ATOMO∑ 日本原子力学会誌 2019.10

巻頭言

日本の産業の未来と原子力

安井 至

時論

学術会議報告「我が国の原子力発雷所 2 の津波対策 |

成合英樹

未来を背負っていく私たちにできることは 何か

上野和花

解説シリーズ

最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構 (7/最終回)

28 核融合エネルギーの実用化に向けた 研究開発の進展(その3)

> 核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発の進展 をめざす幅広いアプローチ活動のうち、最終回の今回 は IFMIF/EVEDA、IFERC と、先進核融合中性子源 A-FNS について紹介する。

> 谷口正樹, 坂本慶司, 春日井敦, 飛田健次, 松本太郎



IFMIF 高周波四重極線形加速器

連載講座 基礎から分かる未臨界(1)

34 今なぜ未臨界か

実効増倍率とはある体系において、時間とともに中 性子が増減する割合を示す指標であり、臨界管理や原 子炉の運転などにおいては基本的な概念の一つであ る。本連載では実効増倍率が1未満である場合の未臨 界について解説する。

遠藤知弘, 辻本和文, 山本章夫

解説

11 原子炉ニュートリノの科学と技術の進展 不毛のニュートリノから原子炉炉心監視まで

ニュートリノは謎の多い粒子である。その存在が提 唱されてから確証されるまでに四半世紀を要し、質量 を持つか否かが確定したのはさらに40年後のこと。 ニュートリノと物質のあいだの相互作用が超絶的に弱 いという性質が、原子炉運転遠隔監視への道を開いて 吉田 正 いる。

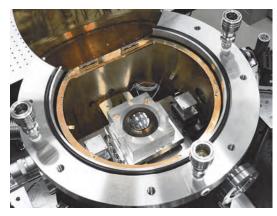


中国のニュートリノ Gd ドープ型液体シンチレーション検出器 Credit: R. Kaltschmidt, Lawrence Berkeley National Laboratory

- 16 プランク定数にもとづくキログラムの 新しい定義
 - -130 年ぶりの定義改定とその影響

国際度量衡総会は昨年11月に, 国際単位系 (SI) の定義を大幅に改定することを決議。キログラム、ア ンペア、ケルビン、モルの定義が基礎物理定数にもと づくものへと変わった。

藤井賢一



珪素結晶の球体の直径を原子レベルで測るレーザ干渉計

21 Column

「きちっとしたエビデンスとワンフレーズ 「ポーランドを訪れて」 妹尾優希 「科学者と市民」 鳥居千智 「甲状腺検査の「理解しがたさ」に抗う| 服部美咲 「トランスサイエンス 坂東昌子 「グローバル化での信頼関係」 マイケル瑛美

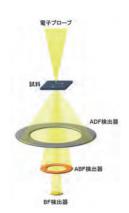
解説シリーズ

電子顕微鏡の現状と将来展望(3/最終回)

24 先進原子分解能電子顕微鏡による 材料局所構造解析

走査型透過電子顕微鏡の 空間分解能は 50pm 以下に まで達しており, 軽元素原 子や原子内部電場の直接観 察が可能になりはじめてい

柴田直哉



井内千穂

原子分解能 STEM 法の模式図

談話室

46 リケジョの思い(7) 議論を学ぶ、演習授業

口町和香

日々是好日~福島浜通りだより(5)

47 丁寧さと良き一日

吉川彰浩

視点 <社会>を語る(6)

48 社会学の歴史をめぐる3つ目の立場

齋藤圭介

理事会だより

放射線利用を考える 52

玉田正男

NEWS

- ●原子力白書, 特集テーマは「廃止措置」
- ●東電など、BWR 共同事業化で基本合意
- ●「地元との共生」テーマに廃炉フォーラム
- ●海外ニュース

報告

39 高速炉開発に関する技術戦略 -新型炉部会「高速炉戦略ロードマップ 検討会 提言

> 新型炉部会は高速炉開発の方向性について提言をま とめた。不確実性の大きい環境下では長期開発が困難 になるため、現状の制約からは一定の距離を置いた普 **遍的目標からバックキャストで長期計画を考えた。**

> > 笠原直人

Short Report

躍動するロシアの原子力開発・国際展開 ATOMEXPO-2019 参加および発電所視察

> 今年春にロシアを訪問した。世界中の企業が出展し ている ATOMEXPO では、原子力分野で躍動してい るロシアの実力を思い知らされた。 廣川直機

ジャーナリストの視点

冷静な議論・判断を呼び起こすには

石戸 諭

- 15 From Editors
- 49 新刊紹介

「爆発作用を受けるコンクリート構造物の安全性 評価」、「衝突作用を受ける構造物の局所破壊に関 する評価ガイドライン」

53 会報 原子力関係会議案内, 共催行事, 訃報, 英 文論文誌 (Vol.56,No.9-10) 目次, 和文論文誌 (Vol.18,No.3) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集 関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、「目安箱」

(https://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html) に お寄せください。

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

日本の産業の未来と原子力



持続性推進機構 理事長 安井 至 (やすい・いたる)

東京大学工学部卒。東大教授,国連大学副学長,製品評価技術基盤機構理事長などを経て,2015年から現職。総合資源エネルギー調査会原子力小委員会委員長を兼ねる。著書は「市民のための環境学入門」、「地球の破綻」など。

「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」が、6月26日に国連に提出された。筆者もメンバーの一人であった内閣府の懇談会の報告書が提出されたのが4月2日であったことを考えると、その後の作成作業が、かなり効率的に行われたものと思われる。その内容を一言で表現すれば、「すべてがイノベーション頼み」とも言える。すなわち、現時点の技術レベルでは、とても実現可能と言えるようなものはない。しかも、イノベーションの定義が、1912年のシュンペーターのオリジナルなものに戻ったと言うべきで、「新結合」、すなわち、人と人、技術と技術、社会と技術、などなどの新たな結合によって、実現を加速することが不可欠だと思われる。

パリ協定が合意されたのが、2015年12月であるから、日本の対応は3年以上遅れたことになる。その理由は、日本という国の状況が強く反映したから、と解釈すべきなのだろう。特に、対応の鍵となる再生可能エネルギーへの主力化については、日本は、かなり特殊な状況に置かれた島国であるために、世界でも最悪の条件としか言いようがない。ヨーロッパのように、文字通り網状の広範囲な電力網を構築して、なんとか発電量を維持するという方法論は採用できない。もし、どこかから電力を輸入できるような状況があるとすれば、それはロシアからであろうと思われるが、簡単に実現できるとはとても思えない。

一方,内閣府の懇談会では、日本製鉄の進藤社長(当時)が、2100年までには、水素還元による製鉄を実現してみせると述べた。しかし、そこには、重大な技術の壁が存在していることが明らかである。なぜならば、水素還元は吸熱反応であって、そのためには、外部からの熱の供給が不可欠だからである。しかし、この熱を化石燃料によって供給するようでは、何の意味もない。となると、何を熱源にするのか。唯一可能と思われる方法論が、高温ガス炉などの原子力エネルギーの産業活用であろう。しかし、それには、相当の開発力が不可欠だろうし、かつ、社会的な理解をどのように得るか、という大きな問題に対して、原子力関係者の渾身の努力が不可欠である。

化石燃料が使用不可となると、困難に陥る産業は、鉄鋼業だけではない。ほとんどすべての製造業が継続 困難になる。万一、そのような状況になれば、日本という国の産業は、消滅する以外に無いのではないだろうか。

産業以外でも、現時点で高温を得る手段はほぼ化石燃料依存である。それを電気によるプラズマ、あるいは、水素燃焼などに切り替えなければならない。となると、都市ガスとしてメタンが使えなくなることで、家庭や中小企業が非常に困るという可能性もある。究極的には、日本という国は、世界でもっとも美味な料理だけを売り物にする観光国になるのだろうか。

しかし、最大の問題が別のところにもある。未来を支えるべき最近の大学生は、未来社会を考察する知識を持たず、また、知識獲得の意欲も無さそうである。まずは、日本の厳しい未来像を若者に伝達することが、日本社会をなんとか継続させる唯一の方法論のように思える。

(2019年7月29日記)



学術会議報告「我が国の原子力発電所の津波対策 |



成合 英樹 (なりあい・ひでき)

筑波大学名誉教授 元独立行政法人原子力安全基盤機構理事長 元日本原子力学会会長 専門分野は原子炉の伝熱流動と安全性

I. 福島第一原子力発電所事故と日本学術会議

日本学術会議総合工学委員会原子力の安全に関する分科会は2019年5月21日に「報告 我が国の原子力発電所の津波対策―東京電力福島第一原子力発電所事故前の津波対応から得られた課題―」を公表した。これは2011年3月11日の東日本大震災により東京電力福島第一原子力発電所で巨大地震と共に津波が想定津波高さを大きく超えて発電施設を浸水し炉心溶融・水素爆発・放射性物質大量放出の大事故に至った報告である。

福島第一原子力発電所事故(福島第一事故)に関しては、日本学術会議総合工学委員会原子力事故対応分科会(当時)で2014年6月13日に「報告 東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓」を公表し、事故の概要、日本の原子力発電開発の経緯および課題と安全性向上への提案等を報告した。この報告の概要は日本原子力学会誌2014年11月号に時論として掲載されている。今回の報告は津波による事故に焦点を当て、事故以前の津波対応の進展状況、東京電力(東電)の津波評価と対策、関係組織の津波対策等に関する教訓と課題を摘出した。そして原子力の安全に関わる事業者、規制機関、学術団体、地震津波等の研究機関の今後の取り組むべき課題をまとめた。

Ⅱ. 原子力発電所の津波対応

日本では原子力発電所の設置当初からドライサイトと呼ばれる津波に対して十分余裕のある敷地の高さに設置することが要求された。2006年に原子力安全委員会(当時)は地震随伴事象として耐震と共に津波の評価も示したが、バックチェックは耐震評価が優先され津波評価は遅れる状況にあった。

福島第一事故発生前の津波高さの検討は1965年の軽水炉の設置許可時からなされ、過去の最大津波を対象に余裕のある敷地高さが定められた。その後も貞観地震津波を含め新しい知見に基づき検討されたが、防波堤を超え発電所の各号機を水没させる状況は予測されなかった。

1995年の阪神淡路大震災を契機に地震調査研究推進本部(地震本部)が設置された。地震本部は2009年4月に「新たな地震調査研究の推進について一地震に関する観測、測量、調査および研究推進の総合的かつ基本的な

施策」をまとめたが津波評価手法の確立への動きはなかった。同年に東電は土木学会に対し地震本部の見解に基づく具体的な波源モデルの策定について審議を依頼した。土木学会は2012年10月を目途に結論を出す予定であったが2011年3月11日に東日本大震災となった。

Ⅲ. 日本と東電の津波対策への取り組み

学術会議では東電の対応から教訓を得ることを目的に、東電が東北地方太平洋沖地震による巨大津波発生の可能性につきどの程度の知見があり対応策は適切であったかを検討した。

事業者は想定津波の評価に用いるデータや手法につい て最新知見を基に津波高さを評価してきた。1970年に当 時の原子力安全委員会(原安委)は過去の記録を参照し最 も過酷と思われる自然力に耐えることを要求した。1983 年に建設省(当時)と水産省は過去の記録に基づく最大津 波を対象とした対策を求めた。1997年に農水省は地域防 災計画における津波対策の手引きの中で既往最大津波と 最新の知見で想定される最大地震津波の大きい方を対象 とすることを求めた。1999年に国土庁(当時)と気象協会 は津波対策強化の手引きを作成し、自治体に津波浸水予 測図の作成を促した。2002年に土木学会は「津波評価技 術」を取りまとめた。2007年に福島県と茨城県は津波浸 水予測図を作成した。このように各機関で津波高さに関 して検討されたが 2007 年の自治体による津波浸水予測 図の津波高さに大きな差はなく、手法の本質的な違いは なかった。2002年の土木学会の「津波評価技術」では想定 津波につき既往津波だけでなくプレート境界付近に想定 される地震に伴う津波も考慮すべきということであった がそこまではまだ可能な状況ではなかった。

日本の地震・津波に関する調査研究は地震本部に一元 化されていた。地震本部は海溝型地震に関して長期評価 を行い、地震の大きさと発生確率を予測する中で、三陸沖 から房総沖の海溝寄りプレートで発生する海溝プレート 境界地震(津波地震)はマグニチュード 8.2 前後の発生と 評価していたが、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地 震はマグニチュード 9.0 と極めて巨大な地震であった。

東電は1965年の設置許可後、津波評価技術の進展と

ともに想定津波高さを見直した。1994年に北海道南西沖地震を踏まえた見直し、1998年の太平洋沿岸部地震津波防災計画手法調査に基づく見直し、2002年の土木学会「津波評価技術」に基づく見直し、2009年の耐震バックチェック随伴事象として再評価に伴う見直しを実施すると共に、福島県と茨城県の防災上の津波計算結果から現状の想定高さを上回らないことを確認した。また仮定に基づく検討も実施し、大きな仮定を行うと海水ポンプや電源設備が水没等をすることを確認すると共に、貞観津波の試算やこの時の沿岸部での堆積物調査を実施した。

このように東電は幾つかの見直しを実施し、ポンプの 嵩上げや浸水防止対策を行い、2009年には5,6号機の非 常用海水ポンプの一部に対策を施した。また2010年には 福島地点津波対策ワーキングにより地震本部の見解と貞 観津波の試算結果を踏まえ対策の検討を開始していた。

原子力発電所の溢水リスクは 1991 年の福島第一1号機での配管漏洩による一部浸水、1999 年のフランスル・ブレイエ原子力発電所の河川氾濫による溢水、2004 年のインド・マドラス原子力発電所でスマトラ沖地震の大津波による海水ポンプ室浸水があった。日本では 2007 年に保安院(当時)と原子力安全基盤機構 JNES(当時)が検討会で敷地高さ +1m の水位を仮定した場合、浸水の可能性を否定できずリスクがあることを示した。これらより溢水事象を仮定すると事故に至る溢水リスクがあることを認識していたが、これに対する建屋への浸水防止対策や建屋内に浸水した場合の対応をとることはなかった。

Ⅳ. 教訓と課題

以上に記した日本と東電の津波対策を踏まえた津波対 応への教訓と課題は以下のようになる。

津波対応への原子力発電所設置時の考え方では、1966年の東電福島第一設置時には津波高さの想定値が約3mであり、ポンプの吸い込み水頭の限界10mで津波対応は十分ということで発電所の設置高さを10mとした。1979年の東北電力女川原子力発電所では設置高さを15mとしたが、ドライサイトを原則として津波の実績調査をベースに余裕を持たせて敷地高さを定めてきた。

日本の津波評価は歴史資料や津波遡上調査に基づく予測方法であったが、2002年の土木学会の「津波評価技術」により評価法が整備された。1995年に地震本部の設置があり、地震と共に津波への関心から研究が進んだが十分ではなかった。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による津波によりこの分野の研究は加速された。

事故以前の福島第一での津波評価において,東電は独 自試算を行い,評価法の妥当性について土木学会の見解 を得て対策を準備し,2011年3月の津波発生直前に規制 機関に報告したが対策は間に合わなかった。

茨城県は国の津波浸水予測図作成指示に従い「津波評価技術」と同じ手法で津波災害予測マニュアルを用いたが日本原子力発電の津波予測を上回る結果を得たため事

業者に東海第二への対応を求めた。これに応えて事業者は重要施設の防水壁工事に着手し事故を防ぐことができた。一方福島県も国の指示に従い福島第一を含む沿岸地域の津波高さを評価したが、東電は福島第一の想定津波高さより低い値であることを確認した。

日本では2006年の「耐震設計審査指針」の改定により 基準を超える地震への対応は「残余のリスク」として評価 する仕組みができ地震動を確率論的に評価する研究は進 んでいた。しかし津波については「極めてまれ」の定義が なく、海底部での地震の発生と共に起きる津波に関して 規模と発生確率に関する確率的な研究は未成熟であっ た。そのため保安院(当時)の耐震バックチェックでは耐 震評価を優先し津波評価は後回しとなった。日本地震工 学会は2015年3月に地震・津波安全の総合技術体系を 目指して「原子力安全のための耐津波工学」を刊行した。

V. 原子力安全に関わる各組織の対応

福島第一事故からの教訓は、津波など不確定性の大きい自然現象に誘起される事故要因への対応が不十分であったことである。そこで原子力安全に関係する組織やグループの状況はどうであったかの視点から、原子力安全に関係する4つの組織やグループ、すなわち事業者、規制機関、原子力安全に関わる学術団体と関係組織、地震・津波等自然現象の評価研究機関が、自然現象に誘起される事故要因への対応に反映すべき点を以下にまとめた。

事業者は原子炉施設が深刻な影響を受ける可能性があると判断される場合は、合理的な対策により深層防護の 考えを基に対策の厚みを増すことが重要である。

規制機関は新知見の発掘と評価を継続して行い,前兆 事象の評価や最新知見に基づき,環境に与える影響の大 きい事象を見出し,適切に事業者を指導・監督すること が重要である。

原子力安全に関わる学術団体および関係組織は、自然 現象の脅威や事故に対する想像力が欠如していた。新知 見が重要な知見であるか否かを検討し、その活用方法や 対応案を積極的に提言することが重要である。

地震津波等自然現象の評価研究機関は2011年3月11日以前に福島県沖日本海溝沿い津波が将来発生すると予測し、津波堆積物調査によって貞観津波の状況を明らかにしていたが、防災対策に資する努力も重要である。

VI. 津波の評価

東日本大震災に伴う津波に関し JNES(当時)の杉野, 蛯沢らは論文「原子力サイトにおける 2011 東北地震津波 の検証」を 2012 年 4 月に日本地震工学会に投稿し 2013 年度の論文賞を授与された。この論文は大震災で影響を 受けた福島第一,福島第二,女川および東海第二原子力 発電所における津波波高の時間変化から詳細な断層震源 モデルを構築し、波源域が日本海溝付近の津波地震型の 地震発生域であること等を明らかにした。

(2019年7月12日 記)



未来を背負っていく私たちにできることは何か



上野 和花 (うえの・のどか)

京都教育大学附属京都小中学校9年生中学校2年生の時に「福島の震災復興プロジェクト」を先輩から受け継いだ。2018年12月、中学生サミットに参加して核廃棄物の処理の問題について考えを深めた。2019年2月、被災地視察と地元高校生との交流を通して、福島県の抱える課題と向き合う。

I. きっかけ

2011年3月11日。日本は東日本大震災に見舞われ る。当時6歳で小学校入学間近だった私は、何がおこっ たのかも理解出来ず、ただ周りの大人達が慌てていたこ とだけが記憶に残っている。2018年夏中学2年になっ た私は学校の理科の授業で交流事業「おこしやす京の夏」 と題した中高生が原発について話し合うサミットの開催 を知った。軽い気持ちで参加したサミットでは科学者や 医師によるガンやチェルノブイリ原発事故の調査, 福島 県甲状腺調査などが学会形式で発表されたが、 案の定 まったく予備知識の無かった私には理解することができ なかった。ただ、各都道府県から集まった自分と年齢も さほど変わらない中学生や高校生たちが「原発」や「福島 の未来」についてディベートする真剣な姿を目の当たり にして私は大きな衝撃をうけた。除染に伴い発生する廃 棄物の処理方法や風評被害について、福島県以外の生徒 たちもまるで自分たちのことのように話し合っている 中、私はやっと一回発言するのが精いっぱいだった。

秋になって学校で今度は京都大学で行われる JST(科学技術振興機構)交流事業「福島の事故を未来へ生かすために」への参加募集があり、今度は自ら進んで応募した。この場では一学年上の先輩達が福島県立安達高校と交流してきた内容をまとめてポスターセッションを行うことができた。先輩の活動を振り返りまとめたことで、私はやっと福島の原発事故による風評被害や復興の現状など今まで全く知らなかった様々なことを知ることが出来た。また、他の学校の生徒たちが外国人にも伝わるように英語でポスターを作成したり、自ら実験を行いデータをまとめたりした活動を聞いて刺激を受けた。少しずつ知識が増えると、日本という小さな国で全員の生活に影響しているエネルギー問題でもあるというのに、自分には関係の無いことと、これまで知ろうともしなかった自分が悲しく思えてくるようになった。

それと同時に、このような問題を抱えながら未来を背負っていく私たちにできることは何か?、と自分に問いかけてみた。この問いの答えを求めて私は青森県や福島県で現状を学ぶ機会に恵まれた。

Ⅱ.「中学生サミット~どうするっ?!核のゴミ~」

2018 年 12 月 22 日から 24 日まで青森県六ヶ所村・東京都で開催された「中学生サミット~どうするう?!核のゴミ~|に参加した。

初日は六ヶ所村の核燃料再処理工場や高レベル放射性 廃棄物貯蔵管理センターを見学した。

六ヶ所原燃 PR センターでは、再処理の工程が一つ一 つわかりやすく展示されていた。核燃料の再利用をやろ うとしているということをここで初めて理解したのだ が、過去日本で再処理ができていなかった時代はイギリ スやフランスなどに再処理を依頼していたという事実に 大変驚いた。外国に頼ってしまっていたという思いもし なかった日本の現状を知り、自分の国と何も知らなかっ た自分に情けなさを感じた。高レベル放射性廃棄物貯蔵 管理センターの見学という貴重な体験もさせていただ き、その後に六ヶ所村住民との講話を聴いて意見交換を した。住民からは日本原燃施設ができたおかげで家族が 出稼ぎに行かなくて済むようになり嬉しいといった声も 聞かれた。実際に再処理工場や廃棄物貯蔵管理センター といった放射性物質が身近にある生活の方々からの話を 聞けたことで、より多角的にこの問題について感じたり 考えたりできるようになったと思う。

翌日は東京で地層処分の基礎や NUMO が行う広報事業についての講義を受けた。六ヶ所村にある高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターとの契約期間が迫る中、未だ最終処分地が決まっていない現状を知り、ショックだった。日本の将来のために大人が考えて計画を立てていることが現実と大きく乖離していることを知り、自分の将来に直結する問題で他人ごとではいけない…と強く感じた。その後、この問題について他府県の中高生と2日間ディベートを行った。住んでいる都道府県が違うと原発に対する見方が大きく変わってくる。自分の住んでいる市町村に最終処分地を受け入れるか―となるとやはり抵抗がある人が大半であった。なぜ、抵抗があるのか。それは核のゴミと聞くだけで危険だというイメージが強くあるからだ。確かにリスクは0ではない。しかし、リスクがあるからといって避けてばかりではいられ

ない。私達はこの現状に向き合っていかなければならないのだ。

難しい問題を前に自分の意見を明確にし、発信しながら他の人の意見を聞く。そうやって他の人の意見を聞くことによりまた新しい考えが自分のなかに生まれてくる。ディベートを通じてどんどん学びが深まり、より身近な問題として考えることができたと思う。何もわからず発言できなかった半年前の私、その出発から私は多くのことを「知る」そして、「考える」ことができるように変化していた。「知る」から「考える」につながる経験ができたこと、それが青森や東京で学んだ宝だと思う。

Ⅲ. 自分の目でみる福島の姿

そんな中、私は2019年2月9日から11日まで福島で行われる「京都発!福島復興プロジェクト」に参加し、実際に福島を訪問し、被災地を見学させていただいた。1日目に訪れた双葉警察署で見た震災の被害にあったパトカー。その骨組みがあらわになっていたり、中に大量の砂が入っていたりと、それは私たちが普段見ている姿とはかけ離れた形になっていた。

その後, 夜ノ森地区ゲートを訪れた。道を1本挟み, 線量の値に大差はないが、外観は大きく違っていた。-方には住めるほど復興が進んだ住宅。しかしこの場に 戻ってきて再び住みたいという人は少なく、人のいる気 配はしなかった。もう一方には窓ガラスも割れ、車もパ ンクした状態のままである住宅地。8年前までは人が住 んでいたと言われても信じ難いほどの殺風景な町が広 がっていた。道を1本、それも片側1車線しかない細い 道を挟んだだけで賠償金が大きく違う。賠償金が違うこ とで住民達の間にすれ違いがおきる。そして人間関係が 大きく崩れていく…お話を伺ううちに、建物の復興など に加えて、被災者の方々の精神的なサポートが必要なの だとこの時気づいた。また、この夜ノ森地区ゲート付近 は壮大な桜並木があり、観光スポットであったという。 しかし、この事故をきっかけに帰還困難区域になったた め、以前のように多くの人に囲まれ、親しまれる桜並木 は姿を消してしまった。それを惜しんだ地元の大学生の 方々が、人が多く通う駅の付近にイルミネーションで壮 大な桜並木を再現したという。地元を思う気持ちを持つ 人が沢山いる。これが被災者の心の拠り所なのではない かと感じた。

翌日、私達はコミュタン福島を訪れ、私はそこで語り 部さんからお話を聞くことが出来た。お話を聞きながら 涙を流す仲間も見られた。語り部さんは"もう8年では なく、まだ8年"とおっしゃっていた。私たちはもう8 年経ったのかと口にする。しかし実際に被害にあった 方々の8年は辛く長いものであるという私たちとの価値 観の違いに驚いた。

"私たち大人が起こした問題であるのに、子供たちの世代で解決していかないといけないということ、本当に申し訳ない"

語り部さんの言葉は一つ一つ私達の心に大きく響いた。

私はこの話を聞いて、きっかけがなく被災された方の 気持ちを直接聞く事がない人達にも、私達のためにと辛 い思いをしてまで話してくださっている方がいるという 事実を伝えていきたいと強く感じた。

また、福島の高校生と京都の中学生。何かのきっかけがないと関わることの無い関係である。しかし、今回の交流を通してまるで本当の姉妹かのような関係を築き、別れを惜しんで涙を流した。原発事故と聞くと普通悪いイメージしかないが、事故がなければ知り得なかった人たちとの交流を思うと、私は複雑な気持ちになった。

IV. 私達はこの問題にどう向き合っていくべきか 問題を抱えながら未来を背負っていく私たちにできる ことは何か。

やっとおぼろげながらも答えが出た。考えた末、自分の中で出した答えは「知る」ということであった。今回私が参加させていただいた数々のサミットのように、知ろうと思えば知る機会はたくさん得られる。だが、私の周りにもサミットに参加するよう誘っても、「めんどくさいから」「興味がないから」等の理由で知ろうともしない人が多い。その姿は、この一連の活動に参加する前の私と重なる部分がある。なぜ知ろうとしないのか。元々は軽い気持ちで応募をしていた私にはよくわかる。「他人事」だと思っているからだ。そんな中、私たちは今回学んだたくさんの事を2時間という短い時間で同学年の人たち全員に報告会をした。すると、思いのほかたくさんの質問が寄せられた。ほんの少しでも興味を持ってくれている同級生がいることが本当に嬉しかった。

このことからも、まずは、この問題に対して関わるきっかけを持つこと。それが知ろうという気持ちにつながると私は考える。そして、今回このような貴重な体験をさせていただいた私たちは、そのきっかけを作る側にならなければいけない。決して「他人任せ」「他人事」ではいられないということをより多くの人に伝えていきたい。自分たちの未来にかかわる大きな問題である。たくさんの科学者の方々とともに、私たち中高生がしっかりとこの問題に向き合っていかなければならないのではないか。

(2019年5月31日記)



原子力白書、特集テーマは「廃止措置」

原子力委員会は9月2日の会合で、平成30年度版原子力白書を公表した。特集テーマは原子力施設の廃止措置とマネジメント。国内では24基の商業用発電所が廃止措置中あるいは廃止を決定している中で、今後は欧米諸国の先行事例を教訓に効率的で生産的な廃止措置を計画・実施し、サイト周辺住民との信頼関係を強化するこ

とに取り組んでいくことが重要だとしている。また、福島の復興・再生をとりあげた第1章では、除染廃棄物処理や特定復興拠点計画の進展、原子力事業者による不断の安全性向上や過酷事故に発生防止に関する取り組みと今後の方向性について紹介している。

(原子力学会誌編集委員会)

東電など4社、BWR共同事業化で基本合意

東京電力と中部電力, 日立製作所, 東芝の4社は8月28日, 沸騰水型軽水炉(BWR)の共同事業化をめざした検討を行うための基本合意を結んだ。福島原発事故以降, BWRの再稼働が滞っている中で, メーカーや電力

会社がこれまで培ってきた BWR に関する技術やノウハウを集積し、原発の建設や運営、保守、廃炉を安全かつ効率的に行うとともに、新しい炉の設計に向けた研究や技術開発の一元化を図ることをめざす。 (同)

福島第一廃炉国際フォーラム、地元との共生をテーマに

原子力損害賠償・廃炉等支援機構は8月4,5日,福島第一原子力発電所の廃炉について考える「福島第一廃炉国際フォーラム」を開催した。初日は福島県富岡町で地元の方々との対話型ワークショップイベントと学生セッションが、2日目は同いわき市に移り、「地元共生と廃炉プロジェクト」をテーマに国内外の専門家によるパネルディスカッションなどが行われ、2日間で延べ約1,300名(うち、ほぼ半数が福島県民)の参加者を集めた。

同機構の山名元理事長は5日のプログラム開始に先立ち、「60名の高校生たちを含め、地元の方々と活発な議論がなされた」と、前日の模様を振り返った上で、今後の燃料デブリ取り出しなど、中長期的な廃炉の進展に向けて「地域と共生すべき事業と認識する」と、今回フォーラムにおけるテーマ設定の意義を強調。「地域の持つ力を廃炉事業に活かしていく」ため、海外レガシーサイトの先行事例からも、地元との相互理解の醸成や協働について学ぶ必要があるとして、議論に先鞭を付けた。

来賓として訪れたいわき市長の清水敏雄氏は、「日々福島第一の廃炉に携わる4,000名のうち、約6割は地元の方々が占めている」と、地域の力を強調した上で、さらに長期にわたる廃炉作業の完遂に向けて「海外の知見・実績を共有して欲しい」と、有意義な議論を期待した。

「地元との共生」に関わる事例として, 英国国立原子力研究所副所長のアイヴァン・ボールドウィン氏は, 同国

カンブリア州の地域企業300社以上を集結させ、セラフィールド原子力サイトの廃炉工程だけに留まらず、地域支援にも貢献した「ブリテン・エナジー・コースト・ビジネス・クラスター」の取組を披露。また、同国からは、周辺大学との教育構想・キャリアパスの連携を通じ、優秀な技術者育成につながった事例も紹介された。

国内からは、JR 西日本の石川裕章氏が、西日本地域の人口減少傾向から「地域の衰退が将来における企業の経営課題」と強調し、地元自治体と連携したサバ養殖などにも取り組んでいることをあげ、新しい事業領域への挑戦を通じた「地域の価値向上」の必要性を原子力産業界に示唆した。

福島第一原子力発電所の地元企業としては、エイブルの中馬真理子氏が登壇。8月に着手された同社の手掛ける1/2号機排気筒解体作業の映像を披露した上で、自社の強みとして、「中小企業ならではの迅速な意思決定」、「既にある有用なパーツの組み合わせによる工期短縮」、「長年の下請けを通じた構造物の熟知」、「熱い思いと行動力」をあげ、「東日本大震災のつらい経験をプラスのエネルギーに変える」企業姿勢を強調した。

パネルディスカッションでは、フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)、英国原子力規制庁(ONR)、米国エネルギー省(DOE)から登壇者があり、それぞれの立場から地域との共生の重要性を主張。これを受け、東京電力

News

福島第一廃炉推進カンパニー・バイスプレジデントの高 原一嘉氏は、福島の復興や廃炉の安全かつ着実な進展に 向け,「技術と同時に,『地域と一体』となる必要性を強

く感じた」と述べた。

(資料提供:日本原子力産業協会)

エネ庁、福島第一の処理水に関する委員会を開催

福島第一原子力発電所の汚染水を浄化した後に残る処 理水の取扱いについて検討する資源エネルギー庁の有識 者委員会が8月9日、およそ7か月ぶりに開かれた。

汚染水は多核種除去設備(ALPS)で浄化し可能な限り 放射性物質を除去しているが、取り除くことのできない トリチウムを含んだ処理水の取扱いが課題となってい る。同委員会では、技術的観点に加え、風評被害などの 社会的影響も含めた総合的な検討を行っており、2018年 8月には説明・公聴会を東京と福島で計3回開催した。

同委員会のもと、処理水の取扱いに関わる技術的評価 を行う「トリチウム水タスクフォース」では、処分方法と して, 地層注入, 海洋放出, 水蒸気放出, 水素放出, 地 下埋設の5つに関する技術的成立性やコスト面の課題な どを比較した報告書を 2016 年 6 月に取りまとめている。 資源エネルギー庁は9日の会合で、説明・公聴会での意 見などを踏まえ、処理水の貯蔵継続を選択肢の一つとし て示し, 処分方法については「トリチウム水タスク

フォース における技術的検討を改めて確認した上で. 今後の議論を進めていくこととなった。

また、東京電力が処理水貯留の見通しについて、7月 18 日時点で約 115 万立方 m(ALPS 処理水約 105 万立方 m, ストロンチウム処理水約9万立方 m)の処理水が約 960 基のタンクに貯留されていると説明。2020 年末まで に溶接型タンクにより約 137 万立方 m の容量を確保す る計画だが、約130~170立方 m/日の処理水発生量で、 2022年夏頃には満杯となる見通しを示した。今後, 使用 済み燃料や燃料デブリの一時保管施設など、廃炉の進展 に伴い必要な施設を設置していく中、タンクエリアの効 率化を図っても、さらなる敷地が必要となるとしてい る。これまでに替わる処理水保管方式の検討としては、 地中タンク他への型式変更や敷地外保管の可能性につい ても説明し、いずれも工事期間や地元の理解などから困 難であることを述べた。 (同)

海外ニュース(情報提供:日本原子力産業協会)

【国際】

フォーラトム. 温暖化対策で 既存原子力発電所の長期運転を指摘

欧州 15 か国の原子力産業協会で構成されるフォーラ トム(欧州原子力産業会議)は7月10日、新たな政策方 針書を公表し、欧州で既存原子力発電所の運転期間を確 実に長期化する(LTO)ことができれば、欧州は地球温暖 化の防止目標を適正なコストで達成することが可能にな ると強調した。

フォーラトムの Y. デバゼイユ事務局長によると、む しろ原子力発電所でLTO を行わないまま、再生可能エネ ルギーのみで 2050 年までの中間的な低炭素化目標を達成 することは難しい。この期間にもしも、欧州連合(EU)が 既存原子力発電所における全面的な運転の維持で投資を 行うとするなら、2030年までに欧州では電力の58%を低 炭素電源から得ることになり、欧州は温暖化防止政策に おいて世界のリーダー的立場に立つことができる。

一方、そうでない場合には低炭素電力のシェアは38% に留まり、2030年までに累積で約15億トンのCO2が排 出されると警告している。

EU は EU 域内の発電部門等で追加的な投資を行うこ とにより、2050 年までに 1990 年比で温室効果ガス排出 量の80%削減は可能と考えている。低炭素経済の実現 に向けた EU のこのように意欲的な目標を達成するに は、低炭素な電源すべてを活用しなければならないと フォーラトムは指摘。既存の原子力発電所における LTOは、この移行に大きな影響を及ぼすとしており、世 界中で今世紀半ばまでに CO₂の削減目標値を達成する ためには、原子力発電が重要な役割を担うとする専門家 の数は増加しているとした。

これはすなわち、EU 域内で新規に約1億kW 規模の 原子力発電設備を建設すること、および既存の発電所で LTO を実施することの両方への投資が必要であること を意味しており、フォーラトムは域内の関係機関や加盟 国、原子力産業界が連携・協力すればどちらも達成でき ると考えている。

News

実際に、既存原子力発電所のLTOには複数の利点があるとしており、フォーラトムは例として、その他の電源と比べて経済面で有利である点を挙げた。原子力のLTOであれば多額の投資コストを必要とせず、これにより投資家や資本市場の投資リスクが低下、消費者が支払うコストも低減される。

原子力のLTOはまた、EUのエネルギー輸入依存度、特に化石燃料の輸入量を削減できるほか、送電網に対する信頼性も向上。さらに、原子力産業界が将来的に発電所の更新準備を行う際、サプライヤーや運転員の能力を維持・向上させるのに役立つとした。

原子力発電所の LTO が提供する多くの利点を EU 域内で最大限に活用するため、フォーラトムとしては以下の点を政策的勧告として提示している。

- ・欧州原子力共同体(ユーラトム)も含め、首尾一貫した 矛盾のない安定した政策枠組を EU 域内で保証する。
- ・低炭素経済に向けた欧州委員会(EC)の長期ビジョン に沿って、2050 年までに CO₂排出量を実質ゼロにす るという EU の意欲的な目標に賛同する。
- ・欧州が技術面でリーダーシップを維持できることを保証するため、強力な産業戦略を開発・実行する。
- ・人的能力の開発支援として、原子力産業界に若い人材を惹き付ける手助けを実施する。2050年の低炭素経済において、原子力には未来があるという事実をEUは一層明確に主張すべきである。

ロシアが中国の高速実験炉と 実証炉に燃料供給

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社傘下の原子 燃料製造企業である TVEL 社は7月9日,中国北京の原子能科学研究院(CIAE)で2011年7月に送電開始した高速実験炉「CEFR」(グロス出力2.5万kW)に、交換用の燃料集合体1バッチ分を供給したと発表した。

同社はまた、2017年12月から福建省霞浦で建設されている高速実証炉「CFR - 600」(グロス出力60万kW)にも燃料を供給することになっており、今年1月にはそのための契約を中国核工業集団公司(CNNC)の1部門であるCNLY社と締結。これらの高速炉用燃料はともに、モスクワ地方にあるエレクトロスタリ機械建設工場で製造された、あるいは製造予定だとしている。

CEFR 用の燃料集合体は、TVEL 社が CIAE、および CNNC 直属の国際貿易会社の中国原子能工業有限公司 (CNEIC)と結んだ契約に基づいて供給された。TVEL 社の発表によると、ロシアからの燃料供給は高速炉技術開発に関する中口協力全体のなかで不可欠の部分。ロスアトム社が直接、設計に関わった CEFR プロジェクト

に続き、中国国産炉となる CFR - 600 計画についても、 両国が協力関係にある点を強調した。

ロシアはこれまでに、江蘇省の田湾原子力発電所で100万kW級ロシア型PWR(VVER - 1000)の1~4号機を建設。中国企業が現在建設中の5,6号機では、CNNCが開発した第3世代のPWR設計「ACP1000」が採用されたものの、7,8号機については第3世代+(プラス)の120万kW級ロシア型PWR(VVER - 1200)を採用することが決まっている。ロシアはまた、遼寧省の徐大堡原子力発電所3,4号機として、同様の120万kW級VVERを建設するため、今年6月に中国と一括請負契約を締結した。

TVEL 社は中国との協力関係について、戦略的かつ圧倒的な規模を持つものだと説明している。同社はすでに、田湾発電所で稼働する4基のVVER - 1000に燃料を供給しているほか、CNNC傘下の企業が四川省宜賓市で操業中の軽水炉用燃料成形加工工場に、VVER - 1000燃料の成形加工技術をライセンス許可に基づいて移転。同工場にはまた、ロシア製の燃料取り扱い機器等も提供している。

これらに加えて同社は現在、ロスアトム社が中国で建設予定の VVER - 1200 への燃料供給についても交渉中である。

【バングラデシュ】

初の原子力発発電所にロシアが 燃料供給へ

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社傘下の TVEL 社は8月6日, バングラデシュの首都ダッカの北西 160km で建設されているルプール原子力発電所1,2号機に、原子燃料を供給する契約を同国の原子力委員会(BAEC)と締結したと発表した。

同発電所 1 号機はバングラデシュ初の商業炉として 2017 年 11 月に本格着工しており、主契約者として建設 工事を請け負ったロスアトム社傘下のアトムストロイエ クスポルト(ASE)社は、同炉の商業運転開始を 2023 年 に見込んでいる。

同社はまた、2018 年 7 月に同 2 号機の建設工事を開始しており、これら 2 基は、国際的な安全要件をすべて満たした第 3 世代 + (プラス)の 120 万 kW 級ロシア型 PWR(VVER) 「AES - 2006」を採用。2024 年に 2 号機が営業運転を開始すれば、1 号機とともに同国の電力不足解消と経済成長に寄与するとしている。

TVEL 社は、これら2基の運転期間全体にわたって燃料供給する唯一の企業となっている。契約交渉においては、ロシアのノボボロネジ原子力発電所2期工事1号機

など、先行する「AES - 2006」における効率性の高い最新式燃料の利用経験が考慮された。TVEL 社はまた、今回の契約でロシアが原子力関係で有する高い技術力を改めて実証すると強調している。

ロシアは 2009 年にバングラデシュに対して原子力発電所の建設協力を提案し、翌 2010 年に両国政府は原子力の平和利用に関する 2 国間協力協定を締結。2011 年には、原子力発電所の建設に関する協力協定を結んでおり、ASE 社は 2015 年 12 月、「AES - 2006」炉を 2 基建設するターンキー・ベースの一括請負契約を BAEC と締結した。

総工費は2基分で126億5,000万ドルと現地メディアが報じており、バングラデシュ内閣は2016年6月、このうち113億8,000万ドルをロシア政府から信用取引で借り受ける政府間協定案を承認したと伝えられている。

【中国】

CNNC が SMR の実証炉建設 プロジェクトに着手

中国核工業集団公司(CNNC)は7月19日,海南省の自由貿易試験区で,出力10万kWの多目的小型モジュール炉(SMR)「玲龍1号」の実証炉建設プロジェクトに着手すると発表した。

CNNC は 2010 年, 仏国の PWR 技術をベースに開発した 100 万 kW 級原子炉設計「ACP1000」の小型版として、第 3 世代設計となる「ACP100」の研究開発を正式に開始。同設計は 2016 年 4 月, SMR 設計としては初めて国際原子力機関(IAEA)の一般原子炉安全レビュー(GRSR)をパスしており、福建省莆田市で実証炉 2 基が建設されると見られていた。

しかし近年は、60万 kW 級 PWR「CNP600」が稼働する海南省昌江原子力発電所の近隣に SMR の建設サイトを移し、設計の呼称も「玲龍 1号」としたことが明らかになっている。

発表によると、CNNC は習近平国家主席のガイダンスに沿って、海南県との戦略的協力関係を深めていく。新たな原子力発電所を建設することで関連産業を精力的に開発し、原子力技術産業都市を構築。これらは、海南島全体の社会経済の発展にも貢献するとしている。

CNNCの説明では、「玲龍1号」には既存のPWR技術に基づいて統合型原子炉設計や受動的安全システムを導入しており、安全性の技術レベルは第3世代に達している。発電規模の柔軟性や経済性、遠隔地や山間部など特殊なサイトにおける順応性も高く、中小規模の電力供給網に対応。プロセス熱の供給や離島の海水脱塩にも利用できるなど、様々な条件下の地域やユーザーのエネル

ギー需要を満たすことが可能で、中国経済の持続的な発展に大きく寄与するとした。

CNNC は商業用「玲龍 1号」の実証プロジェクトを通じて、SMR の設計・機器製造・建設・運転に関する技術を確証するとともに、SMR 原子力発電所の操業で貴重な経験を蓄積していく方針。将来のエネルギー市場において、その他のエネルギー源や大型原子力発電所を補うだけでなく、商業用 SMR の市場も開拓する考えである。

なお、CNNC 以外では、中国広核集団有限公司 (CGN)が2016年11月、熱出力20万kWの海上浮揚式原子力発電所「ACPR50S」を開発するため、実証炉(6万kW)の原子炉容器購入契約を東方電気と締結。2020年の発電開始を目指して、正式着工している。

【豪州】

エネ相、下院常任委に原子力の 導入条件に関する調査を要請

オーストラリア(豪州)連邦政府の A. テイラー・エネルギー相は 8月 2日, 豪州で原子力発電を導入した場合に必要となる条件や状況を見極めるため, 下院・環境エネルギー常任委員会の T. オブライエン委員長に調査の実施と報告書の作成を要請した。

これは、連邦政府が将来的に原子力の導入を検討する際、現在の保守政党連合政権にせよ、あるいは労働党政権に代わった場合であれ、小型モジュール炉(SMR)も含めた原子力発電が豪州経済や環境に及ぼす影響や安全性など、適切かつ実行可能であるか見極めるのが目的。エネ相は今年中に報告書を完成させたいとしているが、実際の調査はこの要請が同常任委員会で審議・承認された後に実行される。

調査の指揮を執ることになるオブライエン委員長は、「ここ 10 数年間で原子力の利用に関して豪州で行われる最初の調査であり、豪州議会としても初めて引き受ける画期的なものだ」と指摘。原子力の有用性を立証するため、様々な質問項目を準備するとした一方、同委の構成員には、与野党や無所属など様々な議員が含まれている点を強調した。

豪州はウラン資源の埋蔵量が世界最大であるにも拘わらず、2つの連邦法により商業用原子力発電所の建設と運転を禁じている。近年は、これらの禁止条項の撤廃を求める動きが活発化しており、サウスオーストラリア州政府の核燃料サイクル委員会は2016年5月、今後数10年間に低炭素電源の1つとして原子力が必要になる可能性に言及した。

また、鉱物資源の探鉱や採掘、製錬等の企業を代表する鉱業評議会(MCA)は2017年と2018年、「感情的な誇

News

張を除いた客観的科学の議論に基づけば、原子力はクリーンで経済的かつ信頼性のある電源として、将来的にも世界中で重要な役割を果たし続ける」と連邦政府に提言していた。

エネ相がオブライエン委員長に宛てた書簡によると、連邦政府はこれまで、CO₂排出量の削減に向けた国際的義務を履行しつつ、適正価格で信頼性の高いエネルギーを供給できるようなエネルギー・システムの構築を支援してきた。原子力発電の導入モラトリアムは今後も依然として有効と見られるものの、豪州のエネルギー供給システムは、新たな発電技術や消費者の需要パターンに沿って変化していると指摘。これと同時に、豪州の電力市場では、間欠性の低炭素発電技術の容量が大幅に増加しているとした。

このような状況からエネ相は、原子力発電の導入で必要となる条件等の調査を同常任委員会に依頼したもの。 具体的な調査項目として以下の点を挙げた。すなわち、放射性廃棄物の管理・輸送・貯蔵、国民の健康と安全、環境影響、エネルギーの供給信頼性と適正価格、経済的な実行可能性、立地コミュニティとの関わり合い、従業員の能力、セキュリティ関係の影響、国民の同意――などである。

【米国】

オハイオ州で原子力発電所の 支援法案が可決成立

米オハイオ州で7月23日, CO₂を排出しない原子力発電所への財政支援を盛り込んだ法案が, ニューヨーク州, イリノイ州, コネチカット州, およびニュージャージー州に続いて立法化された。

これはオハイオ州議会で同日、可決成立した下院法案 (HB6号)に M. デウィン州知事が即日、署名したもの。州内で早期閉鎖のリスクにさらされていたペリーとデービスベッセ、2つの原子力発電所を所有するファーストエナジー・ソリューションズ(FES)社は翌24日、法案の成立を讃えるととともに、これらの原子力発電所の早期閉鎖指示を撤回し、デービスベッセでは翌春の停止期間中に燃料交換するための準備を直ちに開始するとしている。

FES 社は 2018 年 3 月、オハイオ州のこれら 2 つの原子力発電所、およびペンシルベニア州のビーバーバレー原子力発電所について、州政府から支援が得られない限り、2021 年までにすべて早期閉鎖する方針を公表。理由

として、同社の顧客エリアでは北米最大の地域送電機関 (RTO)である「PJM」が電力システムと卸電力市場を運営しており、その容量オークションで良い結果が得られないことや、電力価格の低迷、電力需要の将来的な伸び悩みなどを挙げていた。

FES 社はその後、同様にファーストエナジー社の子会社である2社とともに、同月末に連邦破産法の再建型処理手続、第11条の適用を州内の破産裁判所に申請している。

HB6号法案は、クリーンなエネルギー源と認定された電源に対して、発電量 1MWh 毎に一定の行使価格を設定した「クレジット」を付与し、州内で低炭素な電源を維持・開発することを目的としたもの。今年4月にオハイオ州の下院議員 11名が超党派で議会に提出した。

【英国】

ジョンソン新首相,原子力発電の 強力な後押しを約束

英国政府の与党・保守党の党首選に勝利し、同国の新たな首相に就任した B. ジョンソン氏は 7月 25日、議会下院で新政権の優先項目について声明文を発表した。

首相はこのなかで、「原子力が英国のエネルギー・ミックスの一翼を担わねばならないことを固く信じている」と発言。総電力需要量の約18%を賄う既存原子力発電所のほとんどが、2030年までに営業運転を終了することから、メイ政権に引き続いて新規の原子力発電所建設に強い意欲を示した。

この発言は、カンブリア州コープランド選出の T. ハリソン議員が「英国は今や、原子力ルネッサンスの好機を迎えていると思うか。また、コープランドは原子力の中核的研究拠点たり得るか」と質問したことへの回答。コープランドは、セラフィールド原子力複合サイトや建設計画が頓挫したムーアサイド原子力発電所建設サイトを擁する 1 都市で、2008 年には放射性廃棄物深地層処分施設(GDF)の受け入れに関心表明していたが、州政府の反対により建設サイトの選定プロセスは 2013 年に白紙に戻っている。

ジョンソン首相は、原子力ルネッサンスに関するハリソン議員の認識は全く正しいとした上で、達成が危ぶまれるような意欲的な CO_2 排出量の抑制目標に対しても、原子力はこれを満たす一助として役に立つとの見解を表明している。

原子炉ニュートリノの科学と技術の進展 不毛のニュートリノから原子炉炉心監視まで

東京工業大学 吉田 正

ニュートリノは基本粒子の中で最も捉えどころのない粒子である。その存在は比較的早く1930年代初頭にはほぼ受け入れられたが、存在が確証されるまでは四半世紀を要した。ニュートリノが質量を持つか否かと言う基本の基本が確定したのは更に40年後。その一方でこの謎の多い粒子は、素粒子論や天体核物理学のあらゆる局面に顔を出し、その発展の狂言回しの役割を演じて存在感を増し続けてきた。ニュートリノを遮るには鉛板にして数光年の厚さが必要だが、この物質との関わり(相互作用)が超絶的に弱いという性質が逆に原子炉運転遠隔監視への応用の道も開く。現在も謎の多いこの粒子を追って十指に余る大型実験が進行中であるが、それぞれ奇抜とも言えるユニークなアイデアが光る。

KEYWORDS: reactor neutrinos, sterile neutrinos, neutrino oscillation, neutrino mass, core monitoring

I. はじめに

若いころ勤務していた T 社研究所図書館でソヴィエト の原子力論文誌「Атомная Энергия (Atomnaya Energia)」 をめくっていて、原子炉格納容器直下に置かれた大きな 粒子検出器の図を見つけた。興味が湧き、辞書にかじり ついてあらすじを追った。ソ連が人類史上初の人工衛星 を打ち上げた直後のいわゆる「スプートニクショック」の 雰囲気が残る中で学生生活を送った筆者は、これからの 科学技術はロシア語の時代だと脅されてほんの少し勉強 したものの、結局これがロシア語で読んだ人生唯一の論 文となった。それはニュートリノによる原子炉燃焼度監 視の論文で、実際に実験も行われている。しかしそのと きの筆者の反応は「そんなことできる筈ない!」であった。 なにせベータ線はアルミ薄板で、ガンマ線は厚めの鉛で 遮ることができるのに、ニュートリノを遮るには鉛板に して数光年の厚さが必要というシロモノである。物質と の関わり(相互作用)が超絶的に弱いのである。あのころ はАтомная Энергияは覇を競うアメリカで逐次翻訳され. "Soviet Journal of Atomic Energy"という雑誌名で数ヶ月 遅れで刊行されていた。現在これはシュプリンガー社に 引きつがれ "Soviet Atomic Energy", 更に "Atomic

Progress of Science and Technology in Reactor Neutrinos; From sterile neutrinos to core monitoring: Tadashi Yoshida. (2019年7月3日 受理) Energy"と改題され刊行が続いている。本稿執筆に当たり、バックナンバーから「あの」論文 $^{1)}$ を探し当てたがその先見性に驚かされた。



Ⅱ. 時代はかわって

本年4月ウィーンでIAEA主催の原子炉ニュートリノに関する国際会議があり出席した。中国からPWR近くの地下に設置された大きな検出器(図1)からの測定データが提示された。そこには原子炉運転状況はもちろん、ウラン燃焼・プルトニウム蓄積に従ってゆっくり減



図 1 中国 Daya Bay 原子力発電プラントに設置されたニュートリノ Gd ドープ型液体シンチレーション検出器 Credit: R. Kaltschmidt, Lawrence Berkeley National Laboratory

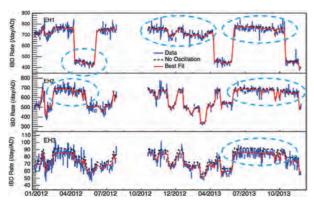


図 2 Daya Bay ニュートリノ振動実験で得られた 2 年間にわたるニュートリノ反応数の変動 2)。近傍には 6 機の PWR があり、検出器位置も異なる $(EH1\sim3)$ ため、挙動は複雑である。

Credit: The Daya Bay Collaboration

少してゆくニュートリノイベントがはっきり刻印されている(図2の特に破線で囲んだあたりにご注目を)。プルトニウム燃料からのニュートリノ放出数はウラン燃料の場合より少ないためである。あの論文は決して夢物語ではなかった。

Ⅲ. 原子炉ニュートリノ小史

地球上に住む我々の体を毎秒数十兆個のニュートリノが貫通してゆく。何処にいようと今のあなたも例外ではない。しかし何事も起こらない。冒頭に記したように、物質との相互作用が超絶的に弱いためである。その主要な成分は太陽からやってくる太陽ニュートリノ(電子型ニュートリノ ν_e),銀河の果てからやってくる宇宙線が地球大気上層で反応して作り出す大気ニュートリノ(ミュー型ニュートリノ ν_μ),そして原子力発電所の近くならこれに原子炉ニュートリノ(電子型反ニュートリノ $\overline{\nu}_e$)が加わる。

原子炉ニュートリノは核分裂で直接作り出されるのではない。中性子過多のため不安定な核分裂生成核(FP)がより安定な状態を求めてベータ(マイナス)崩壊する際に、電子(ベータ線)の相棒として放出されるのである。生まれたニュートリノは何事も起こさず易々と地球を貫通し宇宙の果てへと飛び去る。これを遮るには厚さ数光年の鉛板が必要だったことを思い出して頂きたい。このニュートリノの生まれ方は原子炉崩壊熱の発生と裏表の関係にあり、同じ現象のもう一つの側面に過ぎない。すぐ熱化するか(電子)、何事も引き起こさずに彼方へと飛び去るか(ニュートリノ)が違うだけである。

ベータ崩壊に際し放出されるベータ線のエネルギー分布は連続的である。ある上限値以下のどんな値も取りうる。あたかもエネルギー保存則が成り立たないかのように。実際、量子力学の生みの親の一人であるニールス・ボーアはベータ崩壊に際してはエネルギーが保存されないという立場をとった。一方、リーゼ・マイトナーらへ

の書簡(1930)で、ウォルフガング・パウリは残りのエネ ルギーは未知の(謎の?)中性粒子が持ち去ると提唱して エネルギー保存則を救った。パウリくらいになると、論 文に書かなくとも、手紙を出しただけで歴史に名が残 る。3年後、エンリコ・フェルミはそのベータ崩壊理論 にパウリの謎の粒子を持ち込み、理論の中核に据えて ニュートリノと名付けた。フェルミ理論は今も生きてい る…僅かな、しかし甚大な意味を持つ付け足しがなされ て(後出)。パウリの予言から四半世紀ののち、米国の Frederick Reines と Clyde L. Cowan がサヴァンナリ バーの原子炉から放出されるニュートリノを検出し、そ の実在を確証した。以来ニュートリノは素粒子論や天体 核物理学のあらゆる局面に顔を出し、その発展の狂言回 しの役割を演じ続けている。ライネスがノーベル賞を受 けたのが、実験から 40 年を経た 1995 年(カウワンは既 に死去)であるのは、ニュートリノの重要性が40年の時 とともにひたすら増大し続け、ノーベル賞選考委員会は 「ニュートリノがこれほど存在感を増してしまった以上 授与しないわけには行くまい」と考えたように思えてな らない。

IV. 右巻き、左巻き、そして不毛の ニュートリノ

ニュートリノには「右巻き」と「左巻き」がある。言葉の 遊びではない。中性子も電子もニュートリノもスピンと いう量子力学特有の性質を持つ。あえて我々の直感に結 びつけるなら、「ニュートリノは自転している」。自転が ニュートリノの進行方向に向かって時計回りだと右巻 き、反時計回りだと左巻きと呼ぶ。そして自然は左巻き ニュートリノ(同時に右巻き反ニュートリノ)を依怙贔屓 する。それも 100%完全に。これがフェルミのベータ崩 壊理論にその後なされた唯一の本質的変更である。そし て中性子過剰核である FP のベータ(マイナス)崩壊で生 まれるニュートリノは全て電子の相棒の右巻き反ニュー トリノ $(\bar{\nu}_e)$ である。一方、太陽で起きているのは陽子と 陽子の衝突から始まる核融合反応であり生成される原子 核は全て陽子過剰だから、起きるのは陽子が中性子に変 わり陽電子を放出するベータ(プラス)崩壊である。その ため太陽ニュートリノは陽電子の相棒である左巻き ニュートリノ(ν_e)なのである。ややこしい。

結果、この選に漏れた右巻きニュートリノと左巻き反ニュートリノはこの世の物質(大きく言えばこの宇宙全体)とはきっぱり関係を絶たれ、我々とは縁のない幽霊のような存在となる。この一対は Sterile Neutrino(不毛なニュートリノ)と名付けられた。原子力関係者は Fertile (238U に代表される燃料物質に転換可能な「多産な」重核)という言葉に馴染みがあるので、Sterile は Fertile の対義語だと言えば通りが良いかもしれない。

V. ニュートリノの種類とその質量

2015年にノーベル物理学賞を受賞した梶田隆章氏の受賞理由にはこのように書かれている。

「(基本粒子の)標準理論」にはニュートリノと呼ばれる 三種類の極小で捉えどころのない粒子が現れる。梶田隆 章は日本の鉱山跡に設置されたスーパーカミオカンデ実 験施設で地球大気と宇宙線の反応で創られたニュートリ ノを観測した。実験結果は、異なる種類のニュートリノ の間での振動に起因するズレを明示した。これはニュー トリノには質量があることを意味する。しかし「標準理 論」ではニュートリノには質量が無い。従って「標準理 論」は訂正されなければならない。

(ノーベル財団ホームページより、筆者抄訳訳)

この文章中の二つの事柄は特に重要である。一つ目は ニュートリノにはいくつか種類があるということで、本 稿でも電子型ニュートリノ(ve)だの、ミュー型ニュート リノ(ν_и)などとすでに断りもなく分類を行ってきた。あ らためて記すと、ニュートリノには、電子型(ve)、 ミュー型 (ν_{μ}) それにタウ型 (ν_{τ}) の三つの種類がある。こ れに各々の反粒子 $(\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau)$ が加わる。これをフレー バーによる分類と呼ぶ。空間にはx, y, zの三つの基軸 があるように、基本粒子には何故か三つの階層(世代と も言う)がある(理由は誰も知らない)。赤、黄、青が「色」 という概念で区別されるように、基本粒子の三つの階層 は「フレーバー」という概念で区別される。この三層構造 への深入りは筆者の能力の及ぶところではないものの. かつて拙文³⁾で少しだけ説明を試みたことがあるのでご 一読くだされば幸いである。そして近年、各国の原子炉 ニュートリノ実験結果に現われた兆候から前述した Sterile Neutrino が四つ目のニュートリノとしてこれに 加わる可能性が大きく取りざたされた(三層構造に抵触 はしない)。これに触発され、筆者らも原子炉ニュート リノの計算に少し手を染めた 4 。それが冒頭に述べた IAEA 会議出席、更には本稿執筆へと繋がるのだから、 袖すりあうも他生の縁である。

二つ目はそれまでの定説を裏切ってニュートリノが (光子と違い)質量を持つことが分かったことである。結論から言えばニュートリノには三つの互いに異なった質量の状態がある。そこで、ニュートリノをその質量を基軸に三種類に分類することもできる。この分類ではニュートリノは ν_1 , ν_2 , ν_3 と表記される。質点を表現するための xyz 座標をどこにどう取ってもニュートン方程式はかわらないのと同じように、フレーバー表現を取ろうが、質量表現を取ろうが、両者は物理的に同等である。肝心な点が一つ。あるフレーバーのニュートリノ、例えば ν_2 は、 ν_3 の重ね合わせになっているとい

う点である。具体的には

$$\nu_e = A \nu_1 + B \nu_2 + C \nu_3 \tag{1}$$

と表される。式(1)中では4つの ν はニュートリノの状態を表す数学的記号である。 ν_e , ν_μ , ν_τ をフレーバーの固有状態、 ν_1 , ν_2 , ν_3 を質量の固有状態と言う。話を簡単にするために(1)で ν_3 を省いてしまえば ν_e = $A\nu_1+B\nu_2$ となる。「粒子は波であり,波は粒子である」と言う量子力学の破天荒かつ挑発的な鉄則がここでも生きてくる。ニュートリノが波として空間を伝わるあいだ, ν_1 と ν_2 は波として振動する。僅かに振動数の異なる二つの音叉の音が混ざるとワーンワーンと唸りを生じるように, ν_1 と ν_2 の二つの振動数の差を振動数として ν_e は周期的に増減を繰り返す。これがニュートリノ振動である。 ν_1 と ν_2 が質量を,それも互いに異なった質量を持たなければニュートリノ振動は生じな ν_1 。

ここでニュートリノ振動の発見の物語に触れておかな いわけには行かない。Raymond Davis がサウスダコタに ある Homestake 鉱山の地下 1,500m に置かれた 40 万リッ トルタンクを満たす perchloroethylene (C₂Cl₄,何と洗濯 用クレンザー)中の³⁷Cl 原子核が太陽ニュートリノレeと反 応してできる放射性の³⁷Ar原子の数を一個一個数えると いう気の遠くなるような測定で(いま云うところの) ニュートリノ振動の兆候を掴んでからノーベル賞受賞 (2002年)まで30年。ノーベル財団のホームページから 彼の受賞講演を PDF でダウンロードできるが⁵⁾, これは 半世紀にわたる努力と幸運が綾なす感動的な物語となっ ている。そして、彼が観測したのが本当にニュートリノ 振動であることを確定したのが日本のスーパーカミオカ ンデとカナダの SNO (Sudbury Neutrino Observatory) で の実験であり、本節冒頭で述べた2015年ノーベル賞は両 者の共同受賞である。

Ⅵ. ニュートリノの検出

話を本稿の主題である原子炉ニュートリノに戻そう。 以降、簡単のため電子型ニュートリノ $(\bar{\nu}_e$ および ν_e)も単 にニュートリノと呼ぶ。すでに述べたように、原子炉 ニュートリノは FP のベータマイナス崩壊(基本型は $n \to \bar{\nu}_e + e^- + p$)をその源とする。ニュートリノ検出には、 この逆反応(Inverse Beta Decay: IBD)が使われる。図3 を参照されたい。陽子p(x)中あるいはシンチレータ中 には水素原子核としてふんだんに存在する)にニュート リノが吸収されると陽子は中性子に変じ(これは稀有な 現象だが皆無ではない)、同時に陽電子 e^+ が放出される。 陽電子は物質中の電子との衝突等を経てすぐエネルギー を失い、そこいらにいる電子を捕まえて対消滅し(電子、 陽電子は互いに相手の反物質)ガンマ線に変ずる。中性 子の方も水素原子核と何度も衝突を繰り返して最後には やはりそこいらにいる水素原子核と合体して 2.2MeV の

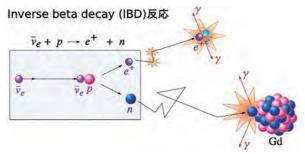


図3 IBD 反応によるニュートリノの検出 Credit: S. Okumura, IAEA

ガンマ線を出し重水素原子核となる。これを光電子増倍管で観測すれば、まず e^+ に由来する鋭い光のピークが見え、数十マイクロ秒後に 2.2 MeV ガンマ線に由来するピークが見える。ガドリニウムやリシウム 6 など中性子捕獲断面積の大きな物質を検出器中にドープしておけば検出の効率は有意に向上する。

10年ほど前から上記 IBD 反応に基づき、商業用動力 炉の高いニュートリノ束を用いたニュートリノ振動実験 が仏, 中国(図 1, 2 の Daya Bay 実験), 韓国で大きな成 果を出し始めた。目的は次のブレークスルーのための実 験データの蓄積と精度向上である。ところで、なぜ宇宙 は物質でできていてそこには反物質がないのか? それ は、宇宙開闢時、自然が極々わずかながら物質の方を依 怙贔屓したためと考えられているが(CP 対称性の破 れ), 実験結果はこんな壮大な話にも繋がって行く。や がてデータが蓄積されるに従い、仏、中、韓すべての実 験結果(ニュートリノ総数)が事前予測より7%程度小さ いことが問題となった。そして炉心内で生まれたニュー トリノの一部が Sterile Neutrino に変身しているのでは ないかとの説も唱えられ大きな議論となった。前章で触 れた話だが発端はここにある。議論はまだ決着を見てい ない。

Ⅷ.ニュートリノを使った原子炉運転監視

「はじめに」で述べたニュートリノによる原子炉運転監視にも進展が見られる。Virginia Tech の Jonathan Link 氏は 6cm×6cm の立方形個体シンチレータを多数個立方 (乃至直方) 体状に並べた小型 IBD 検出器 CHANDLER を開発している。同氏がその原型 miniCHANDLER を積んだトレーラー "Mobile NEUTRINO LAB" (図 4) を実際にヴァージニア州の North Anna プラント原子炉建屋横に乗り付けて採ったデータからは原子炉の稼動/停止がはっきりと見て取れる。炉心監視となると、検出器の①小型軽量化、②可動化、③地表レベル高バックグランド下での稼動性等がポイントとなるだろう。実際、炉心監視を視野に、独自の優れたアイデアで Gd や 6Li をドープした小型シンチレータの開発が他にも米国や欧州で行われている。これにより 1~3 メートルサイズの地表近くに置



図 4 原子炉運転監視用ニュートリノ検出器を搭載したトレーラー試作機 Mobile NEUTRINO LAB と開発者 Link 氏 Credit: J. Link, Virginia Institute of Technology

かれた小型検出器でも、時間さえかければ、そして炉心にさえ近ければ、 $\bar{\nu}_e$ のさまざまな測定が可能な時代になっているのである。

Ⅷ. おわりに

いまもユニークなアイデアに基づいて優に十を越える さまざまな大規模ニュートリノ実験が計画・進行中であ る。特に印象が強い進行中の二例を紹介して本稿を閉じ よう。まず欧米を中心にした国際共同実験 IceCube は、 南極の深層氷そのものをほぼ 1km×1km×1km の六角 柱状の超巨大シンチレータとして使い、深宇宙からやっ て来るいろいろなニュートリノを捉えて宇宙で起きてい る様々な(往々にして激烈な)天体現象に関わる謎を解明 しようとしている。ところで、これまで述べてきた各種 ニュートリノ振動実験からは異なる質量の二乗の差は求 められても質量そのもの(絶対値)は分からない。ドイツ の KATRIN 実験は、トリチウムのベータ崩壊に伴う電 子スペクトルの振る舞いを極めて高い精度で測定し、そ こからニュートリノ質量を決めるための実験である。 ミュンヘン北郊の工場で巨大な電子スペクトロメータを 製造し、トリチウムハンドリングで実績のあるカールス ルーエに運んだ(実験開始は2018年)。アウトバーンを 飛ばせば1時間半ほどの距離だが、カーブが多く高低差 が激しい。どうしたかというと、艀に乗せてドナウ河を 下り、ウィーンを右に見て更にブダペスト、ルーマニア /ブルガリア国境に沿って黒海へ。黒海からボスポラス 海峡→エーゲ海→地中海→ジブラルタル海峡→そして大 西洋へ出る。スペイン沖で180度向きを変え、英仏海峡 を通ってライン河に入りこれを遡上、カールスルー工近 郊で陸揚げし研究所へ、という 8,600km の壮大な迂回を 敢行した。図5は研究所到着直前の写真と思われる。実 験への執念が視覚化されている。

ニュートリノの理論と実験はこれから佳境を迎えようとしている。タイムスパンの極めて長い展開となることは間違いないが、少しでも長く今後の進展に興味を持ち続けたいという想いが筆者にはある。



図5 ニュートリノ質量を測定するための巨大電子スペクトロ メータ KARIN の中核部。ここから東に 220km の Deggendorf の工場で製作され 8,600km に及ぶ大迂回を終 えて陸揚げ直後の写真。

Credit: KATRIN Experiment, Karlsruhe Institute of Technology⁶⁾

- 参考文献 -

- 1) V.A.Korovkin et. al., Atomic Energy, 56 (1984) 233-239.
- 2) F.P.An et al., Chinese Physics C 41, 013002(2017).
- 3) 吉田正, 本誌 Vol.56 No.8(2014)521-524.
- 4) T.Yoshida, T.Tachibana, S.Okumura, S.Chiba, Phys. Rev. C 98, 041303(R) (2018).
- 5) https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2002/davis/ lecture/
- 6) https://www.katrin.kit.edu/

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)核物理・核データ, 炉物理



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)

- ・7月16日から8月15日までに英文論文誌に17報,和文論文誌に1報の 新規投稿が有った。
- ・英文化 WG の進捗状況が報告された。特に公開の方法に関して議論した。 理事会に製本および配布先・公開方法等説明資料を提出する。
- ・学会賞論文賞への推薦候補論文について検討した。
- ・第7分野の編集委員体制の整備計画を承認した。
- ・論文誌 Special Issue 実施要領の改訂案を検討した。

(9月3日第3回学会誌編集幹事会)

- ・2020年3月号,2021年3月号で企画している,福島原発事故の特集号に ついて検討を行った。2021年にシンポジウムの企画案も出ていることか ら、これに合わせて検討を行っていくこととした。
- ・学会誌アンケートサマリの内容を確認した。今回出たコメント に対応 した修正を加え、掲載に向けて作業進めていく。
- ・巻頭言, 時論, その他の記事企画の進捗状況を確認し, 掲載予定について 検討した。

編集委員会連絡先≪hensyu@aesj.or.jp≫

プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義130年ぶりの定義改定とその影響

産業技術総合研究所 藤井 賢一計量標準総合センター

2018年11月にメートル条約にもとづいて開催された第26回国際度量衡総会において、国際単位系(SI)の定義を大幅に改定することが採択された。これによって、SIの根幹をなす7つのSI基本単位のうち、キログラム、アンペア、ケルビン、モルの定義が基礎物理定数にもとづく新しい定義へと移行した。特に、キログラムについては国際キログラム原器による定義が廃止され、130年ぶりにその定義が改定された。本稿ではプランク定数にもとづくキログラムの新しい定義の概要について解説し、定義改定の影響について述べる。

KEYWORDS: SI, redefinition, kilogram, Planck constant, Avogadro constant, Kibble balance method, watt balance method, X-ray crystal density method, CODATA

I. はじめに

「物理量」は「数値」と「単位」の積で表されるので、単位を統一しておけば世界共通の尺度で物理量の大きさを互いに正しく認識することができる。このため古くから幾つかの基本的な単位が用いられてきた。例えば、キログラムの由来は水1Lの質量であり、その定義には国際キログラム原器(International Prototype of the Kilogram: IPK)と呼ばれる白金イリジウム合金製の分銅(図1)が用いられてきた。ケルビンも元々は水の氷点と沸点との温度差を100等分することから出発したものである。キャンドルを語源とするカンデラは、蝋燭(ろうそく)1本分の明るさが基準だった。このようにSIでは日常生活だけでなく産業、商業、貿易などの社会活動においても便利な大きさの物理量が単位として選ばれてきた。

その後、科学技術の進歩とともに、多くの単位の定義は変遷を重ね、より普遍的で再現性の高い定義へと移行してきたが、質量の単位であるキログラムだけは 1889 年に定義されて以来、IPK にもとづく定義が使われ続けてきた。しかし、人工物である限り、IPK の質量安定性には限界がある。国際度量衡局(BIPM)による各国のキログラム原器の質量校正は、およそ 40 年に一度の周期で実施されてきたが、最後に実施された第 3 回定期校正のと

New definition of the kilogram based on the Planck constant; the first redefinition of the kilogram in 130 years and its influence: Kenichi Fuiii.

(2019年7月5日 受理)

きに得られた知見によれば、IPK の質量は表面に付着する空気中の有機物などの影響によって徐々に増加し、1988 年に 48 年ぶりに IPK の表面を洗浄した際に、その質量は洗浄前と比べて約 $60~\mu g$ 減少した。また、メートル条約加盟各国に配られたキログラム原器 (IPK の複製品)と IPK との質量差の変動の記録によれば、各国のキログラム原器の質量の方が IPK よりも $100~\mu g$ 増加してきている傾向にある。逆の見方をすれば IPK の質量がそれだけ減少したとも考えられるが、これまでは絶対的に安定な質量の基準がなかったので、どち



図1 1889 年に質量の単位として定義された国際キログラム 原器(IPK)。白金90%, イリジウム10%から成る合金製 の分銅。直径, 高さともに約39 mmの直円筒型。写真提 供:国際度量衡局(BIPM)。

らが変動したのかを知る術はない。このため、IPK に頼る限り、キログラムという単位の安定性は相対的に $5 \times 10^{-8} (1 億分の5)$ 程度が限界であると考えられている。

このような経緯から、基礎物理定数などの決して変わることのない普遍的な定数によってキログラムの定義を改定することの重要性が認識されるようになり、キログラムの他にアンペア、ケルビン、モルの定義にも基礎物理定数による新しい定義を導入することが検討されてきた $^{1\sim3}$)。そして、上記の4つの SI 基本単位の定義にそれぞれプランク定数h、電気素量e、ボルツマン定数k、アボガドロ定数 N_A を用いることが 2018 年 11 月 16 日に開催された第 26 回国際度量衡総会 (CGPM) で採択され、新しい定義が 2019 年 5 月 20 日の世界計量記念日から施行された。

Ⅱ. キログラムの新しい定義

キログラムの新しい定義としては、原子の数から質量を決めるアボガドロ定数 N_A にもとづくものと、質量とプランク定数 h とを関係づけるものとが検討されてきた $^{1)}$ 。

例えば、原子の数を用いれば「キログラムは基底状態にある静止した $5.018\cdots\times10^{25}$ 個の自由な炭素原子 12Cの質量に等しい」と定義することができる。ここで、 $5.018\cdots\times10^{25}$ という数値は $N_{\rm A}=6.022\cdots\times10^{23}~{\rm mol}^{-1}$ の数値の部分を 1000/12 倍して求められる。

一方,プランク定数にもとづく定義は比較的最近注目されるようになった考え方である。アインシュタインの関係式(特殊相対性理論と光量子仮説)を用いればエネルギーを $E=mc^2=hv$ と表すことができる。ここで,mは物体の静止質量,vは光子の周波数である。エネルギーと質量が等価であり,しかも光子の周波数によってそのエネルギーを表すことができることを考えれば,静止質量mと等価なエネルギーをもつ光子の周波数は $v=mc^2/h$ として表される。真空中の光の速さc=299792 458 m/sは1983年のメートルの定義改定以来,既に不確かさのない定数になっているので,mに 1 kg を代入してプランク定数 $h=6.626\cdots\times10^{-34}$ Js を不確かさのない定数として定義してしまえば「キログラムは周波数が[(299 792 458) $^2/(6.626\cdots\times10^{-34})$] ヘルツの光子のエネルギーと等価な質量である」と定義することもできる。

何れの定数によってキログラムを定義すべきであるのかが議論されてきたが、重要なことはこれら2つの定数が互いに関係づけられるということである。 M_e を電子のモル質量(1 モルあたりの質量)、 α を微細構造定数、 R_∞ をリュードベリ定数、cを真空中における光の速さとすると、量子力学の関係式から電子の質量は m_e = $2hR_\infty$ / $(c\alpha^2)$ として表される。定義から N_A = M_e / m_e なので、 N_A とhの間には次に示す関係が成立する。

$$N_{\rm A} = \frac{cM_{\rm e}\alpha^2}{2R_{\,\omega}h}\tag{1}$$

上式右辺において h を除く基礎物理定数群は定義改定前の時点において 4.5×10^{-10} の相対標準不確かさで既に求められていた 4 。これはアボガドロ定数やプランク定数についての測定の不確かさよりも十分に小さいので、式(1) は $N_{\rm A}$ と h が互いに十分に小さな不確かさで関係づけられることを示している。したがって、何れの定数を用いてもキログラムを定義することが可能である。

ところで、電磁気学の分野では、極低温での量子現象を利用して、ジョセフソン効果と量子ホール効果から、ジョセフソン定数 $(K_{\rm J}=2e/h)$ とフォンクリッツィング定数 $(R_{\rm K}=h/e^2)$ を用いて、極めて高い再現性で電圧と電気抵抗の基準を設定することが実用化されている $^{5)}$ 。そこで、キログラムの定義にプランク定数 h を採用し、アンペアの定義に電気素量 e を採用すれば、SI の定義として電圧と電気抵抗の基準を設定することが可能になる。このため、今回の定義改定ではキログラムの定義としてプランク定数 h の値を明示する以下の表現方法が採択された。

・キログラムは質量の SI 基本単位であり、プランク 定数を単位 J s(kg m² s⁻¹に等しい)で表わしたとき に、その数値を 6.626···× 10^{-34} と定めることによって定義される。

同様にアンペア、ケルビン、モルの新しい定義にもそれぞれe, k, $N_{\rm A}$ の値を明示する表現方法が採択された。

Ⅲ. プランク定数

1. キッブルバランス法⁶⁾

プランク定数を精密に測るために従来からワットバランス法と呼ばれる電気的な測定方法が用いられてきた。 最近では原理発明者(Bryan Kibble)に因んでキッブルバランス法とも呼ばれている。

図2に示すように、電流測定モードにおいて磁束密度

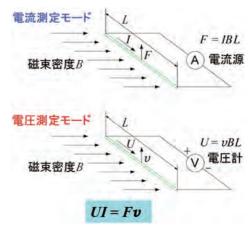


図 2 キッブルバランス法による仕事率の測定原理。電子力 F と速度 v の積は電圧 U と電流 I の積に厳密に等しくなる。

Bの磁場中にある長さLの導体に電流Iを流すと電磁力F=IBLが発生する。次に電圧測定モードにおいて、この導体を同じ磁場中において速度vで移動させると電圧(誘導起電力)U=vBLが発生する。このとき電気的な仕事率UIが厳密に力学的な仕事率Fvに等しくなることを発見したのがキッブルであり、この方法がワットバランス(仕事率天びん)と呼ばれる由縁である。

ここで、 n_1 をシャピローステップの数を表す整数、 f_1 をジョセフソン接合素子に照射するマイクロ波の周波数とすれば、電圧 Uをジョセフソン電圧 $U_{J1}=n_1f_1/K_J$ として表すことができる。また、量子化ホール抵抗 $R_H(i)=R_K/i(i$ は整数)によって校正された標準抵抗の抵抗値を $R=bR_H$ とする。ここで、b は無次元の校正定数である。この標準抵抗に電流 I を流し、この標準抵抗の両端に生ずる電位差をジョセフソン電圧 $U_{J2}=n_2 f_2/K_J$ として表せば、ジョセフソン効果と量子ホール効果から電流 I を U_{J2}/R として測定することができる。このとき、電気的仕事率は次式で表される。

$$UI = \frac{U_{\rm J1}U_{\rm J2}}{R} = \frac{i \, n_1 n_2 f_1 f_2}{4 b K_{\rm J}^2 \, R_{\rm K}} = h \frac{i \, n_1 n_2 f_1 f_2}{4 b} \tag{2}$$

式(2)において電気的仕事率 UI は力学的仕事率 Fv に等しいので,重力加速度 g のもとで質量 m の物体に加わる重力 mg と釣り合うように電磁力 F を制御すれば,プランク定数 h は次式から求められる。

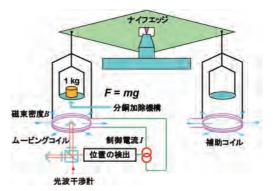
$$h = \frac{4}{K_{\rm J}^2 R_{\rm K}} = \frac{4bFv}{i \ n_1 n_2 f_1 f_2} = mgv \frac{4b}{i \ n_1 n_2 f_1 f_2} \tag{3}$$

式(3)において、電磁力Fと速度vは、質量、長さ、時間の測定から求められる。したがって、ジョセフソン効果と量子ホール効果を用いることによって、キッブルバランス法から従来のSI単位の定義にしたがってプランク定数hを絶対測定することができる。キログラムの定義改定後には、逆にプランク定数hを基準として式(3)から物体の質量mを求め、キログラムの新しい定義を実現する。

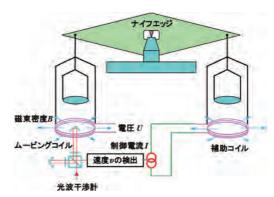
図3にラジアル磁場(中心から周囲に湧き出る磁場)を用いた測定原理を示した。ラジアル磁場を用いると、ムービングコイルの移動範囲にわたってほぼ均一な磁場が得られ、また、移動コイルを通過する全磁束が、コイルの大きさや形によらずにほぼ一定に保たれるので、安定性の高い測定が可能になる。ムービングコイルとラジアル磁場を用いても *UI=Fv* という関係が保たれる。

2. X 線結晶密度法⁷⁾

図4に示すように珪素の結晶は立方晶であり、その1辺の長さを格子定数aとする単位胞(unit cell)には平均で8個の原子が含まれ、その体積はa3である。珪素の単位胞の密度、すなわち、微視的な密度が巨視的な密度 ρ に等しいものと仮定すると、アボガドロ定数 N_A は次式から求められる。



(a) 電流測定モード



(b) 電圧測定モード

図3 ラジアル磁場を用いたキッブルバランス法による仕事率の測定原理。(a)磁東密度 B の磁場中にあるムービングコイルに流す電流 I を制御し、1 kg の物体に働く重力 mg と電磁力 F とを釣り合わせる。(b) このムービングコイルが同一の磁場中において一定速度 v で移動するよう補助コイルの電流を制御し、ムービングコイルに生じる電圧(誘導起電力) U を測定する。

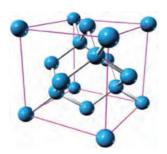


図 4 珪素の結晶構造。この単位胞には平均で8個の原子が含まれる。格子定数 α はこの立方体の一辺の長さとしてX線干渉によって求められる。

$$N_{\rm A} = 8M({\rm Si})/(\rho a^3) \tag{4}$$

ここで、M(Si)は珪素の平均モル質量を表す。自然界の珪素には安定同位体 28 Si、 29 Si、 30 Si がそれぞれ約92%、5%、3%の割合で存在する。これらの核種の相対原子質量 $A_r(^i$ Si)は 10^{-10} よりも小さい相対標準不確かさで既に求められているので、それぞれの核種の存在比を質量分析計で測定すれば、その平均モル質量 M(Si)を求めることができる。しかし、従来の測定には自然界に

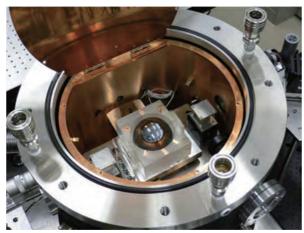


図 5 珪素結晶の球体の直径(約94mm)を原子レベルの精度 で測るレーザ干渉計⁹⁾。

存在する珪素が用いられていたので、同位体存在比の測定精度に限界があり、IPK の質量安定性を超える精度でアボガドロ定数を測ることができなかった。

この問題を解決するために、²⁸Si だけを同位体濃縮し た単結晶を作り、アボガドロ定数を高精度化するための アボガドロ国際プロジェクト(International Avogadro Coordination: IAC) を産業技術総合研究所の計量標準総 合センター(NMII)では 2004 年から開始した $^{8)}$ 。このプ ロジェクトにはドイツとイタリアの研究機関の他に BIPM なども参加し、遠心分離法による同位体濃縮、化 学精製, 多結晶化などを経て 99.99%まで同位体濃縮し た5kgの²⁸Si単結晶が得られた。そして、密度の測定 精度を極限まで向上させるために、質量約1kg, 直径約 94 mm の球体 2 個をこの結晶から切り出して研磨し、そ れらの直径測定、表面分析、質量測定などから密度を求 める方法を採用した。真球度の高い球体の体積はその平 均直径から小さい不確かさで求めることができるので, NMIJ では図5に示す直径測定用のレーザ干渉計を開発 し、約 2300 方位の直径測定からその体積を測った⁹⁾。こ のように、アボガドロ国際プロジェクトでは、²⁸Si 同位 体濃縮結晶の格子定数、密度、モル質量などの精密計測 から N_{Δ} を求めた¹⁰⁾。

3. プランク定数の決定

科学技術データ委員会 (CODATA) では、SI 定義改定のために、2017年7月1日までに受理された論文データにもとづいてh, e, h, N_A の値とそれらの不確かさを決定した。これを CODATA による 2017年の特別調整と呼んでいる 11 。プランク定数h については図6 に示す8 つのデータからキログラムの新しい定義に用いられるh の値が決められた。これらのうち、4 つは NRC (カナダ)、NIST (米国)、LNE (フランス) がキッブルバランス 法で測定したものであり、残りの4 つはアボガドロ国際プロジェクトで NMIJ などが X 線結晶密度法で測定し

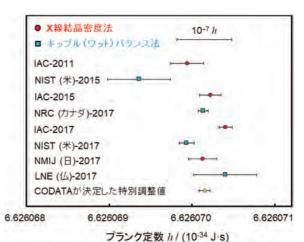


図 6 プランク定数の測定結果と CODATA が決定したプランク定数の特別調整値 11 。エラーバーは標準不確かさを表す。

表 1 CODATA による基礎物理定数の 2017 年特別調整¹¹⁾

基礎物理定数	值	相対標準 不確かさ
プランク定数 h	6.626 070 150(69)×10 ⁻³⁴ J s	1.0×10^{-8}
電気素量 e	$1.602\ 176\ 6341(83) \times 10^{-19}\ C$	5.2×10^{-9}
ボルツマン定数 k	$1.380 649 03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	3.7×10^{-7}
アボガドロ定数 $N_{ m A}$	$6.022\ 140\ 758(62) \times 10^{23}\ mol^{-1}$	1.0×10^{-8}

括弧内の数値は最後の桁の標準不確かさを表す。

表2 SIの新しい定義で用いられる基礎物理定数¹¹⁾

単位	記号	基礎物理定数	値
キログラム	kg	プランク定数 h	6.626 070 15×10 ⁻³⁴ J s
アンペア	Α	電気素量 e	$1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}\ C$
ケルビン	K	ボルツマン定数 k	$1.380 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
モル	mol	アボガドロ定数 $N_{ m A}$	$6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}\ mol^{-1}$

た $N_{\rm A}$ を h に換算したものである。CODATA では、これら8つのデータの重み付け平均から h の特別調整値を決定した。さらに CODATA では音響気体温度計による気体定数 R の測定結果など合計で 11 のデータからボルツマン定数 k の特別調整値を決定した 12 。電気素量 e の特別調整値は $e=[2\alpha h/(\mu_0 c)]^{1/2}$ の関係から、アボガドロ定数 $N_{\rm A}$ の特別調整値は式 (1) の関係から、h の特別調整値を用いて決められた。

表 1 に CODATA による h, e, k, N_A についての特別 調整の結果をまとめた。プランク定数の特別調整値の相対標準不確かさは $1.0 \times 10^{-8} (1$ 億分の 1) である。これはプランク定数の測定の不確かさが IPK の質量の安定性である $5 \times 10^{-8} (1$ 億分の 5) よりも十分に小さいことを表す。SI の新しい定義ではこれらの値は表 2 に示すとおり、不確かさのない定数として定義された。

今回のプランク定数の決定において、NMIJ は半数である4つのデータに貢献した。1889年にIPK によって質量の単位が定義されて以来130年ぶりとなるキログラムの定義改定に、日本が大きく貢献するという歴史的な成果を残すことができた。

Ⅳ. 定義改定の影響

今回の SI 定義改定によって、これまで人工物や古典電磁気学、水の三重点、12C のモル質量によって定義されてきたキログラム、アンペア、ケルビン、モルが表 2に示す基礎物理定数によって定義された。これによって7つの SI 基本単位は全て普遍的な定数によって定義されることになり、人工物などに頼らない理想的な単位系が完成した。

このような定義改定によって、ジョセフソン定数 $K_{\rm J}$ やフォンクリッツィング定数 $R_{\rm K}$ のように不確かさがゼロになるものもあるが、これまで不確かさのない定数として扱われてきた磁気定数 μ_0 、電気定数 ϵ_0 、炭素 $^{12}{\rm C}$ のモル質量 $M(^{12}{\rm C})$ などのように、微細構造定数 α やリュードベリ定数 R_{∞} などの値に応じて変化する変数になるものもある 1,3,12 。例えば SI の新しい定義において μ_0 は以下の式で表される変数になる。

$$\mu_0 = 2\alpha h/(ce^2) \tag{4}$$

SI の定義が改定された時点において、その値は $4\pi \times 10^{-7}$ NA⁻²であり、これまでの定義での値と同じであるが、 2.3×10^{-10} の相対標準不確かさが付与された。その後、 μ_0 の値と不確かさは α の最新データに応じて変化する。

また、式(1)と $m(^{12}\text{C})/m_{\text{e}}=A_{\text{r}}(^{12}\text{C})/A_{\text{r}}(\text{e})=12/A_{\text{r}}(\text{e})$ の関係から $M(^{12}\text{C})$ は次式で表される変数になる。

$$M(^{12}\text{C}) = \frac{2N_{\text{A}}hR_{\infty}m(^{12}\text{C})/m_{\text{e}}}{c\alpha^{2}} = \frac{24N_{\text{A}}hR_{\infty}}{c\alpha^{2}A_{\text{r}}(\text{e})}$$
 (5)

ここで、 $m(^{12}\text{C})$ は ^{12}C の原子質量、 $A_r(^{12}\text{C})$ は炭素 ^{12}C の相対原子質量、 $A_r(e)$ は電子の相対質量を表す。

任意の核種 X のモル質量は定義改定後も $M(X) = M_u$ $A_r(X)$ として、その相対原子質量 $A_r(X)$ から求められる。ここで、モル質量定数 M_u は新しい定義では次式で表される変数になる。

$$M_{\rm u} = \frac{M(^{12}{\rm C})}{12} = \frac{2N_{\rm A}hR_{\rm \infty}}{c\alpha^2A_{\rm r}({\rm e})}$$
 (6)

同様に、任意の核種 X の質量は定義改定後も m(X) = $m_{\rm u}$ $A_{\rm r}(X)$ として求められるが、新しい定義における統一原子質量定数 $m_{\rm u}$ は次式で表される変数になる。

$$m_{\rm u} = \frac{m(^{12}{\rm C})}{12} = \frac{M_{\rm u}}{N_{\rm A}} = \frac{2hR_{\infty}}{c\alpha^2 A_{\rm r}({\rm e})}$$
 (7)

新しい定義に移行した時点において $M(^{12}\mathrm{C})$, M_{u} の値はそれぞれ $12\,\mathrm{g/mol}$, $0.001\,\mathrm{kg/mol}$ であり、従来の定義での値と同じであるが、 4.5×10^{-10} の相対標準不確かさが付与された。その後、 $M(^{12}\mathrm{C})$, M_{u} , m_{u} の値と不確かさは α , R_{∞} , $A_{\mathrm{r}}(\mathrm{e})$ の最新データに応じて変化する。

アボガドロ定数やプランク定数などの基礎物理定数の

計測技術が進歩した結果, 130年ぶりのキログラムの定義改定が実現した。これによって, BIPM に保管されている IPK に頼ることなく, 技術さえあれば誰もがプランク定数にもとづいて質量の基準を持つことができるようになった。これは, 1983年に長さの定義が光の速さに移行し, 光周波数さえ測ることができれば誰もが長さの基準を持つことができるようになったのと同じである。

キログラムの定義がプランク定数に移行したことによって、これまで測定することができなかった超微小な質量や力、トルクなどを計測することが可能になる¹²⁾。新しい定義はより革新的な計測技術が登場することを促す効果のあることを過去の事例は物語っている。

- 参考資料 -

- 1) 藤井賢一, 日本物理学会誌, 69-9, 604-612(2014).
- 2) 藤井賢一, 応用物理, 87-10,774-779(2018).
- 3) 藤井賢一, 島岡博一, 現代化学, 576, 29-36 (2019).
- P. Mohr, D. Newell, B. Taylor, Rev. Mod. Phys., 88, 035009 (2016)
- 5) 金子晋久, 応用物理, 81-2, 102-108(2012).
- I. A. Robinson, S. Schlamminger, *Metrologia*, 53, A46-A75 (2016).
- K. Fujii, H. Bettin, P. Becker, E. Massa, O. Rienitz, A. Pramann, A. Nicolaus, N. Kuramoto, I. Busch, M. Borys, *Metrologia*, 53, A19-A45 (2016).
- 8) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, M. Gray, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, P. Manson, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, A. Waseda, *Phys. Rev. Lett.*, 106, 030801 (2011).
- 9) N. Kuramoto, L. Zhang, S. Mizushima, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa, K. Fujii, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 66–6, 1267–1274 (2017).
- K. Fujii, E. Massa, H. Bettin, N. Kuramoto, G. Mana, Metrologia, 55, L1–L4 (2018).
- 11) D. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandes, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood, Z. Zhang, *Metrologia*, 55, L13-L16 (2018).
- 12) 藤井賢一, 計測と制御, 58-5, 336-340(2019).

著者紹介



藤井賢一(ふじい・けんいち)

産業技術総合研究所 計量標準総合セン ター

(専門分野/関心分野)30年前に X 線結晶密度法によるボガドロ定数の測定を開始。CODATA(国際科学会議 科学技術データ委員会)委員。キログラムの新定義実現方法や,新定義から超微小質量等を計測するための研究開発に取組む。

きちっとしたエビデンスとワンフレーズ

フリージャーナリスト 井内 千穂

「目から鱗」とは言うが、得てして人は「我が意を得たり」の言説に惹かれるのではないだろうか。

報道も減っている中で最近、低線量被ばくの生体影響について、8年前の震災直後からリスクコミュニケーションに尽力してこられたエキスパートの方々のお話に接する機会が続いた。その関連で、宇野賀津子氏の著書『低線量放射線を超えて』も読んだ。概ね「我が意を得たり」の論調に共感しつつ、印象に残ったのは、「きちっと」というフレーズである。「きちっと検証し」「きちっとした科学者の組織」「きちっとリスク評価をして」「きちっとした調査」「きちっと放射線と向かい合い」等々、一冊の新書本に18回も出てくるこのフレーズは、宇野氏のお人柄から自ずとにじみ出たものであり、エビデンスに基づく発信という科学者のあるべき姿を示すように感じられた。

しかしながら、早くも 2013 年に出版されていた本書の「(福島第一原発の事故による)この程度の低線量放射線ならライフスタイルの変化で克服可能」という主旨により、世の人々の目から鱗が落ちたとは残念ながら言い難い。目に鱗が張り付いたような漠然とした放射線恐怖症(radiophobia)は今なお広く共有されたまま、根強い風評被害、決まらない最終処分場、危ういエネルギー安全保障といった膠着状態が続いている。そのような中で 2018 年末に本の形になった『原発ゼロ、やればできる』というワンフレーズの極論が共感を呼ぶ空気も一部にはある。

せっかくの「きちっとした」エビデンスに加えて、心を揺さぶるワンフレーズがあれば、人々の目から 鱗が落ちるだろうか。



ポーランドを訪れて

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。イースター休暇中に、友人「アダム」の故郷である、ポーランド北部のバルト海に面する港町、グダニスク市を訪れました。

車でグダニスク市へ向かう途中、ポーランドを代表する工業都市のカトヴィツェ市周辺に来た際に、アダムから「口を覆って」と、マフラーを手渡されました。しばらくすると、日中なのに辺りは急に暗くなり、霧が一面に立ち込め始めました。近年、ポーランドでは、大気汚染による健康被害が深刻になっています。2018年の欧州環境機関(EEA)の調査によると、毎年約4万7千人のポーランド人が、大気汚染関連の疾病で亡くなっているそうです。

この大気汚染の主な原因として、石炭火力発電が挙げられます。原子力発電の開発が進む東欧の国々とは異なり、石炭、褐炭などの資源が豊富であるポーランドは、石炭火力発電が国の発電電力量の約8割を占めています。そのため、ポーランド政府は石炭火力発電を2030年までに6割に、2050年までに5割に下げる政策案を提示しています。また、今年6月にはホワイトハウスで、ポーランドのドゥダ大統領とトランプ米大統領が会談し、米国産の液化天然ガスの売買契約や、ポーランドの原子力発電事業を米国が支援する覚書に署名がされました。

しかし、国民の原発建設への反応は悪く、アダムも反対意見を持つ1人です。国民の喫煙率が32%と、日本の17.9%を大きく上回ることとかけて「ポーランドのがんは、人も、国もスモーキング(喫煙)からなのね」と冗談交じりに言うと、「日本のベイピング(蒸気を発生させる電子タバコ)にも、がんの危険性はあるよね」と返されてしまいました。

科学者と市民

京都女子高校3年生 鳥居 千智

去年の3月、7月、11月に「高校生スペシャルセッション」という放射線に関する様々な問題を議論する活動の中で、得たものがたくさんあった。そのうちの一つが「科学者と市民」が実際に話し合ったり関わったりする機会が少ないということだ。

少ないと何が問題なのか。科学者は世間の問題を解決しよう、生活をより安全なものや便利なものにしようとせっかく努力しているにも関わらず、市民などのそれほど知識を持たない人にとっては「遠い世界の話」となってしまうことだ。しかし市民は、それが社会問題になっていて自分にも関わるかもしれないこととなると少しは知っておいた方が良いかもしれないと思い、ニュースを少し見たりスマホで何かのついでに調べてみたりする。だが、それは知った気になっただけになることもある。

一つだけ具体的に例を挙げると、東日本大震災が起こって原発の事故が起こったとき、福島から避難してきた人たちが、ガソリンの供給やホテルでの宿泊を拒否されたり、避難先の学校でいじめにあったりした。その行動をとった裏側には恐怖という感情がある。その恐怖はどこから来たのか。それはあまり情報を調べずに自分のすぐ近くにあった情報をうのみにしたのではないかと思う。「科学者の言っていることは難しい、だから易しい表現を使っているものを信じよう」となったのではないか。しかしその情報がデマ、あるいはバイアスがかかっていたのかもしれない。

科学者も市民も同じ社会を作るのだから、この2つの間の壁をどうにかする方法はないのだろうか。

Column

甲状腺検査の「理解しがたさ」に抗う

フリーライター 服部 美咲

一般的に原発事故が起こると、子供の甲状腺がんの過剰発生が懸念される。東京電力福島第一原発事故の場合、飛散した放射性物質はチェルノブイリ原発事故より大幅に少なかった。迅速な農林水産物の出荷制限などの予防措置もとられ、住民の内部被ばくは抑えられた。少なくとも専門家は、福島第一原発事故の影響で子供に甲状腺がんが多発する心配はしていなかったはずだ。

福島の「甲状腺検査」は、甲状腺がん死の低減を目指したプログラムではない。住民の不安に応えるために開始された。しかし、他のがん検診と同様に「過剰診断」が起きている。特に、ほとんどの甲状腺がんが「進行が極めて遅い」という特徴を持つため、早期の発見と治療は受診者に害を及ぼしやすい。

過剰診断の概念は理解しがたい。福島県立医科大学の調査では、受診者の家族や学生の8割近くが甲 状腺検査による害の存在すら知らないという。福島の甲状腺検査開始当時の状況と併せて理解するのは さらに難しい。福島の甲状腺検査の問題には、複数の「理解しがたさ」が絡み合っている。加えて、「放射 線被ばくによって甲状腺がんが多発している」などの単純図式のフェイクニュースが理解を妨げる。

福島県の設置する有識者会議は、受診者に対する説明文書の改訂案をまとめた。しかし、学術的に異なる立場の意見を盛り込むほど、説明は難解になる。せめて自分のできることをと、ウェブサイト「福島レポート」を始めた。正しい知識の「理解しやすさ」にささやかにでも貢献できればと願う。

トランスサイエンス

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

物理学者の Alvin Weinberg は、1972年、「トランスサイエンス」を「科学に問うことはできるが、科学によって答えることの出来ない問題群」と定義し、低線量被ばくを真っ先に挙げた。これは、「ポスト通常科学」という概念で受け継がれ、「科学的不確実性が高いだけでなく社会的利害の対立も高い問題」の合意形成には、市民などを含めた「拡張された共同体」で話し合えという主張になっているように思う。私にはこの考え方はしっくりこない。真実を追求するのが科学者の役割だ。それを「みんなで考えて」と投げるやり方はどこかおかしい。社会的利害の高い問題は、純粋の科学的知見だけでは政策決定できないのは当たり前だが、「現段階では未解決」の問題については、それをどうしたらわかるか、どういう手立てがあるかを追及する事こそ科学者の本来の使命である。その精神で、人類は、まだ見たこともない宇宙の起源や、人類が誕生する以前の生物の様子を探ってきた。今では DNA の配列から生物の系統図が描ける。西村肇氏は水俣病のデータが廃棄された後になって、工場の配置から水銀の経路までを、プロセスシステム工学の手法を使って解析した。見たこともないウイルスを電子顕微鏡が見せてくれた。低線量被ばくの問題は、本当に科学によって答えられない? それを突破する事こそ、科学者に課せられているのだ。私は、この思いがあったからこそ、こんな年になってこの問題に取り組んでいるのだ。



グローバル化での信頼関係

東京学芸大学附属国際中等教育学校6年 マイケル 瑛美

アメリカ合衆国と中華人民共和国、日本と大韓民国、世界ではグローバル化が進む中で様々な貿易摩擦をはじめとする摩擦が起こっている。その中でも、特にアメリカ合衆国のトランプ大統領が焦りと怒りをあらわにしているのがイランとの核問題であるように思う。

7月現在、イランが核合意の制限は超えるウラン濃縮を行い、多くのニュースの報道からは、イランが計算もなしにただウランの濃縮度を上げているように感じる。けれども、実際にはウラン濃縮の値はまだ発電用としての基準にとどまっているという話もある。イランは基準値を超えない範囲でアメリカやヨーロッパ諸国と駆け引きを行っている。それに対し、アメリカ合衆国は力と威圧で核問題を抑え込もうとしているように思う。

21世紀の時代,核という強大なエネルギーを人類は手に入れた。お互いに核を保有し,負の部分を強調することで怯え,脅しあうことは,各国のリーダーが行うことにはふさわしくない。用い方にリスクがあるものだからこそ,それぞれの国同士が信頼関係を築いて,人を傷つける道具に核を用いてほしくないと思う。

電子顕微鏡の現状と将来展望

第3回/最終回 先進原子分解能電子顕微鏡による材料局所構造解析

東京大学 柴田 直哉

微小な電子プローブを用いて原子スケールの構造観察を行う走査型透過電子顕微鏡(STEM)は、収差補正技術の確立に伴ってここ 10 年で大きな進歩を遂げている。現在の世界最高分解能は 50 pm 以下にまで達しており、原子サイズ以下の空間分解能が実現している。一方、最近では STEM の検出器開発にも大きな進展があり、従来は難しかった軽元素原子観察、原子スケール組成分析、超高分解能電磁場観察などが可能になりはじめている。本稿では、原子分解能 STEM の現状と将来展望に関して報告する。

KEYWORDS: STEM, detector, atom, EDS, electromagnetic field

I. はじめに

20世紀末に実現した磁界レンズの球面収差補正技術 は、その後20年を経て今や電子顕微鏡に無くてはなら ない技術となった。球面収差補正技術の誕生する以前は 主に対物レンズの球面収差が空間分解能を制限してお り、如何に小さな球面収差係数を有する対物レンズを設 計するのかに大きな焦点があった。1,250 kV の加速電 圧を有する超高圧電子顕微鏡を用いた当時の最高空間分 解能は1Åであった。これは原子の世界を直接観察でき る空間分解能である。しかし、球面収差補正技術が確立 して以降、加速電圧が200~300kVの汎用電子顕微鏡に おいても1Åを凌駕する空間分解能が実現し始め、現在 の世界最高性能は 300 kV の装置で達成された 0.405 Å である¹⁾。水素のボーア半径が約 0.53 Å ということを考 えれば、現在の空間分解能は原子サイズよりも小さな世 界を観察できることになる。それでは一体、原子サイズ 以下の世界に電子顕微鏡は何を見るのだろうか? 大変興 味深い問いが最先端電子顕微鏡の眼前に聳えている。

一方、先述の収差補正技術の恩恵を最も被った手法が 走査型透過電子顕微鏡(Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM)である。図 1 に模式的に示すよう に、STEM は細く絞った電子プローブを試料上で走査 し、各走査点からの透過散乱電子を試料下部の検出器で

Materials Characterization by Advanced Transmission Electron Microscopy: Naoya Shibata.

(2019年7月18日 受理)

検出してその信号強度をモニター上に表示して像を形成する電子顕微鏡手法である。また、エネルギー分散型 X線分光法(Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS)や電子エネルギー損失分光法(Electron Energy-Loss Spectroscopy)を併用すれば、電子プローブサイズ程度の領域からの超高分解能組成分析や電子状態解析も可能であり、局所分析にも長けている手法である。図 1 にSTEM 法の模式図を示す。STEM では、通常円状あるいは円環状の検出器を逆空間に挿入して像を形成するが、

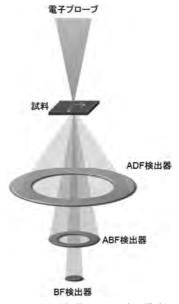
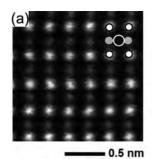


図1 原子分解能 STEM 法の模式図



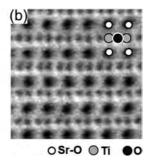


図 2 SrTiO₃[110]入射の STEM 像⁴⁾

その大きさや配置によって性質の異なる像を同時形成す ることができる。例えば高角散乱された電子のみを選択 的に結像に用いる環状暗視野法(Annular dark field: ADF)では、円環状検出器で高角散乱電子を一括検出する ことで、構成元素の原子番号に敏感な像を形成すること ができる。一方、小さな円状の検出器を用いる明視野法 (Bright field: BF)では、透過電子のみを小さな円状検出器 で検出することで、平行照射の高分解能 TEM と同等な 像を形成することができる. 図 2(a) に SrTiO₃を[110]方 向から観察した場合の ADF STEM 像を示す。像中の輝 点は原子位置に直接対応している。このモードでは高角 散乱された電子を結像に用いているため、電子を高角散 乱しやすい重い元素ほど明るいコントラストで結像され る。よって、Sr-O原子カラムが最も明るく、ついで Tiカ ラムが観察できている。一方. 酸素カラムは散乱能が小 さく、このモードでは観察することは難しい。BF 像を併 用すると () カラムが観察できる場合もあるが2),通常の 高分解能 TEM のようにフォーカスや試料厚に像コント ラストが強く依存するため、robust な観察には不向きで ある。そこで著者らのグループでは、ADFやBFを補完 する新たな検出器および結像法の開発を精力的に行い³⁾. 軽元素原子の可視化や電磁場の可視化を実現してきた。 また最近では、STEM-EDS 法の原子分解能化による材料 界面局所組成分析も行っている。本稿では、そのような STEM 手法開発に関して報告するとともに、原子分解能 STEM の今後の展望を議論する。

■■ Ⅱ.STEM による軽元素原子の直接観察

上述のように、従来の ADF 法では軽元素原子の観察はその結像原理から一般に困難であると言わざるを得ない。一方、BF 法は軽元素の観察が可能であるが、コントラスト特性が robust ではなく、像解釈が複雑である。この問題を解決し、軽元素原子を高コントラストで観察する手法として、明視野領域を巧妙に利用する検出方法が開発された 4)。現在、この手法は環状明視野法 (Annular Bright Field: ABF) と呼称され、STEM のスタンダードな観察法となっている。

図1に ABF 法における検出器ジオメトリの模式図を示す。ABF 法では、検出器の外角を電子プローブ収束

角と同程度に小さく設定し、内角をその半分程度にすることで、BF 領域の低角散乱電子を選択的に検出するように設定する。ABF 法により $SrTiO_3$ を [110] 方向から観察した結果を図 2(b) に示す。ABF 像では、ADF 像では観察できなかった O 原子カラムが明瞭に観察できており、Sr-O、Ti、O 原子カラムがいずれもバックグラウンドに対して暗いコントラストとして結像されることがわかる。また、マルチスライス法を用いた像シミュレーションにより、非常に広範囲の試料厚に亘って常に原子カラム位置が暗いコントラストで結像されるrobust なコントラスト特性を示すことも分かった。つまり、ABF 像では像コントラストから軽元素原子カラム位置を直接決定できる手法であるといえる。この手法を用いて Li や H などの超軽元素原子の直接観察も可能であることが示されている 5^5 。



Ⅲ. 原子分解能 STEM-EDS による 局所組成分析

近年、X線分析用シリコンドリフト検出器 (Silicon Drift Detector: SDD) の高性能化により、STEM 法の極めて高い空間分解能を維持したまま単原子レベルでのSTEM-EDS 分析が可能となり 6)、様々な研究分野にその応用範囲を拡げている。特に、材料内部の界面や欠陥周囲の元素偏析現象の解明に大きな威力を発揮すると期待できる。ここでは、筆者らのグループがジルコニアセラミックスの粒界偏析研究に応用した例 7)を紹介する。

ジルコニアセラミックス(ZrO2)は、燃料電池の固体電 解質や構造部材などに用いられるセラミックスであり, その特性向上のためイットリウム(Y)などの希土類元素 が適量添加されている。この希土類元素は材料内部で均 一に分布しているわけではなく、 粒界や表面などの界面 部分に偏析する傾向にあることが知られており、それが 材料特性に大きな影響を及ぼす。しかし、粒界は原子レ ベルの複雑な構造を有し、偏析現象にはさまざまな点欠 陥が関与すると考えられていることから、セラミックス における粒界偏析現象の本質を理解することは極めて難 しいのが現状である。また、これらの元素は粒界のみに 存在するのではなく結晶内部にも存在するため、粒界に どの程度濃化しているかを原子レベルで実験的に捉える ことは極めて困難であった。そこで筆者らのグループで は、原子分解能 STEM-EDS を用いて、Y 原子を添加し たジルコニアセラミックス粒界の原子レベルの組成マッ ピングを試みた。図3にその結果の一例を示す 7)。この 粒界はバイクリスタル法によって作製した人工粒界であ り, Σ3の相対方位関係にある粒界である。また, 粒界 面は{111}面である。(a)に ADF 像を示す。ADF 像か ら、双方の結晶は原子レベルで平坦な粒界を形成してお り、アモルファス層などの第二相は形成されていないこ とがわかる。しかし、YとZrは原子番号が隣同士であ

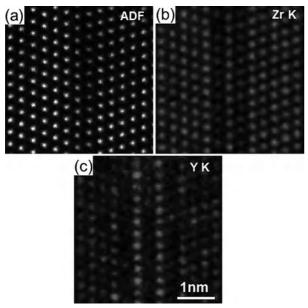


図3 Y添加ジルコニア粒界の原子分解能 STEM-EDS 結果⁷⁾

り、像コントラストから粒界近傍の Y 分布を同定することは極めて難しい。そこで、STEM-EDS 分析を行い、この粒界近傍の (b) Zr および (c) Y のカウントマップとして表示した像をそれぞれ示す。この結果から、粒界近傍の数ナノメーターの領域においては、Y 濃度が[11] カチオン面一層ごとに濃淡を繰り返す規則的な構造が形成されていることが明らかとなった。更に、モンテカルロ計算を用いた理論解析によっても、実験結果と同様の規則的な偏析構造が再現されることがわかった。本結果は、平均場近似からスタートする従来の粒界偏析の描像と実際の原子レベルの偏析現象には異なるメカニズムが存在することを示しており、原子分解能 STEM-EDS がセラミックス界面の偏析現象の本質解明に極めて有効であることを示している。

│Ⅳ.STEM による電磁場の直接観察

1. 微分位相コントラスト法

(Differential Phase Contrast: DPC)

DPC STEM 法は、STEM を用いて材料内部の電磁場を直接可視化できる手法として近年大きな注目を集めている。図4にDPC 法の模式図を示す。DPC 法では、電子プローブを形成する光学系は通常の STEM と同等であるが、用いる検出器が異なる。DPC 法に用いる検出器は、その内部を複数の部分(セグメント)に分割した分割型検出器もしくはピクセル型検出器である。ここでは、分割型検出器の場合を例に、電磁場を可視化できるメカニズムを説明する。もし、試料内部に電子線入射方向と垂直な成分を有する電磁場が存在している場合、入射電子線は電磁場から力を受け、電磁場の強さに比例した角度だけ偏向される。このときの偏向角は微小であるため、円状あるいは円環状検出器でこの偏向を捉えるこ



図4 DPC STEM 法の模式図

とは極めて困難である。一方、分割検出器を用いた場合、入射電子線が偏向されると、各検出セグメントで検出される信号に差が生じる。この差の度合は、対角に配置された検出セグメント信号の差分計算により定量的に評価することが可能である。つまり、電子プローブを走査する試料各点において検出セグメント信号の差分計算を行うことにより、試料各点における電子線の偏向量および偏向方向を算出し、試料内部の電磁場分布を可視化できる。これがDPC法の基本的なメカニズムである。DPC法はBF領域を利用して結像するため、ADF法との併用が可能であり、構造情報(ADF像)と電磁場情報(DPC像)を同一視野で同時に観察することを可能にする。この特徴は、界面や欠陥などの近傍でどのように電磁場構造が変化しているのかを実験的に観察する上で極めて有利な特徴である。

DPC 法が提案されてから 40 年以上が経過しているが⁸⁾,最近まで一部の研究者のみに利用される特殊な手法であった。ところが,近年 DPC 法に対応できる検出器開発の急激な進展に伴い,DPC 法は特殊な手法から ADF 法や BF 法のような一般的な観察手法になりつつある。また最近では,欧米を中心に STEM 用ピクセル型検出器が実用化され,DPC やタイコグラフィーなどの位相イメージングを内包した 4D STEM と呼ばれる新しい研究分野が急速に発展している。

2. DPC STEM を用いた材料電磁場観察

ここでは、DPC 法を用いて実際の材料内部の電磁場 観察を行った一例として、半導体 pn 接合の観察に応用 した例を示す⁹⁾。

半導体内部のp型領域とn型領域の界面であるpn接合界面は、トランジスタ、発光ダイオード、太陽電池などの機能特性発現の起源となる重要な界面である。これらのデバイス開発においては、pn接合界面の正確な位置および空乏層幅等を実験的に直接決定する技術が不可

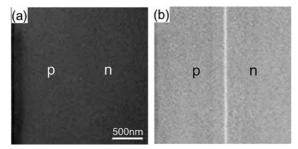


図 5 GaAs 中の pn 接合の DPC STEM 観察結果⁹⁾

欠である。pn 接合界面には、p 型領域とn 型領域の電位差に起因する内蔵電場が形成されており、その電場を直接観察することができれば、pn 接合界面位置およびpn 接合幅を実験的に決定できる可能性がある。そこでDPC 法により、GaAs 結晶中のpn 接合界面を直接観察可能かどうか検討した。

図5に、(a) ADF および(b) DPC 法によって同時観察した pn 接合界面領域の観察像を示す。DPC 像のコントラストは面内電場の強さに対応している。ADF 像では、p型領域、n型領域およびその間の領域に有意なコントラスト変化を検出することはできなかった。一方、DPC 像では、p型領域とn型領域の中間部分に明瞭な直線状コントラストが観察されている。この像は、pn 接合界面直上にn型領域からp型領域の方向に向かって局所電場が形成されていることを示している。つまりDPC 法は、これまでの STEM では観察できなかった pn 接合界面を、電場観察を通して可視化できることを示している。

この他に、DPC 法は材料内部の磁場観察にも極めて 有効であり¹⁰⁾、近年では磁気スキルミオンの直接観察な どにも応用されている。

V. 原子分解能 STEM の将来展望

先述したように、収差補正技術の進展に伴って、電子 プローブ径は水素のボーア半径以下にまで絞れるように なった。それでは、このような小さな電子プローブに よって何が見える可能性があるのか?一つの可能性とし て、筆者らのグループでは DPC 法の原子分解能化によ る原子内部の電磁場観察にトライしている11)。図6は SrTiO3結晶を[001]方向から原子分解能 DPC STEM に より電場観察した結果である¹²⁾。 DPC 像のコントラス トは面内電場強度に対応しているが、原子中心から放射 状に電場が湧き出す様子が観察された。この電場は原子 内部の電場であり、正電荷を有する原子核とその周囲の 電子雲の間に存在する電場である。つまり、原子サイズ 以下にプローブを絞って DPC 観察すると、原子の内部 構造を電場変化として観察できる。この結果は、従来の 超高分解能電子顕微鏡法が原子の直接観察に主眼を置い ていたのに対して、原子内部の更にミクロな構造観察が

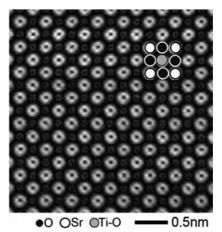


図 6 $SrTiO_3[001]$ の原子分解能 DPC STEM 像 $^{12)}$

今後の電子顕微鏡のターゲットとなり得ることを示唆している。今後更なる検出器の高度化などにより、原子内部や原子間の構造を実空間で直接観察できる日が来るかもしれない。

Ⅵ. おわりに

球面収差補正装置が確立して早20年近くが経過したが、その間、原子分解能電子顕微鏡は目覚しい発展を遂げた。本稿でも紹介したように、今や原子サイズ以下の空間分解能が達成され、日やLiなどの超軽元素や原子内部の電場分布までもが観察できるようになっている。しかし、実はこのような超高空間分解能も電子波の原理的な波長限界には未だ程遠く、まだまだ伸び代があると言えるかもしれない。更なる装置開発の進展が楽しみである。

- 参考文献 -

- 1) S. Morishita et al., Microscopy, 67, 46-50 (2018).
- 2) N. Shibata et al., Science, 316, 82-85 (2007).
- 3) N. Shibata et al., J. Electron Microsc., 59, 473-479 (2010).
- 4) S.D. Findlay et al., Appl. Phys. Lett., 95, 191913(2009).
- 5) S.D. Findlay et al., Microscopy, 66, 3-14(2017).
- 6) K. Suenaga et al., Nature Photo., 6, 545-548 (2012).
- 7) B. Feng et al., Nature Comm., 7, 11079 (2016).
- 8) N. H. Dekkers and H. D. de Lang, $\mathit{Optik},\,41,\,452\text{--}456\,(1974)\,.$
- 9) N. Shibata et al., Sci. Rep., 5, 10040 (2015).
- 10) N. Shibata et al., Acc. Chem. Res., 50, 1502-1512(2017).
- 11) N. Shibata et al., Nature Phys., 8, 611-615(2012).
- 12) N. Shibata et al., Nature Comm., 8, 15631 (2017).

著者紹介



柴田直哉(しばた・なおや) 東京大学大学院工学系研究科総合研究機 歴

(専門分野/関心分野)最先端電子顕微鏡開発とそれを用いた材料界面研究

最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構

第7回/最終回 核融合エネルギーの実用化に向けた 研究開発の進展(その3)

量子科学技術研究開発機構 谷口 正樹ほか

量研における核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発の進展として、第5回の原型炉研究開発戦略およびITER計画、第6回の幅広いアプローチ活動(サテライト・トカマク計画)に続き、最終回の第7回は幅広いアプローチ活動の中でも六ヶ所核融合研究所で実施しているIFMIF/EVEDA、およびIFERCの各事業の研究開発の現状に加え、原型炉の材料開発に必要な先進核融合中性子源 A-FNS について紹介する。

KEYWORDS: Fusion Energy, BA, IFMIF/EVEDA, IFERC, A-FNS, ITER

I

I. BA 活動

幅広いアプローチ(Broader Approach: BA)活動は、フランスで建設が進められている核融合実験炉 ITER の支援と、核融合エネルギーの平和利用の早期実現を目的として、日本と欧州原子力共同体により、日本国内で実施されている国際研究協力プロジェクトである。

量研は、文部科学大臣から BA 活動の日本側実施機関として指定を受け、サテライト・トカマク計画(STP)事業を那珂核融合研究所(茨城県那珂市)で、国際核融合材料 照 射 施 設 の 工 学 実 証・工 学 設 計 活 動 (IFMIF/EVEDA)事業および国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業を六ヶ所核融合研究所(青森県六ケ所村)で欧州の実施機関(F4E)と共同で実施している。

BA活動は、2007年6月に日欧政府間のBA協定の発効とともに開始され、当初の事業計画(BAフェーズI)は2020年3月で終了する予定となっている。現在日欧間で、これまでの各事業の着実な進捗を踏まえ、2020年4月から5年間を想定してBAフェーズIIとして実施するために、各事業の新たな事業計画の検討が進められている。

Progress on Research and Development towards realization of Fusion Energy (3): Masaki Taniguchi, Keishi Sakamoto, Atsushi Kasugai, Kenji Tobita, Taro Matsumoto.

(2019年7月5日 受理)



II. 国際核融合材料照射施設の工学実証・ 工学設計活動

1. 概要

重水素とトリチウムとの核融合反応で生成する 14.1 MeV の中性子は、結晶格子中の構成原子のはじき出し や核変換、組織変化による特性変化などにより炉材料を 劣化させる。加えて、核融合炉では、主に 56 Fe(n, α) ⁵³Cr 反応を介してヘリウムが生成されるが、これが蓄積 して一定濃度を越えると機械的特性に影響を与える。そ れゆえ、原型炉を目指した核融合炉材料の研究開発・規 格化を行うためには、核融合炉と同等のエネルギー、フ ルエンスの中性子照射が可能な試験施設が必要となる。 そのために、1990年代より日欧米露の国際協力により大 電力加速器を用いた IFMIF (国際核融合材料照射施設) の概念設計が進められてきた¹⁾。これは、線形加速器に より重陽子を 40 MeV まで加速させ、液体リチウムを ターゲットとして、Dと Li の核反応により中性子を発 生させる。図1に IFMIF の概念図を示す。重陽子加速 器2基を有し、それぞれの加速器は、100 keV まで加速 する静電加速器. 100 kV から 5 MeV まで加速する高周 波四重極線形加速器(RFQ), さらに 5 MeV から 40 MeV まで加速する4段の超伝導線形加速器(SRF)から構成さ れ、加速された 40 MeV の重陽子ビームは液体リチウム ターゲットに照射され、ここで中性子が発生する。この 下流に試験材料を置き、照射実験を行う。目標とする重 陽子ビーム電流は各々 125 mA, 2 基合計で 250 mA で



図1 IFMIF 概念図

 $40\,\mathrm{MeV}/125\,\mathrm{mA}$ 重陽子加速器 $2\,$ 基とターゲット系 (液体リチウムループ)から構成される

あり、照射されるビーム電力は合計 10 MW と極めて大電力の加速器となる。

IFMIF は現状の加速器技術の達成パラメータからのギャップが大きい。特に 125 mA という重陽子の大電流加速はこれまで類を見ないものである。また、ターゲットとなる大型液体リチウムループはそれまでに存在せず、その工学的な技術実証が必要であった。それゆえ、工学実証・工学設計活動 (IFMIF/EVEDA 事業) が開始された。

2. 加速器系の開発

六ヶ所研内において建設中の IFMIF 原型加速器 (LIPAc: Linear IFMIF Prototype Accelerator)は、入射器、RFQ および IFMIF 用超伝導加速器 4 基のうちの初段 1 基までを製作するものである。

BA活動全体では日本と欧州が同じ負担割合で国際協力を行っており、調達取り決めをタスクごとに日欧で締結して管理している。LIPAcについては、13に分けたサブシステムごとに調達取り決めを日欧で締結し、その取り決めに応じて設計・製作・試験を進めている。加速器を構成する各機器の製作・調達は、フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)サクレー研究所、イタリア国立核物理学研究所(INFN)レニャーロ研究所、スペインエネルギー環境技術センター(CIEMAT)の3機関が主に担当し、欧州実施機関(F4E)が欧州側の各研究所を取りまとめている。日本の実施機関はQSTが指定を受け、据付・運転・試験等の日欧間の調整や建屋や受電系などのインフラ設備を中心に受け持っている。

入射器は、2.45 GHz/1 kW の電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 放電を利用した高周波イオン源で、プラズマチャンバー内で正電荷を持つ重水素イオン(重陽子)を生成した後、5 つの電極を用いて 100 keV まで静電的に加速される。その後低エネルギービーム輸送部で重陽子ビームは最適形状に収束され RFQ に入射される。入射器の実験は 2014 年末に始まり、重陽子の加速実験は 2015 年7月より開始された。入射器は CEA サクレー研究所が設計と製作を担当し、2012 年にサクレー研究所において試運転を実施した。しかしその後サクレー研究所で構築さ



図2 IFMIF 高周波四重極線形加速器

れた入射器システムを完全に解体・梱包し日本に送り、量研六ヶ所核融合研究所で再度組み上げるという移設作業を行なった。ところが、実験結果とビーム引き出し系のシミュレーション結果に不一致が見られたため、電極間のアライメントのずれを疑い、加速電極の詳細な 3 次元計測を実施した。さらに、加速管を分解し、3 次元計測器で精密に計測しながら1つ1つ丁寧に組み立て、精密なアライメント作業を実施した。その結果、100 keV/140 mA の重陽子ビームでこれまで得られていたエミッタンス(ビームの収束性を示す指標で、値が小さいほど収束性がよくビームクオリティが高い)より大幅に小さい、エミッタンス 0.2πmm・mrad の極めて条件の良いビームが得られることが分かった。

図2は、RFQの写真である。長さ9.8mの世界最長の RFQ である。RFQ は入射された 100 keV の連続重陽子 ビームを, 5 MeV まで加速するとともに, 175 MHz でバ ンチングされたビームとして出力する²⁾。LIPAc の RFQ は INFN レニャーロ研究所が設計と製作を担当し、 精密なアライメントで組み立てられ3分割された状態で 空輸にて日本まで輸送された。これら3分割された RFQ はレーザートラッカーを用いて精密なアライメン ト作業を行って一体化した後、ビーズ摂動法による電界 分布, 共鳴周波数測定とチューニングが行われた。ダ ミーチューナーで精密に周波数チューニングを行い、そ の情報を基に最終的な冷却可能な固定チューナーに順次 置き換えられ、設計通りの分布が得られたことを確認し た。その後、RFQ を本設位置に移動し、真空系、冷却 系,制御系の準備が順次行われた。RFQの高温ベーキ ングと高周波源(RF)システムの単体試験が完了した後, 9インチの大型同軸導波管8本を接続し、RFQの空洞の RF コンディショニングの準備が整った。8 基の大電力 高周波源(各 200 kW)から RFQ まで 8 本の導波管を介 して、8つのポートから合計 1 MW 以上の高周波が同期 入射される。RF の電源設備、冷却設備を含む RF シス テムは CIEMAT の調達責任であり、これらの機器はの べ10回以上にわたる海上輸送を行い順次六ヶ所核融合 研究所に搬入された。RFQ に加え、中間ビーム輸送系、 ビーム診断系、低電力のビームダンプをビームラインに

設置し、ビーム試験の準備が整った。まずは RFQ 空洞 への RF 初入射を行い、その後、8 系統の RF 源による同 期入射に初めて成功した。LIPAcの RF システムでは、 フルデジタル方式の RF 励振系(LLRF)が使われており、 2系統以上の同期入射では、White Rabbit と呼ばれるサ ブナノ秒精度でのマスタースレーブ同期を実現するタイ ミング分配ネットワーク技術を用いて精密な同期入射を 実現した。RF コンディショニング後、まず最初に陽子 ビーム実験が2018年6月に開始された。ビーム試験は LIPAc ユニットと呼ばれる、日欧共同チームによって実 施している。試行錯誤の末、RFQへ入射するビームパ ラメータを収束コイルや偏重コイルで調整した結果,初 めてビームが RFQ を透過し、低電力ビームダンプまで 到達したことが確認された。その後の更なる調整の結 果, 25 mA ながら 96%のビーム通過効率が得られ、大電 流化へ向け有望な結果が得られている。また、加速エネ ルギーの計測の結果、目標とする陽子の加速エネルギー である 2.5 Mev であることが確認され、設計通りの加速 性能を有していることが実証できた。さらに重陽子の加 速に必要な RFQ の加速電界を得るためのコンディショ ニングを実施し、最初の重陽子加速実験が2019年3月 に行われ、2019年7月には1 ms ながら重陽子で5 MeV/125 mA の加速性能の目標を達成した。ビームプ ロファイルや加速後のビームエミッタンス、ビームロ スなどの様々な基礎データを取得したのちに、今後、長 パルスで定格ビーム (5 MeV/125 mA) を目指した加速実 験が行われる。

長パルスで定格ビーム(5 MeV/125 mA)試験を実施した後は、RFQの後段に SRF が設置される。8 基の超伝導加速空洞からなる SRF は、量研六ヶ所研内のクリーンルームで現在組立中である。それぞれの加速空洞に100 kW レベルの高周波が導入され、8 段で 5 MeV から9 MeV まで加速される。上記の RFQ での長パルスビームが安定した段階で、SRF を組み込み、9 MeV、125 mAの長パルス重陽子加速実験を行う予定である。

3. ターゲット系の開発

大電流の重陽子ビームのターゲットとなる高速液体リチウム流の安定生成や不純物除去を実証するリチウム試験ループ(ELTL: EVEDA Li Test Loop)を日本原子力研究開発機構大洗研究所内(当時は QST と同一組織)に建設した。IFMIF では、 $40\,\mathrm{MeV}$ の重陽子ビームが十分に停止する厚さ $25\,\mathrm{mm}$ の自由表面(リチウム流れが壁などと接触しないで流れる表面)を持つリチウム流を、 $15\,\mathrm{m}/$ 秒以上の高速で厚さの変動を $\pm 1\,\mathrm{mm}$ 以下に抑えて安定に生成する必要がある。しかしながら、一般的に自由表面を持つ流れは不安定になりやすく、特に高速になるほど乱れが生じ、流れの形(安定性)を保つことが難しくなる。さらに、液体金属であるリチウムを、約 $250\,\mathrm{C}$ の高

温に保ち、かつ真空下で高速で流すという技術は例がなかった。そこで、精密に加工されたノズル等を装着したELTLを用いて、温度 250 $\mathbb C$ 、速度 15 m/s 以上の液体リチウムターゲットの試験が行われた。レーザー技術を使った計測により厚さの不均一性は $0.16~\mathrm{mm}$ と非常に小さく、表面にできる波の振幅は平均で $0.26~\mathrm{mm}$ であり、IFMIF での要求値 ($\pm 1~\mathrm{mm}$)を十分に満足することを実証した。また、 $15~\mathrm{m/s}$ の液体リチウムターゲットを最長 $25~\mathrm{Ell}$ 目間安定連続に動作し、積算で $1,300~\mathrm{Ell}$ 時間運転し、長期間にわたる安定性が実現できることを $2014~\mathrm{Ell}$ に実証した³⁾。長時間にわたって安定に液体リチウム流を実現することは工学的には非常に重要なマイルストーンであり、この実証によって核融合中性子源の技術課題の 1 つを突破できたと言える。

4. テストセル系の開発および工学設計活動

核融合炉材料の開発には、材料の特性変化に大きな影響を及ぼす照射中の試料温度および中性子束強度・フルエンスの制御と、その場試験および照射後試験を効率的に行うことが重要である。量研と F4E が分担して試料を収納する各種照射試験モジュールを開発し、ベルギーの BR2 炉において高速中性子束の実照射を行い、試験モジュールのモックアップ、温度制御用組み込みパネルヒータ、マイクロ核分裂系計数管などのコンポーネントの中性子照射実証試験を 2015 年までに完了した。

また、IFMIF の工学設計については、プラント設計記述書やコスト評価書等から構成される中間工学設計報告書を2013年に策定した。

Ⅲ. 核融合中性子源 A-FNS の推進

1. 目的

文部科学省の下に設置されている核融合科学技術委員会では、核融合原型炉の推進に向けて、原型炉段階への移行判断のためのチェックアンドレビュー(C&R)項目を列挙し、目標を定めている。そのなかで原型炉に関わる材料開発として、炉材料の候補材である低放射化フェライト鋼の20 dpa 照射データ、ブランケットおよびダイバータ機能材料の初期照射データ、ブランケットのトリチウム挙動評価技術の検証を2035年頃までに取得するように定めた。そのためには、核融合中性子源が必要であり、2020年頃の第1回中間C&Rで概念設計の完了、2025年頃の第2回中間C&Rで核融合中性子源の建設開始判断、および材料照射データ取得計画の作成を行うこととしている。2018年にはアクションプランに基づいたロードマップが策定され、「核融合中性子源(A-FNS)」について、下記のようにまとめられている。

- (1)原型炉開発には、炉内中性子環境を模擬し、材料データ取得が不可欠である。
- (2) 第2回中間 C & R で建設移行を判断する。

(3)日欧で核融合中性子源の検討が進んでいることから、IFMIF/EVEDAの成果を活かし、国際協力を得ながら、A-FNS 構想を具体化する。

このように国の施策に基づいて、国内計画として核融合原型炉の建設判断に必要な核融合中性子源 A-FNS を検討することとし、核融合材料開発だけにとどまらず、中性子の医療・産業利用も視野に入れた新しい中性子科学領域を切り拓く魅力的な先進核融合中性子源の検討を開始した。

2. 概要

図3に A-FNS⁴⁾の構成と図4に全体システム概要を示す。A-FNS は大きく分けて、重陽子を40 MeV まで加速する重陽子線形加速器、ターゲットである液体リチウムを循環させる液体リチウムループ、発生した中性子を照射する照射部、遠隔保守/安全系、照射後試験施設、トリチウムの取扱施設等から構成される。

その基本コンセプトは、加速器系は IFMIF の1ライン分(125 mA)とし、設計は IFMIF の中間工学設計報告書をベースにする。国際協力で進める IFMIF/EVEDAの成果を活用し国内メーカーの技術力を結集してA-FNS の加速器系として再構築する。ターゲット系はIFMIF/EVEDA の成果を反映させ、純化系については

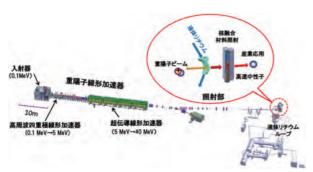


図3 A-FNS の基本構成

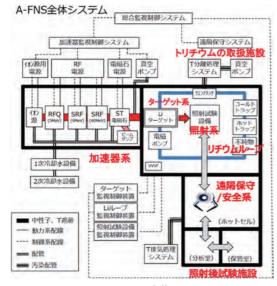


図 4 A-FNS の全体システム

国内大学との共同研究および国際協力で進める BA フェーズ II において R & D を実施する。照射モジュール系は核融合材料試験用モジュールを中心に検討を行い、日本独自案とするため国内活動として実施する。メンテナンスや材料交換など、遠隔保守システムを採用する。また、産業応用可能な多用途中性子源としている。これらは大学および産業界との連携の下、オールジャパン体制で行うこととしている。

3. 特徵

A-FNSの最大の特徴は、中性子発生率としてリチウムターゲットの背面にあるバックプレートの直後で、中性子強度 6.8×10¹⁶個/秒、平均フラックス 6.0×10¹⁴個/cm²/秒であり、原子炉で発生する中性子よりも 10 倍程度高い 14 MeV 付近のエネルギーの中性子を、定常的に発生させることにある。パルス運転である核破砕中性子源にはない特徴を持ち、連続運転の強力中性子を広く提供することができるため、従来の原子炉を利用した中性子照射から置き換わる可能性を秘めている。また、他の中性子源と異なり強度が大きいため、特に産業・医療用RIの大量製造に適している。

核融合用の材料照射や機能材料の照射試験として.9 種類の照射モジュールが現在検討されており、 高速中性 子の重照射や機能材料の特性試験等を柔軟に実施でき る。しかも照射後試験施設を専用に併設することから世 界中の核融合材料研究者にとっては非常に魅力的な施設 であると言える。また4種類の応用利用モジュールを備 え, 多用途な中性子源とすることで, 他分野の基礎研 究・産業医療・エネルギー応用までを網羅でき、特にこ れまでにはなかった高速中性子を利用した新たな中性子 研究・産業創生へ展開し、A-FNS を中心とした中性子 応用産業群(ニュートロンフォレスト)の形成が期待でき る⁵⁾。現在まさに概念設計の段階であり、ユーザーの声 を取り入れながら自由な発想で魅力ある中性子源になる ように進めている。設計から携わることができるチャン スであり、システム設計の経験者や若い方にもぜひこの A-FNS プロジェクトに参加していただきたい。

ı

Ⅳ. 国際核融合研究センター(IFERC) 事業の進捗

IFERC 事業は、原型炉設計・研究開発調整センター、計算機シミュレーションセンター(CSC, Computational Simulation Centre) および ITER 遠隔実験センター(REC, Remote Experimentation Centre)の3つの活動で構成される。

1. 原型炉設計・研究開発調整センター活動

核融合原型炉には、安定な発電の実証、トリチウムの自己充足性(燃料となるトリチウムの外部供給に限りが

あるため), 炉内機器の定期交換・保全(14 MeV の中性子による構造材料の照射劣化のため)が求められる。これらはITERにはなく, 核融合原型炉で初めて直面する課題である。これらを含む原型炉プラントの設計課題に対処するため, 日欧共同で概念設計に取り組んでいる。日欧それぞれの目指す原型炉には隔たりがあるものの(日本は連続運転の定常炉, 欧州は2時間程度の運転を繰り返すパルス炉), 原型炉を構成する共通課題に重点を置いて共同作業を進めてきた⁶⁾。特に, 原型炉の出力規模は重要な設計課題であったが, ITER と同等のダイバータ技術を想定し核融合出力を1.5-2GW 程度とした。このほか, 核的および熱的な側面からみた炉内機器の設計手法, 遠隔保守方式, 超伝導コイルの開発方針などで重要な進展があった。

原型炉設計と並行して、核融合炉材料を中心とした研究開発を行ってきた。厳しい中性子照射を受ける炉内機器の構造材料である低放射化フェライト鋼(F82H)については、本活動では、主に大量生産技術、材料特性、接合技術、原型炉環境下で予想される材料特性の照射劣化などの開発や試験を行い、現在はこれらの成果に基づき、原型炉のための材料規格基準作りに向けたデータ取得戦略を構想中である⁷⁾。また、トリチウム燃料の生産のための機能材料として、化学的安定性や中性子照射特性に優れるベリライド⁸⁾ (Be₁₂V などのベリリウム合金で、中性子増倍の機能を持つ)やチタン酸リチウムの大量造粒法、造粒した材料の特性試験等を行い⁹⁾、良好な特性を確認した。

2. 計算機シミュレーションセンター(CSC)活動

今後の炉心プラズマ、炉工学および材料開発におい て、大規模シミュレーションは重要な役割を担うと考え てよい。実際、核融合プラズマの研究において長年の課 題であった異常輸送や異常輸送抑制のメカニズムの解明 において、第一原理に基づく大規模乱流シミュレーショ ンの大きな役割を果たしている。CSC 活動では、ITER および原型炉の研究開発に資するスパコンを日欧が共同 調達して核融合専用の計算機として運用し、計算資源を 等配分で利用した。本活動のために、2012年にスパコン Helios を六ヶ所研に設置した。Helios の基本システムは 理論性能 1.52PFlops (LINPAC 性能 1.23 PFlops) であ り, 導入当初, LINPAC による計算速度で世界 12 位, 日 本で2位に位置する世界有数のスパコンであった。その 後,加速演算器を備えた増強システム(理論性能 1.23PFlops, LINPAC 性能 1.09PFlops) を追加した。 2016年12月までの運用期間中に、主に、日欧の研究者 約560名が利用し、プラズマ物理、炉材料、炉工学、計算 科学まで、核融合に関連する広い分野の研究に活用され た。CSC の利用による成果は約560編の学術論文にま とめられ、学術や核融合の進展に寄与する多くの研究成



図 5 REC(六ヶ所村)を拠点とした WEST 装置(仏)との遠隔 実験の様子(Photographs on WEST [Courtesy of CEA])

果が得られた¹⁰⁾。この成果を受けて、日本では、Helios 撤去後の施設を活用し、核融合専用機 JFRS-1 (Japan Fusion Reactor Simulator)を国内プロジェクトとして導入し、シミュレーションの立場から、ITER における早期目標達成、および原型炉開発への貢献を目指した研究開発への展開を図っているところである。

3. ITER 遠隔実験センター(REC)活動

本センターは、ITERの実験運転に日本から遠隔参加するための施設と技術を整備するための活動であり、2017年3月にITER遠隔実験のための施設を六ヶ所研に整備した。合わせて、情報学研究所(NII)および核融合科学研究所(NIFS)と協力して、遠隔実験のための大量データ高速転送技術の開発を進め、2016年9月には核融合実験の大量模擬データをSINET5を介して欧州から六ヶ所村まで長距離転送する試験を行い、ITERの初期実験で想定される1実験放電あたり1TBの実験データを30分(転送速度:約7.9 Gbps)で転送できることを実証した111。

また、2018年11月には、ITERに隣接するCEAのトカマク装置WESTを用いて、遠隔実験機能の実証試験を行った(図5)。WESTとRECを広帯域ネットワークで結び、RECから放電条件の作成、実験・運転状態の監視、実験結果データの表示など、RECを拠点として一連の遠隔実験の実証に成功した。

- 参考文献 -

- 1) J.Knaster, et al., Nuclear Fusion, 57, 102016 (2017).
- 2) K.Kondo, et al., Nuclear Materials and Energy, 15 195-202 (2018).
- 3) Kondo H., Kanemura T., Nucl.Fusion, 57, 066008 (2017).
- 4) 春日井敦 他, 第 15 回日本加速器学会年会プロシーディング, 110-113, August 7-10, 2018, 長岡市.
- M. Ohta et al., Nuclear Materials and Energy, Vol.15 (2018), 261–266.
- 6) K. Okano et al., Fusion Eng. Design, 89, 2008(2014).
- 7) 谷川博康 他, 日本原子力学会誌, 54, 56(2012).
- 8) M. Nakamichi et al., Nucl. Mater. Energy, 9, 55 (2016).
- 9) 星野毅, 熱測定, 38,99(2011).
- 10) 中島徳嘉 他, プラズマ・核融合学会誌, 91,711(2015).
- 11) T. Ozeki et al., Fusion Eng. Design, 112, 1055 (2016).

著者紹介

◆以下の著者の所属はすべて, 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門

谷口正樹 (たにぐち・まさき)

(専門分野/関心分野)中性粒子入射加熱装置の開発に長年 携わった後、現在はITER/BA に係る国際交渉に従事。

坂本慶司 (さかもと・けいし)

(専門分野/関心分野)プラズマ高周波加熱技術の研究開発に長年携わった後、現在は IFMIF/EVEDA 事業マネージャーとして活動中。

春日井敦(かすがい・あつし)

(専門分野/関心分野)現在は核融合工学のうち、核融合中性 子源およびそれに関わる加速器技術に興味がある。

飛田健次(とびた・けんじ)

(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。

松本太郎(まつもと・たろう)

(専門分野/関心分野)プラズマ物理/事業マネジメント。 ITERとBAの国際交渉。



書籍販売のご案内

■『東日本大震災における原子力分野の事例に学ぶ技術者倫理』

一般社団法人日本原子力学会 倫理委員会編, B5 判 73 ページ, 定価 1,000 円(税別・送料別)

本事例集は、2011年3月11日に発生した東日本大震災における原子力発電所に係わる活動を事例として、今後遭遇するかもしれない事象に対してどのように向かい合ったらよいのか、今、備えておくべきことは何なのかを倫理的側面から考える教材として作成したものである。

倫理問題は、ある日突然やってくるものである。そのときに 冷静な判断ができなければ技術者としての責務を果たせない可 能性があり、結果として大きな災禍にみまわれることも考えられる。そのような観点から今回の事例を通じて、さらに倫理観を向上させることは重要である。事例はいずれも実際に起こったことであり、リアリティをもって読み進んでもらえるものと考える。そうすることで、より効果的に理解が促進されるものと思われる。(本書[事例の活用について]より抜粋)

○ご購入は日本原子力学会ホームページ 書籍販売のページよりお申し込みください○ http://www.aesj.net/publish/shopping



連載 講座

基礎から分かる未臨界

第1回 今なぜ未臨界か

名古屋大学 遠藤 知弘, 日本原子力研究開発機構 辻本 和文, 名古屋大学 山本 章夫

臨界管理や原子炉の運転等において、体系の中性子実効増倍率は最も基本的な概念の一つである。実効増倍率が1のときを臨界、1未満のときを未臨界と呼ぶことは良く知られているが、実は両者は大きく異なる状態である。本連載講座では、核燃料サイクル施設の臨界安全、原子炉施設の臨界管理や福島第一原子力発電所のデブリ取り出し等で重要となる未臨界状態について、臨界状態の原子炉との違い、炉物理的な特徴、未臨界状態であることを評価・測定する手法などを解説する。第1回では、臨界・未臨界の炉物理的な違いについて紹介する。

KEYWORDS: Subcritical, Critical, Criticality safety, Monitoring of subcriticality, Accelerator driven system, Fuel debris

Ι.

地球は未臨界か?

実効増倍率という概念がある。おおざっぱに言うと、ある体系において、時間とともに中性子がどの程度増加するのか、あるいは減少するのかを示す指標である。人口の増加率/減少率にほぼ対応した概念であると考えると分かりやすい。実効増倍率は、原子力工学の最も基礎的な概念の一つであり、原子炉物理において学ぶ最も重要な概念である。原子力にかかわっている人であれば、この言葉と大まかな概念は知っているであろう。

原子炉物理の教科書では、原子炉は運転時に臨界となっている、と書かれており、以下の説明がなされている。

実効増倍率 >1:超臨界 実効増倍率 =1:臨界 実効増倍率 <1:未臨界

それではここで質問。「地球は未臨界か?」。地球にウラン鉱石は埋蔵されているが、その濃度は低いので、当然ながら、地球は未臨界、と考えて良いであろうか?

1. 地球の実効増倍率の計算値は?

(1)地球をモンテカル口コードでモデル化すると

この問いは、臨界安全の分野では有名な「地球の実効増倍率問題」(英語では、k-effective of the world problem)である¹⁾。先に述べたように、地球にはウラン鉱石が埋蔵さ

Subcriticality - from basics to applications (1); Revisiting subcriticality: Tomohiro Endo, Kazufumi Tsujimoto, Akio Yamamoto.

(2019年5月13日 受理)

れているが、その濃度は低く、また、核分裂を起こしやすいウラン 235 の濃縮度も約 0.7wt%と低い。そのため、地球全体をモンテカルロ法に基づく核特性計算コードでモデル化し(全地球モデルと呼ぶことにする)、計算を行ったとしたら、実効増倍率は限りなく零に近い値になることが予想される。

しかしながら、現在運転中の原子炉の炉心をモンテカルロ法でモデル化し、実効増倍率を計算すると、当然ではあるが、ほぼ1、つまり臨界であるという結果になるであろう。では、このモンテカルロ法で用いた炉心モデルに、地球全体を付け加えたらどうなるであろうか。一般に原子炉容器の外側の条件(モデル化)は、原子炉の実効増倍率にほぼ影響を与えない。従って、炉心+全地球モデルの実効増倍率は、ほぼ1になるはずである。

先に述べた実効増倍率がほぼ零の「全地球モデル」との 違いはどこにあるのであろうか。地球上に点在している 原子炉をモデル化していないことであろうか。仮に、地 球上に点在している原子炉を全地球モデルに付け加えた としても、モンテカルロコードで計算される実効増倍率 は、ほとんどのケースでほぼ零となることが予想される。

モンテカルロコードでは、中性子を多数飛行させ、これらの中性子がどのように吸収・核分裂するかを評価している。具体的には、最初にある一定数の中性子を発生させ、それらが全て吸収などで消滅するまでの挙動を追跡計算する。この過程で核分裂が発生すれば、その位置と発生する中性子の個数を記録しておく。これらの核分裂で新たに発生する「次世代の」中性子数と、「現世代で」発生させた中性子数の比が実効増倍率になる。

(2) モンテカルロコードによる計算値は

地球の体積に比べ、地球上に点在する原子炉の体積は 微々たるものである。従って、全地球で計算に用いる中 性子をランダムに発生させても、その中性子が原子炉に 到達することはほぼなく、原子炉以外の場所で吸収され ると予想される。そのため、実効増倍率はほぼ零と計算 されるであろう。一方、運転中の原子炉内で全ての中性 子を発生させたとしよう。これは、通常良く行われる原 子炉の炉心解析と同じ計算となり、実効増倍率はほぼ1 になると予想される。

このように、モンテカルロ法の計算条件によって計算 される実効増倍率は大きく変わるが、炉心内で中性子を 発生させるという適正な計算条件を用いれば、運転中の 原子炉が一基でもある場合には地球の実効増倍率はほぼ 1であるとの評価になる。一方、地球上の全ての原子炉 が未臨界の停止状態であれば、地球の実効増倍率は1未 満になると考えることが出来る。

(3) 遠い過去、地球は臨界だった?

なお, 原子炉が存在しなくても, 過去, 「地球の実効増 倍率」が1になっていた時期があることが知られている。 ガボン共和国のオクロ地区に約20億年前に存在してい たとされる天然原子炉である。 ウラン 238 に比べてウラ ン 235 の半減期が短いため、現在は 0.7wt% のウラン 235 濃縮度は、約 20 億年前には 3.5wt%程度あったこと が簡単な計算から確認できる。ここで、ウラン鉱床に水 が適量存在すれば、 臨界となり得る条件になり、 実際に オクロの天然原子炉では、数十万年にわたって間欠的に 「臨界になっていた」と推定されている。この時期は、間 欠的にではあるが、まさに「地球の実効増倍率が1に なっていた |と言えるかもしれない。

2. 一定出力で運転している動力炉は臨界である?

(1)原子炉内の中性子数の計算

先の実効増倍率の定義では、実効増倍率は中性子数の 変化率に対応した概念であり、臨界は実効増倍率が1、 すなわち、原子炉内の中性子数に変動がない状態であ る。核分裂は、原子炉内の中性子数にほぼ比例するであ ろうから、一定出力→中性子数に変動がない→実効増倍 率が1→臨界、ということになろうか。実際、一般的に は、「運転中の原子炉は臨界になっている」との説明がな

一般的には、この説明で問題ないであろう。しかしな がら、厳密には、この説明は以下で説明するように正し くない。

原子炉には、核分裂の「火種」となる起動用の中性子源 が必ず必要となる。初めて原子炉を起動する場合(初装 荷炉心)では、カリフォルニウム 252 の自発核分裂を用い た一次中性子源などが用いられる。ここで、火種となる

中性子源から発生する中性子数を毎秒S個とし、実効増 倍率を k とする。実効増倍率は、「1 個の中性子が、核分 裂で生成する新たな中性子数の平均値 | と考えることが 出来るため、中性子源から発生したS個の中性子は、炉 心の中で $S \times k$ 個の中性子を発生させる。この $S \times k$ 個の 中性子はさらに $S \times k \times k$ 個の中性子を発生させる。この プロセスを繰り返すことにより、火種の中性子 S 個を起 源として発生する中性子の総数は、以下で与えられる。

 $S+Sk+Sk^2+\cdots$

仮に、実効増倍率 k が 1 であったとすると、

 $S+S+S+\cdots=\infty$

となり、上記の中性子の総数は無限大になる。つまり、 原子炉の出力は無限大になり、ある有限の一定値にはな

つまり、中性子源が炉心内に存在する原子炉におい て、ある一定の出力で運転するためには、必ず実効増倍 率 k が 1 未満でなければならない。この場合, 上記の中 性子の総数は.

$$S + Sk + Sk^2 + \dots = S/(1-k)$$

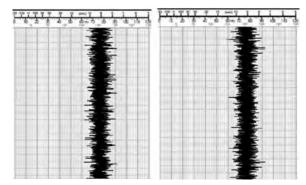
と有限の値になり、原子炉の出力(1秒あたりに発生する 中性子数に比例)も有限の一定値になる。以上のことか ら,一定で運転している動力炉は厳密には臨界ではな く、わずかに未臨界の状態であると言える。

なお、カリフォルニウム 252 などの中性子源を用いな くても、 炉心内にはウラン 238 等の自発核分裂により中 性子が常時発生しており、「核分裂以外の中性子源が零」 という原子炉は事実上存在しない。つまり、厳密に一定 出力で運転している原子炉は、全てわずかな未臨界であ る。ただし、動力炉では中性子源の影響はごくわずかで あることから、一定出力で運転している動力炉が「臨界 である |と述べても事実上問題ないであろう。

3. 臨界と未臨界は見分けがつかない?

(1) どちらが臨界状態?

図1に極低出力で運転する試験用の原子炉(臨界集合 体)における中性子検出率の時間変化を示す。この時間 変化は、シミュレーションにより再現されたものであ



臨界集合体における中性子計数率の時間変化(縦軸が経 過時間, 横軸が計数率)

る。図1には二つの時系列データが存在するが、そのうち一つは中性子源が入った未臨界状態、もう一つが臨界状態である。なお、シミュレーションを用いているので、厳密に臨界状態を再現できる。さて、どちらが未臨界時のデータであり、どちらが臨界時のデータであろうか?(答えはこの節の最後に記載。)

実は、中性子計数率の時間変化から、体系が中性子源で維持されている未臨界状態か、臨界状態であるかを判定することは、意外に難しい。トレンドとしては、いずれのケースも中性子計数率がほぼ一定であり、中性子計数率が「増えている」「一定」「減っている」という区分では判定できないからである。では、原子炉が臨界かどうか(臨界になるかどうか)を試験的に確認するためにはどのようにすれば良いだろうか。

(2)動力炉での臨界の確認

動力炉では、おおよそ1年に一回定期検査が行われ、この際に炉心に装荷されている燃料が部分的に交換される。燃料交換後、原子炉を起動する際に、「炉物理試験」と呼ばれる炉心性能を確認する試験が実施される。炉物理試験は、炉心を臨界にして実施するが、この際、炉心が臨界になっているかどうかの判断は、「原子炉出力(中性子計数率)が一定になること」では行わない。先に述べたように、中性子源で維持された未臨界か、臨界かの区別がつかないためである。ではどうするのであろうか。

原子炉の出力は、炉心が超臨界状態になったとき、時間とともに指数関数状に上昇する性質がある。そこで、この性質を利用し、制御棒を引き抜いて原子炉に反応度を加えたあと、原子炉出力が時間とともに指数関数状に上昇しているかどうかで「臨界」になるかどうかを判定している。なお、原子炉出力計は出力が対数軸の表示になっている場合があり、この場合は、原子炉出力は時間とともに直線状に上昇することになる。なお、この試験の際、定規をあてて直線になっているかどうか確認する人もいるようである。(答え:図1は、左側:中性子源が存在する未臨界状態、右側:中性子源が存在しない臨界状態)。

4. 未臨界度の絶対測定:炉物理の難問

(1) 実効増倍率と中性子源強度の切れない関係

2. で説明したように、強度Sの中性子源が存在する実 効増倍率がkの未臨界体系において、体系内の中性子数 は、以下のように計算される。

$$S/(1-k)$$

同一の体系で実効増倍率が変化すると、体系内の中性子数、ひいては中性子計数率が変化する。実効増倍率が大きくなり1に近づくと、中性子計数率が増加し、逆に、実効増倍率が小さくなり1から離れると中性子計数率が減少する。従って、中性子計数率の変化を見ることによ

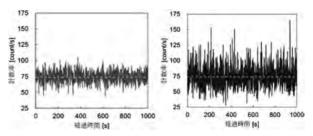


図2 中性子計数率の時系列データ

り、体系の実効増倍率の変化度合いを確認することができる。

しかしながら、やっかいな点が一つある。実効増倍率が変化せずに、中性子源強度が変化するとどうなるだろうか。中性子源強度が大きくなると、中性子計数率は増え、逆に中性子源強度が小さくなると、中性子計数率は減少する。つまり、実効増倍率の変化と見分けがつかないのである。言い換えると、小さい中性子源強度で実効増倍率が1に近いケースと、大きい中性子源強度で、実効増倍率が1から遠いケースでは、見分けがつかないことになる。

このため、中性子計数率の時系列データのみを用いて、体系の実効増倍率を測定することは、一般的に非常に難しく、現在でも完全には解決されていない炉物理上の難問となっている。

一般的には、体系をある未臨界状態にしておき、その状態での実効増倍率 $k_{\pm \mp}$ を何らかの手段で測定する(ペリオド法や制御棒落下法など)。その状態を起点として、体系内の中性子源強度を変えずに、実効増倍率だけを変化させる。この場合、中性子計数率Nは、

$$N \propto S/(1-k)$$

であるため、以下の等式が成り立つ。基準状態における計数率 $N_{\pm \mp}$ 、測定したい体系の計数率 $N_{m \pm}$ 、基準状態の増倍率 $k_{\pm \pm}$ が分かっているため、測定したい体系の増倍率 $k_{m \pm}$ を求めることができる。

$$N_{\pm^{\pm}}/N_{\text{llig}} = (1-k_{\text{llig}})/(1-k_{\pm^{\pm}})$$

では、中性子計数率の時系列データのみを用いて、体系の実効増倍率を推定することは不可能なのだろうか。 図2に、実効増倍率が非常に低い体系(左)と、臨界に近い体系(右)における中性子計数率の時系列データの例を示す。

(2) ゆらぎがポイント

中性子計数率の平均値は両体系とも毎秒75カウントであり、ほぼ同一であることが分かる。従って、中性子計数率の平均値だけを見ていては、実効増倍率の違いを推定することはできない。しかし、図2をよく観察すると、計数率の「ゆらぎ」に明らかな違いがあることが分かる。

まず、結論から述べると、中性子計数率の「平均」とゆらぎを表す計数率の「分散」の比である「分散:平均」の値

は、体系が臨界に近づくほど大きくなる特徴を持っている。この特徴を用いることで、体系の実効増倍率を測定することは原理的に可能であることが分かっている。この方法を雑音解析と呼んでいる。東電福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し時の臨界管理においては、雑音解析の適用も検討されている。

まず、最も簡単な例として、アメリシウム-ベリリウム中性子源が体系内にあり、体系の実効増倍率が0、すなわち、体系内で核分裂が全く発生しない場合を考えよう。この場合、単位時間内に計測される中性子の数は、ポアソン分布に従うことが知られている。計数率Nが十分に大きい場合、ポアソン分布は、平均N、標準偏差 \sqrt{N} (分散N)の正規分布とほぼ同じ形になり、核分裂が全く発生していない場合の「分散÷平均」の値はほぼ1となる。

一方,体系内で核分裂が発生している場合,図2から分かるように、分散が大きくなり、「分散÷平均」の値は1より大きくなる。この理由は以下の通りである。

(3) 釣りとゆらぎ

湖で、冬場にワカサギ釣りをしたことがあるだろうか?(波止場でアジ釣りでも良い)。ワカサギは、群れをなして移動しており、釣れ始めると立て続けに釣れるが、群れが来ていないときにはほぼ釣れない。一方、例えばブラックバスは群れになっておらず、ポツポツと釣れる感じになる。仮に、1日に釣れた数が同じであったとしよう。この場合、1時間あたりに釣れた数を比較すると、ワカサギは釣れているときと釣れていないときの差が大きいため、1時間毎に釣れた数のばらつき、すなわち分散が大きくなることは想像できると思う。

原子炉の中には中性子が飛び交っているが、中性子の 検出器は、原子炉の中に釣り竿を垂らして、中性子をつ り上げているようなものである。核分裂が体系内で発生 しない場合、中性子の発生と移動はランダムに起こるた め、単発的に「ポツポツ」計数されることになる。一方、 核分裂が発生する場合、一つの中性子から核分裂の連鎖 反応で発生した同じ「家系」に属する中性子集団が原子炉 内を動き回っており、計数されるときは立て続けに、そ うでないときは計数されない、という形で時間的なゆら ぎが大きくなる。原子炉が臨界に近づくほど、核分裂の 連鎖反応が長く続くようになり、一つの家系に属する中 性子の集団が大きくなるため、立て続けに計測される中 性子数が増え、計数率のゆらぎが大きくなる。実効増倍 率とゆらぎの量が関連するため、計数率のゆらぎから実 効増倍率を測定できることが知られている。

5. 福島第一 2 号機でキセノン 135 が検出された 理由は再臨界か?

(1) キセノン 135 はどこから? 福島第一原子力発電所事故後, 半年以上経った 2011 年 11月1日,福島第一原子力発電所 2 号機の格納容器ガス管理システムを用いて格納容器内部のガスをサンプリングし,放射線を測定したところ,核分裂で発生するキセノン 135 が検出された²⁾。キセノン 135 は,核分裂生成物のうち最も有名なものの一つであり,その半減期は約9時間と短い。事故後,半年以上経過していることから,事故前の運転時に発生していたキセノン 135 は完全に減衰してなくなっている。キセノン 135 は核分裂からしか発生しないため,2 号機の過酷事故において,溶融し,原子炉容器下部や格納容器下部に堆積した核燃料が再臨界となっているのではないか,との憶測を呼んだ。

このキセノン 135 の検出は、再臨界とは直接関係なく、自発核分裂を考えることで説明できる。通常のウラン燃料に含まれているウラン 238 や、核燃料の燃焼に伴って発生するプルトニウム 238, 240, キュリウム 242, 244 といった核種は、自発核分裂しやすい性質を持っている。この自発核分裂で発生したキセノン 135 が、格納容器内部のガスサンプリングシステムで検出されたものと考えられる。

キセノン 135 が 11 月 1 日に検出された翌日, 東電は, 念のため炉心にホウ酸水を注入した。ホウ酸水は中性子を吸収する効果があるため, 仮に燃料デブリが再臨界になっていたとすると, 燃料デブリが未臨界になり, 発生するキセノン 135 の量は大幅に減るはずである。しかしながら, ホウ酸水を注入した後も同程度の濃度のキセノン 135 が検出された。このことは, 燃料デブリが再臨界になっていたのではなく, 自発核分裂でキセノン 135 が発生しているとの推測と整合している。

(2) デブリ取り出し時の臨界管理

福島第一原子力発電所の廃炉作業では、溶け落ちた燃料(燃料デブリ)を取り出す作業が計画されている。現状では、燃料デブリは未臨界と判断できるが、燃料デブリの取り出しにおいては、固まった燃料デブリの掘削、移動などの作業が発生する。再臨界になる可能性は低いと予想されるものの、一方で、再臨界になることはないと予断を持って作業することは安全上許容されない。そのため、燃料デブリ取り出しにおいては、何らかの形で臨界管理を実施することになると予想される。現在、そのための技術開発が進められている。

Ⅱ. 本連載講座の概要

今後,本連載講座で取り扱う内容について,以下に概要をとりまとめる。

 未臨界度の定義(第2回)
 未臨界度は、実効増倍率kに対して (1-k)/k

として定義されることが一般的である。しかしながら. 実効増倍率は、体系がちょうど臨界状態にある際の中性 子束の分布を用いて評価していることから、未臨界状態 にある体系における中性子の増倍を的確に表していると はいえない場合がある。これは、特に実効増倍率が1よ りずっと小さい場合(未臨界度が深いとき)に顕著に表れ る。そのため、未臨界状態における中性子の増倍(変化 率)を適切に表す様々なパラメータが検討されている。第 2回ではこれらのパラメータの概要について紹介する。

2. 未臨界度の測定(第3回)

体系の未臨界度(実効増倍率)を測定する手法として, 様々な手法がこれまでに提案されている。これらの測定 手法はそれぞれ長所と短所があり,これらを良く理解し て適切な測定方法を使用する必要がある。第3回では, 未臨界度測定手法の原理と特徴について説明する。

3. 臨界安全(第4回)

核燃料を取り扱う施設において、意図しない核燃料の 臨界を防ぐことは、安全確保の基本である。第4回で は. 臨界安全について、未臨界確保の方策などと関連付 けながら説明を行う。

4. 燃料デブリ取り出し(第5回)

福島第一原子力発電所において計画されている燃料デ ブリの取り出しにおいては、燃料デブリの臨界管理を行 いながら作業を実施する予定である。第5回では、燃料 デブリ取り出し作業における臨界管理の考え方と技術開 発の状況を説明する。

5. 加速器駆動システム(ADS)(第6回)

加速器駆動システム (Accelerator Driven System) は、 マイナーアクチノイド核種の核変換の一手段として検討 がなされており、未臨界状態の体系に、加速器で発生さ せた高エネルギー荷電粒子を用いて発生させた核破砕中 性子を打ち込んで定常運転を行う。ADS の性能は、加 速器のビーム強度とともに、体系の未臨界度に大きく依 存するため、未臨界度の常時監視が重要となる。第6回 では、ADS における未臨界度監視について説明する。

6. 動力炉での未臨界度監視(第7回)

商業炉における燃料交換は、未臨界であることを確認し ながら実施されている。第7回では、商業炉、特にBWR における未臨界度の常時監視技術について紹介する。

7. 未臨界実験の活用(第8回)

一般に核特性の検証は、極低出力の臨界集合体を用い て行われている 臨界実験データを用いる。 臨界実験は, 小型とはいえ、原子炉を用いる必要があるため、限られ た条件でしか行うことが出来ない。一方、臨界にならな いが、核燃料を用いた体系で実験を行うこともでき、こ れは未臨界実験と呼ばれている³⁾。体系を臨界にしない ため、原子炉では実施できないような実験も実施できる ことが特徴になる。第8回では、未臨界実験と、その データの活用方法について説明する。

Ⅲ. まとめ

臨界と未臨界は、実効増倍率が1か1未満かの数字上 の違いではなく、異なる物理状態であると考えたほうが 良い。初回は、臨界と未臨界の違いについて、いくつかの トピックスを交えながら解説した。第2回目以降は、未 臨界についての基礎的な知識を得られるよう、学術的な 側面から実際の応用までを体系的に解説する予定である。

- 参考資料 -

- 1) G. E. Whitesides, "A Difficulty in Computing the k-effective of the World," Trans. Am. Nucl. Soc., 14, 680 (1971).
- 2) 福島第一原子力発電所 2 号機の格納容器からの Xe135 の検 出について、東京電力株式会社、平成23年11月4日.
- 3) 未臨界実験データ評価研究専門委員会報告書,「未臨界実験 データ評価」研究専門委員会, 一般社団法人 日本原子力学 会, 2011年3月.





遠藤知弘 (えんどう・ともひろ) 名古屋大学 工学研究科 (専門分野/関心分野)原子炉物理, 臨界安 全. 未臨界度測定



辻本和文(つじもと・かずふみ) 日本原子力研究開発機構 (専門分野/関心分野)原子炉物理, 核変換



(38)

山本章夫(やまもと・あきお) 名古屋大学 工学研究科 (専門分野/関心分野)原子炉物理,原子力 安全

報告

高速炉開発に関する技術戦略 新型炉部会「高速炉戦略ロードマップ検討会」提言

東京大学 笠原 直人

新型炉部会では、「高速炉戦略ロードマップ検討会」を設置し、高速炉開発の方向性について、提言をまとめた。短期的ロードマップの検討を中心とする国の検討に対して、本提言は長期的 視点と戦略を重視したものとしている。ここで、制約や不確実性の大きい環境下では長期開発 に困難が予想される。このため最初に、現状の制約からは一定の距離を置いた普遍的目標から バックキャストで長期計画を考え、次に現在の制約から出発してフォアキャストで長期計画と整合する短期計画を検討した。

KEYWORDS: fast reactors, roadmap, greenhouse gas, energy security

Ⅰ. 「高速炉戦略ロードマップ検討会」の目的

21世紀のエネルギー消費においては2つの基本的制約がある。1点目は、前世紀における大量エネルギー消費に伴う温室効果ガスの放出が地球環境を破壊していることである。このため、カーボン・エミッション・フリーのエネルギー消費に制限される。2点目は、エネルギー資源は有限であり、かつ地球上に偏在しているという事実である。このため、自国にエネルギー資源を有しないわが国では準国産のエネルギーを確保しなくてはならない。

わが国のエネルギー自給率は約8%と先進国中で最も低く、東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、1F事故)後は、1973年の第一次オイルショック時並みに化石燃料への依存度が高まっている。パリ協定では今世紀中に温室効果ガス排出量を実質ゼロにするという目標が掲げられており、世界は温室効果ガス排出量の大幅削減を目指したエネルギー改革を進めている。それを踏まえわが国は、「2030年度に2013年度比26%減」を国連に提出するとともに、長期的に目指す目標として「2050年80%減」を政府が定めている。1.2)

21 世紀半ばに向けて温室効果ガス排出量大幅削減とエネルギー安定供給を実現していくには、太陽光や風力を中心とした変動型再生可能エネルギー(以下、VRE)だけで電力需要に対応することは難しく、原子力エネルギーとの組み合わせが現実的かつ有望であるとの意見が国内外で提出されている。 $^{2\sim6}$)

Technology Strategy on Fast Reactor Development; Proposition by Committee on Strategic Roadmap of Fast Reactors, Advanced Reactor Division: Naoto Kasahara.

(2019年7月11日 受理)

ここで、原子力エネルギーの持続的な利用(エネルギー安定供給)のためには、ウラン資源の制約からの開放と放射性廃棄物による環境負荷の低減が必要になる。高速炉サイクルは、その両者を解決するポテンシャルを有しており、わが国では原子力開発の当初から国策として開発が進められてきた。

これに対し、1F事故、電力自由化、および2016年末の高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」)廃止措置決定といった情勢の大きな変化が生じたことから、高速炉開発戦略を練り直す必要性が出てきている。また、国において今後10年程度の高速炉開発戦略ロードマップ構築の検討が2017年から2018年末まで行われた。

これらを受けて、日本原子力学会新型炉部会に、「高速炉戦略ロードマップ検討会」を2017年8月に設置し、学会の行動指針である「研究開発成果の活用、地球環境の保全、人類社会の持続的発展への寄与」の観点に立ち、今後の原子力研究開発のあり方に大きな影響を及ぼす高速炉開発の方向性とその進め方について議論を重ねた。特に、国が検討するロードマップの範囲には含まれない、高速炉サイクル開発の長期目標や人と社会との係りを含む技術戦略を中心に検討することとした。

ここで示す報告概要は、本検討会の議論を踏まえて提言のエグゼクティブサマリーとしてまとめたものであり、2018年12月1日には新型炉部会ホームページで公開した。なお、本提言は2018年12月21日の原子力関係閣僚会議を経て公表された高速炉開発に係る「戦略ロードマップ」を反映したものではない。

Ⅱ. 開発目標

1. 原子力エネルギーの持続的利用

(1) ウラン資源利用率の飛躍的拡大

OECD/NEA と IAEA による「Uranium 2016: Resource, Production and Demand」によれば、2014年のウラン(U)需要(5.6万tU)をベースに「既知資源量は世界の原子力発電を135年以上賄うのに十分」という報告がなされている。しかし、今後世界の原子力発電規模がロシア、中国、インド等を中心に増大していくと、21世紀後半にウラン価格が高騰する可能性を排除できない。エネルギー安全保障の観点から楽観的予測に基づき判断するのではなく、この不確かさについて安全側に対策を講じておくべきである。ウラン資源の一部を利用した軽水炉から、ウラン資源をプルトニウム(Pu)に変換して資源利用率を飛躍的に拡大できる高速炉サイクルへ移行し、資源の問題を解決することに意義がある。

(2)マイナーアクチニド(MA)燃焼による環境負荷 低減(放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減)

原子炉では核分裂反応に伴って長期にわたって放射能を有する放射性物質が炉心燃料内で発生する。このうちの MA は、軽水炉では核分裂しにくく、その放射能は10万年オーダで継続する。将来的には軽水炉および高速炉の使用済み燃料の中から U、Pu および MA を抽出し、高速炉で核分裂させ、放射性廃棄物の削減(例えば、1/7程度)と潜在的有害度の低減(例えば、10万年オーダから300年程度に短縮)を図っていくことも重要な意義である。

2. 安全性向上

高速炉の安全性は、その開発当初から、炉心損傷の発生防止対策の強化と炉心損傷時の影響を原子炉容器および格納容器内に閉じ込めることを目標とし、各国で様々な研究開発がなされてきた。1F事故後は、より厳しい自然現象(地震、津波等)に対するシステム健全性の確保とともに、炉心損傷の防止対策や影響緩和対策の一層の強化が求められている。今後は、これまでに開発された「受動的炉停止機能」や「自然循環による崩壊熱除去機能」、「炉心損傷時の再臨界回避機能」を採用することによって、次世代炉(第4世代炉)に求められる「シビアアクシデントを想定しても、周辺住民の緊急退避を不要とする概念」を達成していくことが重要である。

また、「ナトリウム冷却高速炉(SFR)」は冷却材であるナトリウムの高い化学的活性度が、炉心安全性に影響を及ぼさない設計にする必要がある。主要なナトリウム配管や容器のバウンダリー二重化、周辺の不活性雰囲気化、ナトリウムの化学的活性度自体を低減する研究開発(例えば、「ナノ粒子分散ナトリウム」)等によって達成していくべきである。

3. 経済性向上

高速炉の実用化には、他の電源と競合できる発電コストを達成することが求められる。このため、高速炉の特長を生かし、高燃焼度燃料および被覆管材料の開発と長期運転サイクルを可能とする炉心設計(例えば、高内部転換炉心等)を行い、kWh当たりの運転費(含む燃料費)の低減に取り組むべきである。また、システム設計の簡素化、主要機器のコンパクト化、ナトリウムループ数の削減等、革新的な技術開発を行い、他の電源と競合できる発電コストを達成できる見通しを示していくことが必要である7)。

今後は、設計研究と連携した要素技術開発を進め、技術的実現性を高めていくとともに、高速炉サイクルによって達成できる①燃料増殖、②放射性廃棄物減容と潜在的有害度の低減、③エネルギー資源の備蓄効果、④将来のエネルギー源に対する安全保障、の4項目に対する経済価値(社会的便益コスト)を評価する研究を進めることも重要である。

4. 機動性の確保(変動型再生可能エネルギーと 共存できる能力)

2050年の温室効果ガス排出量80%減の実現に向けて、原子力発電とVREが共存できることが必要である。現時点では、天候次第で電力需要に応える能力に乏しいVREは、バックアップ電源が必要であり、化石燃料による火力発電が用いられている。将来の脱炭素時代に向けては、大容量バッテリーに期待がかかるものの、大規模に導入されるVREの調整電源とするには経済的にも大きな課題がある⁵⁾。このため、将来の脱炭素社会の実現に向けては、原子力発電が安全性と信頼性を損なうことなく、短時間の負荷追従能力を確保することや、定格運転でも余剰電力の利用や貯蔵など、様々な方策について研究開発を行い、機動性を確保していくことが重要となる⁶⁾。

Ⅲ. 世界における高速炉開発の現状

1. 政策として高速炉の実用化開発を進めている 国々

ロシア、中国、インド、フランス等では、各々の国情に応じて、新規軽水炉の開発・建設あるいは導入と並行して、SFRの実用化計画をもち、これを着実に進めている。特に、ロシア、中国では、建設中の軽水炉を国内外に複数有し、設計から建設完了までおおむね順調に進展している。これらの新規軽水炉の建設とともに、高速炉の実用化開発も国の開発計画の下、実証炉の設計や運転が進められ、2030年代の実用化を目指して開発が進められている。

2. 民間提案の多様な炉概念の研究開発を進めている国々

民間企業が提案する高速炉および軽水炉の多様な革新

概念の研究開発を、政府が支援している国として米国、 英国等がある。そこでは従来の大型炉ではなく、民間投 資を促進可能な小型モジュール炉が対象となっている。 高速炉に関しては、鉛冷却炉や溶融塩炉に関する概念検 討や基礎的な研究開発が民間提案に基づいて進められて いるが、それらを実用化する計画立案の段階には至って いない。

3. 日本

1F 事故後,原子力発電は重要な電源と位置付けるものの,可能な限り依存度を低減するという政府方針が,今般のエネルギー基本計画に記載されている。高速炉開発については,「高速炉開発の方針」(2016年12月原子力関係閣僚会議決定)に基づき策定されるロードマップの下,米国や仏国等と国際協力を進めつつ,研究開発に取り組むと記載されている。

「もんじゅ」以降の高速炉開発は、1980年代から1990年代まで行われた電力実証炉計画を経て、1999年から日本原子力研究開発機構と電力会社の共同プロジェクトとして、「FBRサイクルの実用化戦略調査研究(FS)」が行われた。そこでは、わが国で蓄積してきたSFR(酸化物燃料: MOX)だけでなく、多様な炉概念としてガス冷却炉、重金属冷却炉、水冷却炉、溶融塩炉が、また多様な燃料形態(酸化物燃料、金属燃料、窒化物燃料)に対応する高速炉サイクルが検討された。2006年には、開発目標(安全性、資源有効利用、環境負荷低減、経済性、核拡散抵抗性)への適合性と技術的実現性(国際協力の可能性を含む)の2つの視点から比較検討し、SFR(MOX)を主概念、SFR(金属燃料)が副概念として選定された。

2006年の原子力立国計画に基づき2025年頃の実証炉建設,2050年より前の実用化を目指して、SFR(MOX)を対象に「FBRサイクル実用化研究開発(FaCT)」が開始された。そこでは安全性、経済性、信頼性を向上させていくために13種類の革新技術が選定され、設計研究による成立性評価や設計物量や炉心性能に基づいた経済性評価が行われた。

一方、安全性については、FaCTで実施された実用炉/ 実証炉の設計研究の成果を踏まえ、第4世代炉に求められる安全設計の基準類が整備された。そこには1F事故の教訓も反映され、また安全設計クライテリア(SDC)および安全設計ガイドライン(SDG)としてまとめられ、日本原子力学会・専門委員会での議論を経て第4世代炉国際フォーラム(GIF)において策定された。現在、これらはGIF/SFR参加国(米, 仏, 露, 中)の規制関係者およびIAEA関係者と意見交換が進められている。

また、FaCT では受動安全性と炉心損傷時の再臨界回避方策に関する技術開発が進展し、第4世代炉の安全目標を実現できる見通しが得られてきている。その後、2014年からフランスの ASTRID 計画に参画し、共同設計および共同研究が進められ、1F 事故の教訓を生かし

た先進ループ型 SFR のみならず、国内立地可能性も見通せるタンク型 SFR の設計概念も概略検討された。これらにより、「実証炉の設計段階に向けた開発作業に改めて着手することは十分に可能」と国の高速炉戦略 WG にて判断されている 8)。

Ⅳ. 技術戦略の視点

1. エネルギー安全保障に対する地政学的認識

わが国はエネルギー資源に乏しく、化石燃料資源のみならず、天然ウラン資源も海外に依存している。また、VREである風力・太陽光発電はともに、諸外国に比べて稼働率を年間通じて高くできる気象条件の良い場所も少なく、国内で電力系統は閉じていることから、EU諸国のように電力の輸出入で調整することから、EU諸国のように電力の輸出入で調整することから、わが国でいる。一方、高速炉サイクルは技術によって長期にわたり安定したエネルギーを獲得できることから、わが国では原子力開発当初から高速炉サイクルの実用化を目標としてきた。高速炉サイクルは、技術が生み出す国産エネルギーであり、技術自給率の向上、ひいてはエネルギー自給率の向上に貢献でき、ウラン資源の価格高騰等によって軽水炉利用が困難になる可能性に備えることができる。

2. ステークホルダーとの合意形成

高速炉開発は長期にわたることから、開発関係者のみならず、規制機関を含む政府の関係省庁、立地自治体、国民の各層において、社会的な合意形成とその維持に取り組むことが重要である。特に、エネルギー安全保障等の重要性、確保すべき安全性の目標、Pu保有量の管理等の認識を共有するため、立地自治体や国民に対しては丁寧に説明する必要がある。また、「もんじゅ」で得られた知見と教訓も、今後の開発に活かしていくことが望まれる。特に、保守管理不備で指摘された事項を解決できる「開発段階にある SFR に適合する保全計画」と、国際的に合意された安全設計(SDC/SDG)の考え方に基づいた「SFR に対する規格基準類」については、開発側だけでなく規制側、関連学会、内外の有識者等と幅広く意見交換を行い、技術開発と並行して整備していくことが重要である。

3. 蓄積された技術レベルの維持・発展

わが国に蓄積されてきた高速炉技術は、SFR(MOX)に関するものがほとんどである。これまで、実験炉「常陽」および原型炉「もんじゅ」の設計・建設・運転、そしてFaCT 以降に実施した設計研究と要素技術開発、日仏ASTRID協力により、実証炉を建設可能なレベルの技術が官民に蓄積されてきた。特に事業者やメーカが保有する技術の維持は、設計研究や要素技術開発を進めていくだけでは困難であり、実際の高速炉プラントを設計・建設・運転して初めて実用化に向けた技術の発展が期待でき、人材の確保につながるのである。「もんじゅ」の建設

完了から四半世紀経過した現在では,「もんじゅ」の機器 製造や建設,試運転に携わった技術者の多くが退職年齢 に到達しつつある。わが国の技術資産を無駄にせず,若 手・中堅の技術者へ伝承し,今後の実用化に繋げていく 方策を明確にすることが急務である。

4. 建設間隔の経済性への影響

米国は、1979年のTMI事故以降、新規軽水炉の設計・建設プロジェクトが途絶えていた。2012年に認可・建設が開始された新規軽水炉は、主に建設プロジェクト上の問題(サプライチェーンや現地での設計変更対応不備の問題も含む)で建設工期が大幅に遅延しコストが高騰した。また、フランスの新規軽水炉でも、安全規制による設計変更、原子炉材料の品質保証の問題等により、建設工期の遅延と建設コストの高騰が発生した。このように、欧米での新規軽水炉の建設実態から、原子力発電の経済性は、設計物量に基づいたコストのみならず、安全規制の予見性、主要機器の品質保証、建設プロジェクトの熟練度等が大きく影響することが指摘されている。

一方、上述したようにロシア、中国では、多くの新規 軽水炉の建設が進められており、欧米で発生したような 工期の大幅な遅延や建設コストの高騰は見当たらない。 これらの事実は、設計、建設の経験知が十分あるうちに、 次期炉の開発に着手することが、技術継承のみならずプ ラントの経済性を確保する上でも有効であることを示し ている。

5. イノベーションおよび人材の確保

高速炉が実用化されるまでの開発期間がかなり長期にわたると考えられる。このため、現時点では未成熟な概念でも、その間に開発が大きく進展する可能性がある。この不確実さに備えるためには、国内外の多様な研究開発動向を注視し、様々な炉概念および革新技術に関するイノベーション研究の状況を把握するとともに、それらの中から将来の高速炉サイクルに寄与する可能性の認められる技術を取り込んでいく柔軟性をもつことが重要である。特に、大学や研究機関においては、実用化開発における主概念や技術の制約にとらわれず、より幅の広い多様な炉型や革新技術について研究し、原子力研究の裾野を拡大していくことが望まれる。その際、学会のみならず産業界との意見交流の場を設け、研究活動の活性化を図るとともに、高速炉サイクルの研究開発を担う人材育成も図っていくことが重要である。

6. 国際協力による効率的な開発と市場性の確保 長期間を要し、多額の研究開発資金が必要となる高速 炉開発では、国際協力を活用して、効率的な研究開発を 実施するとともに、海外の運転経験や技術知見の取り込 みを積極的に進め、開発リスクの低減を行うことが合理 的である。加えて、SFR の安全設計基準類の世界標準化 を目指し、これに基づく安全設計概念を世界に先駆けて 実機で具現化する。そして、その内容や効果を国際的な

ネットワークを通じて情報発信していくことは、将来の 市場性を確保していく上でも重要である。その場合、こ れまで行ってきた日仏および日米協力にとどまらず、高 速炉開発を加速しているロシア、中国、インドとの情報 交換等により、安全技術の標準化を先導し、高速炉の安 全性向上に貢献していくことが望まれる。

V. 今後の開発の方向性と進め方

今後の高速炉開発は、上述した技術戦略の視点を踏まえて、方向性と進め方を決める必要がある。ここでは、現在の情勢や目先の利益からは一定の距離をおいて100年程度は揺るがない普遍的な目標を定め、そこからバックキャストで長期計画を考えた上で、一転、現在の情勢から出発したフォアキャストで、長期計画と整合する現実的な短期計画を考えるアプローチを採用した。このような長期と短期の2つの視点を設けることで、長期にわたる一貫性と不確実性に対する柔軟性の両者を確保することとした。

1. バックキャストの視点

高速炉サイクルの目標は、わが国のエネルギー安全保 障に貢献するための、資源有効利用と環境負荷低減の同 時達成による原子力エネルギーの持続的利用である。そ の達成のために、使用済燃料から U/Pu とともに MA を 抽出し、これらを混合した燃料による高速炉サイクルを 実用化していくことが、原子力における真のイノベー ションと考える。これに至る前の21世紀後半には、世 界のウラン需給・価格の大きな変動や、軽水炉のリプ レース需要が想定される。この時期までに、高速炉によ る U/Pu サイクルの本格実用化を可能にすることで、資 源問題に備えることが望まれる。また、同時期には VRE の導入も拡大していることが予想され、原子力発 電は調整電源としての役割から、エネルギー貯蔵設備と も連携できる技術を開発し、原子力と VRE の共生を実 現できることも必要になる。さらにその前の段階(21世 紀半ば頃)では、軽水炉での燃料サイクル(プルサーマ ル)利用を支援するため、プルサーマルからの使用済 MOX 燃料を再処理し取り出された(高次化)Pu を高速 炉で燃焼させることにより、(高次化)Puの削減などの 役割を担うことも期待される。そのため、使用済 MOX 燃料の再処理技術の確立が必要となる。このように、高 速炉の導入初期は、軽水炉が多数基稼働する中で少数基 の高速炉がどのような役割を果たせば原子力利用の幅を 広げられるかについて更なる検討が望まれる。

2. フォアキャストの視点

現時点でわが国は、実証炉の設計、建設が可能なレベルの高速炉技術を保有しているが、これが散逸する前に、次期炉の開発に着手し、蓄積した高速炉技術を設計、建設、運転の一連のプロセスで総合的に高めていくことが、これまで育成した人材と技術継承、研究開発に投資

した資金を有効に活用する観点からも重要である。

高速炉の安全設計基準類の整備では、1F事故の教訓反映も含め、わが国が世界で主導的な役割を担ってきた。同時に、受動的安全機能や炉心損傷時の再臨界回避方策等の研究開発も進展し、GIFで策定された SDC/SDG を実現する安全技術の開発も世界に先行してきている。早期にこの安全技術を実証し、国際標準として世界に貢献していくことがわが国の責務であり、市場の優位性を確保することにも繋がることが期待できる。そこでは、実用化に求められる経済性が見通せるように、設計の簡素化と機器コンパクト化等による物量削減と、製造建設技術を高度化することも重要である。さらに、「もんじゅ」でやり残した、高速炉の運転経験、保守補修経験を蓄積し、建設コストだけでなく、基幹電源としての発電コストに関する見通しも立てられることが重要である。

以上より、わが国に蓄積された技術知見を有効に活用し、安全技術の世界展開と高速炉の実用化を見通すための経済性実証を行うための最も合理的な方法として、安全標準炉(Safety Standard Demonstration Reactor)の建設を目指した開発を提案する(図1参照)。その開発にあたっては、高速炉サイクルの目標の達成に長期間を要することから、エネルギー安全保障を確保する国の政策が不可欠である。併せて、この政策の下、適切なタイミングで国民および立地自治体や規制側等のステークホルダーへ、開発計画と進捗状況を丁寧に説明し、合意形成

に努めていくことが必要である。

報告書の詳細は、日本原子力学会新型炉部会のホームページから公開されている。

- 参考資料 -

- 1) 日本の約束草案 2015.07.17 地球温暖化対策推進本部決定.
- 2) 総合資源エネルギー調査会・基本政策分科会 第 26 回 2018.04.27.
- The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, An Inter- disciplinary MIT Study, 2018.
- 4) The 4th GIF Symposium 2018, http://gifsymposium2018.gen-4.org/programme.html
- 5) 経済産業省資源エネルギー庁エネルギー情勢懇談会提言「エネルギー転換へのイニシアチブ(案)」平成30年4月10日.
- 6) Charles Forsberg, "Strategies for a Low-Carbon Electricity Grid with Full Use of Wind, Solar, and Nuclear Capacity to Minimize Total Costs," MIT-ANP-TR-162, Aug. 2015.
- 7) 向井田恭子他:高速炉サイクルの経済性評価, 原子力学会 誌, Vol.61, No.1(2019).
- 8) 原子力関係閣僚会議,「高速炉開発の方針」(2016 年 12 月決定).

著者紹介



笠原直人 (かさはら・なおと) 東京大学大学院原子力国際専攻, 高速炉戦略ロードマップ検討会主査 (専門分野/関心分野)構造解析, 高温強度, 高速炉



* Safety Standard Demonstration Reactor 规制打止より兒園される酸和の向迷界に関する法規則(SDC/SDGG与語

図1 高速炉サイクル開発の方向性と進め方

Short Report

躍動するロシアの原子力開発・国際展開

─ATOMEXPO-2019 参加および発電所視察─

2019年6月に大阪で開催されたG20の中で日露首脳会談が開かれ、平和条約締結へ向け長年の懸念材料である北方領土問題等の交渉加速を継続することで一致した。原子力分野では、チェルノブイリ原子力発電所の事故のイメージが強い一方で、輸出も含む建設ラッシュ/洋上原子力発電施設/原子力砕氷船の開発といった情報が聞こえてくる。知っているようで知らない隣国「ロシア」、その一端を紹介する。

I. 視察概要

2019年4月、平成最後の月にロシアを訪れる機会を得た。(一社)日本原子力産業協会では、日露国際交流を深める活動の一環として、また、多様な原子力発電開発計画を持つロシアの状況把握を目的として、毎年、ATOMEXPO に参加するとともに、ロシアの特色ある施設を視察している。今年も、協会会員の希望者とともに6名からなる視察団を組み、4月15日(月)、16日(火)の2日間でソチにて開催された原子力産業の展示会であるATOMEXPO に参加した。その後、ヴォロネジへ移動し、4月18日(木)にロシアでの最新炉型であるVVER-1200を有するノヴォヴォロネジ原子力発電所を見学した。

Ⅱ. ATOMEXPO-2019 への参加

ATOMEXPO はロシアの国営原子力企業であるロスアトムが主催しており、2009年から始まり今回で11回目となる。開催場所のソチはご存知の通り冬季オリンピックが開催された場所であるが、ロシアの中では南に位置していて、避寒のためのリゾート地として認知されており、滞在中の気温は東京とほぼ同じ印象であった。

ATOMEXPO には世界 74 か国から約 3,600 人超 (海外から約 1,500 名) の参加者があった¹⁾。会場は冬季オリンピックが開催されたオリンピックのメディアセンターであり,展示スペースだけで $13,000\text{m}^2$ (サッカーグランド二つ分) もあり,東京モーターショーを想起させる規模である (残念ながら,キャンペーンガールはいないが)。

その会場にて、世界各国から650を超える企業・機関が趣向を凝らしたブースを出展した(図1)。特に、主催者であるロスアトムのブースでは、グループ一体となり、大きな部屋の中にテーマごとのブース(フロントエンド、建設、発電、バックエンド、その他(原子力砕氷船、



図1 ATOMEXPO 会場(世界中の企業・機関がブース出展)

浮揚型原子力発電所,デジタル技術)など)を円形に配置し、多彩な照明効果・デジタル技術を使った展示を行っていた。インテグレイテッドソリューションのセールス活動について言及されるロシアであるが、それを体現しており、飛ぶ鳥を落とす勢いを感じる。

ロシアは原子力発電所の輸出だけでなく、原子力新規 導入国に対して、技術開発協力、人材育成協力も盛んに 進めており、ATOMEXPO は発電所輸出のプロモー ションの場だけでなく、協力関係を構築する場にもなっ ている。会期中の二日間だけで 40以上の契約式が執り 行われた。主には、ロスアトムグループと他国の政府、 企業との契約であり、一例として、キューバ政府との原 子力エネルギー分野での教育・訓練、コンゴ政府との原 子力平和利用協力のロードマップ開発がある。

これら展示やイベントと並行して、プレナリーディスカッションと 18 の技術ディスカッションが行われた。本フォーラムのテーマは「Nuclear for better life」であり、各ディスカッションで本テーマを意識した発表、議論がなされた。ひとつ例を挙げると、プレナリーディスカッションにおいて、ロスアトムのリハチョフ総裁から、原子力科学技術は世界の発展に貢献していることが

示された。具体的には、国連の「持続可能な開発目標 (SDGs)」の達成には、原子力発電なしには難しいこと、またエネルギーだけでなく放射線利用(医療、農業、水) にも着目すべきことが強調され、共通のゴール(Nuclear for better life)へ向かってパートナーシップ構築を歓迎する旨の力強いメッセージが発せられた。

その他、印象に残った点としては、「公衆からの信頼」に関する技術ディスカッションでのことであるが、スカイプを使い、アフリカのカカオ工場と NOKIA のオフィスと映像を繋ぎ、それぞれが地域との共生のために行っている活動を紹介した。業種、国境、人種の壁を超えた議論が行われ、知的刺激を味わえる工夫がなされていた。

余談ではあるが、ATOMEXPOでは学生がボランティアとなって会場の案内を手伝っていた。聞くと、数学オリンピックの代表など優秀な学生をボランティアとして採用しているとのこと。原子力業界を身近に感じてもらうには良い取り組みと思われる。

Ⅲ. ノヴォヴォロネジ原子力発電所の視察

ノヴォヴォロネジ原子力発電所は、ロシア南西部ヴォロネジ州にある。ヴォロネジはモスクワから南に飛行機で約1時間半に位置し、約100万人の人口を有する。ノヴォヴォロネジ(ノヴォは新の意味)はヴォロネジから約60km南に位置する小さな街で、1964年に原子力発電所が建設されて以来、発電所関係者が多く住んでいる。

ノヴォヴォロネジ原子力発電所は計7基のプラントを有し、そのうち3基が廃止措置中である。運転中、試運転中の炉型はすべて VVER(加圧水型軽水炉)で、4号機が VVER-440、5号機が VVER-1000、II-1号機および II-2号機が VVER-1200という構成である。なお、II-2号機は現在、起動試験中で2019年度には営業運転開始の予定である。

今回は、2017年に運転を始めた II-1 号機の中央制御室およびタービン建屋を見学した²⁾。この VVER-1200 (ASE2006V-392M)は、印クダンクラム原子力発電所の設計経験、VVER-1000 の運転経験、これまでの R&D の成果を活かし、IAEA の推奨事項や欧州電力要求(EUR)を満たしたものとなっている。運転寿命は当初から 60年を想定しており、二重格納容器や設計超過事故に対応するための動的/静的安全システムを採用している。特に、静的安全システムが印象的で、4トレイン(33%容量)の空冷式熱除去システム(合計 32MW)、コアキャッチャーを備えており、シビアアクシデントリスクを大幅に低減しているものと考えられる。

II-1号機は見学の3日前に第1回定検に入ったところで、定検期間は1回目なのでやや長く70日間の予定。中央制御室の運転員は背広を着用しており、原子炉2名、タービン2名、当直長1名の1班5名体制で1日3

交代制とのこと。なお、日本の中央制御室では神棚をよく見かけるが、それと同様に神様の絵(イコン)が壁に掛けられていた。その後、タービン建屋に移動した。タービン建屋内のオペフロでは軸受けカバーの開放点検が始まっており、機器、定検工具等が多数見られた。タービンはロシア製であり、発電機は水冷の設計(水素は使わない)である。なお、発電所内では女性が多く勤務しており、男女比はほぼ50:50ではないかということだった

その他として、発電所の訓練センターも見学させていただいた(場所はノヴォヴォロネジの街の一角にある)。ここでは詳細は省略するが、訓練センターでは体系的かつ厳密な訓練が行われており、人材育成にかなり力を入れていること、また、それを新規導入国に対しても展開していることがわかった(ロシア語ではなく、英語でテキストを作成し、授業を行っている)。

ロシアでは VVER-1000, VVER-1200 を主力として 海外に展開しており, 既に, ベラルーシ, インド, バングラデシュ, トルコで7基が建設中であるだけでなく, 新規にトルコ, フィンランド, イラン, アルメニア, 中国で11 基の契約が締結されている。他にも受注済みも 含めると, 現時点で30 数基, 総額は150B \$ (約15 兆円)を超えると言われている。順調にいけば, VVER は 今後世界で最も多い炉型の一つになる予定である。

Ⅳ. 所感

ロシアを訪問したのは今回が初めてで、出発前のイメージでは、昔のハリウッド映画の影響からか、警察が怖い、商品がない、働かない、といったネガティブイメージだったが、一週間の訪問でそのイメージは大きく変わった。ATOMEXPO は非常によくオーガナイズされていただけでなく、オープンな姿勢を感じた。また、滞在中、会った方々はフレンドリーで、好印象をもった。食事についても、日本で有名なボルシチ、ビーフストロガノフだけでなく、他の料理も素材を生かしたシンプルな味付けで日本人の味覚に合うと思った。

今回の訪問で強く感じたことは、「競争力のある商品を、顧客主義のトータルサービスで、官民一体となり先行投資しており、結果としてヒト、モノ(情報含む)、カネが大規模に循環している」という点であり、ロシアの原子力躍動の一端を窺い知ることができた。

(2019年6月28日記)

- 参考資料 -

- 1) ATOMEXPO-2019 ホームページ http://www.atomexpo2018.ru/en/
- 2) 発電所見学についてのロスアトム社記事 https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/delegation -from-japan-visited-novovoronezh-npp-/



リケジョの思い(7) 議論を学ぶ. 演習授業

こんにちは。口町です。今日も研究を進めながら、学部2年生の力学演習の授業を担当しています。演習授業を持つには力不足で課題は山盛りです。その中で2年生を見ていると考えさせられることもあります。

力学演習の授業は、私たち院生が準備した問題を配布し、次の週に2年生に問題の解答を発表してもらうという流れで進みます。2年生の多くは、人前で大学レベルの物理の問題について発表したことがありません。発表は緊張した様子で始まります。発表者は問題の状況設定を踏まえて、一つ一つ問題に答えていきます。その中で、発表者の議論に飛躍や間違いがあることもあります。

そんなとき2年生たちはしばしば教え合います。しか

も、直接教えるのではなく発表者にヒントを与えるような助言をしています。「その部分はどのような意味ですか」と議論の欠けている部分を指摘したり、「こうしたらいいんじゃないでしょうか」と打開案を提案したり。

このような問い方は、同じことを勉強する仲間に対する態度としてとても良いものだと思います。相手の議論に欠けた部分があると思っても、初めから自分の考えを押し付けない。「こちらの方が上だ」と威張らない。あくまで相手の議論の中で欠けていると思う部分を冷静に指摘する。

たとえ自分の方が発表の準備が良くできている, と 思っても, その事実は学ぶ上ではそれほど重要なことで はないのです。もっとも自分の方が間違っている可能性

> もあります。演習授業で大切なのは、自分も仲間 も成長すること。演習授業での議論で大切なの は、合理的な解決にたどり着くことなのです。

> またそうして発表者とやりとりができるのは、 基本的にはきちんと予習をしてきている人たちです。自分で問題を解いてきた上で発表を聞いているので、問題の内容はもちろん、難しかった部分をある程度理解しています。直観や論理的思考力に優れていれば、発表を聞いただけで議論に参加できるかもしれません。しかし、その場で考えたことを堂々と発表するのは勇者か専門家でない限りなかなか難しいものです。また相手と異なる立場の発言をするには、相応の根拠が必要でしょう。

> 議論の目的は立場の上下をつけることではなく、協力してより良い考えにたどり着くこと。自分の考えを持った上で、相手の考えを冷静に検討すること。それは演習授業だけではなくていろいろなところで出てくるよ、きっと…。心の中で呟きつつ、2年生を見守っています。





The state of the s

著者紹介

口町和香 (くちまち・わか) 北海道大学理学院物性物理学専 攻,修士1年です。統計物理学 と研究を学ぶ傍ら、科学コミュ

ニケーションを手掛けています。



~福島浜通りだより~(5) 丁寧さと良き一日

畑仕事に勤しむおばぁちゃんと話をした時のことだ。腰が曲がり少しよたよたとしながらも、鍬で器用に畑を耕している姿がふと目に留まり、声を掛けた。「ネギを植えているのよ~」と気さくに返してくれた。晴天が続いたため、畑に水気はなく近場に水場はない。「これから水やりが大変ですね」と聞くと「大丈夫よ、これから雨が降るから、それに合わせて植えているの」「畑仕事はね賢くないと出来ないのよ。大変だって思うのは分からないから」と教えてくれた。

「お兄ちゃんもやってみたら?自分で作るから美味しいし、季節季節で好きなものが作れるから楽しいよ」

強い日差しのなか黙々と作業を続ける額には、大粒の 汗が垂れていた。

短いやり取りの中で、大切なものを受け取ったようだ。忙しさで身近なことに楽しみを見いだせなくなっていたし、これから雨が降るからと、自然と一緒に、その土地で暮らすという視点が自分の中には失われているなと気がついたからだ。丁寧な暮らし方を見たのだと思う。

その日から、「丁寧に暮らせているのか」そんなことが テーマになった。いつも福島のためにと、等身大で収ま らない主語を、目的とする自分を省みるようになった。

丁寧に暮らすとは身近なるものに意味や価値を見いだせていることであろうし、楽しんでいる状態なのだと思う。大粒の汗を流す作業は大変ではあろうが、表情に辛さはなく、にこやかに楽しんでいる顔がおばぁちゃんにはあった。

それから、今日は何をしようと考える余裕が生まれていった。夕飯は外で食べてみよう。せっかく海のある暮らしの中にいるのだからと考えていると、いわき市四倉町にある大川魚店で「さかなの場」という、酒を飲みつつ常磐ものを食べ、福島県の漁業について考えもする、そんなイベントが企画されていた。

以前の私ならば参加理由に、福島県の漁業の未来を考えなければならないと、また大きな主語を使っていたに違いない。だが、純粋に普段の夕食を、丁寧に楽しもうと純粋な気持ちで足が向いた。

友人を誘い, 気が急いて開演前につくと, 既に待ちき

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩



れない人達が並んでいた。お店を覗くと店の息子さん達がぷりぷりのハマグリのお味噌汁を準備していた。待ちきれない思いが溢れてきた。

我先にといわき産のヒラメの刺身、イワシのたたき、メヒカリのフライ等が置かれたコーナーに皆が集まる。アイナメ、ホウボウ、マンボウと普段目にしないものも並び、相馬沖の平ガニがボイルされ山盛りで積まれていた。右往左往し、より取り見取りで選ぶのに困る姿があった。

これも食べたい、あれも食べたいと、気が付くと両手一杯になり、テーブルには沢山の魚介類が並んでしまった。 友人たちと談笑をしながら刺身をつつく、美味い美味 いと止まらない。お酒もどんどん進んでいった。

隣に座った家族が「マンボウの刺身は胆を醤油で溶いてワサビをいれるともっと美味しいよ」と、さらに味わい楽しむ知恵を授けてくれた。

主催者の小松理虔氏と大川魚店さんとのトークが始まった。震災や原発事故で大変な経験をされたことは想像に難くない。大川さんはこれからも漁業が盛り上がっていくためには、消費者が地元のものを食べたいという声が大きくならないといけないと話されていた。「今日は常磐ものを仕入れて提供しています!楽しんでいってください!」との声に、私だけではないだろう、みな心の中で(ありがと~、楽しんでいます!)と思ったに違いない。

ほろ酔いで店を出た。今日という日を丁寧に楽しんだ 心地良さで満たされていた。自慢したくなる暮らしだ。 これからもこの地域の暮らしに丁寧でありたいと思え た。 (2019年6月19日 記)

視点

〈社会〉を語る

第6回 社会学の歴史をめぐる3つ目の立場

岡山大学 齋藤 圭介

社会は目でみることも手で触れることもできません。 社会学という学問は、はっきりとした輪郭をもたない社会 を研究対象にしているため、その誕生の瞬間から〈矛盾〉 を抱えることを運命付けられていたといえるでしょう。

ここでいう〈矛盾〉とはなんでしょうか。子どもと家族の関係を例に考えてみましょう。たとえば自分の家族が標準的な家族とは呼べないような家族構成であったとしても、赤ちゃんは自分の家族を批判的に検討することはありません。赤ちゃんにとって自分の家族はいかなる形であろうと自然なものであり、疑問をもつ対象ではないからです。ふだん空気があることを意識しないように、私たちはあまりに当たり前なことにはわざわざ注意を向けません。しかし、成長するにつれ自分の家族以外にも世の中には多くの家族があることを知るようになると、自分の家族を客観視≒対象化することができるようになります。換言すれば、家族からの影響が薄れてはじめて、家族を自覚できるようになるのです。

社会についても同じように考えることができます。私たち個人が、住んでいる国、地域、家族といった身近な集団の価値観に完全に取り込まれていた時代は、社会は自明視されており、改めて対象化されることはありませんでした。その後、18世紀終わりから19世紀はじめにかけて市民革命や産業革命を経ることで私たちの価値観や規範が個人化していき、はじめて社会は対象化されました。社会の価値観を内面化していることを自覚しつつも、それを客観的に眺める超越的視点をもった〈近代的な個人像〉が成立したときにはじめて、社会を対象とする社会学が可能となったのです。

つまり冒頭の〈矛盾〉とは、社会学が生まれるためにはその研究対象である社会が失なわれつつある状況が必要だった、ということです。社会学者は、この失われつつある(がゆえに対象化できる)社会というものをいかに語ることができるのかを長らく考えてきました。こうした社会学者の試行錯誤の歴史を記述する分野は社会学史レ呼ばれます。

社会学史という言葉をきくと、M. ヴェーバーや E. デュルケムなど著名な社会学者の研究を歴史的に位置づけ、その学的系譜を記述するものだと理解している人も多いでしょう。こうした歴史記述の視点は、著名な社会学者の問題関心のみに注目をする立場であるため〈大文字の歴史〉観と呼ばれます。

対して、社会学者であれば著名であれ無名であれ、彼 ら/彼女らの問題関心を等しく重要だとみなして歴史を 記述するという立場もあります。社会学という学問は、知の巨人だけが担ってきたわけではなく、歴史には名が残らない無名の社会学者も多くいたはずです。こうした無名な(とされてきた)人々に注目をして歴史を記述する試みは、著名人に注目をする〈大文字の歴史〉観への批判のなかでうまれてきており、現在では人文科学・社会科学の一大潮流となっています。たとえば歴史学におけるアナール学派や、一般大衆にスポットをあてる民俗学・社会史・生活史などがあります。

この2つの歴史記述の立場――〈著名な社会学者の歴史〉と〈社会学に関心を持つ人々の歴史〉――については社会学者も侃侃諤諤の議論をしてきましたが、私は3つ目の歴史記述の方法にさいきん注目しています。それは、社会学の方法史という視点です。社会学の歴史を、社会を捉える〈方法〉を洗練させてきたプロセスとみなす立場から描くことです。

社会は輪郭があいまいなので、社会を捉えるためには 創意工夫が求められます。あいまいな社会を捉えるため に、社会学者はこれまで色々と工夫を重ねてきました。 その工夫に着目をすることで、社会学の歴史を記述でき ないだろうかということです。社会学者が用いてきた社 会を分析するための方法や概念を、社会をみるための装 置や道具だと考えることができるのだとしたら、社会学 者はどのような装置や道具を発明し社会を捉えようとし てきたのか。社会学者が愛用する装置や道具はいかに変 化してきたのか、あるいは変化していないのか。ある装 置や道具が発明されたのはどのような背景があるのか。 なぜある時期には役に立っていた装置や道具がある時期 からは使われなくなったのか、などなど。

社会学者という人ではなくて、社会学者が使ってきた 装置や道具に着目をして社会学の歴史を描き直す作業は 非常にチャレンジングなテーマですが、これは同時に、 社会学者が、何を論じれば社会を論じたことになると考 えてきたのかを明らかにする作業でもあるといえるで しょう。

社会学は誕生した瞬間から〈矛盾〉を抱えていました。 その歴史をいかに記述できるのか。社会学史の記述方法 をめぐる論争は非常にホットなトピックの1つです。

今回で、〈社会〉を語る理論編は終わりです。次回からは、専門社会調査士として私が調査にかかわった具体的な事例を紹介しながら、社会学者の視点をお伝えしていきます。

新刊紹介

爆発作用を受けるコンクリート 構造物の安全性評価 一評価手法と対策技術ー

別府 万寿博編,防衛施設学会,210p(2018.9.), (定価 5,000 円),ISBN 978-4-907956-43-1

近年,重化学プラントにおける爆発事故や欧米における爆破テロ等の増加を踏まえると、爆薬やガス等の爆発作用によって発生する爆発荷重は、その発生確率は極めて小さいものの、その発生によって土木構造物や建築構造物に甚大な影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、これまでの構造物の設計では爆発荷重が考慮されないことが多く、爆発荷重を設計から対策まで体系的に取り扱った専門書は少ない。

本書は、爆発荷重に対する構造物の設計手法や対策技術について、数多くの爆発問題の実験例や数値解析例を引用しつつわかりやすく解説している。まず、爆発現象の種類や爆風 圧の特徴および爆発荷重の設定法について述べ、それら荷重 による構造物の全体破壊や局部破壊の損傷評価法を紹介しており、 実務設計に有益な情報がまとめられている。さらに、最新の衝撃解析専用コードによる数値解析事例も紹介されており、非常に興味深い構成となっている。また、最後に、爆発荷重や構造特性のばらつきを考慮した信頼性評価の一助とするため、爆発荷重を受ける構造



物の安全性に関する確率論的検討にも触れている。

原子力分野では限られた範囲で爆発事象に対する考慮が必要になると思われるが、本書は、爆発荷重に対する構造物の設計手法や対策技術について系統的に記載しており、爆発荷重に対する構造物の性能設計やリスク管理に取り組む技術者や研究者に是非一読をお薦めしたい。

(電力中央研究所・白井孝治)

衝突作用を受ける構造物の局部破壊に 関する評価ガイドライン 一評価手法と対策技術-

別府 万寿博編,防衛施設学会,314p(2018.9.), (定価 5,000 円),ISBN 978-4-907956-42-4

2001年に米国で発生した同時多発テロ以降、米国を中心に原子力施設に関して航空機衝突に対する安全性評価が求められている。さらに、2011年の東北地方太平洋沖地震の発生以降、我が国の原子力施設においては、自然現象による衝突作用の想定限度の大幅な引き上げとそれに対する防護対策の強化が求められ、竜巻によって巻き上がられて飛来する物体の衝突に対する安全性評価も厳格化されている。コンクリート構造物が数 m/s から数十 m/s の速度で飛来する物体の衝突を受けると、衝突部や衝突と反対側の面で破壊が生じる局部破壊と呼ばれる損傷が生じることが知られている。この現象は、飛来する物体の質量や速度、材料や形状によって損傷モードが変化するため、合理的な設計法は確立されていない状況にある。

本書は、衝突を受けるコンクリートや鋼製構造物の局部破壊に対する性能設計を体系的に取り扱った専門書であり、複数の評価手法(実験式、解析的方法、数値解析法)による評価例がわかりやすく解説されている。特に、各手法の具体例が、衝撃実験や最新の衝撃解析専用コードによる数値解析例を引用しつつ記載されており、



実務設計に携わる技術者には非常に有益な情報がまとめられており是非一読をお薦めしたい。さらに、繊維補強コンクリートのエネルギー基準による局部破壊評価法、衝突作用を受けるコンクリート部材のリスク評価、衝突作用後のコンクリート構造物の耐火性等、局部破壊に関連する最新の材料や構造に対する話題にも触れられており、衝撃荷重に対する構造物の性能設計に取り組む研究者にも興味深い一冊となるう。

(電力中央研究所・白井孝治)

Journalist's eyes

冷静な議論・判断を呼び起こすには

ノンフィクションライター 石戸 諭

2011年以降,福島第一原発事故ほど人々の間に分断を呼び起こしたものはない。分断は、双方の陣営でお互いの「内輪ノリ」を強め、発信される内容をより極化させていく。

例えば筆者が取材し、詳細に論じた研究がある(詳細は『日経サイエンス』2019年4月号特集「分断の心理学」を参照してほしい)。早稲田大学准教授の田中幹人(科学技術社会論)らは、原発事故から3年間、各年の3月にツイッター上に投稿された「福島」に関するツイートを抽出した。誰が強い影響力を持つインフルエンサーなのか。インフルエンサー同士はどのようなネットワークになっていて、福島をめぐる発信がどのように拡散していったのかを調べたのだ。

分析には学術論文の引用文献のデータから研究動向などを分析するのに使われる共引用分析という手法を用い、議論の配置図を描き出した。

そこで何がわかったのか。あらかじめ結論から述べておこう。浮かび上がったのは、巨大災害の直後には科学者が情報発信の中心的存在だったが、彼らの影響力は急速に低下し、科学に対して懐疑的、あるいは陰謀論的に見る人々に取って代わられていったという事実である。わずか2年の間に、科学者たちの声は科学者とその周辺、さらに一部の保守層にしか届かなくなっていた。

2011年,未曾有の大災害に加え,日本ではかつて起きたことのない原発事故によって全てが混乱していたこの年の3月,ツイッターの議論の中心にいたのは,東京大学教授(当時)だった早野龍五だ。早野は事故直後から科学者として発信し,放射性物質の測定データや,自身で作成したグラフを公開していた。早野の発信に救われた,という声は取材でも多く聞いた。

私は当時、毎日新聞の記者だったが原発担当も含めて、多くのメディア関係者も早野のツイートに注目していたことは間違いないと言える。田中たちが抽出したネットワーク図では、早野と近い位置にツイッター上で強い影響力をもっていたジャーナリストの津田大介やマスメディアの公式アカウントが位置している。ここが重要だ。

彼らは早野の発信を読みながら、しばしば関連する発信をしたため、早野の発言は、彼らを介して異なるクラスターの間にも広がっていった。科学者と他のクラスターをつなぐ文字通りの媒介者=メディアがそこにあったのだ。

ネットワーク図により、政府発表や科学者に懐疑的な クラスターにも早野らの発信は届いていたことも明らか になった。原発に反対か賛成か、福島に対して安全か否 かといった分断は深まることなく、イデオロギーを超え たネットワークは存在していたのだ。

さらに付言すれば、デマや陰謀論の影響も極めて限定的だったことも明らかになっている。積極的に根拠不確かな噂―震災は地震兵器が引き起こした、自分は地震を予知できるーを拡散したアカウントは周縁に位置していたことからわかる。

それが1年後には様変わりする。2012年3月になり、「福島」を含むツイートは前年の半数以下の140万にまで減り、ネットワーク図もまた大きく変化した。

事故直後に議論の中心にいた科学クラスターは、周縁に位置し、代わりに中心に座ったのは「福島は放射性物質によって汚染されている」と考え「脱原発」を主張するインフルエンサーらを中心とする懐疑派のクラスターだった。

この時期、早野とその周辺の科学クラスターは、福島 産農産物の放射性物質の量が十分に小さいことを実証的 に裏付け、発信を続けていたが、前年と違って、メディ アとも懐疑派クラスターとの接続は失われていた。結 局、私も含めて福島産農産物についての発信は分断され たコミュニティの中だけに届いていた可能性が高いとい うことだ。

福島の農家がどのように農産物を作り、安全性を回復させていったのか。その道程を知れば、原発や政府に対する態度は関係がなく、食べたい人は食べたいと思うだろう。だが、回路が閉じた中では議論はうまく接続しなかった。

以降、科学クラスターの言説は、保守主義者が「反原発」あるいは「左派系言論人」を批判、嘲笑するために利用していくようになる。例えば、科学クラスターは、福島の汚染は軽度であり、健康被害をもたらすものではないとの論陣を張る。そうした主張は、保守主義者が反原発論者など安倍晋三政権に批判的な層をバッシングする際にも使われた。科学の主張はこうして、人々の政治的意識とも密接に結びついていく。今になっても、福島をめぐる議論は強い政治的文脈のなかにある。

日経サイエンスで筆者の取材に対し、田中は科学クラスターについてこう述べている。「福島について引き続き議論している人々に届くように語るのではなく、意見が対立するクラスター、つまり科学的な知見を共有しないクラスターに対する批判や攻撃を強めていった。これがさらなる分断を生んだ。ソーシャルメディア上で起きている分断は、福島第一原発事故を巡って起きた社会の分断とつながっている」。

原発について発信するとき、これらの見取り図、社会の分断を意識するのは必須であるにも関わらず、まったく意識が足りないグループがある。原子力業界だ。一例を挙げれば、何度も炎上を繰り返す原子力産業協会のウェブサイトだ。

先日も批判が集まり、閉鎖に追い込まれた「あつまれ! げんしりょくむら」だけではない。それ以前にも炎上騒動があり、今でも火種が残ったまま放置されていると言っていい。サイトをひらけば、不必要なまでにひらがなを多用、謎のリーゼントキャラクターを使った「3年C組原発先輩」など内輪ノリの極致としか言いようがないコンテンツであふれている。

あえて新聞だけでなくウェブメディアも経験した一プロの目からジャッジすれば、ひらがなを使えばわかりやすい、キャクラターを使えば親しんでもらえるというのは、大間違いとしか言いようがない。相手を小馬鹿にしている、と受け止められてしまうからだ。

前半に見たように、いまの SNS は分断が進んでいる 状況にあり、自分たちの常識は自分たちにしか通用しな くなっている。原子力の必要性を外に向けて発信してい きたい、福島のファクトを知ってほしいという思いだけ はわかる。若手の研究者に対して、不安ではなく希望を 持ってもらいたいという意識だけはわかる。だが、これ は分断を意識していない言説であり、違う考えを持つ人 たちに届かないだけでなく,不必要な批判しか生まな い。

分断を超えるために必要なのは、真摯なコミュニケーションである。原子力がこの国に必要だというのなら、それはなぜか。反原発を訴える人たちを分かり合えない存在と決めつけるのではなく、自分たちから彼らとコミュニケーションを図っていく気概が必要だろう。おふざけは内輪ノリを強めるだけであり、内輪の強化は外部との分断を招く。

本稿の結論にいこう。現実として「福島」を巡る議論において、科学者は確かに一時期影響力を持ったが、それは科学的な議論が深化することを意味しなかった。原発事故後の福島という社会的なテーマを持った語りは徐々に閉じていき、タコツボ化が一層進行していった。科学的な議論を支持するユーザーには科学クラスターの声ばかりが届き、原発に賛意を示す人たちは賛意を示す人たち同士で固まり、反対は反対だけで固まっている。その中で原発業界、原発研究者が率先して分断を深める発信をしていいのだろうか。

私は方々で主張しているように、「分断」が問題なのは「対立陣営を言い負かすコミュニケーション」にばかり時間を割いてしまい、福島について多くの人の知恵が必要な問題が後回しになってしまうことにある。福島第一原発の廃炉、全面的な再開に向けて動き出そうとしている漁業とトリチウム水の放出、県民健康調査の行方、住民の帰還、福島の産業・経済といった問題は社会の関心と専門知が必要なのに、だ。

さて。ここまで読んでこられた皆さんの中に、自らの情報発信に疑問を持つ原発研究者はいるだろうか。SNS全盛の社会において、福島の復興につながる情報発信とは何か。それが問われているのはメディアだけではない。図らずも「メディア」として、外側に伝わる役割を求められている専門家の姿勢も問われているのだ。

著者紹介

石戸 諭 (いしど・さとる)



立命館大学法学部卒業後,毎日新聞社に入社。同社デジタル報道センター,Buzz Feed Japan を経て、ノンフィクションライターとして活動。著書に『リスクと生きる、死者と生きる』(亜紀書房)がある。

理事会だより



放射線利用を考える

昨年度から理事として、部会等運営、国際活動、総務 財務、支部協議委員会等に携わった。放射線利用、特に 高分子(プラスチック)の放射線加工が専門分野であり、 放射線利用について考えてみたい。

原子力学会では、2013年に定款が改正され、「本会は、公衆の安全をすべてに優先させて、原子力および放射線の平和利用に関する学術および技術の進歩をはかり、その成果の活用と普及を進め、もって環境の保全と社会の発展に寄与することを目的とする。」となって、放射線の平和利用が目的に加わった。

放射線の平和利用の一環である放射線利用では、放射 線をモノづくり、観察、治療の道具として使用する。モ ノづくりを例に取ると、身の回りにある数多くのものが 放射線の高エネルギーを活用したクリーンなプロセスで 作られている。あまり知られていないが、乗用車には放 射線による改質で製造されたタイヤ、耐熱電気配線、緩 衝内装材などが使われている。ラジアルタイヤでは、高 強度のプラスチックネットとゴムシートを精度良く積層 し、タイヤの耐久性と低価格を実現させている。そのた め、シート状のゴムに電子線で照射し、ゴム分子間に新 たな結合を形成させる橋かけ反応により強度を適度に向 上させる。その後、加硫成形してラジアルタイヤに仕上 げている。エンジンルームの電気配線は、エンジンから の放熱で温度が上昇する環境で、プラスチック被覆が溶 融して、短絡を起こさないことが要求される。被覆電線 では、電子線の照射により生じる橋かけにより被覆の耐 熱性を向上させる。その処理速度は数百 m/分であり、年 間 120 万 km(地球 30 周分)の被覆電線が放射線を利用し て耐熱加工されている。車内で使われている緩衝内装材 では、発泡剤を混ぜたプラスチックシートを照射して、 橋かけにより耐熱性を向上させる。そのシートを加熱す ることで、独立気泡を有する緩衝シートが出来上がる。 細かい気泡の発泡シートは優れた性能からスマホ内の緩 衝材にも使用されている。その他、腕時計用のボタン電 池の隔膜にも、放射線による導電性付与技術が活用され ており、自己放電が少なく寿命が向上した腕時計用ボタ ン型電池が流通している。最近では、放射線で橋かけし た耐熱性セラミックの複合体は、金属材料の1/3の重量 であるが、耐熱温度は20%高いため、ジェットエンジン の軽量化と燃費向上に向けた展開が進められている。

このような放射線利用についての国内の経済規模調査 が平成9,17,27年度に実施されている。それぞれ,経 済規模は3.5,4.1,4.4 兆円と算出され,調査ごとに増加の傾向にある。平成27年度の結果では,工業利用が56%,医学・医療応用が37%,農業利用が7%である。医学・医療応用は平成17年度の調査結果に比較して2割程度増加している。

国際協力における放射線利用ではアジア地域は特に農業応用が盛んであり、エビ殻から得られるキトサンなどを放射線分解した植物生長促進剤が作製されている。植物生長促進剤の作物への葉面散布により、コメ、唐辛子などの収量を20%増加させることができ、多くの国で実用化が進んでおり、経済的な利益が期待されている。フィリピンでは、台風の通過後、植物生長促進剤を散布した稲が倒れなかったことから、国が注目して予算の獲得が実現した。現在、植物生長促進剤の需要に対応した生産プロセス開発も進み、電子加速器を用いた1,700ℓ/時間の量産装置が稼働している。

学会誌であるアトモスでは、放射線に関して、放射線のリスク、防護、原子力・放射線教育に関する記事が数多く掲載されている。最近では、平成29年5月号の巻頭言「量子科学技術による調和ある多様性の創造」、平成30年12月号での巻頭言「離陸したQST(量子科学技術研究開発機構):量子科学技術の研究開発拠点として」の他、同号から「最先端の研究開発」として、量子科学技術を駆使したがん治療、量子ビーム科学、核融合等の研究開発に関するトピックスが解説シリーズで紹介されている。「量子ビーム」という用語は、ここ10年来、放射線に代えて使用されるようになった。量子ビームは電子、中性子、陽子、などの量子性をもつ粒子や波の集団のビーム状流れを指す。

放射線利用は、多様な量子ビームの優れた加工・観察機能を総合的に活用する量子ビーム科学として、SDGs (持続可能な開発目標)にも関連する物質・材料、医療・バイオ、環境・エネルギー等の幅広い分野での展開が期待されている。革新的な成果を生み出すためにも、次世代の研究開発を担う人材の育成は極めて重要な課題である。また、放射線利用の特長や有用性は原子力関連機関のホームページや中高の教科書などで幅広い世代に分かり易く伝えられており、さらなる人材の育成と利用技術の普及を願っている。 (部会等担当理事 玉田正男)

「理事会だより」へのご意見、ご提案の送り先rijikaidayori@aesj.or.jp