンド部会は、夏期セミナーで技術的な情報交換と部会員の交流を図り、週末基礎講座で教育的な情報提供と若手世代の交流を図っている。以下に各々の実績と課題などを述べる。

1. 夏期セミナー

(1) 開催実績と懸念

バックエンド部会は、1985年以降、例年7～8月に夏期セミナーを実施してきた。開催実績を表1に示す。近年は、講演とパネルディスカッション、および交流会と連動したポスターセッションで構成している。

例年、概ね100名以上、多い年には約200名が参加してきた。しかしながら、近年は学生の参加者が皆無となり約90名となっていた。これは、学生の年間スケジュールが2010年頃から変わってきており、7～8月には参加しにくいことが端的な原因と考えている。

また、放射性廃棄物の処理処分が学生には魅力的な分野ではなくなっているのではないかと、この懸念も持っている。

部会としては、このような状況での継続的な人材育成に危機感を持っている。

(2) 2017年度夏期セミナーの取り組みと結果

そこで、2017年度は、学生が参加しやすい条件を整えるよう試みることとし、時期、場所、費用を次のように

表1 バックエンド夏期セミナー開催実績

回	開催日	会場	参加者数
33	2017.08.25(金)-26(土)	東京都市大学(東京都世田谷区)	113名
32	2016.08.03(水)-04(木)	サンブラス天文館(鹿児島市)	91名
31	2015.08.05(水)-06(木)	旭川道北経済センタービル	90名
30	2014.08.06(水)-07(木)	ビッグバレットふくしま (福島県 郡山市)	83名
29	2013.08.07(水)-08(木)	コアッセふくしま (福島県 福島市)	93名
28	2012.08.22(水)-23(木)	コアッセふくしま (福島県 福島市)	115名
27	2011.08.04(水)-05(金)	福島県 会津若松市 東山温泉	約120名
26	2010.08.02(月)-04(水)	レゼプションハウス名古屋通信会館	約120名
25	2009.07.29(水)-31(金)	旭川ターミナルホテル	約160名
24	2008.07.31(木)-08.01(金)	仙台エケルホテル東急	約130名
23	2007.07.26(木)-27(金)	上新原文化センター	約110名
22	2006.07.27(木)-28(金)	北九州アインズホテル	約150名
21	2005.07.28(木)-29(金)	山形国際ホテル	約150名
20	2004.07.29(木)-30(金)	姫路キャッスルホテル	約150名
19	2003.07.31(木)-01(金)	静岡音楽館AOi	約140名
18	2002.08.01(木)-02(金)	新潟東映ホテル	約140名
17	2001.07.12(木)-13(金)	土佐ロイヤルホテル	約100名
16	2000.07.13(木)-14(金)	ホテルルージュ札幌	約130名
15	1999.07.22(木)-23(金)	金沢ニューグランドホテル	約140名
14	1998.07.22(水)-24(金)	シーサイドホテルフェニックス	約110名
13	1997.07.23(水)-25(金)	長崎東急ホテル	約110名
12	1996.07.24(水)-26(金)	淡路島	約120名
11	1995.07.12(水)-14(金)	国際佐渡観光ホテル八幡館	約130名
10	1994.07.06(水)-08(金)	福岡・玄海ロイヤルホテル	約120名
9	1993.07.07(水)-09(金)	能登ロイヤルホテル	約130名
8	1992.07.08(水)-10(金)	愛媛・ホテル奥道後	約170名
7	1991.07.10(水)-12(金)	北海道・鹿部ロイヤルホテル	約180名
6	1990.07.11(水)-13(金)	八幡平ロイヤルホテル	約200名
5	1989.07.05(水)-07(金)	岐阜・高山グリーンホテル	約160名
4	1988.07.06(水)-08(金)	鹿児島・ホテル林田温泉	約160名
3	1987.07.29(水)-31(金)	秋田・湯瀬ホテル	約130名
2	1986.07.14(月)-16(水)	鳥取・三朝温泉会館	約120名
1	1985.07.15(月)-17(水)	筑波研修センター	約160名

工夫した。

時期：大学院入試、原子力学会秋の大会を考慮

場所：全国から概ね交通の便が良い場所

費用：低廉に抑える

その上で、部会員の関心も高かった次の二つのテーマで2日間のセミナーとし、初日にポスターセッションと情報交換会を設けた。

① 原子力施設の廃止措置における廃棄物マネジメントの役割

② 地層処分：基本的な考え方・これまでの取り組み・現状

①については、大学の研究炉の廃止措置、商用炉の廃止措置、および解体廃棄物の処理処分について、海外からの講演者も3名招き、国内外の計画と実績・経験について6件の講演を設け、各々質疑応答を行った。講演に続くパネルディスカッションでは、海外から見た日本の廃棄物処理処分への提言などを共有した。

②については、高レベル廃棄物の処分概念の検討経緯と課題、その基本となる科学的な基礎について、処分システム全体について振り返りと確認の講演とした。いずれのテーマでも、講演内容に限らない質問が若手から出され、活発な意見交換がなされた。

これら講演の内容は、当部会誌「原子力バックエンド研究 Vo.24 No.2 (2017年12月15日発行)」(Web 公開先：<https://nuce.aesj.or.jp/journal>)、および、当部会Webサイト(<https://nuce.aesj.or.jp/>)を参照願いたい。

結果的に、参加者113名のうち学生が1割を超える13



図1 ポスターセッションの様子

名となり、年齢構成も若手の割合が高い印象であった。また、ポスター賞2名のうち1名は学生参加者に授与された。

ここ数年皆無に近かった学生参加者を得ることができ、講演およびパネルセッションでの質疑応答に加えて、ポスターセッションおよび情報交換会でも活発な質疑応答と会話が交わされた。これらを通じて、ベテラン、若手ともに、参加者各々が持つテーマの大局的な位置付けを確認する上で良い機会とできたと考えている。

(3) 2018年度夏期セミナーへの反映

2017年度のセミナー会場で回収したアンケートでは、廃棄物処分の技術的な内容に加えて、安全規制との関係についても関心が高いことが伺えた。そこで2018年度以降は、これに関連するテーマも候補として企画していくことも考えられる。

また、2017年度は見学会を企画しなかった。現場、工場、サイトなどを実際に見る機会を提供することは、夏期セミナーの大事な役割の一つと考えるため、2018年度以降は見学会を含めた企画も考えられる。

2. 週末基礎講座

(1) 開催実績と懸念および工夫

バックエンド部会は、2003年以降、ほぼ例年10~12月に週末基礎講座を実施してきた。開催実績を表2に示す。学生と社会人若手を中心に概ね30名程度の参加者を得ている。

本講座では、提供する情報が、とすれば特定の技術分野の詳しい情報に偏る懸念があった。このため2016年度以降は、原子力利用の意義から説明を始め、処理と処分との関係を説明することで、技術分野を横断して放射性廃棄物処理処分の全体最適を考えるきっかけを持つように工夫している。

(2) 2017年度の取り組みと結果

2017年度は、廃止措置の実務に取り組んでいる電気事業者殿も講師に迎え、教育的情報と実務とのつながりを

表2 週末基礎講座開催実績

回	年度	開催日(土)(日)	会場	参加者数
15	2017	11/11,12	京都大学吉田キャンパス	40名
14	2016	10/15,16	セラトピア土岐 瑞浪超深地層研究所	35名
13	2015	11/7,8	東北大学	37名
12	2014	10/18,19	電力中央研究所 狛江地区	24名
11	2013	10/26,27	石川県四高記念文化交流館	29名
10	2012	11/17,18	原子力機構リコッティ	33名
9	2011	10/29,30	九州大学	27名
8	2010	10/30,31	福井大学	40名
7	2009	10/24,25	北海道大学	58名
6	2008	2009/2/8(日)	福岡県中小企業振興センター	40名
5	2007	10/20,21	東北大学	29名
4	2006	10/28,29	原子力機構リコッティ	26名
3	2005	10/15,16	電中研大手町本部	15名
2	2004	10/9,10	京都大学原子炉実験所	21名
1	2003	12/6,13(土)	原子力安全研究協会	31名

意識できるようにプログラムを編成した。

また、全国からの交通の便が良い関西圏での開催として参加者は例年より少し増え、開催場所のアンケートにも都市部開催が良いとの傾向が現れた。

例年プログラム最後にグループディスカッションを行っている。今年も地層処分をテーマにして参加者と講師のコミュニケーションが図られた。

Ⅲ. まとめ

2017年度に実施した夏期セミナーと週末基礎講座での、技術分野横断の交流・世代間の交流への試みと結果を紹介した。

当部会の試みが、同様の問題意識を持った原子力学会員各位の参考となる部分があれば幸いであり、また、各



図2 若手と講師のディスカッションの様子

位のご意見・アドバイスを頂き当部会の活動をより良いものとしていきたい。

著者紹介



小畑政道 (おばた・まさみち)
東芝エネルギーシステムズ 原子力化学
システム設計部
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処理処分、廃止措置



山岡 功 (やまおか・いさお)
原子力安全推進協会
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処理処分、廃止措置

核融合原型炉開発の動向

アクションプランと核融合工学研究の進展

慶應義塾大学 岡野 邦彦,
量子科学技術研究開発機構 飛田 健次

本稿では、我国の核融合開発の経緯、今後の計画、原型炉概念設計の現状を簡潔に紹介する。平成4年に設定された基本計画に沿い、現在は、実験炉 ITER (建設中) を軸として核融合連続燃焼の実現を目指す段階にある。今後は、安定した電気出力、商用化に十分な稼働率、持続運用可能なトリチウム増殖率、そして保守を含めた高い信頼性と運用性などを確認するための原型炉を建設し運用する段階を目指す。この原型炉開発に関するアクションプランが2017年12月に決定されている。また原型炉設計を全日本体制で取り組むための特別チームも設置され、目指すべき原型炉の基本概念設計が進んでいる。

KEYWORDS: Fusion, DEMO reactor, Action Plan, Conceptual design, Fusion Technology, Roadmap, Tokamak, ITER, Plasma.

I. 我が国の核融合開発の経緯

我が国の核融合研究開発は、平成4年の原子力委員会による決定「第三段階核融合研究開発基本計画」¹⁾に沿って実施されている。この第三段階の中心となる装置は、実験炉 ITER であり、現在、フランスのカダラッシュに国際協力で建設中である。今後の展開については、平成17年の原子力委員会核融合専門部会の決定「今後の核融合研究開発の推進方策について」²⁾に、核融合エネルギーの「技術的実証・経済的実現性」を目的とした原型炉計画を中核とする第四段階に向けた具体的な方針が示された。平成21年には、原子力委員会核融合専門部会により、報告書「原子力政策大綱等に示している核融合研究開発に関する取組の基本的考え方の評価について」³⁾が取りまとめられ、そこでは、原型炉の実現に向け、我が国として戦略的なロードマップを策定し、産学官で共有してオールジャパン体制で取組を推進する必要性が指摘された。

平成25年に核融合研究作業部会によって示された「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の進め方について」に沿って構築された「原型炉開発のために必要な技術

基盤構築の中核的役割を担うチーム」(略称：合同コアチーム)は、核融合原型炉の開発に必要な技術基盤構築の在り方を、我が国の核融合コミュニティの総意を踏まえて検討し、平成26年に「合同コアチーム報告」⁴⁾を取りまとめた。

この報告を受け、平成27年3月の核融合科学技術委員会ⁱにおいて、核融合研究開発の総合的な進捗状況等を俯瞰的に把握し、アクションプランの策定をはじめとする事項を審議する「原型炉開発総合戦略タスクフォース」(タスクフォース)が設置された。また、タスクフォースの指導のもとに、産学官のオールジャパン体制により原型炉開発の技術基盤構築を進めることを目的に、「原型炉設計合同特別チーム」(特別チーム)が結成され、原型炉の概念設計及び研究開発が開始されている。

このような原型炉開発に向けたこれまでの種々の検討を参照しつつ、最新の研究開発の進捗状況と ITER 計画を始めとする内外の状況を考慮した、原型炉研究開発についての報告書として核融合科学技術委員会により平成29年12月に決定されたのが、「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」⁵⁾であり、それに付随する形で、「原型炉開発に向けたアクションプラン」とその「項目別解説」⁶⁾が公開されている。

Direction toward fusion DEMO reactor development: Action plan and progress in fusion technology : Kunihiko Okano, Kenji Tobita.

(2018年6月4日 受理)

ⁱ 正式名称は、文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会

現在は、上記アクションプランに基づき、開発の優先度やマイルストーン、国際協力項目なども含めて総合的に開発工程をまとめた原型炉開発ロードマップの構築をタスクフォースにて進めている段階である。

II. アクションプランの概要

アクションプランは、原型炉研究の全体を包含する原型炉設計研究を含めた15の技術分野ごとの記載からなっている。すなわち、0. 炉設計、1. 超伝導コイル、2. ブランケット、3. ダイバータ、4. 加熱・電流駆動システム、5. 理論・計算機シミュレーション、6. 炉心プラズマ、7. 核融合燃料システム、8. 核融合炉材材料と規格・基準、9. 安全性、10. 稼働率と保守性、11. 計測・制御、12. 社会連携、13. ヘリカル方式、14. レーザー方式 である。13と14については、それぞれの方式による原型炉の開発ではなく、トカマク方式による原型炉への学術的または工学的寄与が可能な項目が記載されている。トカマク方式と同じ磁場方式のヘリカル方式については、ほとんどの研究開発はトカマク原型炉の開発にもつながる一方、レーザー方式については、レーザーそのものの開発など、レーザー方式特有のものがあるので、それについては、本アクションプランでは、15番目に「参考」として添付されている。

アクションプランは、14項目＋参考1項目が18ページにわたる規模で示されており、ここではそのすべてを掲載することはできないため、全体を統括する点で重要な「0. 炉設計」の項目におけるアクションプランの例を、略号・凡例のページと共に図1に示しておく。アクションプランは以下4つの期間ごとに示されている。

① 2015年～2020年頃

これはすでに実施中、またはすぐに開始すべきアクションである。2020年頃に第1回C&Rを実施して進捗を確認する。

② 2020年頃～2025年頃

2025年に予定されるITERの運用開始から数年以内に実施される第2回C&Rまでに確認すべき、または完了すべきアクションが示されている。

③ 2025年頃～2035年頃

ITERのDT燃焼実現の確認後に行われる原型炉建設への移行判断までに実施/完了しておくべきアクションが示されている。2025年頃以後、一部の中規模R&Dは順次実施に移していく必要がある。

アクションプランによれば、2030年代中盤には原型炉の建設を含む第四段階への移行を判断することが、日本の核融合研究において共通に認識されている目標「2040年での原型炉の実現」には必須である。

原型炉から商用炉への展開が開けるには、安定した電気出力、商用化に十分な設備利用可能率(Availability)、持続運用可能なトリチウム増殖率、そして保守を含めた

十分に信頼性の高い運用性の実現が必要である。この目標の実証には、最低でも10年間程度の原型炉での技術実証期間が必要であろう。

第四段階に移行するには、ITERの自己点火実験の成功と国内に建設中の超伝導定常トカマクJT-60SAによる成果の達成が必須であろう。加えて、いくつかの工学実証のための設備が必要であろうこともアクションプランで指摘されている。例えば、14MeVの中性子によって材料照射試験を実施するための加速器型の中性子照射試験装置は2020年代中盤には建設を判断する必要がある。これは、現在、A-FNSとして検討が進行中である。同様に、ダイバータの高い熱負荷を試験する設備も必要とされている。2030年代に入ると、大量トリチウムの取扱設備も必要になる。また原型炉の建設判断前には、その保守システムを実機大で実証確認する設備も必要であることが指摘されている。

2035年頃に予定されるITERの燃焼確認後は、速やかに原型炉建設段階への移行判断を行う必要がある。

このアクションプランを基に現在タスクフォースで作成中のロードマップについては、まだ未公開のためここに掲載できないが、文部科学省の原型炉開発総合開発戦略タスクフォース⁷⁾ならびに核融合科学委員会⁸⁾のサイトに公開後に順次掲載されるので、チェックされたい。

III. 核融合原型炉の設計活動

原型炉設計に取り組むため2015年6月に設置された特別チームは拠点を量子科学技術研究開発機構(QST)六ヶ所核融合研究所に置き、QSTのほか、核融合科学研究所(NIFS)等の研究機関、大学、産業界の参画の下で、産学官合同のオールジャパン体制で概念設計活動を開始した。特別チームの設置は、研究機関や大学の研究グループの枠を超えた「日本の原型炉」構築を目指す正式な設計活動になったところに大きな意義がある。本活動の構造を図2に示す。特別チームは、文部科学省の核融合科学技術委員会下の原型炉総合戦略タスクフォースの方針(アクションプラン)に沿って、原型炉設計を実施する。

原型炉には、①数十万kWを超える定常かつ安定な電気出力、②実用に供しうる稼働率、③燃料の自己充足性を満足する総合的なトリチウム増殖、という要件を満たすことが求められ⁴⁾、現在、プラズマ主半径8.5m、核融合出力1.5-2GW級の核融合原型炉の概念検討が行われている(図3)。その主要パラメータを表1に示す。これまでの核融合炉概念研究⁹⁻¹²⁾の設計知見を踏まえ、ダイバータでの除熱とプラズマ電流を誘導するための磁束供給の観点で開発リスクを低減して比較的保守的な炉概念である。原型炉の加圧水条件(290~325℃、15.5MPa)として既存の蒸気タービンによる発電技術を活用し、開発項目を減らす方針である。核融合炉の出力は、軽水炉よ

アクションプラン構成表

原版のカラー表現を、白黒印刷でもわかるように加工しています。

凡例		概念設計の基本設計	概念設計	工学設計
合同特別チームの活動フェーズ		2015	2020頃	2025頃
#. 課題名		研究計画1	研究計画2	研究計画3
小課題名1	アクションを、開始、実施機関記号、アクション名、終了年の順に記載: (15)特/Q/N:アクション1(25) (15)等は 2015年 の意味で開始年、完了年を示す。		----->(15)特/Q/N:アクション (25) →(*) (*)は2037年以後も継続の意味
小課題名2	同区分間に開始と終了の場合の記載例: (15)Q/N/特:アクション2 →(19)		注: 完了時期の(19)とは、2020年に予定される第1回中間C&Rの前までを意味する。
責任をもって実施することが期待される機関・組織の記号		直接の実施でなく全体調整等を行う機関は、 正や特のように、下線付きで、位置は実施期待機関の後。		
国: 政府 特: 原型炉設計合同特別チーム Q: 量子科学技術研究開発機構(核融合) N: 核融合科学研究所 大: 大学 産: 産業界 F: 核融合エネルギーフォーラム	C1~C5: 大学研究所・センター等(右記) 学: 学協会 Ij: I T E R機構(全日本としての関与) 物: 物質・材料研究機構 QW: 量子科学技術研究開発機構(関西研) TF: 原型炉開発総合戦略タスクフォース HQ: 社会連携活動ヘッドクォーター	大学研究所・センター等 C1: 大阪大学レーザー科学研究所 C2: 京都大学エネルギー理工学研究所 C3: 筑波大学プラズマ研究センター C4: 九州大学応用力学研究所 C5: 富山大学水素同位体科学研究センター		

合同特別チームの活動フェーズ		概念設計の基本設計	概念設計	工学設計
		2015	2020頃	2025頃
0.炉設計		概念設計		工学設計
		物理・工学設計ガイドライン構築		サイト評価 建設向け設計 建設地候補選定 ▲
		安全確保方針案の策定	安全要求・解析・評価ならびに法令準備	安全法制の整備と候補サイトでの安全評価
		物理・工学・材料データベース構築		JT-60SAや材料照射成果にそったDB更新
炉概念と建設計画	(15)特: 物理・工学ガイドライン →(19) (15)特: 基本概念設計 →(19) (16)特/TF: 燃料サイクル戦略(26) (17)Q/N/大/特: 統合シミュレータ(26) (18)特/産: コスト評価(31)	(20)特/産: 概念設計 →(26) ----->(16)特/TF: 燃料サイクル戦略(26) ->(17)Q/N/大/特: 統合シミュレータ(26) (23)特/Q/F: 目標プラズマ性能更新 →(28) ----->	(27)産/特: 炉本体設計 →(35)	(18)特/産: コスト評価(31) (29)国/TF: 候補地選定 →(31) (32)国: 建設サイト評価・選定 →(35)
機器設計	(15)特/Q: SC概念の基本設計 →(19) (19)特/Q: 原型炉TBM目標 →(19) (17)特/産: BOPを含む機器構成案→(19)	(21)特/産: BOP概念設計 →(26)	(27)産/特: プラント・建屋・機器設計 →(31) (27)学/特: 規格・基準 →(31) (規格基準とサイト候補決定後) (32)産/特: プラント・建屋・機器設計 →(35)	
安全確保指針	(16)特/産: 安全確保方針案 →(19)	(20)特: 安全要求・解析・評価(31) (20)特/産: 原型炉プラントの安全上の 特徴整理→(26) (20)TF/特: 安全規制法令予備検討 →(26)	----->(20)特: 安全要求・解析・評価→(31) (27)国/TF: 安全規制法令 →(35) (32)国: 安全評価 →(35)	
物理・工学・材料DB	(16)Q/大/F/特: 原型炉物理DB(26) (16)Q/大/F/特: 工学・材料DB(26)	----->(16)Q/大/F/特: 原型炉物理DB(26) ----->(16)Q/大/F/特: 工学・材料DB(26)	(27)Q/特: 物理・工学DB更新 JT-60SAを反映 (32)Q/特/産: 材料DB更新 14MeV重照射データを反映	→(31) →(35)

図1 原型炉開発に向けたアクションプラン
凡例と項目「0. 炉設計」のアクションプランの例。全体では14項目+参考1項目がある。

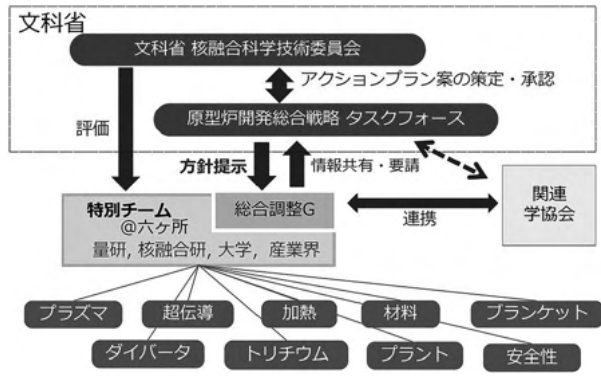


図2 核融合原型炉の開発に取り組む体制

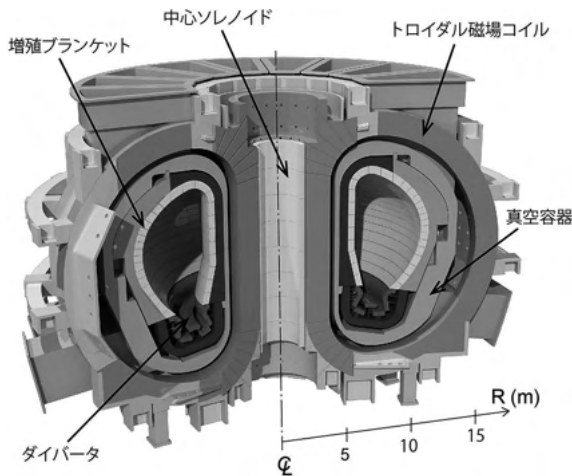


図3 核融合原型炉本体の概念図

り短時間(分オーダー)で定格に達すると考えられるので、原型炉の運転形態と整合をとるために既存発電技術に求められる変更点について検討しているところである。本設計活動の当面の目標は、2025年頃までに原型炉のプラント全体概念(図4)を示すことであり、それまでに、原型炉本体、構成機器及び付帯設備の技術仕様、安全設計指針、廃棄物管理シナリオ、運転シナリオ、長期的な資源確保の方策、コスト概算、工学設計段階(2025年頃~2035年頃)に向けた工学開発計画の検討を進める。原型炉における大きな技術的課題は、発電のための高パワーの取扱い、燃料(トリチウム)生産の自己充足性、及び中性子照射により損傷した炉内機器の遠隔操作による定期交換である。これらに関する技術や経験はITERの実験でも部分的には得られるが、実用を見通しうるレベルで技術実証を求められるところに原型炉の難しさがある。

トリチウム燃料の生産のため、原型炉の炉内には炉心プラズマを取り巻くように増殖ブランケットを配置する。この増殖ブランケットの技術確立までには、厳しい中性子照射に耐える構造材料(低放射化フェライト鋼¹³⁾やトリチウム生産のための機能材料(リチウムチタン酸化物¹⁴⁾、ベリライド¹⁵⁾)には大量生産技術、中性

表1 核融合原型炉の主要諸元

主半径 (m)	8.5
アスペクト比 A	3.5
プラズマ断面の楕円度	1.65
プラズマ電流 (MA)	12.3
プラズマ軸上磁場 (T)	5.94
核融合出力 (GW)	1.46
熱出力 (GW)	1.88

子照射材の特性把握、最終的には規格・基準確立まで長期間にわたる研究開発が必要になることから、原型炉設計と並行して材料開発が行われている。これまでのところ、中性子照射の影響は原子炉内での材料照射やイオンビーム模擬試験で評価されているが、核融合炉内では14 MeV 中性子照射に伴う He 生成が材料特性や寿命に重要な影響を与えると考えられるため、核融合炉材料の試験を主目的とした核融合中性子源の開発も進行中である¹⁶⁾。原型炉概念設計が完了し、遠隔保守や超伝導コイルなどの大規模な機器のオプションが絞り込まれる2025年以降には、原型炉のための実規模大の技術開発が見込まれる。

IV. おわりに

本稿では、文部科学省下の委員会による核融合原型炉開発に向けた施策とそれを受けた研究開発の動向を概説した。II節で述べたアクションプランは、原型炉の建設開始までに確立しなければならない技術基盤を網羅したもので、改めて眺めると取り組まねばならない研究開発の裾野は広い。これまでは核融合コミュニティからは遠いとみなしてきた関連学協会との連携・協力も積極的に進める必要があり、原型炉開発をとおして楠の大木のような核融合学を築く必要があるという思いを強くする。

— 参考文献 —

- 1) 「第三段階核融合研究開発基本計画」, 平成4年6月9日, 原子力委員会.
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryo/kettei/kettei920609.htm>
- 2) 「今後の核融合研究開発の推進方策について」, 平成17年10月26日, 原子力委員会 核融合専門部会.
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryo/kettei/houkoku051026/index.htm>
- 3) 「原子力政策大綱等に示している核融合研究開発に関する取組の基本的考え方の評価について」, 2009年1月22日, 原子力委員会 核融合専門部会.
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/houkou/090122-houkokusyo.pdf>
- 4) 合同コアチーム報告, 「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告」, NIFS-MEMO-69, 2014年9月.
- 5) 「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」文部科学省 核融合科学技術委員会, 平成29年12月18日.
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/

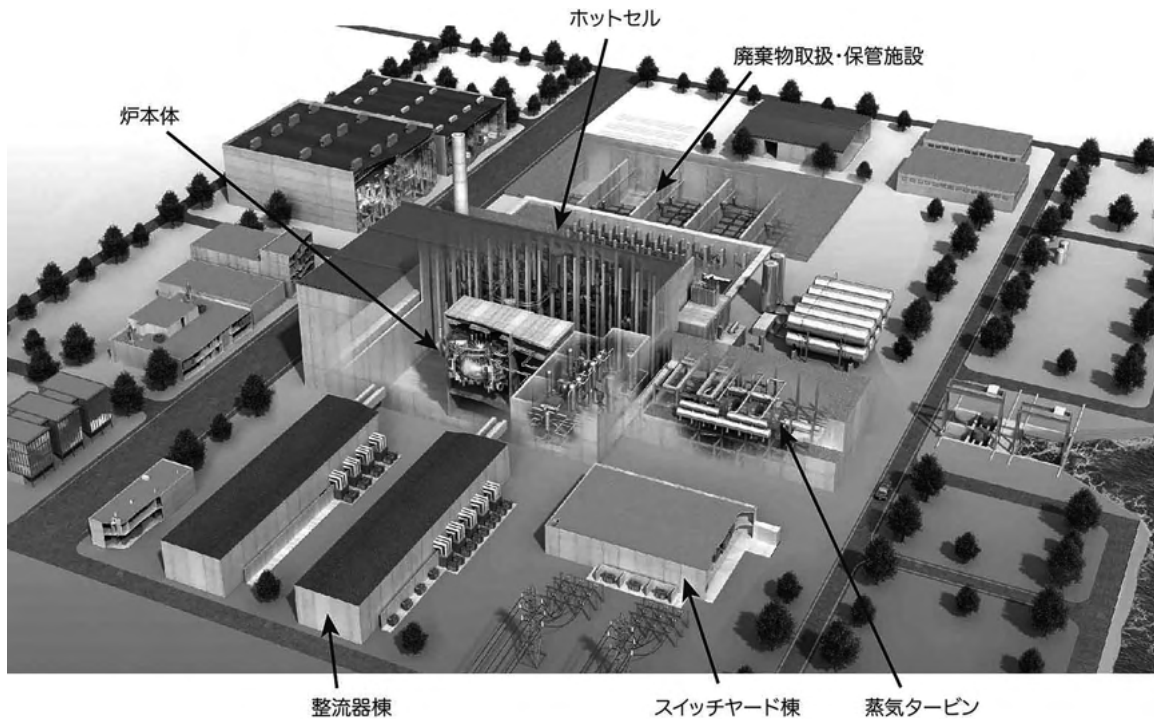


図4 核融合原型炉プラントの配置案

074/houkoku/1400117.htm

6) 「原型炉開発に向けたアクションプラン」と項目別解説。

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2017/12/28/1399735_003.pdf

7) 核融合科学技術委員会 原型炉開発総合戦略タスクフォース。

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/078/index.htm

8) 核融合科学技術委員会。

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/index.htm

9) M. Kikuchi, Nucl. Fusion, 30, 265 (1990).

10) K. Okano et al., Nucl. Fusion, 40, 636 (2000).

11) K. Tobita et al., Nucl. Fusion, 47, 892 (2007).

12) R. Hiwatari et al., Nucl. Fusion, 45, 96 (2005).

13) H. Tanigawa et al., Nucl. Fusion, 57, 092004 (2017).

14) T. Hoshino et al., Fusion Eng. Design, 84, 956 (2009).

15) M. Nakamichi et al., Nucl. Mater. Energy, 9, 55 (2016).

16) 坂本慶司, IFMIF/EVEDA 原型加速器統合チーム, RADIOISOTOPES, 67, 139 (2018).

著者紹介



岡野邦彦 (おかの・くにひこ)

慶應義塾大学理工学部

(専門分野/関心分野) 核融合炉システム解析, エネルギー技術戦略, 低周波騒音のアクティブ制御



飛田健次 (とびた・けんじ)

量子科学技術研究開発機構

核融合エネルギー研究開発部門

(専門分野/関心分野) 核融合炉システム, 核融合炉工学, プラズマ理工学

首都圏の学生が見た原子力発電所の今！

—文系学生が浜岡原子力発電所で見えたもの、感じたこと—

シニアネットワーク連絡会 若杉和彦, 松永一郎
東京工業大学大学院 三島理愛

東京女子大等、首都圏の大学生 17 名が昨年 11 月中部電力(株)浜岡原子力発電所を見学し、シニア(シニアネットワーク連絡会会員)と対話した。発電所の内部まで初めて見た学生は、ここまで安全対策が採られていて安心したと感想を述べる一方、1,000 年前に書かれた源氏物語のころのことも十分に分かっていないのに、さらに 1,000 年先まで廃棄物の情報を伝えられる保証はあるのか等、鋭い質問と対話が行われた。また、事後アンケートでは、マスメディアからの情報が原子力に対する心配の主原因になっている実態が読み取れた。一般学生の参加する原子力発電所の見学と対話会は、社会のエネルギー問題、その中での原子力の位置付の理解促進活動として有意義であった。

I. はじめに

「皆さんの体の中には放射能があって、男女が抱き合えばお互いに被ばくすること知っていますか？」と原子力発電所に向かうバスの中で質問したら、一瞬シーンとなったが、興味津々の目が輝いていた。「このバスの中でも放射線が飛んでいて、今はこの計測器で $0.02\mu\text{Sv/hr}$ だ。宇宙飛行士は毎日約 1mSv も放射線を浴びている。これは $1,000\mu\text{Sv}$ に相当するが、飛行士の皆さんは元気に地球に帰ってきている。」後で分かったことだが、文系の学生さん達は数字を聞くと頭が痛くなるとのことで、もう少し感覚的に訴える、分かり易い仕方の説明すれば良かったと、今は反省している。

このような形で首都圏の大学生 17 名の浜岡原子力発電所の見学とシニアとの対話が始まった。参加した学生は、東京女子大 6 名、東工大 4 名、東大 3 名、立正大 2 名、青山学院大と東京都市大が 1 名ずつ。また、シニアからは 6 名、浜岡原子力発電所の見学を仲介してくれた中部原子力懇談会から 1 名で、総勢 24 名である。この報告書では、原発の是非が世間で問われているなか、原子力発電所を初めて見た学生さん達、特に原子力をあまり勉強していない文系の学生さん達の本音の感想や意見をまとめ、今後の理解促進につなげたいと思う。

II. 浜岡原発で見えたもの、聞いたこと

原子力発電所の構内に入る前に浜岡原子力館(PR館)の中部電力職員の方から、パンフレットを使って、発電

所には原子炉が 5 基あることや東日本大震災後に拡充した安全対策施設等について概要の説明があった。また、PR館内で放射線の原理や働き、模型から原子炉や燃料集合体等原子力発電の仕組み、緊急時の安全対策設備等を見て勉強した。いよいよ発電所構内に入るが、学生さん達がまず驚いたのは入域管理である。原子力発電所はウランやプルトニウムを取り扱うため、セキュリティが大変嚴重である。見学で発電所の構内に入域する場合でも身分証明書を提示して本人確認を受ける。実際の入域の際には、一人ずつ金属探知器のゲートをくぐってセキュリティチェックを受ける。

発電所の構内でも中部電力職員の方の案内で説明を受けた。実際に見たのは次の施設等だが、残念ながら写真撮影禁止のため、ここには掲載できない。

- ・津波対策として構築された海拔 22 メートルの防波壁(万里の長城のようだった)
- ・万一津波で構内が浸水した場合の対策として設置された厚さ約 1m の強化扉や水密扉
- ・万一の事故時に放出される放射能を少なくするためのフィルターベントやその配管類
- ・それでも事故が発生した場合の代替電源として複数の電源車や注水車とその駐車場
- ・原子炉 5 号機の建屋内に入り、窓越しに中央制御室とオペレーションフロア(ここでは燃料貯蔵プール近くで働く電力作業員の姿が見られた)

なお、拡充された浜岡原子力発電所の安全対策施設を図 1 に、津波に備えた高さ 22 メートルの防波壁の写真

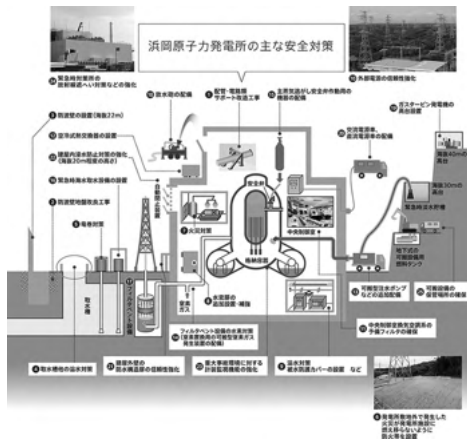


図1 拡充された浜岡原子力発電所の安全対策施設



図2 津波に備えた高さ22mの防波壁

を図2に、同社ホームページから転載して示す。

Ⅲ. 原発見学後の学生の質問や意見

見学会の後、参加学生から一人一言ずつ感想または疑問に思ったことを聞いた。普段関わる機会が少ない文系学生から、自身の経験や専門と関連付けた貴重な感想を聞くことができた。また鋭い質問も出て、我々理系には大変参考になった。実際に見ることで原子力に興味を持ち考えてもらうきっかけになったのではないと思う。以下に質問・意見のやり取りの一部を示す。

・「今回の見学は先生に紹介されて参加した。大学では英語専攻なので、原子力に関する授業が全くなく、聞く内容が難しいと感じた。勉強してから、再度訪問したい。」

—文系の学生は一般に原子力について知識は少ないし、触れる機会もないが、このように現物を見た後では、「もっと勉強して再度見学したい」の意見が多かった。

・「地震、津波対策を強化しなければならない場所に、なぜ浜岡原発は立地ができたのか。」

—原発の立地点に要求されるポイントは、岩盤が強いところ、冷却水の取得が可能なところ、そして住民が受け入れに対し理解をして頂いたことである。

・「自分は古典を専攻している。源氏物語が描く1000年前の情報などほとんどない。これから建設する(高レベル放射性廃棄物)処分場の情報が、1000年後に正し



図3 浜岡PR館見学の様子 図4 対話会でのQ&Aの様子

く伝えられる保証があるのか疑問だ。」

—放射能は時と共に減衰する。石碑を建てる等、処分場の存在を伝えていく手段を現在研究中である。

・「ヨウ素剤の配布について住民はどう受け止めているのか。危ないものと思い、受け取りに抵抗がないのか。」

—ヨウ素剤は自治体が配布している。住民個人は自治体から説明を受け、医師の判断を聞いて服用することとなる。

・「広報に力を入れていること、安全対策にお金を掛けていることが良く判った。リオ五輪の際、安倍首相は、汚染水問題はアンダーコントロールの状態と言った。その後、漏れ出しているアンダーコントロールなのか。また、昔佐藤総理が原発建設は核武装を考えているからだと言ったそうだが、本当か。」

—これは文系の学生で、何に関心があり、何を心配しているか良く分かる。マスコミからの情報が心配の原因であるようだ。一般の人はこのような感覚を持っているので、実際に原子力の現場を見て、知識を付けることが大切である。その思いを強めた。

Ⅳ. 事後アンケートに書かれた学生の感想

アンケートの内容は「対話の満足度」「対話の必要性」を含む8項目で、複数の回答(満足、やや満足、やや不満、不満等々)から選ぶようにできている。また、それぞれ、選んだ理由、感想、意見を自由に書けるようになっている。17名中、16名が回答した。

(1) 対話の満足度と必要性について

対話の成功度をはかる物差しとなるのは「対話の満足度」と「対話の必要性」に対する感じ方である。

両方とも14名がそれぞれ「満足、ほぼ満足」「必要、やや必要」と答えている。この結果はシニアネットワークの他の対話会とほぼ同じであり、見学・対話会が成功のうちに終わられたことを示している。

(2) その他の感想と意見

質問に対して文系学生が書いた理由、感想、意見の中から興味深いものを選んでみた(「」内)。

①事前に聞きたいと思っていたことは聞けましたか？

a. 「福島事故は、ニュースでは分からなかったが、話を聞いてよくわかった。」

—往路のバス中でシニアが福島事故について説明したことに対する感想。

- b. 「歩きながら専門家の方々と会話できた。」
 一見学ではいつでも自由にシニアに質問できる。
 専門家を身近に感じたようだ。
- ②今回の対話で得られたことは何ですか？
- a. 「他の参加者の着眼点が新鮮だった。」
 一見学後に出た学生の質問や意見に対する感想であろう。自分と同年代の学生の異なった見方、意見に対する率直な感想。
- ③学生とシニアの対話の必要性についてどのように感じますか？その理由は？
- a. 「何がわからないか」は直接話さないと伝わらないと思うので。」
 一「原子力はよくわからない」ということを率直に伝える場として、学生とシニアの対話をとらえている。
- b. 「熱意のある方々の生の声をきくのは、こちらの気持ちの持ち方を変えてくれたと思う。」
 一日頃、エネルギー、原子力について触れる機会の少ない文系学生の率直な感想である。
- c. 「対話をしてもいいが、社会には大きな影響は出ないと思います。」「シニアと対話する必要があるかは微妙」
 一対話会について、さめた見方をしている。
- ④日本のエネルギー政策では、原子力発電を基幹電力(2030年に発電電力量の20~22%)とし、省エネ・再エネ利用の拡大や火力の高効率化により、可能な限り削減していくとされています。対話を含めたあなたの認識は次のどれですか？その理由は？
- a. 「必要悪」ということです。より効率的で安全で低コストな代替エネルギーがあれば、その比重を増やすべきだと思う。」
 一世間一般の平均的な意見をそのまま言っている。
- b. 「原子力発電はハイリスク、ハイリターンであるため、リターンだけ考えると将来的にもとても必要なものだと思うが、リスクが大きいため世論の反発が大きく、原発はなくなってしまうのではないか。結局、僕らはテレビからしか情報を得ることができないので、エネルギー問題は世論をどれだけ反映しているかが大事だと思います。」
 一原子力、エネルギー問題に対するマスコミの影響の大きさと、この問題に関するマスコミの認識不足について言っている。
- c. 「世代間の公平について議論を進めるべきだと思う。」
 一若い人ほど原子力を支持する割合が高いという調査結果が出ている。高年齢者によりエネルギー政策を一方的に進められるのは不公平だと考えているようだ。
- d. 「安全対策はされているが、将来のことを考えたら

安全とはいえないのではないかと思ったから、削減または撤退すべきと考える。」

一見ただけではまだ安心できないようだ。

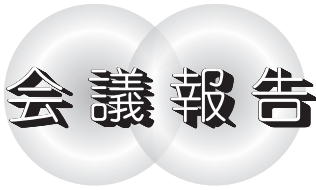
- e. 「現時点では逆にこれしかないと思ってしまいました。でもきっと20年後には更なる良い技術があるはずなのでそれに期待したい。」
 一安全対策済施設を見てある程度安心したようだ。
- ⑤本企画を通して全体の感想・意見などがあれば自由に書いてください。
- a. 「わからない」という事実、というか科学の本質って伝えるのが難しいのかなど。“学者・エンジニア・政策立案者→メディア→その他”のどこかで“わからない・不確実”を受け入れられない段階が出てきている印象。」
 一原子力が直面している問題点をズバリと指摘している。
- b. 「原発反対という意見がなく、賛成ばかりだったので偏りがあったような気がします。例えば反対派やマスコミを交えた議論が聞けると非常に充実するのではないかと思った。但し論点は絞るべきだと思う。」
 一今回の見学、対話会では無理な注文であるが、指摘されたような場がほとんどないことも問題だ。
- c. 「文系と理系の考え方の違いを感じられて面白かったです。文系はやはり感情に流されがちだし、理系は数や値に信頼を置きすぎていて、対話の大切さを感じました。私自身、学校の放送部で番組づくりに携わり、マスメディアの先輩方の話を聞く機会があったので、情報の取捨選択のむずかしさを少しは知っていると思います。でも、マスメディア(特に新聞)は文系の人たちが多いようです。だからこそ、文系学生(これから文化を担うものとして)は学びを深めるべきだと思います。」
 一理系と文系の違いを端的に述べている。そして両者が一緒になって対話する面白さや意義を率直に語っている。

V. まとめ

“百聞は一見にしかず”のとおり、一般学生の参加する原子力発電所の見学と対話会は、社会のエネルギー問題、その中で原子力の位置付の理解促進活動として有意義だった。今後とも日本原子力学会学生連絡会、シニアネットワーク連絡会の活動の対象に加えていきたい。

— 参考資料 —

- 1) 日本原子力学会シニアネットワーク連絡会ホームページの「学生とシニアの対話報告」：<http://www.aesj.or.jp/~snw/#>
- 2) 中部電力(株)ホームページ：<https://www.chuden.co.jp>
 (2018年5月15日記)



Physics of Reactors (PHYSOR2018) 報告

2018年4月22～26日(カンクン, メキシコ)

国際会議 Physics of Reactors (PHYSOR2018) がメキシコ原子力学会主催・米国原子力学会後援で行われた。本国際会議は 1990 年から 2 年おきに世界各国から炉物理研究および炉心解析に関わる研究者および専門家が一堂に集まり開催されている炉物理分野最大の会議である。今回の基調テーマ「Reactor Physics Paving The Way Towards More Efficient System」は炉心のシミュレーション、モデリング手法および炉物理実験に焦点をあて、計算と実験の融合とさらなる探索を目的として設定された。初日の 22 日には炉心・燃焼解析用連続エネルギーモンテカルロ (MC) コード (COMET, SERPENT, SuperMC 等) と核データ処理コード (NJOY) のワークショップが開催された。今回の会議では 37 か国から参加者が集まり、4 件の基調講演と、10 個の Track および 3 つの SS (特別セッション) で 363 件の口頭発表があった。日本からは、参加 15 人・発表 15 件であった。

基調講演では、Multi Physics および計算の不確かさに焦点が置かれ、実機データを用いたベンチマークの重要性が強調された。まず、M. Salvatores 氏 (CEA) より、断面積の微小変動が核特性に及ぼす影響 (感度) や不確かさ解析の現状と課題について紹介があり、炉心核特性を対象とした感度解析の精度向上の課題に対して従来の一次摂動から二次の摂動を考慮する必要性が強調された。ここで、我が国の高速炉用臨界実験装置 (FCA) では様々な中性子スペクトルでの臨界実験がベンチマークとしてまとめられており、感度や不確かさ解析の妥当性評価に有用であることが強調された。さらに、連続エネルギー MC 法を用いた核データの調整手法が考案されているとの報告があった。次に、S. Monti 氏 (IAEA) より国際連合が掲げる目標およびパリ協定の達成のためには原子力発電が重要であると強調された。原子炉システム高度化のための IAEA の役割 (訓練, 教育, 開発の活性化) が紹介された。続いて T. Ivanova 氏 (NEA) より、NEA の最新レポート、不確かさ解析、Working party の進捗や Multi physics (核・熱水力・燃料挙動解析の連成モデル) 実験等が紹介された。中でも炉物理、熱水力と燃料挙動の不確かさ評価のためのベンチマーク活動が強調された。最後に、M. D. Dehart 氏 (INL) より、最新の Multi Physics コードプロジェクトの紹介があり、モデリングの向上のために専門家を募集しているとのことである。

全発表のうち、最大の発表数だったのが 100 件の Track 1 (炉心解析手法) であり、炉心解析における決定

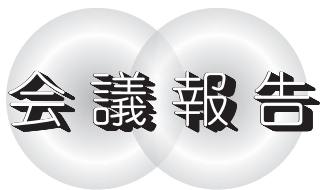
論的手法の理論、未臨界度の測定精度向上のために、原子炉内で中性子束の空間分布が変化しない仮定に基づく 1 点炉動特性解析での中性子世代時間 (核分裂連鎖反応における核分裂間の平均時間) の決定手法、各国で開催されている炉心計算コードの新機能の紹介や妥当性評価など、多岐にわたって報告された。Track 5 (実験解析および核データ, 44 件) では、炉物理実験における検出器位置の依存性および測定手法間の比較や測定で得られた中性子計数と一点炉動特性方程式を組み合わせた反応度の推定手法 (逆動特性解析) などの臨界集合体を用いた基礎研究に関する報告があった。加えて、軽水炉で反応度フィードバックの考慮が必要な実験体系 (熱出力運転下) に炉内の中性子計数のゆらぎを利用した測定手法 (炉雑音解析) を適用した報告があり、Multi physics 実験に着目した検討が進行している。その他、核データの精度追求のため炉物理パラメータの不確かさ解析、燃焼計算の感度解析などに関する報告があった。また、国産核データ処理コード FRENDDY が NEA/Data-Bank より 2018 年に公開予定であることが報告された。Track 3 (MC 法, 42 件) では、MC コードの燃焼計算手法に関する研究や温度変動の効果、過渡現象を扱った研究があり、MC 法においても Multi Physics かつ過渡現象を扱えるように着々と理論および計算コードが整備されつつある。

SS の口頭発表 48 件のうち 21 件が SS 1 (不確かさ解析および次元低減法) で報告された。基調講演で強調された摂動計算の精度向上に対して、D. G. Cacuci 氏 (サウスカロライナ大) により随伴中性子束に 2 次効果を考慮した感度解析の理論が、H. J. Shim 氏 (ソウル大) から MC 法を用いたエネルギー 2 群での温度に対する実効増倍率の不確かさ解析が報告された。不確かさの導出が難しい 6 群動特性パラメータについては、ランダムサンプリング法による不確かさ解析が報告された。また、計算の負荷軽減を目的とした次元低減モデルについても研究報告があった。

PHYSOR2018 では、商用炉運転時のデータを用いた実験解析が、また不確かさの解析において実効増倍率だけでなくボイド率など Multi physics を対象にした研究が進められている印象を受けた。今後も最新の研究動向を感じながら自身の研究に反映したいと考えている。

(京都大学複合原子力科学研究所 山中 正朗,
東芝エネルギーシステムズ 和田 怜志,

2018年7月2日 記)



原子力分野の若手・女性が一同に会する

IYNCWiN18 (IYNC2018 / 26th WiN Global Annual Conference)

2018年3月11～16日(バリローチェ, アルゼンチン)

去る3月, International Youth Nuclear Congress (IYNC)と Women in Nuclear (WiN) Global が共催する国際会議 IYNCWiN18 が, アルゼンチンのサン・カルロス・デ・バリローチェにて開催された。IYNC は隔年, WiN Global は毎年, それぞれ国際会議を主催しているが, 本年はホスト国が重なったことから, 史上初めて, 原子力分野の若手と女性が一同に会する機会となった。

日本からは, 若手連絡会 (YGN) 運営委員 2 名と WiN-Japan 理事 1 名を含めて計 5 名が参加した。ほぼ地球の裏側であったこともあり, 多数の参加者を得ることは難しかったが, この機会に会議の様子, 印象に残った点などを会員諸氏に共有したい。

歴史ある町で

バリローチェはパタゴニア地方, アンデス山麓の湖畔にあり, その風光明媚さ故「南米のスイス」と呼ばれる。他方で 1940 年代後半にアルゼンチンの原子力開発が始まった地でもあり, 日本で言えば東海村のような, 歴史的な使命を帯び, 現在もアルゼンチン原子力委員会 (CNEA) の研究施設, 原子力分野の高等教育機関 Balseiro Institute, 重工メーカー INVAP 等が集積している。

IYNCWiN18 には 37 개국から約 420 名が集まり, 3 つの全体セッション, 7 つのパネル・セッション, 15 のワークショップ, 13 のテクニカルトラックが設けられ, 1 週間にわたって活発な議論が交わされた。基調講演にはマグウッド OECD/NEA 事務局長やハイワード IAEA 事務次長(管理担当)等が登壇, 各国の原子力界の代表も多く顔を揃え, 盛会であった。

一層高まる多様性

今回の会議では様々な面で多様性の高まりを感じた。

一義的には参加者の男女比がほぼ半々であったこと。通常の IYNC の会議であれば, 他の国際会議よりは女性の比率は高いものの, 参加者の総数では男性の方が多い。一方で WiN の年次大会では参加者の大半は女性である。今回は両者が共催したことでジェンダーバランスの良い会議になり, IYNC も WiN も元来多国籍であることと合わせて, 非常に多様性に富むコミュニティが形成されていた(多くのスピーカーがこの点に言及)。

また協賛企業の顔ぶれも興味深い。伝統的に会議のスポンサーは欧米の電力会社やメーカー等が中心だったが, IYNCWiN18 ではトップスポンサーに中国核工業集団 (CNNC) やアラブ首長国連邦原子力公社 (ENEC) が名を連ね, より国際的な色合いとなっていた。

イノベーション, クリーン, 持続的な開発

内容面ではイノベーションに絡めたセッションが多く設けられていたことが目を引いた。小型モジュラー炉 (SMR) やロボティクスなど題材は様々であったが, ウェスティングハウス社によるオープン・イノベーションの試み (WeLink) 等, アプローチとして興味深いものも散見された。IYNC 自身も独自のイノベーションコンテスト (I4N: Innovation for Nuclear) を企画・実施している。

また気候変動やクリーンエネルギーの議論も盛んであった。最初の全体セッションは気候変動がテーマであったし, 米国エネルギー省とカナダ天然資源省のサイドイベントでは, クリーンエネルギー大臣会合 (CEM) の下, 両国と日本が共同で立ち上げる “Nuclear Innovation: Clean Energy Future (NICE Future)” について紹介, 若手への参画の呼びかけがあった。

他にも, 国連の「持続可能な開発目標 (SDGs)」の達成に原子力がどのように貢献できるか, といった議論も聞かれ, 原子力を語るコンテキストとして興味深い。

世界の若手・女性を日本に

実は YGN は次回 IYNC2020 のホスト国に立候補していた。福島県郡山市を開催地に, 学会や日本原子力産業協会, 郡山市などから支持をいただいたが, 選挙の末, 豪州 (シドニー) の後塵を拝する結果となった。開催を勝ち取れなかったことは大変残念だが, ご支援いただいた方々にこの場を借りて御礼申し上げたい。また英国 YGN など訪日に関心を持っている若手がいることもわかったので, 引き続き各国の若手の訪日の機会を創出したい。

良いニュースは 2021 年 WiN Global 年次大会の開催国が日本に決まったことである。福島第一原子力発電所事故から 10 年の節目に, 世界各国の原子力分野の女性リーダー達を迎えられることは貴重な機会になるだろう。Stay curious. Be adaptable. Help each other out.

結びに代えて, 基調講演でのハイワード IAEA 事務次長のメッセージを紹介したい。「好奇心を持ち続けよ」「順応的であれ」「互助に努めよ」とでも訳せようが, 原子力に携わる者が備えるべき資質として「順応性」を挙げていることは示唆に富む。業界や組織に染まれという意味では決してなく, 原子力を取り巻く社会・環境の変化が激しさを増す中, 変化を恐れず前向きに順応せよということであるが, 蓋し至言ではなかるうか。

(日本原子力学会若手連絡会 堀尾健太,
WiN-Japan 小林容子 2018年5月20日記)

Science Communication

科学とコミュニケーションを考える

共感・共有の手法

青山学院大学 岸田 一隆

人類はなぜ、他の動物に比べて大きな脳を持っているのでしょうか。これは、進化の過程において人類が選択した生存戦略に理由があります。人類の祖先は速い逃げ足を持っているわけでも、鋭い爪や牙を持っているわけでもありませんでした。そこで、単独で生きていくのではなく、集団で生き残ることを選択しました。こうした群れを作る動物は地球上にたくさんいましたが、人類の戦略は独特でした。心と心を通じ合わせ、コミュニケーションすることで、複雑な社会集団を作り上げたのです。そのためには大きな脳が必要でした。すなわち、人間の脳は人間の心とコミュニケーションするように進化してきたのです。

これが共感・共有のコミュニケーションの出発点です。ですから、共感・共有のコミュニケーションを成立させるのは意外に簡単で、そこに人間が介在すればいいだけなのです。そうすれば、人間は勝手にその人の心とコミュニケーションを始めます。ゆえに、最も効果的な共感・共有のコミュニケーションの方法は、対人コミュニケーションです。

ただし、対人コミュニケーションを有効に機能させるためには、それなりの工夫が必要です。ここで、2つの事例に則して、工夫の方法を挙げてみましょう。

最初の例は、青山学院大学の「岸田アドバイザーグループ」の活動です。アドバイザーグループというのは、教員を中心として結成される学生の集団なのですが、ゼミのような課目としての縛りがなく、自由な活動が許される団体です。上記の「岸田アドバイザーグループ」は2017年11月5日に開催された学園祭の機会を利用して、サイエンスカフェを開催しました。

メインの講演者は、時間的な余裕がなかったこともあり、ゲストを呼ばずに私が務めました。対人コミュニケーションを成功させるための前提として、企画の段階から聴衆の具体的な人物像(マーケティングの用語で「ペルソナ」といいます)をしっかりと設定しました。ポスターにも工夫を施しました。講演者のプロフィールに「理学博士なのに経済学部教授？」というひと言をいれて、コミュニケーションにおける「人間」の部分に興味を持たせるようにしました。本番の冒頭では、聴衆と講演者と企画者(学生たち)が混ざって、簡単なゲームで「アイスブ

レーク」を行いました。互いに初対面同士の固い人間関係を、氷を融かすようにほぐしていきます。この時点で「共感・共有」のベースができていきます。講演のスライドにも「共感・共有」のための工夫があったのですが、それは省略します。最後はワークショップに移ります。ここでは、なるべく自分の実体験に基づく発言をしてもらいました。参加者は、他者がどう考えているかを知り、自分自身の中で無意識に設定している偏見や前提を、意識の上に取り出して、再確認することができました。

第2の例は、今回のコラムシリーズでたびたび取り上げている一般市民向け公開シンポジウムです。ここでは、「共感・共有」のための仕掛けとして、パネル討論の冒頭に工夫を施しました。各パネリストたちにあらかじめ配っておいた画用紙に「あなたは小学生時代に何になりたかったですか」という質問に答えてもらいました。予告なしの抜き打ちですから、回答にはその人間の地が出ます。これこそが、私の狙いでした。パネル討論会は、パネリストと聴衆の間に意識の上での「壁」が生じがちです。しかも、パネリストは専門家であり、自分とは違う人種のように感じがちです。ところが、このゲームを冒頭に行うことによって、「パネリスト」という無機質な存在ではなく、「生身の人間」が自分に対峙しているように思えるのです。

そして、パネル討論の最後では、2枚目の画用紙に、「今のあなたの目標や夢は何ですか」という質問に答えてもらいました。最初の質問から最後の質問へ向けて、過去から未来へと橋を架け、未来へのビジョンを持って現実を選択することを象徴させたのです。

他にも、対人コミュニケーションの手法はいろいろあります。しかし、前回にも述べたことですが、悪用の危険性には十分な注意が必要です。実は、対人コミュニケーションの効果は、実体験だけではなく、擬似体験でも同じように働きます。ですから、私たちはドラマや文学作品に心が揺さぶられ、価値観を変えてしまうこともあるのです。ですが、そんなドラマや文学作品やVR(仮想現実)が、特定の国や民族をヘイトする目的で作られてしまったら、どんなことになるのでしょうか。私たちは、あくまで、よりよき共同体を形成するために、「共感・共有」を使うべきなのです。(2018年7月14日記)

新刊紹介

湿式プロセス —溶液・溶媒・廃水処理

佐藤修彰, 早稲田嘉夫編集, 289p. (2018.3),
内田老鶴園(定価 4600 円)
ISBN978-4-7536-5549-6 C3042

持続可能な社会を実現するためには、資源の有効利用が肝要であり、特に、有用資源のリサイクルは重要分野である。有用資源リサイクル技術の中心が湿式プロセスを用いた製錬技術である。

本書は、1970年代の名著「湿式製錬と排水処理」に続く、この分野の基礎から応用までのポイントを押さえた書物として、前書著者らの活動拠点であった東北大に関連を持つ有志によりまとめられたものである。

製錬の基礎である平衡と熱力学及び反応機構や速度論から始まり、製錬技術に必要な化学工学的な基本操作(浸出、沈殿、濾過等)を論じ、さらに、湿式分離プロセスの中心技術であるイオン交換、溶媒抽出及び電解製錬については章を改めて詳細に解説している。各プロセスで用いられる装置等の概略図が豊富であり、具体的なプロセスがイメージできるよ

うになっている。製錬技術の最新の応用として、超高純度化プロセスや放射性物質の分離・製造についても述べられており、最後に持続的社會に必要な廃棄物処理と環境・リサイクル、及び、放射性廃棄物処理についてまとめ、福島第一原子力発電所事故で生じた廃棄物に関する技術も解説されている。

ウラン鉱山・採鉱から廃棄物処分までの原子燃料サイクルで用いられている技術のほとんどは、製錬技術の応用と言っても過言ではない。長い歴史のある製錬技術を基礎から学ぶことは、原子燃料サイクル技術に携わる者として大変有意義である。原子力ではあまりなじみのない微生物による製錬技術等も紹介されており、基礎から幅広く製錬技術の知識を身につけることにより、原子燃料サイクルの研究開発や技術開発に新しい視点で臨むことができるようになることが期待できる。

(電力中央研究所・塚田 毅志)



■お知らせ■

日本原子力学会誌, 日本原子力学会誌「ATOMOS」 J-STAGE 電子アーカイブ化に伴う過去記事の登載・無料公開について

2016年に登載が採択されました、日本原子力学会誌(以下、原子力学会誌)ならびに、日本原子力学会誌「ATOMOS」(以下、学会誌アトモス)は、今年度より電子アーカイブ作成の作業に入ります。

1959～2001年に学会誌に掲載された論文(一般記事を除く)は、すでにJ-STAGEにて電子アーカイブ化され、無料公開しておりますが、この度、2002年から現在(発行から半年経過した記事)までの記事をJ-STAGEにおいて無料公開することとなりました。

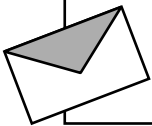
すでに2008年1月号から現在までの記事は、当会HP「立ち読みのページ」で無料公開しておりますが、2002年から2007年12月号までに掲載された記事に関しては、インターネット上での公開はしていません。

つきましては、2002年から2007年12月号に掲載された著者の方で、J-STAGEに記事を登載・無料公開することに問題がありましたら、2018年12月24日(月)までに当学会まで、ご連絡くださいますようお願い申し上げます。なお、期限までに異議がない場合は、順次電子アーカイブ化の作業に入らせていただきますので、ご了承ください。

本件連絡先

一般社団法人日本原子力学会事務局 学会誌編集担当宛て
TEL 03-3508-1261, FAX 03-3581-6128
E-mail: hensyu@aesj.or.jp

理事会だより



ゴッホと未熟な葡萄、熟れた葡萄と干し葡萄

私が担当となっている部会等運営委員会は、(1)年会、大会、総合シンポジウム等、費用収益の伴う事業に関する事項、(2)部会、連絡会等の運営にかかわる事項、(3)部会、連絡会の設置・改廃に関わる企画委員会への提案に関する事項、(4)国内外学術的会合等の主催・共催・協賛・後援等に関する事項、の4項目が所掌事項となっています。特に年会、大会につきましては、委員の方々にプログラム編成という大変な作業をご負担いただいています。

学会は年会や大会において学会員が研究成果を発表し自由な意見交換を行う場を提供することが重要な使命の一つです。そのため学会員がご自分の研究成果を発表する権利は最大限尊重されるべきと考えています。一方、本学会の学術団体としての性格から、学術的でない発表をご遠慮いただくためのスクリーニングを実施しています。学術的かそうでないかという線引きは必ずしも明確ではありませんが、当該分野の複数の専門家に判断いただき、問題と思われる予稿が担当理事三人に送られてきて最終判断をすることになります。私個人としては相当な線までは発表を許容するべきと考えていますが、学会の予稿が思わぬ形で『権威のある』成果としてプレスに取り上げられたことも現実にあるため、一定のガイドラインを設けることが必要になります。しかし、学会のガイドラインでは科学的な裏付けのない個人の意見の表明はアウトですが、それをどのように考えるのかはなかなか難しい問題です。というのも、もしそれがある範囲の方々の共通意見であれば社会科学の対象となりえるからです。一般の方々の理解なしには原子力が立ち行かなくなることは明白ですから、個人的なご意見を広く伺うことは重要です。これについては、現状では年会や大会ではなく社会科学がテーマとして入っている研究会などでその機会を作っていただくこととなりますが、それだけで良いのかは検討すべき問題です。

私の好きなヴィンセント・バン・ゴッホは今でこそ大変有名な画家ですが、存命中には彼の絵は1枚しか売れませんでした。毎日の生活は画商をしていた弟からの仕送りで成り立っていたようです。当時のパリの画壇では伝統派が主流でしたが、ちょうど彼の時代にピカソや印象派が台頭し、時流に乗れた人もいればそうでない人もいて、ゴッホは後者に属していたこととなります。アンリ・ルソーも同様にほとんど注目を浴びることがなく一生を終えた画家の一人です。ルソーは病死ですが、ゴッ

ホは精神を病んで自ら命を絶しました。二人とも自分の生きた時代の社会からの非共感と貧しさに起因する病に負けたという意味では共通なのかもしれません。仮に彼らが健康で天寿を全うしても彼らの絵が売れる時代が来たかどうかは分かりませんが、その兆しくらいは感じられる時代に変化していたかもしれません。何年も後に、彼らの絵がいくらで取引をされたかを本人達が知ったらどういう感想を持つのか、大変興味のあるところです。

原子力はわが国の高度成長期におけるエネルギーを支える電源としての役割を果たしてきましたが、現在は強い逆風の中にあります。絵が売れるかどうかは画家個人の生活に大きな影響を与えとはいえず社会が直接の影響を受けることはほとんどないのではないかと思います。一方、原子力は社会のインフラ技術ですから事情が異なります。マルクス・アウレリウスは第16代ローマ帝国で、ストア派哲学に精通し、五賢帝と言われた最後の皇帝です。彼の言葉に、『未熟な葡萄、熟れた葡萄、干し葡萄、すべて変化である。それは、無へと向かう変化ではない。まだ存在しないものへの変化である。』があります。変化は止められないが、方向づけることはできるという意味を含んでいます。原子力は安全性を非常に強く求められる分野ですからややもすれば保守的になりがちです。また、過去のある一定期間、原子力が社会を支えているという状況が続いたため原子力従事者は原子力が社会にとって当然必要な技術であると考え、そのような立場から発想し発言することがあります。しかし、今後は再生可能エネルギーが確実に増えて、人類はその不安定さと必然的に向き合いながら社会を発展させていくことになるでしょう。原子力もそのような情勢の中で人類や社会に必要な価値を提供できる分野として常に変化しつつ技術継承していく必要があります。そのために、まずは学会の最も基本となる活動である年会や大会での議論を盛んにし、技術を深め、若い人に夢を与え続けていっていただきたいと思います。特に、昨年度、医学系や原子力プラントで活躍している現場の方々が発表しやすいように分野分けを修正しましたので、可能であれば一般の方々にもうまく入っていただく形で、これまでより多くの方に活発に年会と大会で発表をしていただければと期待しています。後継者が育たず、技術が断絶してからゴッホやルソーのように悔やまれることのないように。

(部会・編集担当理事 千葉 敏)