

巻頭言

- 1 7年目に入った原子力政策の停滞からの脱却のために 細川珠生

特集 LNT仮説への挑戦—2016年秋の大会企画セッションから

従来の低線量被ばくの影響評価そして放射線防護の枠組みを一新する可能性のある理論が開発されている。その名をモグラたたき (WAM) モデルと言う。このモデルが導く最も重要なことは、低線量被ばくの影響はモグラたたきのようにつぶされていって、時間経過とともにその影響が蓄積してはいかないということだ。

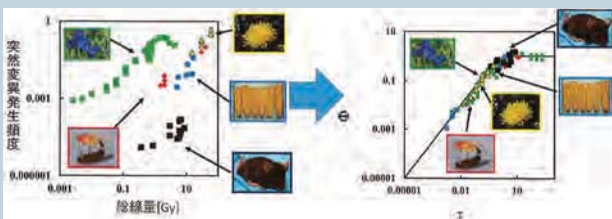
- 8 低線量放射線影響の歴史的経緯と現状 坂東昌子

- 12 統計モデルとしての LNT 仮説の起源 田中司朗, 今井 匠

- 14 LNT 仮説への挑戦としての WAM モデル 真鍋勇一郎

- 16 日本学術振興会 産学協力 放射線の生体影響の分野横断的研究委の発足 和田隆宏

- 18 パネル討論会 坂東昌子, 田中司朗, 今井 匠, 真鍋勇一郎, 和田隆宏, 澤田哲生, 下 道國, 滝 順一, 西本由美子

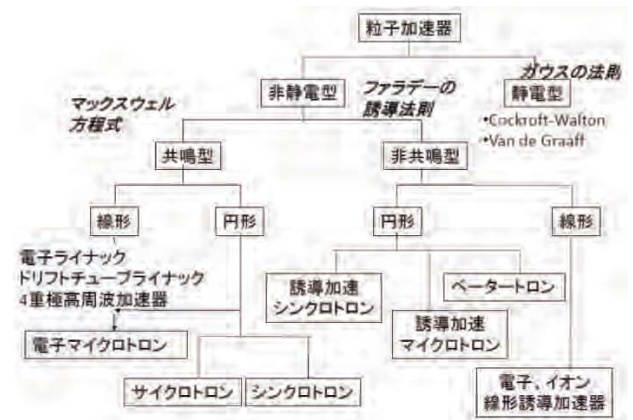


この5種類の動植物の突然変異発生頻度には共通のメカニズムがあることが示唆される

サイエンス

- 21 現代加速器の歴史的進化

170年の歴史を持つ荷電粒子加速器の発展の過程を科学技術史的にまとめた。 高山 健



加速器の分類

- 28 放射性廃棄物処分施設の長期挙動評価に関する研究—人工バリアの性能評価試験

放射性廃棄物処分の際に使用されるベントナイトは、アルカリ環境下ではどう変質するのか。それにどう対応すべきか。ここではそのための試験や設備を紹介する。 渡邊保貴, 横山信吾

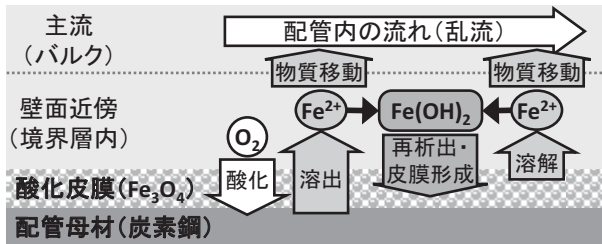


水浸させたベントナイトの様子

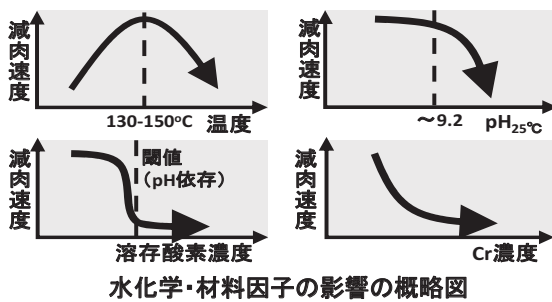
33 流れ加速型腐食に対する研究の現状

原子力や火力の発電プラントでは、水が流れる系統配管の肉厚が時間の経過と共に減少する現象が見られる。特に流れ加速型腐食は過去に大規模な配管破損事故を発生させたことがあり、重要な保守管理項目の一つとなっている。

米田公俊, 藤原和俊, 歌野原陽一



FACの現象メカニズムの概略図



会議報告

48 第13回遮蔽国際会議

奥野功一, 大石晃嗣

49 第18回放射性物質輸送国際会議 PATRAM2016

伊藤大一郎

50 原子力発電プラントの水化学に関する国際会議2016

河村浩孝

報告

46 学会誌アンケート結果サマリ (2016年9~11月号)

小林容子

2 NEWS

- 東電, 格納容器内部映像を公開
- 日英, 原子力分野の協力拡大で合意
- 海外ニュース

報告

38 福島の影響・健康影響研究の新たな展開

今後もし、原発事故が起きた際に、迅速かつ適切に対応するためには今何をすべきか。環境測定、環境影響、健康影響の視点から議論した。

廣内 淳, 大倉毅史, 佐藤大樹

42 幌延見聞記—大学生・大学院生が見た現場から

6名の大学生・院生が幌延地層研究センターを視察し、見学直後に率直な意見を交換した。

大谷崇人, 亀岡優輔, 酒井泰地
中村建翔, 山川裕久, 渡辺人生
早瀬佑一, 澤田哲生



理事会だより

52 学会傘下の組織とは？(総務財務委員会とは？)

竹野正志

- 32 新刊紹介 「マレー 原子力学入門」 寺井隆幸
- 41 From Editors
- 51 新刊紹介 「写真に見る 地質と災害」 佐々木俊法
- 53 会告 平成29年度新役員候補者募集のお知らせ
- 54 会報 原子力関係会議案内, 共催行事, 新入会一覧, 英文論文誌 (Vol.54, No.3) 目次, 和文論文誌 (Vol.16, No.1) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(<https://ssl.aesj.net/publish/meyasubako>)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>

7年目に入った原子力政策の停滞からの脱却のために

巻頭言



細川 珠生 (ほそかわ・たまお)

聖心女子大学卒。「娘のいいぶん〜がんと親父にうまく育てられる法」で第15回日本文芸大賞女流文学新人賞受賞。「細川珠生のモーニングトーク」(ラジオ日本、毎土7時5分)は放送22年目。千葉工業大学理事。元品川区教育委員長。

3年余り原子力発電を中心にエネルギーの取材を続けてきたが、私が今、最も懸念していることは、原子力に携わる人々の士気の低下である。東日本大震災から6年が経ち、その間、原子力発電を稼働させることに高いハードルが課せられただけでなく、先の見通しが立たない状況に、仕事の価値ややりがいを見いだせなくなっている様子が見受けられるのである。省資源国の我が国が、効率的に、安定的にエネルギーを調達できるよう、国が責任をもって進め、事業者はその役割を果たし、豊かで安心のある国民生活を築くことに大いに貢献してきた。原子力に携わる人々は、そのことに大きな誇りを持ってきた。

ところが、誇りはいつの日か甘えとなり、想定外の惨事を引き起こしてしまった。どれだけ備えがあっても、100%の危険の回避は有り得ないとしても、6年経っても原子力を取り巻く環境に改善の兆しが見えないことを考えると、失ったものはあまりに大きいのではないだろうか。

しかし、その後、原子力の事業者は猛省をし、再び原子力発電を活用できるよう、国の指導に忠実に、そして事業者として責任ある対応をするため、この局面の打開に必死に取り組んできた。民間事業者であるならば、会社の「命」にも関わることであった。原子力政策を止めない限り、事業者は必要であり、何とか事態を前に進めなければならないからだ。例えば、安全対策の基準ともなる「基準地震動」も、過去の災害のデータ等で導かれる数値よりもさらに1.5~2倍の大きさに自主的に設定し、それに基づいて安全対策を講じるなど、念にも念を入れた対応を行ってきたのである。当然のことながら、その分の事業者負担は膨大になる。火力を中心に、他の電源による電力の供給で稼ぎながら、それらの事業者負担を賄うのだが、燃料費が高騰してきたこの数年を考えれば、事業者がどれだけ経費を削減しながら、経営の安定に努めても、年々厳しくなっていくことは、誰の目にも明らかである。電力自由化の施策の中で、電気料金として利用者負担を増やすことにも限界があるだろう。原発が立地する地域では、原発は産業や雇用の受け皿となり、地域経済を支えてきた。福島や老朽原発では廃炉という作業が地域経済を支えることにもなる。しかし、原発を今後も、エネルギーミックスの中で20~22%のシェアを持つとうのであれば、稼働するという前向きな進捗がなければ、事業者も、また原発の安全な稼働を支える産業や研究、そして地域の担い手も停滞しきってしまうのである。いざ、原発の再稼働が進み、動かそうと思っても、それを担う事業者や人材がいなくなったら、どうにもならない。

そのためには、規制委員会の遅々とした役所仕事そのものの審査の在り方を改善すべきである。「安全第一」は当然であるし、手を抜いてはならないことはわかるが、事業者の「命」がかかっているという切迫感とは、まるでかけ離れたかのような時間感覚では、エネルギー政策の根幹までもが狂わされる。合わせて、原子力に係る人々は、もっと声を大にして、原子力の意義を世の中に伝えるべきである。例え事故が起きたとしても、重要なものであれば、検証・対策を講じながら続けなくてはならないのである。原子力政策も、我が国にとってはその一つであることは間違いない。それに携わることの重要性や誇りを伝えずして、高い志や能力を持った人材の育成ができるわけもないのである。この6年は、謙虚にならざるを得なかったのかもしれないが、もうその姿勢は終わりにすべきだ。国民にどうしたら原子力の必要性を理解してもらえるか、そのことに関係者一同、努力していくべきではないだろうか。

(2017年1月22日記)



東電、2号機格納容器内部の映像を公開

東京電力は2月2日、福島第一原子力発電所2号機の格納容器内部の映像を公開した。格納容器貫通孔にカメラ付きの装置を挿入して、格納容器の中にあるペDESTALと呼ばれる構造物の中まで調べたもの。撮影された画像には放射線によるノイズが生じており、そのノイズを解析した結果、空間線量率が格納容器入り口近くでは毎

時30mSv、その奥にあるペDESTALの入り口付近では20mSv、その途中で530mSvあることが推定された。また、TIP案内管サポートと思われる構造物に付着した堆積物があることや、ペDESTAL中央部に脱落しかかったグレーチングがあることがわかった。

(原子力学会誌編集委員会)

日英両政府、民生用原子力分野の協力拡大で合意

日英両政府は2016年12月22日、原子力施設の廃止措置や研究開発、英国における新設計画といった民生用原子力分野全般の協力活動拡大を目指す協力覚書を結んだ。世耕弘成経産大臣と来日したビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)のG. クラーク大臣が都内で調印した。日本において福島第一原子力発電所の廃止措置等で共同研究を拡大する必要性が認識される一方、英国では現在、日立製作所と東芝が出資する新設計画が進展中であることから、商業段階および研究段階の協力拡大という双方の希望を再確認し、対話を一層促進して互恵的な戦略的パートナーシップを推進していくとしている。

この覚書は、2012年4月に日英両国の首相が公表した共同声明「世界の繁栄と安全保障を先導する戦略的パートナーシップ」に基づいている。BEISの発表によると、日本は英国経済に対する投資額では2番目に大きく、日立製作所の子会社であるホライズン社がウェールズ地方アングルシー島で進めているウィルヴァ・ニューウィッド原子力発電所建設計画、および東芝が筆頭株主となっているNuGen社が西カンブリア地方で進めているムーアサイド原子力発電所計画により、英国内では最大2万人分の雇用創出が見込めるほか、英国の電力需要の約15%が満たされる見通し。原子力産業のサプライ・チェーン企業には約200億ポンド相当の契約がもたらされるとした。また、原子力施設の廃止措置や放射性廃棄物の管理で英国は世界でもリーダー的立場にあり、日本と緊密に協力することで、日英両国で原子力発電の将来的な持続可能性を確保するという現実的な利益が生まれると強調した。今回の覚書は国際法に基づく拘束力や義務事項を発生させるわけではないが、クラーク大臣は「戦略的な国際連携が経済にどれほど推進力を与え、産業戦略の重要部分として国内外に事業チャンスを生み出すか、日本とのパートナーシップ

は明らかな実例になる」との認識を示した。

同覚書がカバーする民生用原子力分野の活動は4種類に大別されており、「原子力施設の廃止措置と除染」の項目で両国は、経験と知見を共有することの重要性から廃止措置プログラムの共同実施や共同研究で関係を深める点で合意。日本の原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)と英原子力デコミッションング機構(NDA)が行っている協力、および東京電力とセラフィールド社間の既存の共同研究は、双方に利益をもたらしている例だとして称賛した。「研究開発」に関しては、双方の原子力部門で研究開発協力を促進し、相互理解を深めることの重要性を両国が認識。双方の研究施設を共有する手段を模索したり、学術機関同士で交流を深めるなど、連携拡大を目的に関連省庁や組織間で進められている協議を高く評価した。

また、「安全・セキュリティの世界的慣行」という項目では、原子力発電の安全・セキュリティ対策を確保する上で、民生用の原子力活動を行っている国、特に輸出国が世界的な慣行を維持・促進することは重要という考えで両国は合意。こうした目標を達成するため、2国間、多国間で協調していくことを再確認した。さらに「原子力新設計画」の項目では、両国はまず原子力発電が安全かつ信頼性が高く、低炭素で価格も適正なエネルギーを生み出すという役割を果たし得ると指摘。ホライズン社とNuGen社による新設計画の進展に向け、今後も継続して協議を進めて行くとした。現地の報道によると、英国財務省のP. ハモンド大臣は「東芝と日立製作所の技術に何ら問題はなく、実際の課題は資金調達だ」と述べた模様。日本の政府系輸出信用機関である国際協力銀行と日本政策投資銀行がホライズン社に対して融資を行うか、両国政府が審査する予定だと報じている。

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】

次期エネ省長官に R. ペリー前テキサス州知事

米国の D. トランプ次期大統領は 2016 年 12 月 13 日、2017 年発足する自らの政権人事のうち、原子力発電を管轄するエネルギー省(DOE)長官として、リック・ペリー前テキサス州知事(66)を指名する方針をウェブサイト上で明らかにした。

ペリー氏は 2012 年と 2016 年の大統領選で共和党の予備選挙に立候補したものの、どちらの回も短期間で撤退。2016 年の選挙運動期間中はトランプ氏を激しく批判していたが、撤退後は同氏支持に回った。ペリー氏は約 14 年間の州知事時代、風力発電を拡大して州内の再生可能エネルギー関係雇用を大幅に拡大した一方、同州の豊富なエネルギー資源を背景に大手石油ガス生産企業であるエナジー・トランスファー・パートナーズ社の取締役会に名を連ねており、トランプ氏と同様、「地球温暖化は科学的に立証されていない」という持論の持ち主。この点から、2015 年の COP21 で採択されたパリ協定に対する今後の取り組みについて、懸念の声が上がっている。また、DOE の現職長官である E. モニッツ氏や前長官だった S. チュー氏が物理学博士であるのに対し、ペリー氏の学位は地元テキサス州の A & M(農工)大学で取得した動物科学の学士号のみ。1984 年に政界入りする前は農業や空軍業務に従事していたことや、2011 年のテレビ討論会で廃止すべき省庁の一つに DOE を挙げていることなどから、同省長官としての資質に疑問を抱く向きもあると伝えられている。

こうした懸念に関連して、トランプ次期大統領はウェブサイト上にペリー氏の指名を歓迎する各界からの弁を掲載。ニューヨーク・タイムズ紙が 13 日付けで掲載した同様の記事もリンクしており、同氏の指名は妥当との考えを示唆した。

ニューヨーク・タイムズ紙は、G. W. ブッシュ政権下で DOE 長官を務めた共和党の S. エイブラハム氏、およびクリントン政権下で同長官を務めた民主党の B. リチャードソン氏のコメントを掲載。両氏ともに、ペリー氏がいずれ DOE 長官として適応していくとの認識を示している。エイブラハム氏によると、自らも DOE 長官に就任する前はたびたび、DOE 廃止論を唱えていたが、DOE に入って実際にどのようなものであるか知り、考えが変わっていったという。同氏によると、DOE

予算の 6 割は国家核安全保障局(NNSA)関連であるものの、その時々が発生する出来事によって DOE が果たす役割は多種多様。自らの長官時代はカリフォルニア州の輪番停電問題や、9.11 後のテロ対策と核不拡散プログラムに追われた一方、チュー前長官はメキシコ湾での原油流出事故への対応、モニッツ長官はイランとの核開発協議に集中することになった。このように、DOE を統括していくきっかけは一つではなく、テキサス州という大きな官僚組織の運営経験を持つペリー氏も、長官としてしっかり役目を果たしていただろうと述べた。

【英国】

中国製原子炉の英国内建設に向け、規制当局が審査開始へ

英国の原子力規制局(ONR)は 1 月 10 日、中国製・第 3 世代原子炉設計「UK - HPR1000(華龍 1 号)」の英国内での建設に向け、必要となる包括的設計審査(GDA)の開始をビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)から要請されたと発表した。GDA 申請企業との合意協定が締結され次第、審査を開始する。

同設計は、EDF エナジー社がエセックス州ブラッドウェルで計画している新設プロジェクトに採用予定で、同社が 2015 年 10 月、サマセット州ヒンクリーポイント C(HPC)原子力発電所建設プロジェクトに対する投資約束を中国広核集团有限公司(CGN)から取り付けた際、付随項目として合意していたもの。この時の戦略的投資協定に基づき、英国版 HPR1000 の GDA 活動にともなう全経費は、EDF と CGN が審査活動の管理会社として設立した合弁企業「ジェネラル・ニュークリア・サービス(GNS)社」が負担する。英国の T. メイ政権は発足して約 2 か月後の 2016 年 9 月、国内で数十年ぶりの原子力新設計画となる HPC プロジェクトの実施を決めたが、BEIS の J. ノーマン政務次官は 10 日の国会で GNS 社による今回の投資を歓迎するとの政府声明を公表。EDF エナジー社も、英国版 HPR1000 を 2 基設置するというブラッドウェル B 原子力発電所建設プロジェクトの実施許可取得に向け、堅実かつ完璧なプロセスの第一歩が刻まれたとの認識を示した。

中国では国家能源局(NEA)による 2013 年の「原子炉輸出の国家戦略化」政策を踏まえて、CGN による「ACPR1000 +」設計の開発と中国核工業集团公司(CNNC)による「ACP1000」開発を「華龍 1 号」に一本化。中国が知的財産権を有する第 3 世代の輸出用 PWR 設計

という位置付けで、2014年に全体設計が承認された。中国国内ではCNNC版「華龍1号」の実証炉計画として2015年に福清5、6号機、CGN版「華龍1号」の実証炉計画として同年12月と2016年12月に防城港3、4号機が本格着工した。EDFエナジー社の発表によると、GNS社は2016年10月にブラッドウェルB発電所用としてCGN版「華龍1号」のGDA実施をBEISに申請しており、防城港3号機はブラッドウェルB発電所の参照プラントになるとしている。

GDAは英国国内で初めて採用・建設される原子炉設計の事前認証審査で、土木建築から原子炉化学まで17の技術分野にわたる。安全性についてはONRが、環境影響面については環境庁(EA)が担当し、対象設計が安全・セキュリティと環境保全、廃棄物管理の側面で英国の基準を満たしているかを評価する。最終的にONRが設計容認確認書(DAC)を、EAが設計容認声明書(SoDA)を発給するまで約5年を要するが、これまでに仏アレバ社製欧州加圧水型炉(EPR)に対してこれらが発給された。同設計はEDFエナジー社のHPCプロジェクトと、サフォーク州サイズウェルC原子力発電所建設プロジェクトで採用される予定である。

CGNは2015年の戦略的投資協定で、HPCおよびサイズウェルCの両プロジェクトに対して、それぞれ33.5%と20%の出資を約束した一方、ブラッドウェルBプロジェクトが建設段階に入った場合は、66.5%を出資する方針。EDFエナジー社をパートナーに、CGNが同プロジェクトを主導するという事で両社は合意済みだ。ただし、同プロジェクトは今のところ事前計画の初期段階にあり、建設計画の申請に必要な詳細提案を作成する前に、様々な調査作業や公開協議の実施で数年間を要する見通し。また、GDAプロセスの完了に加えて、ONRのサイト許可(NSL)や担当省の開発合意書(DCO)など、複数の許認可取得が必要となっている。

【フランス】 IAEA、フランスの深地層処分場計画の安全性をピアレビュー

国際原子力機関(IAEA)は2016年12月19日、フランスで放射性廃棄物管理機関(ANDRA)が計画している高レベル放射性廃棄物(HLW)等の深地層処分場(CIGEO)建設プロジェクトについて、安全性確保のために採用されている概念オプションや原則のピアレビューを実施したと発表した。仏原子力安全規制当局(ASN)の要請により、9名の国際的な専門家チームを2016年11月6日～15日まで派遣し、同プロジェクトの研究開発戦略や長期的な安全性確保シナリオの設定手法などについて審

査。全体的に見て完璧であるとの評価結果を明らかにしており、「処分概念の構造的安定性やANDRAが安全性を実証する能力に関しては合理的に保証できる」と明言した。一方、処分場閉鎖後のシナリオと運用設計に関しては、ANDRAが安全評価を行う上で信頼性をさらに高めるべき点のいくつかを追加で特定。研究開発計画とモニタリング・プログラムの設定についても、一層の改善を行うべきだと勧告した。現在のスケジュールでは、ANDRAは2018年にCIGEOの建設許可を取得し、2025年にパイロット段階の処分開始を目指している。

CIGEOは1万立方メートルのHLWと7万立方メートルの長寿命・中レベル放射性廃棄物を少なくとも100年間、地下500mの深地層に回収可能な状態で貯蔵するための施設。フランス東部のムーズ県とオートマルヌ県にまたがるピュール地区を含めた30平方kmの圏内で建設することが2010年に確定している。CIGEOの安全確保オプションに関する文書は、ANDRAが作成してASNに提出していたもので、これを審査するASNとしては、IAEAのように独立の立場の専門家からも評価を受けることでCIGEO計画の安全面に関する国内審査を補完する狙いがあった。

IAEAのチーム・リーダーによると、HLWの処分においては処分施設を「受動的安全性」に基づく状態に置くこと一すなわち、廃棄物を搬入し施設を閉鎖した後、人が介入する必要性を生じさせないことが重要視されている。このため、ANDRAはCIGEOの建設許可を取得する前に、処分システムがどのように設計されているかや、通常の操業時および異常事態の発生時にそれがどのように機能するかなどを説明し、施設を受動的に安全な状態で維持できることを実証しなければならない。また、地震発生時や気候変動時のシナリオについても考慮されるとしている。

【ハンガリー】 パクシュ4号機の運転期間の20年延長を申請

ハンガリーの国家原子力庁(HAEA)は2016年12月9日、同国唯一の原子力発電施設であるパクシュ発電所で、事業者の国営MVM社が4号機の運転期間を2037年末まで20年延長する許可申請書を提出したと発表した。同発電所では、公式運転期間が30年のロシア型PWR(VVER)が4基(各50万kW)稼働しており、4号機の現行の運転認可は2017年12月31日まで。HAEAは、MVM社が申請にあたって法的に必要なとされる点検をすべて実施するとともに、期間延長にともなう技術面、安全面、環境影響面の分析を行ったと認定。それら

の結果に基づいて HAEA は審査を実施し、2017 年 12 月に最終判断を下すことになる。HAEA は同発電所の 1 号機と 2 号機については、すでにそれぞれの運転期間を 2032 年と 2034 年まで 20 年間延長することを承認済み。3 号機についても、2036 年まで延長する申請について、年内にも審査結果を明らかにすると見られている。

同発電所はハンガリーにおける電力需要の約 4 割を賅う重要電源であり、政府は 2014 年 1 月、ロシアからの融資でⅡ期工事として 120 万 kW の VVER を 2 基、増設する計画を発表した。総工費の約 8 割にあたる最大 100 億ユーロ(約 1 兆 2,260 億円)を、完成後 21 年間の低金利ローンで返済することで同国と合意している。

【ロシア】

ロスアトム、社名を「ASE エンジニアリング社」に変更

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は 2016 年 12 月 12 日、ニジニ・ノブゴロドにある傘下の総合エンジニアリング企業「アトムエネルギープロジェクト(NIAEP)社」の臨時株主総会で、社名を「ASE エンジニアリング社(ASE・JSC・EC)」に変更することが決定したと発表した。「ASE」は、かつて世界の原子力発電所建設プロジェクトに携わり、諸外国に広く名を知られた傘下の原子力建設・輸出企業「アトムストロイエクスポート社」の略称であり、これを NIAEP 社の社名に含めることで、国際的な原子力発電所設計・建設市場におけるロシアのプレゼンスをさらに高めるとともに、リーダーの立場を維持していくのが主な狙い。ロシアの原子力産業界にとって「ASE ブランド」は信頼性の高い、非常に重要なものとの認識を明らかにした。

ロスアトム社は今回の変更が「社名のみ」であり、NIAEP 社の法的立場や能力に変更がないこと、いかなる組織再編も行われない点を強調。2012 年に ASE 社を NIAEP 社に合併したことなども含め、社名変更は ASE グループを形成する最終段階になるとした。今後は、すべての関連ライセンスを新しい社名で再発給するとともに、その他の許認可文書にも新社名のスタンプやシールが使われる予定。関連するすべての情報システムにも修正を加えるとしている。

2016 年末にノボボロネジ 3 号機を永久閉鎖

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は 2016 年 12 月 28 日、モスクワの南約 500km に位置するノボボロネジ原子力発電所で 45 年間稼働した 3 号機(PWR, 41.7

万 kW)を同日付けで永久閉鎖したと発表した。1971 年に送電開始した同炉の総発電量は 1,186 億 7,000 万 kWh。今後は廃止措置が取られることになるとしている。

ノボボロネジ発電所はボロネジ州を流れるドン川沿いに立地しており、20 万 kW 級ロシア型 PWR(VVER)の 1 号機と 30 万 kW 級 VVER の 2 号機はすでに 1988 年と 1990 年に閉鎖済み。3 号機は 40 万 kW 級 VVER 設計(VVER - 440)の初号機に当たり、同炉を含めた 6 基の同型設計炉がロシア国内に存在するほか、国外ではアルメニア、ブルガリア、チェコ、スロバキア、フィンランド、ドイツ、ハンガリー、およびウクライナに合計 29 基が建設された。このため、VVER - 440 の廃止措置市場は今後、290 億ドル規模に成長するとロスアトム社は試算。ノボボロネジ 3 号機の廃止措置はこれらのテスト・ケースになるとの認識を示した。

同発電所ではまた、3 号機と同型の 4 号機を 2017 年中に閉鎖する予定だが、100 万 kW 級 VVER の 5 号機は 1981 年から営業運転を続けている。さらに、「Ⅱ期工事 1 号機」に相当する 6 号機では、120 万 kW 級の第 3 世代 VVER 設計である「AES - 2006」を採用しており、2016 年 8 月に同設計の採用炉として初めて送電を開始。同型の 7 号機も 2009 年から建設中であり、経年化が進んだⅠ期工事の 5 基をリプレースする予定である。

【ヨルダン】

初の研究炉が完成、IAEA がピアレビュー実施

ヨルダン初の原子力設備となる多目的研究炉が、6 年あまりの設計・建設期間を経て、このほど首都アンマンの北 70km に位置するヨルダン科学技術大学(JUST)敷地内で完成した。通常運転の開始に先立ち国際原子力機関(IAEA)は同炉が安全に稼働することを確認するため、ヨルダン政府の要請を受けて「研究炉の包括的原子力安全評価(INSARR)」ミッションを 2016 年 12 月 4 日～8 日まで現地に派遣。IAEA および研究炉を持つ 5 か国からの専門家チームが、IAEA 安全基準に対する適合性についてピアレビューを実施したことを 9 日付けで明らかにした。

同炉で 6 か月間実施された性能試験の結果や、運転時の安全性改善プログラムおよび有資格の運転機関設置といった運転段階への移行準備作業を審査した結果、IAEA の G. リジエットコフスキー原子力施設安全部長は、ヨルダンで原子力研究プログラムの導入計画が大幅に進展したことを称賛した。その一方で、「建設段階から運転段階への移行は簡単なことではないと認識しなくてはなら

ない」と指摘。今後も継続的に運転機関が資格要件を満たしていると実証するとともに、適切な安全対策が講じられていると確認していく必要があるとコメントした。

「ヨルダン研究訓練炉(JRTR)」と呼称されるこの原子炉は、韓国製の新型高中性子束応用炉「HANARO」を熱出力0.5万kWにスケールダウンしたもの。同炉を建設する約1億6,000万ドルのプロジェクトは、韓国初の原子力輸出案件として2009年12月に韓国原子力研究所(KAERI)と大宇建設のコンソーシアムが獲得した。設計・建設活動は翌2010年6月に開始され、2016年12月7日には竣工式を現地で開催。ヨルダンのアブドラⅡ世国王やヨルダン原子力委員会(JAEC)委員長をはじめ、韓国の未来創造科学部長官およびKAERIと大宇建設の幹部らが出席した。

エネルギー資源に乏しいヨルダンは、2020年代に国内の電力需要の12%を原子力で賄うため大型発電炉の導入計画も推進中。アンマンの東85kmのアムラで100万kW級のロシア型PWR(VVER)を2基建設する計画について、2015年3月にロシアと2国間協力協定を締結している。JRTRはこれらの原子炉で必要になる運転員やエンジニア、研究者の教育訓練に使われるほか、中性子を利用した基礎科学研究と新物質の開発研究、医療用・工業用の放射性同位体生産などにも活用される計画だ。

【中国】

「華龍1号」設計を採用した防城港4号機を本格着工

中国広核集团有限公司(CGN)は2016年12月23日、広西省の防城港原子力発電所で4号機(PWR, 115万kW)の原子炉系統部分に最初のコンクリートを打設したと発表した。同炉では中国が知的財産権を保有する第3世代の輸出用設計「華龍1号」を採用しており、中国内における同設計実証炉プロジェクトの一つという位置付け。同様に「華龍1号」を採用して2015年12月に着工した3号機と同じく、英国で将来CGNが参加して建設されるブラッドウェルB原子力発電所の参照発電所となっている。

最終的に6基の原子炉を建設予定の同発電所は、中国の原子力発電所としては最西端に位置しており、Ⅰ期工事の1, 2号機(各PWR, 108万kW)はすでに、2016年1月と10月にそれぞれ営業運転を開始。これら2基ではフランスのPWR技術に基づいてCGNが開発した「CPR1000」技術を採用した。Ⅱ期工事にあたる3, 4号機の建設は、COP21でパリ協定が採択されたのを受けて2015年12月に国务院・常務会議が承認。4号機の本格着工はCGNにとって、2016年から始まった第13次

5か年計画期で最初の新規着工になったとしている。

36基目の商業炉となる陽江4号機が送電開始

中国広核集团有限公司(CGN)は1月9日、広東省の陽江原子力発電所4号機(PWR, 108万kW)を8日の午後2時過ぎに初めて送電網に接続したと発表した。約4年間の建設段階を経て同炉は発電段階に移行し、試運転中に出力を定格まで徐々に上げていく計画。今年後半にも中国36基目の商業炉として営業運転を開始すると見られている。

国务院は2008年に陽江サイトで合計6基の100万kW級PWRを建設するという計画を承認。これまでにフランスの技術をベースとする「CPR1000」を採用した1~3号機がそれぞれ、2014年3月、2015年6月および2016年1月に営業運転を開始した。同型設計の4号機は2011年に着工予定だったが、福島第一原子力発電所事故の発生を受けて中国政府は新規計画の審査・承認を一時停止。同炉が本格的に着工したのは2012年11月のことである。これに続く5, 6号機では、安全性に改良を施した「ACPR1000」が採用されており、それぞれ2013年9月と12月に建設工事が開始されている。

【台湾】

2025年までの脱原子力を盛り込んだ改正電気事業法案可決

台湾政府の經濟部能源局は1月11日、国会にあたる立法院が同日、2025年までの脱原子力達成を盛り込んだ改正電気事業法案を可決したと発表した。2016年1月に発足した民進党の蔡英文政権は党是として脱原子力を打ち出しており、電気事業法の改正では4つの重要な改革項目の一つとして、2025年までに「非核家園(原子力発電のないふるさと)」を目指す明記。これにより、既存3サイトの原子炉6基は40年の運転期限を迎えた時点で期間の延長を行わず、順次廃止する。不足分は省エネや再生可能エネルギー源の拡大などで補っていく方針だが、原子力発電所が供給していた総発電電力量の16.3%(2015年実績)をこれらで代替できるかという点については疑問視する見方もある。

經濟部の発表によると、改正電気事業法の柱は再生可能エネなどのグリーン・エネルギー開発に努力を傾注し、エネルギーの移行を実行に移すこと。再生可能エネ源による発電・売電の自由化など開発環境の規制緩和を通じて、一層多くの再生可能エネを電力市場に導くとした。また、顧客は台湾電力以外の再生可能エネ業者から

電力を選択購入することが可能になるほか、革新的な技術の事業開発モデルを構築することで、電力インフラの増強や関連産業への投資増強を促進する。さらに台湾公営の中央通信社は、台湾電力が発電部門と送配電部門に分社化されることになることを伝えている。

台湾では稼働中の原子炉6基に加えて、パブコック日立や東芝が圧力容器を受注した龍門(第4)原子力発電所(135万kWのABWR×2基)が1999年から建設中だった。しかし、福島第一原子力発電所事故を受けて反原子力の世論が高まり、当時の馬英九総統は2011年11月、龍門発電所を完成させる一方、既存の原子炉は40年の運転期間満了後に閉鎖していく政策を明らかにした。その後も、龍門発電所の建設中止を求める抗議運動が激化したことから、馬総統は2014年4月、ほぼ完成していた1号機を密閉管理するとともに、2号機の建設作業を凍結する方針を公表。これらの作業は2015年7月に完了していた。現在の閉鎖日程では、金山(第1)原子力発電所の2基が2018年12月と2019年7月に、國聖(第2)原子力発電所の2基が2021年12月と2023年3月、馬鞍山(第3)原子力発電所の2基が2024年7月と2025年5月に運転期間を満了する予定である。

【韓国】

新古里3号機が初のAPR1400として営業運転開始

韓国水力・原子力会社(KHNP)は2016年12月20日、世界で初の「APR1400」設計採用炉として新古里原子力発電所3号機(PWR, 140万kW)が営業運転を開始したと発表した。これにより、同国の原子力発電設備は25基、約2,310万kWとなり、総発電設備に占める割合は

約22.1%となった。2008年10月に本格着工した同炉に対して、原子力安全委員会は2015年10月に運転許可を発給。同年12月に初めて臨界条件を達成し、2016年1月から送電網に接続されていた。今後は年間約104億kWhを発電予定で、韓国南東部の釜山市と蔚山市、および慶尚南道地域における電力需要の約12%を賄うことになる。

「APR1400」は、米コンバッション・エンジニアリング(CE)社(現在はウェスチングハウス社に統合)の130万kW級PWR設計「システム80+」をベースに韓国が開発した大型PWR。原子炉格納容器の安全性向上や中央制御室のデジタル化、建設工期の短縮(48か月)といった改良が図られたほか、設計寿命も国内の既存炉が40年であるのに対し60年に向上したとしている。同設計はまた、韓国の原子力コンソーシアムがアラブ首長国連邦(UAE)で建設中のバラカ原子力発電所(4基)にも採用されており、KHNP社は当初、これらの参照プラントである新古里3号機の営業運転開始を2013年末に予定。UAEに対し同設計の安全性を保証するため、2015年9月までには開始すると誓約していたという。しかし、同炉の安全系制御ケーブルで検査結果の偽造が発覚したため取替作業が必要となり、営業運転の開始スケジュールは大幅に遅れることになった。

現在、同様に「APR1400」設計を採用した新古里4号機の建設工事が進んでおり、KHNP社は2017年上半年にも運転許可を取得して試運転を実施する計画。営業運転の開始は同年末になる見通しだ。また、新ハヌル(旧名:新蔚珍)原子力発電所でも1,2号機に同設計を採用して建設工事を実施中。さらに、計画中の新古里5,6号機、および新ハヌル3,4号機でも、同設計を採用予定となっている。

特集

LNT 仮説への挑戦
2016 秋の大会企画セッションから

知的人材ネットワークあいんしゅたいん 坂東 昌子, 京都大学 田中 司朗, 今井 匠,
大阪大学 真鍋 勇一郎, 関西大学 和田 隆宏

従来の低線量被ばくの影響評価そして放射線防護の枠組みを一新する可能性のある理論が開発されている。その名をモグラたたき(WAM)モデルと言う。このモデルが導く最も重要なことは、低線量被ばくの影響はモグラたたきのように潰されていって、時間経過とともにその影響が蓄積してはいかないということである。これは現行の放射線防護の基盤であるしきい値なし直線(LNT)モデルが70年にわたって築いてきた枠組みにチャレンジするものである。ここでは、このことを議論した2016年秋の大会企画セッションの内容を紹介する。

1. 基調講演「低線量放射線影響の歴史的経緯と現状」

物理学者の挑戦

坂東 2016年秋の日本原子力学会でセッション「LNT 仮説への挑戦」を企画していただき感謝しています。まず私からは、放射線防護の歴史を簡単にたどっておきたいと思います。放射線発見の歴史は、レントゲンやキュリー夫妻から始まります。一つだけコメントしておきますと、「少量のラジウムを入れたガラス管をポケットに入れていたら数日後に腹部の皮膚に紅斑ができたよ」とベクレルから聞いたピエールキュリーは、同じ実験を自分の腕で試してみてそれを確かめ、そして言ったそうです。「皮膚の細胞を殺すのならがん治療にも使えるはずだ」と。すごい発想と想像力を持つ科学者ですね。

科学の新しい発見は常にプラスとマイナスの面を持っているもの、それをどう使うかは我々人類次第です。「非破壊検査」が可能な放射線は、発見当初から世間で重宝され、菅原務の言葉を借りれば、いわば有頂天になった時代でしたが、すでにマリー・キュリーは最初の放射線障害を受けていたはずでした。しかし、マリーはこれをあまり認めようとはしなかったようです。実際マリーの弟子であった日本人、山田延男(1896-1927)は、27歳でフランスへ派遣され、ラジウム研究所で2年半放射線研究に従事し、帰国後、放射線障害で帰国直後に入院したそうです。そして31歳の若さで死去しました。山田を高く評価していたマリーのねぎらいの手紙には「過労」と書かれていたということです。マリーのような科学者でも、自分の発見した放射線が起す障害をなかなか受け入れなかったという科学史研究もあります(川島慶

子)。しかし、ラジウムによるペインターたち、鉱山病といわれたラドンの影響など、少しずつその実態が明らかになっていきました。ただ、当時は、放射線取扱を職業とする一部の専門職業グループの問題でした。

放射線の被ばく状況を変えたのは、ビキニ水爆実験(1954年)でのフォールアウトの被害で、対象が一般市民になったからです。この事件をきっかけに、ラッセル・アインシュタイン宣言が出、パグウォッシュ運動が始まったのでした。ちなみに、1956年第1回パグウォッシュ会議の第1セッションは、放射線量の基準値をめぐる議論がテーマでした。なんと、湯川秀樹はこのセッションに出席していたのです。この時の議論で大変興味深いのは、放射線量の基準を決める科学的結論と、人道的立場を明確に区別すべき判断の基準を明確にしたという点です。それは、

- ① どれだけ人類に利害を与えるか
- ② 放射線源はどれだけ制御可能か

という二つでした。原子力発電の場合は、①については「一定の評価ができる」、②については、「将来は技術が発展してより制御可能になるだろう」ということだったようです。残念ながら、福島事故後の今なら、②の評価はどうなるだろうかと思いますが・・・。

それに対して、原水爆実験は百害あって利なし、しかも制御できない。この結論は論旨が明確で人道的立場と科学的真実を混同することへの戒めも含んでいると思われます。参考のために言っておきますと、のちに述べるマラーはこの会議に参加しています。そして同時に、国際的な規模で、放射線防護のための組織が国連をはじめとして結成され本格的な放射線防護の検討が始まります(表参照)。

LNT；マラーとラッセル：その経緯と疑問

そこで、本題の「LNTの謎」に入りますが、そもそも放射線の生体に対する影響という意味では、大量の強い放射線被ばくでは細胞死など相当なリスクがあることはす

Towards to Scientific Investigation of LNT Hypothesis : Mariko Bando, Shiro Tanaka, Takumi Imai, Yuichiro Manabe, Takahiro Wada.

(2017年1月6日 受理)

放射線防護に関する国際基準の変遷とその分野での科学的話題

防護に関する国際基準の変遷	西暦	科学分野等のトピック
	1927	H.J.Muller ショウジョウバエで実験(Scinence,1927;66:84-87) 高線量では線量と突然変異は比例
国際 X 線・ラジウム防護委員会 (IXRPC) 創設 X 線の耐容線量 (tolerance Dose) は 1ヶ月あたり 1/100 皮膚 紅斑線量以下	1928	
IXRPC 体表面の耐容線量: 02R/日 (約 1.8mSv)	1934	
米国放射性防護委員会 (NCRP) しきい値がないという 前提で全身被ばくの最大許容量: 0.05R/日	1946	Muller ノーベル生理学医学賞受賞, 受賞スピーチで LNT に 言及
IXRPC → ICRP 最大許容線量: 空中線量 0.3R/週, 一般人 はその 1/10	1950	広島・長崎原爆被爆者への調査開始
	1954	米科学アカデミー (NAS)・原爆放射線の生物学的影響委員会 (BEAR) が健康や環境への影響調査開始
ICRP 遺伝的影響において LNT 仮説を支持	1956	NAS・BEAR が LNT モデルを採用
ICRP 白血病・骨肉種・寿命でも LNT 仮説支持 30mSv/13 週, 50mSv/年, 一般人は 1/10 (個人差を考慮?)	1958	広島・長崎原爆被爆者への長期追跡調査開始
	1982	W.L.Russell メガマウス実験 (PNAS.1982:542-544) 線量率により勾配率が異なる
ICRP Pub.60 DDREF を採用 20mSv/年 (5年平均, 最大 50mSv), 一般人 1mSv/年	1990	

でに確定しており, これは確定的影響で「閾値」があることも分かっていました。

問題はそれより低線量の被ばくの問題です。当然ながらそれほどのリスクは受けませんが, 細胞内の DNA の変異を通じて遺伝的影響, あるいは体細胞の場合はがんリスクにつながるのでは, という問題でした。それに対してまず動物実験での結果が注目されました。それが, マラーのショウジョウバエの実験 (1927 年) でした。このハエの実験結果では, 総線量が 5-25 Gy の X 線照射実験が蓄積されました。その総括的なデータは, 例えば「放射線必須データ 32」に紹介されています。しかも, かなりの高線量率で照射されています。なぜ低線量率のデータがないかというと, ハエの寿命は短いので, 低線量率では, 突然変異を観測するほどの総線量に達する前に寿命が尽きてしまうからです。

実は, 放射線による突然変異は, 物理学者にとって, いわゆる原子物理とは異質の生物現象に対する大変興味深いテーマでした。シュレディンガーの「生命とは何か」にあるように, 当時, ヨーロッパのメッカと言われたコペンハーゲンのボーア研究所では, ニールス・ボーアやマックス・デルブリュックなど当時の重要な物理学者たちが連日議論に花を咲かせていました。そしてマラーもまたこうした刺激的な環境の中で影響を受けています。そこには例の「ヒット理論」で有名なリーも彼らと交流しています。当時の物理学者の意気込みはすごかったようですが, 実はこの雰囲気から影響を受けた 1 人が仁科芳雄でした。

話がそれましたが, このマラーの実験は, 進化の原動

力である突然変異が人工的にも引き起こされるという画期的な証拠を与えたということで, 1947 年にノーベル賞を受賞しています。彼のノーベル講演は, 「放射線の影響は被ばく線量に比例する」という LNT を強調したものでした。もっともその段階では, ハエの実験しかありませんでしたから誰もがそう思ったと思います。かの有名なリーのヒット理論では物理過程のみを問題にして LNT が再現できることを示しましたので, 放射線生物の基礎的なモデルとして今日まで使われています。

LNT の呪縛

しかし, マラー以後ハエの実験は大流行していたわけで, LNT に反するデータも報告されていたのです。しかし, その当時の論点は, 閾値の有無を巡る論争だったことが見て取れます。これが私にはどうしても理解できないところがあるのです。

それは, 以下に述べるように, 線量率効果があることが, ラッセルの実験結果として報告されていたのに, 線量率効果というのは取り入れていないこと。それから, もう一つはバックグラウンド, つまり我々は普通, どのぐらい放射線以外の原因で突然変異を起こす影響を受けているかということ, すなわち自然突然変異がほぼ 1Gy のオーダーで生体の中に誘起されていることがわかっていたはずなのに, 無視されていたように見えることです。

といいますのは, ハエの実験結果に疑問を投げかけたのが, オークリッジのラッセル・ラッセルでした。彼は次に 2 点を強調しました。

- ① ハエはヒトからかなり遠い, もっとヒトに近い

動物実験が必要

- ② 線量も線量率もかなり高い結果だ。もっと低い線量・線量率の実験が必要

ラッセルはこれを確かめるために、マウスの遺伝子座を特定した実験計画(SLT)を立て、マラーにも相談しています。マラーは、「10万匹に1匹程度の突然変異しか見えない、それは無理だ」と反対したそうです。しかし、ラッセルはそれを敢行しました。それには100万匹のオーダー(実際には700万匹だそうです)のマウスが必要で、オークリッジのビルディングの1つはマウスでいっぱいになったそうです。そういうわけで、この実験は「メガマウス実験」と呼ばれています。そして実に、最後のレポートが出るまではほぼ30年かかりました。もちろん、途中経緯の段階でも、突然変異が線量率によってかなり異なることは随時報告されていました。これは明らかに放射線によってできた変異細胞数が、時間とともに減少するよう生体の機能が働いているということを意味しています。

しかし、残念ながら、放射線防護関係の組織も放射線研究者も、LNTを放射線の影響を表す作業仮説としてずっと基礎に据えていました。リーの理論を改良してこの効果を取り入れようとする動きがなぜなかったのか不思議です。どうもリー自身は物理学者ですから、当然、私たちが最近考えたような微分方程式を考えなかったはずはないような気がするのですが……。残念ながらリーは早くに他界してしまっていたのです。ほかに彼の仕事を継ぐ研究者がいなかったのかと思いますが……。

いったん固定概念ができると、そこから他の発想へ転換することは、かえってプロの方が難しいでしょう。異分野交流で新しい風をいつも吹き込まないとイノベーションは起こらないことはよく知られた科学史の事実です。こういう話も含めてLNTの新しい定式化のお話を真鍋さんがされます。また、LNT仮説がどのような根拠で国際防護の基盤となったかのお話は、突然変異だけでなく、一般の疾病等でも疫学的な分析を含めて行われましたが、実際の歴史をたどってこの経緯を今井さんがお話しされます。そして和田さんが、日本や世界で、低線量放射線の影響についての再検討を始めている事情を説明していただきます。

生物進化と分子生物学の研究が繋がった

そこで、放射線の生物学的影響というのが、どういうところへ向かうべきかということについて、いくつかの理念についてお話をさせてもらって終わりにしたいと思います。

放射線で誘起されるミューテーション。実はこのミューテーションが起こらなかったら、生物というのは進化しなかった。進化の原動力がこのミューテーションなのです。そういう意味では、ヒトがなぜヒトになった

のかということを探っていく非常に重要な、学問的にも面白い分野です。

例えば、生物進化系統図をみると、何億年前にサメとヒトが分化して今日に至ったかがわかります。さて、その間に、どれくらい自然突然変異が起こったのか、今ではDNAの変化を調べることによってわかります。それと、今行われている動物実験データでのコントロール、つまり人工的な放射線照射のない場合の自然突然変異率と比べることができるのです。そうすると、なんと！まさしく同じオーダーで一致するというのを発見しました。これには興奮しました。つまりマイクロな実験データとマクロな生物進化が、統一的に記述できるということです。ちょうどマクロな星の進化を、マイクロな素粒子過程で説明した林忠四郎の仕事に匹敵する、生物進化と分子生物学をつなぐ研究が始まったのです。これを成し遂げた先人が木村資生です。マイクロとマクロをつなぐこの二つの仕事が、どちらも日本の中で生まれたことは誇りに思っています。

そしてそれを可能にしたのは、基礎物理学研究所や国立遺伝研究所といった共同利用研究を推進する、いわば分野横断的思考を持つところだったというのは教訓的です。その延長上として、マイクロとマクロをつなぐ、そういうロマンが今の放射線生物学にはあると思います。これが第1点です。

物理学者の先進性とその役割

それから第2点、これは物理学者の先進性を少し自慢させてください。科学としての放射線生物学は、実は初期の段階から物理学者が大変興味を持っていたことは先ほどの話でも出てきました。デルブリュックという人は生物学者と思われていますが、出身は物理です。いわばコペンハーゲンのボーア研究所でのディスカッションが生みの親でした。いわゆる3 men's paperの中での“Landmark of Molecular Biology: 1935 Gottingen Academy of Science “On the nature of gene mutation and gene structure”には、次のような1文が出てきます“1 bold attempt to tackle a biological problem with a new set of tools”として、“Conscious collaboration between a geneticist a biophysicist and an atomic physicist.”

そこでは、いわゆるコペンハーゲン精神という先取の気風と分野横断で心置きなく議論していた特徴を高く評価しているのです。この影響を受けた一人である仁科芳雄は、日本に帰ってきて最初にサイクロトロンが稼働したとき、「このビームをマウスに当てて実験をするように」と仁科研究室におられた村地さんに言われたそうです。そういう意味では、物理学と生物学とを結び付けた最初の仕事だったのです。物理学と生物学の橋渡しといえますか、そういうことが日本でも伝統としてあるこ

とをととも心強く思うと同時に、この伝統を受け継いで、私たちも分野を横断したコラボレーションをこれからも続けていきたいというふうに思っております。

人類の宇宙への飛翔の夢

それから第3ですが、これは宇宙への私たちの夢とつながります。人類の歴史を振りかえると、その活動はローカルなところからグローバルになり、地球規模になってきましたが、そこでとどまるわけではありません。ダイソンブームなんていう言葉がありますが、今や人類の活動は大きく宇宙に翔たく時代に突入し、宇宙旅行業者までいる時代になりました。地球サミットなんて言っていますが、そのうち、太陽系サミットになる日もあるでしょうね。

こうして人類はだんだん進化していくでしょう。この人類の活動の宇宙への広がり、宇宙への飛躍を可能にするには、放射線の生体リスクをクリアすることが必要です。そのためには、放射線の影響がどのくらいあるかというのを正確に評価し、それをどのように防護すればいいかを評価しないといけないわけです。つまり、我々の将来の宇宙への夢を、この研究が担っていると思います。

福島原発と女川原発の差はどこにあったのか

第4はもちろん、エネルギー問題です。宇宙へ進出のためにも、その燃料がなかったらできませんので、もちろんエネルギー問題とつながるのです。原子核エネルギーをまるで敵か悪魔みたいに言うのは、科学の成果を無視することになります。原子力発電そのものが悪いというような科学を否定した話をしていて、いったいどうするつもりかと思えます。私たちは、キュリー夫妻をはじめとして多くの科学者が人類の未来のために役立てようとして発見した原子核エネルギーが、人類とどう共存できるかを見きわめないといけないのです。しかし、莫大なエネルギーをどうやってコントロールするのかを科学技術の問題としてクリアしないとイケません。

こう考えると今回の福島事故は、非常にシビアな問題を私たちに突きつけたわけですね。それに対する事故調の報告は、どれを見ても私には満足感がありません。最大の疑問は、いったいどこに決定的な欠陥があったのかということです。マークIという最初の機種が悪かったのか、沸騰水型が本来決定的な欠陥をもっているのか、いやいや、加圧水型を含めて軽水炉全体がシビアアクシデントに弱いのだ、という主張から、最後には原子力発電そのものが人類には危険すぎる、こういういろいろな段階の主張があります。本当のところ、どこにシビアな境界があるのか、正確に知りたいと思うわけです。それを明確にしてほしいのです。

それとは別に、人災の面も多く報告されています。原子力ムラというような言い方をよくしますが、私はこう

いう言い方が好きではありません。全体として安全性を高めるための組織的取り組みがうまく機能しなかったのは確かで、「安全神話」がまかり通っていたといわれます。しかし、現場の技術者は、これまで様々な努力をしてこられたのを見るにつけ、その成果が生かされ機能しなかったのはなぜかが気になります。記録をたどってみると、現場の科学技術者は、電源の問題、津波対策など、様々な提言もしてきたはずで、そして現状の危険な側面もわかっていたはずで、

ところが経営的な側面からの詰めに検討して、どこまで安全対策に経費をかけるかが決まるのでしょうか。あんな大事故が起こった後、今から思えば、安全対策に対する決断の差が出てきたのではなかったかと思われ。その差がどこから出てきたか、きちんと知りたいです。

果たして、科学技術者が自分の、みずからの立場からの提言をどこまで経営者が、あるいは国が受け止め、決断できるか。それが重要なカギではないかと思うのです。

ですから、私は、今でも一番知りたいのは、福島原発と女川原発の差がどこにあったのか、どこの決断が違ってきたのか、です。女川原発は、あの震災のときに避難所になったわけですね。なぜ、福島原発は事故を起こし避難地域になってしまったのでしょうか。その違いは一体何が決定的だったのかをきちんと分析して、そこから教訓を引き出してほしいのです。これってあまり誰も分析してくれないのですが、ぜひ原子力学会でもきちんと報告してほしいです。

技術者の誇りを大切に

というのは、原子力学会の牧先生から頂いた資料によると、女川の津波対策は、よく考えられていて、例えば引き潮で水が足りなくなった時のためのプールまで設置してあるのですね。東北電力は、技術者の意見をきちんと聞いて対策を立てたということではないでしょうか。

正直言うと、私はそれまで物理学の世界にいて、湯川研究室で育ったのですが、ビキニ事件でショックが大きかった湯川秀樹はその核兵器廃絶のために一生をささげられました。また、当時は原水爆実験反対の世論が大きく盛り上がっていました。そしてそれとともに、原爆の材料としてのプルトニウムを取り出す軽水炉にも批判的な立場をとってきました。自主・民主・公開という原則で始まった原子力研究でしたが、原子力はすでに応用分野であるという意識もあり、物理学の手を離れたという雰囲気の中で、ほとんどこうした分野の技術の発展に関心を持たないでここまでできました。そして技術移入でやってきた日本の原子力発電所が、「ターンキー方式」で自主からはほど遠いのだという思いで過ごしてきました。

それを痛感したのが、福島事故後です。どうしてこんなに原子力と原子核研究が隔離されてしまったのでしょ

う。ですから、原子力分野で、どのように技術の進歩があったかということをお自身は、ほとんど勉強してきました。それを痛感して、基礎物理学研究所の研究会「原子力：生物学と物理」を仲間と提案し、研究会を持ったのは2012年夏でした。そこで、はじめて、原子力関係の方々と一緒に会って議論をいたしました。いろいろな話を聞かせていただき、ああ、やっぱり技術者は、その後大変な努力をしてきたのだ、決して「ターンキー方式」にすぎなくて何もなかったわけではない。これまでの技術者の努力と成果をどうしてまともに受けとめて、そして次のことに生かしていけないのか。そういう忸怩たる思いがあります。

そういう意味で、原子力学会の皆さんには、ぜひ技術者・科学者の立場から、人類の未来のためにしっかり考え、情報発信してほしい。それが私たちの責務だと思えます。そういう意味で、特に最後の夢はみなさんのご努力にかかっているのかなと思っております。

科学的な話と政治的発言の峻別を

最後に、大体今まで放射線の防護に対して、科学者が前面に立ち過ぎていることは、科学と政治の混同を招くと思います。科学者が、科学界での合意もなく、個人としていきなり市民に情報発信し過ぎているのではないかと危惧しています。それが科学であるのか、あるいは防護という立場からの政治的発言なのか、その区別がはっきりしないままになっています。これはまずいと思えます。むしろ科学者は、ここまではわかっているけれども、ここまではまだ合意に達していない、そのことをきちんと明確に科学的事実を伝えることが大事です。

しかし、それを政治とか防護に当てはめていくのは、科学者だけで決めるのは余りにも思い上がりではないでしょうか。残念ながら、行政もすぐに科学者に判断を任せる傾向があります。科学者が前面に立って説明説得すれば、市民が信頼するだろうという安易な気持ちがあるのではと思います。それも科学者として合意を形成するというプロセスを踏まず、科学者の代表がどういう立場で情報発信しているかも明確でないまま、いろいろな方々がマスコミやテレビに顔を出して情報発信しました。これがまずかったのではないかと、こういうふうにおもっております。ということで、私の話はこれでおしまいです。ありがとうございました。

司会(下/澤田)坂東さん、ありがとうございました。歴史的な面、いろいろ調べていただいて、参考になりました。続いて問題提起に入ります。最初に「統計モデルとしてのLNT仮説の起源」と題しまして、京大の田中司朗さんがお話しになる予定だったのですが、ご都合が悪くて、同大大学院の今井さんに、話していただきます。

2. 問題提起1「統計モデルとしてのLNT仮説の起源」

今井 京都大学の田中の代理で発表させていただきます。

私も、京都大学の医学研究科で薬剤疫学の教室におりまして、疫学、生物統計を中心に研究しております。今日はLNTの仮説に対して、どのような起源があるのかということについて統計学の観点から解説をしたいと思います。

「Linear Non-threshold(LNT)」は、放射線防護の現場で用いられる線量管理の際に想定される仮説です。被曝による健康影響には閾値がなく、累積線量に正比例するというものです。過去に行われたマラーによる実験や、長崎・広島医学データなどによってこのような仮説が支持されています。

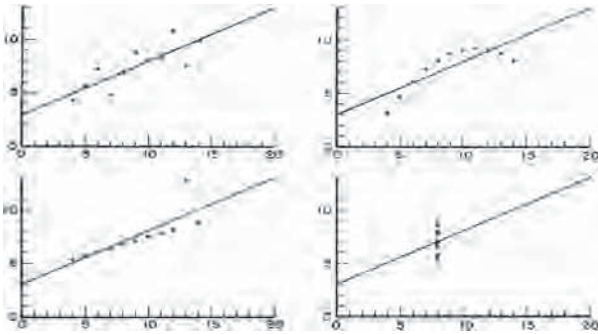
これとは別に、得られた疫学データを表現するとき、どのような回帰式を当てはめるのが良いか、という別の問題があります。放射線疫学の研究で主に用いられるものに、直線モデル、直線二次関数モデルというのがあります。本来、LNTの仮説とこの回帰式で直線モデルあるいは直線二次モデルを用いること、というのは、放射線防護の問題と統計解析という次元の異なる問題です。しかしながら、これらを完全に二つに分けることはできず、放射線被曝という問題という文脈の中で互いに影響を与えてきました。

以降のスライドでは、こちらの直線モデル、直線二次モデル、これらがどのような経緯で放射線疫学のデータに当てはめられるようになったかについて説明を行います。

回帰分析におけるポイントを整理

まず、回帰分析について簡単に説明します。回帰分析の解釈における注意には、主だったものが二つあります。下図に、データのプロットが四つあります。どれも見かけは異なりますが、これらに直線を当てはめようと思って最小二乗法というものをいり直線の当てはめを行うと、見た目のプロットは全部違うものになっているのですが、全てに同じ直線が当てはまってしまう。そもそも、この回帰分析の目的というのは、プロットされたデータの背後にあるものを説明する目的で行われるものですので、その観点からいうと、一番左上のもの以外は何となく実際のデータにはあまり当てはまっていない、と思われれます。この例の通り、回帰式を立てるときには、データをきちんとプロットして、まずは目でデータの構造を把握することが大切になります。

二つ目の問題として、交絡というものがよく問題になります。これは、医学とか疫学の分野では、因果推論を行う上で非常に問題になるものになります。例えばがんのリスク因子について、放射線に暴露した分と暴露していない分の間で大きくばらつきがある状況を考えます。そ



ういった場合には、がんの発生率や死亡率は、その効果によってゆがめられてしまう、つまり真の線量の効果を見ることができなくなってしまいます。これが交絡と呼ばれる現象です。このような問題に対処するには、きちんと肺がんのリスク因子である喫煙などのデータを一つ一つ対象者から集めて、解析で調節するなどをしなければなりません。

続いて、回帰式の選択における問題について説明します。物理モデルが具体的に想像できない場合には、幾つかモデルを立てて、そのモデルの比較を行う必要があります。直線モデルを当てはめるのか、直線二次関数モデルを当てはめるのか、どちらが良いかを考えるときに、様々な方針が考えられると思います。まず1つ目、仮説検定方式というのがあります。こちらはどのようなものかという、例えば、 $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon$ という回帰式を立てた時に、 $\beta_2 = 0$ に対する仮説検定を行い、統計学的有意性が確認されれば、二次の項をモデルに残す、というものです。しかしながらこのモデルでは、真にデータに二次の項の影響があるかどうかという問題以前に、サンプルサイズが大きいのか小さいかによって、その仮説検定の結果が大きく違ってしまいます。サンプルが少ないと仮説を棄却できず、直線モデルが選択されやすくなります。続いては最小二乗法です。こちらは「データによく当てはまる」ということをきちんと具体化して計算しようというものです。最小二乗法では、データと予測の差をはかって、それを最小化しようという考え方を uses。この考え方では、今度はパラメータを増やすことで必然的に当てはまりがよくなってしまいます。従って真実に関係なく、直線二次モデルが選択されやすくなり、これにも問題があります。

いろいろな問題がありますが、これらの問題を解決する形でよく用いられるのが、赤池先生によって提案されたAIC、赤池情報量基準です。また、赤池情報量基準の応用版も多数提案されており、統計の世界でよく用いられます。実際の統計解析の現場ではこの当てはまりの指標と、実際にデータをプロットしてみて当てはまりを確認、ということに基づいて回帰式の選択が行われます。

では実際に、放射線のデータや疫学データにどのようなことが考慮されて回帰式を立てられたか、ということ

ですが、アメリカの電離放射線、生物学に関する委員会、BEIR委員会というのがあります。そちらの報告書の内容について解説します。この報告書が1980年のもので、それ以前にミラーの実験やLNTの仮説というのが元々あったのですが、この報告書ではまずLNTからスタートするのではなく、もう少し広い柔軟なモデルから検討をスタートしています。「発がんに対する理論はまだ十分でない」と述べた上で、このように様々な項を含んだモデルを想定しています。

$$F(D) = (\alpha_0 + \alpha_1 D + \alpha_2 D^2) \exp(-\beta_0 D - \beta_1 D^2)$$

発がん効果

細胞死効果

この一番右の項は、細胞死効果といって、ダンピングファクターを表します。放射線で細胞が死んでしまう効果を表現するものになりますが、実際の統計解析では低線量ではこちらの効果が確認されてないとし、解析で用いたモデルからは除外されています。

こちらがデータの解析の結果になっています。まずはデータをプロットしたものに直線を当てはめたもの。次に最小二乗法を当てはめて回帰係数を求めたときの結果です。こちらには「goodness of fit」という項目があり、カイ二乗統計量の値が記されていますが、これは当てはまりの良さを表す指標の一つです。実際の解析では、直線モデルと直線二次関数モデルがあてはめられましたが、さらに中性子線とガンマ線の影響を分けて、回帰モデルが3つ立てられています。結論としては、当てはまりの指標がそこまで大きく3つのモデルの間で変わっていないことから、積極的にどのモデルを支持するという理由がない、と報告書では述べられています。

直線モデルの起源ということで話しましたが、今話したこの1980年のBEIR IIIの報告書というのが一つの基準になっていることは確かだと思われまます。それ以降、統計解析における想定に本質的な違いは見られてはいません。BEIR V、1990年の報告以降では、直線モデルというのがもう積極的に用いられていて、このBEIR IIIほど慎重な議論がされていない傾向にあります。方法論の是非はさておいて、このIIIでつくった基準をさらにこのBEIR Vで踏襲したというところに、直線モデルの起源があるのではないかと考えています。さらに、2000年に入って提出されたレポートによると——BEIR VIIになりますね——もうこの直線モデルをベースに考えて、それに補正を加える形でいろんな解析というのが行われるようになってきます。

まとめです。放射線疫学データに当てはめられるモデルの起源について解説を行いました。BEIR IIIというのが基準になったと考えられますが、そもそもの始まりは、直線モデルありきのスタートではなく、より柔軟な効果を含んだようなモデルからスタートしています。統計学的な根拠を含んださまざまな観点から、直線、直線

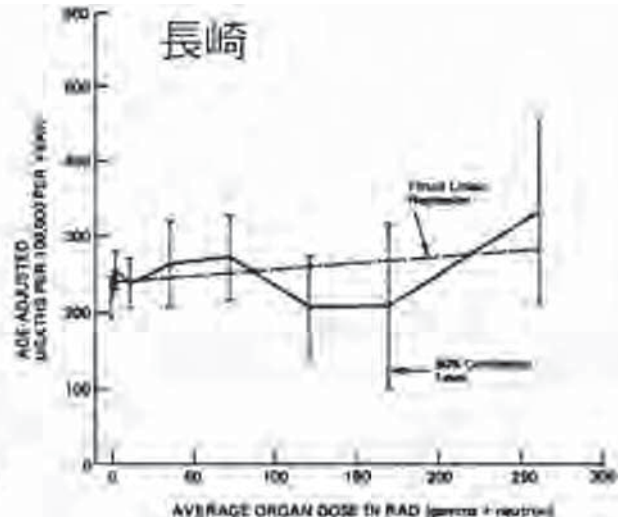
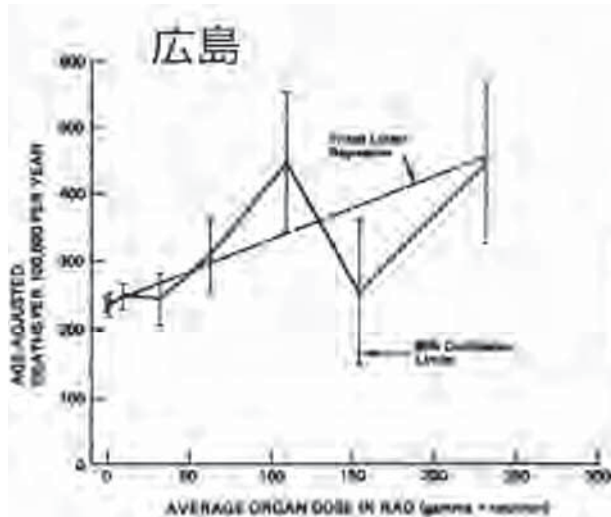


TABLE V-9 Regression Analyses for Gas Mortality Data, 1955-1974 (Excluding Leukemia)

Model (Equation)	Coefficient \pm SD			Goodness of Fit	
	α_1	α_2	δ_1	χ^2, df	(p)
LQ-L (V-6)	1.40 ± 4.56	0 ± 0	61.9 ± 39.2	16.0, 11	(0.23)
L-L (V-7)	1.40 ± 2.18		61.9 ± 34.6	14.0, 12	(0.30)
Q-L (V-8)		0.0047 ± 0.0104	67.3 ± 21.9	14.3, 12	(0.28)

[†] Boundary-value estimate; α_2 constrained to be nonnegative. The calculated standard deviations of estimates do not allow for the fact that an active constraint is operating in this equation, and they may therefore be misleading.

二次関数モデルが選択されましたが、モデルの優劣に関する結論はここでは出ていません。さらに、AIC などではなく、カイ二乗統計量を用いて当てはめめのチェックを行っております。その後、BEIR Vで直線モデルが積極的に採用され、以後の標準的な習慣になったと考えられています。

—今井さん、どうもありがとうございます。

次に「LNT 仮説への挑戦としての WAM モデル」と題しまして、真鍋さんをお願いします。

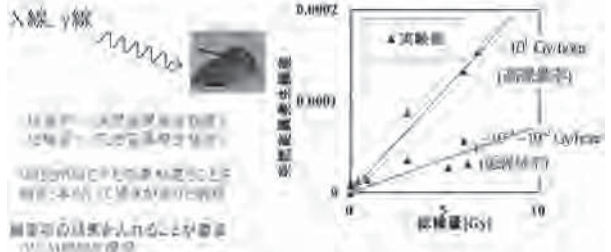
3. 問題提起 2[「LNT 仮説への挑戦としての WAM モデル」]

真鍋 大阪大学の真鍋です。

今、統計モデルとそれがなぜ定着していったのかを今井さんがお話ししてくれましたが、私からは物理モデルを使えば、実はこれまでの放射線疫学の影響のデータがこれまでと異なった解釈ができるというお話をしたいと思います。

LNT 仮説は少しの放射線量でも危険で、リスクは増大するというものです。その例でよく挙げられるのが、マラーが1927年にショウジョウバエで行った実験です。これはショウジョウバエに放射線を当てて、その子供の突然変異を調べたという実験なのですが、結果は非常に単純なデータになりまして、当てれば当てるほど、その

ラッセルのメガマウス実験(線量率効果)



子供に異常が見られるという直線のデータでした。これがまさに LNT ということになります。

その後、ラッセルがアメリカのオークリッジで戦後に、ハエではなくもう少し人間に近いものでやってみようということで、メガマウス実験というものを行いました。さらに彼は、総線量だけを問題にするのではなく、例えば線量率を少し変えてみたらどうなるのかという実験も行いました。方法はマラーの実験と同様に、親に放射線量を当てて、その子供に突然変異が出る率を調べました。とはいえ、頻度はかなり低くかなり手間のかかるものすごい実験で、この0 Gyのコントロールのところの3点の実験だけで約100万のデータを取るという気の遠くなるような実験でした。

線量率が下がれば突然変異率の発生頻度は数倍下がる

それによりますと、総線量がふえれば確かに突然変異発生頻度は増えるのだけれども、 10^1 Gy/hの照射結果とや線量率の低い 10^{-4} Gy/h、 10^{-3} Gy/hだと、総線量は同じでも発生頻度が数倍下がるということを彼は発見しました。

ただ、彼は普通の生物屋ですので解釈として通常の統計解析の手法を使い、得られたデータを、総線量が同じでも効果が違うというのを、傾きが違うというふうに線を

WAM理論を突然変異発生頻度に適用

線量率を考慮し、時間に関する微分方程式へ

$$\frac{d}{dt} F(t) = (a_0 + a_1 d) - (b_0 + b_1 d) F(t)$$

$\frac{dF}{dD} = \frac{F_0}{D_0}$ F : 突然変異発生頻度
 $F = d \times t$ d : 線量率 [Gy/hour]
 D : 総線量 [Gy]

解

$$F(t) = F(\infty) \{1 - \exp[-(b_0 + b_1 d)t]\} + F(0) \exp[-(b_0 + b_1 d)t]$$

$$F(\infty) = \frac{a_0 + a_1 d}{b_0 + b_1 d}$$

1. WAM理論からは、LNT仮説はごく短い照射時間でしか成立しない。
 2. 低線量長期被曝(低線量)には天井がある。
 $F(t) \rightarrow F(\infty), t \rightarrow \infty$

引いて解釈しました。我々物理屋としては、このデータを見たときに、線量率が重要だと言っているのだから、線量率をあらわに入れたモデルをつくって解釈すべきだと考えたというのが WAM (Whack-A-Mole) モデルの始まりです。

ここでは細かい数式の話はしませんが、この WAM モデルを突然変異発生頻度に適用した際に重要になってくるのは、まず線量率を考慮するという事です。突然変異発生頻度をまず時間に関する微分方程式にして、増える効果のところに、例えば線量率の一次までの関数〜ゼロ次の項は放射線照射が全くないときに対応しますが〜一次までの関数をとって、さらにその突然変異発生頻度の減る効果のところもまた一次まで、線量率 d の一次までとるという数式をつくりました。この減る効果と増える効果をさまざまな生物効果が入った式とみなします。

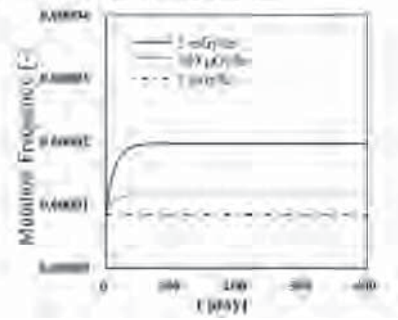
LNT 仮説は短時間でしか成立しない可能性

これは、これまでとどう違うかといいますと、それまではこの総線量だけで判断するモデルでした。これらは時間の効果が入らないということになります。我々の式はこれまでのモデルとは全然違うモデルということになります。

これを最も単純な場合で考えると、大学生レベルでも解けるもので、大変単純な式になります。細かい式の話は省き、この式から何が分かるのかといいますと、WAM 理論の解の形からは、LNT 仮説というのはごく短い調査時間でしか成立しないことがわかります。

詳しく言いますと、exp の中の変数 t が極めて小さい場合にテイラー展開すると、F(t) は、t に一次に比例する数式の形になります。これは LNT 仮説が成立することを示しています。ただし、(b₀+b₁×d)t が極めて小さ

WAM理論(物理モデル)を導入 →直線ではない可能性



い場合に限りません。一方で、もっと重要なことは、t が無限の極限になりますと、F(t) は一定の値に近づくことです。これを解釈すると低線量長期被曝のリスク〜この場合は突然変異ですが〜はずっと増えるのではなく、どこかに天井があるということを示しています。

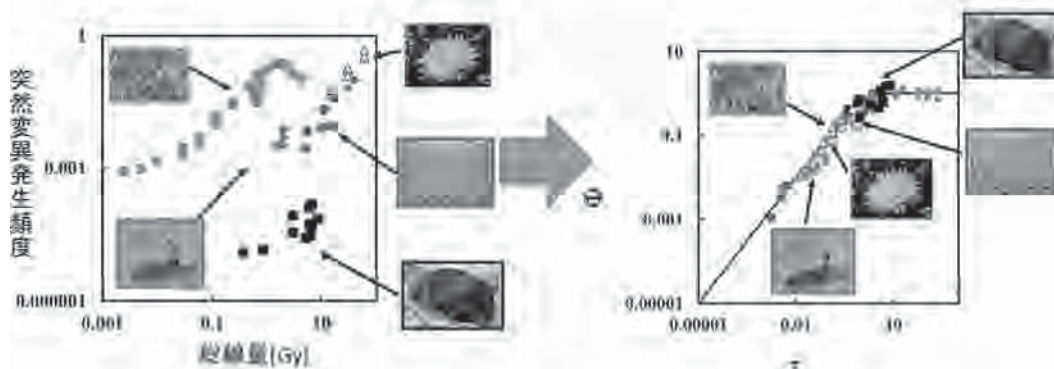
例えばこれはマウスの実験データを再現するパラメータを使った突然変異発生率の時間推移の図です。パラメータを決定すると、線量率によって全く異なる線が引けます。全ての線量率で挙動としては t が小さい領域では最初に直線に近い形で急激に上がって、t が大きくなると一定値に近づきます。ただし図からもわかるように、線量率によって、最初の直線の上がり方と、最終的に飽和して収束するところの値が違ってくるようになります。

我々はこれまでにマウスやいろいろな生物の放射線誘発の突然変異の実験結果を再現しました。例えばメガマウス実験を再現するように4つのパラメータを決めます。他の種についてもそれぞれ4つパラメータを決めます。何故このようなことをしたかという、WAM 理論はマウスだけにあてはまるだけではないかとの指摘があったので、他の種も試しました。色々検索しましたが、線量率が書いてあるデータは極めて少なかったです。それでもなんとか5種類見つけることができて、ショウジョウバエ、マウス、トウモロコシ、キク、ムラサキツユクサなどにも適用しました。この図はスケールリングという特殊な操作をしているものですが、この黒い曲線が WAM モデルの理論曲線で、実験データが全てその曲線の周辺に分布するということがわかります。この結果から WAM モデルは大変に簡単な式ですが、現実の実験データとの一致はそんな悪くないことがわかります。より慎重に言うと、少なくともこの5種類の種には共通なメカニズムがあることを示唆するということになります。

低線量被ばくリスクには天井がある可能性

さらに、もっと重要なことなのですが、この WAM モデルから計算しますと、先ほど坂東先生も指摘された自然突然変異、これは人工的な放射線がないとき

これまでの5種類の動植物に適用



共通のメカニズムがあることを示唆

自然突然変異の話

$$\frac{d}{dt} F(t) = (\alpha_0 + \alpha_0 f(t)) (\lambda_0 + \lambda_0 f(t)) F(t)$$

式から自然放射線がなくても発生する突然変異(自然突然変異)

$\alpha_0 = \alpha_0 f(t)$ とすると、自然突然変異が発生する瞬間線量率(平均)

$$\Rightarrow \alpha_0 = \frac{\alpha_0}{d_t} = 1.1 \text{ [mGy/hour]}$$

$\approx 7.54 \text{ [mGy/hour]} \Rightarrow$ 活性酸素によって発生するDNA損傷断片の放射線量 (Tabatake 2000)

\rightarrow ほぼ同じ

に起こる放射線によるものではない突然変異～自然突然変異と言いますが、それらを引き起こすものが放射線だと仮定して、どのぐらいの放射線に相当するかが計算できまして、それは、1時間あたりの量にして約1 mGyです。年にすると10Gyぐらいになります。

これは1mGy/yearという一般公衆の被ばく限度とは桁が全く違って、極めて大きいものになります。実はこれは昔、マラーが1920年代に「サイエンス」で発表した論文(Muller HJ. ARTIFICIAL TRANSMUTATION OF THE GENE. Science. 1927 Jul 22;66(1699):84-87, H. J. Muller and L. M. Mott-Smith, EVIDENCE THAT NATURAL RADIOACTIVITY IS INADEQUATE TO EXPLAIN THE FREQUENCY OF "NATURAL" MUTATIONS, Proc Natl Acad Sci U S A. 1930 Apr 15; 16(4): 277-285)にも書いてあります。自然突然変異は、我々が受けている自然放射線の量では絶対に説明できないということに彼は昔から気づいていたのです。今回、我々も同じような結果を得たことになります。

ただし、彼は総線量のみを気にしていたわけですが、我々は線量率によって正確に計算するということができます。我々の計算結果はチェビアナという人が計算した放射線量換算と、大体桁が合っています。

最後にまとめます。LNT 仮説はごく短い時間でしか成立しない。なおかつ、低線量被曝にはリスクは天井がある。1 mGy/h の被曝相当の自然突然変異があるということが、我々の新しい提案であるWAMモデルを使うとわかるということです。

-真鍋さん、ありがとうございました。

今のお話はこのセッションの肝にも当たるかと思えます。それでは次に、関西大学の和田さんから、学術振興会産学協力委員会という分野横断委員会が発足しましたので、その意味合いや経緯と、WAMモデルとの関係についてお話ししたいと思います。

4. 問題提起3「日本学術振興会 産学協力 放射線の生体影響の分野横断的研究委員会の発足」

和田 日本学術振興会の中に、放射線の生体への影響の分野横断的な研究のための研究開発専門委員会ができています。この委員会は、特に低線量の放射線を念頭においたもので、発足後ほぼ1年が経っております。

この委員会は産学協力ということで、産業界からも委員として半数ぐらい入っていただいています。委員長は私で、副委員長は日立製作所で放射線診断などの部門を

統轄しておられる長我部信行さんです。

研究開発専門委員会について少し説明します。学術振興会は科研費などの研究助成や国際交流、人材育成をしていますが、その中の一つの活動として社会との連携という事業部門があり、学術の社会的連携協力事業や科研費の成果の社会還元などを行っています。この学術の社会的連携という部分に、産学協力総合研究連絡会という20名程度の有識者で組織されている会議があり、そのもとに産学協力研究委員会、いわゆるナンバー委員会と呼ばれる、産業界からの資金で長期にわたって活動しているグループがあります。一方で研究開発専門委員会と先導的研究開発委員会というものがあり、こちらは委員30名程度で、活動期間は3年間、運営経費は学術振興会から支出されます。こちらは学界、産業界からほぼ半数ずつの委員で構成されています。

分野横断的研究の必要性

なぜ、放射線の生体影響の分野横断的研究という委員会を持つことになったかということですが、福島の事故以来、科学者の信頼が失墜している状況で、われわれでそれに対して何かできないかと考えました。ただし、低線量放射線研究というのは大変難しい。疫学の話でいうと、交絡因子をどう除くか難しい、生物実験だとメガマウスというふうに、大変たくさんの標本が必要になってきます。しかも時間がかかる。こういうことをどうやって続けていくか。

そのためにはやはり異なる分野間の交流が絶対必要となるが、今はどうしても短期的な成果が求められて、個別課題が優先され分野間の交流などというのは後回しにされている。これに対して、やはり何か動きを始めないといけないということで、2015年7月に、この委員会の設立を日本学術振興会の中で提案させていただきました。

低線量の放射線に関しては、国家レベルの取り組みが必要です。例えば疫学や放射線生物学の研究者が順調に継続しているかということとそうではなく、むしろ減少傾向にあります。欧米を見ますと、MELODI(Multidisciplinary European Low Dose Initiative)というヨーロッパ内の国際プラットフォームをつくって、後継者問題や研究テーマの優先順位などを議論しています。これに対して、日本は大変立ち遅れていると思います。また、国際機関、UNSCEARやICRPなどに対して、日本としてどういうふうに関わっていくのかということも考えていく必要があるだろうと、この委員会を提案しました。

この委員会は、放射線に関する重要なデータになる生物実験と疫学データの研究成果を統合することをめざしています。委員会には第1分科会と第2分科会があり、第1分科会は分野横断的な研究の活性化ということを考えて、国家レベルの組織へ向けての提言をしたい。例えば、福島県で今、県民健康調査が行われていますが、こ

ういうものの重要性を訴えていきたいと考えております。第2分科会では、産業界とのかかわりの深い放射線の医療利用に関して、日本は欧米に比べて二、三十年遅れていると言われており、そういうことに関して一定の提言をしたい。そのために、例えば医療被ばくに関するデータベース構築というようなことを提案していきたいと考えています。

最後に、これまで1年間の活動を紹介します。委員会の活動期間は2015年10月から2018年9月までですが、分野横断的な研究活動を活性化するためには、さまざまな分野の委員に一堂に会していただき、互いの分野の特徴や分野の課題などを共有することが出発点だと考えています。

このために分野横断的研究を実践して来られた和田昭允氏やUNSCEAR議長の米倉義晴氏に来ていただいてお話を伺い、直近では、がんの病理診断を専門とする常木雅之氏に、がんのメカニズムについてお話を伺っています。さらにはGeant4DNAという、放射線がDNAレベルでどんな影響を持つかを物理・化学過程としてシミュレーションしようというフランスにおけるプロジェクトの中心人物に来ていただいてお話を聞き、いろいろ議論していこうと思っております。

2015年にはMELODIワークショップに出席させていただきましたが、世界では写真にあるように、低線量の研究という枠で、これだけ多くの研究者が集まって来ています。それに比べればやはり日本は、体制が大変おくられていると思いますので、そういうことについて少しずつでも活動していこうと思っております。

—ありがとうございます。今のお話して、この企画セッションがどうやって成り立っているか、そのメーンは何かということ、それから学振がどういう動きをしているかということをおわかりいただけたのではないかと思います。

お話の中でMELODIというのが出てきましたけれども、これも福島の事故の前からいろいろ出ておりました、日本でも立ち上げなければいけないという声が上がっていながら、なかなかできていない。和田さんを初めとして、学術振興会でこういう努力がされているのは非常にありがたいし、それをもっともっと大きくしなければいけないと思っております。また、真鍋さんが中心となって手がけられているWAMモデルも、もっと広くディスカッションできる場が欲しいと思っております。

著者紹介



坂東 昌子 (ばんどう・まさこ)

知的人材ネットワークあいんしゅたいん
(専門分野/関心分野)素粒子論, 非線形物理学



田中 司朗 (たなか・しろう)
京都大学
(専門分野/関心分野)生物統計学, 疫学



今井 匠 (いまい・たくみ)
京都大学
(専門分野/関心分野)生物統計学, 疫学



真鍋 勇一郎 (まなべ・ゆういちろう)
大阪大学
(専門分野/関心分野)原子核物理, 低線量放射線の生体影響



和田 隆宏 (わだ・たかひろ)
関西大学
(専門分野/関心分野)原子核物理学, 放射線影響の数理的研究

(司会)下 道國 藤田保健衛生大学
澤田哲生 東京工業大学

パネル討論会

前節では、低線量被ばくの影響は蓄積していかないとする WAM モデルについて、2016 年秋の大会で行われた基調講演と 3 つの提言を紹介した。本節では講演に引き続いて行われたパネル討論のようを紹介する。WAM モデルにいち早く注目し WEB 新聞で紹介した滝氏の元には、様々なバックグラウンドを持つ読者層から多様な意見が寄せられている。また、地元である福島浜通りの復興に尽力する西本氏は、帰還者にも避難者にも少しでも安心をもたらしてくれる専門知とそのわかりやすい説明を希求している。

司会(澤田) 前半の皆様の講演に続いて、後半のパネル討論に移ります。なお、前半の講演セッションで登壇されなかったお二人から、お話をいただきます。最初にお話しただく日経新聞の論説委員の滝順一さんは日経サイエンス誌にも毎月コラムを書いておられ、正鶴を射た技術科学評論をされていると私は思っています。

滝 WAM 仮説は LNT 仮説に対する野心的な挑戦だと思いますが、だからの方がいいと簡単に結論が出るものではないと思います。長い間支持され、社会通念にもなっている仮説を変えていくためには、どういった科学的な、学術的なプロセスが要るかっていう問題だと思います。国家的機関への提言というようなプロセスを順次進めていく必要があるし、その過程で、この仮説をもっと精緻なものにしていく必要がある。今の段階でこれをメディアに発表したとしても、必ずしも受けはよくない、割と批判的な声が高いのではないかと私は想像します。

それは、低線量の健康影響については意見が分かれていますからです。何を信じていいかわからないというのがメディアや一般の人たちの捉え方だと思います。それに加えて科学的な意味での被曝の影響という問題と、防護の基準の問題が混同されて理解されているのが現状です。そのような中で、今まで定説的に扱われたもの

に対する新しい仮説を出すことは、さらなる混乱を生む可能性があります。被災した住民の方々にとっても、科学者の言っていることはばらばらな上に、さらに言うことが変わってきているということで、科学に対する不信を増す可能性があります。研究なさっている方々の熱意に水を差すようなことで申しわけないですが、これが私の感想です。

澤田 続けて西本さんお願いします。西本由美子さんは福島の広野町、南双葉で NPO ハッピーロードネットを主催されており、浜通りに桜並木を作ることや清掃を手がけられています。

西本 第一原発のところから 21 キロの双葉郡の広野町というところに住んでいます。私は震災前に原発についても放射線についても全く知識がありませんでした。だから被災したときには大変苦労しました。魔物と戦っているような状態でした。

けれども最近、有識者の人たちのお話を聞いて、何とか言葉の意味は少しわかるようになってきました。今日の講演で興味深かったのは、科学的結論と人道的な立場が、私にはすごくインパクトがありました。

有識者の先生達の話の中には、私たちが聞いても全くわからない言葉で話しをされる方もいます。有識者の方々はずいぶん、科学者用の話と、私のような日常の生活を

している者のための話を分けてお話しをしていただきたい。そんな中で開沼博先生が出した「はじめての福島学」は、私たちにも何とか理解できるように書かれていると思います。今の私たちには問題が2点ある。一つは戻っている人と戻らない人の温度差があること、もう一つは放射線に関する知識を持たなければならないということです。

澤田 このWAMモデルの話は一般の人にとってかなりハードルが高く、より理解を広めていくために、今後どういう発信をしていくかということ、福島に住んでいる人に届くようなわかりやすい話を展開していただきたいという指摘をいただきました。

坂東 WAMモデルは今の所、突然変異がどれくらい起こったかということを調べただけのものなので、がんが発生するメカニズムのような話にまでは至っていません。このため学問的な議論はしますが、一般の人にそれを言う段階ではありません。がん発生のメカニズムの理解をさらに深めていくことが必要だと思っています。

真鍋 今回、紹介したのはあくまで仮説です。このため、これからやらなければいけないのは、この仮説を証明するための実験です。とはいえ、そのために数百万匹のマウスを用意するのは大変なので、例えば大阪大学の中島裕夫先生がマウスにセシウムをずっと飲ませ続けることで遺伝的な影響を調べる実験を行っておられますので、それらの全ゲノム解析を実施することによって、少ない数のマウスで変異の検出ができないかということや、そのほかにあるモデルマウスを使って突然変異やがんを総合的に調べようという構想がありえます。それらによって突然変異だけの話から、突然変異とがんの関係についても実験的なエビデンスを得たいと思っています。このため、まだ市民との対話という段階ではありません。

和田 低線量の放射線の影響というのを考える時には、データというのが重要な意味をもちます。このため今、福島で行われている県民の健康調査を継続的に続けていくということは大変、重要なことだと思っています。

また、がん治療では放射線治療が重要な選択肢ですが、一方で放射線は人体に対してどんな影響があるのか。それを調べるためには、人に対してどれだけの線量が使われ、その結果がどうなったか、数年たってがんが発生したのかどうかなどをデータベース化していく必要があります。

滝 私は2、3年前にこのWAMモデルを記事にしたことがあります。記事になったら、想定されていたとおりの反響がありました。一つは医学的・生物学的な実験データに基づいていないのではないかという批判。もう一つは、福島事故でいろいろ非難を浴びている原子力推進の人たちが苦し紛れに、何とか局面を開拓するために

ひねり出した考え方じゃないかというような批判がありました。これは全般的な外れだと思えます。

今日の前半の講演で皆さんは、過去のメガマウスなどの実験やデータを再解釈されている。だから、決して学問的な根拠がないわけではない。さらには福島状況を打開するためにむりやり考えたような話でもない。これまであまり顧みられてこなかった領域に新しい光を当てて、そこに新しい学問的なフロンティアを見つけようという動きだと思います。

坂東先生がおっしゃったように、この話を学問的なレベルで詰めていくという話と、それを社会的な基準やルールにしていくという両方が必要だと思います。それは大変で時間がかかる作業だと思います。

坂東 健康調査の話ですが、私は京都で避難者とそういう議論をしておりました。避難者の人が、これが将来のために役に立つのであればやりましょうというような意見もいただきました。放射線と人体との関係についてはっきりさせることが、自分らの健康にも返ってくる、という大事な問題であるという認識が、当事者にはあると思います。

西本 私も賛成です。私は3年前にウクライナを訪問しました。被災したプリピャチ市の人たちは今はキエフに住んでいたのですが、当時から今までの30年近い個人データを国で管理しており、それが記載された手帳をみんなが持っています。さらにウクライナ政府はキエフの住民に、広島市が発行している健康手帳と同じようなものを配布していました。私は、これは福島県にも必要だと思います。出生時から生涯にわたって、自分がどういう状態でいたかということがわかるデータを作る、健康に関するデータ管理を行うことが、被災者にとっても福島県にとっても必要なことではないかと思っています。県にお願いすると、「予算がなくてできない」と返事されておしまいますが、予算の問題ではなく国民の命をどう守るかということで、これを考えていただきたいと思います。

澤田 では、この問題と社会からの理解の問題に入ります。個人的にはこうした話が福島に帰還している人たちはもちろんのこと、未だに避難を強いられている人々に少しでもこの安心感を与えるような話になればいいのかなという思いはあります。西本さんは専門家向けの解説と、一般の人々にも理解できるやさしい解説の二つがあればという提案でした。

坂東 京都に来られた避難者の方から聞いた話ですが、その方たちは南相馬からわざわざ飯館村のほうに逃げて、それでそこで一番被曝したと。その人たちが毎日、悪魔が大きくなっていく夢を見るということを伺いました。自分の体の中に、放射線という得体のしれない生物がいるような感じがする。その不安を払拭するためにホールボディカウンターではかりたいけど、福島まで

帰るのは大変なので、京都ではかれないかという相談にいられたのです。

仮に測っても、たぶんND(検出限界以下)だろうと私は思っていたのですが、その話は別にして、京都大学の原子炉研究所にはホールボディカウンターがあることが分かり、松本総長にお願いして、避難者の測定をしていただけないか相談しました。そしたら、総長がすぐに高橋千太郎先生につないでくださり、避難者の測定をしてくださることになったのです。ありがたかったです。そして、避難者のリーダーを中心に、とにかく測定グループを結成し、まずはこの方々を測定していただき、それをもとに、たくさん仲間たちにも広がるようにしようということになりました。原子炉実験所のホールボディカウンターは研究用のものですが、「避難者を測定することも、今後の研究の貴重なデータになる」ということで、15人ほどのグループを試験的に測定していただくことになりました。ただ、私たちとしては、単にお伺いして測定していただくだけでは、いったいこれで何が分かるか皆さんにもわかっていただけないだろうということ、[「いったいホールボディカウンターで何が分かるか」]をしっかりと勉強していこうね、ということになりました。そこで、測定する前に、その方たちと一緒に勉強しました。その方たちは、中学校ぐらいの知識から始めて、原子核やガンマ線、あるいはスペクトルやセシウムについて徹底的に勉強した上で、測定に臨みました。その勉強ぶりは、大学での授業などよりずっと真剣で、ほんとうによく勉強されました。ほんとうの勉強ってこういうことだと感心しました。

澤田 それはいい話だと思います。ただ、西本さんの気持ちに寄り添うと、そこまで勉強しなくても、わかるように説明してほしいということだと思います。

坂東 それについては私たちも、もっと工夫しなければならぬと思っています。そのためにはまず、私たちは今まで何がわかっているかということ、市民の人とともに学んでいったというのが経緯です。また、その時に学んだプロセスをもとに、パンフレットをつくらうという計画があります。そのときには西本さんにも協力をお願いします。

西本 福島では戻ってきている私たちと、それから戻ってこない人たちとの間で温度差が出てきています。戻ってきている私たちは、県内のいろんなところにある空間線量をはかる機械の数値を見て、今はどういう状態にあるかを理解しています。不安も少しありますが、そうやって数値が見えることや、食べるものも検査済みなもので、安心もしています。けれども他県に避難している人たちはそういう状況から離れているので、線量に対する不安が大きくなっていて、私たちが思っている不安との大きさが違ってきているという感じがします。福島で一つに

なろうということは難しいのではと思っています。

澤田 なお、このWAMモデルをどうやって伝えるか。また、これが日本国民、特に福島の人たちにとってよいものであれば、これを共有、理解していくことをしてほしい。そのためにはどういう取り組みや枠組みが必要かということが、課題としてあると思います。

西本 私は、今の高校生が原発事故に負けない30年後の自分たちの夢をかなえようということで、浜通りに桜を植えています。戻るときは満開の桜にしたいということで高校生が植樹していますので、2020年のオリンピックではぜひ被災地の子どもたちと、この桜の下で聖火リレーを走りたいと思いますので、協力をお願いします。

和田 今のところWAMモデルは突然変異という視点で分析しているのですが、これとがんとのメカニズムや関係を解明していくおとが、次の大きなステップだと思っています。

今井 今回のような問題については科学者などの専門家と、市民の方がいろいろ討論できる場をつくる必要があるのではないかと思います。

坂東 このWAMモデルについてはいろいろな批判も受けますが、私たちは重要なことが含まれていると信じています。批判をしっかりといただき、おかしいところや疑問に思ったところを徹底的に検討する中で、よりよい結論に向かっていくと思います。私が立ち上げているNPO「あいんしゅたいん」は、原発に賛成する人も反対する人もいますが、主張の違いは尊重しながらも、きちんとした議論ができる人をふやす。原発に反対する人でも、その人たちは「いかにして原発をより安全性の高いものにできるか」ということを考えている人もたくさんいます。そのような人たちの意見を聞く耳を私たちは忘れてはいけないと思います。

下 WAMモデルについて期待することを一つ。前半の講演で提示されたパラメーターについてはぜひ、生物学的な意味づけをしていただきたい。それから閾値問題についても、これをどう取り上げていくか。ぜひともいいアイデアを考えていただきたいと思います。

澤田 それでは、このパネル討論を終わりたいと思います。どうもありがとうございました。

登壇者紹介

今井 匠	京都大学
下 道國	藤田保健衛生大学
滝 順一	日経新聞
西本 由美子	NPO ハッピーロードネット
坂東 昌子	知的人材ネットワークあいんしゅたいん
真鍋 勇一郎	大阪大学
和田 隆宏	関西大学
澤田 哲生(司会)	東京工業大学



現代加速器の歴史的進化

高エネルギー加速器研究機構 高山 健

約 170 年の歴史を持つ荷電粒子加速器の発展の過程を科学技術史的にまとめた。広く普及している加速器の動作原理を簡潔に紹介し、それぞれのルーツを辿り、進化の中での相互の関係を解説する。実験室科学から巨大科学へ展開していく加速器をベースにした 20 世紀物理学の必然性と共に、第 2 次世界大戦の影響にも言及する。最後に 21 世紀における基礎科学としての巨大科学の存続の可能性を他の国家プロジェクトとの比較で論じる。

KEYWORDS: *Accelerator, Cathode Tube, Betatron, Cockcroft-Walton, Van de Graaff, Cyclotron, Synchrotron, Linac, Induction Accelerator, ILC*

I. 量子ビームと加速器

ここで云う量子ビームは粒子源から直接供給される粒子を意味する。量子の文言を使用するが、粒子源を離脱し、標的に到達するまでは基本的には量子力学で記述する対象ではなく、古典力学、古典電磁気学、特殊相対性理論のみで扱える荷電粒子、荷電粒子群の総称とする。現在多様な量子ビームが現在各種の加速器で高いエネルギーまで加速し、広範な応用に供されていることは周知の通りである。以下では先ずプライマリー量子ビームを世代に分類し、その特徴について述べる。それらの特徴から利用出来る加速器に制約がある。採用する加速手段によって加速器形態は大きく異なるが、これを加速装置の動作原理に基づき整理しておく。

1. 量子ビームの分類

荷電粒子を加速するには先ず、人為的に物質から量子を取り出さねばならない。取り出された段階で、帯電しておれば、そのまま加速できるが、中性であれば、何らかの方法で正か負に帯電させる必要がある。宇宙線が大気分子に衝突する事によって発生する電子は膨大な数になるが、これは制御ができない。しかし、電場を金属表面へ集中すると、トンネル効果によって簡単に真空中に取り出す事ができる。170 年前に発見された陰極線が正にこれであり、第一世代の量子ビームと言える。トムソンによるその同定と、レントゲンによる 2 次粒子として

の X 線の発見と、直後からの医療応用により量子ビームと人間の関わりが本格化した。この軽量の量子は加速後すぐに光速近傍に達するので、加速手法が単純化できるのが最大の特徴である。後述するマイクロ波や高周波を用いた現代加速器で得られる高速電子が生成するシンクロトロン放射光や標的から直接得るガンマ線等の光子の応用はほぼ全ての科学技術に波及していると言えるだろう。

一方、1910 年代の一連の研究を通じラザフォードはアルファ崩壊核からのアルファ線と窒素核との核反応によって生じる水素の原子核、すなわち陽子の存在を認識した¹⁾。尤も単純な構造の水素原子核を人為的に創出し、加速後様々な原子核反応のドライバーとしての利用が 1930 年代初めに漸く達成されることになる。この陽子が第 2 世代と言える。電子の約 2,000 倍の質量を持った陽子の加速はオールマイティーな加速手段としての静電加速で先ず実現した。高周波を用いた加速手法の発展に伴い、静電加速で得るエネルギーを凌駕するに到り、標的照射によって生成される中性子や中間子などの 2 次粒子も含め、これらを用いた応用分野が急速に開花した。

更に重い重イオンの加速が、イオン源の開発に伴い陽子に追従する事になる。これら重イオンは第 3 世代に相当する。今日、重イオンの応用分野は原子核物理から、材料科学、医療応用、突然変異を駆動するドライバービーム等広範に及ぶ。

1980 年代から希ガスクラスター、分子クラスター、イオン結合クラスター、金属クラスター等が見出されていたが、1985 年に発見された共有結合する安定なフラウレ

Historical Evolution of Modern Accelerators : Ken Takayama.
(2016 年 12 月 24 日 受理)

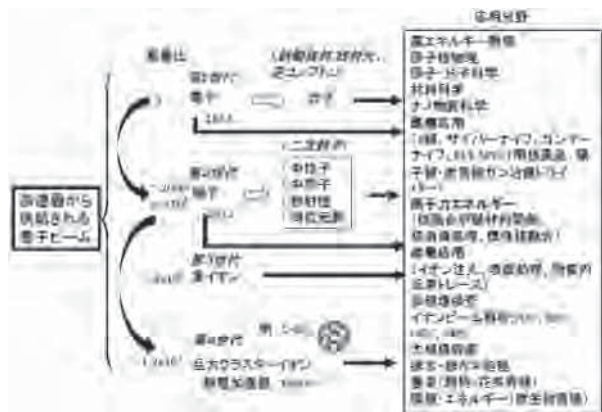


図1 加速器から供給されるプライマリー量子ビームの分類とそれらの応用分野



図2 加速器の分類³⁾

ンが得られるようになり²⁾, 加速対象として量子ビームグループに参入することになる。質量数が 10,000 に及ぶ生体由来の巨大クラスターイオンさえハンドリング出来る技術が確立してきた。新たなフロンティアが拓かれようとしている。このクラスター原子を第 4 世代とする。読者の便を考え、以上を図 1 にまとめた。

2. 加速器の分類

加速器の分類法には幾つかの方法があるが、ここでは加速電場の違いから進め、その後、幾何学的形状の違いによる分類で全体を整理する。

電場には時間に依存せず、常に一定の電場と時間と共に変動する電場の 2 種類が存在する。両者とも古典電磁気学で記述するが、前者は電場に関するガウスの法則のみで十分である。後者は電場のガウスの法則に加え、他のマックスウェル方程式によって記述される。加速装置(電場発生装置)の動作原理の違いによって、加速器を静電タイプと非静電タイプに分類する。

静電タイプの代表的な加速器としてコックロフト・ウォルトンとバンデグラフ加速器がある。基本的には高圧発生装置に粒子源を組み合わせただけのものである。非静電タイプの電場の形態にも 2 種類がある。ファラデーの誘導法則に従うパルス誘導電場とアンペール・マックスウェル方程式無しには記述できない時間軸と空間軸で振動する振動電場である。前者はパルストランスの 2 次側に発生する誘導電圧を利用する。この誘導電場を利用する加速器としてベータートロンが先ず提案された。後者は金属導体の共振器に励起したラジオ電波などの高周波や位相速度を制御した導波管(加速管)に伝搬させるマイクロ波が加速電場となる。ここではパルス電場を利用する加速器を非共振型、振動電場を利用する加速器を共振型として分ける。

何れの方式であっても、加速器本体の幾何学的形状から線形タイプと円形タイプに区別される。電子用の加速器も、陽子以上の重い量子の加速器もこの分類手法は同

じである。図 2 にこれまで名称が与えられた加速器を並べた。

単純な法則に従う加速電場を用いた加速器は汎用である。荷電粒子の種類や電価数を選ばない。静電場加速器は第一世代から四世代の量子を越えて、帯電した金属微粒子さえ加速可能である。但し、加速管の縁面放電等のため高電圧発生は一定の限界を越えられない。得られる粒子エネルギーは頭打ちとなる。次にファラデーの法則だけで済む非共振型加速器も汎用である。一方、共振型加速器はその加速装置で容易に高電圧振幅の発生が可能であり、著しく高い加速効率を持つ。しかし、加速装置の周波数のバンド幅の制約などから加速粒子の種類に応じその加速装置が異ならざるを得ず、一般性・汎用性には欠ける。例えば 1 価の鉛イオンを共振型加速器では高いエネルギーまで加速できない。

加速電場発生に関わる基盤技術の進化の違いによって急速に普及したもの、提案は先でも技術が追いつかなかった故、普及が遅れた物が存在する。共振型加速器の第二次世界大戦を経ての進化は特筆される。第一次世界大戦から第二次大戦の間に欧米で急速に進化した高周波技術、マイクロ波技術の存在と切り離せない歴史的事実がある。

II. 加速器の進化(第二次大戦まで)

1. そのルーツと曙

加速器のルーツは紛れもなく、ドイツの物理学者ブリュカーが 1854 年に実証した陰極管にある。彼は一定電圧をカソードのアノード間に印加し、アノード下流のガラス管端部で蛍光を観測した。カソード面で発生し、アノードの孔を伝搬した陰極線の存在を主張した。この陰極管は単一加速ギャップに印加した静電場で電子を加速する加速器に外ならない。1897 年に、より高電圧を陰極管に印加して行った一連の実験でトムソンは陰極線を電子と同定した⁴⁾。1895 年レントゲンは単一加速ギャップで加速した電子を金属に照射し、X 線の存在を初めて明らかにした⁵⁾。物理学上の発見とは別に、量子ビーム

の医療応用が開始された人類史上の一大発見であったと言える。この成果によりレントゲンはノーベル物理学賞の最初の受賞者になった。

1924年、スウェーデンの物理学者イジングは交流電圧を2個の加速間隙に印加し、電子の複数段加速を可能にする加速器を提案したが、実証できなかった。代わって、ノルウェーからドイツのカールスルーエ大学の大学院に留学していたヴィデレーが1928年にこれを実証した⁶⁾。この実証により時間依存の電場を用いた複数段加速が可能であることが明らかになった。実証したのは2段加速であったが、以降進化し続ける繰り返し加速の端緒になる実験であった。

2. 静電加速器の進化

自然界に存在する放射性同位元素から得られるアルファ線などの放射線や、宇宙線を用いた実験原子核物理の限界が認識されつつあった1920年代後半から、人為的な核変換を可能にする粒子ドライバーの必要性が高まり、陽子加速器の開発競争が開始された。当時世界の原子核物理の中心であったケンブリッジ大キャベンディッシュ研究所のラザフォードの研究室が1928年からこれに取り組んだ。既にそのスタッフであったコックロフトと大学院生であったウォルトンの二人の弟子が、倍電圧整流回路であるシェンケル回路に改良を加え、700kVの高電圧発生装置を1932年に完成させている。イオン源を組み込み690kVまで加速した陽子をリチウム標的に照射し、初めての人工的核変換となる2個のアルファ粒子の観測に成功した⁷⁾。この成果で二人は1951年にノーベル賞を受賞する。

米国のバンデグラーフは1928年にオックスフォードで博士号を取得、その直後から高電圧発生装置の研究を開始した。電荷を巨大な金属球体表面に移動させ、そこを帯電させると云う原始的だが独創的手法により、1929年にプリンストン大でバンデグラーフ方式80kV装置を実証、1931年には7MVと云う前人未至の高電圧を実証している。移籍したMITでは彼自身は核物理の研究を行わず、もっぱら加速器開発に従事した。タンデム加速器も彼のアイデアになる。

1980年代に高周波4重極加速器⁸⁾が普及するまで静電加速器は加速器複合システムの下流に位置する高エネルギー加速器の入射器として使用される時代が30年程続いたが、現在ではコックロフト・ウォルトン高圧発生装置が500kV程度までの標準的高圧電源として電源メーカーから供給されている。一方、質量分析の様なイオン分析の目的にはタンデム加速器は不可欠の加速器であるが、製造企業からの購入で済ます時代になった。

3. 高周波加速器の進化

前述したヴィデレーは彼の実証結果をドイツ語論文と

して発表した。この論文が当時新興のカリフォルニア大バークレー校の若い教授として研究グループを率いて実験核物理を開始しようとしていたローレンスの目に留まった。ドイツ語を読めない彼は、論文中のイラストだけから、何が実証されたかを理解した。直ぐに交流による円形加速器での繰り返し加速への応用のアイデアを得ている。固定周波数の高周波を用いて、すでに当時得られていた1テスラの磁束密度に閉じ込めた水素イオンを加速するサイクロトロン概念を論文を「見て」一週間後には確立したと言われている。彼の大学院生と共に、ほぼ一か月で4インチサイクロトロンを実証した⁹⁾。その実証から半年で27インチ、その後37インチ、1939年には60インチのサイクロトロンを完成させた。この結果、バークレー校は世界の実験核物理、核化学研究のメッカとなるに到った。サイクロトロンは円形加速器での高周波を用いた繰り返し加速方式の原型であり、後に発明・進化するシンクロトロンやマイクロトロンの出発点となった。因みに、理研仁科研究室のサイクロトロンは上記60インチサイクロトロンを下敷きにして建設された。

ローレンスはサイクロトロンの発明とそれを用いた物理・化学の成果で1939年のノーベル賞を獲得している。

III. 加速器の進化(大戦後)

1. 円形ハドロン加速器

ローレンスの求めでプリンストン大からバークレーに移籍し、サイクロトロンを使った超ウラン元素の研究をしていたマクミランは戦時研究への動員を受け、開戦当初は創設されたばかりのMITの輻射研究所に、その後ロスアラモスで原爆研究に参加することになる。終戦が見えた1945年に、シンクロトロンのアイデアを思いついている。ローレンスに建設途中で中断していたバークレーの184インチサイクロトロン完成を要請されていたマクミランはその電磁石の巨大さに辟易していたと伝えられている。シンクロトロンのアイデアの影にその様な事情があったとしても不思議ではない。固定磁場と加速に伴うスパイラル軌道が特徴のサイクロトロンと対照的に、変動磁場と加速全域にわたる一定軌道がシンクロトロンの最大の特徴である。また、高周波の右肩上がりの位相域で捕捉した粒子集団を安定に加速し得ると云う位相安定性が実用的な加速器を保証する。この位相安定性が線形であれ、円形であれ高周波電場を用いた現代加速器の根幹を支える原理となっている。一方、加速に伴って粒子の周回周波数が暫時増加していくが、これには加速空洞の共振周波数を変動させることによって対応し、同期加速を常に維持する。シンクロトロンの概念はほぼ時期を同じくして独立に旧ソ連のヴェクスラーによっても確立していた。両者は論文として直ぐに発表しているため、独立の発明者と看做されている^{10, 11)}。しかしながら、ラザフォードの教え子でオーストラリア産

まれの物理学者で、当時バーミング大学の教授であったオリファントが陽子シンクロトロンを1943年にイギリス政府に提案している。戦中だった故公式論文としては残念ながら発表はされなかった。

マクミランやヴェクスラーのシンクロトロンは現在弱集束シンクロトロンと呼ばれるもので、垂直方向の軌道安定性を維持するため偏向磁石のギャップ間隔を外側に向けて僅かに広げた物であった。粒子運動はベータトロンのそれと本質的に同じである。このため、シンクロトロン内での粒子の進行軸に垂直な面内の運動をベータトロン運動と呼ぶ。1946年にパークレーで最初のシンクロトロンが実証された後直ぐに、パークレーとブルックヘブン研究所から申請された大型の実用的弱集束シンクロトロン6GeVベバトロン、3GeVコスモトロンがアメリカ原子力委員会によって直ぐに承認され、建設が開始された。(第二次世界大戦終了後からベトナム戦争まで米国の物理学界は黄金時代であったと言って良いだろう、戦時研究に参加後大学に復帰した物理学者からの要求に対する米国政府の大判振る舞いには驚く。もう2度と来る事のない夢の様な時代であったろう。しかし、1994年Super-Conducting Super Collider(SSC)の予算が米国上院で否決され、計画は完全に消滅した。大御所の多くが鬼籍に入り、嘗ての神通力は色褪せたと云う事だろう。これが米国がエネルギーフロンティア物理のリーダー役をヨーロッパに譲るターニングポイントとなった。)

この二つのシンクロトロンは1954年に完成したが、その建設中にブルックヘブン研究所のクーラン、スナイダー、リビングストンによって強収束シンクロトロンが發明された(1952年)¹²⁾。磁極に大きな正負の傾きを付けた偏向磁石を並べて水平方向、垂直方向に軌道安定性を維持し、とても強い収束力によって加速ビームの断面形状を絞り得るこのアイデアは高エネルギー物理実験からの要請である高エネルギー加速器の実現には決定的役割を担うことになる。即ち、小さいビーム断面サイズは小さな電磁石の利用で済むことを意味し、加速器のコストダウンに直結した。この強収束の發明自身は1950年にギリシャ生まれのエレベーター技師クリストフィロスによって特許が取得されていた¹³⁾。クーラン等はその特許の存在に気付かず論文を発表している。結局、クリストフィロスもブルックヘブン研究所の招聘に応じ、そのスタッフになるが、余り居心地が良くなかったと見え、数年後には創設されたばかりのローレンスリバモア研究所へ移り、後述する線形誘導加速器を使った核融合研究へと転身する。

強収束原理を論じたフィジカルレビューの論文が発表された一か月後に、東北大の北垣敏男によって、磁極間ギャップに勾配を持った偏向磁石を単純な2極電磁石と4極磁石に分離してシンクロトロンのビームガイドシス



図3 円形加速器の進化

テムを組む機能分離型の提案がなされた¹⁴⁾。その単純性と機能性の拡大は「目から鱗」の感で迎えられた。以降に建設された大型のシンクロトロンは全てこの方式を採用するに到った。特に、衝突型加速器、シンクロトロン放射光リングなど複雑な磁石ラッセ構造を取らねばならない加速器には不可欠な方式である。

現代のシンクロトロンの骨格は1953年までにほぼ揃ったと言える。もちろん、超伝導技術、高速コンピューター、新たな磁性体の發明、集積回路技術、高速デジタル回路技術、超高真空技術などの基盤技術の進化が、コンパクトで多機能、高性能の現代加速器へ繋がっているのは言うまでもない。尚、發明者のマクミランにはシンクロトロンの發明ではなくサイクロトロンによる超ウラン元素ネプチウムの発見で1951年にシーボルクと一緒にノーベル化学賞が授与されている。

2. 線形ハドロン加速器

数百メガヘルツ域の高周波増幅器とこの電波を励起する空洞の存在が不可欠であるが、戦後直ぐパークレーの正教授に迎えられたアルバレッツのアイデアで巨大な共振空洞内に、イオンが通過する穴を開けた金属電極を直線に配置した加速装置をパノフスキー等と共に建設し、32MeV陽子ビーム加速実験に成功した(1947)¹⁵⁾。高周波の一周期時間幅内の航続距離の変化に対応させてドリフトチューブの長さが徐々に長くなるのが特徴である。このタイプのイオン線形加速器をアルバレッツ線形加速器と呼び、ほぼ同構造の加速器が世界の加速器施設で建設された。単独のハドロン加速器としても、下流に位置する大型のシンクロトロンの入射器として多数稼働している。

アルバレッツは天才であった。彼のキャリアの中で加速器の業績はほんの一部に過ぎない。液体水素泡箱を用いた素粒子の共鳴状態の研究で1968年にノーベル賞を獲得している。また、1980年代に息子と共に提唱した「隕石衝突による恐竜絶滅シナリオ」でも有名である。最

近マスコミの科学欄を賑わす宇宙由来のミュー中間子を用いた地層表面、ピラミッド、原子炉等の構造体の内部診断手法の先鞭を取ったのも彼である。半世紀前のことであった。

3. 線形レプトン加速器

レプトン線形化加速器の実用化にはマイクロ波源と位相速度を制御した加速管の実現が不可欠であった。大電力マイクロ波源の開発には戦争の役割が決定的であったと言えるであろう。1921年のハルによるマグネトロンの発明後、その短波長化と出力性能アップは日本の岡部金治郎の陽極分割型マグネトロンの発明(1928年)で一気に進んだ。英国ではナチスドイツの爆撃機の本土襲来に対する防衛手段としてイギリスの東海岸にレーダー網の建設が1930年代から始まった¹⁶⁾。これに関係して、電波源、アンテナ、立体回路の研究が国家プロジェクトとして早くから進められた。八木アンテナの特許が早々と英国の手に渡ったのも、この様な事情と無縁では無かったであろう。少し時期を遅らせたが、米国でもMITに放射研究所を創設し、電気工学者に加え、ラビ、アルバレット、マクミラン、スレーター、シュウインガー等の国内の有力物理学者に参加を求めて研究が開始された。英国と連携し、航空機、艦船全てに最新鋭のレーダーシステムを搭載すべく、これも国策としてのプロジェクトが推進された。米でのレーダー開発経費、レーダー施設建設費、航空機・艦船への搭載コストは現在の貨幣で15兆円に昇ると試算されている。これはマンハッタン計画の20兆円にも相当する。

その様な状況の中、後に電子線形加速器の標準的電波源となるクライストロン(速度変調管)の理論が1935年にヘイル夫婦から提唱され、2年後には現 Varian Medical Systems の創設者であるスタンフォード大のバリアン兄弟によってこの理論に気付くことなく実証された¹⁷⁾。直ぐに長波長レーダーの電波源として使用されている。そして戦中よりクライストロンの電波を共振器に導き、電子加速のアイデアが検討されていた。戦後、スタンフォード大に戻ったハンセンによって、クライストロンをベースにした1GeVクラスの電子線形加速器の建設が開始されたが、ハンセン自身は完成を見ずに亡くなった。スタンフォード大のハンセン実験物理研究所は彼に因む。これらを背景としてスタンフォード線形加速器センターが創設され、電子線形加速器と高エネルギー電子を用いた高エネルギー実験物理の世界の中心となっていった。

IV. 加速器の進化(現代)

図2に示す非共鳴型加速器は先ず、1928年のヴィデレ一の博士論文で提案され、1940年に米国イリノイ大学にいたカーストにより電子加速用ベータートロンとして実

用化された¹⁸⁾。シンクロトロン輻射による限界のため100MeVの旧ソ連のベータートロンが最大のものであった。戦中、戦後は20MeV程度までのX線発生用の加速器として市販もされた。

1950年代に入ってローレンスリバモア研究所へ移籍したクリストフィロスと前述のヴェクスラーにより電子線形誘導加速器(線形ベータートロン)が提案された。円形ベータートロンでは誘導電場の発生のため時間と共に変化させる磁束密度は電子を円形軌道に閉じ込めるためにも利用されたが、線形誘導加速器ではベータートロンの加速原理のみ独立させた加速装置を用いる。それは完全な1対1のパルストランスであり、トランス一次側にパルス電圧を印加すると同じ電圧が加速電圧として出力し、加速粒子に印加される。負荷である加速セルを低インピーダンス化する事により大電流の電子ビームの加速器としての特徴を持つ。1964年に4MeVアストロンが1983年に50MeV、10kA ATAがローレンスリバモア研究所に完成した¹⁹⁾。特殊な用途のために開発されたので、普及に到ったとは言えない。

一方、2000年に高周波空洞の代わりに1対1のパルストランスをシンクロトロンに導入した誘導加速シンクロトロンが高エネルギー加速器研究機構(KEK)で提案され、1MHzの繰り返し能力を持つパワー半導体をスイッチング素子に用いた出力3kVのスイッチング電源が開発された。この電源で駆動する誘導加速セルに発生する2種類の誘導電圧が誘導加速と、進行方向の閉じ込めに用いられた、閉じ込めと加速を分離した誘導加速シンクロトロン完全実証が2006年にKEK12GeV陽子シンクロトロンを用いてなされた²⁰⁾。この結果、高周波のバンド幅の制約からシンクロトロンは開放された。周回する粒子集団の位置情報を捉え、スイッチング電源のゲート信号を生成するので、どの様な速度でリングを周回しようとも適切なタイミングで加速電圧が発生し得る。従って、量子ビーム2,3,4世代を問わず任意のイオンを可能な電価数で低速から一台の円形リングで加速することが可能になった。

前述した様に、動作原理が単純であればあるほど汎用性を持つ。その意味では共鳴型の加速器より非共鳴型の進化が先に進むのが歴史的必然であった筈だが、実際は共鳴型の加速器の進化が先行した。二つの世界大戦が与えた技術イノベーションへの影響はすさまじかったと言えるだろう。非共鳴型の円形誘導加速器の実現は1990年代に入って実用化したMOSFETパワー半導体の登場とロス小さな加速セル用の磁性体の発明なくしてあり得なかった事を付け加えてこの章を終る。

読者の便宜のためこの章の全体像を図3に示す。円形加速器の進化は孤立した直線的パスでの進化では決してないことが理解できるだろう。

V. ビッグサイエンスと加速器展望

古典物理に依拠する加速手法は出尽くした様に思える。今後複合システムとしての加速器システムを支える要素技術の発展は、既存加速器の効率化、ある程度のコンパクト化に繋がるであろうが、劇的な進化はないだろう。それでも非共鳴型の円形加速器は進化の端緒に付いたばかりであり、進化の幅は他の静電加速器や共鳴型加速器と比較すると期待できるかもしれない。特に、静電加速以外に加速手法のなかった第4世代量子ビームへの非共鳴型円形加速器の適用は大きな期待が持たれる。誘導加速マイクロトンなどが想定される²¹⁾。

現在、日本を中心に世界の高エネルギー加速器社会が熱心に推進しようとする巨大加速器計画「International Linear Collider」がある²²⁾。確実に実現が見込めるにも拘らず30年のR&D期間を費やしてもまだ具体的建設の目途が立っていない。一カ国でその建設経費を負担できる国は無いだろうと想定されており、国際協力での実現は不可避と思われる。その根拠になる資料として、戦中から戦後、現代に到るまでの世界のビッグサイエンス、国家プロジェクト、エネルギー事業、宇宙開発、自然災害の復旧等に要した経費を年表に記す。地球に暮らし、それぞれの国家を営む我々が基礎科学、エネルギー科学をどの程度までサポートできるのかが見えてくる。

1990年代にKEKに合流した東京大学原子核研究所の1.3GeV電子シンクロトロンを加えて、KEKがこれまで建設した加速器の建設コストをグラフ上に記載した。KEKと原研の共同事業であるJ-PARCを除き、全額が旧文部省、現文部科学省が裁量する基礎科学予算から支出されたと考えて良い。ほぼ一定の飽和に達する曲線に乗るように見える。これからの外挿では単一のビッグサイエンスとして許されるコストは最大2,000億円程度かと思積られる。

次に世界の基礎科学巨大プロジェクトを見てみよう。ヨーロッパ原子核研究所(CERN)のLarge Hadron Collider(LHC)プロジェクトが最大であり、3,000億円であった。このコストは正式なCERN加盟国に加え、非加盟国ながらLHCでの実験に参加した米国、日本によっても分担された。前述したILCのコストはLHCの3倍、総額1兆円が見込まれている。

将来のエネルギー源に関わる最大の国際プロジェクト(国際熱核融合炉)の費用は既に1兆円を超えていると言われている。米国のレーザー慣性核融合計画(国立点火施設)にも既に3,000億円が投資されている。これは100万kWの原子力発電所の建設コストに相当する。エネルギー開発と云う明確なミッションを持った研究には1兆円規模の研究費がこれからも期待できるのだろう。国内に既に蓄積している・これからも産み出される長半減

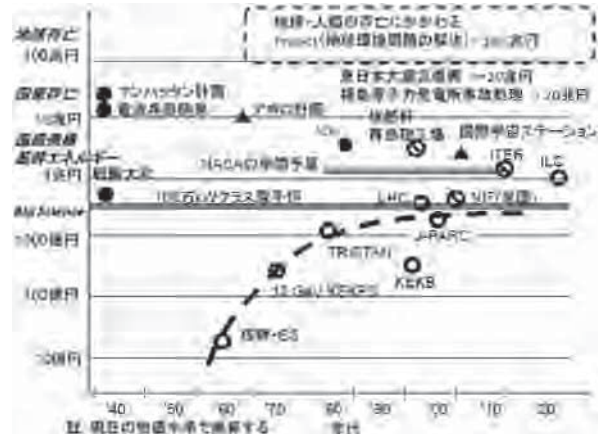


図4 ビッグサイエンスや他巨大事業のコスト比較

期を有する放射性廃棄物の加速器駆動消滅処理システムのコストも巨費が予想されるが、十分に正当化できるかもしれない。核燃料処理施設や高速増殖炉の開発に同程度以上の国費がすでに支出されているが、兎に角将来のエネルギーのためと云う大義名分の下にはタックスペイヤーも納得すると云う事だろうか。

次に宇宙開発に関するプロジェクトコストを評価するのは興味深い。人類を月に送り込んだアポロ計画は現在の貨幣価値換算で約10兆円が投じられたと言われている。国際宇宙ステーションはその建設と運用にほぼ2兆円の経費を要している。1980年代に米国の科学界を巻きこんで10年間程、賑々しく推進された戦略的防衛構想(スターウオーズ計画)は3兆円規模だったという報告がある。宇宙開発には軍事目的、戦略的な地球表面監視などの目的があってもすぐに産業に繋がるような目標課題が無いにも拘らず、この投資の意味するのは表向き「国威発揚」と言って良いだろう。

次に戦時のプロジェクトを見てみよう。戦時の国家予算の配分は特別であり、戦争経費が国家予算の70%を超える事も珍しいことではない。前述のマンハッタン計画が現在の貨幣換算で20兆円、レーダー兵器関連が15兆円と評価されている。ちなみに、帝国海軍の戦艦武蔵、大和の建造費は7,000億円程度であったと言われている。これだけの巨費の支出が可能だったのは国家の存亡に関わるプロジェクトであると言った認識があったからだろう。同様の意味合いで、東日本大震災の復興費用、福島原発事故の後処理費用がそれぞれ20兆円を超えると見積もられているが、これも致し方ない事なのだろう。

100兆円の規模を超えての支出は恐らく、地球の存亡、人類の存亡に関わる事業となるだろう。身近には地球環境の保全・対策に関わるものだ。終わりのないプロジェクトかもしれない。世紀を超え、総額が1,000兆円になっても不思議ではない。

結語

限られた紙数のため、加速器全体を網羅できたわけではないが、主たるトレンドとその必然性については記述できたと思っている。参考文献はオリジナルの論文を引用した。教科書で学んだ身にはオリジナルの論文は理解しづらいところもあるが、先駆者の息遣いを感じることが出来るので一読をお薦めしたい。19世紀から21世紀に亘る加速器の歴史的進化を概観すると、提案から10年以内に実用化ができない物はやはり日の目を見る事はないように思える。最終章のコスト評価については多くの資料を参照した。全てを挙げるのは煩雑であるので、割愛する。Wikipedia等を駆使すれば、真の情報へのアクセスは可能な筈であり、興味のある読者は試みられると良いだろう。

－ 参考資料 －

- 1) E.Rutherford, "The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom", *Philosophical Magazine* 21, 669 (1911).
- 2) H.M.Kroto, J.R.Heath, S.C.O'Brien, R.F.Curl, and R.E.Smalley, "C₆₀: Buckminsterfullerene", *Nature* 318, 162 (1985).
- 3) K.Takayama and R.J.Briggs (Edit), *Induction Accelerators* (Springer, Berlin Heidelberg, 2011)
- 4) J.J.Thomson, "Cathode Rays", *The Electrician* 39, 104 (1897).
- 5) W.Röntgen, "On A New Kind Of Rays", *Science* 3, Issue 59, 227 (1896).
- 6) R. Widerøe, "Ueber Ein Neues Prinzip Zur Herstellung Hoher Spannungen". *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik* 21, 387 (1928).
- 7) J.D.Cockcroft and E.T.S.Walton, "Experiments with High Velocity Positive Ions. II. The Disintegration of Elements by High Velocity Protons", *Proceedings of the Royal Society A*, 137, 229 (1932).
- 8) I.M.Kapchinsky and V.Tepliyakov の発明 (1969). http://uspas.fnal.gov/materials/11ODU/Proton_7.pdf

- 9) E.O.Lawrence and M.S.Livingston, "The Production of High Speed Protons Without the use of High Voltages", *Phys. Rev.* 38, 834 (1931).
- 10) E.McMillan, "The Synchrotron, A Proposed High Energy Particle Accelerator", *Phys. Rev.* 68, 143 (1945).
- 11) V.Veksler, "A New Method of Acceleration of Relativistic Particles", *J. Phys. USSR* 9, 153 (1945).
- 12) E.D.Courant, M.S.Livingston, and H.S.Snyder, "The Strong Focusing Synchrotron - A New High Energy Accelerator", *Phys. Rev.* 88, 1190 (1952).
- 13) N.Christofilos, US Patent 2736799 (1950).
- 14) T.Kitagaki, "A Focusing Method for Large Accelerators", *Phys. Rev.* 89, 1161 (1953).
- 15) L.W.Alvarez *et al.*, "Berkeley Proton Accelerator", UCRL-236, Radiation Laboratory, University of California, Berkeley (1953).
- 16) D.Zimmerman, *Britain's Shield - Radar and the Defeat of the Luftwaffe* (J.H.Haynes & Co. Ltd, Sparkford, 2001).
- 17) R. H.Varian and S. F.Varian, "A High Frequency Oscillator and Amplifier", *J. of Appl. Phys.* 10, 321 (1939).
- 18) D.Kerst, "Acceleration of Electrons by Magnetic Induction". *Phys. Rev.* 58, 841 (1940).
- 19) L.Reginato, "The Advanced Test Accelerator (ATA), a 50 MeV 10-kA Induction Linac", *IEEE Trnas. Nucl. Sci.*, 28, 3401 (1983)/
- 20) K.Takayama *et al.*, "Experimental Demonstration of the Induction Synchrotron", *Phys. Rev. Lett.* 98, 054801 (2007).
- 21) K.Takayama, T.Adachi, M.Wake, and K.Okamura, "Racetrack-shape fixed field induction accelerator for giant cluster ions", *Phys. Rev. ST-AB* 18, 050101 (2015).
- 22) <http://aaa-sentan.org/ILC/about-ilc/outline/>

著者紹介



高山 健 (たかやま・けん)

高エネルギー加速器研究機構研究員(名誉教授)
総合研究大学院大学客員教授
(専門分野/関心分野) ビーム物理, 加速器物理, 非線形力学
重イオンビーム応用, 量子ビーム慣性核融合
文明の崩壊パターン

サイエンスよみもの

放射性廃棄物処分施設の長期挙動評価に関する研究 人工バリアの性能評価試験

電力中央研究所 渡邊 保貴, 横山 信吾

放射性廃棄物処分の安全評価では、人工バリアの長期的な性能を評価することが重要になる。人工バリアは、ベントナイトやセメント系材料を用いて構築される計画であり、それらの力学的・化学的相互作用を理解する必要がある。本稿では、セメントに起因してベントナイトがアルカリ環境下に曝され、変質することを想定した透水性、膨潤性、強度変形特性を調査するための試験設備について紹介する。

KEYWORDS: *Radioactive waste disposal, Engineered barrier, Nuclide migration, Bentonite, Cement, Permeability, Swelling, Alteration*

I. はじめに

放射性廃棄物の処分は、国家として取り組まねばならない重要な課題である。低レベル放射性廃棄物の一部については、青森県六ヶ所村において日本原燃(株)により埋設事業が行われており、それ以外の廃棄物についても、放射能レベルに応じた埋設深度、施設形態が国等により検討されている¹⁾。例えば、第二種廃棄物埋設地の設計では、人工バリアを設置することにより、放射性核種の閉じ込めや移行抑制を期待している²⁾。ここで人工バリアとは、埋設された廃棄物から生活環境への放射性物質の漏出の防止及び低減を期待して設置する人工構築物²⁾であり、具体的には、ベントナイト系材料やセメント系材料が候補材となる。ベントナイトは天然に産する膨潤性粘土であり、低い透水性、変形追従性、膨潤による隙間の自己修復などが期待できる利点があり、セメント系材料と併用することにより、多重バリアを形成することができる。

安全確保のためには、人工バリアの長期的な状態を科学的な根拠をもって推測し、安全評価に反映する必要がある。半減期の長い核種も存在することから、数千年以上という工学的に未経験の時間軸での評価となる。そのため、数値シミュレーションの高度化や検証に資する実

験データが求められている。例えば、数値シミュレーションの検証に使えるデータを取得するためには、遠心加速度載荷による模型実験³⁾や大規模スケールの熱-水-力学連成実験⁴⁾が行われている。地球化学反応計算には、鉱物変遷の評価に着目した人工変質実験⁵⁾により得られるデータが重要性を持つ。数値シミュレーションの高度化に伴い、熱-水-力学-化学連成の計算⁶⁾も行われるようになっており、それに追従して化学的変質と工学的性質を結び付ける実験データの重要性が増してきている。

著者らが所属する(一財)電力中央研究所では、化学試験と力学試験を融合させた人工バリアの性能評価試験を長きにわたって開発・実施してきた。ベントナイトの基本的な透水性、膨潤性、強度変形特性の調査、これらの物性に及ぼす変質の影響を調査することを可能とする室内試験である。本稿では、放射性廃棄物処分施設の長期挙動評価に資する人工バリア性能評価試験の基本原則や特徴を紹介する。

II. ベントナイトの性質

1. ベントナイト

ベントナイトは、火山灰の続成作用により生成された弱アルカリ性粘土岩の名称である^{7, 8)}。天然の産物であるため、地域や場所によって構成鉱物や化学組成は異なる。ベントナイトの主要構成鉱物は、モンモリロナイトと呼ばれる粘土鉱物である。モンモリロナイトは、粒子の負電荷の電気的中性をとるためにNaイオンやCaイ

Research on a long-term behavior of radioactive waste disposal facilities - Experiments for engineering performances of the engineered barrier : Yasutaka Watanabe, Shingo Yokoyama.

(2016年11月30日 受理)



図1 水浸させたベントナイトの様子



図2 ベントナイトの透水試験装置

オンなどの交換性陽イオンを保持しており、Naイオンの占める割合が高いほど、膨潤性は高くなる傾向にある。図1に示すように、圧縮したベントナイト(以後、圧縮ベントナイトと記載する)を水中に浸漬しておくとも体積が数倍に増加することもある。ペットのトイレ用砂としてもベントナイトは活用されており、身近な存在でもある。

2. 膨潤性と透水性

ベントナイトの工学的価値は、吸水膨潤することで隙間を充填し、水を通りにくくさせる点にある。圧縮ベントナイトのように所定の体積を有する成型体には、間隙(気相や液相の体積)が存在し、この間隙を、水を含んだモンモリロナイトが充填することで透水性は低下する。透水係数を測定すると条件にもよるが 10^{-10} ~ 10^{-13} m/s程度である。これは、1秒間で 10^{-10} ~ 10^{-13} m、1000年で約3~0.003mの移流に相当する(動水勾配を1とした場合)。きわめて水を通りにくい材料であるため、図2に示すような透水試験装置⁹⁾を用いて、ベントナイトを定体積に保った上で、圧力条件を制御した流量測定を行い、透水係数を求めている。定体積に保った状態で吸水膨潤すると、条件にもよるが数十kPa~数MPaの膨潤圧が生じるため、精度よく膨潤圧を測定するためには、十分な剛性を有した容器構造にすることも重要になってくる。

モンモリロナイトの主な膨潤機構は、電気二重層理論に基づいて解釈されている。交換性陽イオンを有するため、結晶層間内外のイオン濃度差により浸透圧が生じ、水分子が結晶層間に取り込まれる¹⁰⁾。そのため、例えば

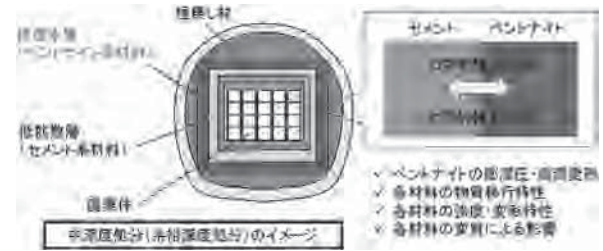


図3 ベントナイト-セメントの力学的・化学的相互作用のイメージ(文献²⁾を参考に作成)

海水のような水質では、浸透圧が小さくなるために膨潤性が低下し、透水係数は大きくなる¹¹⁾。こうした現象を視覚的に捉えるには、ベントナイトで作った壁に純水と塩水を染み込ませる簡単な実験を行い、浸透速度の違いを実際に観察することができる。そして、ベントナイトを高密度に締固めることで透水性を下げる工学的対策についても、併せて理解できる。

III. 人工バリア性能評価試験

1. 長期挙動の解明への取り組み

放射性廃棄物処分では、設置したベントナイト系材料が地下水により飽和し、地下水、崩壊熱や地熱、地圧や部材自重などによる応力、様々な化学環境といった複雑な場が形成され、その中で化学反応の進行が長期間続くことが想定される。ここで、化学反応とは、例えば地下水のイオン組成やpHなどに応じたベントナイト構成鉱物のイオン交換、溶解、沈殿などを指す。電力中央研究所では、上述した背景から、図3に示すような力学的・化学的相互作用に着目し、複数の試験を開発・実施することにより、ベントナイトの周辺部材も含めた熱-水-力学-化学連成現象の理解を目指している。

2. 周辺部材で拘束されたベントナイトの膨潤特性

ベントナイトが吸水膨潤することにより、それと接する周辺部材には圧力が作用する。こうしたベントナイトの膨潤圧は、ベントナイトを含めた処分施設の応力状態を考える上では重要な点である。ベントナイトの膨潤圧は室内試験により測定されることが多い。現在は、特に定められた試験規格はないが、剛性の容器に圧縮ベントナイトを収容して吸水させ、膨潤により生じる圧力を荷重計で測定することが多い。

既往の報告¹²⁾では、膨潤圧の測定方法の検討として、文献調査を通じて容器の形状、装置の構造、供試体の寸法などを整理し、これらが測定値に及ぼす影響を検討している。この報告¹²⁾を受けて、著者らは、現場で想定される膨潤圧を評価する上で、膨潤変形(体積変化)を抑えるための力(反力)の設定が重要と考え、セメント系材料や岩盤といった剛性の異なる材料と接触したベントナイトの膨潤圧を評価することを目的とした試験装置「微小

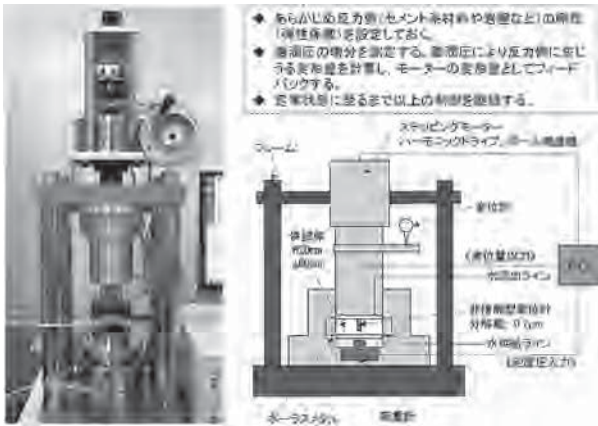


図4 ベントナイトの微小変位制御型膨潤試験装置

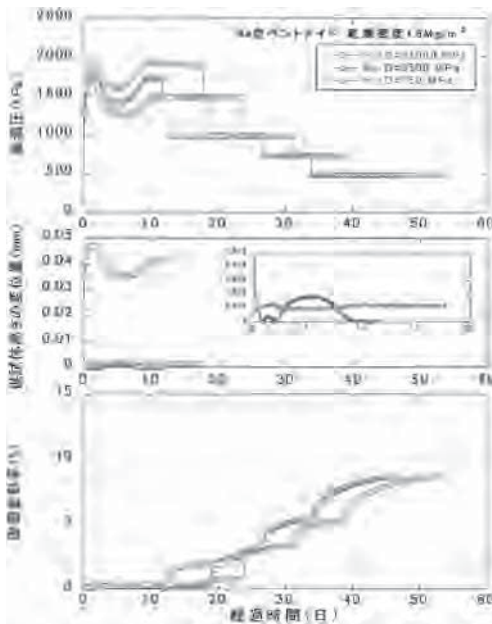


図5 ベントナイトの膨潤試験データの一例¹³⁾

変位制御型膨潤試験装置」を開発した(図4)。

図4に示す試験装置では、ベントナイトと接触する材料の変形を機械的に模擬することができる。あらかじめ反力側となるセメント系材料や岩盤等の剛性を弾性係数として設定し、吸水膨潤の過程で生じる膨潤圧の増分から変形量を計算する。計算された変形量を供試体に与えるためにモーターによる機械制御を行う。 10^{-7} mオーダーの微小変形となるため、非接触型変位計を供試体内部に設置し、高い精度の計測と可能としている。こうした制御を膨潤圧が定常状態になるまで1秒間隔で繰り返す。

微小変位制御による膨潤試験を行うことにより、図5に示すようなデータ¹³⁾を得ることができる。図中の凡例にある H_0/D は弾性係数に相当するパラメータである。反力側となる材料の弾性係数が小さくなるほど、平衡膨潤圧が低くなる傾向が認められる。供試体を拘束する圧力(鉛直圧)を低下させることで膨潤変形が生じるため、膨潤圧の測定と共に膨潤変形量も測定することができ

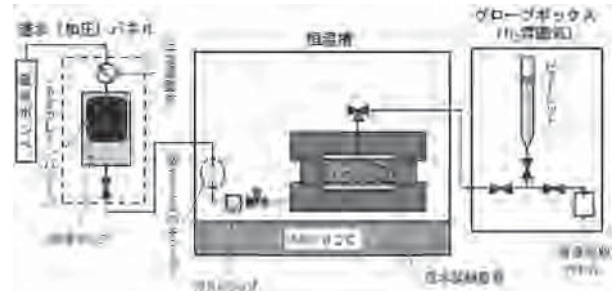


図6 長期透水試験装置の概要¹⁴⁾

る。

岩石等の実際の材料を使った試験も検討しているが、材料定数やそのバラツキを把握した上で実施しなければならず、難しさもある。様々な剛性の材料との接触を模擬し、パラメトリックな検討を進める上では、図4の装置は非常に便利である。イオン強度やpHの高い溶液にも対応した構造であるため、化学的側面からも検討できる。

3. アルカリ環境におけるベントナイトの変質と透水特性

ベントナイトとセメント系材料が隣接して施工されると、セメントのカルシウム成分が溶け出すことによりアルカリ性の地下水にベントナイトが長期間曝されることが予想される。こうした背景から、電力中央研究所では、アルカリ性の溶液を用いた長期透水試験を行い、数年間で観察される変質現象と、透水係数の変化を調べている。それらの検討では、図2に示した透水試験の仕組みを基本として、図6に示すように恒温槽を用いた温度制御、空気との反応を避けるための窒素ガス供給やグローブボックス内での採水作業を行うことで一定の化学環境のもとでの長期の透水試験を可能としている。条件によって鉱物溶解が顕著となる場合と、二次生成物の沈殿が顕著になる場合があり、それぞれ透水係数の増大・減少につながるようになってきている(図7)。ベントナイトの変質は緩慢な現象ではあるが核種移行と密接な関係のある現象であるため、セメント側の状態と併せて埋設環境を想定した長期データを現在でも取得し続けている。

4. 変質したベントナイトの力学特性

ベントナイトに変質が生じると、先述したように透水性が変化することがある。透水性の変化は溶解や沈殿などによる間隙構造の変化に起因すると考えられるため、その他の工学的性質についても何かしらの影響を受けていることは容易に想像できる。そこで、著者らは、力学的な支持性、あるいは、ベントナイトの変形追従性に及ぼす変質の影響を解明するため、ベントナイトが変質する化学環境にも対応した三軸圧縮試験装置を開発し、セ

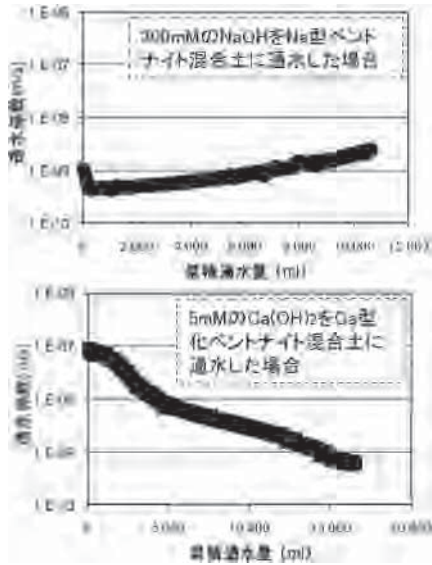


図7 長期透水試験データの一例¹⁴⁾

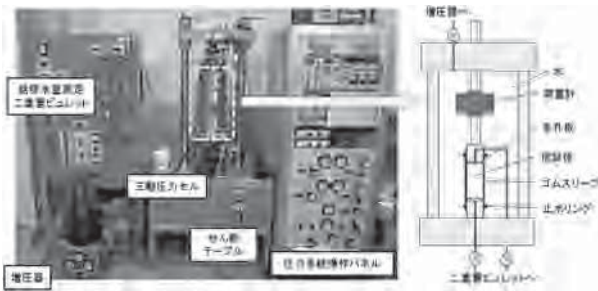


図8 耐アルカリ・高圧三軸圧縮試験装置

せん断特性を調べている。

三軸圧縮試験は、土質力学の分野で古くから行われている。地盤内の応力状態を模すように試料に拘束圧(側圧)を作用させた状態で軸圧縮し、応力-ひずみ関係を得るものである。図8に示す装置がアルカリ性の溶液に対応し、高い拘束圧を作用させることができる三軸圧縮試験装置である。ベントナイトを使用する上での難しさの一つは、その膨潤である。剛性の容器ではなく、透水性のきわめて低いゴムスリーブを使って供試体を覆うため、膨潤圧以上の拘束圧を作用させる必要がある。本装置では、最大10MPaの拘束圧を作用させることが可能である。

この試験では、図9に示すような応力-ひずみ関係を得ることができる¹⁵⁾。NaOH溶液により変質したベントナイトは、鉱物の溶解が要因と考えられる乾燥密度の低下が生じており、せん断強度は低下していた。一方、Ca(OH)₂溶液により変質したベントナイトは、未変質の状態と比べて軸差応力(せん断過程に加える軸圧力と側圧の差)が大きくなり、脆性破壊していることがわかった。前節の図7において説明した二次生成物の沈殿が顕著な条件における力学特性の変化の一つと解釈することができる。変質のパターンはいくつも考えられるが、強

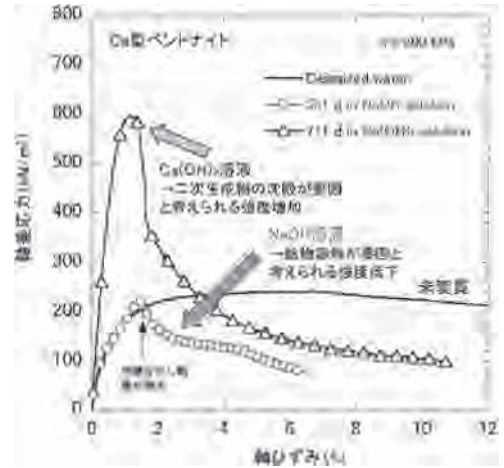


図9 三軸圧縮試験データの一例(文献¹⁵⁾をもとに作成)

度低下だけではなく、沈殿により粘土が硬い材料に変わる等、変質により材料特性に利点が見出される可能性もある。

土質力学の分野では、例えば飽和粘土地盤に荷重した時の変形問題では、将来的な地盤の圧密沈下量を理論的に推定し、設計に反映することが行われてきた。それと同様に、放射性廃棄物処分においても、将来の状態を推定し、施設の設計を行うことが求められる。しかしながら、人工バリアの長期挙動のように、時間の経過と共に場の変化に加えて材料そのものも変化する点では工学的な扱いが難しいと思われる。変質に関しては、溶解や沈殿を速度論で評価することが重要になると考えられ、電力中央研究所では、鉱物の溶解速度の測定・評価も行っており^{16, 17)}、今後は沈殿に焦点を当てた検討も行っていく必要があると考えている¹⁴⁾。

IV. まとめ

放射性廃棄物処分では、ベントナイト系材料を含めた人工バリアの長期挙動を評価し、科学的な知見を安全評価に反映させることが求められている。特に、化学的変質を伴う力学的挙動の評価は、あまり着手されていない課題でもあった。電力中央研究所では、熱-水-力学-化学連成を強く意識した人工バリア性能評価試験を開発しており、基礎的な現象理解から工学的なアウトプットまでを意識した取り組みを進めている。室内試験で知りえることには限りがあるが、室内での長期試験データを理解し、数値解析での再現力を高めることは重要なタスクの一つであるため、こうした研究アプローチを通じて処分事業に寄与していきたい。

同時に、放射性廃棄物処分は、長く向き合わなければならない事業である。そのため、本事業に若手の世代が主体的に取り組み、先輩から受け継いだ技術と思想を発展させ、次世代につなぐ橋渡し役にもならなければならないと考えている。自らが所属する組織や専門の枠におさまらず、国内外の研究者・技術者と協同して事業を進

めていきたい。

－ 参考資料 －

- 1) 電気事業連合会ホームページ, <http://www.fepec.or.jp/nuclear/haikibutsu/index.html>, (2016年11月30日閲覧).
- 2) 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, 土木学会, (2008).
- 2) 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会, 余裕深度処分における地下施設の設計, 品質管理および検査の考え方, 土木学会, (2009).
- 3) 西本壮志, 他, 原子力バックエンド研究, Vol.21, No.1, 7-8, (2014).
- 4) 操上広志, 他, 土木学会論文集, No.757, III-66,127-137, (2004).
- 5) 久保博, 他, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.46, No.10, 31-34, (1998).
- 6) 鈴木英明, 他, 原子力バックエンド研究, Vol.19, No.2, 39-50, (2012).
- 7) 日本粘土学会, 粘土ハンドブック(第三版), 技報堂出版, (2009).
- 8) 白水晴雄, 粘土鉱物学, 朝倉書店(2010).
- 9) 渡邊保貴, 他, 電力中央研究所報告, N13005, (2013).
- 10) R. Y. Yong, M. Nakano, R. Pusch, Environmental soil

properties and behaviour, CRC Press, (2012).

- 11) 長谷川琢磨, 電力中央研究所報告, N04005, (2004).
- 12) 棚井憲治, 他, JAEA-Research, 2010-025, (2010).
- 13) 渡邊保貴, 田中幸久, 第71回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, DVD-ROM, (2016).
- 14) 横山信吾, 他, 電力中央研究所報告, N20, (2013).
- 15) Y. Watanabe, S. Yokoyama, Proc. of Geo-Chicago 2016, ASTM, 448-457 (2016).
- 16) 横山信吾, 他, 電力中央研究所報告, N07006, (2007).
- 17) 渡邊保貴, 横山信吾, 電力中央研究所報告, N15008, (2016).

著者紹介

渡邊 保貴 (わたなべ・やすたか)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野)地盤工学, 廃棄物処分・リサイクル, 土の変形

横山 信吾 (よこやま・しんご)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野)粘土鉱物学, 地球科学, 粘土の変質

新刊紹介 マレー 原子力学入門

R. L. Murray and K. E. Holbert 著, 矢野豊彦 監訳,
関本博, 加藤仁 訳, 430p. (2015.11),
講談社(定価 13,000 円)
ISBN978-4-06-156543-2

本書は, アメリカの代表的な原子力の教科書である「Nuclear Energy ; An Introduction to the Concepts, Systems and Applications of Nuclear Processes」の改訂第7版の翻訳書である。まず初めに述べておきたいことは, 本書は翻訳書でありながら, 翻訳文が非常に良くこなれており, 極めて読みやすいことである。これは, 監訳を担当された3名の先生方のご尽力によるものと思われるので, まずは, 敬意を表させていただきます。

本書は, 原子核と放射線の基礎, 放射線の発生・生物影響・防護・検出器・同位体・利用, 原子炉理論・原子力プラント・安全性・放射性廃棄物の処理処分・原子力発電の将来・核兵器など, 原子力の基礎から将来までがバランスよく全27章で記述されており, 大学学部レベルの予備知識で, それぞれの事項を学ぶことができるようになっている。従って, 大学での教科書として最適であるし, 原子力に携わる技術者が自ら勉強したり, 知識を整理したりするためにも適している。

特に, 第7版では, 内容をより深く理解するために, 例題

の他に, 章末に演習問題やコンピュータ演習が付け加えられている。また, さらに深く学ぶための参考書等が示されており, 本書により, 原子力工学の概要について理解した後, さらに進んだ勉強を行うための配慮もなされている。その上, その記述内容にも最新の知見が取り入れられており, スリーマイル島原発事故やチェルノブイリ原発事故, さらに, 福島第一原発事故に至るまで, 詳しい説明がなされている。また, 類書にはあまり見られない, 原子力の研究開発の歴史, 安全に関する考え方, 核セキュリティ, 原子力発電の現状, 原子力の将来についてもたくさんのページが割かれており, 現在だけでなく, 今後の原子力の在り方を考える上で重要な知識が得られるように工夫されている。

なお, 放射線関連の単位が Ci, rad, rem で記述されることがやや気になるが, 後二者については Gy と Sv も併記されているので, それほどの混乱はない。むしろ, 年配の読者にとっては, Gy や Sv に慣れる良い機会になるかもしれない。

(東京大学・寺井隆幸)



サイエンスよみもの

流れ加速型腐食に対する研究の現状

電力中央研究所 米田 公俊, 藤原 和俊
原子力安全システム研究所 歌野原 陽一

原子力や火力の発電プラントにおいては、水が流れる系統配管の肉厚が、時間の経過と共に徐々に減少する配管減肉現象が見られる。いくつかある減肉現象の中でも特に、流れ加速型腐食(Flow-Accelerated Corrosion: FAC)は、過去に国内外で人災を伴う大規模な配管破損事故を発生させており、プラントの運転保守において重要な管理項目の一つとなっている。本稿では、過去の経緯を踏まえてFACに対する研究の現状について紹介する。

KEYWORDS: *power plants, pipe wall thinning, flow-accelerated corrosion (FAC), oxide film, dissolution, mass transfer, hydraulics, water chemistry, chromium content, predictive code*

I. はじめに

1. プラントにおける配管減肉事象

原子力や火力の発電プラントにおいては、系統配管の肉厚が時間の経過と共に徐々に減少する配管減肉現象が見られる。減肉現象により、配管は局所的あるいは全面的に肉厚が薄くなり、過度に進展した場合は、配管破損による内部流体の漏洩につながる可能性がある。過去に国内外で発生した人災を伴った主な配管減肉事象としては、1986年のSurry発電所2号機(アメリカ, PWR)、1995年のPleasant Prairie発電所(アメリカ, 火力)、2004年の美浜発電所3号機(日本, PWR)、2007年のIatan発電所(アメリカ, 火力)がある。各事象について、発生当時の関連文書では所謂「エロージョン/コロージョン」が原因とされるものが多いが、最近の知見に依れば、いずれも流れ加速型腐食(Flow-Accelerated Corrosion: FAC)と呼ばれる現象が原因であったと言える。FACの定義とメカニズムについては後述する。

人災を伴わない事象も含め、世界各国の発電プラントでは1970年代より数多くの配管減肉事象を経験しており、これらを通じてプラント内で配管減肉が発生し得る条件について知見が蓄積されてきた。原子力プラントの場合は、主として復水・給水等の水単相流系統や、タービン抽気、ヒータドレン・ベント等の水・蒸気二相流系統の、エルボやT管、オリフィスや弁の下流管等の配管

部位において、配管減肉が発生している。

2. プラントにおける配管減肉管理

1986年のSurry発電所の減肉事象を機に、配管減肉は潜在的に人身安全に関わる事象であると認識されるようになった。アメリカでは原子力規制委員会(NRC)が中心となり、発電プラントにおける配管肉厚の管理体制が強化され、産業界によるガイドライン、学協会による規格等に基づく減肉監視プログラムが発電事業者において実行されるに至った。また他国でも配管減肉管理に関する規格等の整備が進んだ。

日本においても、Surry発電所の事象を受けて、PWRを有する電力では、1990年に「原子力設備2次系配管肉厚の管理指針(PWR)」を策定し、以後この指針に従って配管肉厚を管理してきた。一方BWRを有する電力では、各社独自の点検要領を定め、配管肉厚検査を定期的に変更してきた。その後、2004年の美浜発電所の減肉事象を受けて、日本機械学会(JSME)において、配管減肉管理に関する規格類¹⁻³⁾が2006年までに発行され、規制当局の是認を経て、現在の原子力・火力発電プラントにおける配管減肉管理に適用されている。

JSMEでは同規格類の初版発行以後、発電用設備規格委員会において継続的に改訂作業を進めており、2016年12月の段階では2016年版の公衆審査が完了している。また関連する技術的知見の調査を通じて、改訂作業を支援する研究分科会も並行して活動している。本稿では、2013年度当時の「配管減肉管理法の改良・実用化に向けた調査研究分科会」(主査:稲田文夫)にて、現行規格¹⁾の

Present Status of Researches on Flow-Accelerated Corrosion :
Kimitoshi Yoneda, Kazutoshi Fujiwara, Yoichi Utanohara.

(2017年1月6日 受理)

参考資料「配管減肉に関する技術的知見の現状」の更新を目的に取り纏められた成果報告書⁴⁾の内容に基づき、FACに対する研究の現状について紹介する。

II. FAC に対する研究

1. FAC のメカニズム

配管減肉の要因としては、配管の腐食(Corrosion)による化学的作用が支配的なものと、配管内を飛散する液滴の衝突やキャビテーション等の浸食・壊食(Erosion)による機械的作用が支配的なものとに大別できる。しかし少なくとも1990年代までは、前者に該当するものであっても、前章の減肉事象のように「エロージョン/コロージョン」と称され、曖昧な用語となっていた。この状況の中で、米国電力研究所(EPRI)は、「炭素鋼や低合金鋼等の表面の保護皮膜が、水あるいは水・蒸気の混合流体の中へ溶出することによって、腐食が促進される現象」としてFACを定義した⁵⁾。これにより、エロージョンが支配的な現象に対する用語との明確な区分が可能となった。

FACの根本的なメカニズムは水中での電気化学的な腐食であり、配管壁面における鉄の酸化反応により、鉄イオンの溶出およびマグネタイト(Fe_3O_4)の酸化皮膜生成を伴う。一般的な腐食であれば、配管材料の母材に対する酸化皮膜の保護性により、腐食速度は時間と共に徐々に減少する傾向を示す。一方FACの場合は、水の流れにより酸化皮膜の溶出が促進され母材に対する保護性が小さくなるため、母材からの溶出、酸化皮膜の形成・溶出がバランスする状態に早期に到達し、腐食速度が時間に対して概ね一定になるとされる(図1)。

次節ではFACのメカニズムにおける主要な影響パラメータとして、酸化皮膜の溶出促進、即ち皮膜表面から鉄イオンの輸送に寄与する流体力学因子と、母材および酸化皮膜の溶出自体に寄与する水化学・材料因子に対する技術的な知見を整理する。

2. FAC の影響パラメータ

(1) 流体力学因子

FACの本質的な流体力学因子は、次式で定義される配管壁面近傍の物質移動係数 k であるとされている。

$$J = k(C_s - C_b) \quad (1)$$

ここで J は物質移動流束、 C_s は酸化皮膜・溶液界面での

溶液中の鉄濃度、 C_b は主流溶液中の鉄濃度である。 J が減肉速度に直接結びつく物理量であり、主流と界面の濃度差に比例すると定義される。流れ場の影響は全て k に内包されるため、上式に従えば、 k が最終的に減肉速度に影響を与える流体力学因子となる。流速や乱流エネルギー等の流体力学因子は、物質移動係数を介して間接的にFACに影響を及ぼすというのが、現在の有力な立場である。

単純な円管乱流の場合であれば、運動量と熱移動、物質移動のアナログに基づき、壁面摩擦係数と各現象に関する無次元数との関係式が整理できる。例えば壁面摩擦係数が、流れ場を表現するレイノルズ数 Re のべき乗則から成る関数であった場合は、物質移動に関する無次元数シャーウッド数 Sh および物質移動係数 k は、物質拡散に関する無次元数シュミット数 Sc を含めて、以下のように整理できる。

$$Sh = kd/D = a_1 Re^{a_2} Sc^{a_3} \quad (2)$$

$$k = a_1 Re^{a_2} Sc^{a_3} D/d \quad (3)$$

ここで d は管内径、 D は拡散係数である。また定数 a_1 、 a_2 、 a_3 は、既存知見の中で様々な値が提示されており、一例としてBergerらは、滑らかな直円管内の乱流条件において、各定数として0.0165、0.86、0.33を与えている。(2)式は、レイノルズ数の代表速度・代表長さに円管断面平均流速・管内径が用いられており、平均的な流れ場と物質移動の関係を示す評価になっている。しかし上述の通り、実際に配管内で顕著なFACによる減肉が発生する部位は、単純な直円管内の乱流条件ではなく、配管の曲がりや絞り等の配管形状に起因する流れの乱れあるいは偏流が強い条件である。そしてこれらの部位における減肉傾向には空間的な分布があり、保守的な減肉管理の観点からは、減肉傾向が顕著となる領域を局所的に評価する必要がある。即ち、この減肉傾向の分布に対応する局所的な流れ場と物質移動係数の分布の評価が重要である。

FACによる減肉が顕著となる配管部位に対して、物質移動係数を用いて局所的な減肉速度を評価することは煩雑であるため、従来知見の中では、各種配管部位における流体の影響を、直円管内条件との相対的な比として表した「形状係数」を用いた評価が提案されてきた。代表的なものとしてKellerの形状係数がある。表1にその評価例を示す。このような形状係数を、直円管内条件に対する減肉速度に乗ずることで、各種配管部位に対する減肉速

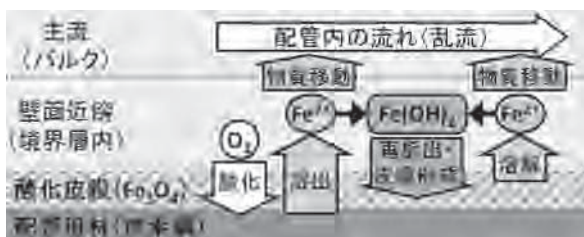


図1 FACの現象メカニズムの概略図

表1 Kellerの形状係数による評価例

配管部位	減肉傾向相対値(直管=1.0)
エルボ・曲げ管	5.75~13.0
オリフィス	4.0
分岐/合流	35.0~18.75/3.75

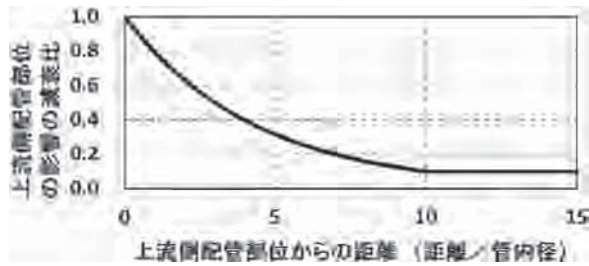


図2 Kastnerによる上流側配管部位の影響の減衰比

度を簡便に評価することができるため、後述するFAC予測コードの多くで、この考え方が採用されている。

形状係数は、各種配管部位が配管内において上流側からの乱流や偏流の影響を受けずに、単体で存在する場合を想定した評価である。しかし実際の配管ではエルボや弁等の部位が連続的に接続している場合が多く、FACによる減肉傾向の評価において、上流側からの流れの影響を考慮する必要がある。このように、配管部位を組み合わせた場合のFACに対する影響評価の例として、Kastnerらは、上流側および下流側の配管部位AおよびBを想定した場合、下流側BにおけるFACによる減肉傾向に対する上流側Aの影響は、両部位A-B間の距離に応じて指数関数的に減衰する取扱を提案している(図2)。

近年の研究では、実験技術や数値計算技術の向上により、従来は比較的煩雑であった、局所的な流れ場及び物質移動係数の計測や評価が行われている。研究対象とする配管部位としてはオリフィスを扱っているものが多く、粒子画像流速測定法(PIV)による局所的な流体構造の可視化計測、電気化学的な手法による物質移動係数計測、数値流体力学(CFD)を利用した物質移動係数の評価等が行われている。この中で特にCFDを利用した評価に関しては、CFDの計算結果として得られる、配管内壁面近傍における変動速度成分や壁面せん断応力のRMS値等、流れ場の非定常性を考慮した物質移動係数分布の評価手法がいくつか提案されており、FACによる減肉速度の実験値と定性的に良い一致を示している。

(2) 水化学・材料因子

前節にて記したように、FACの根本的なメカニズムは腐食であるため、FACに対する水化学・材料因子の影響は、一般的な腐食に対するそれと定性的には概ね一致する。鉄の腐食反応(アノード反応)により生成する二価の鉄イオンは水中で水酸化鉄(II)($\text{Fe}(\text{OH})_2$)となり、高温条件でシッコール反応により水酸化鉄(II)から生成されるマグネタイト(Fe_3O_4)の安定性が、FAC挙動に影響すると言われている。(1)式に示すように、酸化皮膜・溶液界面と主流溶液との間の鉄濃度差があると、これが駆動力となり物質移動が生じるが、これに準じた単純な現象モデルを想定すれば、水化学・材料因子の影響は、主として配管材料の溶解度を用いて説明できる。以下、主要な

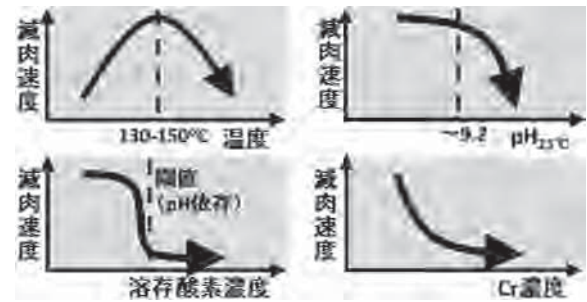


図3 水化学・材料因子の影響の概略図

パラメータの影響に関する知見の概略を記す(図3参照)。温度の影響：水单相流条件下でのFACは、中性純水条件、弱アルカリ条件(常温pH9.2程度)のどちらでも、130~150°C付近で減肉速度が最大となる傾向を示す。この温度領域で減肉速度が極大となる理由として、マグネタイトの溶解度の温度依存性との一致とする一方で、その溶解度と一般的に温度に対して単調増加を示す物質移動係数との積により極大を生じるとの説明もある。この他、溶存酸素濃度や酸化皮膜の空隙率との関係についても言及されている。なお水-蒸気二相流条件下では、極大を示す温度領域が高温側に移行し180°C近傍になるとの報告がある。

pHの影響：FACによる減肉速度はpHに対して、常温pH(以下、単にpHと記す)9.2付近からの上昇に伴い急速に減少する傾向を示す。これはマグネタイトの溶解度がpHの上昇に伴って小さくなるためであるとされている。このため、国内のPWRプラントでは、二次系の給水pHを9.2程度から10近辺まで高める運用に移行している。pH調整剤として、従来はアンモニアを用いた全揮発性物質処理(AVT)が主流であったが、水-蒸気二相流条件下で、アンモニアの大部分が蒸気相に移行するために、二相流系統の炭素鋼配管でのFACを抑制しにくい側面があった。これに対して近年pH調整剤として適用が多くなっているエタノールアミン(ETA)を用いた場合は、蒸気相への移行を抑えることで、二相流系統での高pH化の効果が高まるとの報告がある。

溶存酸素濃度の影響：FACによる減肉速度は溶存酸素濃度に対して、ある程度の濃度以上で急激に減少しほぼ抑制される傾向を示す。BWRプラントでは給水系材料の腐食を抑制する観点から、給水中に溶存酸素が添加されている(管理値20~200ppb)。近年の研究では、FAC抑制に必要な溶存酸素濃度はpHの影響を受けることが明確に示されており、中性純水条件では数十ppb程度であるのに対し、弱アルカリ条件では数ppb~数十ppb程度で、減肉速度が極めて小さくなるとの報告がある。酸素によるFACの抑制効果の説明としては、安定な鉄酸化物の形態が、マグネタイトから溶解度の小さいヘマタイト($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)に変化するためと考えられている。

材料因子の影響：FACによる減肉速度は、配管材料に含

まれる特定の元素の濃度に対して減少する傾向を示す。既存知見の中ではクロム (Cr), 銅 (Cu), モリブデン (Mo) についてその効果が確認されている。特に Cr 濃度は FAC に対して大きく影響し, Cr 濃度 0.5wt% 以上存在すれば, 減肉速度は十分に抑制されるとする報告がある。Cr の効果の理由については, 酸化皮膜の緻密性に影響し, 皮膜欠陥(空孔)でのイオンの拡散を抑制するとの説と, Cr が濃縮し皮膜の保護性を高めるとの説がある。なお Cu および Mo については, Cr に比べて FAC 抑制効果は小さく, その検証は充分とは言えない。

3. FAC のモデルおよび予測コード

FAC の現象メカニズムの中で, 腐食・溶出過程には水化学・材料因子, 物質移動過程には流体力学因子が, それぞれ主に関与しているのは, これまでに記した通りである。本節では, 欧米で先行している関連研究の中で提案されている, 現象全体に対する予測モデルと, この予測モデルを参照して実機プラント配管の余寿命予測や管理を目的とした予測コードの概要を, それぞれ記すと共に, 国内における関連動向についても紹介する。

(1) 国外予測モデル

国外予測モデルの中で, ここでは比較的簡便で多く引用されている 2 つのモデルを紹介する。

一つは Berge らのモデル⁶⁾であり, 溶解過程と物質移動過程を, それぞれ(1)式と同様の一次式と仮定し, 減肉速度 m を次式で表している。

$$m = (C_{eq} - C_b) / \left(\frac{1}{k_c} + \frac{1}{k} \right) \quad (4)$$

ここで k は物質移動係数, k_c は溶解速度定数, C_{eq} は鉄の溶解度, C_b は主流水中の可溶性鉄濃度である。この式では, 溶解過程と物質移動過程のいずれが律速過程となるかは, k および k_c の相対的な大小に依存することになる。

もう一つは Sanchez-Caldera らのモデル⁷⁾である。現象過程として, 金属・酸化皮膜界面での水酸化鉄の生成, 金属・酸化皮膜界面から酸化皮膜中の空隙を通過して酸化皮膜・流体界面への拡散, 酸化皮膜・流体界面からバルク水中への物質移動, の 3 ステップを考慮している。減肉速度 m に対するモデル式は Berge らの式と類似するが, 酸化皮膜の空隙率・厚さに関する項が含まれている。

$$m = \theta(C_{eq} - C_b) / \left[\frac{1}{k_f} + 0.5 \left(\frac{1}{k} + \frac{L}{D} \right) \right] \quad (5)$$

ここで θ は酸化皮膜空隙率, C_{eq} は鉄の溶解度, C_b は主流水中の可溶性鉄濃度, k_f は金属・酸化皮膜界面での反応速度定数, k は物質移動係数, L は酸化皮膜厚さ, D は拡散係数である。こちらのモデルでは, 上記 3 ステップに対応する式中分母の 3 項の大小関係に律速過程が依存することになる。

(2) 国外予測コード

欧米各国では, 前項で紹介した 1970 年代以後に研究が進められた予測モデルの知見に基づき予測コードの開発が進められ, 1990 年頃から実機プラントの配管減肉管理に対して本格的に適用されるようになった。減肉予測コードは, 実機プラントの配管条件を入力することで, 各配管部位に対する減肉速度の予測および余寿命の評価を実行し, 配管肉厚の検査箇所抽出や検査頻度設定の最適化等に活用することができる。現在に至っては, 原子力プラントに関して言えば, 適用レベルに差異はあるものの, 日本を除く殆どの国において予測コードが管理に導入されている。ここでは, 初期に開発された WATHEC コード, そして現在世界的に利用されている主要な 3 つのコードである BRT-CICERO, CHECWORKS, COMSY について紹介する。なおこれらの主要コードに対しては国際原子力機関 IAEA 等において, 実機プラントデータを用いた国際ベンチマークが実施されている。

WATHEC: ドイツの Framatome ANP (旧 KWU) により開発された予測コードであり, 実験および実機データに基づく Kastner らの経験式および構成式を用いて, 水単相流および水-蒸気二相流における FAC による減肉速度 ($\Delta\Phi_R$) を評価している。

$$\Delta\Phi_R = 6.25 k_c \{ Be^{No} [1 - 0.175(\text{pH} - 7)^2] \times 1.8 e^{-0.118g} + 1 \} f(t) \quad (6)$$

ここで k_c は形状係数, w は平均流速, g は溶存酸素濃度, B と N は温度および材料中の Cr+Mo 濃度の関数, $f(t)$ は時間の関数となる補正項である。この評価式は, 各影響パラメータを考慮した相関式を組合せて経験的に調整した構成となっており, 比較的簡便に評価値が得られるものの, 物理的な現象メカニズムに基づいていないため, 適用範囲外の条件では非現実的な評価となる場合がある。

BRT-CICERO: フランス電力公社 (EDF) により開発された予測コードであり, (5) 式の Sanchez-Caldera の予測モデルを参照しているものの, 種々の簡略化を経て最終的には, 減肉速度 m に対して以下の予測式を用いている。

$$m = 2f(\text{Cr}) \times k C_{eq} \quad (7)$$

$$k = \text{Geo} \times 0.0193 (e/d)^{0.2} \text{Re} \text{Sc}^{0.4} (D/d) \quad (8)$$

ここで k は物質移動係数, C_{eq} は鉄の溶解度, Geo は形状係数, e は配管表面粗さ (40 μm に設定), d は管内径, D は拡散係数である。また $f(\text{Cr})$ は経験的に材料中の Cr 濃度や水素分圧も含んだ関数として与えており, Cr 濃度の相対的な影響については図 4 に示す評価を適用している。減肉速度を求める基礎式, 構成式の中には非公開の要素も含まれるため, 一般には定量的な評価値を把握することはできないが, 公開されている範囲で部分的なパラ

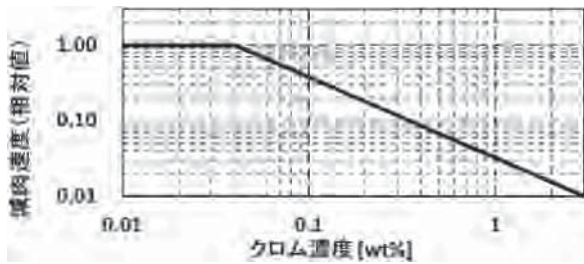


図4 EDFによるクロム濃度の影響評価

メータに対する定性的な予測傾向の把握は可能である。CHECWORKS：アメリカ電力研究所(EPRI)により開発された予測コードであり、現在世界中で最も適用実績が多い。実験および実機データに基づき、温度・材料組成・物質移動・溶存酸素濃度・pH・配管形状・ポイド率の各影響パラメータによる効果の積とした減肉速度評価式を用いているとされるが、詳細は公開されておらず不明である。

COMSY：WATHECの技術を継承し、ドイツのAREVA-NP GmbHにて管理・更新された予測コードであり、FACに限らずエロージョンやキャビテーション等、プラント系統の機器・配管の劣化事象全般を対象とした予測・管理を可能としたものである。しかし現在の減肉速度に対する評価式については公開されておらず不明である。

(3) 国内の開発動向

国内では、2004年の美浜発電所の事象を機に多くの関連研究が立ち上げられ、この中で独自の予測モデルと予測コードの開発も進められてきた。ここでは主なものとして二つ紹介する。

一つはエネルギー総合工学研究所を中心としたグループによる開発である。予測モデルでは、溶解過程に関しては静的な電気化学解析と動的な酸化皮膜成長解析を連成することで、減肉速度の時間依存性が評価可能としている。また物質移動過程に関しては、乱流エネルギーや摩擦速度の関係等を用いて物質移動係数と濃度境界層厚さを同時に求める評価手法を提案している。このモデルとプラント系統配管全体に対する一次元的な評価に基づき予測コードDRAWTHREE-FACを開発している⁸⁾。

もう一つは電力中央研究所による開発である。予測モデルは、定常な減肉現象を対象に濃度境界層からバルク水への拡散を律速過程とした現象モデルに、壁面近傍の変動速度を考慮した実効摩擦速度の概念を導入した物質移動係数モデルを組合せたものを用いている。この予測モデルに基づき予測コードFALSETを開発している⁹⁾。

いずれの予測コードも、実機プラントデータを用いた検証作業を実施している。現時点では、適用範囲の限定はあるものの、減肉速度の実測値に対して概ね-50%~+100%の誤差範囲内の予測精度を示しており、今後の

更なる性能向上が期待される。

III. おわりに

日本の産業界において、所謂エロージョン/コロージョン(FAC)が古くから認識されていなかったわけではない。しかし現状として諸外国の発電プラントにおいて、予測コードの導入により定期検査時の肉厚測定部位数を概ね100箇所以内としている点では、日本の配管減肉管理は20年程度の遅れがあり、桁違いに多い肉厚測定をしている。しかしそれは逆に世界で類を見ない充実した貴重な検査実績データを保有していることでもある。現在、JSMEの研究分科会(フェーズ4)では、国内プラントの減肉管理に対する予測コードの導入方針に関する検討が進んでいるが、単に先行する国外の手法を導入するのではなく、日本独自の知見を十分に活用した減肉管理の高度化が達成できるよう、国内産官学の関係者による有意義な議論が展開されることを期待する。

— 参考資料 —

- 1) 日本機械学会, 発電用設備規格 JSME S CA1-2005.
- 2) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 JSME S NG1-2006/NH1-2006.
- 3) 日本機械学会, 発電用火力設備規格 JSME S TB1-2006.
- 4) 日本機械学会, P-SCC II-4 研究分科会成果報告書, 2014.
- 5) V. K. Chexal, et al., TR-106611, EPRI, 1996.
- 6) P. Berge, et al., Water Chemistry of Nuclear Reactor System 2, BNES, 19, 1980.
- 7) L. E. Sanchez-Caldera, et al., Trans. ASME, 110, 180, 1988.
- 8) S. Uchida, et al., Nuclear Science & Technology, 47, 184, 2010.
- 9) K. Yoneda, et al., ASME PVP2013-97601, 2013.

著者紹介



米田 公俊 (よねだ・きみとし)

電力中央研究所 原子力技術研究所
(専門分野/関心分野)熱流体工学/配管減肉, 気液二相流



藤原 和俊 (ふじわら・かずとし)

電力中央研究所 材料科学研究所
(専門分野/関心分野)腐食化学/水化学, 流れ加速型腐食



歌野原 陽一 (うたのはら・よういち)

原子力安全システム研究所 技術システム研究所
(専門分野/関心分野)熱流体工学/配管減肉等の配管劣化現象, 格納容器熱流動



福島環境影響・健康影響研究の新たな展開

日本原子力研究開発機構 廣内 淳, 大倉 毅史, 佐藤 大樹

本報告は、2016年秋の大会において行われた保健物理・環境科学部会企画セッションのとりまとめである。環境測定、環境影響、健康影響の各テーマで、福島第一原子力発電所事故から今まで得られた知見、今後の研究の展開・課題に関する講演が行われた。講演後に会場全体でディスカッションが行われ、今後事故が起きた際に、今回の事故よりも迅速かつ適切に対応するためには今何をすべきか、幅広い分野とのつながりの重要性が主に議論された。

KEYWORDS: *environmental monitoring, environmental effect, health effect, archiving*

I. はじめに

保健物理・環境科学部会は日本原子力学会 2016年秋の大会で「福島環境影響・健康影響研究の新たな展開」と題して企画セッションを行った(2016年9月9日)。本セッションでは環境測定、環境影響、健康影響の各テーマについて、3名の講師からご講演をいただき、全ての講演の後に会場全体でディスカッションが行われた。各講師の講演概要およびディスカッション内容を報告する。

II. 過去5年間の研究の経緯

1. 講演概要

斎藤公明氏(JAEA)からは「過去5年間の研究の経緯」の題目にて講演があった。斎藤氏は、福島第一原子力発電所(以降、1F)事故後の福島県での環境モニタリングなどの統括的役割を務めている。講演内容は、1. 初期汚染の状況、2. 放射線環境の経時変化、3. 住民の被ばく線量についてであった。

まず初めに、土壌試料採取、Ge半導体検出器によるin situ測定による ^{137}Cs を始めとした放射性核種の初期汚染についての諸研究の成果が紹介された。1Fから約80km圏内の沈着量のマッピングの成果により、 ^{137}Cs の沈着量は森林に70%、農業用地に20%、宅地に5%の割合で沈着していることが報告された。また、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比の地域分布から、2012年3月時点における $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比が0.785未満で2号機由来、比が

0.785以上で3号機由来と推定し、放出元からの汚染経路が解析されたことや、長半減期核種である ^{129}I (半減期1570万年)の測定を通して、同時に放出された短半減期の ^{131}I (半減期8日)沈着量の分布に関する諸研究の成果が紹介された。

次に、土壌に沈着した放射性セシウムと空間線量率の経時変化について説明された。土壌に沈着した放射性セシウムは、事故発生から約4年半後までの間にかく乱のない平坦地では物理減衰に従い減少し、2015年時点での放射性セシウムの90%が含まれる深度の平均値は、未だ5cm以内であることが紹介された。森林における放射性セシウムの移動として森林から外部への流出量は0.1%/年のオーダーであると説明された。放射性セシウムの河川から海洋への流出は、豪雨時の流出量が年間流出量の半分以上を占めていることが紹介された。空間線量率の測定は、定点測定、走行サーベイ、歩行サーベイ、無人ヘリ測定など複数の測定手法で行われている。それぞれの測定手法の特徴を評価し、それら複数の手法を組み合わせて測定された80km圏内における空間線量率に対して、土地利用の違いや人間活動の有無による空間線量率の経時変化の違いを統計解析すると、人間が生活する環境周辺の空間線量率は物理減衰よりも顕著に早く減少していると説明された。さらに、これらの成果をもとに得られた空間線量率減衰モデルの構築と空間線量率の将来予測について紹介された。

最後に、住民の被ばく線量について、外部被ばくと内部被ばくそれぞれに着目して説明された。福島県による県民健康調査における事故後4か月間の外部被ばく線量の推定結果は、最大で25mSv、平均0.8mSvであり、5mSv以下が98%を占めている。個人線量計による被ばく線量の測定結果は実効線量をよく代表しているこ

Prospects for researches on environmental and health effects of the Fukushima Dai-ichi NPP accident: Jun Hirouchi, Takehisa Ohkura, Daiki Satoh.

(2016年10月26日受理)

と、避難指示解除予定の地域への帰還予定住民に対する追加被ばく線量の推定結果などが紹介された。初期被ばくによる甲状腺線量を放医研の桐原らが再構築した結果によれば、90パーセント値ⁱは最大で30mSvであり、非常に大きな被ばくはなかったとされているとの説明のほか、原子力機構の百瀬らが行ったホールボディカウンタによる体外測定結果に基づく¹³⁷Csの預託実効線量の50パーセント値は13歳以上で0.02mSv程度であると説明された。

斎藤氏は、チェルノブイリ事故の際のモニタリングなどの経験を生かし、1F事故の際には、本講演での成果を中心に貴重な技術、データ、知見を社会に発信し続けている。これらは、今後、原子力産業が社会からの信頼を取り戻す上で、大変貴重な資料となる。

以上、斎藤氏の講演では、これまでの経緯について紹介された。これらの貴重な情報や技術を、今後いかにして継承してゆくかは重要な課題であり、その課題に対する今後の展開については、次に続く2つの講演で紹介された。その内容について、Ⅲ、Ⅳ章に記載する。

(大倉 毅史)

Ⅲ. 今後の環境影響研究に何が必要か

1. 講演概要

高橋知之氏(京都大学)からは「今後の環境影響研究に何が必要か」の題目にて講演があった。高橋氏は、食品中の放射性核種濃度の基準値や、農作物中への移行に関する研究を進められている。講演内容は、1. 環境影響評価と線量評価の不確実性、2. 社会的ニーズと研究テーマ、3. 将来への責任についてであった。

原子力発電所事故による環境影響評価と線量評価は、実測値に限られているなどの理由から、モデルを用いた評価が活用される。評価する際に認識すべき点は、使用するモデルそのもの、シナリオ、乾性・湿性沈着速度などの入力パラメータに不確実性が存在することである。その不確実性を認識し、考慮した上での評価と情報伝達が重要であることが説明された。さらに、我々は正確な評価を進める必要があるものの、それらの不確実性を小さくするための高精度化はどこまで可能であるかの検討も重要であると指摘された。

現段階でのモデルを使った評価では平均的な状況を把握できるものの、平均から離れた状況(モデル評価値から大きく外れたもの)の把握が困難である。もちろん平均的な状況を把握することは事故影響を把握する上では重要であるものの、平均から離れた状況がどのような原因で生じたのかを追求することは、より精緻な評価をす

る上で必要不可欠である。平均から離れたものを評価するために、単なる外挿のみでは過度に過小あるいは過大評価してしまう危険性が生じるため、個別の検討が必要である。これらを検査するためには、どうしてそのような事象が生じたのかのメカニズム、測定データの意味を解釈し、他分野の知見を総動員して評価することが重要であることが紹介された。

研究者は研究成果が問われており、新たな知見を創出することが求められている。しかし一方で、事故後の空間線量率、放射能濃度の測定などを継続的に実施することが社会的なニーズとして挙げられている。研究をする上で、その研究を行うことにより新たな知見が得られるのか、社会のニーズとどのように対応しているか、の2点のリンクが必要であることが説明された。

我々は、数年後、数十年後に今回の事故と同様の事故が発生した場合、その世代の環境分野の専門家が今回の知見、経験を教訓として、今回の事故よりも迅速かつ適切に対応がとれるかを考えていかなければならない。そのためには、今回の事故の経験、知見をどのように後世に残していくかを考える必要がある。斎藤氏の講演で紹介されたように、チェルノブイリ事故の環境モニタリングの教訓や経験が1F事故時にも生かされた。

2. 今後の新たな展開

高橋氏の講演では、今回の事故の経験および知見を将来に残すための課題、その課題を解決するために今後どういった行動が必要であるかが述べられた。1F事故初期時の課題の一つとして、データ収集が挙げられた。事故直後では専門家間でも誰がどのような測定データを持っているかが明らかではなく、有用なデータであるにも関わらず、誰にも知られていないデータが多々存在した。これらのデータを収集するために、日本学術会議の「原発事故による環境汚染調査に関する検討小委員会」に、「東京電力福島第一原子力発電所事故に関連する放射線・放射能測定データアーカイブズワーキンググループ」が設置された。このWGでは、収集したデータを確保および長期的に保存するために、元データのアーカイブ化、そして、誰でもインターネット上で簡易に検索できるツール、データの登録システムの開発が行われている。さらにデータのみならず試料のアーカイブ化の可能性についても検討されている。このように測定データをアーカイブ化することは、データを後世に継承する上で重要であり、今後事故が起きた時に、過去との比較が可能となり、さらに、前の事故ではどのように解析したのかを把握するための資料となる。測定データをアーカイブ化するのみならず、1F事故で得られた情報、技術、課題点を環境放射線モニタリング指針、原子力災害対策指針などに十分に反映させることによって後世に残していく、その際には、専門家ではない周辺の人も含めて、多

ⁱ 全体を100として小さい方から数えて何番目になるのかを示す数値

くの事象に対応できるシステムを組むことが重要ではないかとの意見が会場から挙がった。

(廣内 淳)

IV. 今後の健康影響研究に何が必要か

1. 講演概要

松田尚樹氏(長崎大学)からは「今後の健康影響研究に何が必要か」の題目にて講演があった。松田氏は、緊急被ばく、健康リスク評価、リスクコミュニケーションをはじめとする放射線に関する幅広い領域をご専門とされ、1F 事故に対しては放射性ヨウ素の取り込みによる甲状腺ガンに関する研究を進められている。

甲状腺ガンは、男性で10万人に2.5人、女性で10人程度の割合で発症し、年齢別では60~70歳で多くの発症が報告されている。その平均10年生存率は90%程度である。また、甲状腺は放射線に対して比較的高い感受性を持つ臓器であるため、被ばくと甲状腺ガンの発症には関連性のあることが知られている。原爆被ばく者に対する疫学調査では、被ばく後13~16年で甲状腺ガンの発症がみられ、被ばく時に10歳未満であった集団のリスクが高いことが報告されている。また、チェルノブイリでの放射性ヨウ素による内部被ばくでも、被ばく時に10歳未満の集団に高い発症がみられた。そのため事故後の福島においても、小児を含めた大規模な甲状腺検査が実施されている。この検査によって得られた甲状腺ガンの有病割合ⁱⁱは、予想値に対して30倍ほど高い値を示した。しかし、福島県内での地域差という観点では、線量率分布に地域差があるにもかかわらず、有病割合には有意な地域差は観測されなかった。また、発症者の被ばく時年齢もチェルノブイリの場合と異なりほとんどが10歳以上である。さらに、小児に対する超音波検査での有所見率についても、他県での検査結果との間に大きな差は認められなかった。

今回のような最新機器を用いた大規模検査においては、通常であれば検査されなかったり、検査されても見過ごされたりする異常も発見されることがある。超音波検査による甲状腺ガンの発見は難しく、複数項目の検査によって判定が変化することもあると紹介された。これを受けて会場からは、有病割合などの上昇はすべてスクリーニング効果で説明できるのではないかとの質疑があった。松田氏の回答では、その可能性の高いことは示唆されるが甲状腺検査の結果の解釈は難しく現段階で結論付けることはできないとし、福島県と他県との甲状腺ガンの罹患率ⁱⁱⁱの比較において福島県での罹患率は他地域よりも約30倍高いとする論文も紹介された。福島で

の被ばくと小児甲状腺ガンの発症は極めて高い関心を持たれているが、限られたデータから科学的に確かな結論を導き出すことはとても難しく、問題解決には今までになかった新たなアプローチによる解析も助けになる。

2. 今後の新たな展開

松田氏の講演では、被ばくと小児甲状腺ガンの発症との相関解明に大きな貢献が期待される基礎研究の成果も紹介された。それは、甲状腺ガンの分子遺伝学的解析に基づく研究である。チェルノブイリにおける甲状腺ガンの分子遺伝学的特徴として、放射線誘発性と考えられる小児の甲状腺ガンではRET/PTC 遺伝子^{iv}の融合がみられ、それに対して一般の成人の甲状腺ガンではRAS および BRAF 遺伝子^vの点突然変異^{vi}がみられた。つまり、甲状腺ガンの分子遺伝学的特徴を解析することで、病態の違いを判断する足がかりを得ることができる。福島で発症した甲状腺ガンではRAS および BRAF 遺伝子の変異が多い。よって、分子遺伝学的にもチェルノブイリの事象とは異なり、被ばくの有無に関わらず成人後に発現する甲状腺ガンを現段階で見つけている可能性が示唆される。最先端の基礎科学の成果を、福島での健康影響研究に応用することで、従来得られなかった新たな知見が得られ、より詳細な解析が可能となった。松田氏の研究グループでは、放射性ヨウ素の甲状腺への取り込みパターンの解析や分子イメージングを用いたDNA損傷の可視化研究も進めており、これらの研究成果も甲状腺ガンの発生機構の解明に大きな貢献が期待される。

(佐藤 大樹)

V. ディスカッション

会場を含めたディスカッションでは、「データの取り扱い」と「人材育成と他分野とのつながり」が主なテーマとして議論された。

今現在もどこにどんなデータがあるのか、どのようにまとまっているのかがあまり明確ではないため、データを収集し、公開することは重要である。しかし、一般の方に説明する際には、生データを示してもほとんど意味はない。データ開示の今後の展開として、例えばグラフなどを作成して経時変化を閲覧できるようなデータベースを作成する、JAEA が公開しているQA集などを利用しつつ、専門家がかみ砕いて分かりやすさを補完することが重要であると指摘された。さらに、後世への情報伝達の観点から、放射性物質の地中への浸透速度、環境半減期などのパラメータ評価を行った結果を提供していくことも重要であることが指摘された。

^{iv, v} ガン原遺伝子の一種

^{vi} 遺伝子DNAを構成するヌクレオチドのうち、単一のヌクレオチドが別のヌクレオチドに変わることによって生じる突然変異

ⁱⁱ 観察対象集団の特定時点における疾病を有する割合

ⁱⁱⁱ 観察対象集団の特定期間における疾病の新規発症の頻度

今回の事故では齋藤氏のようにチェルノブイリ事故時の経験を持った人がいたため、事故対応が早くできたと感じている。しかし、今後事故が起きた際に今回と同様またはそれ以上の対応ができない可能性があると危機感を持ち、現在何をすべきかを常に考えておかなければならず、同時に人材育成に努める必要がある。狭い分野で人を集めるのではなく、幅広い分野から人を集め、風通しの良い環境を築いていくことが様々な問題の早期解決への糸口となるのではないかと提案された。

(廣内 淳)

VI. 部会セッションを終えて

本セッションには42名が参加し、活発な議論が交わされた。1F事故の際のモニタリングを経験した方も多いと思われるが、筆者もその一人である。その経験や、本講演の内容を踏まえて、緊急時の適時のモニタリングが、社会への重要な情報の提供につながるということを痛切に感じた。また、松田氏の講演にあったガン細胞の分子遺伝学的解析などは、発ガン機構の解明に新たな光を当てる最先端の科学である。日頃より高い精度の基礎研究を着実に進めることと、緊急時にはその知見を適切に応用することの大切さを感じた。本セッションを通じて、1F事故後の研究の現状を認識するとともに、今後我々が後世に何を残すべきなのか、どのような研究を行

うべきなのか、今後事故が起きた際にどのような測定が必要なのかをさらに考えていくべきと感じている。さらに、測定されたデータをどのように一般の方に分かりやすく伝えるべきなのかを常に考えながら研究し、自身の分野にとどまらず、他分野にも意見を求めることが研究の新たな展開へとつながるのではないかと考える。

著者紹介



廣内 淳 (ひろうち・じゅん)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)安全研究, 防災研究,
環境放射能



大倉毅史 (おおくら・たけひさ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子炉施設周辺の環
境放射線監視



佐藤大樹 (さとう・だいき)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)放射線工学, 線量評
価, モンテカルロ計算

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—
(2月7日第8回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・12月16日～1月15日に英文誌へ16論文、和文誌へ1論文の投稿があった。
- ・和文誌に掲載された福島事故後5年間の関連論文と学会誌の関連解説を英訳して出版するためのWGを設置した。選定作業を進めている。
- ・編集委員会論文誌関係の平成29年度予算案(修正)が編集委員会で承認された。
- ・編集委員アンケートを参考に、論文審査・査読要領の見直しに合わせて検討していたArticleとTechnical Materialの取り扱い方針を決めた。
- ・編集委員会規程の改定案を承認した。編集委員メール審議とする。
- ・JNST Most Popular Awards受賞論文6論文を決定した。
- ・和文誌掲載論文の英訳転載1論文を認めた。
- ・ScholarOneの作業に関して、マニュアル通りに行うよう注意喚起することとした。

【学会誌関係】

- ・委員長より、1月理事会で学会誌の至近の状況を説明したという報告があった。
- ・4月号震災6年目特集企画について、進捗状況の報告があった。現状、23学会から寄稿していただいている。
- ・学会誌福島関係の記事をデータベース化する案について、編集長から報告があった。鋭意検討・作業を進めていく。
- ・12月号のアンケート結果の報告があった。
- ・2017年春の年会企画セッションからの記事候補を選出した。
- ・記事の進捗状況、巻頭言、時論その他記事の企画検討をした。

【論文誌・学会誌合同会合】

- ・論文誌編集長、学会誌編集長から、現在の状況報告があった。
- ・編集委員会規程の改定案について報告があり、審議の結果、承認された。以降はメール審議後、正式承認となる。
- ・論文誌、学会誌の電子化等について議論が行われた。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>



幌延見聞記—大学生・大学院生が見た現場から

2016年9月1日、6名の大学生・院生がJAEA 幌延地層研究センターを視察し、見学直後に率直な意見を交換した。高レベル放射性廃棄物の処分問題をめぐって、若手研究者が様々な視点から意見を述べた。



大谷 崇人

東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 M1

亀岡 優輔

慶應義塾大学法学部法律学科 4年

酒井 泰地

東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 M1

中村 建翔

東京都市大学工学部原子力安全工学科 4年

山川 裕久

東京都市大学原子力安全工学科 4年

渡辺 人生

東京都市大学環境学部環境マネジメント 3年

早瀬 佑一 エネルギー・環境研究会・代表

司会：澤田 哲生(東京工業大学)

澤田 最初に早瀬さんから企画の意図をお願いします。

早瀬 若い世代に問題の重要性を認識してほしい。我々の世代でなんとか道をつけたいという思いで、このような機会を設定しました。みなさんの経験を家族や友人に広げて行ってほしいと思います。

印象に残ったのは—

澤田 では、今回参加した学生の皆さんから、もっとも印象に残ったことを一つずつあげてください。

渡辺 原子力発電について身近に感じる良い機会でした。自分の心の中には、原子力は廃止したほうが良いという思いがありました。今回の見学で、担当する人たちが先の先まで考えていることを知り、これからの未来は大丈夫ではないかなと思うようになりました。

中村 写真を撮っていいなどの言葉からは、フレンドリーな印象を持ちました。

亀岡 高レベル放射性廃棄物(HLW)のことは新聞・メディアを通じて知っていましたが、リアリティーはありませんでした。現場を見て、今後はリアリティー感を持って考えていかないといけないと思いました。原子力は民間に任せるだけではなく、政治とも一緒になって

やっつけていかなければならないと思うようになりました。

大谷 この試験施設では本物のHLWを入れないことを知っていたので、そのような場所で実験をする意味があるのか疑問を持っていました。実際に350mもぐったところで、様々な問題を考慮して研究結果を出すということを知って、ここでの研究もまた有意義だと思うようになりました。

山川 大学で地層処分を学んだが、施設見学の機会を得ることができたのは非常に良かったと思います。施設そのものが、かなり見学者向けに作られているという印象をもちました。

澤田 そういうふうに変わってきたのかもしれない。

山川 研究施設の使命が将来終わっても、ここは見学施設として残しておくべきだと思います。

酒井 卒論・修論で廃棄物をテーマにしました。印象に残ったことは二つあります。一つは実際の処分地のサイズ感をつかめたこと。特にベントナイト(緩衝材)がかなり大きいと実感しました。もう一つ、幌延町の皆さんがこの研究施設に好意的だと知ったことは、印象に残りました。

技術的には大丈夫なのか

澤田 今日工学的バリアや自然のバリアの仕組み、そして実スケールの模擬体が地下350mの坑道に安置されているのを目の当たりにしました。これを実際に見て、皆さんは、これは技術的には行けそうだと感じましたか、あるいはさらなる課題があると感じましたか。

大谷 試験で得られたデータの詳細までは見ていないのでなんとも言えませんが、実際に多重バリアを見てから、本当にこれでHLWの漏れを防ぎきれるのかという疑問が深まりました。

澤田 千年後に仮にオーバーパックがなくなると非常に厳しい(保守的な)条件のもとでの安全評価もやっています。安全性を確認しているようです。

大谷 私は千年後よりも1万年後を考えていました。1万年後だとかなりSv値が減るため、その期間まで経てば安全性が高くなると考えました。

澤田 もし、大学の友人や家族に聞かれたら『地層処分は技術的にはいけると思う』と言えますか？

大谷 現場を見ただけでは何とも言えません。データの裏付けをもとに論理的に納得できないと、とても言えません。口先だけでは誰も信用しないし、説得することもできない。きちんと説明するためにも、自分は自分の研究をしていこうと思いました。

澤田 良い心構えですね。

酒井 何千年、何万年という先までシミュレーションしていかなければいけない。現時点で得られているデータはすごく少ないと思うし、だからこそ地層の特徴を捉えて、地下水がどのように移行するとか、バリア素材の腐食の研究などをやっていると思います。けれども、それらのデータは全体の中での一部でしかなく、本当に先がどうなるかということについてはわからない。そういう面では実験も大事だけど、データだけでは不十分で、シミュレーションと実験を合わせることができればと思います。技術的に安全かどうかは、自分では何とも言えないけれども、かなり保守的な想定で実験をやっているの、それを推し進めていくしかないと思います。

亀岡 僕には詳しい技術的なバックグラウンドがあるわけではないのだけれども、地下350mまで潜ったところにある地下坑道のあの壁の先に模擬体がありますよと言われて、実感を持ってました。また、15cm厚さのオーバーパックや緩衝材で千年は十分な耐性があり、その先のことについても極めて厳しい仮定をして評価していると言われて、少しは技術の実態がわかった感じがします。

生活圏、自然環境との共存は？

澤田 次の論点に行きます。今の政府の方針は、地下350mあるいは500mに、緩衝材で包んだオーバーパックを埋めようというのですが、技術的な話とは別に、生活圏や自然環境との調和に関して感じたことや意見を。まず、環境問題に詳しい渡辺くんいかがですか？

渡辺 原子力のみならず、自然エネルギーや化石燃料の発電について、環境との親和性をよく問題にしています。環境面から考えると、原子力は生態系に対する脅威でもあります。生態系を壊しかねない恐ろしい力を秘めている。便利さよりも、地域住民に対する配慮とか、周りに及ぼす影響について、考えて行動していくことが必要だと思います。

中村 高レベル廃棄物の輸送のことを考えると、海岸地域の方が適しています。そうすると津波の問題があります。一言で言えば、どういう場所に置いても何らかの問題はあると思います。

澤田 そういうことを考えれば、まだまだ考慮しなければいけないことは多いということですね。

山川 リスク評価について。何をしてもリスクはあります。そのハザードは100万年に一度の頻度かもしれないけれども、例えば津波対策をどのように考えているのか。地層処分をすった時に、原発の場合と同じようにリスク評価をして、その結果を公表すれば国民の皆さんにも広く理解を得られる可能性があるのではと思います。

澤田 今日は幌延の担当者からそこまでの話はありませんでしたが、リスク評価はやっています。日本原子力研究開発機構(当時は核燃料サイクル開発機構)の2000年レポートというのがあります。

コミュニケーション、そして国民的議論

澤田 次の論点に行きます。地層処分の問題は、候補地の選定から決定に20-30年、その後土木建築を伴う処分を始め、処分地(地下の2kmx3km程度の広さ)に4,5万本の高レベル放射性廃棄物を収めて、ひとまず蓋をするまでに100年ほどかかる、とても息の長い作業です。皆さんが、社会の中堅で活躍する頃には処分地を決める方向に進んでいると想像しますが、いずれにしても世代を跨いだ作業になります。これに伴うコミュニケーション、国民的議論を深めていかなければなりません。

大谷 事前調査に30年、穴を掘ってから埋めるまで、大雑把に言って150年のスパン。それを考えると、今の時点でこんなにいろいろ議論をしている暇はあるのかと思います。今後、戦争を知っている人も日本からいなくなることを考えると、150年という周期を考えれば核の恐ろしさを継承していくのは不可能だと考えています。

澤田 結構悲観的なんですね。

大谷 悲観的というよりリアリスティックに見ていま

す。150年のスパンを考えると、今の我々が「こうだ」と断言するようなものがないと、結局今までと同じようにズルズルと行って、150年経ってもこの問題は解決していないという未来が容易に想像できます。なので、いち早く取りかかる、もしくはとにかくPDCAを回す。Doをしると言いたい。いつまでもPlanばかりに拘泥している時ではないと思います。問題解決のためには核に対する教育をもう少ししっかりする責任が国にはあると言いたいです。

澤田 コミュニケーションに関して、誰か意見はありませんか？

山川 その教育はいつ頃からやるべきでしょうか？

大谷 夏休みに小学生たちが大学に来て、彼らにシミュレーションや原子力について話す機会がありました。小学4年生の子が非常に熱心に質問してくれて、大学院生の私と議論を交わすぐらいでした。なので、小学生のうちに始めるのが良いと思います。興味のない子にも教えるべきであり、中学受験で放射線や原子力の問題に踏み込んでいいのではないのでしょうか。

亀岡 自分も教育に踏み込むのは賛成で、環境とエネルギー問題では、日本は資源が少ないのでいろいろな手段で発電をして賄っているということ、小学校の頃から考えておかないと。事実や議論の前提をふまえた上で、彼らが成人した時に、自ら選択できるようにして、政治的判断もできるようにするのが良いと思います。

澤田 まず情報を共有して、自分たちの置かれている状況を考える。

亀岡 加えて言えば初等教育の中で、エネルギーや放射線、あるいは科学技術の問題になると、小学生と科学者・技術者の間に誰かが入らなければいけない。その間に立って、適切な説明をする仲介者が必要になると思います。

澤田 中村くん、いかがでしょうか？

中村 地層処分をめぐるNUMOはキャラバンカーを出すなどさまざまな活動をやっており、その一環として小学生向けの自由研究というのがあります。霧箱や手回し発電機、ガラス固化体のしくみなどがあって、それを全部回るとスタンプを押してもらえ。そういうふうな、小学生のような小さいときから地層処分とかの知識をつけることで、正しく怖がるということができるようになるといいのでは。

澤田 今日、私たちも実際にベントナイトを使って、それがいかに止水性に優れているかを体験しました。そういうことがもっと多方面であっていいのかもしれない。

酒井 原子力は特に3・11以降はメディアで扇情的に報道されてきまし

た。原子力を勉強するものとしては、悲しい。

澤田 ネガティブな報道が多い。

酒井 恐怖を煽るような報道が多い。無意味に怖がるのではなくて正しく怖がるべきです。もちろん、怖いものだという認識は私たちも持ってはいけません。その際には、それがどれくらいの確率のもので、どれくらいのリスクを持つものであるかということ、きちんと理解できる感覚をもつことができるような機会があればいいと思います。

原子力を一つのサンプルとして、この世の中全体にはどんなリスクがあるのか、それらのリスクとどうつきあい、どう判断していくかという意味では、教育の果たす役割が大きいと思います。

酒井 テロや津波によって出現するハザードは大きいかもかもしれませんが、その確率も考えてリスクで見ると、リスクの考え方を定着させていかないと、原子力の場合にしても、賛成意見と反対意見が平行線のままで収まりません。だから小さい子たちに、原子力、もっと言えばリスクという考え方を学べる教育があればと思います。

渡辺 リスクがわかりにくいということもありますが、情報を伝える側と情報が伝わる側に格差があります。それが今の世の中ですごく大きくなってきている。福島第一原発事故やその後についても、事故を起こした原発が今どういう状態であり、それが周辺に住んでいる人にどういう影響を与えるのか、専門家の方たちは自分ばかりやすいように答えていると思っても、僕自身はそれが伝わっていないと思うと感じます。伝える側と伝わる側との格差が大きいと思いました。

日本では歴史的に見て、核と原子力に強い関心が持たれていて、福島第一原発のような事故が起これしまうと、原子力をやめようという流れになりがちです。けれども、そこで失敗したことを反省して次に生かせるようなことを考えていないように感じます。例えばドイツでは、1年間かけて第二次大戦のことを十分考えるような教育をしています。何が悪かったのかを、一人一人が自分のこととして考える機会があります。



澤田 歴史をきちんと考え、総括する。

渡辺 歴史と私たちは一心同体だと思っています。これからの未来を考える時には過去を勉強し、それを生かしていかないと、より良いみんなの幸せは実現できません。

澤田 最後に皆さんから一言ずつ。

早瀬 この処分の問題はよく深く考えて臨まないと、自分たちも理解できないし、国民も理解できません。私の70年の人生の教訓なんだけど、ではそれを誰がやるか？主語は一体誰だということ。誰かがやるというのはダメで、私たちみんなが自らの問題として捉えないとなかなか解決しないと思います。

要望や希望

酒井 現場での見学ではもう少し時間的なゆとりが欲しかった。特に現場での質疑応答時間を多めに欲しかった。これからは、ここで得られたアウトプット、この体験の発信を広く行いたいです。

山川 予備知識を得る機会が事前にもっとあれば、見学がもっと有意義なものになったのではないかと思います。

大谷 十分満足のいくプログラムでした。今回の見学は全体的なバランスは良く、この問題に対して意欲的になれました。

亀岡 原子力は何ごとも理系中心で進められています。私たちも含めみんなへの理解を進めるということであれば、もっと文系の人や知恵を活用すべきでは。また、単に施設を見せるだけではなく、考える時間も提供

できるようなイベントが組み込まれていると良いと思います。

中村 ワークショップがあればいいと思いました。地元の大学生や中高生との意見交換。そういった若者世代、つまり未来に向けた取り組みが重要ではないかと思っています。私自身、かつてワークショップに参加した経験で、意見が少しシフトしたことがありました。

渡辺 ここで得た知識や新しい発見をアウトプットすることはしたいと考えています。自分の目で感じられる、体験できるという機会はなかなかなく、この機会は本当にありがたかった。特に、その地域に住んでいる人々がどのように考えているのか、意見を交えたりすると、新しい考えだとか、こう言った目線もあるのだという発見にもつながっていくと思います。ぜひそういうワークショップもできる環境を期待します。

澤田 こう言った事業を受け入れて、地元で共存している人たちの視点や気持ちに非常に関心があるということですね。

早瀬 今回のような機会を、みなさんの成長にとっての一歩にしてほしいと思います。いろんな形で発信をして、行動をしてほしいと思います。

澤田 これからも、このような機会を設定していただくことを期待します。

*本見学会は、エネルギー・環境研究会(代表：早瀬佑一氏)が(財)日本原子力文化財団の公募事業に応募し、参加者を公募して実現したものである。

学会誌アンケート結果サマリ(2016年9~11月号)

学会員の方のご意見を学会誌の記事企画等に反映させ、より良い学会誌の記事企画を行うために、2016年9月号より原子力学会誌のアンケート調査を再開しました。アンケートは、毎月月初めに AESJ メールで学会員に回答を依頼する方式とし、アンケート結果は、3ヶ月ごとにサマリを学会誌に報告するものとします。

I. 2016年9月号アンケート結果

○アンケート実施期間：2016年9月1日～30日
アンケート回答数：171名

1. 回答者のプロフィール

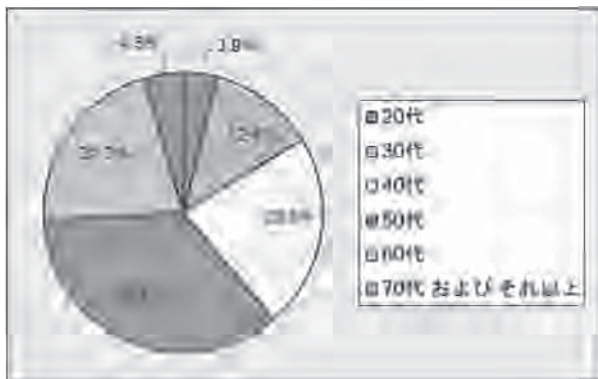


図1 回答者の年齢構成(2016年9月号)

II. 2016年10月号アンケート結果

○アンケート実施期間：2016年10月5日～28日
アンケート回答数：186名

1. 回答者のプロフィール

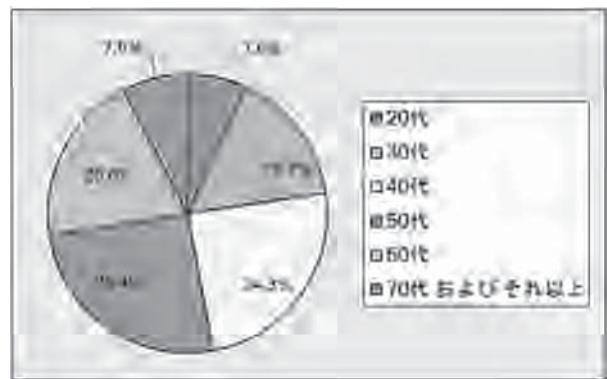


図3 回答者の年齢構成(2016年10月号)

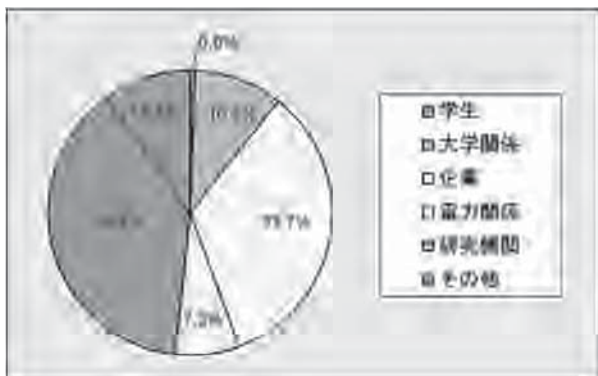


図2 回答者の所属組織(2016年9月号)

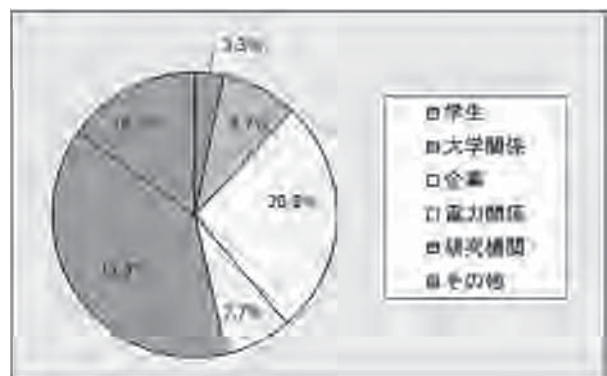


図4 回答者の所属組織(2016年10月号)

2. 集計結果

表1 9月号で興味を引かれた記事(上位5件)

順位	回答数	記事種別	タイトル
1	118	特約	原子力発電に対する期待感
2	87	特約	40年運転経歴の原子力発電所について 科学館の展示館をめぐって 訪れたおもしろさ
3	83	記者会見	原子力規制 一歩前進
4	82	サイエンス	原子力発電所におけるスマートフォンによる安全確認
5	50	特約	原子力発電所に対する安全対策

表2 10月号で興味を引かれた記事(上位5件)

順位	回答数	記事種別	タイトル
1	100	特約	原子力発電所の事故に対する安心感
2	89	サイエンス	原子力発電所の事故に対する安心感
3	71	特約	原子力発電所の事故に対する安心感
4	53	特約	原子力発電所の事故に対する安心感
5	54	サイエンス	原子力発電所の事故に対する安心感

Ⅲ. 2016年11月号アンケート結果

○アンケート実施期間：2016年11月4日～28日

アンケート回答数：155名

1. 回答者のプロフィール

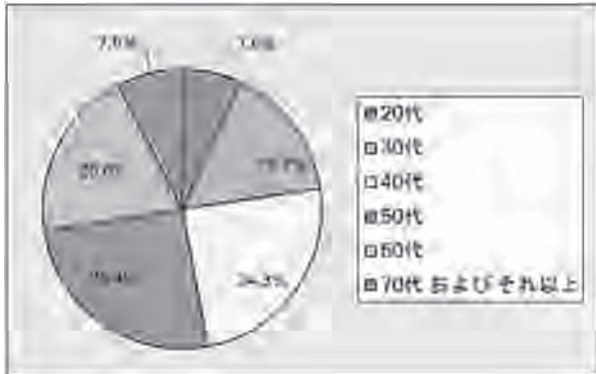


図5 回答者の年齢構成(2016年11月号)

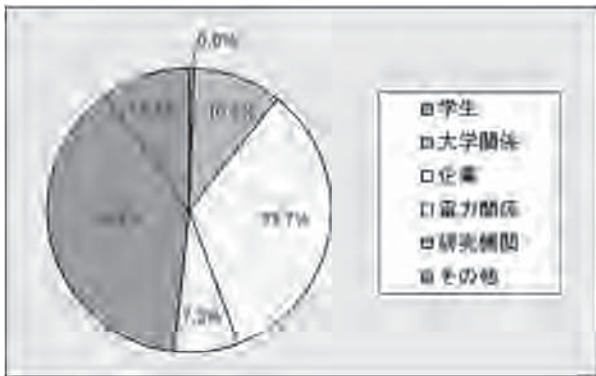


図6 回答者の所属組織(2016年11月号)

2. 集計結果

表3 11月号で興味を引かれた記事(上位5件)

順位	記事名	記事内容	コメント
1	7-1 楽観論	本誌と関係無関係	
2	7-2 サイエンス	東京大学の物理学、あつたこと、おぼろげな感じがした	
3	8-1 核融合	燃料燃焼はHによる燃料燃焼と異なり、燃料燃焼と異なる	
4	8-2 核融合	イオン化燃料	
5	8-3 核融合	燃料を燃焼するエネルギーを発生、原子炉を燃焼するエネルギーを発生、エネルギーを発生する燃料燃焼	

Ⅳ. 学会誌に対するご意見

学会誌アンケートでは、①学会誌の記事企画や記事の内容についての意見、②今後、学会誌に掲載を希望する記事、③編集委員会への要望や意見 の3種類の自由記入欄を設け、学会員のご意見を伺っています。

これまでのアンケートで頂いたご意見から、今回は、まず、「学会誌の専門性」と「記事企画」に関するご意見を以下に紹介いたします。

【記事企画に対するご意見】

○記事企画においては、伝えたい事がファクト、リスク、

ベネフィット、価値観のいずれかに整理する事が重要である。

○原子力が社会で信任されなければ未来がない。原子力に携わる学会員が社会に目を向ける契機となるような記事・企画を希望する。

○社会との接点の記事が多彩な事は喜ばしい。一方、IOT、人工知能等の原子力との係わりなど世の中の科学技術との接点もあると良い。

○低線量放射線の健康影響に関しては、原子力発電の理解のために本学会では重要なので、記事として積極的に取り入れてほしい。

○原子力産業が低迷している現状、技術維持とともに、工学や物理学としての学問維持にも危機感を感じる。そのような内容の記事を特集してほしい。

○11月号の「サイエンス」は、インタビュー形式という斬新な方法で非常に読みごたえがあった。今後も続けてほしい。

○11月号のサイエンス記事を参考として、毎号一つ技術トピックスを掲載してほしい。最新論文や業界動向の紹介記事ではなく、発電炉、加工、再処理、廃棄等の幅広い括りの科学的テーマを対象にした技術トピックス記事を希望する。

【専門性に対するご意見】

〈より専門性を求める意見〉

○震災以降、専門性が低くなり、解説的な記事が多くなったので読む気がなくなった。より専門性を高めてほしい。

○最近の学会誌は業界紙のようで、アカデミックな内容に乏しくなっていると感じる。

〈より平易性を求める意見〉

○専門外でも興味を持てるような記事にしてほしい。

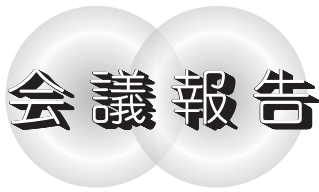
○解説記事の中に専門家向けに書かれ過ぎているものが多いと感じる。自分の専門分野の記事は他分野の方には理解できないと思うし、自分の専門外の記事は非常に読みにくいと思う。詳細報告は参考文献にして、本文は概要を伝えるような記事にする方が良いのではないかと感じる。

○学会誌である以上、専門性を追求することは必至であるが、一方で興味を持つ“素人”への情報発信の役割を期待するのは酷であろうか。素人が読みやすい記事は適宜掲載されると職場の原子力の理解促進の啓もう活動に役立つと思う。ただし、中立的な立場での配慮も必要。

○学会誌だから仕方がないかもしれないが、全般的に硬いイメージである。NEWSや「イチエフ訪問記」のような世の中の状況を知るような記事は良いと思う。

以上、2016年9月～11月号のアンケート結果の概要を紹介しましたが、今後も毎月アンケートを実施しますので、会員の方の忌憚のないご意見を募ります。

(本誌諮問委員 小林容子)



第13回遮蔽国際会議

The 13th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-13) and Topical Meeting of the Radiation Protection & Shielding Division of the American Nuclear Society (RPSD-2016)

2016年10月3～6日(パリ, フランス)

第13回遮蔽国際会議/米国原子力学会・放射線防護遮蔽部会合(ICRS-13/RPSD-2016)が、フランス原子力庁(CEA)主催のもと、フランスのパリにあるNOVOTEL HOTEL TOUR DE EFFELにおいて開催された。本会議はほぼ4年毎に開催されており、第1回が1958年に英国のケンブリッジで開催されて以降、開催地は概ねヨーロッパ、アメリカ、日本の順となっており、前回のICRS-12は日本の奈良で開催された。今回の参加者は60ヶ国、約300人であり、そのうち日本からの参加者は45人と開催国のフランスに次いで2位であった。

会議のトピックは、(T1)核データ・放射線検出器・測定&ドジメトリ、(T2)遮蔽実験&ベンチマーク、(T3)加速器&核融合施設、(T4)医療施設・放射線治療&医療応用・宇宙での線量評価と遮蔽、(T5)原子炉施設・核燃料サイクル&廃棄物管理・デコミッションング、(T6)計算手法・モンテカルロ&決定論的方法に分かれ、発表件数は口頭発表とポスター合わせ約250であった。トピック別では、T1の発表件数が54件と最も多く、次いでT6の49件、T5の42件の順であった。さらに「福島事故5年後」と大阪大学核物理研究センター(RCNP)で実施された一連の実験「100～400MeVの準単色中性子場・核破碎中性子源」の2本のスペシャルセッションが行われた。「福島事故5年後」の招待講演は原子力規制庁の平野氏の福島事故概要とそこから学んだ事に関する講演を筆頭に4件あり、どれも高い関心を呼んでいた。また福島関連の一般講演では環境放射能、内部被曝評価、線源評価など多岐にわたる発表があった。

ワークショップは主に放射線輸送解析に関するもので、米国のAttila4-MCコード、中国のSuperMCコード、米国のMRT法(Methodologies for Real-Time Particle Transport Simulation of Nuclear System)の3つが行われた。特に中国のSuperMCコードを用いた解析やV&V(Verification and Validation)等について、一般講演においても中国の研究者から多数の発表があったのが印象的であった。

また、解析コードに対する強力なプリ・ポストツールが多く開発され、計算結果や計算モデルの可視化・アニメーションが容易になりつつあると思われる。モンテカルロ解析コードは広く利用されるようになったが、決定論的手法によるコードも計算速度やアジョイント計算等

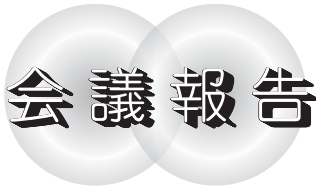
の観点からはまだまだ有利であると会議の総括で述べられた。一方、簡易遮蔽計算コードの開発も米国・欧州で進められていた。

放射化とデコミッションング関係では、大きく加速器関係と原子炉関係に分けられるが、欧州の発表では原子炉関係の放射線輸送解析や放射化解析にモンテカルロ計算コードが多く用いられていたのが印象的であった。一方、加速器の放射化に係るクリアランスの問題については、日本のみならず世界中で問題になりつつある事が判った。放射化関係の発表では会場が満員になり、立ち見が出る程になる発表も見受けられた。放射化評価では特に線源評価や金属・コンクリート材料中の微量元素の評価等が重要になると考えられる。また、原子力学会の標準委員会 放射線遮蔽分科会 遮蔽材料作業会で現在検討が進められている、遮蔽設計等のための普通コンクリートの組成等に関する学会標準の策定に関する発表が行われた。国内における原子力施設や放射線施設の設計・改修等に係る遮蔽評価で現在使用されている普通コンクリート組成は、40年以上前に海外で整備されたデータが主であり、そのデータの出処も明確ではないため、原子力学会標準として新たに策定することを検討している。本会議では、同委員会で行われている検討のうち、コンクリート組成やコンクリート内の水分量が増減した時の遮蔽体外側における線量への影響に係る感度解析を主にした発表があった。聴衆からは解析条件などに関する議論が活発に行われた。国際会議での発表と議論を通じ、より良い学会標準の策定が期待される。

会議の総括では、前述の計算コードに関するもののほか、世の中のニーズに応じた20MeV以上と極低エネルギー領域における核データ拡張の必要性、不確かさ評価、および放射線輸送計算のみでなく生物や化学等も考慮したmulti-scale, multi-physicsのコード開発の必要性等が提示された。本会議で発表された研究を見ると、放射線の応用範囲が確実に広がっており、従来のような放射線だけを考えた解析ではなく、様々な他の分野も含めた解析が必要となっていると感じた。

次回、第14回遮蔽国際会議は、2020年に米国の西海岸(場所未定)で開催される予定である。

(安藤ハザマ 奥野功一, (株)日本環境調査研究所 大石晃嗣, 2016年12月8日記)



第 18 回放射性物質輸送国際会議 PATRAM2016

18th International Symposium on Packaging and Transportation of Radioactive Materials

2016 年 9 月 18(日)～23 日(金)(神戸ポートピアホテル, 神戸市)

医療用、産業用等から核燃料まで世界中で年間約 2000 万個の放射性物質が安全に輸送されている。その性状や放射線量は幅広く、これらの放射性物質を安全に輸送するには、適切な規制・基準とともに関係者による協力と最新の知見・経験の共有等が重要である。放射性物質輸送容器および輸送に関する国際シンポジウム(PATRAM2016 : 18th International Symposium on Packaging and Transportation of Radioactive Materials)では、放射性物質の輸送に関する規制、輸送経験、設計・製造、セキュリティ、中間貯蔵等の幅広いテーマに対して、規制当局、研究者、事業者、輸送業者、容器製造者等の世界の関係者が一堂に会する放射性物質輸送に特化した唯一の国際会議である。1965 年以降、3 年ごとに開催されており、日本においては 1992 年に横浜で PATRAM'92 が開催されて以来、今回(第 18 回)24 年ぶりに日本(神戸)にて開催された。

今回の PATRAM2016 は、日本機械学会主催、日本原子力学会共催、原子力規制庁、国土交通省、資源エネルギー庁後援、IAEA、INMM、WNTI 協賛で開催された。具体的な準備、運営は、幅広い関係機関による組織委員会および実行委員会が全体を統括し、その下にいくつかの委員会等を設け、関係者の協力により進めた。

会議は、27 カ国から約 600 名(海外から約 400 名)の参加者を得て、組織委員長の有富東工大名誉教授、主催機関の岸本日本機械学会会長、後援機関の田中知原子力規制委員および開催地(神戸市)の加藤局長の歓迎挨拶で始まった。11 件の基調講演、2 件のパネル討論に加え、52 の口頭発表セッションおよびポスター発表セッションが行われ、290 編の論文(国内から 51 編)が発表された。また、企業展示では、研究機関を含む 27 社が最新の技術等が紹介された。

基調講演では、福島除染廃棄物輸送(環境省)、東日本大震災後の海上輸送における安全対策(国土交通省)、福島第一原子力発電所における使用済燃料管理(東京電力)とともに、吉澤厚文氏(元東京電力、福島第一原子力発電所 5、6 号ユニット長)から「レジリエンスエンジニアリング手法を用いた 2011 年の東日本大震災からの新しい教訓の抽出」と題して、リスクの低減は不可欠であるが、これを完全には排除できないとの認識をもって、壊滅的な損害を避けるためにはレジリエンス能力(予測能力、対応能力、監視能力、学習能力)が必要であり、限られた時間の中で意思決定および優先順位を設定するワーク

ロードマネジメントの重要性が述べられた。その他、国際機関からは途上国を含めた国際協力や規制機関と産業界の協力、企業間の国際的な協力の重要性とともに、輸送分野へのサイバーセキュリティの脅威が紹介された。更に、欧州から日本への MOX 燃料輸送の概要が英国、仏国、日本の責任者によりリレー方式で発表され、関係者の緊密な協力関係が示された。パネル討論では、安全で国際的な放射性物質輸送を阻害する運搬拒否や各国規制当局による輸送容器の許認可の違い等による課題が議論され、引き続き関係者の協力、情報共有が必要であるとの認識が共有された。

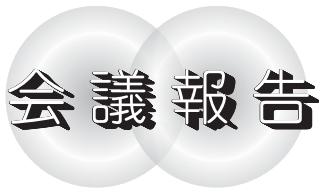
口頭発表のセッションは、輸送物設計、解析、輸送方法、規制・制度上の課題、輸送・貯蔵・処分の相互課題、収納物特有課題の 6 つのテーマについて、4 つの会場で発表、議論が行われた。設計、解析に関する最新の輸送容器設計・解析手法、落下衝撃を含めた試験および製造技術の発表とともに、福島事故を受けた緊急時対応能力の向上や訓練等の輸送方法に関する報告が行われた。また、近年懸念が増大している輸送セキュリティに関する国際的な規制強化の動向や国際的な実地訓練、今後増加が見込まれる使用済蒸気発生器等の大型放射性機器の輸送のための IAEA 輸送規則の改定内容等の紹介に加え、国際的な課題である使用済燃料の中間貯蔵についても規制、容器設計、新規材料開発および運用経験等の様々な観点から議論された。ポスター発表は、企業展示会場の中央で開催され、多くの参加者による活発な議論が行われた。

第 4 日夜には恒例の晩餐会が開催され、チンドン屋、雅楽・巫女舞という日本的エンターテインメントが好評を博し、併せて優秀賞、若手賞等の授賞式が行われた。

久しぶりの日本開催であったが、国内外の官民関係者の協力を得つつ、手探りで開催の準備運営が進められた。最終的に国内からの約 200 名を含めて多くの参加者を得て本国際会議を成功させることができたことについて、協力頂いた関係各位に深く感謝する次第である。

放射性物質輸送では、これまで世界的にも放射線影響が生ずるような事故は発生していないが、引き続き安全輸送の実績を維持するために、PATRAM が寄与することができれば幸いである。次回は 2019 年 8 月に米国ニューオーリンズで開催される予定であり、より多くの方の参加を期待したい。

(原燃輸送(株)伊藤大一郎, 2016 年 12 月 22 日 記)



原子力発電プラントの水化学に関する国際会議 2016

Nuclear Plant Chemistry Conference (NPC) 2016

2016年10月2日～7日(英国 Brighton 市, The Grand Brighton Hotel)

1. はじめに

Nuclear Plant Chemistry Conference (NPC) は 1977 年に英国 Bournemouth で開催されて以降、2.3 年毎に開催される原子力水化学分野で最も権威ある国際会議である。今回は、The Nuclear Institute 主催のもと、EDF Energy Nuclear Generation の Andy Rudge 氏が議長を務め、Brighton 市の The Grand Brighton Hotel で開催された。Brighton は英国の南東部の海沿いに位置する 15 万人規模のリゾート地であるが、近隣に Brighton 大学や Sussex 大学があり、学生など若者の多い町でもある。

今回は、地元英国をはじめ、日本、EU 諸国、米国、カナダ、韓国、中国、台湾等から 243 名が参加した。日本からは 31 名が参加し、英国に次いで 2 番目に多かった。月曜から木曜日は朝から夕方までオーラルセッションが生まれ、月曜から水曜日の午後には 115 件のポスターセッションが開催された。オーラルセッションは、3 件の基調講演の他、PWR 一次系、PWR 二次系、BWR、高経年対応、放射線化学、燃料と水化学、補機系、事故マネジメントの 8 項目、15 のセッションで構成され、56 件の口頭発表があった。金曜日には、放射線分解・電気化学に関するワークショップとして 15 件の講演(うち 4 件が日本から)に加え、Kent 海岸に立地する Dungeness B 発電所(AGR 初号機)へのテクニカルツアーが平行開催された。

2. 技術トピックス

(1) 基調講演

英国原子力規制局の Michael Paul Redmond 氏は、6 基の新規炉を建設準備中の英国における許認可に関わる水化学活動を紹介した。米国 EPRI の Daniel Wells 氏は、世界全体の水化学の動向を紹介した。日本原子力学会の勝村庸介水化学部会長は、原子力の再活性化に努力している現状を紹介した。英国における運転規制のための水化学を真摯に検討している様子等、水化学に対する各国のスタンスの違いが興味深かった。

(2) BWR 水化学関連

吸着プロセスにおける元素の拡散を考慮した BWR 用放射能移行モデル、Fe の溶出を促進し⁶⁰Co の吸着を抑制する Pt 被覆 Tight-Binding 法、再汚染抑制技術およびインターナルポンプ方式の北歐 BWR の運転経験に関する発表があった。化学除染後のステンレス鋼表面の皮膜再生時に皮膜内に⁶⁰Co を多く取り込むことで線量率が急上昇する事象が課題となっており、その対策に関する発表が 2 件あった。その他、Co の取り込み挙動および酸化皮膜の分析技術に関する発表もあり、さらなる

技術の進展が期待される。

(3) PWR 水化学関連

一次系では、被ばく低減の高度化を目指した各国の取り組みとして、試運転時の水質管理、停止時 RCP の運用、亜鉛注入、系統内のシリカ管理の向上、^{110m}Ag 線源挙動などが紹介された。起動停止時の水化学管理はプラント全体の線源強度に影響を及ぼすため、各国で試行錯誤が継続している様子が伺えた。今後、更なる線源強度低減効果の評価が進むことに期待したい。また、新たな取り組みとして、欧米や国内の PWR の pH 調整剤として一次冷却系に添加している LiOH に対し、ロシア型 VVER で用いている KOH の適用可能性についても報告があった。

二次系では、スケール管理に対する取り組みとして分散剤(PAA)および化学洗浄に関する発表が米国と仏国よりあった。PAA は試行段階にあり、適用条件の最適化等が期待される。また、がん原生を有するヒドラジンに対する代替剤の検討、およびフィルムフォーミングアミンの適用に関する発表が複数あった。

(4) 高経年化対応

PWR 二次系の化学管理の発表が中心で、経年劣化予測モデルの精度向上、炭素鋼の二相流下 FAC 解析モデル、304 ステンレス鋼のクレビス腐食挙動、CANDU 炉の SG 伝熱管の損傷、インド PHWR フィーダー管の FAC、福島事故に係るクレビス腐食、ほう酸水によるコンクリートの中性化と鉄筋腐食に関する発表があった。

(5) 放射線化学

BWR、PWR および CANDU 炉での核種移行挙動に関する発表があった。いずれも実機での測定データを詳細に解析しており、機構論に基づく研究が精力的に継続されている一方で、統計的な手法により経験式を導く取り組みも始まっている。両者の特徴と知見を踏まえ、より良い水化学管理の構築に結び付けることが肝要である。

3. おわりに

新設炉を多く抱える英国や仏国のプラントメーカーを中心に、新たな水処理法の開発と実機適用が積極的に行われている。軽水炉の再稼働が進まない日本との格差を感じた。国内参加者が大きな刺激を受けたことは言うまでもない。その一方で、軽水炉プラントの輸出は、安全技術に加え水化学も含めた保全技術のパッケージ化も検討されていることもあり、早い巻き返しが求められる。

今回は、米国 San Francisco にて 2018 年 9 月 23 日～28 日に開催される。NPC2020 は、南フランスで開催される。

(電力中央研究所, 河村 浩孝, 2016 年 12 月 12 日 記)

新刊紹介 写真に見る 地質と災害

千木良雅弘著, 232p. (2016.5), 近未来社(定価 3,300 円)
ISBN 番号 978-4-906431-46-5

本書は、地すべりや山崩れ、およびそれらに関連する地質現象について、多種多様な事例を紹介したものである。著者は本書を「災害地質学入門」(1998, 近未来社)の導入部、つまり「入門のさらに入門」として位置づけ、災害における地質学的な見方、考え方を豊富な写真とともに詳細に述べている。災害のうち、人為的災害を除けば、地震、噴火など、そのほとんどは地質が関係している。にもかかわらず災害を正しく知ろうとする(知る必要がある)人々には、我が国の教育課程の事情もあり、地質学、地球科学についての正しい知識が不足しているのを感じる。本学会に所属する方々も、専門課程で地質学を専攻した物好きはそういないはずである。本書はそういった人々を対象として、日本の土砂災害から黄土高原を経て氷河まで、著者が自分の目で見てきた世界中の災害について、1 主題 1 ページで丁寧に書かれている。本書の特徴の 1 つとして、写真や図によって、実際の災害の状況が非常

にわかりやすく描かれている。これは、地質学を専門としない人が読むに際し、非常に重要なポイントである。一方、説明文には、地質学的な意味は正確だが一般には馴染みのない言葉や表現(例えば、漣痕(れんこん)、蓮根(レンコン)ではない)が散見される。まずは写真や図をながめて、興味をもった項目について「災害地質学入門」や地学系の辞書で詳しく調べる、といった読み方が推奨される。多くの人に本書が読まれることで、災害における地質学的な見方、考え方が身に付き、世界で最も地質災害を被る可能性が高い地域の一つである我が国が、より災害に強くたくましくなることを思いながら本書を紹介する。実は、今、この原稿を書いている机の横に、著者がかつて使用していたとの言い伝えがある古いペンタックスのカメラが置いてある。本書とこのカメラが現地調査の大切さを常に思い出させてくれる存在である。



(電力中央研究所・佐々木俊法)

学会誌への投稿記事の採否に関する判断基準

日本原子力学会 編集委員会

学会誌への投稿は、記事原稿の作成に先立ち、記事提案書(学会 HP に記載)の提出が必要となります。提出された記事提案書は編集委員会で審議し、通過したものについて記事原稿を提出していただくことにしています。

投稿記事の内容については著者に責任がありますが、記事提案書の審議において、投稿記事が下記のいずれかに該当すると判断した場合は、学会誌に掲載することをお断りすることになっています。なお、記事提案書に基づいて執筆された記事原稿につきましても、下記のいずれかに該当すると判断した場合や、記事提案書と異なる内容の原稿が提出された場合は、掲載することをお断りすることになっています。

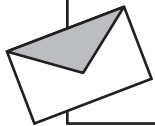
- (1) 事実を無視し、あるいは歪曲した意見。
- (2) 真偽が不明な内容を含む場合。
- (3) 文章に論理性がない場合。文章が意味不明な場合。
- (4) 掲載することにより、学会の品位に傷がつく恐れがある場合。
- (5) 良識に欠けると思われる意見。例えば、個人あるいは組織の中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (6) 美醜、好悪に類する判断に依拠している場合。
- (7) すでに掲載された記事と同様の内容である場合。
- (8) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。
- (9) 会員にとって掲載する価値がない場合。
- (10) 余り期間を空けない同一者からの投稿。

(註 1) 記事提案書の審議結果については約 1 か月で事務局よりお知らせいたします。

(註 2) 掲載否の場合、該当事由の番号をお知らせしますが、それ以上の説明は致しません。

(改定 2012 年 6 月 1 日)

理事会だより



学会傘下の組織とは？(総務財務委員会とは？)

昨年6月に理事を拝命してから早半年が過ぎましたが、未だに理事会、委員会に出席すると初めて聞くことが多く、理事会の活動は奥が深いと実感しています。会員の皆様も支部、部会、連絡会等でご活躍されておりますが、それぞれ相互に関連するものですので、参考にしていただけるよう学会傘下の組織をとりまとめました。

1. 常置委員会

以下の13委員会があり、学会全体の運営にかかる事項を所掌する。

- ①企画委員会、②総務財務委員会、③部会等運営委員会、④支部協議委員会、⑤編集委員会、⑥広報情報委員会、⑦教育委員会、⑧国際活動委員会、⑨標準委員会、⑩倫理委員会、⑪男女共同参画委員会、⑫標準活動運営委員会、⑬会員サービス委員会

2. 支部

支部協議会にて、支部間の連絡を取りながら、研究会、オープンスクールの開催や支部表彰などを行う。

- ①北海道支部、②東北支部、③北関東支部、④関東・甲越支部、⑤中部支部、⑥関西支部、⑦中国・四国支部、⑧九州支部

3. 部会

18部会がそれぞれの分野において、会報やニュースを発行するほか、サマースクール、国際会議運営、表彰活動などを実施する。

- ①炉物理部会、②核融合工学部会、③核燃料部会、④バックエンド部会、⑤熱流動部会、⑥放射線工学部会、⑦ヒューマン・マシン・システム研究部会、⑧加速器・ビーム科学部会、⑨社会・環境部会、⑩保健物理・環境科学部会、⑪核データ部会、⑫材料部会、⑬原子力発電部会、⑭再処理・リサイクル部会、⑮計算科学技術部会、⑯水化学部会、⑰原子力安全部会、⑱新型炉部会

4. 連絡会

5連絡会において、所属会員相互の情報交換、連絡調整などを実施し、各世代間の交流の場、意見発信の機会を設ける。

- ①海外情報連絡会、②学生連絡会、③若手連絡会、④シニアネットワーク連絡会、⑤核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会

5. 専門委員会

原子力の平和利用に関する学術及び技術の調査、研

究を行う。

- ①研究専門委員会、②調査専門委員会、③特別専門委員会

我々理事は、1.の常置委員会の他、理事会運営ボード、経営改善特別小委員会、福島特別プロジェクト、福島第一原子力発電所廃炉検討委員会、役員候補選任小委員会等に担当が割り振られ(一人当たり6~11件)、活動を行っています。

このうち、私は総務を担当しており、総務財務委員会(1.②)に出席していますが、「総務財務委員会とは何だろう」と分かりにくいと思いますので、その活動の一端を紹介します。

まず、委員会は理事または理事経験者で構成されており、委員会には学会長や副会長も出席しますが、堅苦しくなく、気さくに、ざっくばらんに意見を交わしています。

委員会は毎月開催し、短くて2時間程度、場合によっては時間を延長して「学会活動がどうすれば良くなるのか」を考え議論しています。委員はボランティア(お茶なども持参)で頑張っています。

毎回議題にあがることに、「会員動向」、「予算の月次報告」があります。これは、「会員の増減具合はどうか、減り具合が大きい場合には、なんとかできないか」、「皆様からの会費など大事なお金が問題なく適切に活動に使われているか」など議論しています。

最近では「学会活動の活性化」が大きな課題となっています。現在、来年度予算を策定しているところですが、各支部、部会、連絡会等に予算策定を依頼するにあたって、学会の主要課題である「会員の獲得」や「原子力の理解促進」に役立つ予算をたて、できるだけ有効に使ってほしいと、喧々諤々の議論を繰り返しました。その結果、原子力理解獲得等のため特別準備金を用意することにしました。

この予算で実際に活動をいただく主役は、会員の皆様です。各会員の活発な活動が、学会をより良くし、盛り上げていくものと考えております。理事は、皆様をできる限り支援していきたいと努力しております。

皆様の積極的な学会活動への参加、お待ちしております。

(日本原子力発電株式会社 竹野正志)

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