

巻頭言

1 環境放射能の課題

森田昌敏

時論

2 With コロナと原子力：他害リスクとの共生

越智小枝

4 科学分野におけるダイバーシティの現状と課題

宮浦千里

解説

11 県外最終処分に向けた技術シナリオの検討

一環境放射能除染学会での研究会活動

県外最終処分に向けては熱的減容化後の副生成物等の灰洗浄・濃縮による減容化や廃棄体化、最終処分、低濃度の処理物の有効利用が必要になり、技術課題の整理と技術開発戦略の設定が重要である。

山田一夫 ほか

解説シリーズ

25 世界情勢の構造的変化とエネルギー (1) 新型コロナウイルスとエネルギー情勢

新型コロナウイルスにより、世界の経済成長率やエネルギー需要は大きな影響を受けた。新たな社会生活様式の広がりにより、エネルギー需給も構造的な変化を遂げる可能性がある。

小宮山涼一

FOCUS 原子力関連国際機関の最近の動向と日本からの期待 (1)

30 OECD/NEA の概観と活躍を増す日本

OECD/NEA など国際機関の期待が高まっている。本連載ではそれらの機関の活動を紹介するとともに、そこで活躍している日本人の状況を紹介します。

森田 深, 大塚伊知郎, 舟木健太郎

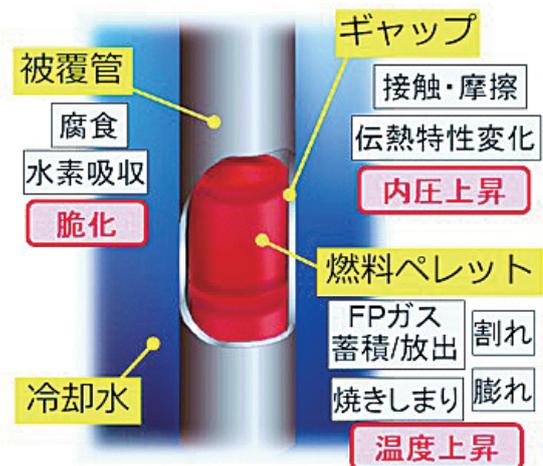
解説

15 燃料挙動解析コード FEMAXI-8 の開発と公開

一信頼性向上と燃料分野での利用拡大に向けて

核燃料や燃料被覆管のふるまいに係る研究で得られた知見やデータは、燃料挙動解析コードにモデルとして集約され、燃料設計や安全評価に活用されている。私たちは国産/公開コードである FEMAXI の最新バージョン FEMAXI-8 を開発した。

宇田川 豊

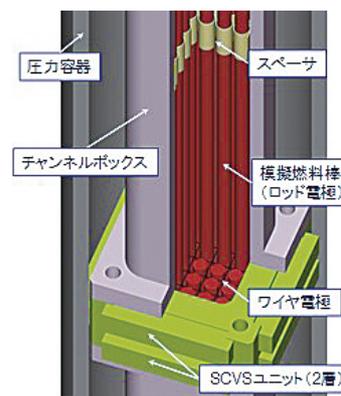


原子力発電所で使われる燃料棒（被覆管をカット）と燃料コードが扱う現象の例

20 燃料集合体内の三次元沸騰二相流挙動の可視化—軽水炉三次元熱流動実験設備 (SIRIUS-3D) の概要と活用

流れ現象を定量的に把握する可視化技術が発展してきた。原子炉燃料集合体ではその内部に水が流れながら除熱や中性子減速材の役割を果たす。ここではその計測事例を紹介する。

新井崇洋, 古谷正裕



サブチャンネルボイドセンサ (SCVS) 付近のバンドル部分断面図

ワイヤ同士及びワイヤとロッドの近接部の流動を検出し、被覆管表面の沸騰流の動特性を計測できる

35 Column

原子力と哲学

想い描く未来へ

東京都知事選での違和感

緊急時下の労働力とは？

最適な選択を考える

批評家ではなくプレイヤーになる

井内千穂

上野和花

小澤杏子

妹尾優希

服部杏菜

服部美咲

サイエンス

38 量子力学の不可解な挙動が拓く未来技術—アインシュタインの反抗から量子科学衛星まで

アインシュタインは1935年に一つのパラドックスを提起した。その衝撃は形を変えて生き永らえ、量子暗号や量子ネットワークといった革命的新技術の鍵として期待される一方で、物理的実在とは何かと言う根源的な謎を問いかけて続けている。

吉田 正

Short Report

54 放射線遮蔽工学の体系化と知識の普及—第52回日本原子力学会「貢献賞」を受賞して

「遮蔽ハンドブック」と「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会は、「基礎編」と「応用編」の2分冊の「放射線遮蔽ハンドブック」を出版した。

上養義朋

58 使用済燃料の貯蔵に係る動向セミナーの開催報告

使用済燃料の貯蔵に係る動向セミナーが開催された。トピックスは中間貯蔵であり、国内でも関連施設・機器の許認可が進められている。

平尾好弘ほか

60 原子力人材育成ネットワークによる原子力教育

東工大などが実施してきた「国際原子力人材育成大学連合ネットワーク」による国際原子力教育事業を紹介する。

西村 章

63 2020年米国研修派遣体験記—世界トップレベルの原子力の環境を見て、日本で原子力を志す若者として感じたこと

文部科学省事業の一環で、テキサス A&M 大学 世界銀行、在米日本大使館、INL を見学した。

和田山晃大 ほか

連載講座 核セキュリティ入門 (4)

43 核セキュリティを支える核鑑識技術

核物質や放射性物質の盗取・密輸などを防ぐ核セキュリティに技術的に対応するため、各国では近年、核鑑識に関する能力整備が進められている。

木村祥紀

連載講座 よくわかる PRA —うまくリスクを 使えるために (5)

48 人間信頼性解析の現状

人間のエラーは、機器故障の発生とは本質的に異なる。PRAの結果として得られるリスク情報に含まれる不確実性の大部分は、人間信頼性解析の結果の不確実性に起因する。

高橋 信、氏田博士

談話室

65 一步一步の日常 (1) —読書と挫折

口町和香

視点 社会を語る (11)

66 社会調査とプライバシーの微妙なバランス

齋藤圭介

理事会だより

67 学会の経営改善に向けた取り組み

藤澤義隆

6 News

42 From Editors

68 会報 原子力関係会議案内、人事公募、英文論文誌 (Vol.57, No.10) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

環境放射能の課題

巻頭言



環境放射能除染学会 理事長

森田 昌敏 (もりた・まさよし)

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(工学博士), 国立環境研究所部長, 愛媛大学教授, 愛媛県環境創造センター所長などを歴任。

20世紀に入り人類が手に入れた核エネルギーであるが、放射能のリスクがつきまとい、社会のなかで活用され続けるためにはリスクの理解とリスク低減のための不断の努力が必要である。放射能利用のパイオニアはキュリー夫人であったが、同時に彼女は放射能被ばくの先人でもあった。彼女は再生不良性貧血となり66歳で死に、また娘のイレヌー・キュリーは白血病で58歳でなくなっている。このような高いレベルの被ばくの健康被害は明白であるが、より低いレベルの被ばくがあったときは、悪影響は確率的にしか検出できなくなる。この場合被ばくと悪影響の因果関係が個人については不明瞭となり、したがってリスク評価は難しい側面を持つことになる。リスク管理は、わが国の許容線量やIAEAのガイドラインに準拠しながら、決められることとなるが、科学的政策を進めるうえで、リスクに関する基礎研究とその発展は引き続き重要である。

環境放射能の研究は戦後日本でもよく進展し、これは東京大学理学部化学科の木村健二郎教授とその門下生によるところが大きい。核実験による放射性物質の降下物が問題とされまた後にはスリーマイルやチェルノブイリや原子力発電所の事故による環境汚染問題の発生が見られた。その一方でわが国では大学や国立研究所で関連する研究室の数は減少していった。このようななかで、2011年3月11日の大地震とそれによる福島第一原子力発電所の事故が起こり、大規模な環境放射能汚染が発生した。被ばく低減と環境修復を速やかに実施するため環境のための学際的な学術グループが必要となり、環境放射能除染学会が生まれ、科学的情報と除染事業との連携を整えることを目標に活動することとした。

高熱の暴走原子炉から放出された放射性核種は主として湿性沈着により、地表面に落下し、短寿命の核種は消滅し、放射性セシウムが環境放射能課題として残った。調査研究の過程ですぐにわかってきたことがある。それは、セシウムは土壌表層にあり、土壌中での移行により強い結合となって存在しており、移動しにくい分布にあるということであった。並行して住民の放射線被ばくを最小化するべく、汚染表土の剥ぎ取り、家屋などの洗浄などの事業が行われた。現在ではそれに引き続く中間貯蔵、除染、土壌の再利用にむけて取組が始まっている。学会もそれに応じながら、活動を展開しつつある。また一方でサイト内には汚染源が残っており、環境に漏れないよう目配りが必要と考えている。

除染などで生じた除去土壌などは、中間貯蔵施設で一定期間保管した後、安全に福島県外で最終処分することとなっている。中間貯蔵等は国策会社にあたる中間貯蔵・環境安全事業(株)により行われるが、着実に施設の建設も進みつつあり、あわせて、土壌の輸送、搬入も始まっている。最終処分は20数年後の目標であるが、途中に、減容、再生利用技術の開発が必要である。膨大な量の土壌などの処理が必要であり、目下のところ分級、化学処理、熱処理を軸に研究開発が進められつつある。その成功のためには、新しいアイデアや技術が必要になっている。とくに知識と経験の多い原子力学会の諸兄のご協力をお願いしたいと思います。

(2020年7月13日記)



With コロナと原子力：他害リスクとの共生



越智 小枝 (おち・さえ)

東京慈恵会医科大学臨床検査医学講座 講師
医師・公衆衛生修士。東日本大震災後に
Imperial College London で災害公衆衛生を学
ぶ。2013年より相馬市で診療しつつ、福島
の健康問題や食の問題につき発信を続けている。
2017年4月より現職。

今般の新型コロナウイルスパンデミックに伴う社会混乱は、原子力発電所(原発)事故後の福島を彷彿させる。そう感じるのは私だけではないだろう。

もちろん大災害の長期被害は多かれ少なかれ似通ってくるので、類似性を列挙することにはあまり意味がない。ではなぜそれは似通うのか。その根柢にある共通課題を考えることは、将来の大災害に備えるためにも重要だ。

本稿ではその一例として、今般のパンデミックと原子力に共通する、他害リスクへの不寛容について述べる。
寄生者との共生

新型コロナウイルスの撲滅が困難であることが明らかになるにつれ、「コロナとの共生」「with コロナ」という言葉が聞かれるようになった。医療者として注意を喚起したいことは、これは決してコロナと「仲良く暮らす」ことではない、ということだ。共生には、共に栄える共存共栄、片方だけが利を得る片利共生、片方が利を得て片方が害を被る寄生などがある。ウイルスが繁殖すれば人間は一定の割合で重症化・死亡する。ウイルスと人との関係は寄生であり、少なくとも生物学的な「共存共栄」はあり得ない。

では「敵」への防備のために禁止事項だけを羅列することがwith コロナか、といえども違うだろう。多くの方が知るように、過剰な感染リスク回避は経済の損失、高齢者の活動性低下、子どもの情操面への影響、うつ病の増加など別の健康リスクを呼び込むからだ。ウイルス感染リスクも回避リスクもゼロにならない中で必要なことは、受容できるリスクの妥協点を模索することだ。

しかし現在の「with コロナ」の議論は、コロナの危険性を軽視する早急な自粛解除と、コロナの危険性ばかりを強調する規制・排斥との両極端に偏りがちだ。そのどちらにもリスクの受容と呼ぶことはできないだろう。

「コロナは安全」により遠ざかる with コロナ

たとえば今、自粛解除の理由付けとして

「コロナはただの風邪だから心配ない」

とコロナの「安全性」を主張する人々がいる。その主張の

妥当性はさておき、問題は根柢にある

「自粛を解除するためには安全の保障が必要」という認識だ。コロナは安全、と言わなければ自粛を解除できないのであれば、それはwith コロナではなくリスクからの逃避に過ぎない。

リスクと共に暮らすためには、人々がある程度の恐れを持つことは必須である。人が「コロナは危険だから気を付けよう」と考えて暮らすのと「大したことはない」と考えて暮らすのでは当然感染拡大の程度は異なるからだ。徒な安全の吹聴は、日本人の強みである公衆衛生を弱体化させてしまい得る。また安全性が強調されることは、実際は有害事象が起きているのにそれを隠蔽するような「安全神話」を容易に生み出してしまうだろう。

これを原子力に置き換えれば、もし「原子力は安全」と言わなければ施策が推進できないのであれば、それは原子力と共存する社会とは呼べない、というのと全く同じことである。

規制強化という「隠れ安全神話」

このような直截的な安全神話以上に多く見られるのが、際限のない規制強化という「隠れ安全神話」だ。

新型コロナウイルス対策において、夜間の営業や大規模イベントへのさまざまな規制はある程度必要だ。しかし規制される側の視点から見れば、規制強化は感染拡大の責任を「決まりが守れない集団」「特定の職業」に転嫁するだけの行為ともいえるだろう。たとえばGoToキャンペーンによって感染拡大が起きれば、その責任は「対策が不十分」な旅行者や旅行者に転嫁されかねない。

どんなに注意を払っても人々の活動が増えれば感染拡大リスクは増す。その責任を敢えて追及するのなら、経済活動の再開を促す者全員がその一端を負うべきだろう。しかし施策者は往々にして、規制側に身を置くことにより、感染拡大という加害の当事者であることを回避しようとする。これは民間の「自粛警察」と呼ばれる人々にも見られる心理だ。その背景には「正しい行い」をしている人は安全、という、裏返しの「安全神話」が存在するのではないだろうか。

福島原発事故の後、原子力業界は直截的な安全神話か

らは脱却したと言われる。しかし原発再稼働のための規制が次々と強化される姿は、今般の新型コロナ対策や自粛警察の姿と重なる。規制という名目の下、リスクの責任を誰かに転嫁し、結局はゼロリスクを追求してはいないか。「その規制は過剰では」という声を「人命を守るため」という大義で抑え込む空気はないか。施策者が他害の当事者であることから逃避すれば、このような隠れ安全神話は容易に生まれ得る。

「国益」に潜む思考放棄の危険

もし他害性を認めたとしても、人は「国益」「公益」という耳当たりの良い言葉を用いてその後ろめたさから逃避しがちである。

たとえば

「経済活動のためには新型コロナウイルスの感染リスクは受け入れざるを得ない」

という意見は、一見リスクを受容しているように見えるし、結論としては間違っていないかもしれない。しかし経済活動が再開されれば、介護や医療・保健所など一部の業種が高い感染リスクとストレスに晒される。その現実を止む無く受け入れることと、国益という大義の下に「正論」として胸を張ることとの間には、結論が同じであっても天と地ほどの差がある。

大きな決断を下す時には、必ず何かを切り捨てなくてはならない。そこに葛藤が生まれるからこそ、人は被害を最小にするべく努力するのではないだろうか。われわれ医療者も、副作用を知るからこそ治療に悩み、治療と同じくらい有害事象の被害を減らすことにも努力を払う。「国益」論の一番の問題は、このような「必要な葛藤」を人々から奪ってしまうことだ。

原発についても

「国益のために多少の犠牲はあっても原子力発電を続けることはやむを得ない」

という意見は良く聞く。もしその結論に至る過程で福島やチェルノブイリに対する後ろめたさが全くないのなら、将来被災者となり得る人々は、多数決の下にためらいもなく切り捨てられてしまうだろう。

さまざまな施策決定において、その施策の被害者となり得る人々への支援が施策の執行と同じ熱意をもって行われることは稀だ。それは決断する者が自身の加害性と向き合っていないことにも一因があると私は考えている。国益という言葉に逃避する限り、「止む無く切り捨てられる人々」に優しい社会は実現しないのではないだろうか。

他害リスクからの逃避

とはいうものの、人を害する「他害リスク」の許容は、自身に降りかかるリスクの許容以上に難しい。

たとえば

「感染症は(放射能とは違って)人にうつるのだから、ゼロリスクを目指すべきだ」

という声を時折聞く。そこには自分は他害リスクの加害者側ではない、という他人事感があるように見える。

しかし実際には、われわれは日々他害リスクを冒して生きている。たとえば車の運転、喫煙、飲酒、子どもや部下の叱責、SNSや論文による発信などは、いずれも人を傷つけ得るリスクだ。感染症はそのようなリスクの一つに過ぎない。感染リスクだけを特別視すれば、感染さえなければ加害者にはならない、という他害リスクのゼロリスク神話が作られてしまう可能性もあるのである。

もちろんこのような他害リスクへの不寛容は、人として真つ当な反応だ。他者を傷つけない、という道徳心がある人なら誰でも、自分が加害者だとは思いたくないだろう。しかしその道徳心と「自分は人を傷つけない」という虚構とを混同してはならない。パンデミックの元凶は夜の街である、若者たちである、と自分以外の高リスク集団を見つけて非難する昨今の風潮には、自分は常に「正義」の側、加害者を罰する側にいたい、という勝ち組願望があるように思う。

われわれはいつ何時災害に遭うかもしれないのと同じく、いつ加害者になるかも知れない危うい世界を生きている。その他害リスクを容認しない限り感染者を他人事として排斥する世論はなくなり、真の with コロナは訪れないだろう。

沈黙が醸す無謬文化

そんなリスクは心の内で分かっていたらよく、公言するのは露悪趣味に過ぎない、と思う方もいるかもしれない。また、それを公に認めれば、ゼロリスクを求める「リテラシーの低い人々」によって無用の誹謗中傷が生まれるのでは、と懸念する人もあるだろう。

リスクにまつわる水掛け論の不毛さは、私自身福島で何度も目にしている。それでも、その不毛な衝突は時に必要だというのが私の考えだ。なぜなら誹謗中傷の回避という名目で被害者となり得る人々との対話を避けるうち、いつか習い性になり、他害性に無関心な職業文化が醸され得るからだ。

医療界ではつい最近まで「白い巨塔」の残滓がしばしば見られ、自身の過ちを認めない医師も見かけた。無謬の砦が一度作られれば、そこから抜け出すことは容易ではないのである。

真の共生へ向け

いつ自分が感染し(被害者になり)、人にうつす(加害者になる)とも知れぬ新型コロナウイルスとの共生は、自他ともにゼロにならない他害リスクを許容する大きなチャンスだと私は考えている。他害性を直視するからこそ、その被害を減らそうと努力し続ける社会。With コロナ、with 原子力がそんな優しい世界となって欲しい、というのが甘すぎるであろう私の願いである。

(2020年7月31日記)



科学分野におけるダイバーシティの現状と課題



宮浦 千里 (みやうら・ちさと)

国立大学法人東京農工大学 副学長，女性未来育成機構長，工学研究院教授 工学部教授として学部・大学院の教育を担当する一方，副学長として戦略的事業や男女共同参画を担当。科学技術分野の進展のために，性別・国籍・研究分野の多様性を確保するダイバーシティの推進が極めて重要であると考える。

はじめに

女性の活躍推進は世界的に高い関心が寄せられており，科学分野におけるダイバーシティの推進は極めて重要な課題となっている。わが国における女性研究者比率は欧米諸国と比べて著しく低く，女性研究者がその能力を最大限に発揮できるようにするため，研究と出産・育児等の両立に配慮した措置を拡充すること，そして女性研究者の採用を促進することが求められている。近年，女性活躍推進に関わるさまざまな取組が行われ，平成 31 (2019) 年 3 月 31 日現在，研究者に占める女性の割合は過去最高の 16.6 % を示した。しかし，世界経済フォーラムによる「グローバル・ジェンダー・ギャップ指数(2019 年)」において，日本は世界 153 か国中 121 位となり，2017 年の 114 位(144 か国中)を下回る結果となっている。第 5 期科学技術基本計画において，2020 年までに理系分野の研究本務者の女性比率を農学系 30 %，理学系 20 %，工学系 15 % にするという目標を掲げているが，平成 31 (2019) 年 3 月 31 日時点で農学系 23.1 %，理学系 14.7 %，工学系 11.5 % と未だ達成の目途はたっていない。

本稿では，大学等における女性研究者支援および人材育成に関わる現状と課題について考察したい。

女性研究者支援の取組

女性研究者の活躍推進は，世界レベルの教育研究活動を進めていく上でわが国の最も重要な施策の一つとして位置づけられている。女性研究者が増加しない理由の一つには，出産や育児等を機に女性が研究職としてのキャリアから次第に離れていくことが原因と考えられ，大学などを中心に女性研究者への支援が進められてきた。

文部科学省は平成 18 年度に補助事業「女性研究者支援モデル育成」を開始以降，女性研究者支援事業を継続的に実施してきた。その結果，女性研究者支援事業を獲得する大学が増加し，各大学・研究機関に男女共同参画センター等が設置され，女性研究者や女子学生への支援体制の強化および地域ネットワークの構築等，さまざまな

取組みが行なわれている。本補助事業の採択機関数は，令和元年度時点で 104 機関(内訳：国立大学 61，公立大学 10，私立大学 23，研究機関 10)にのぼり，研究環境や支援体制が整備された結果，日本における女性研究者の離職率は大幅な減少を示している。このような背景から，文部科学省は全国的なダイバーシティネットワークの構築を目的に，文部科学省科学技術人材育成費補助事業ダイバーシティ研究環境実現イニシアティブ(全国ネットワーク中核機関(群))を立ち上げ，幹事機関である大阪大学と協働機関である東京農工大学および日本アイ・ビー・エム株式会社が申請した取組が採択され，平成 30 年度(2018 年度)より開始している。本事業では「全国ダイバーシティネットワーク組織」および「全国ネットワークプラットフォーム」を二つの柱として，女性研究者を取り巻く研究環境整備や研究力向上に取組む機関をつなぐ全国ネットワークの構築を目指している。「全国ダイバーシティネットワーク組織」では，全国を北海道，東北，関東・甲信越，東京，東海・北陸，近畿，中国・四国，九州・沖縄の 8 ブロックに分けて幹事大学を設定し，各幹事大学が一同に集まる“全国ネットワーク組織幹事会”を開催し，各地域の特徴的な取組や課題等について全国的な情報共有を推進している。さらに「全国ネットワークプラットフォーム」では，幹事機関である大阪大学が中心となり，ウェブサイト OPeNeD を基盤とした全国ネットワークを構築し，取組動向のデータ収集や分析，グッドプラクティス等の情報発信を行い，全国的な普及・展開を図っている。本ダイバーシティネットワークは，現在，全国 156 の機関が参画しており，国立大学，公立大学，私立大学，研究機関，企業等から組織される横断的な組織としてその役割が期待される。

ワーク・ライフ・バランス

平成 28 (2016) 年 6 月，「ニッポン一億総活躍プラン」が閣議決定された。一億総活躍社会の実現に向けた最大のチャレンジとして「働き方改革」が位置づけられ，仕事と

家庭生活の両立を困難にし、少子化の原因や女性のキャリア形成、男性の家庭参画を拒む要因である長時間労働を是正すること等が課題として取り上げられた。

内閣府男女共同参画局は令和2年版「男女共同参画白書」において、「家事・育児・介護」と「仕事」のバランス～個人は、家庭は、社会はどう向き合っていくか」と題した特集を組み、その意義や重要性を示している。本書における調査報告によると、「夫は外で働き、妻は家庭を守るべきである」という考え方に反対する者は6割程度に達し、夫婦とも「外で働く」ようになっているものの、依然として妻が家庭を守り、夫が稼得役割を分担しているのが現状である。介護と仕事との両立については、介護が必要な親の有無にかかわらず、40～50代の就労者において、男女ともに7割以上が不安を感じていることが明らかになっている。「家事・育児・介護」の負担が女性に偏り、就業継続や仕事との両立の難しさにつながっている状況を改善するには、男性に期待されている「仕事」の在り方や男性自身の「仕事」への向き合い方の変革と併せて、男性の「家事・育児・介護」への参画を進めていくことが必要との見解がなされている。女性の「仕事」による稼得役割を確保し、男性が家族ケアを担えるようにしておくことは、家庭単位で見た場合のリスクヘッジという側面があること、また、「家事・育児・介護」を家庭内で分担するのみならず、担い手の多様化や多様な外部サービスの活用等が重要であるとの報告がなされた。また、外部サービス(家事・育児・介護支援サービス)の利用率は低いものの、潜在的な利用意向は利用率より高いことが明らかになっている(介護62.9%、育児33.5%、家事26.3%)。

現在、文部科学省および独立行政法人日本学術振興会の科学研究費助成事業(科研費)において、若手研究者向けの研究種目の応募要件(博士の学位取得後8年未満)における育児休業等の期間の除外、育児休業等の取得により応募できなかった研究者等を対象とする研究種目の設置など、研究とライフイベントとの両立を考慮した取組支援が行われてきている。しかし、研究者は研究成果を継続して示さなければいけない一方で、出産・育児・介護との両立などの問題を抱えており、その能力を十分に発揮しながらワーク・ライフ・バランスを維持している環境づくりや支援が求められている。

自然科学分野における学術・研究支援の現状と課題

先端技術分野の教育・研究において、教授、准教授、研究所の主任研究者は若手研究者や若手教員と協働して日々、研究に邁進している。しかし、近年の大学運営費交付金の削減や競争的研究資金の拡充により人件費が期間限定の外部資金に依存する体制になり、任期付きの特任教員や博士研究員、研究支援員が増加しているのが現状である。科学技術の進展には、高度な技術を有する技

術者や研究を円滑に進める研究支援人材が不可欠であり、技術者や研究支援者には理系学部を卒業し、修士号を取得している人材も多い。しかし、大学や研究機関等の研究現場ではポスト削減により、技術者も任期制による雇用が多く、企業や病院における専門技術者に比べ、継続的な活動が難しい。研究の高度化に伴い優秀な技術者の育成と獲得は研究を推進していく上で必要不可欠であり、技術者や研究支援人材の雇用システムの構築は急務である。

大学や研究機関では戦略的部署、例えば、産学連携関連の取組を担うURA(University Research Administrator)、知的財産関連部署、情報メディアセンター、図書館、国際交流部署、学生キャリアセンターや男女共同参画センター等が果たす役割は大きい。URAは、研究の推進や産業界との連携、外部資金の獲得、知的財産の確保と管理をする大学の第3の職種として、高い能力が求められる。

これら戦略的部署やセンター等ではこうした職務内容の高度化に伴い、事務職員や司書、技術員に加え、教員や特任教員が配置されている。しかし、これら教員は兼任で各部署においての重要な職務を担っているケースが多く、時間・資金・エフォートの面から自身の研究と並行して実施していくことは極めて難しい。また、博士の学位を取得している者が任期付きで専任教員として配置されるなど、キャリアパス上の課題も多く残されている。また、上記の部署では女性研究者が担当している比率が高く、特に、図書館関連や男女共同参画センター等では女性の任期付き教員が配属される傾向がある。優秀な女性研究者を戦略的部署・センター等において任期付きで雇用するという傾向は、男女共同参画と女性活躍の推進の面からも、人材の活用とキャリアパス支援の視点からも是正すべき課題の一つである。

おわりに

近年、子どもの理系離れが深刻化しており、特に女子の理系進路選択が少ないことが問題視されている。これらの背景より、女性研究者が少ない農学、工学の分野において、ロールモデルを増加させ、教育力と研究力に秀でた質の高い女性研究者を育成するとともに、ダイバーシティの推進および働きやすい環境作りが期待される。一方、大学等では外部資金依存の事情もあり、ポストク問題、人件費削減による技術者および研究支援者の人材喪失、戦略的部署や男女共同参画等を担う女性の待遇改善や継続的支援の創出など、取組むべき課題は多い。人材育成は大学等の機関全体による取組が必須であり、企業・大学・研究機関・国際機関などで幅広く活躍できる社会を構築することが、わが国の科学技術の進展に不可欠である。これらは日本全体で中長期の戦略的観点で議論していくことが必要である。

(2020年8月28日記)

県外最終処分に向けた技術シナリオの検討

環境放射能除染学会での研究会活動

国立環境研究所 山田 一夫ほか

東京電力福島第一原子力発電所事故による環境汚染対応のため、中間貯蔵施設の整備、除去土壌の処理・貯蔵、焼却残渣の熱的減容化開始等の進展がある。今後、県外最終処分に向け、熱的減容化後の副生成物等の灰洗浄・濃縮によるさらなる減容化や廃棄のための安定化、最終処分、また、低濃度の処理物の有効利用が必要になり、中長期的技術課題の整理と技術開発戦略の設定が重要である。そこで、専門性を有しかつ中立的な立場にある環境放射能除染学会において、県外最終処分に向けた技術開発戦略の在り方を取りまとめるための研究会を設置した(2018~2020年度)。その活動概要を概説する

KEYWORDS: *final disposal, Fukushima-Daiichi, off-site, volume reduction, technical scenario, Society for Remediation of Radioactive Contamination in Environment (SRRCE), Radioactive Cesium, reuse, mass balance*

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故により東日本の広範囲が放射性Csにより汚染された。放射性物質特措法に従い、環境省はオフサイトの除染と中間貯蔵施設稼働後30年以内(2044年度)の県外最終処分に向け活動している。2024年にはそのための戦略目標を設定するというロードマップが示されている¹⁾。

一方で、帰還困難区域を除き、環境の除染は完了し、除去土壌は中間貯蔵施設に運搬され、可燃物を分離し、放射能濃度ごとに区分され、貯蔵が進行している。種々の放射能汚染した可燃物は焼却炉で減容化されている。焼却により発生する焼却残渣は中間貯蔵施設内の廃棄物貯蔵施設で保管することになっているが、保管スペースに限りがあるため、熱処理により減容化が2020年3月から始まっている。現在は、さらにこの熱処理により発生する副産物(溶融飛灰:排ガスからの捕集ばいじん)を減容化すべく、灰洗浄・クロマト濃縮が検討されている。これは、溶融飛灰中の放射性Csの多くが水溶性であることから、飛灰を洗浄することで、放射性Csを安定Csとともに水溶液に移行させ、そこから吸着剤によりCsを選択吸着し、濃縮しようというものである。

この濃縮過程では、用いる吸着剤の性能次第で濃縮後の放射能レベルと量が数桁も変わりえる。それに伴い、廃棄のための安定化の方法と処分方法も異なるもの考える必要がある。つまり、減容化処理は最終処分までの全体を考慮して定める必要がある。

しかし、2024年に県外最終処分の戦略目標を設定する目標がある一方で、可燃物等の焼却減容化により大量に生じた焼却残渣については、現実に2系列の熱処理システムが多額のコストを投じて整備され処理事業が開始された。刻々と状況が変化し、全体戦略における位置づけや整合性の議論が成熟していないなかで意思決定をせざるを得ない場面もあったと思われる。今後においても、学側が先導的な知見を示していくこと、すなわち、純粋に技術的に考えられる今後の処理・処分の方法について、全体を見渡した複数のシナリオを設定し、その課題を検討することは意義深い。また、これらの処理・処分の実現のための社会的合意形成に関しても、技術だけではなく、環境、社会、経済といった多面的な視点から、ステークホルダーの意見を集め、解析することも重要である。

そこで、筆者らは、各方面の専門家とともに、「環境放射能とその除染・中間貯蔵および環境再生のための学会」(通称:環境放射能除染学会(SRRCE))に、「県外最終処分に向けた技術開発戦略の在り方に関する研究会」(県外最終処分技術戦略研究会、委員長国立環境研究所大迫政浩センター長)を設置し、2018年10月から活動を行っ

Investigations of technical scenario for the final disposal outside Fukushima prefecture : Kazuo Yamada, Kenichi Arima, Masahiro Osako, Kazuto Endo.

(2020年6月3日 受理)

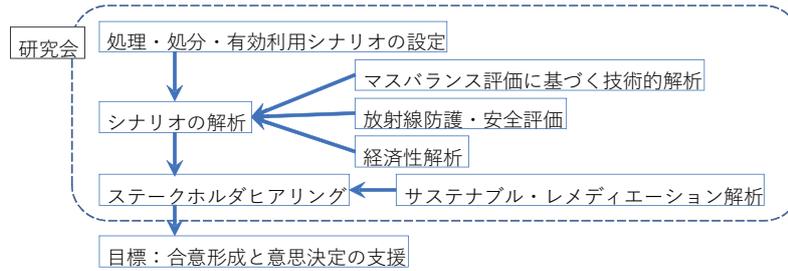


図1 県外最終処分技術戦略研究会の構成

処理対象物	減容化処理方法						安定化処理	容量	再利用/処分の方法	再利用/処分の場所	関連法規	放射線防護
	一次処理		高度処理									
土壌A							無処理		再生利用 中蔵II型	県内土工	別途	見做し規定 (別途策定のガイドラインに準拠)
土壌B	無処理						土工資材化	1,200万m ³	管理型	県外土工	特措法	
土壌C	高度分級	粗粒分					鋼製容器収納	900t+解体	遮断型	県外	炉規法	有識者による安全評価
土壌D		細粒分	化学処理				耐久性容器収納		長期貯蔵	既存施設	電離則	
土壌異物	焼却	焼却灰	熱処理	浄化物	灰洗浄濃縮 10 ⁶ Bq/kg		ジ・林・リ固型化		浅地中処分相当	新放射性廃棄物処分場		個別審査
非除染可燃性廃棄物				濃縮物 施設解体廃棄物	灰洗浄超高濃縮 10 ⁸ Bq/kg		ガラス固型化		原因者返却			
							処理水<90Bq/L	82万t				

図2 処理・処分の各工程でのオプション一覧と再利用/処分の例²⁾
(実線：再利用対象の低濃度汚染物，破線：処分対象の高濃度汚染物)

てきた²⁾。本稿ではその活動概要を報告する。

II. 県外最終処分技術戦略研究会

研究会で検討する内容を図1に示す。研究会は、環境省が実施する、県外最終処分に向けた全国民との合意形成を踏まえた県外最終処分の方法の意思決定を支援することを目標に活動している。現有の処理・処分技術を調査し、処理対象物から始まり、減容化、安定化、再利用/処分の方法と場所、関連法規、放射線防護の一連の工程における代表的オプションを整理した(図2²⁾)。この各項目を適宜連結することで処理・処分シナリオを構築できる。図2では、比較的汚染度が低い土壌と熱処理による浄化物は土工資材として再利用し、比較的汚染度が高い濃縮物や濃縮施設解体廃棄物は鋼製容器に収納し、県外に遮断型相当の最終処分場を設置し、処分する事例を示した。各工程のオプションを結び付けた各シナリオで発生する除染物と濃縮物、および副産物の量と放射能濃度を推定することは、処理・処分費用の算定とともに、再利用と処分の方法や場所にも関与するため、熱処理と洗浄・濃縮処理を中心にこれらのマスバランスを調査した³⁾。マスバランスが計算できる手法を得ることで、各工程で求められる能力に関しても定量的に把握することができるようになる。マスバランス計算に基づき、公開情報を用いて経済性解析も実施中である。

現時点では、シナリオの詳細までは検討できていないため、必要な放射線防護策や処分にかかわる安全評価までは実施できていない。

これらの技術的情報を踏まえて、将来的には種々のス

テークホルダーに対してヒアリングを行うこともありえるが、技術者側の詳細な検討結果を提示するのではなく、より柔軟な内容で調査をするのが妥当とも考えられ、研究会では独自の調査を行い、結果を Sustainable Remediation の手法⁴⁾で解析している。本報告とは別に検討内容のまとめが提示される。

III. マスバランス計算

ここでは除染特別地域内の仮設焼却炉から発生する焼却残渣などを対象に、熱処理(溶融)による減容化、さらに濃縮物である溶融飛灰の洗浄と吸着剤による濃縮、吸着剤の固型化¹⁾による安定化、までの放射能濃度と質量の変化を各工程ごとに算出する方法について紹介する³⁾。考慮した工程を図3³⁾に示す。使用した数値は、文献から集めたものであり、それぞれの代表値を用いた。

熱処理では、Csを除去するため、CaとClを適宜添加し、Csを塩化揮発させる。放射性Csは、焼却残渣に1~数10ppm程度含まれる安定Csと同一の挙動をする。

Csの分析感度は、放射能計測による方が効率的である。誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MASS)での定量

¹⁾ ここでは、未固結物質を廃棄体に一体化する過程を固型化と称する。これまで、固化和固型化は未統一に使用されている用語である。廃棄物分野では、セメント固化は重金属溶出防止であり、immobilizationの意味である。地盤改良におけるセメント系固化材はsoil improvementに用いられる。ここで言う固型化は埋立てのための強度発現を意味し、solidificationである。

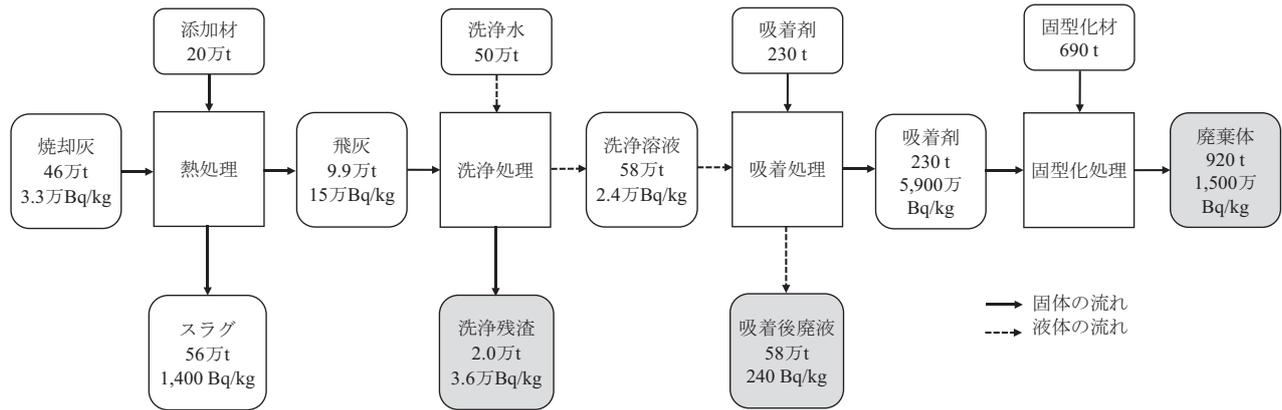


図3 代表的パラメータでの減容化・固化過程でのマスバランス計算例³⁾

下限は 10 ppb 程度であり、1 ppm の Cs 含有率であると、99 % の除去までしか評価できないが、10,000 Bq/kg の Cs-137 を含有した試料であれば、Ge 半導体検出器により 10 Bq/kg を計測するのは容易であり、99.9 % の除去が評価できる。Cs を除去した後は溶融スラグとなり、冷却後は土工資材としての利用が想定されている。

Cs は CsCl として存在し、600 °C 程度から揮発が始まる。溶融温度である 1,400 °C では、全体の化学組成のバランスにも依存するが高効率で Cs は除去される⁵⁾。揮発した CsCl は冷却され、バグフィルタ内で他の塩類とともに飛灰として回収される。

この塩類は水溶性であり、洗浄することで Cs は液相側に移行する。ここに吸着剤を添加することで、洗浄液から Cs を相当程度除去できる。Cs の除去の程度(固液間での分配比ⁱⁱ⁾)は、運転条件にも依存するが、吸着剤の性能と共存元素との濃度比によって決まる。Cs は吸着剤にイオン交換により固定されるため、競合するイオン間での選択係数とイオン交換容量をあらかじめ評価しておけば、任意のイオン組成において Cs の吸着剤への分配比を算定できる⁶⁾。

図3の計算例では、吸着処理後の廃液中の放射能濃度が 240 Bq/kg と排水基準を超えるため、パラメータスタディにより、排水基準 90 Bq/kg を満たすにはどの程度の吸着率を実現すればよいかを求めることも可能で、図4に示すように設定の 99.0 % を 99.6 % とすればよい³⁾。このようにマスバランス計算は、求められる工程の能力を算定するのにも有効である。

吸着剤に何らかの固化材を添加し、安定化する。この工程には多様な方法があり得、最終的な濃縮度合いも

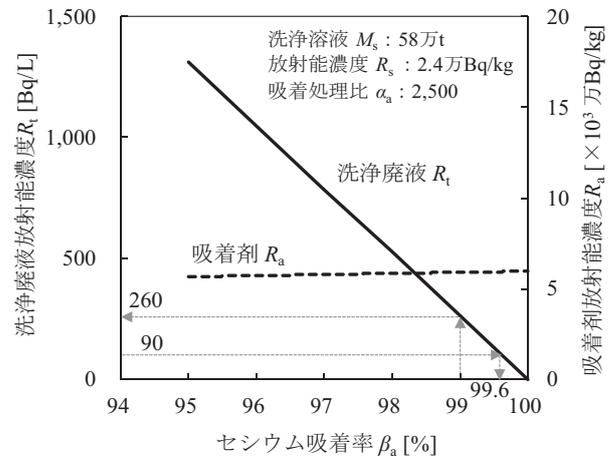


図4 洗浄処理におけるセシウム溶出比の残渣と洗浄溶液の放射能濃度への影響³⁾

変化する。最近の研究によれば、フェロシアン化銅ポリビニルアルコール造粒物を吸着剤として使い、ジオポリマー固化などを行うことで、処理対象物の焼却残渣の段階から固化化後で、1 万倍濃縮が可能であることも示されている⁶⁾。単純計算すれば 38 万 m³ (かさ密度 1.2 g/cm³ として 46 t) の焼却残渣が、38 m³ (一部屋程度の容量) にまで減容化ができることになる。もちろん、それに伴い放射能濃度も 3.3 万 Bq/kg から 3.3 億 Bq/kg となり、種々の配慮が必要になる。

図3に示したものは一例であり、あらゆる運転パラメータを変化させ、特徴ある工程を構築して多様な検討が可能である。本研究会は、最終処分を見据えた処理工程の最適化の支援を目指してきたが、目的に合致した有効なツールを提供できた。

IV. おわりに

本項では、環境省による県外最終処分の戦略方針決定の一助とすることを目標に、環境放射能除染学会に県外最終処分技術戦略検討会を設置し、現在検討している内容のうち、技術シナリオ設定とマスバランス計算による定量的評価手法を概説した。ここに示した例は、個別に

ⁱⁱ 原子力分野では「分配係数」という用語が用いられる。しかし、Cs 吸着剤はイオン交換体であり、液固間の Cs の分配は Cs と競争吸着するイオンの濃度に依存し、著しい変化を示す。特定の条件で測定した固液間の分配の比でイオン交換の程度を推定するのは一般的には間違いである。用語としても、定数ではなく条件依存性を有する数値であるため、「分配比」とここではした。

は仮定の数値もあり、より詳細な検討を要する。今後は、現実の熱処理施設から発生する飛灰を用いた、洗浄試験の結果を踏まえ、さらに精緻化することが必要である。

また、コスト試算も進めているが、ここで検討した先にある処分施設に関する部分は、最終処分の対象となる廃棄のための安定化体の放射能濃度と量に大きく依存することになるため、現時点では不透明である。今後、処分までの技術シナリオ全体での具体的な施設詳細条件を考え、別途検討している社会的合意形成の議論に活用できるように、技術的な検討を進めていきたい。

－ 参考資料 －

- 1) 環境省, 中間貯蔵除去土壤等の減容・再生利用技術開発戦略検討会, 資料2 中間貯蔵除去土壤等の減容・再生利用技術開発戦略 進捗状況について, 2019.3
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/proceedings_190319_02.pdf?190416
- 2) 山田一夫, 大迫政浩, 飯本武志, 大越実, 杉山大輔, 宮本泰明, 保高徹, 山田正人, 遠藤和人, 有馬謙一, 企画セッション: 環境放射能除染学会「県外最終処分技術開発戦略あり方研究会」成果報告「県外最終処分に向けたシナリオ」, 環境放射能除染研究発表会, 同要旨集, Vol.8, p.43, 2019.
- 3) 有馬謙一, 山田一夫, 大迫政浩, 保高徹生, 芳賀和子, 福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムによる汚染物の処理・処分方法の総合的比較(第1報)焼却残渣の熱処理・灰洗浄を含む減容化プロセスの定量的評価方法の開発, 環境放射能除染学会誌, Vol.7, No.4, pp.241-252, 2019.
- 4) 保高徹生, 古川靖英, 張銘, わが国と諸外国のサステナブル・レメディエーションへの取り組み, 環境情報科学, Vol. 46, No.2, pp.43-37, 2017.
- 5) 釜田陽介, 阿部清一, 川本克也, 由井和子, 倉持秀敏, 大迫政浩, 溶融技術による土壌等からのセシウム熱分離に関するプラント実証試験評価, 環境放射能除染学会誌, Vol.3, No.2, pp.49-64, 2015.
- 6) T. Ichikawa, K. Yamada, R. Iwai, Y. Kanawaza, Ion Chromatographic Decontamination of ¹³⁷Cs-enriched Fly Ash Using Poly(vinyl alcohol)-bound Copper Ferrocyanide as Cs Adsorbent, J. Soc. Remed. Radioact. Contam. Environ. (in press).

著者紹介

山田一夫 (やまだ・かずお)

国立環境研究所

(専門分野/関心分野)セメント・コンクリートの材料科学/Csの高濃縮と固化, 最終処分施設

有馬謙一 (ありま・けんいち)

国立環境研究所

(専門分野/関心分野)プロセス工学/粉粒体工学/放射性物質で汚染された廃棄物の減容化処理

大迫政浩 (おおさこ・まさひろ)

国立環境研究所

(専門分野/関心分野)資源循環・廃棄物に関する環境衛生工学/オフサイトの汚染廃棄物等の処理シナリオと社会合意形成

遠藤和人 (えんどう・かずと)

国立環境研究所

(専門分野/関心分野)廃棄物工学・環境地盤工学

燃料挙動解析コード FEMAXI-8 の開発と公開

信頼性向上と燃料分野での利用拡大に向けて

日本原子力研究開発機構 宇田川 豊

核燃料や燃料被覆管のふるまいに係る研究で得られた知見やデータは、燃料挙動解析コードにモデルとして集約され、燃料設計や安全評価に活用されている。著者らは、国産/公開コードである FEMAXI の最新バージョン FEMAXI-8 を開発し、燃料分野における産官学の研究開発をより強力にサポートする技術基盤とすべく、モデル/機能拡充に加え、体系的検証による性能評価を経た標準モデルセットを提供した。2019年3月の公開に至るまでの取り組みを概説する。

KEYWORDS: LWR, fuel, cladding, high burnup, fuel performance code, fission gas release, PCMI, irradiation, crack, swelling

I. はじめに：燃料挙動解析コードとは

原子力発電所では、燃料棒を多数束ねた燃料集合体の形で原子炉に装荷し使用している。燃料棒は、燃料ペレットをジルコニウム合金被覆管で覆った構造(図1)をしており、燃料ペレットが熱エネルギーの発生源になる一方、被覆管が炉心の冷却に必要な形状を維持する。同時に、燃料ペレットおよび被覆管ともに運転中の燃料棒からの放射性物質放出を防止する役割を担っている。

燃料ペレットの発熱は、ウランやプルトニウムの核分裂反応によって生じており、これにより生じる核分裂生成物(FP)のうち、特にキセノン(Xe)やクリプトン(Kr)などの希ガス成分(FPガスと呼ばれる)の挙動が、原子炉運転中の燃料のふるまいを変化させる原因となる。たとえばFPガスがペレットと被覆管のギャップに放出されることで、燃料棒内圧が高まり、被覆管の変形に影響する。またギャップの熱伝達が悪化して同じ出力でも燃料ペレット側の温度が高くなる、などがその代表例である。

上記の変化は行きすぎれば燃料の破損につながることから、原子炉設置にあたっては燃料のふるまいが原子炉の安全性を損なわないこと、を確かめる必要があり、このための工学ツールの一つとして燃料挙動解析コード(以下、燃料コード)が使用される。例えば原子力事業者は、想定される運用下での燃料温度や内圧、被覆管変形

などの現象(図1)の推移を燃料コードにより予測し、燃料設計の妥当性を確かめるⁱ。新たな燃料の設計、開発においても、設計パラメータや使用条件の最適化に燃料コードが必要となる。規制の観点では、米国原子力規制委員会をはじめとする世界各国の規制主体の多くは事業者とは独立に整備された燃料コード(例：米 FRAPCON)を保有、利用することで、その審査能力を確保している。学術研究においては、質、量ともに限られる燃料照射試験データから、直接には測定できない燃料内部の情報を推定することで、燃料ふるまいの解明をサポートする、逆解

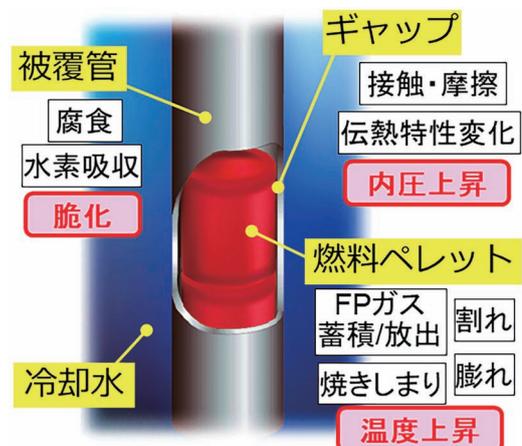


図1 原子力発電所で使われる燃料棒(燃料ペレットが見えるよう、被覆管をカットしている)と燃料コードが扱う現象の例

Development and release of fuel performance code FEMAXI-8 :
Yutaka Udagawa.

(2020年6月4日 受理)

ⁱ この目的の場合、「燃料設計コード」と呼ぶことがある。

析のツールとなる。本稿では、国産燃料コード FEMAXI の最新版となる FEMAXI-8 について、開発の経緯と改良/検証の進展を紹介する。

II. FEMAXI-8 開発に至る経緯

FEMAXI は燃料コードの一つで、1980 年代に大学、メーカーとの共同開発が行われた FEMAXI-III を経て、バージョン IV 以降は日本原子力研究開発機構 (JAEA) が開発を続けてきた、公開コードである。炉心内に置かれた燃料棒に着目し、内部で起こる現象 (図 1) を扱うための要素モデルを組み合わせることで、その内側で発生する力や、燃料棒を構成する燃料ペレットと被覆管の温度、燃料棒内部での FP ガスの動きなどを計算する。開発初期よりソースコードを含む無償公開を続けてきたこと、また多様な物性値モデルをオプションに備える運用上の自由度の高さから、産官学で広く利用されてきた。

国内では近年まで、大きく 2 つの燃料コード整備の取り組みがあった。JAEA では、実験データの分析や新しいタイプの燃料の研究開発に役立てる観点から、FEMAXI-V および 6 で燃料の高燃焼度化や軽水炉での MOX 燃料利用に対応したモデル拡充を、FEMAXI-7 で FP ガスモデルの高度化を主として、FEMAXI コードの改良を続けてきた。他方、(独)原子力安全基盤機構 (JNES、現在は原子力規制庁へ統合) でも 1990 年代以降 FEMAXI を導入し、これを改良して燃料安全審査 (クロスチェック) 用コード FEMAXI-JNES として整備していた。

2012 年には FEMAXI-7 が公開され、同時期、FEMAXI-6 を基盤とする JNES での安全審査コード整備も区切りを迎えた。これらを受け、2013 年に、JAEA/JNES 間で次期国産燃料コードの開発/整備方針および開発体制に関して議論がなされた。この際喫緊の課題として一致を見たのは、近年のモデル拡充にコード全体の検証ⁱⁱが追い付かず、拡大する両者のギャップの解消であった。

燃料コードの検証規模について具体的な基準やガイドラインは存在しないが、有力な目安として、当時から現在に至るまで米国 NRC 他世界的に広く用いられている、米国 FRAPCON4.0 コード検証の取り組みがある¹⁾。ここでは 100 を超える照射試験データベースについて一律の解析条件 (標準モデルセット) による解析が行われ、その予測性能が報告されている。対して、当時の最新バージョンであった FEMAXI-7 は解析対象となったの

ⁱⁱ ここでは、コードの利用目的に照らして十分広い条件範囲の燃料照射試験で得られた実測値と予測値を照らし合わせ、モデルの修正/追加を経て予測性能の向上を図ると共に、最適評価を与えたモデルおよびパラメータの組み合わせを推奨モデルセットとして予測性能と併せて提示するまでの一連の取り組みを指す。

べ試験数こそ数十ケースに上ったものの、これらは一律の解析条件の下での性能評価を企図したのではなく、解析テーマ毎にモデルが設定されている。標準モデルセットのない状況では、

- 解析結果が利用者の経験および知識に大きく依存する
- 利用者は、モデル選定の根拠や妥当性の説明、それにより得られた解析にどの程度の信頼性が期待できるかについて、ゼロベースで検討せねばならない

ので、本来目的としていた解析実施にたどり着くまでの工数が膨れ、コードの活用を妨げる。この点が、FEMAXI-JNES では安全評価への適用にあたり独自の整備、検証が加えられた理由でもある。さらに、一般に検証には大きな工数と期間を費やすⁱⁱⁱので、モデル改良を継続する開発者と利用者間のバージョンのずれが常態化し、公開コードの利点である開発者/利用者相互のフィードバックが機能しなくなる。

以上の課題認識の下、本稿テーマである FEMAXI-8 の開発では、特定の機能拡充やモデル改良にとどまらず、それらの組み合わせとしての総合的な燃料挙動予測性能の評価、すなわち体系的検証を経て、一定の信頼性が確認された標準モデルセットの提示とセットでコードをリリースすることを目標に据えた²⁾。

III. FEMAXI-8 の開発と検証

1. 開発体制の一元化

2013 年以降開始した FEMAXI-8 の開発では、上述の反省を踏まえ、FEMAXI-7 と FEMAXI-JNES の開発を一本化し、改良と検証を一体的に進めた。コード基幹部分の開発/整備は JAEA が担当する一方、FEMAXI-JNES の開発を引き継いだ原子力規制庁長官官房技術基盤グループの協力を得て、後述のデータベース整備や検証解析を分担し、これらを速やかに共有する体制を維持することで、開発効率の向上を図ってきた。

2. 燃料コード検証用データベースの整備

燃料挙動の解析においては、図 1 に挙げた要素を含むさまざまな現象の推移を直接、間接に支配している燃料ペレットの温度が最も重要な評価項目の一つである。また FP ガスの移行/放出挙動も、燃料ペレット内部でのポロシティ発展やギャップガス圧増を通じて被覆管変形の駆動力となることに加え、ギャップ熱伝達の悪化を通じて温度へのフィードバック作用が大きいことから、温度と並び重要となる。この他、燃料棒の健全性に直結する要素として被覆管の変形量や腐食量が挙げられる。そこで燃料コードの検証では、オンライン計測や照射後試験によりこれらの実測データが得られている燃料照射試験

ⁱⁱⁱ 照射試験レポートやデータベースから入力作成、モデル選定、解析実行、分析に要する工数。文献中に登場する燃料コードの解析は数ケース規模のものが多い。

表 1 FEMAXI-8 の検証に用いた燃料照射試験 168 ケースがカバーする条件範囲³⁾

	燃料タイプ		
	UO ₂	MOX	Gd 添加
燃焼度 [GWd/tU]	3-99	15-72	25-95
最大線出力 ^a [W/cm]	146-585	201-469	174-392
燃料棒内圧 ^b [MPa]	0.1-3.4	0.1-2.6	1.0-2.6
He/ギャップガス比 ^b	0.0-1.0	1.0	0.5-1.0
ペレット/被覆管ギャップ ^b [μ m]	42-508	75-290	49-186

^a: 照射期間中に燃料棒が経験した棒平均の値

^b: 初期/製造時条件

を解析して、照射下での燃料挙動の再現性能を調べる。

検証工程が開発を律速してきた反省を踏まえ、FEMAXI-8 の開発においては、コード本体の本格的な改良に先立ってまず検証工程の生産性向上のための開発基盤整備に取り組んだ。第一に、収集した燃料照射試験データを集約、整理し、解析実行に必要な適用モデル構成などの情報とあわせて、MySQL ベースのリレーショナルデータベースとして整備した。第二にデータベースに格納されたデータを利用した FEMAXI の入力生成、実行から結果の分析までの工程を担うサブプログラム類を開発し、検証システムとして整備した。これらによって、検証作業の核となるプロセスが自動化されている。

FEMAXI-8 の検証では、現在世界的に事実上の標準コードである米国 FRAPCON-4.0 がその検証に用いた燃料照射試験ケース群およびデータ項目を骨格として、ここへ JAEA 独自に 48 の試験ケースを追加し、計 168 ケースの照射試験を扱った(表 1)³⁾。検証データベースの構成が先行研究と近くなる程コード間のモデリングの差異が際立ち、性能の比較や開発へのフィードバックが容易になると見込まれたことから、このような試験ケースを選定した。

3. FEMAXI の数値安定性の改善

前節に述べた検証システムによる開発効率の向上は、投入した解析ケースが全て正常に完了することが前提である。しかし FEMAXI-7 による当初の試解析では、数値不安定による停止が相次いだ。この要因と、安定性改善に寄与した改良^{2, 3)}のいくつかを以下に述べる。

図 2 は、FEMAXI の力学計算に使われる有限要素モデルの内、燃料棒を構成する軸方向ノードの 1 つを抜き出したものである。簡単のため、ここでは燃料スタック^{iv}部と被覆管部は径方向にそれぞれ 3 および 2 メッシュの構成とする。バッファ要素は、ディッシュやチャンファといったペレット形状を表現する他に、軸方向に潰れるほど硬くふるまうことで、燃料スタック同士の軸方向接触に伴う非線形性を幾分緩和する役割がある。燃料スタック部と被覆管部の間でも径方向の固体接触が生

^{iv} 燃料ペレットが積みあがった集合を指す。

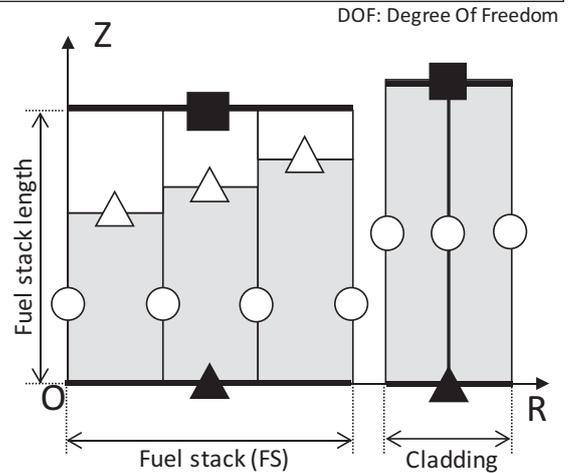
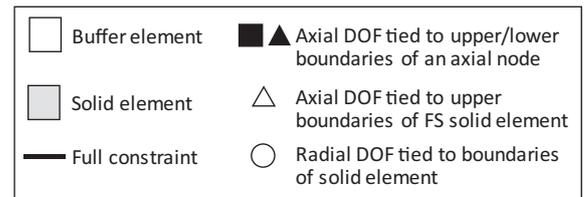


図 2 軸方向の有限ノード内要素モデル

じるので、図の簡単なメッシュ構成でさえ、強い非線形性の源となる箇所が $3 + 1 = 4$ 箇所存在する。これに、照射中の出力の変動に伴って生じる燃料スタックの急な膨れなど別の非線形挙動が重なって、数値不安定の原因となる。

(1) バッファ要素の剛性修正アルゴリズム

バッファ要素の剛性修正アルゴリズムは、収束性を重視して変更した。残存バッファ幅の大きさの関数として剛性修正処理を力学計算反復過程に単純に挿入する従来の方法に替え、隣接軸方向ノードのオーバーラップ(バッファ幅の負値)を常時監視し、発生時に限りバッファ剛性を漸増させることで、急激な剛性上昇/低下の繰り返しによる解の振動を回避している。

(2) 軸力^v算定アルゴリズム

従来は、まず軸方向ノード毎に仮の FEM 求解を行い、ここで得られた摩擦力の推定値を使って燃料棒全体の剛性方程式を改めて解いていた。これは非線形性の強い条件ではしばしば失敗し、非物理的な解や未収束の原因となった。FEMAXI-8 では、ノード毎求解は行わず、燃料スタック/被覆管接触ノードについてはまず単純に全ノード固着を仮定して系全体の求解を行う。この結果に基づき算定された燃料ペレット/被覆管の軸力が摩擦力を上回るノードでは適用する軸力を少しずつ下方修正し、この手順を反復する。

^v 燃料スタックと被覆管が互いを拘束する力を指す。

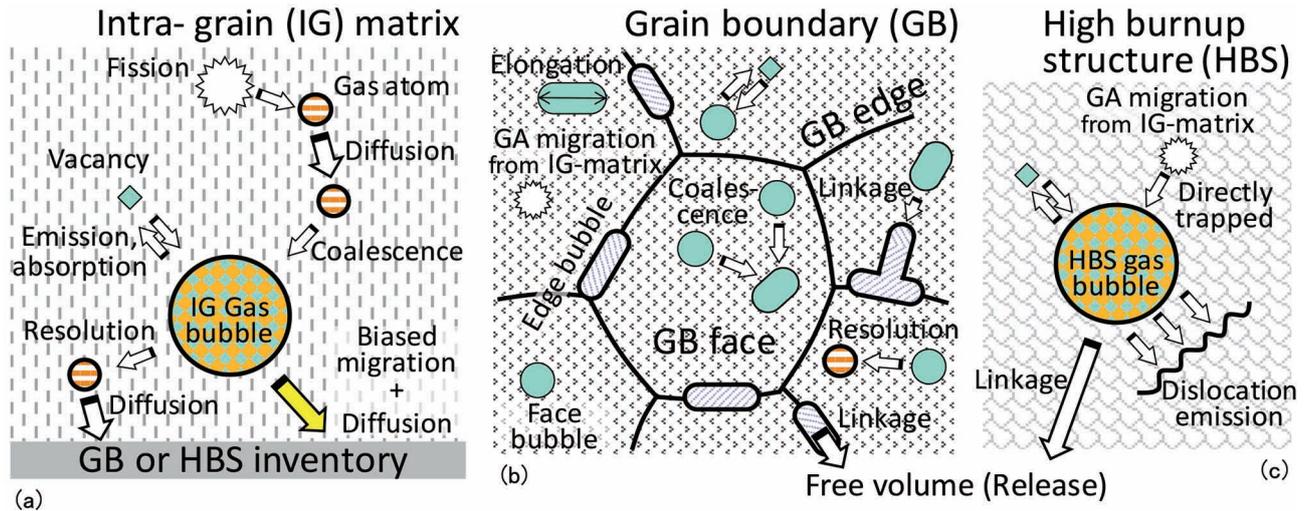


図3 FEMAXI-8FP ガス移行モデル：ガス発生から放出までの過程に関与する現象

(3) 燃料ペレットの応力再配分

現実の UO_2 ペレットは高々数十MPaの引張応力で内部にクラックを生じるとされるが、燃料スタック要素を連続体として扱くと、有意な引張応力(数十～数百MPaオーダー)が発生する。FPガスバブル^{vi}のモデリング上、あまりに強い引張応力の発生はバブルの急激な膨れを引き起こすので、現象記述の妥当性の他、やはり数値安定性への悪影響が問題となる。こうした引張応力を緩和するため、燃料ペレットの剛性方程式求解に応力再配分アルゴリズム(Stress Transfer Process)を導入した。

4. 物理モデルの開発：FPガス移行モデル

FEMAXI-8開発の過程で追加、更新したモデルの内、ここでは燃料コードでモデリングの核となるFPガス移行モデルを取り上げ、個々の文献からは把握し辛くなっている全体像や要素間のつながりについて説明する。力学的リロケーション、燃料スタック/被覆管摩擦、熱的リロケーション、亀裂の熱的影響、燃料熱伝導率、燃料焼きしまり、など他のモデル開発やFPガス移行モデルの詳細については文献^{2~4)}を参照されたい。

図3にFPガス移行モデルの概念図を示す。FPガス(Xe, Kr)は最初、核分裂密度に比例する生成率をもって、単原子の状態燃料結晶粒内(同図(a))に生成する。ガス原子は拡散(熱拡散、照射誘起拡散)により、濃度勾配に応じた速度で結晶粒の境界(粒界)に向け移行する。実効的な移行の速度は、燃料結晶粒内マトリクス中に分布するFPガスバブルにガス原子がトラップされることで小さくなり、逆に核分裂片によってガスバブルからガス原子がマトリクス中へはじき出される(再溶解)ことで大きくなる。また、以上の過程だけでは、過渡(急な出力、温度の上昇)時に観測される移行速度増大を十分に

説明できないケースがある。そこで、過渡時への対応として、温度勾配に比例してバブル自身が粒界へ移行する過程(図中“Biased migration”)を取り入れている。

粒内から粒界(図3(b))に移行したFPガスはまず直ちに粒界面上のバブル(フェースバブル)に取り込まれる。フェースバブルは主に空孔の吸収、放出により成長、連結、伸長し、これにより粒界の辺上のバブル(エッジバブル)への連結が進む。エッジバブルの成長が進むとその一部は燃料棒内自由体積に連結し、いわゆるFPガス放出(FGR)としてカウントされる。

燃料ペレットの外周部のように、比較的低い温度の下で燃焼が進んだ領域では、高燃焼度組織(HBS)の形成が進み、粒内から移行するFPガスの一部はこのHBS領域(図3(c))内ガスバブル(リムポア)に分配される。粒内、粒界と同様空孔の吸収による成長を考慮するが、HBS形成が有意となる温度では寄与は小さく、FPガス凝集によるバブル圧上昇は、主に転位放出により緩和される⁴⁾。またバブル成長に伴い一部が自由体積に連結し、FGRに寄与する^{vii}。

以上の粒内、粒界、HBSを独立した3つの常微分方程式(ODE)系で扱っている。1つの解析で、FPガス移行モデルについて熱計算メッシュ×3のODEソルバーが並行に走っていることになる。各系で算定されるFPガスバブルの成長は燃料ペレットのポロシティ増分として集計される。これが燃料スタック有限要素(図2)の体積増に換算され、力学計算に強い影響を与える。

5. 検証と標準モデルセットの決定

前節までに述べた改良を施したFEMAXI-8について、検証データベース(表1)に登録された燃料中心温度、FPガス放出率、燃料ペレット密度変化、被覆管外径変

^{vi} ここではFPガスと空孔が凝集し気泡化したものを考えている。

^{vii} 現状、HBSバブル経由の放出寄与は非常に小さい。

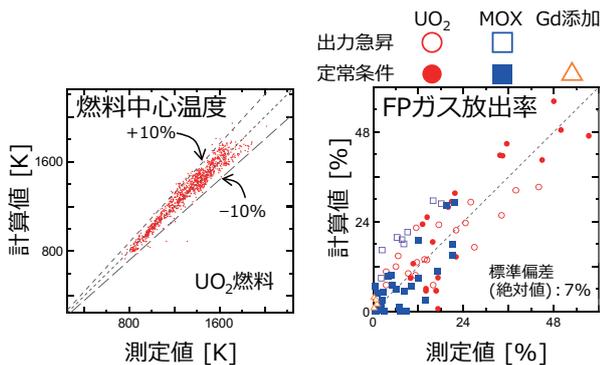


図4 FEMAXI-48 計算結果と照射試験データとの比較

化量、被覆管酸化量、被覆管水素吸収量、燃料棒内体積などの実測データと解析結果の比較を通じてモデルの調整を行い、標準モデルセットを決定した。ここでは燃料挙動への影響が大きい燃料中心温度とFPガス放出率の再現性を最も重視している²⁾。

文献³⁾に報告したモデルセットによる計算結果と実測値の比較を図4に示す。燃料中心温度については概ね相対誤差±10%以内の精度、またFPガス放出率の標準誤差は絶対値にして±7%程度となった。他の検証項目を含め、全体的な到達精度については、本検証のデータベース構成の土台としたFRAPCON-4.0コードと同水準である。ただしFEMAXI-8の方が誤差の大きいケース、またはその逆のケースがあり、これらの差は、FPガス移行や燃料ペレット焼き締めにおける燃料結晶粒径の影響の取り込み方など、コード内のモデル構成の違いを反映している。

6. コードパッケージの公開

開発当初に目標とした体系的検証と信頼性確認(II章を参照)を一定の水準で達成できたことを受け、FEMAXI-8のコードパッケージを2019年3月に公開した(PRODAS, <https://prodas.jaea.go.jp>)。FEMAXI-8以降では厳密なバージョン管理を行っており、不具合やバグ修正、モデル更新の都度、公開プログラムの実際のバージョンも8.1.001, 8.1.002, …のように変わっている。プログラムと併せて配布パッケージに添付する標準モデルセットについても、検証ケースの追加やモデル更新後、一定の検証を経て追加している。III.2に述べたコード開発基盤の整備を経て、現在は、プログラムあるいはモデル変更時の再検証を迅速且つ低コストで行えるようになった。従来利用者は解析条件の設定を独力で行う他なかったが、今後は随時提供するモデルセットが共通言語となり、結果の解釈やモデルに係る議論の共有をたすけ、産官学にわたる利用者の連携の質を高めることが期待される。

IV. おわりに

原子力分野における燃料コードおよびそのなかでの

FEMAXIの位置づけをふりかえるとともに、FEMAXI-8開発の経緯と公開に至る取り組みを紹介した。

国内外の状況を見渡せば、東京電力福島第一原子力発電所事故以降活発な研究開発が続いている事故耐性燃料挙動評価への対応をはじめとして、設計基準事故解析への適用とその検証、このための熱水力計算コードや核計算コードとの連携、その他多次元化や計算科学アプローチの取り入れなどさまざまな開発や応用が欧米を中心に進んでおり、わが国の規制支援上のニーズや優先順位を見極めつつ、検討を進めるべき多くの開発課題がある。

FEMAXIにあっても、これまで公開パッケージを基に、IIに述べたFEMAXI-JNESの他、低減速炉や新型転換炉、高速炉といった次世代炉燃料を中心に適用対象を拡げる取り組みがあった。また最近では、事故耐性燃料や加速器駆動未臨界炉向け窒化物燃料向けのバージョンが生まれている。しかしながら、これらのモデル/機能拡充は一部を除きFEMAXI-8には反映されていない。独立に大規模な修正を経た後のマージは非常にコストが大きいためである。今後は、異なる利用者間で並行する取り組みを調整し、適時成果を集約・一本化する努力が、上述のさまざまな開発ニーズへの対応を加速する上で極めて重要となる。III.1に述べた組織間の連携も、同様の問題意識に基づいている。技術面の対応としては、FEMAXI-8以降順次プログラムのオブジェクト指向化を進めており、分散開発との親和性向上を図っているところである。

－ 参考資料 －

- 1) K.J. Geelhood et al., "FRAPCON-4.0 Integral Assessment", PNNL-19418, PNNL, 2015.
- 2) 宇田川 他, 燃料挙動解析コードFEMAXI-8の開発—軽水炉燃料挙動モデルの改良と総合性能の検証—, JAEA-Data/Code 2018-016, JAEA, 2018.
- 3) Y. Udagawa, M. Amaya, Model updates and performance evaluation on fuel performance code FEMAXI-8 for light water reactor fuel analysis, N. Nucl. Sci. Technol., Vol. 56, No 6, pp.461-470, 2019.
- 4) Y. Udagawa et al., The Effect of Base Irradiation on Failure Behaviors of UO₂ and Chromia-Alumina Additive Fuels under Simulated Reactivity-Initiated Accidents: A Comparative Analysis with FEMAXI-8, Ann. Nucl. Energy, Vol. 139, 107268, 2020.

著者紹介



宇田川豊 (うだがわ・ゆたか)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子力材料, 核燃料,
照射損傷, 破壊力学, 損傷力学, 延性破壊,
計算科学, ソフトウェア設計

燃料集合体内の三次元沸騰二相流挙動の可視化

軽水炉三次元熱流動実験設備 (SIRIUS-3D) の概要と活用

電力中央研究所 新井 崇洋, 古谷 正裕

流れ現象は日常生活から工業プラントまで身近に存在するが、それを定量的なものとして把握するために可視化技術が発展してきた。原子炉燃料集合体はその複雑な構造内部を水が流れながら除熱や中性子減速材の役割を果たす。本稿では、当所が研究開発を進めている燃料集合体内の沸騰二相流計測技術に焦点をあてる。これまでに開発した計測技術の測定原理や計測機器の概略を示し、模擬燃料集合体を用いた計測事例を紹介する。

KEYWORDS: *fuel rod bundle, boiling two-phase flow, flow visualization, X-ray computed tomography, real time radiography, subchannel void sensor, void fraction*

I. はじめに

流れの可視化は、目視では捉えられない物質移動を定量化することである。流れの理解だけでなく、工業利用に際して効率や安全性を向上させるためにも、流れの定量化は重要である。流れの可視化技術は、層流から乱流への遷移や、境界層のはく離といった液体や気体単相の流れや、沸騰や凝縮、溶解や凝固などの相変化、化学反応を伴う流れなどさまざまな状態が対象となる¹⁾。特に液相と気相が混在する沸騰二相流などでは、屈折率が異なる気相と液相が混在することから、目視観察はもちろんのこと、複数カメラの撮影などの光学観測でも可視化が困難である。つまり気泡の向こうにある気泡は見えない。

沸騰二相流は熱伝達が良好であることから、原子力プラントや火力ボイラなどで幅広く工業利用されている。例えば、沸騰水型軽水炉(BWR)の燃料集合体は直径約10 mm、長さ約4 mの燃料棒60本程度が正方格子状に配置され、水は間隙を流れる構造である²⁾。通常、燃料集合体下部から流入した(サブクール)水は発熱した燃料棒によって加熱される。上方に流れながら温度が上昇し、やがて燃料棒表面で沸騰が始まる。気泡は成長に従い燃料棒表面から離脱し、さらに気泡は合体や分裂を生じる。この流れの様子(流動様式)を気泡流、スラグ流、チャン流、環状噴霧流などと分類して表現する。

原子炉の内部で生じる沸騰二相流を大まかに把握する

Visualization of three-dimensional boiling two-phase flow in a fuel rod bundle : Takahiro Arai, Masahiro Furuya.

(2020年6月22日 受理)

ことが目的の場合、鉛直方向に対する一次元熱流動解析で予測できれば工学的に十分な場合が多い。しかしながら前述の流動様式は炉心設計や安全評価を行う場合、沸騰二相流を燃料集合体の幾何構造に対して正確に予測することが望ましい。前述の流動様式に応じて熱伝達や圧力損失が異なることから、各場所での流動様式に応じた熱伝達や圧力損失相関式を適用することになる。

安全性の観点では、東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、過酷事故対策等が新規規制基準に取り込まれ、継続的な安全性向上の取り組みとして、研究開発、知見拡充が進められている。事故時の炉心内流動状態は、流量の低下や圧力の変動などによって起動時や定格運転時の流動とは大きく異なる状態をとる。事故の過程によっては極めて複雑な過渡変化を示す多次元二相流挙動となることから、幅広い流動条件に対する燃料集合体内の沸騰二相流挙動を可視化し、過渡三次元二相流をもとに熱流動解析技術の妥当性を確認することは、安全評価の信頼性を高めるためにも重要である。

経済性の観点では、BWRプラントの場合は水ロッドや部分長燃料などの工夫により核的・熱的余裕の増大や圧力損失の低減に効果を発揮する。複雑な流動を高精細に可視化することで、これらの構造を最適化し、核的・熱的余裕を更に増大し、一層の圧力低減を達成できる可能性がある。さらに燃料集合体の幾何形状を考慮した減速材密度分布、すなわち流体中の気相存在割合であるボイド率の三次元分布評価の不確かさを低減できれば、取出燃料体数を削減することで経済性を高め、高レベル廃棄物量を低減させることができる。

本稿では、さらなる知見拡充が期待される燃料集合体内の沸騰二相流に関して、一般財団法人電力中央研究所（以下、当所）において開発した二相流計測技術および開発した計測技術を活用した研究事例を紹介する。

II. 燃料集合体内二相流計測技術の開発

1. 高エネルギー加速器駆動 X 線 CT/リアルタイムラジオグラフィ (RTR) システム

X 線を用いた燃料集合体内の可視化は、複雑な構造物内の流動状態を非侵襲で定量化する手段の一つとして有用である。X 線は被写体の内部寸法や、ひびや割れといった欠陥の検出などで利用される非破壊の可視化方法である。既存の熱流動研究において、(財)原子力発電技術機構 (NUPEC = Nuclear Power Engineering Corporation, 当時) が BWR プラントの実規模模擬燃料集合体を用いて、X 線 CT (Computed Tomography, コンピュータ断層撮影) 装置によるボイド率分布測定を実施した。その試験結果は BFBT (BWR Full-size fine-mesh Bundle Tests) ベンチマーク³⁾として公開され、サブチャンネル解析コード等の妥当性確認として国内外で広く活用されている。しかしながら、撮影に用いられた医療用 X 線 CT の照射線量が低いことから、ヒータや試験容器の仕様に制限が課され、可視化部位が限定されていた。

そこで当所では燃料集合体内の沸騰流動状態を三次元的に把握するため、医療用の約 50 倍のエネルギーを発生させる高エネルギー直線加速器を用いた X 線 CT/リアルタイムラジオグラフィ (以下 RTR) 装置を開発した。X 線 CT/RTR の概略図を図 1 に示す。ターンテーブル上に X 線源として線形加速器や X 線検出器、高圧電源や温調を設置している。ターンテーブルは自在に回転しながら、高さ 4 m 範囲を撮影できる。燃料集合体の有効発熱部全長を撮影対象とし、燃料入口から出口までの流動を可視化できる。検出器は高エネルギー直線加速器で発生した X 線を効率的に検出できる様に工夫されている (特許出願中)。

X 線 CT/RTR は、断層撮影をするための CT 機能、透過像撮影をするためのデジタルラジオグラフィ (以下 DR) 機能、そして透過像の高速撮影のための RTR 機能の 3 つの撮影モードを用途に応じて使い分ける。CT 撮影および DR 撮影に際してはラインセンサを、RTR 撮影に際してはエアセンサを使い分ける構成である。

CT 撮影では、被写体を介して対向する X 線源とラインセンサを回転させて X 線を全方位から照射し、被写体を透過した X 線をラインセンサで検出して角度透過像 (サイノグラム) を得る。このサイノグラムを再構成処理する際に、構造体と流体を弁別し、高空間解像度の CT 画像を得るアルゴリズムを開発している。そのため、流路断面でのボイド率分布を高い空間解像度で取得する場合に有効である。

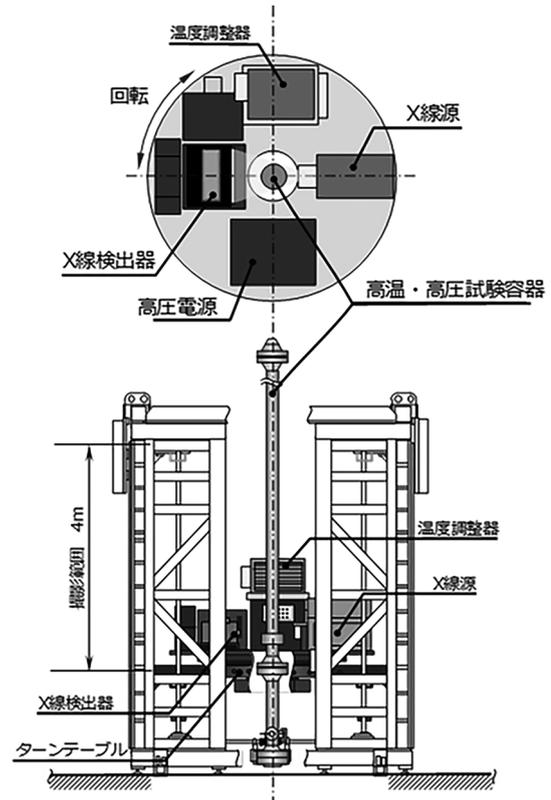


図 1 X 線 CT/RTR の概略図

DR 撮影では、X 線源とラインセンサを同時に垂直に移動させながら X 線を照射し、被写体を透過した X 線をラインセンサで検出して移動全長分に対して広いダイナミックレンジの透過像を得る。そのため、燃料集合体内での沸騰開始位置のような鉛直方向での冷却材密度変化の把握等に活用することができる。

RTR 撮影では、X 線検出器としてエアセンサを用いる。被写体を透過した X 線をエアセンサで検出し、毎秒 400 枚という高速度で透過像を取得できる。そのため、流動状態を時系列二次元情報として得ることができ、流動様式や水位変動などを把握するために活用できる。

CT 撮影に基づくボイド率の算出方法について示す。異なる密度の物質を CT 撮影したときの CT 値と物質密度は良い線形関係にあることから、局所ボイド率は以下の式を用いて計算する。

$$\alpha_{CT} = \frac{\rho_L - \rho_F}{\rho_L - \rho_G} = \frac{CT_L - CT_F}{CT_L - CT_G} \quad (1)$$

ここで、 α_{CT} は CT 画像に基づく局所ボイド率、 ρ は密度、 CT は密度に対応した CT 輝度値、添え字の L は液相の値、 G は気相の値、 F は二相の値を示す。ボイド率を評価するためには、燃料集合体内が液单相状態、気相单相状態、そして二相流状態の CT 画像をそれぞれ取得する必要がある。また、沸騰二相流という動的な被写体を CT 撮影するため、サイノグラムを複数回取得し、平均化処理によって、長時間に亘る時間平均値に近い値が短時間で得られるように工夫している。

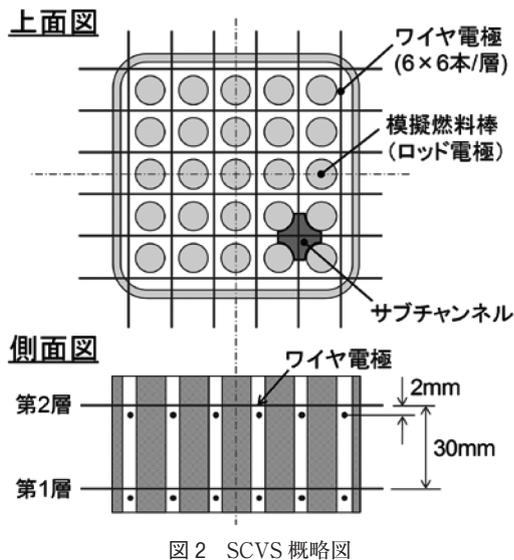


図2 SCVS 概略図

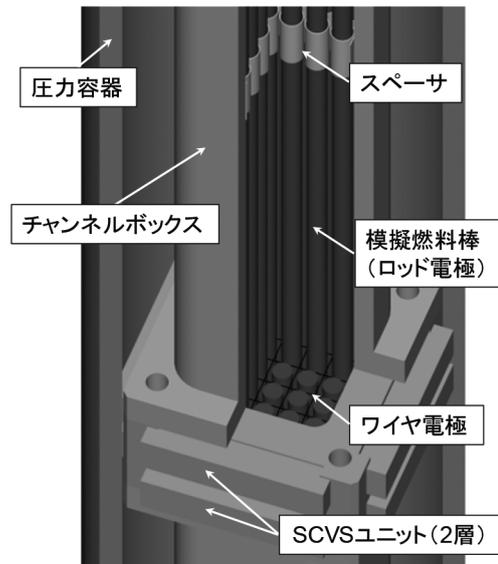


図3 SCVS 付近のバンドル部分断面図

2. サブチャンネルボイドセンサシステム

X線CT撮影では、燃料集合体内の流路断面ボイド率分布の流れを乱すことなく(非侵襲で)高空間解像度で取得できる利点があることを前節で述べた。しかしながら、X線CTで得られる情報はあくまでも時間平均値であり、時々刻々と変化する沸騰流の過渡変化を測定することには不向きである。また、ボイド率は気液二相流の物理パラメータとして重要であるが、気相と液相の相互作用に関わる速度や界面積濃度などのパラメータも実験から得ることは、気液二相流解析の相間式の開発や流動様式の判別にとって重要である。

そこで、X線を用いた可視化とは全く異なる気液二相流計測手法として、バンドル流路内に多数設置した電極間の局所導電率の時系列測定から、瞬時局所ボイド率や界面移動速度を高速多点で計測できるセンサを開発した。図2はセンサ構造の概略図であり、燃料集合体を部分模擬した5×5バンドル体系として示している。サブチャンネル(隣接燃料棒に囲まれた最小流路)単位でサブチャンネル中央部やロッドギャップの局所ボイド率を測定する特徴を表現するためにサブチャンネルボイドセンサ(SCVS)と呼称する。模擬燃料棒間にワイヤ電極(6本×6本)を鉛直方向に2mm程度のギャップを設けて正方格子状に配するとともに、模擬燃料棒も独立したロッド電極(5本×5本)として使用する構造である。局所ボイド率の計測箇所は、サブチャンネル中央にあたるワイヤ電極同士の近接点32箇所(6×6-4, コーナーを除く)、模擬燃料表面近傍に相当するロッド電極とワイヤ電極の近接点100箇所(5×5×4)の合計132点である。正方格子状のワイヤ電極層は鉛直方向に近接して2層配置し、層間の通過時間から界面移動速度や気液構造なども計測できるセンサユニットとした。電極間の局所導電率を高速多点で測定する原理は、気液二相流計測手法として近年幅広く利用されているワイヤメッシュセンサ

(WMS)の信号処理手法⁴⁾に基づいている。

局所ボイド率 $\alpha_{(t)}$ は、SCVSで得られる二相流、液相単相ならびに気相単相時の計測電位に基づき、以下の式を用いて計算する。

$$\alpha_{(t)} = \frac{U_{water} - U_{(t)}}{U_{water} - U_{air}} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_{(t)}$ は局所ボイド率、 U_{water} は液相状態での計測電位、 U_{air} は気相状態での計測電位、そして $U_{(t)}$ は二相流での計測電位をそれぞれ示す。

SCVSシステムおよびセンサの基本構造は、大気圧条件下での空気-水体系の二相流実験によって確認し⁵⁾、BWR原子炉の定格運転条件を想定した高温高压条件へ拡張すべく耐熱性や耐食性を向上させ、熱膨張対策を講じた⁶⁾。図3はSCVS付近におけるバンドル試験体の部分断面図である。センサユニットは分割したチャンネルボックス間に配置し、ロッドギャップに配したワイヤ電極は熱膨張や振動を吸収する機構を有している。また、模擬燃料棒をロッド電極として使用するために、スペーサは金属材と絶縁材の複合構造を採用して実構造の模擬と絶縁機能が両立するように工夫している。

Ⅲ. 燃料集合体内の沸騰二相流計測

1. 軽水炉三次元熱流動実験設備(SIRIUS-3D)

開発した気液二相流計測技術の重要な特徴は、大気圧条件下での気液二相流だけでなく、実機運転条件を想定した高温高压環境下へも適用できる点である。高温高压条件下での燃料集合体内の熱流動現象を実験的に模擬するために、当所では軽水炉三次元熱流動実験設備(SIRIUS-3D)を構築し、開発した計測技術を活用した伝熱実験に取り組んでいる。

図4にSIRIUS-3Dの概略図を示す。図中の左は熱水力試験ループであり、全高約17mの試験ループが7階

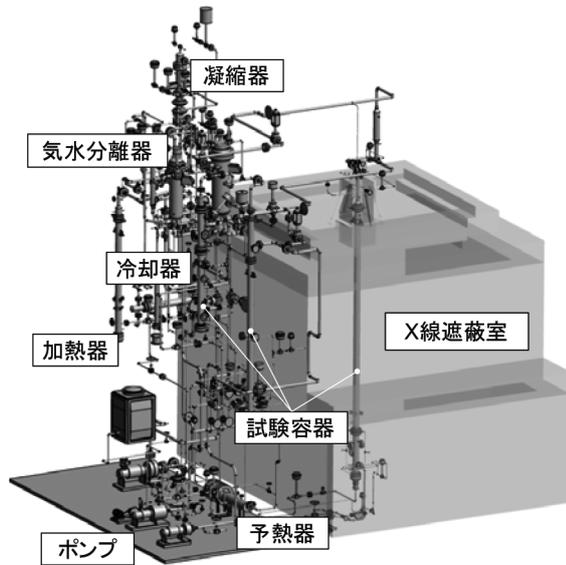


図4 SIRIUS-3D 概略図

建での試験架台に設置されている。試験ループには3系統の試験容器(模擬燃料集合体を装荷する試験部)が並列に接続されており、実験目的や実験に応じて試験流路を切り替え、柔軟な設備運用が可能である。試験ループは循環系統、冷却系統、補機系統により構成される。循環系統は、循環系ポンプ、流量調整機器、予熱器、気水分離器、加熱器、加圧器、試験容器およびバイパス流路から構成され、試験部に所定の条件(温度、流量)の循環水を供給する。冷却系統は、冷却系ポンプ、流量調整機器、冷却器、および凝縮器から構成され、試験部で発生した蒸気を気水分離器内の冷水スプレーで除熱する。補機系統は、試験ループ内への給水のための補給水系、ポンプ等に必要の冷却水を供給する補機冷却系、および調節弁動作等に必要の圧縮空気を供給する圧縮空気系からなる。試験ループの設計圧力は9MPa、設計流量は $20\text{ m}^3/\text{h}$ であり、BWR原子炉定格での運転圧力・温度を模擬した伝熱実験が可能である。また、圧力、流量、熱出力の制御機能を有していることから、定常実験だけでなく原子炉の異常な過渡変化や事故事象を模擬した急速な過渡実験を再現できる。試験ループに隣接してX線遮蔽室があり、前述したX線CT/RTRが設置されている。X線遮蔽室内に設置した試験容器は、汎用的に用いられるステンレス製压力容器ではなく、チタン合金製压力容器として第一種压力容器構造規格を取得した。チタン合金はステンレスと比較して密度が約3分の2、引張強さと耐力に優れており、X線減衰を低減した試験容器の設計製作を実現している。

2. 部分露出バンドルの冷却に及ぼす水位挙動の把握

設計基準を超える事故により原子炉水位が低下する場合には、炉心の一部が蒸気中に露出する可能性がある。

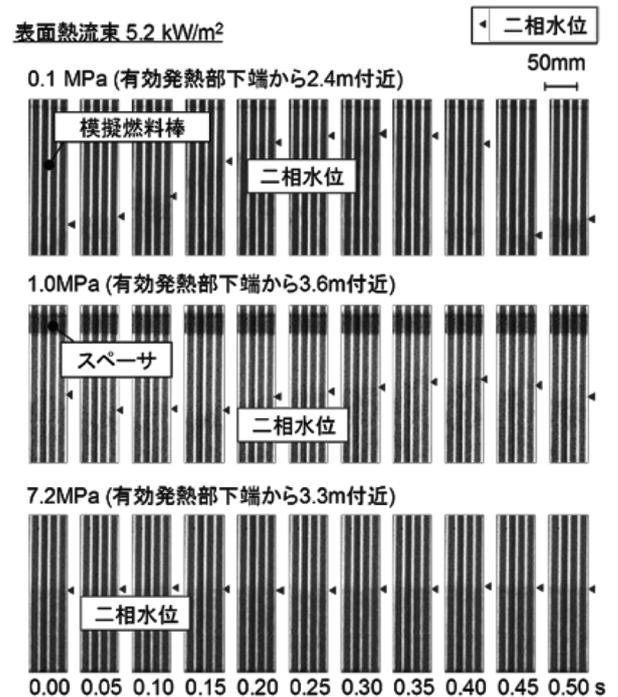


図5 X線RTRによるバンドル側面から見た二相水位変動の観察例

このとき、沸騰に伴って炉心内で発生する蒸気流量に応じて炉心内では見かけ上高い位置まで液面が到達し、このときの水位(二相水位)が炉心冷却にとって重要な指標となる。しかしながら、二相水位は実機で直接測定することが難しいため、コラプスト水位など中央制御室での監視パラメータで算定できることが望ましい。

本研究では、事故時を想定した流動条件に対してX線RTRを用いた 5×5 バンドル内の二相水位の直接観察⁷⁾やSCVSを用いた部分露出過程におけるボイド率測定⁸⁾を実施した。代表的な事例として、 5×5 バンドルが崩壊熱相当で発熱したときのX線RTRによる二相水位観察例を図5、SCVSによるボイド率測定例を図6に示す。蒸気塊の周期的な流出に伴って二相水位は大きく変動するが、圧力の増大とともにボイド率が相対的に低下し、大気泡の形成が減少して二相水位の周期変動も小さくなる。このとき、崩壊熱相当で発熱する燃料棒は、二相水位の周期変動によって液供給される限りは十分に除熱されることが確認された。従来、二相水位は燃料棒表面温度や局所差圧から間接的に推定されていた。二相水位挙動を直接観察することは、炉心の除熱限界と沸騰流動状態の関係を現象に基づき適切に理解することにつながり、二相水位の予測向上、事故時操作手順の高度化へ向けた知見として活用できる。

3. X線CTによるバンドル内ボイド挙動計測

燃料集合体のような複雑な流路構造では、横流れを伴う大振幅流動変動が形成しやすく、特に事故時の低流速域ではボイド率の急激な増大や流動遷移によって極めて

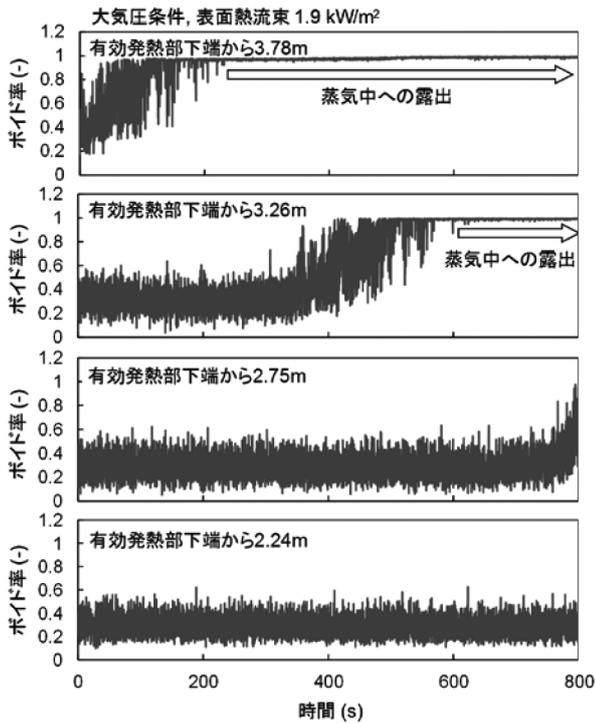


図6 SCVSを用いた部分露出時のボイド率測定例

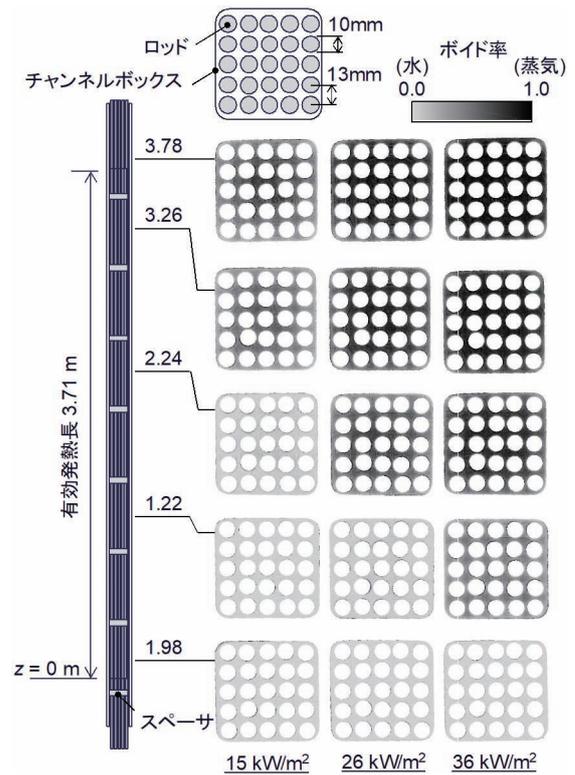


図7 X線CTによるボイド率分布測定例

複雑な流動状態となる。本実験では、事故時に想定される低流速域に対して幅広い圧力条件に対するバンドル内ボイド挙動をX線CTによって計測した⁹⁾。図7に事故時に崩壊熱程度で発熱している5×5バンドルを対象に、圧力7.2MPaでのボイド率分布の測定例を示す。流れが発達する様子をボイド率の三次元分布として詳細に捉えており、数値混相流体力学(CMFD)やサブチャンネル解析などの多次元解析コードの妥当性確認データベースとなる。

本節で紹介した測定事例は、同一の有効発熱長を有する5×5バンドルという単純な幾何形状であった。しかしながら、実際の原子炉の燃料集合体は、核的・熱的余裕の増大や圧力損失の低減のために水ロッドや部分長燃料を含む複雑な流路構造である。現在、核熱結合解析コードの高度化に向けて、実機相当の流路構造を有する燃料集合体内に対する実験データベース構築を目的とした熱流動実験を進めている。

Ⅲ. おわりに

燃料集合体内の沸騰二相流計測は、従来からさまざまな方法によって試みられている。近年、熱流動解析技術の目覚ましい発達に伴って、モデル化や妥当性確認のために必要とされる実験データへの要求もより多様化・詳細化している。原子炉の運転条件のような高温高圧環境を対象とする場合、適用できる計測手法が制限されるものの、熱流動解析が必要とする要件を満たす計測手法の開発、そして実験データベースの拡充が必要不可欠である。本稿では当所の研究事例を紹介したが、国内外の研

究機関で精力的な熱流動研究が進められている。今後も熱流動研究の関係者と多面的に連携し、炉心設計や原子炉の安全評価の高度化に向けた研究を推進していきたい。

— 参考資料 —

- 1) 日本原子力学会, 混相流計測法, 森北出版, 2003.
- 2) (財)原子力安全研究協会, 軽水炉発電所のあらし(改訂第3版), 2009.
- 3) B. Neykov et al., NEA/NSC/DOC(2005)5, 2006.
- 4) H.M. Prasser et al., Flow Meas. Instrum., 9, 1998.
- 5) T. Arai et al., J. Multiphase Flow, 47, 2012.
- 6) T. Arai et al. Proc. ATH'16, 193-200, 2016.
- 7) T. Arai et al., Proc. NURETH-18, 5701-5708, 2019.
- 8) T. Arai et al., Proc. NURETH-16, 7312-7322, 2015.
- 9) T. Arai et al., Flow Meas. Instrum., 69, 2019.

著者紹介



新井崇洋 (あらい・たかひろ)
電力中央研究所 原子力技術研究所
(専門分野/関心分野)熱流体工学/原子炉熱流動, 気液二相流, 蒸気爆発



古谷正裕 (ふるや・まさひろ)
電力中央研究所 原子力技術研究所
早稲田大学 共同原子力専攻
(専門分野/関心分野)熱流体工学, 電気化学/原子炉熱流動, 過酷事故

世界情勢の構造的変化とエネルギー

(その1)新型コロナウイルスとエネルギー情勢

東京大学 小宮山 涼一

新型コロナウイルス感染症の影響を受けて、世界の経済成長率ならびにエネルギー需要は大きな影響を受けた。また、デジタル化など、ポストコロナの新たな社会生活様式の広がりによるエネルギー需給の新たな構造的変化への関心が高まっている。欧州等ではポストコロナの経済復興と環境対策の両立を図る政策への機運が高まる一方、同時にレジリエンスといった社会の安全、安心、復興、適応への関心が一層高まる可能性があり、社会、経済、地政学の新たなニューノーマルを注視しつつ、日本のエネルギー戦略の再構築が重要であると考えられる。

KEYWORDS: COVID-19, lockdown, digitalization, behavioral change, green recovery, resilience, energy security

I. はじめに

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の影響を受けて、2020年の世界のGDPはマイナス5%に近い成長減速が見込まれるなど、世界の社会経済活動や貿易活動が大きく収縮した。都市封鎖や国境封鎖により財や人の移動制限が実施され、個人消費の低迷および工場や事業所閉鎖など供給能力の低下に波及し、経済の需要・供給両面で大きな打撃を受けた。そして経済活動の低迷に連動して、エネルギー消費も記録的な低下をみせ、2020年の世界のエネルギー消費は約6%低下すると見込まれている(リーマンショック時の7倍)。世界の原油市場では、需要減少等で供給過剰となり、原油価格が一時的に大幅下落した。

このような経済的打撃のなか、国際社会の緊急課題は、経済の復興であり、そのなかで欧州等を中心に、従来の公共事業等による経済刺激策ではなく、持続可能な社会の実現につながる復興策を重視しており、コロナ後の経済復興と環境対策の両立を図る政策(「グリーン・リカバリー」)への機運が高まっている。

また今後、経済回復が見込まれるが、こうした経済復興策や社会の価値観の変容を受け、エネルギー需給の構造はコロナ前の状態には戻らず、新たな社会生活様式の浸透などによる構造的変化が、エネルギーシステムに与

える長期的で不可逆的な影響への関心が高まっている。社会のデジタル化、人々や社会の行動様式の変化が想定され、生活やビジネスのオンライン化(テレワーク、オンライン授業、オンライン診療など)、集中型から分散型への変化(住居と職場など活動拠点の分散化、製造拠点の分散化などサプライチェーン再構築など)が予見されている。近年では、IoTなどデジタル化進展により、エネルギーや輸送などでの生産性が飛躍的に向上し、財やサービスの低価格化、企業収益の低下、ひいては資本主義社会の後退を予測する急進的な見方もある¹⁾。

また国際情勢においても、新型コロナの影響を受けて、多くの国が国内優先、国内回帰を優先してグローバル化と逆行する動きが新潮流となり、世界情勢の不確実性が増す可能性も想定されうる。例えば、比較優位の原理と国際分業による経済性追及よりも、国内のサプライチェーン強化による自給率重視など、国家の安全、安心を優先する姿勢である。米中間での経済、貿易、技術を巡る対立のなか、世界的に保護主義が高まれば、地政学的な緊張関係が高まる可能性も考えられる。

このように新型コロナウイルス感染症の影響は、社会生活の変容や国際情勢にも直接的、間接的に波及するとの見方があり、エネルギー政策もポストコロナの社会情勢を見据えた再構築が重要となる。特にエネルギー資源に乏しい日本にとっては重要な課題となる。本稿では、国際エネルギー機関(IEA)が発表した報告書^{2,3)}を踏まえ、新型コロナが世界のエネルギー情勢に与えた影響、ならびに、環境対策と両立した経済復興策がエネルギー情勢、

Structural change of global affairs and energy (1) ; COVID-19 and energy market : Ryoichi Komiyama.

(2020年7月20日 受理)

経済情勢に与える潜在的影響についてレビューを行う。

II. 新型コロナのエネルギー情勢への影響

1. 経済、エネルギー需要への影響

2020年7月19日現在、世界保健機関(WHO)によると、世界の新型コロナ感染者数は1,400万人、病気による死者数は59.7万人に達し⁴⁾、世界各国に影響を及ぼしている。感染拡大防止のため、これまで、部分的・完全な都市封鎖(ロックダウン)、外出禁止、教育機関や事業所、工場閉鎖など、各国政府は社会経済活動を大幅に制限してきた。2020年4月下旬時点では、世界人口の約半分に相当する約40億人が(世界経済の6割を担う人口規模)、都市封鎖による規制下におかれ、封鎖対策の影響を受けた(図1)。世界のGDPの2割、エネルギー消費の2割を占める中国は2020年1月下旬に強制的な都市封鎖を実施し、それ以降、欧州やインド、そして米国でも外出規制を行う州の数が増加し、2020年4月には、世界の一次エネルギー消費の5割に相当する人口が都市封鎖による規制を受けた。

これにより、経済の需給両面での広範な範囲が影響を受け、世界経済の成長率は大幅な落ち込みを記録すると見込まれている。国際機関などの予測によれば、2020年の世界の実質GDPはマイナス成長が見込まれており、最悪の場合、世界恐慌以来の下落幅が予想されている(図2)。

都市封鎖により、輸送、貿易面などで経済活動が低下した結果、エネルギー部門も新型コロナによる深刻な影響を受けた。IEAによるデータ分析の結果、都市封鎖

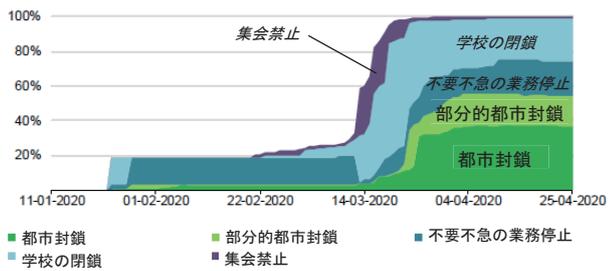


図1 世界人口に占める封鎖措置を受けた人口比率 (出所)文献²⁾, pp.6より作成

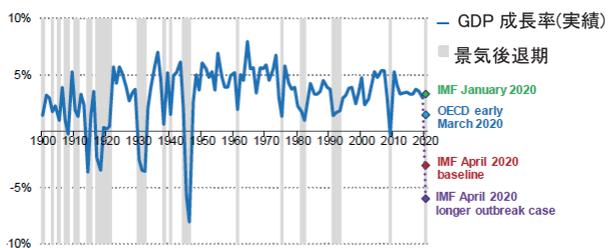


図2 実質GDP伸び率の推移 (出所)文献²⁾, pp.9より作成

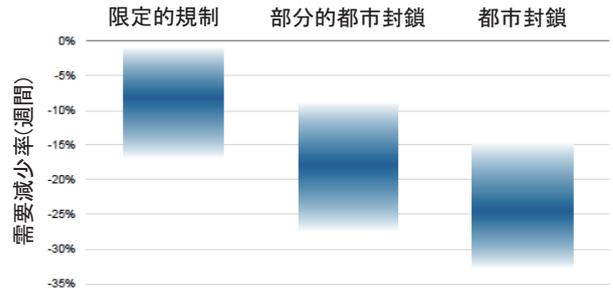


図3 都市封鎖によるエネルギー需要への影響 (出所)文献²⁾, pp.13より作成

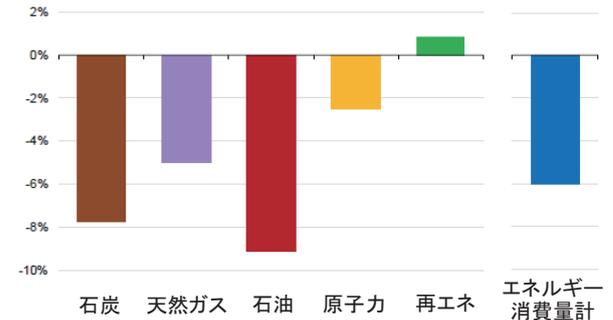


図4 2020年の世界の一次エネルギー消費の変化率の見通し(2019年比) (出所)文献²⁾, pp.15より作成

(完全なロックダウン)を実施した国・地域は、1週間当たりのエネルギー消費が平均25%減少し、部分的な都市封鎖を実施した国・地域は平均18%減少したと報告されており(図3)、都市封鎖はエネルギー消費にこれまでにない大きな影響を与えた。

2. エネルギー供給への影響

このような事例を踏まえ、IEAは2020年の世界のエネルギー消費は6%低下し、この下落幅は、過去70年間で最大の減少幅になり、また、2008年のリーマンショック時の7倍の減少量に相当すると推計している。各エネルギー源別には(図4)、都市封鎖を通じて輸送需要が大きく制限されたことから、石油消費の減少が最大になると見込まれている。世界の石油消費は9%、日量900万バレルが減少し(日本の消費量の2倍に相当)、2012年の消費水準まで低下するとしている。都市封鎖により国際的に道路輸送、航空輸送需要が低下し(図5)、特に世界最大の石油消費国である米国では、2020年4月~5月のガソリン消費量は年初比で40%もの記録的減少となり、ジェット燃料は60%近くも急減した(図6)。軽油需要はネット注文等による物流輸送に下支えされ、低下幅は相対的に小さい。

今後の石油消費の見方に関しては、テレワーク、Web会議の普及により、長期的に移動需要、ひいては主たる輸送用燃料である石油消費が構造的に抑制される可能性が指摘されている。電動自動車などのエコカー普及によ

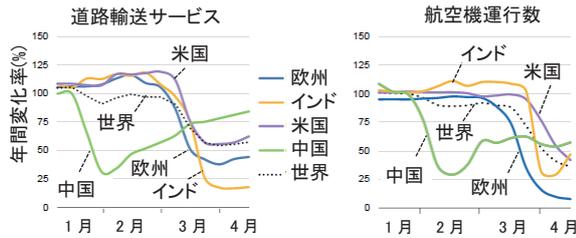


図5 2020年の道路輸送、航空需要の変化率(2019年比)
(出所)文献²⁾, pp.18より作成

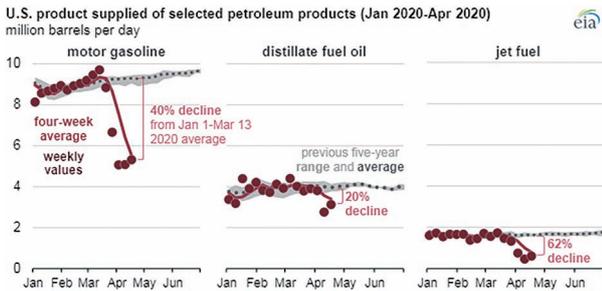


図6 米国の2020年1月～4月の石油製品消費量
(出所)米エネルギー省
(<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=43455>)⁵⁾

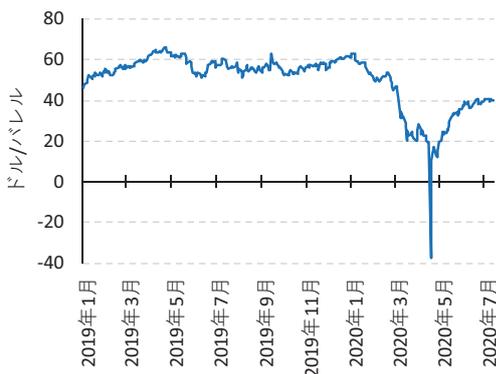


図7 原油先物価格の推移(NYMEX)
(出所)米エネルギー省 HP より作成
(https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_fut_sl_d.htm)

り、石油消費が抑制されるとの見方がエネルギー予測の世界では主流にあったが、現在はコロナの影響を踏まえ、WEB会議やテレワーク浸透などに伴う移動需要自体の減少が石油消費を根底から抑制して、シェアカーやライドシェアの普及とも相まって、国際的に石油消費が構造的に抑制される見方への関心が高まりつつある。

また新型コロナウイルスの影響により原油価格も急落し、象徴的なイベントとして、石油消費低下の他、OPEC+の協調減産決裂、先物原油の受渡地(オクラホマ州クッシング)での石油貯蔵能力の枯渇を受け、NYMEX原油先物価格は4月20日に初めてマイナス価格を記録し(図7)、原油価格が大きく低迷した。そして先述の通り、石油消費の構造的抑制により、原油価格の慢性的な価格低下が起きれば、エネルギー産業やエネルギー生産国に経済的打撃を与え、経営環境や国家財政の悪化により、必要な

エネルギー投資が確保されず、投資不足により将来の需給ひっ迫、市場不安定化の要因になりえる。よって、石油価格低迷が将来のリスクを高める点を認識することが必要である。

また、都市封鎖は電力需要を減少させ、電源ミックスにも影響を与えた。IEAによると住宅での電力需要は増加の一方、産業・業務でのそれを上回る電力需要減少により、電力需要は平均20%減少したとしている²⁾。電力需要減少、ならびに、再エネのほぼゼロの限界発電コスト、優先給電ルールを背景に、再エネ電力比率が増加の一方、石炭、ガス、原子力など再エネ以外の電源発電量は、電力需要減少の影響を受けて減少した。

ただし長期的には、デジタル化という社会の構造的変化が進めば、電力需要が将来的に増加し、デジタル化を支える電力の重要性が高まるとの見方もある。日本および世界全体で、2050年には現在の総電力の最大200倍近い電力をIT関連機器だけで消費するとの極端な見方もある⁶⁾。デジタル化により、電力は社会インフラの生命線となるため、電力安定供給が一層重要になると想定される。

3. CO₂ 排出量

化石燃料の消費量の低下を受けて、世界のCO₂排出量は8%、絶対量で26億トン急減し、10年前の水準になる見込みである。CO₂減少量としては過去最大であり、2009年のリーマンショック時の6倍の減少幅であり、第二次世界大戦以降の減少量合計の2倍に達する。このなかでIEAは、過去の経済危機後の例として、CO₂の一時的に急減後、経済活動再開により、CO₂がその減少を上回るテンポで増加するリスクがあるとして、経済復興と環境保全をバランスよく両立したエネルギーインフラ投資策(Sustainable Recovery Plan)が重要になると指摘している。

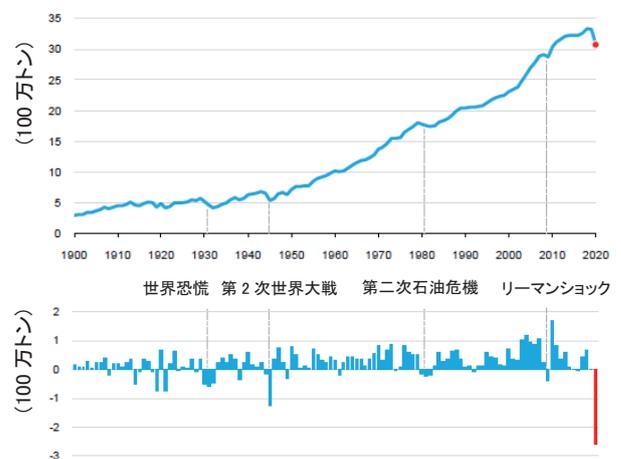


図8 世界のCO₂排出量とその年間変化量の推移
(出所)文献²⁾, pp.17より作成

Ⅲ. ポスト・コロナのエネルギー環境戦略

1. 欧州グリーンディール

欧州委員会は、2019年12月に欧州グリーンディール⁷⁾と呼ばれる気候変動対策を発表し、持続可能なインフラ投資の促進を通じて、2050年までに温室効果ガス排出実質ゼロを目指して(クライメート・ニュートラル)、エネルギー脱炭素化、建築物改修による省エネ、クリーンな交通機関の展開(クリーン・モビリティ)を目標に掲げた。そして今回のコロナ禍で欧州は、欧州グリーンディールの考え方を活用し、再エネや水素などクリーンエネルギーの導入拡大を通じて、ポストコロナの経済復興と環境対策の両立をはかる政策推進(「グリーン・リカバリー」)を目標に掲げている。

2. 技術の雇用創出効果

IEAは、新型コロナによる世界経済の収縮、雇用喪失の可能性を踏まえ、経済成長、雇用、脱炭素化の観点から低炭素技術の評価を行っている。各技術への投資による雇用創出効果(図9)、CO₂削減コストと雇用創出効果(図10)を評価している³⁾。その結果、建築物改修による省エネ化、省エネ建築物の推進、太陽光発電、都市交通インフラ整備の雇用創出効果が相対的に高い(図9)。また電力部門の技術に着目すると、原子力の運転期間延長はCO₂削減コストで優位にあると同時に、雇用創出効

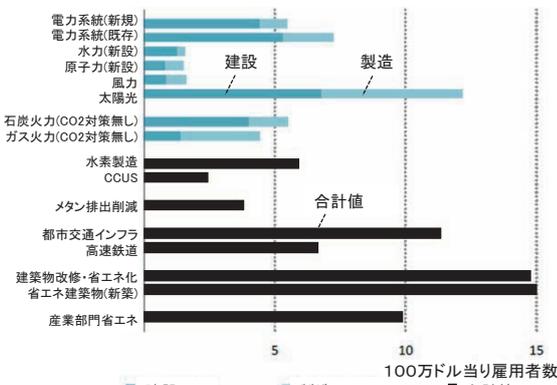


図9 各技術の雇用創出効果(100万ドル投資当り)

(出所)文献³⁾, Fig2.1より作成



図10 低炭素技術の雇用創出効果とCO₂限界削減費用

(出所)文献³⁾, Fig2.3より作成

果も風力を上回る効果が推定されている(図10)。原子力の新設は、運転期間延長に比べCO₂削減コストが高く、雇用創出効果も相対的に小さくなっている。

3. Sustainable Recovery Plan

これらの推計を踏まえ、IEAはSustainable Recovery Plan(持続可能な経済復興プラン)が世界の経済、CO₂排出量に与える影響を評価している。この計画では、世界全体で2021~2023年の3年間に年間1兆ドルのクリーンエネルギーへの投資(現在の世界GDPの0.7%)を想定しており、再エネ・原子力の促進、クリーンエネルギー自動車の拡大、建築物の省エネ化、産業プロセスの高効率化、クリーン燃料製造(バイオ燃料等)、省エネ機器、先進技術への投資が含まれている。投資全体の内訳は風力、太陽光、送電網など電力関連で3割、ビルの省エネ、高効率自動車等の導入拡大など省エネ関連が全体の4割を占める。経済と環境を両立する政策は短期的便益のみならず、長期的便益が高いとしている。Sustainable Recovery Planによる各技術の雇用創出効果を見ると、建築物の省エネ、再エネ、送電網整備、電気自動車、産業部門の省エネで効果が高い(図11)。

また経済成長への影響では、Sustainable Recovery Planにより年間1兆ドルのクリーンエネルギー投資がエネルギー部門で今後3年間実施されれば、2023年の世界の実質GDPはそれが実施されない場合に比べ3.5%増加する(年平均経済成長率に換算すると1.1%ポイントの上昇)(図12)。さらに、エネルギー部門で年間900万人の雇用創出が可能になると推計しており、経済全体へのインパクトも大きいとしている。

そしてSustainable Recovery Planの環境面での影響を見ると、2023年までに世界のエネルギー起源CO₂排出量を45億トン削減し(図13)、パリ協定の削減目標を実現可能としている。このようにクリーンエネルギー投資により、世界のGDP成長率の1.1%ポイント増加、年間900万人の雇用創出、世界の温室効果ガス削減に貢献

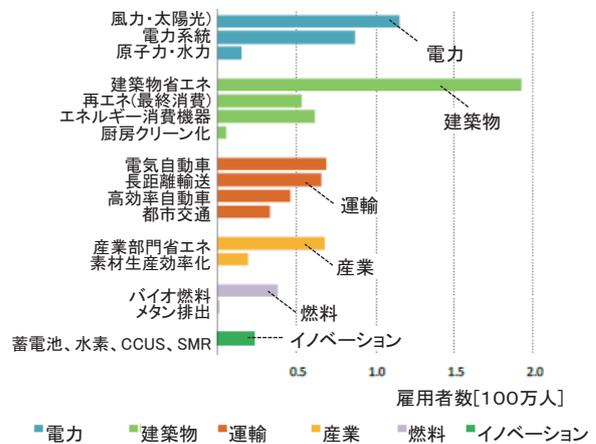


図11 持続可能な復興計画による年平均雇用創出効果

(出所)文献³⁾, Fig3.7より作成

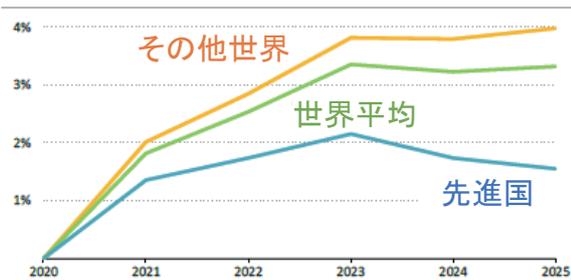


図 12 Sustainable Recovery Plan による GDP 増加率
(出所)文献³⁾, Fig3. 8 より作成



図 13 世界の CO₂ 排出量の推移
(出所)IEA Sustainable Recovery
< <https://iea.blob.core.windows.net/assets/bdc1328a-b3ca-40b1-9dad-bddb5d57124/SustainableRecoveryReport.pdf> >

し、経済と環境の両立が可能としている。

IV. おわりに

新型コロナウイルス感染症による経済影響の緩和手段として、クリーンエネルギー技術への投資による経済復興への機運が欧州等で高まっている。脱炭素化のみならず、エネルギーセキュリティ(自給率向上)、イノベーションへの貢献も期待される。

IEA の Sustainable Recovery Plan の通り、クリーンエネルギー技術への投資による経済、環境への有効性が定量的に確認されているが、実際にはそれらの投資環境を十分に精査の上、実行可能性を検証することが大事である。経済や需要の低迷ならびに市場競争など、厳しい市場環境を踏まえれば、必ずしも事業者がクリーンエネルギー投資に積極的に取組む環境にはならないものと考えられる。例えば、電力需要低迷、電力価格低下のなかで、大規模な再エネ投資とその事業性の確保は容易ではない。石油など化石資源の相場下落によっても、再エネなどクリーンエネルギー投資の経済的メリットが薄まり、投資インセンティブを鈍化させる。

また、地球環境問題への対応は国際協調が重要であり、Sustainable Recovery Plan も世界全体がクリーンエ

ネルギー投資に邁進する姿が前提となっている。しかし現実には、政治、経済、軍事面で台頭する中国と米国間での貿易、技術、経済的覇権をめぐる対立のなか、世界情勢の無極化傾向が深まりつつある。ポストコロナの世界情勢において、各国の保守的傾向が強まり、国際情勢のガバナンスを担う存在や枠組みの影響が低下すれば、各国間の緊張関係の高まりや、地政学的リスクが顕在化して、パリ協定など国際協調による脱炭素化の取組が容易に進まない可能性もあり、今後の展開を注視する必要がある。

そして、新型コロナの影響として何より、社会における安全、安心、復興、適応、生存、すなわち、レジリエンスの価値への関心が高まったと考えられる。コロナ以前は脱炭素化がエネルギーシステムの方向性を決定づける主要因として位置づけられていた。しかし新型コロナによる社会の価値観の変化により、レジリエンスという生存や社会機能の維持に関わる価値がポストコロナのエネルギーシステムのあり方に強い影響を及ぼす要因になる可能性も考えられる。社会、経済、地政学の新たなニューノーマルを注視しつつ、日本のエネルギー戦略の再構築が求められると考えられる。

— 参考資料 —

- 1) ジェレミー・リフキン著、柴田裕之訳、限界費用ゼロ社会、NHK 出版、2015 年。
- 2) OECD/IEA, Global Energy Review 2020, 2020.
- 3) OECD/IEA, Sustainable Recovery - World Energy Outlook Special Report, 2020.
- 4) WHO, WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard, < <https://covid19.who.int/> >
- 5) EIA/DOE, COVID-19 mitigation efforts result in the lowest U.S. petroleum consumption in decades, 2020 < <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=43455> >
- 6) 科学技術振興機構、低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書、技術普及編 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1) 2019 年。 < <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-15.pdf> >
- 7) European Commission, A European Green Deal < https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

著者紹介



小宮山涼一 (こみやま・りょういち)
東京大学
(専門分野/関心分野) エネルギー需給分析、電力システム、エネルギーセキュリティ

原子力と哲学

フリージャーナリスト 井内 千穂

東京の高校生 Y 君は友人たちと 3 人で、原発の是非を考えるドキュメンタリー映画「日本一大きいやかんの話」を制作した。自費で、あるいは、学校などが提供する研修旅行に参加して国内外を飛び回り、学者、電力会社、再エネ事業者などに取材したその映画は「高校生のための eiga worldcup2019」最優秀作品賞を受賞し、各地で上映イベントが開催されている。昨夏京都で行われた中学生サミットでも上映され、中学生たちは Y 君に憧れの眼差しを向けていた。Y 君自身、原発に興味を持ったのは中学時代に聴いた一つの講義がきっかけだというから、刺激を受けた若者の学びは大人の想像をはるかに超えている。映画の続編制作のため今年 2 月にはカナダ取材を敢行した。コロナ禍で国境が閉ざされる直前だ。

高校 3 年生になりアメリカの大学への進学を希望する Y 君に何を勉強したいのか聞いてみると、意外なことに「哲学」と答えた。数学が得意な彼のことだからてっきり物理か原子力工学かと思ったらそうではなく、「原発の賛成派と反対派の橋渡しをするには社会科学がいいかと初めは思ったが、そもそもの物の考え方を学びたいから哲学」ということだった。

感心しながら思い出したのは「原子力時代における哲学」という最近の本。哲学者で東京大学准教授の國分功一郎氏が 2013 年に行った連続講演録が元になっており、原子力の平和利用が謳われた 1950 年代に、ただ一人、原子力技術の原理的な危険性に「気づいていた」哲学者ハイデッガーの思想を紹介している。収録されたハイデッガーの「放下」は難解で、一度読んだぐらいでは理解が追いつかないが、それが賢者と学者と科学者の 3 人の「対話」形式で書かれていること自体が興味深かった。対話が考えを深めていく。

あとがきで國分氏は「脱原発を目指しつつも脱原発のドグマの提示を避け、(中略)各人が原発についての意見を形成し、それが集合し、彫琢され、脱原発の教説となること」を望む哲学者として逡巡しながら本書を世に出したと言っている。哲学を学ぼうとしている Y 君にぜひ紹介したい。逆に、原子力の平和利用の原理的・哲学的根拠を突き詰めた論考はあるのだろうか。ぜひ読んでみたい。

Column

想い描く未来へ

京都教育大学附属高校 1 年 上野 和花

「今から一年後、オリンピックとパラリンピックができる世界になっていたら、どんなに素敵だろうと思います。」これは競泳の池江璃花子選手から、一年後に延期された東京五輪へ向けたメッセージ動画の一文だ。

私はこのメッセージに心動かされ、半年前に見た動画のことを思い出した。〈核のゴミあなたはどうか考えますか〉である。この動画は次世代に向け、地層処分問題への関心喚起を目的に学生によって制作されたもので、NUMO のサイトで公開されている。そこでは、一人の人の誕生から、亡くなるまでの長い人生の折節に合わせて、日本国内で高レベル放射性廃棄物の地層処分地が決定し、建設着工され、地層処分事業終了というニュースが報じられる未来が描かれている。

この未来の日常を切り取ったような映像を見た時、私は強く思った。このストーリーのように、私に孫が生まれる頃には、地層処分地が決定し、建設着工している世の中になっていたら、どんなに素敵だろうと。一方で、この問題を学ぶにつれ、状況を進展させていくことの難しさを知る。私が生きている間に、どこまで実現していくのか、自分に何ができるのか分からなくなる。しかし、自らの病と闘い、世界的なコロナとの闘いの中で、前向きに未来を見据える池江選手の姿を見ると、私も想い描く未来へ希望の力を大切にしなければと思う。

東京都知事選での違和感

東京学芸大学附属国際中等教育学校高校3年 小澤 杏子

高校3年生の私は、人生で初めて投票所に足を運んだ。2020年7月5日に行われた、東京都知事選挙である。歴代最多となる22人の中から投票をする1人を選ぶために、私は1週間かけて立候補者らの公約や実績などを調べた。さらに、政治のシステムや国の経済状況などに関する知識も身につけた。そこで気付いたのは、今回の主要候補者らは街頭演説でほとんど原発に関する発言をしていない、ということである。

確かに、今日における一番の注目はコロナウイルス対策かもしれない。経済は低迷し、人々はさまざまな困難に直面している。この未曾有の事態を少しでも早く切り抜けることが、都知事に求められている能力なのは確かである。

しかし、コロナ禍を乗り越える政策だけを実行するのが都知事の仕事ではない。以前のコラムでも書いたように、コロナウイルス以外にも差し迫っている大きな社会問題は多く存在する。その中でも原発問題は後回しにすればするほど、私たちの世代にとっての重荷となる。

一番悲しいのは、今の私には現状を変えられるほどの影響力がないということである。私のような学生にはできることも限られている。だからこそ、私は責任を持って投票に赴き、自分の意見を反映してくれる人に投票していこうと強く思った。

原発問題は、「いつか解決しなければいけないこと」ではない。世間の原発への関心を再び引き戻すために、私自身もできる限りの発信をしていきたいと改めて思った。

Column

緊急時下の労働力とは？

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

スロバキアよりこんにちは。『ニューズウィーク』5月号に元スロバキア国民議会議員のミロスラフ・ペブラビ氏が書いた『スロバキアがコロナ封じ込めに成功した3つの要因』という記事が掲載されました。記事では、公的医療機関や国境封鎖後も隣国との間で人の往来があったスロバキアで、人口約550万人に対して感染者数は1,687人(6月30日時点)、死者は26人と低く抑えられたのは、メディアの報道力と人々の努力の結果とされていました。

確かに、買い占めによる転売や品不足が各国で問題とされていた中、スロバキアではそういったことは起こりませんでした。しかし、3月末の時点でブラチスラバ市内に4つある大学病院の中、3つの病院で医師・看護師を含む院内感染が認められており、感染の状況は日本や他国と比較して良かった訳ではありません。実際に、小児科の試験で接触した教授が、新型コロナウイルス陽性と分かり私も自宅待機をしなくてはなりませんでした。

また、報道や国勢調査の数字では見えてこない『声のない人たち』もスロバキアに存在します。3月15日に、緊急事態宣言が発令され、飲食店や工場は臨時休業となりました。しかし、ブラチスラバ城の修復作業や道路工事はスロバキアに約49万人いるとされている、移動型民族のロマ人の労働者によって引き続き行われていました。ブラチスラバ城の裏手にある私の自宅からは、毎日20人ほどのロマ人の方が咳をしながら作業をする様子が見えました。ロマの人々は、スロバキアで国籍を持たず、感染者数にもカウントされません。

非常時における労働力がどうあるべきか、日本においても必要な議論だと思います。

最適な選択を考える

福島県立安達高等学校 3年 服部 杏菜

高校も3年生となり、政治経済という授業が始まった。今は主に経済分野を進めている。それは授業1日目のことだった。「最適な選択をするためにコストを考える」というテーマで生徒が話し合う時間が設けられた。その例に挙げられたのが、エネルギー問題だったのだ。原子力発電に依存すべきか、あるいは再生可能エネルギーに依存すべきか、どちらが最適な選択かをあくまで「経済的な面から」捉えた。私のクラスでは3:1の比率で再生可能エネルギーが多数だった。他のクラスではだいたい半々に分かれたらしい。原子力発電側の生徒の意見として発電自体にかかるコストが低く、安定供給ができるという理由が多かった。対して再生可能エネルギー側の生徒からは、見えないコストやリスクがあり、もし事故などが起こってしまったら、その対応コストはバカにならないというような意見も上がった。生徒何人かの意見でクラスの空気が左右されるのが感じられ、やはり意見共有は大事だなと改めて思った。また今までは単純に気持ちとして、再エネの方が気持ちがいいからもっと促進すればいいのにと考えていたが、「経済的な面から」見たい時に気持ちなど唱えても仕方ないことが今回の授業でわかった。人の気持ちって大切なのに。ただ、世の中ではどうやら「経済的な面から」捉えた上で選択される物事が大多数だということも政経から学んだ。最適な選択とは何か、責任はどこにあるか、考えるこの頃だ。

Column

批評家ではなくプレイヤーになる

フリーライター 服部 美咲

「批評家ではなくプレイヤーになってほしい」。医学者の高橋政代さんが、SNSを通じて若者に発したメッセージである。氏は、新型コロナウイルス対策を巡って、無責任な批評が飛び交う状況を憂える。

2020年7月現在、日本では、多くの都道府県で新規感染者ゼロの日が続く。日本の新型コロナウイルス対策は、検査体制の不備や人材不足など、多くの現実的制約にも拘らず、一定の成果をあげたといえよう。しかし、対策の理論的支柱となった専門家会議には、他分野の専門家などから、日々さまざまな「批評」が寄せられる。

「プレイヤー」は、さまざまな現実的制約の中で最善の道を探る。それは新型コロナウイルス対策に限らない。自身の分野でプレイヤーとして働く人は、他分野のプレイヤーの試行錯誤に思いを致すことができるはずだ。だからこそ簡単に「批評家」にはなれない。

原発事故後の福島のプレイヤーとなった科学者もいる。地域の空間線量を解析する。地元の人々の協力を得て、個人線量を測り、アンケート調査を行う。データ数に不足があれば、得られたデータから実情に近い推計ができるよう工夫を重ねる。若手研究者を育て、データを蓄積し、科学的知見の確かさを増していく。現実的制約による不備不足を「批評」する者ばかりであったなら、福島で起きたことや地元住民の努力が次世代に活かされることもなかっただろう。原発事故から10年を迎えようとしている。福島にかかわる若者が、批評家ではなくプレイヤーとなることを願う。

サイエンスよみもの

量子力学の不可解な挙動が拓く未来技術 —アインシュタインの反抗から量子科学衛星まで—

東京工業大学 吉田 正

1935年に刊行された4ページに満たない論文でアインシュタインはある思考実験を提案し、生まれたばかりの量子力学の根幹を鋭く突いた。著者達の頭文字からEPRパラドックスとも呼ばれるが、これは量子力学の発展過程における深淵な刺激剤となった。その後半世紀を越える理論実験両面での努力をあざ笑うかのようにEPRの衝撃は形を変えて生き永らえ、21世紀のいま量子暗号や量子ネットワークといった革命的新技術の鍵として期待されている。量子通信の実用化がますます現実味を帯びる一方で、物理的実在とはいったい何なのかという根源的な謎に答えはまだ無い。

KEYWORDS: *EPR experiment, hidden variables, Bell's theorem, entanglement, quantum communication, quantum cryptogram*

I. はじめに

現代のテクノロジーはミクロの領域に広く深く入り込み、極微の量子達の挙動から計り知れない恩恵を受けている。原子力、電子素子、メモリー、MRIを始めとする医療工学、レーザー、…。ミクロの世界(原子分子より小さな世界)を支配するのはニュートンの古典力学ではなく、量子力学である。しかし、今年で生誕95年を迎えたこの量子力学には、常識と真っ向から対立しわれわれの素朴な自然観を茫然自失させる過激な一面が潜んでいる。そこでは量子たちが不可解な挙動をし、アインシュタインはそのある側面を“Spooky Action at a Distance (不気味な遠隔作用)”と呼び、量子力学は不完全な理論であるという立場を生涯変えることがなかった。1935年にアインシュタインは現在ERP (Einstein-Podolski-Rosen)パラドックスとして知られる思考実験を提案し¹⁾、そこに顕在化する量子達の不可解な挙動はその後80年以上にわたって多くの物理学者を悩ませる一方で、量子力学の本質を問う幾多の基礎研究の豊かな源泉となった。筆者はこの問題に学生の頃から興味を持ち、レーザー応用プロジェクトで働いた1980年代、興味は

更に深まった²⁾。断るまでもなく素人としての興味に過ぎないが。そして筆者が予想すらしなかったことだが、その数十年後、事態は逆転の様相を呈し量子達の不可解な挙動が、その正体は不明のまま、量子暗号、量子インターネット、量子コンピューターといった未来技術を拓く鍵となって行く。

II. スピンと量子力学の謎

EPR実験は「量子は確定した運動量と位置を同時には持ち得ない」とする量子力学の正統的理解に異を唱える思考実験として考案された。しかし本稿の文脈ではスピンを主役に据えたそのボーム版³⁾が説明に適している。

量子力学においても、エネルギー、運動量そして角運動量の各保存則は重要な柱である。特に角運動量保存則は孤立した系である原子や原子核の記述において大いに幅を利かせ、教科書や論文を数式で真っ黒にする。更に量子力学には、古典力学には無いスピンと呼ばれる奇妙な一種の角運動量がこれに付け加わる。ときにスピンは量子の自転に喩えられるが、これはあくまでも比喩である。スピンは量子力学を相対性理論の要請に従わせる際自然に現れる新たな物理量であり、角運動量としての性質を持ち合わせている。スピンを一緒に考慮しないと角運動量保存則は成立しない。古典力学から引継がれた角運動量(軌道角運動量と呼ばれる)が整数のとびとびの値を取るのに対し、中性子や陽子や電子のスピンはとびと

Spooky action in quantum mechanics leading us to novel technologies ; From Einstein's rebellion to quantum science satellite : Tadashi Yoshida.

(2020年6月21日 受理)

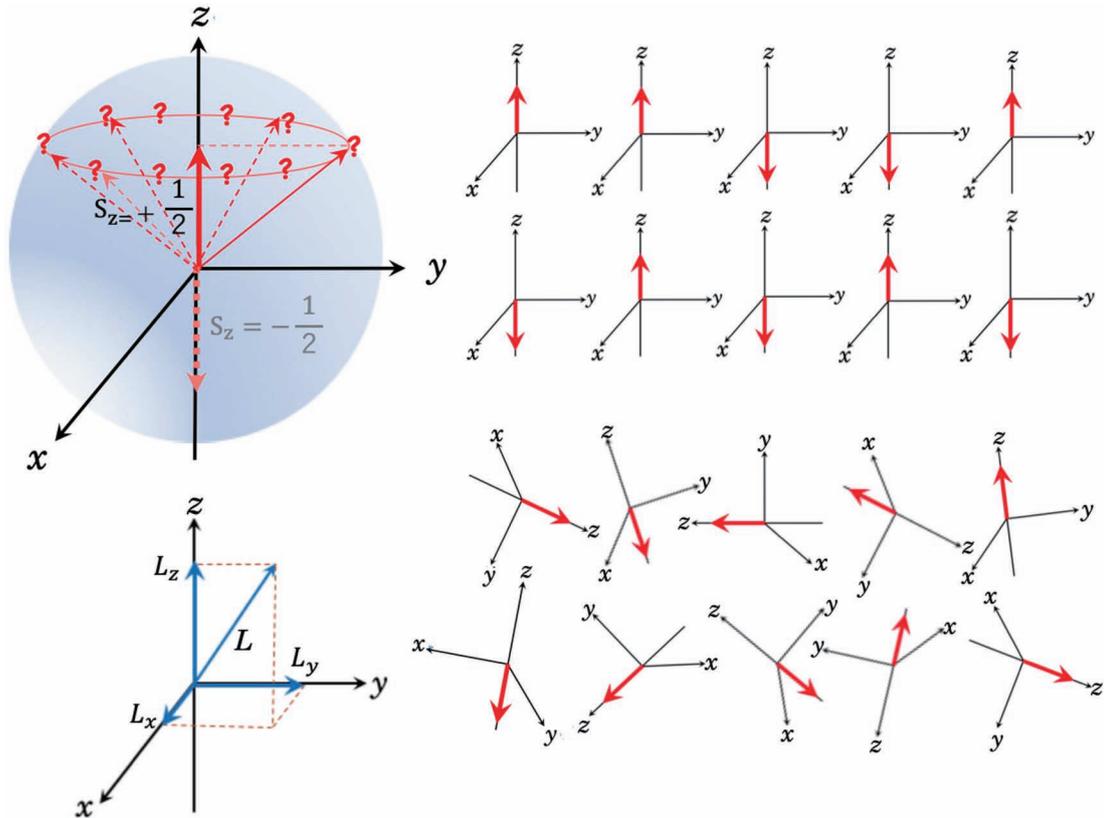


図1 中性子，陽子，電子などわれわれに馴染みの物質粒子はスピンの1/2なのでそのz方向成分 S_z だけを考えればよい。この時x成分とy成分は本質的に不確定だ(左上)。 S_z を測定すると $+1/2$ と $-1/2$ が半々の確率でランダムに現れる(右上)。さらにz軸をどんな向きにとっても結果は同じである(右下)。ここがx, y, z成分を持つ古典力学の角運動量 L と大きく異なる(左下)。

びの半整数値を取る。まずそういうものとして飲み込むしかない。

図1を参照されたい。中性子や陽子や電子(フェルミ粒子の仲間)のスピンは $\frac{1}{2}\hbar$ である(以降、換算プランク定数 \hbar を省略する)。そのz軸方向成分 S_z は大小関係 $-S \leq S_z \leq S$ を満たす半整数値しか取れないから、 S_z の値は $+\frac{1}{2}$ あるいは $-\frac{1}{2}$ に限られ、測定すればそのどちらかが正確に半々の確率で全くランダムに得られる。注目すべきは、このとき残りのx軸方向成分とy軸方向成分は本質的に不確定であるという量子力学特有の主張である(図1左上)。考えてみると、これは驚くべき主張で、この辺りからわれわれの常識は量子力学に次第に道を譲らなければならなくなってくる。なお、スピンを考える際に着目あるいは測定する向きをz軸方向と呼ぶのであり、それ以上の意味はない。スピン量子数 S は粒子の種類毎に決まっており、われわれは S_z だけ考えればよいので、その向きをz軸方向と決めておくと何かと便利なのである。更に、磁場を印加する等の仕掛けでもしない限りz軸をどんな向きに取っても、やはり、測定すれば50%ずつの確率で $+\frac{1}{2}$ か $-\frac{1}{2}$ のどちらかがランダムに得られる(図1右下)。

アインシュタインが量子力学は不完全な理論であるという立場に立つのは、そこでは「物理量(例えば水素原子中の電子の位置や陽子スピンのz成分 S_z)は実際に測定

されるまで確定した値を持っておらず、本質的に不確定だ」とされるあたりにある(曖昧な表現お許しを)。量子力学にできることは、特別な場合を除いて、物理量を確率的に予言することだけである。「神はサイコロを振らない」と言う彼の有名な言葉⁴⁾の出所もここにある。物性理論家マーミンはEPR論文刊行50周年にあたり「誰も見ていない時も月はそこにあるのか? 実在と量子論」と言う刺激的な表題の論考をPhysics Today誌1985年4月号に寄せている。これは文献⁵⁾とともに、次節以降の主役となる「量子もつれ」の最良の解説となっている。

III. ボーム版 EPR 思考実験

原子を構成する電子達はペアになろうとする。片方の電子のスピンのz成分 S_z (以後単にスピンと呼ぶ)が $+\frac{1}{2}$ でもう一方が $-\frac{1}{2}$ の状態、およびその逆で各々のスピンのz成分が $-\frac{1}{2}$ と $+\frac{1}{2}$ の状態、の二つの状態が重ね合わせになっているとき両者の角運動量の和は0であり、これをSpin Singlet状態という。

まずは図2の上パネルだけに着目されたい。Singlet状態が何らかの理由で壊れ、図のようにAが左へ、もう一方のBが右に飛び去って行くとする。そして左に離れた場所で片方の電子Aのスピンを測定する。量子力学の説くところでは、すでに記したように、結果は全くランダムでありつつ50%の確率で $+\frac{1}{2}$ 、やはり50%の

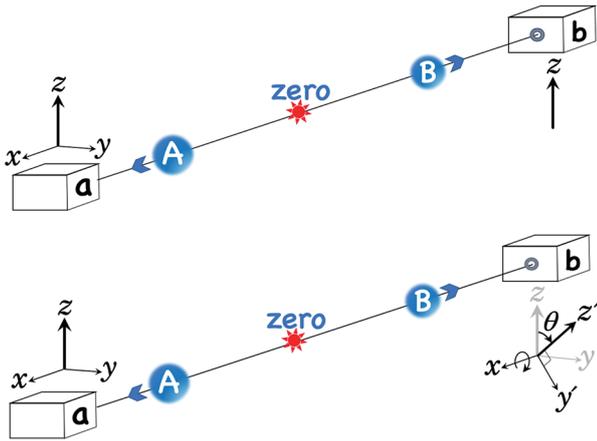


図2 ボーム版 EPR 実験の概念図。zero 点で Spin Singlet 状態にあった粒子 A と B は互いに反対の向きに飛び出し、それぞれ検出器 a と b に入り各々のスピンの測定される。
上：a と b と同じ向きのスピンを測定する場合
下：スピンを測る向きを x 軸周りに θ 回転させた場合

確率で $-\frac{1}{2}$ が得られる。ここで量子力学は、測定が実行されるまでは A と B の両粒子ともスピンの $+\frac{1}{2}$ なのか $-\frac{1}{2}$ なのか完全に未確定(!!)であると断言する。量子力学には常にはこの「未確定」あるいは「不確定」という言葉がついてまわりわれわれを苛立たせるが、拙稿²⁾でもこれに触れているのでご一読くださると有り難い。

仮に、A のスピンの測定結果がたまたま $-\frac{1}{2}$ であったとしよう。すると、もう一方の端で同時かその後 z 軸の向きを A 測定の時と同じにして(つまり図2上パネルの通りに)B のスピン (S_z) を測定すると、その結果は必ず $+\frac{1}{2}$ となるのである。両者の相関はマイナス 1.0 である。なぜなら不可侵の保存則たる角運動量保存則がそれを要求するからだ(両者一体で角運動量の和が $-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 0$ の Spin Singlet 状態に止まらなければならない)。ここだけ読めばしごく当たり前と思われる。だが振り返ると大きな謎が残る。量子力学の主張に従えば、測定により値が確定するまで A も B もスピンは完全に未確定だった筈である。更に本節前半の議論を要約すると「A のスピン測定の結果が(確率は 50 % と大きい)がたまたま $-\frac{1}{2}$ であったとすると、もう一方の B のスピンはその瞬間 $+\frac{1}{2}$ となる。」であった。従って、電子 A のスピンの測定によって $-\frac{1}{2}$ に確定した瞬間、電子 B のスピンも未確定から確定値 $+\frac{1}{2}$ へ劇的な変化を遂げなければならないではないか。いったい、A の測定結果が $-\frac{1}{2}$ になったことをいかにして電子 B は瞬時に知るのか。それを知らずして B のスピンの突然 $+\frac{1}{2}$ に確定することはあり得ない。しかも A と B はすでに遠く離れているのである。互いを隔てる距離は 12 m でも 1,200 km でも、たとえ原理的にせよ 100 光年離れていても事態は変わらないのである。アインシュタインはこれを「不気味な遠隔作用」と言い、(巷では)冗談めかして量子の「共同謀議」と言ったりする。これがボーム版 EPR

思考実験である。このように、この一対の量子は互いに遠く離れ去った後も時空を超えて強く繋がりがあっていてと考えざるを得ない。これを「量子もつれ (Quantum Entanglement)」という。前述したマーミンの論考の表題「誰も見ていない時も月はそこにあるのか?」は、以上の「測定が行われるまで問題の物理量は確定していない」という量子力学の主張への反論として、アインシュタインが文献4)の著者パイスに、皮肉を込めて「君が見上げているときだけ月が存在していると本当に信じるのかね?」と話しかけたこと(文献4)冒頭)に由来する。

IV. 局所实在論と隠れたパラメータ

EPR パラドックスに対峙した何人かの物理学者たちは量子力学の欠陥が「実際に測定が行われるまで物理量は本質的に未確定だ」とする点にあると考え、「物理量は常に確定している。ただわれわれがそれを知らないだけなのだ。ミクロの世界には物理量を支配する隠された何かはまだ潜んでいる」と考えた。これを隠れた変数 (Hidden Variables) とよび、計算結果は量子力学に矛盾せず、かつ隠れた変数を含んだミクロ世界の理論構築を模索した。ちょうど私が学生だった時代であるが、この「隠れた変数」理論はあまりに難解であったことを記憶している。当時この隠れた変数理論の先導者は先程のボーム (David Bohm, 1917-1992) であった。この理論の立脚点は「局所实在論」と呼ばれる。平たくいえば、(1) 電子 A の測定結果を瞬時に B と共有するような共同謀議は存在しない(局所性)、また(2) 電子のような量子であってもその物理量は測定するかしないかに係りなく常に確定している (EPR 論文流に言えば「实在の要素が常に存在する」)、というわれわれにも受け入れやすい前提だ。しかし、万人に広く認められるような説得力のある隠れた変数理論はついに作り上げられることはなかった。

V. ベルの不等式と量子力学の勝利

局所实在論(隠れた変数理論)が正しいのか、量子力学が正しいのか。裁定者は実験しかないが、それは極めて困難と思われ、EPR 実験が実際に行われるまでには 30 年以上の歳月が流れた。流れを変えたのは 1964 年に CERN の物理学者ベル (John Stewart Bell, 1928-1990) が提唱した「ベルの不等式」である⁶⁾。ベルは前節で述べた(2) 電子のような量子であってもその物理量は測定するかしないかに係りなく常に確定している、を前提にあれっと思うほど抽象的な論考を行い、ボーム版 EPR 実験を実際に行えば「隠れた変数理論」と量子力学のどちらが正しいかを峻別できることを示した。1970 年代に入ると EPR 実験が現実に行えるようになる。

百聞は一見に如かず。図3で実験結果の一例を見てみよう。フランス原子力庁(当時)サクレイ研究所の Laméhi-Rachti と Mittig が行った実験⁷⁾で、加速器から

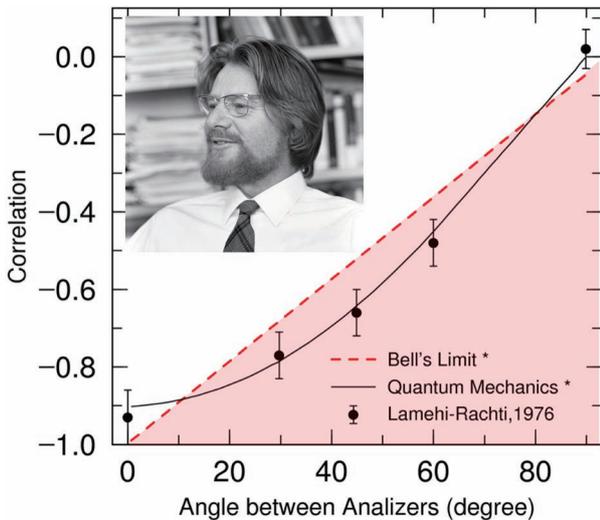


図3 量子もつれ状態のまま互いに離れた一対の陽子間スピン相関。横軸はスピン検出器間の相対角度。破線右下はベルの不等式が禁止する領域で実験は量子力学を支持する。実験値●は文献7)の表の値。*を付した計算値は文献5)の図から読み取った。写真はJ.S. ベル(Credit: CERN)

の低エネルギー陽子を水素原子核(=陽子)に衝突させると二つの陽子は Spin Singlet 状態を経て「量子もつれ」状態に入る。入射陽子と弾き飛ばされた陽子は共に斜め前方に飛び出す。反対向きでない点は図2とは少し異なるが本質的な違いではない。図3の横軸は図2下パネルの角度 θ に対応し、0度するとき(図2上パネルと同じになる)はすでに述べたように相関はマイナス1.0(黒実線と●の-1.0からの小さなズレは実験状況の反映だろう)、90度で相関は0である。そして、そのあいだ($0^\circ < \theta < 90^\circ$)で実験値はベルの不等式を破り明確に量子力学を支持している。0度と90度の間に着目したのがベルの深い洞察であった。

70~80年代に実施された多くのEPR実験が量子力学を支持したが、殆どの実験で陽子や電子ではなく光子が使われている(実はボームの提案自身もそうなのだが本質的違いはない)。光子もスピンを持ち、それは光の偏光に他ならないのでスピン測定は比較的容易である(補足すると光子はボーズ粒子なのでその量子数は整数値をとる)。

そのなかで、アラン・アスペらが行った実験⁸⁾が決定的である。図2下パネルに即して述べよう。これまでの説明で角度 θ がEPR実験の要であることが解るが、アスペは両光子が同時に zero 点を離れた後になってから測定角 θ を決定するという離れ技をやった。検出系a-b間の距離は光速で40ナノ秒かかる12mに設定された。zero点を出た光子Aが6m飛んで20ナノ秒後に検出系aに入る直前に測定角 θ の向き(これがz軸になる)が決まりスピンの測定される。Aがこの情報を急いでBに送っても、すでに遠く離れたBに情報が届くのは40ナノ秒後である(光速より早く情報は伝わらな

い)。その頃にはもう光子Bの θ もスピンも確定してしまっており変えようはない。つまり光子の共同謀議は不可能であり、局所実在論は否定され、量子力学の勝利は更に確定的になった。

この結果は一部の物理学者に大きな衝撃を与えたものの、「アスペの実験は行われなくてもよかったと結論できるかもしれない。というのは、量子論の確認は、その理論とともになされた偉大な成功によって実質的には保証されているからです(ロンドン大学ジョン・テラー)」といった反応が1980年代まで多数派だった。こんな基礎的(言いようでは重箱の隅的)研究が実利に結び付くなどと考える人もまた皆無であった。

VI. そして迎えた21世紀

ところが、である。20世紀も終わりにかかる頃からEPR研究が再び活況を呈するようになる。「量子もつれ」が量子暗号、量子インターネット更には量子コンピュータといった、実利どころか経済的、政治的覇権にすら直結しかねないような新技術への鍵であると考えられるようになったからである。量子もつれ研究再興の経緯⁹⁾はここでは省き、わかりやすい例に話題を移そう。2016年に中国が量子科学衛星「墨子(Micius)」を軌道に投入した。これは日本の新聞やマスコミでも扱いこそ地味ながら、打ち上げ以来何度も報道されている。最近では今年5月13日の読売新聞が『「量子暗号」中国におくれ』という表題のもと「16年8月16日、世界初となる量子暗号通信の専用衛星『墨子号』の打ち上げに成功すると、17年7月、墨子号と地上の間で、量子暗号通信の実証実験を世界で初めて実現させたと発表した」と記している。本稿執筆を機会に米国Science誌に掲載された中国の論文¹⁰⁾をチェックすると、報告されている内容は宇宙空間と地上の2基地局を結んだ大規模なEPR実験で、光子の飛行経路長の和は1,200kmに達する(その後ウィーン大学の協力を得てこの距離は7,600kmにまで延びたが、いずれも現在までに日本を含めた世界で光ファイバーを用い達成された距離を大きく上回る)。衛星が図2のzero、2つの地上基地局がaとbの検出器にそれぞれ対応する。読み始めて、前述のテラーではないが何もそこまで…と感じたがすぐに納得した。この論文の目的は決して衛星を利用した量子力学の正しさの再々確認などにあるのではなく、逆にEPR実験を利用した宇宙および量子情報技術力のデモンストレーションなのだ、と。この論文はScience誌の年間最優秀論文に与えられる2018年のニューカム・クリブランド賞を得た。

2点だけ補足しておきたい。まず「量子もつれ」は決して相対性理論が禁止する光速を超えた情報伝達を可能にするものではないこと。もう一つ、伝達されるのは暗号そのものではなく暗号を解くための「鍵」(乱数)であり、

それを知らうと第三者が飛行途中の光子のスピン(=偏光)を測定すると、それは量子状態の突然の変化となり送受信者に判ってしまう絶対安全な通信手段なのである。ただし、この「量子もつれ」による通信法も盗聴検出方法もここに記すには煩雑すぎる。

VII. おわりに

晩年のアインシュタインは量子力学について行けず頑なに自らの統一理論の研究に閉じこもったという言説が流行った。EPR論文はその象徴にされもした。だが、今となって見るとそれはアイデアの汲み尽せぬ豊かな源泉であった。一方現実に戻れば、コロナ後の世界において、われわれはエネルギーと共に量子情報技術の死活的な重要性を身に染みつつ改めて理解することになるだろう。

－ 参考文献 －

- 1) A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, *Phys. Rev.*, 47 (1935) 777-780.
- 2) 吉田 正, 量子力学のしっぽ-パラドックスの実験検証一, 核データニュース, 44 (1993) pp.87-94.
<http://www.aesj.or.jp/~ndd/ndnews/No44.html>
- 3) David Bohm, *Quantum Theory*, Dover Publications (1951) pp.619-623.
- 4) アブラハム パイス, 神は老獪にして…アインシュタインの人と学問, 産業図書 (1987) 冒頭および pp.584-604.
- 5) B.d'Espagnat, The quantum theory and reality, *Scientific American*, 11 (1979) 158-181.
- 6) J. S. Bell, *Physics* 1 (1964) 195-200.
- 7) M. Lamehi-Rachti, W. Mittig, *Phys. Rev.*, 14 (1976) 2543-2555.
- 8) A. Aspect, J. Dalibart, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, 49 (1982) 1804-1807.
- 9) R. ハンソン, K. シャルム, 日経サイエンス, 2019年2月号 pp.54-62.
- 10) Juan Yin *et al.*, Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers, *Science*, 356 (2017) 1140-1144.

著者紹介



吉田 正 (よしだ・ただし)

東京工業大学
(専門分野/関心分野) 核データ, 炉物理,
レーザー応用



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1日 第3回論文誌編集幹事会)

- ・テレビ会議システムを使ったりリモート会議を実施した。
- ・7月16日から8月15日までに英文論文誌に34報, 和文論文誌に2報の新規投稿があった。
- ・英訳公表事業の進捗状況が報告された。Vol.3の翻訳が終了し最後の記事の校閲中。Vol.1と4の製版を開始する。
- ・学会賞論文賞の推薦論文を検討・選定した。
- ・若手編集委員からの「英文論文誌に望まれる改善点」に関する意見聴取結果の概要が報告され, 意見が交換された。
- ・論文審査・査読要領の改訂案を検討した。
- ・広い分野に投稿してくる著者に対する扱いを検討した。
- ・第2分野担当の新編集顧問を承認した。

(9月1日 第3回学会誌編集幹事会)

- ・テレビ会議システムを使ったりリモート会議を実施した。
- ・「福島事故から10年」の1月号特集の自治体首長の依頼について, 編集長より進捗状況の報告があった。
- ・新企画案「原子力の未来を予測する, 創る」について編集長から進捗状況の説明があった。
- ・編集顧問の後任について, 佐田編集長より説明があり, 承認された。
- ・学会誌電子化調査内容について検討した。検討結果を反映したものを理事会に報告予定。
- ・学会誌8月号アンケート回答結果を確認した。
- ・座談会の新規企画案を検討した。テーマや参加者を検討し実施していくこととした。
- ・巻頭言, 時論, その他の記事企画の進捗状況を確認し, 掲載予定について検討した。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>