ATOMOΣ 日本原子力学会誌 2019.5

## 巻頭言

1 福島から「未来を創造する力」を育む
丹野純一

## 時論

2 日本の原子力と日本原子力学会の60年を振り返る
成合英樹

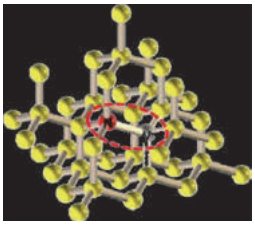
4 教育現場から見た福島県の震災復興
野ヶ山康弘

## 解説シリーズ 最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構（3）

29 量子ビーム科学研究

原子や電子，中性子などの量子はビームにすることで，物質の構造を解析したり，対象物を加工したり，ナノサイズのモノを創ったりすることができる。そんな量子ビーム研究の最前線を，ここでは紹介する。

佐藤隆博，越智義浩



ダイヤモンド NV センターの模式図

## 12 Column

「脱炭素化ビジネス」 井内千穂
「英語での放射線関連記事の一般向け配信」 妹尾優希
「風評の「一次予防」としての基礎知識」 服部美咲
「科学者のネットワーク」 坂東昌子
「七転び八起き」 渡辺真由
「ナショナリズムへの未練」 渡辺 凜

## 特集 Mayak 核技術施設作業者の放射線疫学調査研究

旧ソ連の Mayak 施設は核兵器製造のためにプルトニウムを生産していた。この施設では当初，作業遂行が優先されたため，プルトニウム吸入による体内汚染が頻繁に生じた。ここで働いていた作業者の個人被ばく線量について今，詳細な分析が進みつつある。

岩井 敏，熊澤 蕃，仙波 毅，石田健二，高木俊治

15 Mayak 生産合同施設の概要とコホートの設定

18 作業者の個人被ばく線量再構築

23 放射線疫学調査結果

## 解説シリーズ 安全かつ効率的な廃止措置に向けて（2）

34 英国における原子力廃止措置の経験

駐日英国大使館が英国での原子力施設廃止措置の教訓をまとめた。そこでは安全で効率的な廃止措置を進めるには技術ソリューションより,「人」と「プロセス」を重視することが必要だとしている。

キース フランクリン，山内豊明

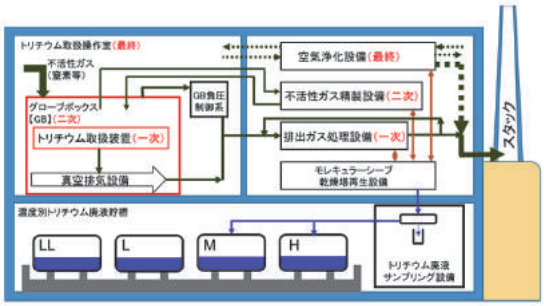
廃棄物の処理に既存の一般産業機器を使用

## 連載講座　核融合トリチウム研究最前線（第９回）

### 42　トリチウム安全閉じ込め

核融合施設では，各種化学形で漏洩しうるトリチウムを施設内に閉じ込める設備を設け，万一の事故の発生時における影響を緩和させる。そのしくみと実証研究例を紹介する。

岩井保則，枝尾祐希，磯部兼嗣



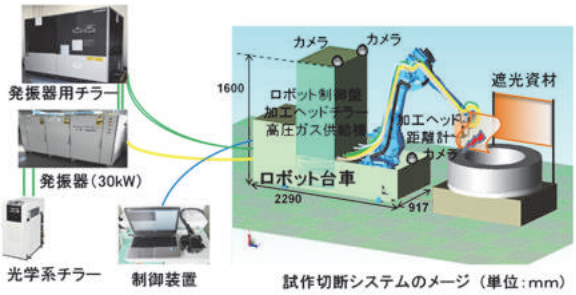

トリチウムプロセス研究棟における
安全設備の概念系統図（原子力機構）

## Short Report

### 39　厚板鋼材のレーザー切断技術 ―廃炉の時代の先端技術開発

原子炉の廃炉作業では，100mm を超える厚板鋼材の切断解体が必要とされる。その切断が可能なレーザー切断技術について報告する。

田村浩司，遠山伸一




レーザー切断システムの概念図

## 理事会だより

### 52　本年度の予算方針 留意事項や重点項目

三倉通孝

## 6　NEWS

●学会，茨城で春の年会開催
●経済同友会，原子力政策の再構築提言
●海外ニュース

## FOCUS　国内外の原子力教育事情（３）

### 48　東京大学原子力専攻（専門職大学院）の概要

長谷川秀一

## 視点　＜社会＞を語る（１）

### 51　社会学者は社会を語れているのか

齋藤圭介

## 談話室

### 47　リケジョの思い（3） ―つまずきは，扉になる

口町和香

### 学会、春の年会を茨城で開催

日本原子力学会は３月２６～２８日、茨城大学で春の年会を開催し、「原子力防災の現状と課題」などさまざまなテーマで議論を深めた。


41　From Editors
53　会告　2019 年度新役員候補者投票のお願い
55　日本原子力学会「2019 年秋の大会」発表および参加申込受付のご案内
57　会報　原子力関係会議案内，人事公募，新入会一覧，寄贈本一覧，訃報，英文論文誌（Vol.56,No.5）暫定版目次，主要会務，編集後記，編集関係者一覧
58　日米欧原子力国際学生交流事業派遣学生レポート「University of Michigan 滞在記」　梅原裕太郎
後付　第 51 回（2018 年度）日本原子力学会賞受賞概要

# 福島から「未来を創造する力」を育む

巻頭言

福島県立ふたば未来学園中学校・高等学校　校長
丹野 純一（たんの・じゅんいち）

東北大学法学部卒業後，福島県の高校で社会科教諭や教頭を務め，県教育委員会を経て，2015年に開校のふたば未来学園高等学校初代校長に就任。現在は，2019年4月に併設された中学校の校長も兼任。

巨大地震，津波，原発事故という，人類が経験したことのないような複合災害に見舞われ，いまなお，4万人以上の福島県民がふるさとを離れた地で生活しており，多くの県民が抱える困難は今なお続いている。福島に生きる子供たちは，否応なく次のような課題に向き合っていかなければならない。

第一に，全国の地域が直面する課題である。双葉郡，福島県では，日本のあらゆる地域が直面している，少子高齢化，過疎化の急激な進行などの課題が，震災と原発事故により先鋭化しており，いわば「課題先進地域」となっている。第二に，原発事故特有の課題である。故郷を汚染され，帰りたくても帰ることができないという現実。長期にわたる避難生活。差別と偏見。コミュニティ内での対立と分断。

このような中，私たちは，これまでの価値観，社会のあり方を根本から見直し，持続可能な循環型社会の実現，自立した新たなコミュニティ・まちづくり，再生可能エネルギー社会の実現など，新しい生き方，社会の建設を目指し，変革を起こしていくことが求められている。それは，震災と原子力災害を経験した私たちに，未来から課せられた使命，ミッションと言うこともできる。私たち人間は，理想とする未来の姿を思い描きながら，いま，ここにある現実を，少しずつ，少しずつ変えることができる存在であり，それは未来を創造することにほかならない。

逆に，人間は，既存の生き方や価値観，システム，社会のあり方に黙従し，思考を停止したままでも生きていくことはできる。しかし，そこには人間の自由はなく，約束された未来もない。 震災と原発事故を経験した私たちは，世界中の誰よりもそのことをよくわかっている。

震災と原発事故を機に双葉郡に2015年に開校したふたば未来学園高等学校は，「自らを変革し，地域を変革し，社会を変革する「変革者たれ」」，これを建学の精神とし，変革のための理念として，既存の価値観，システムに過剰に依存することなく自律心を持って自分の頭で考えぬく主体性を身につける「自立」，どんな困難な課題にも多様な主体と共に力を合わせて立ち向かう「協働」，これまでの社会のよさに磨きをかけながら新しい生き方，社会を創りだしていく「創造」を校訓とし，「未来創造型教育」を展開してきた。

生徒たちは，役場や商店，病院，企業などを訪問して出会った，解が見えないような困難な課題を題材とした対話劇を創り上演し，協働性，寛容性などコミュニケーション力や本質をつかむ力を身につける。さらに，ベラルーシ，ドイツ，アメリカなどでの研修を通して，福島と世界の課題を重ね合わせ，持続可能な世界実現の課題意識を深めていく。加えて，地域の課題を解決する数十ものプロジェクトを自分たちの力で立ち上げ，地域の様々な主体と協働しながら実践まで行う。

このような，企業，NPO，行政，研究機関など多様な主体と協働する学びを通して，本誌本年1月号時論記事に掲載いただいた本校生をはじめ多くの生徒が，失われた故郷を取り戻し自分たちで新しく創ろうという意志，困難な状況にあるからこそ可能なことを構想する創造性を身につけ，困難を乗り越え夢に向かって自立への第一歩を踏み出している。この4月には地域協働スペースも備えた念願の新校舎が竣工すると共に中学校を併設し本校は新しいステージへ進んでいる。これからも，未来を創造する力を育んでいきたい。

（2019年3月8日 記）

時論

# 日本の原子力と日本原子力学会の60年を振り返る

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

## 日本の原子力と日本原子力学会の設立

原子力の平和利用は1953年12月8日の米国アイゼンハワー大統領による「Atoms for Peace」の提唱から始まった。日本では54年3月に原子力予算が衆議院を通過したが，一方この3月にはビキニ環礁での水爆実験により第五福竜丸が被災して後に久保山愛吉さんが亡くなった。長年原子力の研究に対し慎重論が強かった日本学術会議も4月に原子力研究に関する民主・自主・公開の3原則の声明を出し，平和利用に関してはこの3原則の下で容認することとした。このようにして日本では超党派の賛成により原子力平和利用推進の体制作りが始まった。55年には原子力基本法と原子力委員会設置法等原子力3法が成立し，56年に国の原子力委員会，科学技術庁，産業界の日本原子力産業会議(原産)，研究機関の日本原子力研究所(原研)，原子燃料公社(原燃)等が設立されて官民の研究開発体制が整えられていった。また大学も原子力に関わる学科や大学院専攻の設置が行われ，56年に東海大，57年に東工大・京大・阪大と進んだ。57年に日本学術会議が主催して原子力シンポジウムが開かれた。同年には日本原子力発電(原電)の設立と英国の黒鉛減速炭酸ガス冷却炉の改良型炉採用が決定され，米国で開発が進む沸騰水型と加圧水型軽水炉(BWRとPWR)導入の準備が進むなど原子力の平和利用は産官学をあげて推進された。

日本原子力学会は1959年(昭和34年)2月14日に設立された。皇太子のご成婚式が2か月後の時である。以下に10年ごとの原子力と日本原子力学会を振り返る。

## 学会設立から10年(1959〜69)

1958年4月に大学入学した筆者は62年(昭和37年)に大学院に進み原子炉の伝熱流動の研究を行った。日本では米国で開発されつつある軽水炉に関し，1963，64年度に日立・東芝・三菱等産業界により工学的安全性に関する国のSAFEプロジェクト研究を進め，非常用炉心冷却系ECCSや格納容器冷却系の有効性等の研究を行い米国からも高い評価を得る成果を得た。また原研の動力試験炉JPDRが63年10月26日に発電試験に成功し，翌年より10月26日が日本の「原子力の日」となった。65年に原電東海発電所のガス冷却炉が臨界に達し，67年に動力炉・核燃料開発事業団(動燃)の発足，68年に原研の材料試験炉JMTRの臨界，69年に原子力船「むつ」の進水と進んだ。

日本原子力学会は，学会誌，欧文論文誌の刊行，各種委員会・連絡会，関西支部設置，63年の「原子力総合シンポジウム」「年会」「分科会」の発足等を進めた。69年に日本原子力学会創立10周年記念式が行われ，第1回日本原子力学会賞が授与された。このように最初の10年は日本の原子力発電施設の導入整備と各種試験炉の建設・試験等で日本原子力学会も学会の体制を整え，シンポジウムや学会誌等の研究成果の発表の場の提供等を進めた。

## 学会設立10年から20年(1969〜79)

日本原子力学会設立10年後からの10年間を振り返る。軽水炉の建設が進み1970年3月に原電敦賀発電所1号(BWR)，8月に関西電力(関電)美浜発電所1号(PWR)，さらに71年3月に東京電力(東電)福島第一原子力発電所1号(BWR)が送電を開始し，その後も建設が進み10年間で20基の軽水炉が営業運転を開始した。また動燃が建設した重水減速沸騰軽水冷却の新型転換炉ATR「ふげん」が79年3月に定常運転入りした。運転開始した軽水炉には応力腐食割れSCC等の初期トラブルが発生し対応がなされた。軽水炉の熱水力安全性に関し原研でSAFEプロジェクトを引き継いでROSA計画が進められたが，71年に米国アイダホ研究所でECCSの性能に関する問題が生じた。日本では安全研究促進のため原研で原子炉安全性研究炉NSRRの建設や再冠水試験等が進められると共に，76年に財団法人原子力工学試験センターNUPECが設立され安全性の実証試験等が行われた。74年に原子力船「むつ」の洋上での航海試験中に放射線漏洩問題が生じ，反対運動によって一時漂流することとなった。それらをふまえ，開発と規制を分離する規制体制の変更が進み78年10月に原子力安全委員会の設置となった。米国で75年に原子力委員会AECがエネルギー研究開発局ERDAと原子力規制委員会NRCに分離した影響もある。日本の原子力安全委員会設置半年後の79年3月に米国でTMI事故が発生した。

日本原子力学会は引き続いて原子力総合シンポジウム，春の年会，そして75年に各分科会を統合して行うこととなった秋の大会の開催，学会誌・英文論文誌の発行を進めた。支部活動は学会設立と同時期に設置された関西支部だけであったが，その後69年の中部支部以降順次支部を設置し2000年の北関東支部と関東・甲越支部設置で8支部が揃った。また国際的な活動も開始された。

### 学会設立20年から30年(1979〜89)

この頃の日本は景気が良く，原子力発電炉建設は順調に進んで発電量に占める原子力の割合も20%を超えた。柏崎刈羽6，7号機の改良型沸騰水型軽水炉ABWRの安全審査も始まり，高速増殖炉FBR「もんじゅ」も建設へと進んだ。従って79年のTMI事故や86年のチェルノブイリ事故等の海外事故の直接的な影響は少なく，81年の敦賀発電所の放射性廃液漏洩や89年の福島第二原子力発電所3号炉再循環ポンプ破損事故も大きな影響はなかった。

日本原子力学会では企画委員会と編集委員会を中心とした活動が続いた。国際活動が次第に増え，分野として核融合や放射光・中性子科学等の基礎科学が増加した。

### 学会設立30年から40年(1989〜99)

平成に入ったこの期間は91年のバブル崩壊もあり，失われた十年と言われる停滞感の漂った時期であり，東西ドイツの統一，旧ソ連の崩壊に伴うグローバリゼーションの始まりでもあった。それと共に国際原子力機関IAEAの活動が目につくようになり，また情報化社会が進展した。日本の発電量で原子力発電の割合が83年に30%を超え，東電柏崎刈羽原子力発電所のABWRも96年に建設された。しかしこの時期には89年の東電福島第二原子力発電所3号機再循環ポンプ破損事故，91年の美浜2号機蒸気発生器細管破損事故，95年の高速増殖原型炉「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故が発生すると共に，95年には阪神大震災も発生した。バブル崩壊と国際化・情報化社会における従来の社会システムの対応の遅れに伴う停滞感もあった。大学においても学科名称等で「原子力」の名前が少なくなっていった。

日本原子力学会では国際化時代を反映し，91年に環太平洋原子力協議会PNCと国際原子力学会協議会INSCへの加盟，92年に国際協力委員会(後の国際活動委員会)の設置が行われると共に国際会議の主催・共催が進んだ。また96年の仏原子力学会を皮切りに協力協定を結び現在13カ国の原子力学会と協力協定を結んでいる。また分野別に長年進められてきた研究連絡会の活性化と分野の拡大を目指して93年に部会制が導入された。これにより基礎分野に加え社会に関わるバックエンドや社会環境等が加わり，現在19部会が設置されている。また社会的責任を果たす活動として97年にホームページの開設，98年に分かり易い解説書「原子力がひらく世紀」の発行を行った。

### 学会設立40年から50年(1999〜2009)

原子力界において行政改革で省庁の再編が行われ，2001年に原子力安全・保安院NISA，03年に原子力発電技術機構(旧原子力工学試験センター)・発電設備技術検査協会・原子力安全技術センターを統合した原子力安全基盤機構JNES，05年に日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構を統合した日本原子力研究開発機構JAEAができた。一方，99年9月30日にJCO臨界事故，02年に東電による自主点検記録の不正記載，04年に美浜発電所3号機二次系配管破断事故による11名の死傷者発生があって電力会社への不信感も強まり，高速増殖炉「もんじゅ」や六ケ所村の再処理施設もなかなか前へ進まなかった。また米国の原子力回帰や中国・インド等の積極的な建設計画があり，日本も05年に原子力政策大綱，06年に原子力立国計画を作成し世界の原子炉建設計画への対応を考えた。日本のプラントの稼働率が低下して上昇しないことも問題であった。

日本原子力学会は産官学の専門家の最新知見を集め中立的な立場で原子力の規格基準作成を行うことが重要であるとして99年に標準委員会を設置して活動を開始し，現在約80件の標準を制定した。また原子力関係者の倫理に関わる問題も重要で01年9月に前文・憲章・行動の手引よりなる倫理規定を制定した。原子力関係者の技術士資格では01年に日本原子力学会より技術士資格に原子力部門設置を文科省に要望して認められ，現在原子力・放射線部会となっている。事故調査として99年に「JCO臨界事故　その全貌の解明事実・要因・対応」を出版し，要望のあったIAEAへも英文の報告が送られた。

### 学会設立50年から60年(2009〜19)

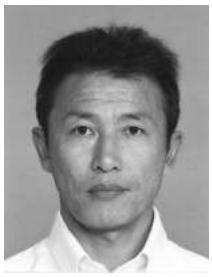
原子力界では2011年3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故が大きな問題であった。この事故では原子力を推進する資源エネルギー庁と規制する原子力安全・保安院が同じ経済産業省にあることが問題とされ，内閣府原子力安全委員会と原子力安全・保安院をまとめて環境省の外局として原子力規制委員会を置き，同委員会の事務局として原子力規制庁を置いた。12年9月19日に原子力規制委員会が発足し，14年3月1日に原子力規制庁に原子力安全基盤機構が統合された。

日本原子力学会は東日本大震災と福島第一原子力発電所事故において，海外への情報発信，各委員会での調査検討と関連学協会との連携協力，福島第一原子力発電所事故に関する特別シンポジウム等を行うと共に，14年には事故をふまえて定款と行動指針の改定や「福島第一原子力発電所事故　その全貌と明日に向けた提言」の報告書出版を行った。

以上筆者が見てきた日本と日本原子力学会の60年を振り返った。今後グローバリゼーションと情報化社会が一層進む中で，日本原子力学会がこれからの原子力を更に進展させることを期待する。　(2019年1月30日 記)

時論

# 教育現場から見た福島県の震災復興



野ヶ山 康弘（のがやま・やすひろ）
京都教育大学附属京都小中学校・研究主任
岡山大学大学院教育学研究科修了。
愛知県の公立学校教員として小学校と中学校を14年間歴任。その後，京都教育大学附属京都小中学校で9年間勤務し現在に至る。現在は研究主任として，義務教育カリキュラムの開発に取り組んでいる。

2011年3月11日，東北地方太平洋沖地震が起こった。この巨大地震によって大津波が発生し，地震の揺れそのものの被害以上に津波による被害を大きく受け，たくさんの命を失う東日本大震災となった。さらに，福島第一原子力発電所では，電源喪失による爆発事故が連続し，福島県内の広範囲に放射性物質が降り注ぎ，8年経った今でもその影響は計り知れないものがある。この原発事故によって原子力発電の是非やエネルギー問題，放射能汚染による健康被害など，今日的な重要課題として騒がれるようになった。

このような中，教育現場では正しい知識をつけるために放射線教育やエネルギー教育の必要性が叫ばれるようになり，文部科学省から放射線教育の副読本が配付されたり，全国各地で授業実践が盛んに行われたりするようになった。

しかし，東日本大震災から8年が経ち，当時に比べると教育現場では教える内容が変化してきている。放射線教育を積極的に取り組んでいる学校が減ってきたり，放射線教育が形骸化してきたり，再生可能エネルギーの活用が叫ばれるようになったりして，震災当時の様子やそこにある課題と向き合う時間が減ってきているように感じる。このような時間の経過の中で感じることは，年々，風化が進んでいるということである。それゆえに，生徒に対して震災を話題にしたとき，「もう東北地方は復興が進んで普段の生活ができるようになっている」，「福島は原発事故の影響で広い範囲が未だに放射線によって危険だ」，「安易に原発反対や賛成を述べる」など，現実や事実と異なる生徒たちの意見が大多数を占めている。

その原因として考えられることは，教育現場において震災や原発事故を学習課題として取り上げても，被災地から遠く離れた地域で生活している生徒にとって「他人事から自分事」にして考えていくことが難しいからである。また教師自身がその課題に必然性を感じなかったり，放射線という未知な部分が多いものを扱うことに自信が持てなかったりという実態も影響している。

さらに，震災について得られる情報が偏っていないか，正しく情報発信されているかなど，疑問も多いということである。震災直後から現在に至るまで，多くの人々にとって主な情報源はマスコミであることが多い。震災1年半後に福島県の浜通りを訪問する機会があり，その時感じたことはマスコミから得られる情報と現地を訪れて得られる情報との間にある大きな隔たりであった。なぜ現地の情報が外に向けて出てこないのか，震災直後の混乱の影響もあったのかもしれないが，これは震災直後も現在もあまり変わっていないように感じる。現地に行かなければわからないことがあまりにも多すぎ，その中で生徒たちの情報源はマスコミやインターネットに頼っているため，一部の情報しか得られていないように感じる。

この東日本大震災や原発事故の抱えている課題というものは，被災地で解決していけばよいというものではなく，今を生きる人々だけで解決していけるものではない。被災地だけでなくあらゆる地域，あらゆる世代の人々で解決していかなければならい課題である。そのためには，これからの未来を創っていく生徒たちが「自分事」としていく機会を持つことが必要であり，その機会を設けることが教育現場の役割として重要ではないだろうか。

特に，最近では震災からの復興が進んできている様子がマスコミでよく流れるようになってきた。しかし，その陰で福島の震災復興の抱える課題はとても重く，解決には次世代まで引き継がなければならないことも多く存在する。その課題に「自分事」として向き合い，今後の未来を創造していくことが，生徒にとって必要なことであると考える。

そこで，被災地から遠く離れたところで生活する生徒に対して，「福島の震災復興」と向き合う機会を設定し，その課題を「自分事」として主体的に課題解決する力を養うことを目指すことにした。

この力を養っていくために必要な条件として，①被災地の正しく確かな情報を得ること，②科学的な知識を身に付けること，③被災地の同世代の生徒と交流して現地の思いを共有すること，という3つの条件が必要であると考える。被災地の福島であるとか，被災地から遠い京都であるとか関係なく，正しい情報と確かな科学的知識に基づいて，同じ未来に向かう若者同士が知恵を出し

図１　福島震災復興プロジェクトの活動内容

合って，主体的に課題解決に向う姿が見られるのではないか，そしてこの姿が震災復興を明るい未来につなげる力となるのではないかと考える。

まず課題設定として，「福島震災復興」をキーワードに「福島震災復興プロジェクト」として活動内容を図１のように構成した。

確かな情報としてマスコミの情報だけでなく，現地で収集した情報を基にした活動ができるようにしたり，科学的知識を得るために専門家の特別授業を設定したりした。さらに，同世代同士の交流母体として福島県Ａ高校自然科学部と本校８年の生徒を設定した。

当時８年生であった９年生は，両校の生徒交流の場として両校の代表生徒が東京で行われたサイエンスアゴラに参加してこれまでの取り組みを共同発表したり，本校代表生徒が福島県の被災地とＡ高校を訪問したり，ユネスコスクール発表会にビデオレターを送ったりして交流を深めた。現在の８年生はこの交流を先輩から受け継ぎ，Ａ高校の代表生徒が京都を訪れたり，両校の代表生徒が一緒に福島復興に関するイベントや中学生サミットに参加したり，本校代表生徒が福島県の被災地とＡ高校を訪問したりして，さらに相互交流を深めてきた。

この取り組みによって，生徒の主体的な学びが喚起されているかどうか検証[1)]するために，福島の震災復興を題材としたカリキュラムを２年間取り組んできた９年生とこのカリキュラムを取り組む前の８年生に対して，表１のアンケート調査を行い，４種類の動機づけごとに主因子法による因子分析によって１因子性の確認を行ったところ，いずれも .40 以上の高い因子負荷量を示した。次いで，クロンバックのα係数を算出した結果，内発的動機づけは .85，同一化的動機づけは .83，取り入れ的動機づけは .84，外的動機づけは .85 の値を示し，高い信頼性が確認できた。

表１　アンケート調査項目

| | |
|---|---|
| 内発的 | ①好奇心が満たされるから。 |
| | ②知識を得ることで幸せになれるから。 |
| | ③その内容が知りたいから。 |
| | ④知識や能力が身につくのがうれしいから。 |
| | ⑤内容を理解できるようになるのがうれしいから。 |
| | ⑥難しい内容を学ぶのが楽しいから。 |
| | ⑦おもしろいから。 |
| | ⑧教材や本などがおもしろいから。 |
| | ⑨自分がそうしたいと思うから。 |
| | ⑩考えたり，頭を使ったりするのが好きだから。 |
| 同一化的 | ⑪将来いろいろなことに役に立つから。 |
| | ⑫将来の成功に結びつくから。 |
| | ⑬就職試験や職業にとって必要だから。 |
| | ⑭自分の能力を高めることになるから。 |
| | ⑮そうすること自体が大切なことだから。 |
| 取り入れ的 | ⑯しておかないと恥ずかしいから。 |
| | ⑰しておかないと不安だから。 |
| | ⑱きまりのようなものだから。 |
| | ⑲しなければならないようになっているから。 |
| | ⑳課題などのやらなければいけないことを与えられるから。 |
| | ㉑今の社会ではしなければならないようになっているから。 |
| 外的 | ㉒まわりからやれと言われるから。 |
| | ㉓親がうるさいから。 |
| | ㉔しないとまわりの人が文句を言うから。 |
| | ㉕親を悲しませたくないから。 |
| | ㉖やらされているから。 |

表２　アンケート分析結果

| 動機づけ | ９年生 | ８年生 | 全　体 |
|---|---|---|---|
| 内発的動機づけ | 3.20 (86) | 3.40 (79) | 3.30 (165) |
| 同一化的動機づけ | 3.33 (86) | 3.57 (83) | 3.45 (169) |
| 取り入れ的動機づけ | 2.03 (87) | 2.13 (83) | 2.08 (170) |
| 外的動機づけ | 1.67 (86) | 1.83 (83) | 1.75 (169) |
| 自律的動機づけ指標 | 4.35 (84) | 4.55 (78) | 4.45 (162) |

これらをふまえ，それぞれの動機づけの質問項目群の平均値を算出し，尺度得点とした。これをもとにして，尺度の妥当性に関する検討を行うために，４種類の動機づけの間の相関係数も求め，シンプレックス構造をなしていることを確認した（r = − .06 から r = .71 までの範囲の値を示した）。

９年生と８年生，全体の尺度ごとの平均値を算出し表にしたものが表２であり，「内発的動機づけ」× ２ +「同一化的動機づけ」× １ −「取り入れ的動機づけ」× １ −「外的動機づけ」× ２ の数式によって，自律的動機づけ指標についてもあわせて算出することにした。この指標は正の大きな値を示すと，内発的動機づけや同一化的動機づけが高く，外的動機づけや取り入れ的動機づけは低い，という傾向性を表すことになる。９年生と８年生の平均値の間に差異がみられるかどうか，統計的検定を試みたが有意差がみられなかったが，「あてはまる」から「あてはまらない」までの５件法で尋ねていることから，意味上の中央値は３点になった。どちらの学年も全体の平均について値をみれば，内発的動機づけや同一化的動機づけが高く，外的動機づけや取り入れ的動機づけは低い，という方向へ傾いていることがうかがえ，自律的動機づけ指標は大きくはないが，正の値を示した。

このことから「福島の震災復興」と向き合う機会（①確かな情報，②科学的知識，③生徒間交流）を設けることで，その課題を「自分事」として主体的に解決していこうとしていることが考えられる。したがって，「福島の震災復興」を「自分事」としていく取り組みは，教育現場において必要なことと言えるのではないだろうか。

（2019 年 2 月 18 日　記）

－　引 用 文 献　－

1) 野ヶ山康弘，谷口和成，伊藤崇達（2019）：「生徒の意欲を喚起する授業デザインの構築Ⅰ～震災復興期の福島から学ぶ～」，教職キャリア高度化センター教育実践研究紀要第１号 pp101-109.

# News

## 原子力学会，茨城で春の年会開催

日本原子力学会は 3 月 20～22 日の 3 日間，茨城大学で春の年会を開いた。

「原子力防災の現状と課題」をテーマにしたセッションでは内閣府官房審議官の荒木真一氏が，原子力緊急事態宣言の際に設置される原子力災害対策本部と原子力災害現地対策本部（オフサイトセンター）の役割について説明。原子力発電所立地地域では地域原子力防災協議会を設置して，緊急時対応を取りまとめている現状を紹介した。また，茨城県原子力防災調整監の土信田法男氏は万一の事故の際を想定して，広域的な避難先や避難経路，避難の流れを盛り込んだ茨城県広域避難計画を策定。これにもとづいて東海第二発電所に近い 14 市町村と，避難所の割振りや避難所までの経路設定などの具体的な協議を進めていると説明した。さらに茨城大学の原口弥生教授は，震災被災者にうつ傾向や PTSD 症状が高いことを紹介した上で，外から見える生活再建と，当事者の心の状態の乖離がみられることを指摘。防災計画では「どう避難するか」だけではなく，「避難後の生活をどうサポートするのか」まで含めた視点からの取り組みの必要性を訴えた。　（原子力学会誌編集委員会）

## 経済同友会が原子力政策の再構築を提言

経済同友会は 2 月 28 日，今夏開催予定の G20 の議長国として日本が検討を進めている「パリ協定長期戦略」に向けて，提言「2030 年目標の確実な達成と 2050 年の展望」を発表した。

現在，政府有識者懇談会で策定への議論が行われている「パリ協定長期戦略」は，温室効果ガス低排出型の経済・社会の発展を目指す未来の成長戦略となるもの。現在の政策で 2030 年に向けては，エネルギーミックスとそれに基づく温室効果ガス削減目標（2013 年度比で 26％減）が，さらに長期的目標としてパリ協定を踏まえ，地球温暖化対策と経済成長を両立させながら「2050 年までに 80％の温室効果ガス排出削減を目指す」ことが掲げられている。

今回発表された提言は，東日本大震災以降の化石燃料の消費増や米国によるパリ協定離脱表明などに鑑み，経済同友会の環境・資源エネルギー委員会が，2030 年までに取り組むべき課題と，2050 年以降のシナリオを考える上で着手すべき課題を整理したもの。

2030 年エネルギーミックスが掲げる「再生可能エネルギー 22～24％（電源比率）」，「原子力 22～20％（同）」との目標について提言では，再生可能エネルギーの多くを占める太陽光発電は日照時間に左右され，原子力についても「社会的受容の低さ，核燃料サイクル・最終処分の未決着などがボトルネック」と指摘し，目標達成は不可能と警鐘を鳴らしている。その上で，(1)再生可能エネルギーの大量導入，(2)原子力政策の再構築，(3)高効率石炭火力による $CO_2$排出低減――の諸課題解決が急務であると強調。再生可能エネルギーの導入促進に向けては，市場メカニズムの活用や利水・治水を目的としたダムの発電利用などをあげた。

原子力政策については，国民に対する明確な意思表明とともに，原子力事業環境の整備も国が民間任せにせず責任を持って取り組むべきことを訴えている。また，使用済み燃料問題を「喫緊の課題」ととらえ，核燃料サイクル政策に関する方針を明確化し，高レベル放射性廃棄物の処分地選定も国が前面に立ち 2020 年までに調査段階に進むようプロセスを加速することを求めている。さらに，国家主導の原子力人材育成の仕組みづくりに関して，英国政府が 6 月に公表した支援政策「原子力セクターディール」を例示した。同政策では，民間企業と協力した高等学校への専門家派遣・インターンシップや，原子力労働者の女性割合を 2030 年までに 40％に引き上げる目標などが盛り込まれている。

2050 年以降を見据えた課題としては，小型で安全性・経済性に優れた次世代原子炉の研究開発の推進や，核融合を始めとする「ムーンショット」（野心的な構想）への挑戦などをあげている。

（資料提供：日本原子力産業協会）

## 海外ニュース（情報提供：日本原子力産業協会）

【国際】

### WANO が上海に支援センター設置へ

世界原子力発電事業者協会（WANO）は 2 月 22 日の臨時総会で，中国の上海に新たな支部を置くことを決定したと発表した。同支部はロンドン調整センターによる管理の下，支援センターに移行していく計画だが，今後開催される臨時総会での表決いかんでは，本格的な地域センターに昇格する可能性があるとしている。

WANO はチェルノブイリ事故後の 1989 年，世界 30 か国以上の国と地域で約 460 基の商業炉を運転する事業者が，安全性と信頼性の改善支援を行うために設立した非営利の国際組織。理事会の事務局として「調整センター」が英国ロンドンとその支所が香港に置かれているほか，「地域センター」が米国のアトランタ，ロシアのモスクワ，仏国のパリ，および東京の 4 か所に設置されている。

上海に支部を置くという決定は，世界で建設中の商業炉の約 3 分の 2 が位置するなど，同国を含めたアジア地域全体で，原子力発電所の劇的な開発成長に応えるという WANO の戦略に基づいている。中国の商業用原子力発電設備容量は今や，米国，仏国に次いで世界第 3 位に躍進。上海のセンターを通じて，WANO は世界最速の商業炉開発地域の事業者に対し，建設段階から安全性と信頼性の高い原子力発電所に移行する際の，様々なサービスを一層容易に提供できるとしている。

WANO の P．プロゼスキー CEO は，上海支部の設置が表決されたことを歓迎。過去 30 年以上が経過するなかで，中国は商業用原子力部門の中心的存在になったとしており，WANO が支援するメンバー企業が中国で増加したことは喜ばしいことだと述べた。

上海センターへ移行するにあたって，WANO は 3 段階の開発モデルを策定している。まず，(1)ロンドン調整センターによる監督管理の下で，約 40 名のスタッフを擁する上海支部を設置。(2)同支部はその後，支援センターに移行していくが，監督管理は引き続きロンドン・センターが行う。(3)最終段階として，WANO は改めて臨時総会を開催し，本格的な地域センターとするかという点について表決することになる。

WANO では現時点で，中国核工業集団公司（CNNC）とその傘下の秦山核電公司，福建福清核電公司，三門核電公司などが WANO 東京センターに所属している。一方，中国広核集団有限公司（CGN）と傘下の陽江核電公司，台山核電合営公司，福建寧徳核電公司などはパリ・センターのメンバー。このほか，国家電力投資集団公司（SPIC）および同公司が出資する海陽山東核電公司，中国 5 大電力の 1 つである中国華能集団などはアトランタ・センターの所属となっている。

### IEA 事務局長，原子力設備の減少防止で政治的アクション訴え

国際エネルギー機関（IEA）の F．ビロル事務局長は 2 月 28 日，米国議会上院のエネルギー・天然資源委員会が開催した公聴会で証言を行い，効果的な政治的アクションを取らない限り，原子力発電でかなりの設備容量が失われていくことになると警告した。

この公聴会は，米国の役割も含めた世界のエネルギー市場の将来見通しに関するもので，ビロル事務局長はエネルギー専門機関である IEA の視点から，まず近年の動向について説明。最後の部分では原子力発電設備について，「米国の主要な資産と捉えるべきだ」と発言しており，米国は，フランスやロシア，日本などとともに 60 年にわたって原子力発電技術でリーダー的立場を維持してきたが，米国の政策が変わらなければ，新たなリーダーとして今後は中国が台頭することになるとの認識を表明した。

同事務局長によると，中国は過去 20 年間に原子力発電開発を急速に加速し，2000 年に 3 基だった商業炉の数は昨年末までに 46 基に拡大。このまま行けば，10 年以内に中国が米国を追い抜き，原子力設備で世界第 1 位になる見通しである。

米国の原子力発電所は今もなお，太陽光と風力を合わせた低炭素電力の約 2 倍の量を発電するなど，電力供給保証の維持という点で重要なベースロード電源。異常な寒波に見舞われて，電力とガスの需要量が増大した北部地域においては，太陽光発電量が不足する時期などは特に原子力が重要となるほか，原子力であれば周波数の制御やその他のシステム・サービスが可能だと述べた。

事務局長はまた，小型モジュール炉（SMR）など原子力発電関係の技術革新に，近年は国際的に開発意欲が増大していると指摘。工場で組立ができるほか，場所を選ばずに建設が可能という柔軟性，先行投資額も少なくて済むなど複数の利点を挙げた上で，米国が指導的役割を果たせる技術革新上のさらなる機会になるとしている。

しかし，米国の原子力発電所は，今や大きな課題に直面していると事務局長は強調。政策面で効果的なアクションを取らなければ，設備容量のかなりの部分が失われていく方向にあり，エネルギーの供給保証とクリー

ン・エネルギーの確保という2つの目標の，どちらについても害を及ぼすとした。

最も優先すべき事項としては，既存の原子力発電所の保護を挙げており，安全性が確保される限りは原子力発電所の運転期間を延長すべきだと指摘。同事務局長は，米国内の大部分の地域でこのことは「課題」になるとしたが，その理由としては，エネルギーの供給保証やクリーン・エネルギーの確保に対する原子力の貢献に，電力卸市場が価値を見出していない点を挙げた。原子力によるこのような貢献を長期的に維持するためにも，米国はSMRを含めた新しい原子力技術革新を継続的に加速していく必要があると説明している。

## フォーラトム，低炭素実現に原子力は必要と強調

フォーラトム（欧州原子力産業会議）は2月7日に新しいポジション・ペーパーを公表し，欧州連合（EU）が加盟国住民に信頼性の高い適正価格な電力を供給しつつ，持続可能で低炭素な未来を約束する際，原子力が一助になるとの見解を表明した。

EUのこのような目標の達成に向けて，原子力には主に次の3点，すなわち(1)環境面での持続可能性，(2)エネルギーの自給，(3)経済への貢献――において利点があると指摘。その上で，EUが推進する2050年までの戦略的長期ビジョン「クリーン・プラネット・フォー・オール」では，原子力の果たし得る役割が確認済みであるとした。すなわち，2050年までに欧州でカーボン・ニュートラルな状態（$CO_2$の排出量と吸収量が同量）を達成するには，原子力が再生可能エネルギーとともに，欧州の無炭素な電力システムにおいて支柱的存在になると説明。可能性のある8つのシナリオのいずれにおいても，かなりの発電シェアを原子力が担っている点を強調している。

フォーラトムのY．デバゼイユ事務局長によると，欧州委員会（EC）は欧州の低炭素な未来における重要な要素として，原子力を「正しい方向に向けた一歩」と認識。原子力には$CO_2$の排出量を抑える能力があるのみならず，エネルギーの供給保証面，環境面や経済面および社会的な側面においても持続可能であるなど，多くの利点を備えている点に目を向けることは大事なことだとした。

今回のポジション・ペーパーで，フォーラトムはEUにおける持続可能な未来や，EU諸国がカーボン・ニュートラルな状態となる上で，原子力がどれほど貢献可能であるかを集中的に取り上げている。原子力はEU諸国が$CO_2$の排出レベルを下げるのに役立つだけでなく，SOxやNOxなどの危険な大気汚染物質を基準値以内に抑えるのにも役立つと指摘。原子力発電所はほかのエネルギー部門と比べて廃棄物の排出量も少なく，原子力産業界は核燃料サイクルのバックエンド全体についても策を講じている。必要な土地の面積も，風力や太陽光といったその他の低炭素電源と比べて，大幅に少なくて済むとした。

また，原子力がもたらすその他の重要な貢献は，エネルギーの自給レベルを上げられる点だとしている。EUが消費エネルギーの約半分を輸入で賄っていることや，加盟国の多くが単一の外部供給国に依存していることからも，この貢献は必要不可欠である。また，高いエネルギー密度や供給力，エネルギー供給源の多様化，信頼性などの点で原子力には利点があり，化石燃料の輸入依存を低減する上で大きく寄与しているとした。

フォーラトムはさらに，原子力が経済的にも社会的にも持続可能なエネルギー源であると強調。発電コストの観点では，原子力は燃料価格の急上昇から影響を受けにくく，経済協力開発機構・原子力機関（OECD/NEA）も「発電コスト予測」報告書の中で，「耐用期間中の均等化発電コスト（LCOE）」に基づけば原子力は陸上風力発電とともに最もコスト面で効率性が高い，低炭素なエネルギー源であるとしている。

また，原子力産業界は高度な技術を必要とする雇用を長期的かつ大量に創出するなど，その国の経済成長にも大きく貢献していると明言。フォーラトムの試算では，原子力産業界は欧州で約8万人の雇用を提供したとしている。

**【米国】**

## 原子力産業界，世界市場での地位奪還に向け大統領と協議

米国で小型のペブルベッド高温ガス炉を開発中のX－エナジー社，および核燃料企業のライトブリッジ社は2月13日，両社を含む米原子力産業界の大手企業幹部らが前日，トランプ大統領からホワイトハウスに招かれ，世界の原子力市場で米国サプライヤーがリーダーシップを取り戻し，他国との競争に打ち勝って契約を受注していくための方策を協議したことを明らかにした。

この会合の開催は，原子力関係のコンサルティング企業，IP3インターナショナル社を創設したJ．キーン氏が手配したと言われている。同社のウェブサイトからリンクされた一般紙報道によると，同会合にはウェスチングハウス社やGE社，エクセロン社に加えて，小型モジュール炉（SMR）や革新的原子炉を開発中のニュースケール社とテラパワー社，濃縮ウラン供給企業のセント

ラス・エナジー社のトップも参加。米国で開発された新型炉やSMRなど，次世代原子炉を今後，海外市場に幅広く販売していくため，連邦政府の承認を求めるとともに，中東その他の地域の新設プロジェクトでロシアや中国，フランスなどとも競合できるよう，財政面での支援も要請したとしている。

ライトブリッジ社の発表によると，原子力産業界の幹部らはこの会合で，核不拡散や安全・セキュリティ面で強固な基準を世界市場にもたらすため，米国の産業界がいかに貢献しているかを説明した。参加者らはまた，米国の原子力サプライヤーが保有する長所が，海外案件で米国企業が勝利する際，極めて重要となる国内の産業基盤にどれほど寄与しているか議論したという。

同社のS．グラエ社長兼CEOは，「エネルギー産業はどこの国においても重要なインフラを象徴するものであり，このような世界的規模の分野で米国がリーダー的立場を維持するために，様々な意見を共有できる機会というのは貴重だ」と述べた。また，強固な国内産業基盤は国家の安全保障や経済政策などとも連携しており，技術革新や近代的なインフラ，質の高い生活といったものを促進していく上で，役に立つという考えにも同意するとしている。

一方，X－エナジー社のJ．C．セルCEOは，固有の安全性を有する同社の新型炉技術であれば炉心溶融の危険性もないため，世界市場で米国の産業界が地位を回復することに貢献できると述べた。世界人口が爆発的に増加し，経済も拡大していくなか，我々は深刻なエネルギー危機に陥る危険性があると指摘。その上で米国の原子力産業界は，米国におけるエネルギー供給保証と国家安全保障のために，また世界に対して最も高い安全基準を保証していくためにも，世界の原子力産業界でリーダーシップを取り戻さねばならない。そのためにも，米国の原子力産業界は大統領を支持し，大統領が要請するように，世界の原子力技術レースで勝利していくとの考えを表明している。

【カナダ】

## SMRプロジェクト，募集プロセス第2段階へ

カナダ原子力研究所（CNL）は2月15日，CNLの管理サイト内で小型モジュール炉（SMR）の実証炉を建設・運転するという独自のプロジェクトで，2社を募集プロセスの第2段階に招聘したことを明らかにした。このうち1社は，電気出力19.5万kWの小型モジュール式・一体型溶融塩炉（IMSR）を開発しているテレストリアル・エナジー社で，もう片方は出力1.4万kWの高温ガス炉（HTGR）を開発中のスターコア・ニュークリア社である。

これらのほかに，オンタリオ・パワー・ジェネレーション（OPG）社との連携により，出力0.5万kWのHTGR開発を進めているグローバル・ファースト・パワー（GFP）社とウルトラ・セーフ・ニュークリア社（USNC）のチームでは，すでに第2段階が完了しつつあることから，第3段階への進展を勧告。オンタリオ州チョークリバーなどCNLの管理サイト内で，2026年までに少なくとも1基のSMRを建設するというCNLの長期戦略に沿って，プロジェクトが順調に進んでいる。

CNLの認識では，SMRの生み出すクリーン・エネルギーはカナダ国内の辺境地域や工業地帯で需要があり，モジュール方式で購入・建設が可能な点や大型炉よりも初期投資が少なくて済む点，少数の従業員で運転可能な点などにメリットがある。このため，2017年4月に公表した今後10年間の「長期戦略」では，管理サイト内でのSMR実証炉建設を戦略的イニシアチブの1つに指定。同年中に技術開発業者から最終的に19件の関心表明を得た後，2018年4月に募集した第1回目の建設提案に対し，国内外の4つのSMR開発業者から提案があったと同年6月に発表していた。

今回，テレストリアル社とスターコア社はプロセスの第1段階にあたる「認定前段階」を成功裏に終了しており，CNLは第2段階の「適正評価段階」に進むよう勧誘した。ここでは，一層厳格な評価が設計の技術面と事業面の利点に関して行われる予定で，建設プロジェクトの財政的実行可能性や，国家安全保障面と健全性に関する要件についても審査を行うことになる。

また，OPG社およびGFP社とUSNC社のチームは，同プロセスの第3段階として，用地の手配やプロジェクトのリスク管理，その他の契約に関する包括的な事前協議をCNLと実施する。このような交渉はプロジェクトが承認されたことを意味するわけではなく，提案者はその提案内容について，さらに厳しい審査を受けることになる。

プロセスの最終となる第4段階では，実際の実証炉建設から試験と起動，運転，廃止措置まで移行していくが，CNLはすべてのプロジェクトに対して，規制上の要件や手続が課せられる点を指摘。原子力安全委員会の許認可プロセスは，CNLによる招聘や評価の影響を全く受けないため，プロジェクトが許認可申請段階に進んだ場合，提案者は地元住民や先住民コミュニティに意見を求めるなど，実効性のある交流を持たねばならないとしている。

【英国】

## SMR などの新たな原子力研究開発センターがオープン

英国政府が産業界との協力により 2012 年に設置した先進的原子力機器製造研究センター(NAMRC)は 2 月 13 日，イングランド中部のダービー市南部にある商業・技術パーク内に，NAMRC の新たな研究・技術革新センターをオープンしたと発表した。

ミッドランド全域における様々な規模の製造業者と，経済的に最も重要な産業分野で協働する機会を探るのが主な目的。現地の報道によれば，NAMRC は同支部を通じて小型モジュール炉(SMR)の供給チェーンを構築する方針である。新しい制御装置やセンサー機器など，SMR 開発に不可欠な先進的技術分野に集中的に取り組む考えで，一層幅広い産業分野にそれらを適用していくと伝えられている。

英国政府のビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)は 2018 年 6 月，民生用原子力部門との長期的な戦略的パートナーシップとなる「部門別協定」を公表しており，国内エネルギーミックスの多様化を図るとともに原子力発電コストを削減するため，産業界からの投資も含めて 2 億ポンド(約 285 億円)を確保。この中から，出力 30 万 kW 以下の SMR も含め，新型モジュール式原子炉(AMR)を研究開発するプロジェクトに，英国政府は今後 3 年間で最大 5,600 万ポンド(約 80 億円)を投資することになっている。

NAMRC ミッドランド支部の役割は，イングランド地方にある先進的製造技術パークとモジュール化研究開発施設における中核的な研究能力を補完することである。同支部が設置された商業・技術パークは，ダービー市議会とロールス・ロイス社，および複数の不動産企業が連携して運営。元々は，航空宇宙部門や自動車・鉄道部門など，輸送エンジニアリング関係の供給チェーンで，最先端技術の研究と技術移転を進めるために設置されていた。

NAMRC の A．ストーラー CEO は，同支部により地元企業が原子力関係の契約を受注できるよう支援していくと明言。NAMRC が開発している技術であれば，自動車や鉄道，航空宇宙，再生可能エネルギー，それ以外の数多くの高価値部門においても，製造上の課題に取り組むことができると述べた。

【フィンランド】

## 規制当局，オルキルオト 3 号機の運転認可発給を勧告

フィンランド放射線・原子力安全庁(STUK)は 2 月 25 日，ティオリスーデン・ボイマ社(TVO)がオルキルオト原子力発電所で建設中の 3 号機(OL3)(PWR，172 万 kW)について，「安全に運転することが可能」との意見書を雇用経済省に提出した。

この評価は STUK が同炉全体で実施した安全評価の結果に基づくもので，「運転認可の発給を阻むような障害は見受けられない」と説明。同炉の技術的，構造的な安全性に加えて，事業者である TVO に関しても，従業員および組織全体として OL3 を安全に運転する準備が出来ていると結論付けた。これを受けたフィンランド政府は今後，運転認可発給の可否について最終的な判断を下すことになる。

2005 年に本格着工した OL3 は，世界初の欧州加圧水型炉(EPR)採用炉であったこともあり，規制関係書類の認証作業や土木工事などで想定外の時間を費やした。着工当初，2009 年に予定されていた通常運転の開始日程は，昨年 11 月時点の最新スケジュールで 2020 年 1 月を予定。現在は起動試験が行われている。

OL3 の設計運転期間は 60 年だが，発給される運転認可は申請書に明記されていた通り，当面 2038 年末までのものとなる。この制限は，OL3 から出る使用済燃料と低・中レベル放射性廃棄物を中間貯蔵する施設の操業許可に準じて設定された。同発電所 1，2 号機用に建設されたこの中間貯蔵施設はすでに発電所敷地内で操業中であり，最終処分場が完成するまでの期間，OL3 の廃棄物も同施設で TVO が保管する計画。最終処分場は現在，TVO とフォータム社が共同出資するポシバ社が，オルキルオトの地下 500m の地点で 2016 年 12 月から建設中で，2020 年代中の操業開始が見込まれている。

また，運転認可の発給にあたっては，最初の定期安全審査を TVO が 2028 年末までに OL3 で実施し，STUK から承認を得ることが義務付けられている。燃料の装荷に関しても STUK が別途，承認を行う必要があり，装荷に先立ち STUK は，1 次系の試験運転で認められた加圧器サージラインの振動を抑えるため，管理・点検を実施する計画。これには技術的な代替解決策が複数存在することから，STUK は TVO が選択した解決策を調査するとともに，その実施可能性試験や実際の作業についても監督する方針である。

【ポーランド】

## 原子力発電所立地候補地点の世論調査で7割が支持

ポーランド初の原子力発電所建設計画を進めるため，国営エネルギー・グループ(PGE)の子会社として設立された原子力事業会社のPGE EJ1社は3月8日，建設候補地として特定した3地点で世論調査を実施した結果，前回の2017年調査より2ポイント増の69%が原子力発電所の建設を支持していることが判明したと発表した。

ポーランドでは昨年11月，エネルギー省が2040年までのエネルギー政策案をパブリック・コメントに付しており，この中で2043年までに最大6基の原子炉(600万kW～900万kW)を稼働させることを想定。初号機については，2033年までに運転を開始するとしている。

2016年にはすでに建設候補区域として，北部ポモージェ県のルビアトボーコパリノ地区(3地点)とジャルノビエツ地区(2地点)を特定しており，2017年3月から地質・環境調査を開始。今回はこれらのうち，ルビアトボーコパリノ地区のホチェボ，およびジャルノビエツ地区のグニエビノとクロコバで，世論調査会社のPBS社が2018年11月から12月にかけて，合計1,217名の住民を対象にインタビュー形式の世論調査を実施した。

「ポーランドにおける原子力発電所の建設」という設問については，全体の69%が支持すると回答したものの，ホチェボにおいては支持派が前回調査の78%を5ポイント下回り，73%だった。一方，グニエビノでは支持派が58%から66%に増加，クロコバにおける支持派の割合は，前回と同じ68%という結果だった。

また，「自分達の近隣における原子力発電所の建設」という設問では，全体的な支持派の割合は前回調査の67%から66%に低下。クロコバで69%だった支持派が62%に低下したが，ホチェボとグニエビノにおいてはそれぞれ，1ポイント増の74%および9ポイント増の68%となっている。

PGE EJ1社としては，「近隣での建設」を支持する割合は，前回とほとんど変わらないと見る一方，そうした投資が近隣で行われることに対する住民の認識は改善しているとした。すなわち，「絶対に反対」という意見の持ち主が減少し，「どちらかというと反対」に移行。原子力発電所が地球温暖化の防止や国家のエネルギー供給保証に資するのであれば，より多くの住民が意見を変えるとの見方である。

また，建設支持派が支持の主な理由として挙げているのは「雇用の創出」であり，地元地域が活性化される可能性や安い電気料金も，同様であるとした。さらに，全体の78%が「ポーランドには原子力発電所が必要」との見解に「強く」，あるいは「どちらかといえば」同意しており，ポーランドの現在のエネルギー源ではエネルギー需要を満たすには不十分，と考えていることが明らかになった。

【韓国】

## 電力技術社，チェコと新規計画受注で協力覚書

韓国電力公社(KEPCO)の子会社として発電所のエンジニアリングと建設を担当する韓国電力技術(KEPCO E & C)は2月26日，チェコで新規の原子力発電所建設計画を受注する活動の一環として，前日にチェコの国立原子力研究機関(UJV Rez)と協力覚書を締結したと発表した。

同覚書を通じて，KEPCO E & C社は原子力発電所の設計・研究分野でUJV Rezと実質的な協力体系を構築。将来的に，新規原子力発電所の建設を受注できた場合は，関係設備をチェコで調達する足がかりとする考えだ。

韓国では文在寅政権が国内で脱原子力政策を進める一方，海外展開により国内原子力産業界に活路を見出す方針。チェコでは国営チェコ電力が2014年に新規計画をキャンセルした後，2015年の「国家エネルギー戦略」の中で，チェコ政府は2040年までに原子力発電シェアを6割まで上げる必要があると指摘。その後に閣議決定したフォローアップ計画では，国内2つの既存原子力発電所で1～2基ずつ増設する準備を始めなければならないとしていた。

両社はこれまでに，原子力発電所技術交流ワークショップを共同開催するなど，多くの活動で協力。今回の覚書では一層具体的な協力方策を策定するとしており，両国の既存原子力発電所で安全性を向上させる技術協力と共同事業開発，新規原子力発電所関連の技術協力，新型原子力発電技術開発のための研究分野別人材・技術などで相互交流を深める。

また，覚書を通じてKEPCO E & C社は，チェコで稼働しているロシア型PWR(VVER)の技術経験を習得する計画。一方，国営チェコ電力が50%以上出資するUJV Rez側は，韓国の稼働中原子力発電所で主要設備の交換技術を学ぶ機会にしたいとしている。

# 脱炭素化ビジネス

フリージャーナリスト　井内 千穂

氷が解けて生息地が減少し陸地で餌不足が深刻化したホッキョクグマが，住宅やオフィスに侵入し人を襲っているというロシアのニュースに驚く。これも地球温暖化の影響なのか？　地球規模の話と個別の事象の因果関係の証明は難しいが，気候の異常を肌で感じ温暖化対策が必要だと考える人は多いだろう。

「温室効果ガスの実質排出ゼロに向けて，まず自然エネルギーの拡大により電力の脱炭素化を実現することが世界標準の戦略となってきている」と主張する自然エネルギー財団のシンポジウムに行ってみた。テーマは「世界に広がる自然エネルギーユーザー企業」。

今後は太陽光や風力の発電コストが低下していき，固定価格買取制度でコストの補てんを受けなくても，自然エネルギーの電力を自家発電・自家消費することが現実的になっていくと言っていた。それは結構なことだと思う。感心しながら話を聞いていたが，何とも言えない違和感があったのは，コストの話と導入の方法論に終始し，自然エネルギーにもあるはずのリスクについては全く触れないことだった。

二酸化炭素を排出する石炭火力発電をやめ，安全性の懸念に加え高コスト化が進んでいる原子力発電もやめて，2050年よりも前に自然エネルギー電力100％の達成を目指すという。そして，企業がいかにして自然エネルギーを導入すればよいか，海外の有識者が14種類ものパターンを説明し，資源エネルギー庁の担当者が「非化石証書」取引について説明し，導入実績について先進的な企業の担当者が発表した。

温暖化対策を錦の御旗に巨大なビジネスチャンスが広がる自然エネルギー。「安くて安全で地球にやさしい電力」の神話を謳う主体が交代するだけで，一般市民はまた騙されやしないだろうか。

## Column

# 英語での放射線関連記事の一般向け配信

コメニウス大学
医学部英語コース　妹尾 優希

スロバキアよりこんにちは。前回は，福島第一原子力発電所の浄化作業に使用した処理水の処分方法をめぐり，欧州でもニュースへの関心が高まっている一方で，SNSによって間違った情報が海外の方に拡散している現状をお話しました。こうした情報が海外で広がる原因の一つに，日本の一般向けの放射線関連の記事が，英訳されていないことが挙げられます。日本の風評被害対策と同様に，一般の方にわかりやすく説明し続けることが，海外の人々に対しても求められています。

もっとも，難解な用語の多い放射線や原子力関係の事柄を，英語で専門知識のない方に向けて説明するのは大変です。また，放射性物質の人体への影響についての説明は，英語を母国語としていても簡単ではありません。

私の在籍するコメニウス大学医学部では，4年前期に放射線科の授業が行われています。授業では，放射性物質が検査の際にトレーサとしてや，治療に使用されるなど『使用方法』については学びますが，大量の放射性物質が人体にどんな影響を与えるのかについては，ほとんど触れません。

そこで私自身の学習も兼ねて，現在「MRIC Global」という海外の方向けの英語医療系メールマガジンで，「福島民友」で連載されている『坪倉先生の放射線教室』の英訳配信を，福島県いわき市の常磐病院に勤務されている尾崎彰彦医師のご指導のもと，担当させていただいております。

こちらのメールマガジンは英語で寄稿された内容の配信がメインですが，一部記事に関しましては，日本語の記事を英訳して配信しています。この学会誌をお読みの皆様の専門的な知見の，ご寄稿お待ちしております。

# 風評の「一次予防」としての基礎知識

フリーライター　服部 美咲

2018年秋以降，風疹やインフルエンザの流行が社会問題となった。予防接種は，病原体の持つ病原性を予め弱めたりなくしたりして，体内に病原体の免疫を作る。集団の一定の率が免疫を持てば，深刻な感染拡大は予防できる。新生児や妊婦など，接種ができないワクチンがある人々を守るため，周囲がワクチン接種を受けて感染拡大を防ぐという「コクーン(繭)戦略」も有効だ。こうした予防接種などで疾病を予め防ぎ，健康な状態を保持する対策を1次予防，疾病を早期に発見して治療を行い，健康障害の進展を防止する対策を2次予防という。厚生労働省は2012年に国民の健康増進のため「健康日本21」を計画し，1次予防を重視した健康対策を進めている。

福島第一原発事故後，経済的風評被害の他，福島に対する不安や偏見を助長する風評が問題となった。この対策として，放射線被ばくの基礎知識を啓発する動きと，誤情報による不安や偏見の煽動行為に逐次対処する動きがある。前者はワクチン接種(1次予防)，後者は早期の疾病発見・治療(2次予防)に譬えられよう。

放射線のリスク認知と抑うつ傾向には相互増幅関係があるとされる(2016，鈴木)。被災や避難生活の影響による抑うつ傾向にある人々に，放射線の基礎知識を伝えるのはときに難しい。社会全体に放射線の基礎知識を普及させ，弱った人々を「繭」に包み込むことで，不安や偏見，抑うつの負のループから守ることができるかもしれない。

## Column

# 科学者のネットワーク

NPO あいんしゅたいん　坂東 昌子

女性研究者のメーリングリストの発端は，京大の「婦人研究者連絡会(通称婦研連：1963年発足)」だった。当時，薬学部に女子学生が増えたのに対し，「これでは後継研究者が育たない」と危機感をもった薬学会が，「女性は1次研究者ではなく2次研究者に向いている」と白書に記した。これに抗議した薬学部女子学生たちの声で結局薬学会は取り下げたが，これを契機に，「なぜ女性は働き続けられないか」の議論が始まり，育児の壁に行き着き，京大に保育所をという運動に発展した。婦研連は京大だけでなく多くの女性研究者が集まり，実質的に全国の集まりに発展して，学術会議を動かすところまで発展した。その後，「女性研究者の会;京都」と改名したが，IT時代を迎え「メーリングリストで情報交換」することになったのが15年前である。今では，メンバーは300人を超え，生活に関すること，学問の現状など，様々な質問や意見を投げかけると，瞬く間に反応があり情報を共有できる。ある友人が痛みをかかえて苦悶していると，即座に専門的アドバイスや経験談が寄せられ，「痛みの科学」の研究が日本では如何に遅れているか，までが議論に上る。子供連れの海外留学となると，アドバイスや経験者の知り合いの紹介が始まるといった風だ。各分野の学問の前線の紹介もあり，知らぬまに情報を共有する。学問の分野横断的ネットワークというものは，このような日常のつながりの基盤の上に培われるのではないだろうか。ただ，これだけでは，真の分野横断的学問にはつながらない。次世代の学問の方向へと大変革を起こすには，この基盤の上に2つの要素がいることを，3・11以後の経験が教えてくれた(次回に続く)。

# 七転び八起き

東洋大学社会学部　渡辺 真由

珍しく地元に雪が降った日，地元の温泉街で行われたあるイベントに参加した。温泉街の旅館やパン屋・酒屋さんなど様々な人が自分のアクションについてや悩みをプレゼンし，参加者全員で改善策・アイディアを出し合い，時には協力者となり，アクションを支援するというものである。震災後に始まったイベントであり，今まで20数回ほど開催されてきた。店舗の空きスペースを活用したい！新商品のパッケージを考えてほしい！外国人観光客に優しい街作りをしたい！そんな思いを持った人が集まる熱い場所だ。今回は東京からの大学生，地域住民の方々など120人あまりが集まった。

それに加え，私達は東京の学生と共に，登壇者に直接出向かってヒアリングをし，具体的で実現できるようなアイディアを学生で提案・プレゼンした。私の班では，地元の温泉水と生姜を使用したパンの活用方法について提案した。その地域にある「温泉神社」と「ジンジャー」を掛けた中々面白いパンである。私達の提案は無事店主の方に採用された。その案が実現する日もそう遠くはないそうだ。

イベント終了後，東京から来た学生が口を揃えて「人との繋がりが濃くて暖かいね」と言っていた。そこが地元の良いところだ。震災後，観光客が減り活気が失われたように見えたが，むしろ逆だと私は思う。「地元を盛り上げたい」「良いところを知って欲しい」という思いは，今も昔も皆変わらない。だが，震災をきっかけに「なんとかしたい」と行動する人が更に増え，新しく商店街や学生団体ができたりと様々な変化が現れた。ピンチはチャンス，とはまさにこのことだろう。

今では震災前の8割にまで観光客数が回復している。震災前に元通り，ではなくそれを越えていって欲しいと思う。

## Column

# ナショナリズムへの未練

アジア太平洋エネルギー研究センター　渡辺　凜

原子力が健全に成り立つには，この国で「日本人」というものが信じられていないといけない。

「日本人というものが信じられない」とは，たとえば沖縄の人に馴染みの感覚ではないかと思う。「日本」に属するといわれても，ほかの「日本人」を自称する人たちが自分の健康や安全を望んでくれているとはどうも思えない，という感覚である。

津々浦々に住む人々が，「同じ日本人である」という理由で，お互い健やかに過ごせるよう願っていると感じられなくなれば，日本という共同体は瓦解する。その点で，日本人，とりわけ沖縄に住む日本人の健康と幸福を祈る姿を示し続けた平成天皇は，確かに「日本」という共同体の象徴であったと考えられる。

既存の原子力技術は，中央集権型の制度と相性がよく，その共同体の中の役割分担で成り立っている。大役を担ってきた立地県の人々は，「自分たちの健康と安全を願って原子力技術が使われている」と思えるような経験をしてきただろうか。そのような文言は法律の条文に盛り込まれているが，近年の政策や，事業者の会見には見られない。つまるところ，「原子力が人の健康と安全のためにある技術である」と業界の関係者自身が信じられていないのではないか？そしてこの姿勢がいかに原子力の社会的信用を損ねてきたか，自覚していないように見える。でも「すべての日本人の健康と安全」を真剣に考え，願う姿勢には威力がある。それは，平成天皇が示したとおりなのだ。

現代の日本で，大規模な科学技術と社会の健全な関係は成立しえない，と割り切るのが手っ取り早い。だが私はちょっと未練を感じるときもある。「日本人」を信じる道を探ってみたかった，というのが文系から進学してまで原子力利用を研究しようとした理由だったのかもしれない。

特集

# Mayak 核技術施設作業者の放射線疫学調査研究
# Ⅰ．Mayak 生産合同施設の概要とコホートの設定

原子力安全推進協会　岩井　敏，他

旧ソ連は米国の核兵器開発に対抗して，1945 年に核兵器製造を目的として，プルトニウム生産炉を開発し，1948 年後半に稼働した。その後，照射した燃料からプルトニウムを抽出する化学処理施設と化学・冶金施設を建設し，プルトニム核兵器生産を開始した。この施設は米国のハンフォード・サイトに相当するもので，運転開始から 1982 年までに約 2 万人が放射線作業に従事し，その 1/4 は女性であった。操業当初，作業遂行が優先され，作業者の多くが管理基準を超える放射線被ばくを受け，1958 年までに 19 件の放射線事故で 59 人が急性放射線症に罹り，7 名が死亡している。

*KEYWORDS: Mayak Production Association, reactor facilities, chemical processing facilities, plutonium chemical-metallurgical facilities, Mayak worker cohort*

## Ⅰ．Mayak 生産合同施設の概要

Mayak 生産合同施設（Mayak Production Association: MPA）は，ロシア連邦の南ウラル地区にあるチェリアビンスク州のオジョルスク市近郊にある原子力施設であり，旧ソ連時代は核兵器の生産，1987 年以降は放射性核種を生産する工業施設として用いられている。

MPA はプルトニウム（$^{239}$Pu）生産目的で建設された原子炉と，照射済燃料からプルトニウムを抽出して溶液とする化学処理施設および，溶液のプルトニウム純度を高めて核兵器の材料となる高純度プルトニム金属を製造するプルトニウム化学・冶金施設，ならびに補助施設（機械修理施設，計装設備施設，水処理施設，設計者事務所）からできている[1)]。

### 1．原子炉施設

$^{239}$Pu 生産用原子炉としては，天然ウラン軽水冷却黒鉛減速炉が開発され，1948 年 6 月には最初の炉である原子炉 A が稼働した。この炉には当時，ソ連で使用可能であるウランの全量が装荷され，生産されたプルトニウムから長崎に投下された原子爆弾ファットマンを模倣したソ連初の原子爆弾 RDS-1 が製造され，1949 年 8 月に核実験が行われた。その後，1950～1952 年までの間に 4 基の同型の原子炉が追加的なプルトニム生産のために稼働した。稼働初期には様々な技術的問題が発生した。とくに燃料被覆管のアルミニウムの腐食と破損が発生し，修理のため原子炉上部に取り出すことにより，運転員の高線量被ばくが問題となった。これらの原子炉は 1987 年以降，操業を停止し，最終的には 1990 年にすべての操業を停止した。これらの軽水冷却原子炉以外にも重水炉が 5 基建設され，2011 年の時点で稼働中の 2 基の重水炉では $^{3}$H，$^{14}$C，$^{60}$Co，$^{137}$Cs，$^{192}$Ir，$^{239}$Pu，$^{241}$Am の製造が行われている[1, 2)]。

### 2．化学処理施設

化学処理施設は原子炉から取り出された照射済燃料からプルトニウムを抽出する施設である。1948 年 9 月に最初の施設 B が稼働した。この施設でプルトニム溶液から不純物である核分裂生成物，放射化物が大きく低減された。最初のプルトニム出荷は 1949 年 2 月であった。施設 B が稼働したことで，様々な欠陥が露呈した。重大な汚染が，施設内機器，壁，床に存在したのみならず，作業場の空気汚染まで発生し，作業者の年間平均約 1Sv に近い被ばくを与えていた。この解決を図るため，1950～1951 年に汚染された機器の撤去，耐腐食性機器の設置，抽出処理工程の改善等を行うことによって，徐々に安定した稼働が可能となり，作業者の被ばくも低減し始めた。施設 DB が 1959 年に施設 B に替わって稼働し，1987 年に核兵器生産のための処理工程は停止したが，2011 年の時点でもこの施設は稼働していた。施設 DB の建設は 1957～1959 年に，1957 年の高レベル廃棄物貯蔵タンク過熱爆発によるキシュチム事故（Kyshtym Accident）による汚染環境下で実施された。施設 DB は施設内部で働く作業者には改善された作業環境を提供し，安定したプルトニウム抽出ができる技術を装備していた[1)]。

化学処理施設の抽出処理工程として最初はウラニル酢酸塩沈澱法を用いていたが，その後イオン交換法に改造され，1970 年代にはピューレックス法に改造された。

*Review of radiation-epidemiological studies on Mayak Production Association workers*：Satoshi Iwai, Shigeru Kumazawa, Tsuyoshi Semba, Kenji Ishida, Shunji Takagi.

（2018 年 11 月 12 日 受理）

### 3. プルトニウム化学・冶金施設

プルトニウム化学・冶金施設は，化学処理施設で作られたプルトニウム溶液の純度を高めて，高純度プルトニウム金属を製造する施設である。パイロット施設 No.9 が 1948 年 3 月に稼働したが，処理工程のトラブルが複数発生したため，問題点を改良した施設 1 の建設が決められた。施設 1 はステンレススチール製の密閉型グローブボックスが結合された形であった。施設 1 は，グローブボックス集合体を再構築して，機器を交換する補修作業を繰り返すことにより，大きな操業停止もなく 1950 年代から 1960 年代にかけて稼働した。1971 年 1 月に化学・冶金生産活動は新しい施設 1B に移された。この施設ではプルトニウム操業区域と非操業区域を分離する“空気遮断設計”を取入れて，汚染拡大を最小化した。この施設では，作業立入許可が管理制度として求められ，大きな被ばくを受ける可能性のある作業には技術評価が求められた[1)]。

### 4. MPA における被ばく事故

1955 年まで職業被ばくの線量は高く，年間平均で，外部被ばくで数 100mSv [i] に達することもあった[3)]。そして 1953～1958 年の間に臨界事故を含む 19 件の放射線被ばく事故が発生し，女性 10 名を含む 59 名の放射線被ばく事故が発生し，男性 6 名と女性 1 名が急性放射線症で死亡した[4)]。環境への放射性物質放出事故としては，化学処理の B 施設の高レベル廃棄物貯蔵タンク（複合“S”貯槽）の過熱による爆発事故が 1957 年 9 月 29 日に発生し，事故放出された放射能量の 90％は施設と周辺を汚染し，残りの 10％はプルームとして北東方向約 120km に亘る細長い土壌汚染を発生させた（キシュチム事故）。

## Ⅱ．MPA 作業者のコホートの設定

### 1. MPA 作業者の被ばくの特徴

MPA 作業者は操業初期の頃，かなり大量の γ 線外部被ばくと $^{239}$Pu を主とするプルトニウムによる内部被ばくを蒙った。1949 年に原子炉施設中央ホールでの使用済み燃料取扱い装置の汚染が発生し，1951～1952 年には化学処理施設で設備設計不備による大規模な空気汚染が生じた。女性の割合の高いプルトニウム化学・冶金施設でも，同時期に比較的高い被ばくがあった。MPA 作業者の受けた慢性被ばくによる積算線量は広島・長崎の原爆被爆者の受けた急性被ばく線量に相当する線量レベルであり，女性作業者が約 1/4 含まれている。MPA 作業者の被ばくはハンフォード・サイトなどの米国エネルギー省の作業者が受けた被ばくよりも多いものであった。**表 1** に示すようにプルトニウムによる体内汚染も米国と英国の同様の施設における作業者に比べてかなり高いものであった[3)]。

**表 1**　英国，米国，ロシアにおける $^{239+240}$Pu の身体負荷量（データ出典：文献 3，5，および 6）

| 国 | 調査対象作業者数（人） | $^{239+240}$Pu の身体負荷量（Bq） |
|---|---|---|
| 米国（USTUR）* | 280 | 40～300 |
| 英国（セラフィールド） | 993 | 10～10,000 |
| ロシア（MPA） | 870 | 40～175,000 |

*U.S. Uranium and Transuranium Registries

### 2. コホート [ii] の設定

MPA 作業者の“オリジナル Mayak 作業者コホート”は，原子炉 A が稼働した 1948 年から 1972 年までで 18,831 人であった。その後の 10 年間，すなわち 1973～1982 年における作業者が追加されて，拡張コホートは 22,349 人となり，約 25％は女性であった。このうちプルトニウム汚染の可能性があるため，1970 年頃から尿検査を実施した者は 32％であり，剖検データがある者は 4.5％であった。その他，コホートのデータベースには職歴，喫煙歴，飲酒歴を含む健康記録，外部被ばく線量，キレート剤（Ca-DTPA）処置歴，事故被ばく等の可能性，医療 X 線被ばくに関する情報も含まれている。剖検データとは化学処理施設，冶金・化学施設で作業経験のある人から死後に集められた人体組織試料である。MPA では，$^{3}$H，$^{90}$Sr，$^{241}$Am 等のプルトニウム以外の核種も製造したが，これらの核種からの有意な内部被ばく作業者はコホートからは除かれている[1)]。

“拡張 Mayak 作業者コホート”の詳細について**表 2** に示す。なお，この拡張コホートの使用は Mayak 作業者線量評価システム 2008（MWDS-2008）からである[7, 10)]。

Mayak 作業者で，外部被ばく積算線量 200mGy 未満の作業者はかなり少ないため，このコホートから，“非暴露群”を選定することは困難であった[8)]。そのために，補助建屋で働く作業者の職歴等を調べ，職業被ばくを受けた可能性の高い者を除いた機械修理施設と水処理施設の作業者約 3,400 人を非暴露群として選定された。この非暴露群の被ばくシナリオに基づく線量評価は MWDS-2008 の段階で整備された[9)]。

[i] 再構築された個人線量当量 Hp（10）で表示するため Sv 表示となっている。光子である γ 線被ばくであるため，Sv と Gy は同じ数値である。

[ii] コホートとは共通した健康修飾因子を持ち，観察調査の対象となる集団のことである。疫学研究のコホート研究とは分析疫学における手法の 1 つであり，特定の要因（例えば放射線被ばく）に暴露した集団（暴露群）と暴露していない集団（非暴露群または対象群）を一定期間追跡し，研究対象となる疾病の発生率を比較することで，要因と疾病発生の関連を調べる観察的研究である。

表 2　拡張 Mayak コホートの詳細(出典：データ文献：7 および 10)

| | 雇用の開始時期 | | | | | | | Pu 被ばくモニタリング*2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1948～1952 | 1953～1958 | 1959～1963 | 1964～1972 | 1973～1982 | 小計 | 女性の割合(%) | 有 | 無 | 潜在的汚染可能性 |
| 原子炉施設 | 2,479 (6%)*1 | 796 (6%) | 673 (6%) | 556 (3%) | 912 (5%) | 5,416 (6%) | 21.8 | 260 | 5,154 | − |
| 化学処理施設 | 3,747 (36%) | 2,011 (39%) | 1,469 (41%) | 791 (56%) | 1,169 (52%) | 9,187 (41%) | 25.7 | 3,537 | − | 5,654 |
| 化学・冶金施設 | 2,448 (31%) | 1,239 (40%) | 1,616 (39%) | 1,314 (53%) | 1,112 (40%) | 7,746 (39%) | 27.8 | 2,902 | − | 4,859 |
| 施設合計 | 8,674 (26%) | 4,046 (33%) | 3,758 (34%) | 2,661 (43%) | 3,210 (35%) | 22,349 (32%) | 25.5 | 6,699*3 | 5,154*3 | 10,513*3 |

*1：数字はサブコホートの構成員数，( )内の%は尿検査の被験者の割合。尿検査は 1970 年から実施された。
*2：有：プルトニウム汚染の可能性があり尿検査を実施した人数，無：プルトニウム汚染の可能性が無く尿検査を実施していない人数，潜在的汚染の可能性：尿検査は実施していないが，プルトニウム汚染の可能性がある人数
*3：文献 10 の数値から著者算出

## Ⅲ．まとめ

MPA 稼働初期は作業条件が悪く，大きな内部被ばくが発生したが，呼吸器系防護具導入により 1956 年以降は低減した。1948～1972 年の積算線量はコホート平均で数 100mGy，最大で数 Gy であり，広島・長崎の原爆被爆者の急性被ばく線量に匹敵する高い積算線量となる慢性被ばくを受けており，女性は約 25%含まれている。このコホートの作業者は米英の作業者と比べるとプルトニム汚染がかなり高い者も多く含まれており，女性も男性に匹敵する被ばく線量を，最も高い被ばく線量で受けていた時期があったという特徴がある[9)]。

### － 参 考 資 料 －


1) E.Vasilenko et al.,(2007). Mayak Worker Dosimetry Study Project 2.4.(2007). http:// download. lww. com/ wolterskluwer_vitalstream_com/PermaLink/HP/A/00004032-920070900-00002.pdf
2) I.Kudrik et al., The Russian Nuclear Industry: The need for reform. Bellona Report, 4.(2004). http://bellona.org/publications-and-archive
3) H.K.Vasilenko et al., Health Physics, 93(3), 190-206(2007).
4) T.V.Azizova et al., The British Journal of Radiology. 1, 30-35 (2005).
5) R. F. Filipy et al., Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 234(1-2), 171-175(1998).
6) A.E.Riddell et al., Journal of Radiological Protection, 20(3), 275(2000).
7) V.V.Khokhryakov et al.,.(2013). Health Physics, 104(4), 366-378(2013).
8) N.A.Koshurnikova et al.,.(1999). Radiation Research, 152(4), 352-363(1999).
9) M.Sokolnikov et al., PloS one, 10(2),(2015) e0117784.
10) N.Hunter et al., British Journal of Cancer, 109(7), 1989-1996 (2013).

# Mayak 核技術施設作業者の放射線疫学調査研究 Ⅱ．作業者の個人被ばく線量再構築

Mayak 合同生産施設（MPA）作業者の大半は光子被ばくについては個人線量計でモニタリングされていたため過去の線量計の記録値と作業歴が残されていた。プルトニウム体内汚染に関しては，尿検査によるバイオアッセイ測定値および死後の体組織中のプルトニム量を調べる剖検データが残されている場合もあった。本稿では，米露共同研究による作業者の個人被ばく線量の再構築方法とその改良の経緯について解説する。

***KEYWORDS: personel dosimetry, Mayak Worker Dosimetry System（MWDS）, urine bioassay, autopsy record, smoking status, plutonium biokinetic model, lung model, Hp（10）, organ dose***

## Ⅰ．外部被ばく線量および体内汚染の測定

### 1．光子，β線量の測定

MPA 作業者の外部被ばくに関するデータは Doses-2005[1, 2] に詳細に記述されている。“オリジナル Mayak コホート”18,831 人中 84％である 15,724 人に，外部被ばく線量記録が存在する。1948 年の原子炉稼働当初から作業者の光子とβ線被ばく線量測定には，数種類の線量計が用いられた。主要な 3 つの方法は，携帯型放射線測定器，ペンシル型電離箱線量計（初期は IDC-1，以降 KID-1，ID-1，DK-02 等），フィルム線量計であり，作業者はペンシル型電離箱線量計とフィルムバッジを入れたキャンバスバッグを胸ポケットに常に装着した。フィルム線量計は，1948～1953 年まで IFK というプラスチックフィルタ付フィルム線量計が光子被ばく用に使用されたが，10～100keV の応答が高かったため，0.75mm 厚の鉛フィルターを加えた IFK+Pb フィルム線量計が使用された。1960～1991 年までは光子のみならずβ線も測定できる 0.75m 厚の鉛と 0.5mm 厚のアルミニウムフルターを付けた IFKU フィルム線量計が使用され，1992 年からはフィルムの代わりに熱蛍光線量計（TLD）が使用された。

### 2．中性子の測定

MPA の作業場では，中性子は十分に遮蔽されているため，わずかな例外を除けば一般的には中性子の寄与は被ばく線量の 1％未満である。しかし，放射化学施設における後処理ノードの運転員室，完成したプルトニム製品の集積とバッチ作業用，ならびに中間または長期保管用の放射化学施設およびプルトニウム化学・冶金施設の一部，および原子炉施設の一部等では有意な中性子被ばくがあった。

熱中性子束の測定などの中性子の測定は 1957 年頃から実施されていたが，MPA で最初の中性子線量評価は 1970 年に開始された。日常的な中性子モニタリングは個人用の事故対応中性子個人線量計 DINA 開発後の 1973 年から開始された。DINA は $^{103}$Rh（n,γ）放射化反応を用いたγ線測定と $^{237}$Np の核分裂片をシリカガラスか人工雲母による飛跡（エッチピット）検出法を用いている。1979 年以降，DINA は緊急時線量計 GNEISS の一部に組み込まれた。初期には中性子検出下限値が 50mGy であったが，改良されて 0.1mGy となり，1985 年以降は MPA で公式な中性子線量計として使用されている。DINA に加え，中性子線量当量率と熱中性子領域，中速中性子領域，および高速領域中性子束密度を測定できる RUS 汎用シンチレーション測定器が，1984 年以降は放射化学施設で，1986 年以降はプルトニウム化学・冶金施設で使用されている。

中性子の個人被ばく線量評価には中性子/光子線量比が非常に有用である。これは場の測定値から評価できるが，測定値が無い場合，モンテカルロコード MCNP を用いた計算で評価される。

### 3．内部被ばくに関する測定

プルトニウム内部被ばくに関する測定は，尿検査と剖検により行われた。尿検査は尿サンプル中のプルトニウムからのα線測定であり，剖検は組織中のプルトニウムからのα線測定により実施された。“拡張 Mayak コホート”は 22,349 人であり，そのうち尿検査測定対象者は 6,481 人，剖検対象者は 990 人であった[1]。

## Ⅱ．線量再構築

### 1．Mayak 線量評価システム

1990 年代初頭にロシア側が線量再構築の基盤整備を実施し，線量のデータベース Doses-1999 が 1999 年に整備された。これは MPA 作業者の資料記録から作業者 18,831 名が抽出され，過去の記録線量を計算機データベースとして整備されたものであった。1994 年に米露両政府間で締結された放射線影響研究に関する米露協力研究 JCCRER（the Joint Coordinating Committee for Radiation Effect Research）ではテチャ川住民の線量再構築と並んで，MPA 作業者の線量再構築も開始された。このプロジェクトにより，MPA 作業者の資料記録に基

づく個人線量計情報と記録線量が計算機データベースとして整備された。線量データベースに加えて，作業者の作業歴と作業場所のデータが，作業者個人の職業歴データベースとして整備された。作業場所のデータには，作業者の業務実施位置，姿勢，放射線場の情報も含まれており，これらが線量再構築の情報源となった。プルトニウム内部被ばくに関しても FIB-1 モデルという簡単な体内動態挙動を示すモデルが使用された。バイオアッセイ，医療診断に係わる情報も整備された。

MPA 作業者の線量推定のために行われた諸改訂が組み込まれた Doses-2000 が 2000 年 10 月に整備された。Doses-2000 では，記録線量の単位統一，個人線量計の前方-後方(AP)照射条件におけるエネルギー応答補正，中性子/光子線量比を用いた作業者の中性子線量評価値が含まれた。プルトニウム内部被ばくに関しては，呼吸器系モデルとして ICRP Publ.66 を改造したモデルが使用された。

2005 年には，個人線量計の記録線量と作業者の作業歴情報に基づいて再構築された光子の器官吸収線量と光子，中性子それぞれの個人線量当量 $Hp(10)_{\gamma}$，$Hp(10)_{n}$ を用いた外部被ばく線量評価データベースと，プルトニウム内部被ばくモデルを用いた内部被ばく線量評価データベースを含む Doses-2005 が整備された。プルトニウム内部被ばくに関しては，呼吸器系モデルとして剖検データを反映して ICRP Publ.66 を改訂したモデルが，組織系の動態挙動モデルとして ICRP Publ.67 を改訂したモデル(プルトニウムに関する Leggett 組織系モデル[3])が使用された。

その後，プルトニウム内部被ばくモデルの呼吸器系に重点を置いた改訂が進められ MWDS-2008 が整備された。MWDS-2008 では外部被ばく線量評価の改訂の記載はほとんどない。したがって，Doses-2005 において外部被ばく線量評価手法はほぼ整備されたと考えられる。Doses-2005 までは“オリジナル Mayak コホート”を対象としているが，MWDS-2008 では“拡張 Mayak コホート”を対象としている。

## 2. 外部被ばく線量の再構築

Doses-2005 では作業者の外部被ばく線量の再構築を行っており，MWDS-2008 ではこの方法をそのまま引き継いでいる。記録線量から器官吸収線量と個人線量当量 Hp(10)を再構築する方法は，IARC15 カ国合同コホート疫学調査研究[4]や INWORKS 疫学調査研究[5]で用いられた方法に近いものである。線量再構築の考え方の概要を図 1 に示す。

個人線量計の記録線量としては使用された時期により，線量単位が異なり，1948～1973 年までは照射線量(レントゲン：R)が使用され，それ以降から 1992 年までは組織吸収線量(rad)，それ以降は個人線量当量 Hp(10)が用いられて cSv(センチシーベルト)単位で標記され，2000 年以降は mSv で標記されるようになった。これらの歴史的に異なった線量概念と単位標記を空気吸収線量単位(mGy)に統一することならびに，非定常作業(事故時など)ならびに個人線量計のフィルターによる遮蔽が

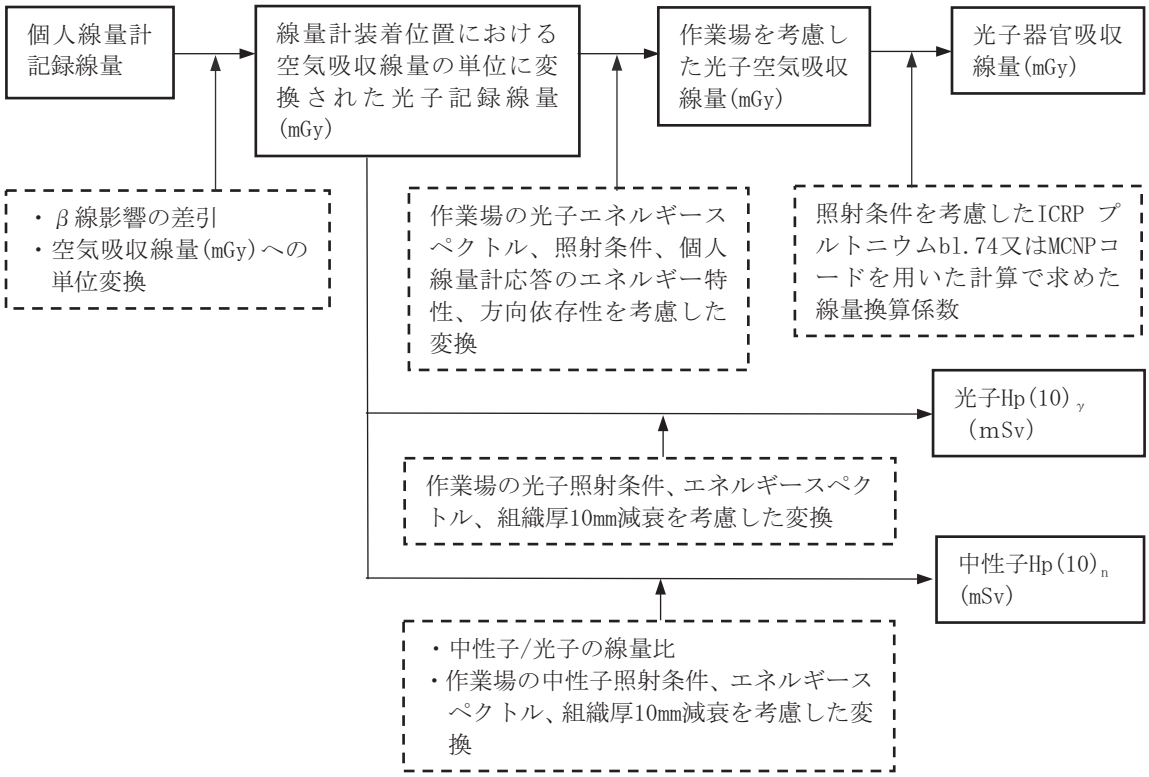



図 1　MPA 作業者の外部被ばく線量再構築方法

高エネルギーβ線に対して十分でなかった1960年以前で照射済燃料を遮蔽なしで扱った作業の場合，全身被ばく線量に寄与しない高エネルギーβ線の寄与の補正を行っている。ただし，事故被ばくなどの急性被ばくと慢性被ばくの分離は行っていない。

次に，作業場での光子エネルギースペクトルと照射条件(前方照射(AP)，回転照射(ROT)，等方照射(ISO)の3条件)と，使用した個人線量計のエネルギー応答関数と方向依存性を考慮した空気吸収線量への変換が行われた。その後，ICRP Publ. 74の光子線量換算係数を用いて光子器官吸収線量が求められた。ICRP Publ. 74に換算係数のない器官(脳，大腸下部，腎臓，小腸，食道)はMIRD型ファントムを用いて，3次元モンテカルロコードMCNPで計算された換算係数を整備して光子器官吸収線量が求められた。

光子の個人線量当量$Hp(10)_{\gamma}$も作業場の光子照射条件，エネルギースペクトル，組織厚10mm減衰を考慮して求められ，中性子の個人線量当量$Hp(10)_{n}$は中性子/光子の線量比と作業条件を考慮した換算係数を用いて求められた。MPAの主要施設における作業者の$Hp(10)_{n}$は，それに対応する$Hp(10)_{\gamma}$に比べて，年代変化はあるものの，最も高くても数%以下であると評価されている。

“オリジナルMayakコホート”では16%にあたる3,016名の作業者の記録線量のデータがない。これらの事例にはモニタリングはされたが線量記録が紛失した場合，当時の線量管理基準より被ばくが低いと見なされて線量計が支給されなかった場合，そして稼働初期の場合は適切な線量計が不足していたため支給されていない場合があった。これらの作業者の線量再構築は作業者の線量，作業場所と作業シナリオ情報と作業場環境の線源情報等考慮して測定された場の線量および作業活動期間情報を用いて評価された。

再構築されたMPA作業者の外部被ばく線量評価値には不確かさがある。不確かさにはランダムな成分と系統的な成分がある。ランダムな成分は線量計の持つ測定誤差であり，相対的な不確かさは30%である。系統的不確かさは線量計応答の放射線エネルギー特性と入射角度依存性と作業場所や線源の諸条件を含む各作業シナリオモデル設定に関するものであり，対数正規分布をするとされてまとめられている[1)]。

## 3. 内部被ばく線量の再構築

内部被ばくの動態挙動モデルは，呼吸器系モデル，消化管モデル，組織系モデルの3要素から成り立っている。プルトニウム内部被ばくの動態挙動モデルはDoses-1999，Doses-2000，Doses-2005の各段階で改良されて，疫学線量評価ではMWDS-2008が現時点で疫学解析に使用された最新のモデルである。モデル改訂の概要を**表1**に示す[6)]。この表から分かるように，Doses-1999ではロシア独自のモデルが使用されたが，Doses-2000では呼吸器モデルにICRPモデルに近いモデルが取り入れられ，Doses-2005では呼吸器系モデル，消化管モデル，組織系モデルにICRPモデルの改良版が取り入れられ，MWDS-2008では呼吸器系モデルの一部が改訂された。

Doses-1999ではプルトニウム動態挙動モデルとしてFIB-1モデル[7)]を使用している。これはロシアの第一生物物理研究所の第一支所(FIB-1：the First Branch of the First Institute of Biophysics)で543人の剖検データに基づく人体組織中のプルトニウム分布データと尿検査データから作成されたモデルであり，ICRPのプルトニウム動態挙動モデルとは独立に作成されたものであった。FIB-1モデルは呼吸器系は3個のコンパートメント，組織系は10個のコンパートメントから構成される単純なモデルであった。

その後，Doses-2000では1994年に刊行されたICRP Publ.66の呼吸器系モデルの粒子輸送パラメータを一部改訂して肺での残留を長くするモデル[7)]を使用したが，組織系モデルはFIB-1モデルのままであった。

**表1**　MPAのプルトニウム動態挙動モデルの変遷(出典：文献6のデータ等から著者作成)

| | Doses-1999 | Doses-2000 | Doses-2005 | NWDS-2008 |
|---|---|---|---|---|
| 呼吸器系モデル | FIB-1肺モデル | ICRP-66<br>改訂モデル | Doses-2000<br>モデルの改訂 | Doses-2005<br>モデルの改訂 |
| AMAD値[i] | 使用せず | 15μm | 5μm | 同左 |
| 組織系モデル | FIB-1<br>組織系モデル | 同左 | ICRP-67改訂モデル | 同左 |
| 胃腸管モデル | 考慮せず | 単一コンパートメント | ICRP-30胃腸管モデル | 同左 |
| 吸入率 | グループ平均吸入率，長期均一摂取 | グループ平均吸入率，長期指数関数時間減衰摂取 | 個人別，作業歴から作成 | 同左 |
| 喫煙係数 | なし | なし | 考慮 | 同左 |
| 線量評価対象器官 | 肺，肝臓，骨 | 肺，肝臓，骨表面，赤色骨髄 | 肺，肝臓，骨表面，赤色骨髄＋9器官・組織 | 同左 |

[i] AMAD(activity median aerodynamic diameter)空気力学的放射能中央径：吸入される放射性エアロゾル粒子の粒径表現の一つ。

Doses-2005 では呼吸器系は ICRP Publ.66，組織系は米国で開発された動態挙動モデルを基本とした ICRP Publ.67 モデルに基づいて，MPA 独自の剖検データと f/u 比（糞/尿中の放射能量の比）の実測値に基づく改訂が行われたモデルが採用された。Doses-2005 で使用された組織系モデルと ICRP Publ.67 モデルとの相違点は，肝臓や骨の剖検データに基づいて，肝臓と血液のコンパートメントの詳細化と骨コンパートメントへの血液からのフローの改訂であった。肺組織の剖検データによれば，喫煙は不溶性のプルトニウムの肺残留を増加させるが，可溶性プルトニウムは喫煙と非喫煙で有意差が無いという知見が得られ，喫煙がプルトニウムの呼吸器からのクリアランスに及ぼす影響がモデルに反映された。

Doses-2005 の段階で MPA の剖検データと ICRP のモデルを活用した MPA のプルトニウム動態挙動モデルの原型はほぼ確立したと考えることができる。そして，MWDS-2008 では，肺の深部である肺胞-間質領域から肺リンパ節への移行経路が詳細化されたが，それを除けば Doses-2005 の動態挙動モデルと同様であった。MWDS-2008 の動態挙動モデルを図 2 に示す。

現時点で疫学解析に使用されていないが，MWDS-2013 が 2014 年 9 月に完成した[8]。これは外部被ばくと内部被ばく線量評価に不確かさを入れた線量評価システムである。外部被ばくについては光子被ばく，中性子被ばく，ならびに医療被ばくについて定量的な確率分布関数を考慮している。内部被ばくの動態挙動モデルでは，胃腸管と組織系モデルは Doses-2008 と同じであるが，呼吸器系モデルとしては ICRP Publ.130 のモデルが使用された。そして，24 時間毎の尿中プルトニウム排泄量データと吸入摂取の時間分布パターン仮定に基づいて，摂取したプルトニウム量がベイズ推定[ii]を用いて評価される。尿中プルトニウム排泄量データは不確かさを持つ量であるため，摂取量は確率分布でされる。呼吸器系モデルの各コンパートメントの移行パラメータは動物実験の再解析データ，MPA の作業者の剖検データ，および米国の USTUR（Uranium and Transuranium Registries）の再解析データに基づいて，対数正規分布の確率分布関数で表されている。なお，血液から肝臓，骨への移行パラメータも確率分布を与えている。従って，器官の内部被ばく線量も確率分布関数で表現される[9]。

[ii] ある事象 X が起こる条件下で，別の事象 Y の起こる確率を推定するための計算方式のことで，イギリスの数学者・牧師であるトーマス・ベイズ（Thomas Bayes）によって示された。具体的には「ある事象 X が起こる条件下で，別の事象 Y の起こる確率」のことを事後確率，または，条件付き確率といい，ベイズ理論では，事前確率と観測されたデータから尤もらしい事後確率を求めるための計算方式である。MWDS-2013 では，仮定に基づくプルトニウム摂取量の時間分布を事前確率として，測定値に基づく尿中プルトニウム排泄量の時間分布とプルトニウムの体内動態挙動モデルを用いて，尤もらしいプルトニウム摂取量の時間分布を事後確率として導出している。

## Ⅲ．まとめ

外部被ばくに関する線量再構築では，記録線量から光子による器官吸収線量を評価する方法が Doses-2005 でほぼ確立された。しかし，中性子による線量である個人線量当量 $H_p(10)_n$ は求められたが中性子器官吸収線量は評価されていない。中性子被ばくの割合はわずかな例外を除けば一般的には被ばく線量の数％未満であるが，放射化学施設，プルトニム化学・冶金施設の一部の作業場では有意な中性子被ばくがある[iii]ため，該当する作業者の中性子による器官吸収線量を評価することは今後の課題となっている。

プルトニウム内部被ばく線量評価に必要な動態挙動モデルについては，Doses-1999 ではロシア独自のモデルを使用していたが，Doses-2000，Doses-2005 で次第に ICRP モデルに基づくものに改訂された。しかし，MPA 独自のプルトニウム剖検データ，f/u 比（糞/尿中の放射能比）の実測値，喫煙影響のデータを反映して，ICRP モデルに改良を加えた独自のモデルが開発された。このモデルは Doses-2005 でほぼ確立され，その後 MWDS-2008 で呼吸器系モデルの一部の改訂が行われた。これらの動態挙動モデルと尿検査データからプルトニウムによる内部被ばく線量は評価されている。現時点（2018 年 7 月現在）ではまだ疫学解析に使用されていないが，2014 年に完成した MWDS-2013 は外部被ばくおよび内部被ばくの線量が確率分布で表現されたものである。

職業被ばく以外の被ばく要因としては，医療 X 線検査，環境放出された空気中の放射性エアロゾルによる線量があるが，医療被ばくは当初想定されたよりも大きな寄与はないと評価されている[8]。

### ― 参 考 資 料 ―


1) E. K. Vasilenko et al., Mayak Worker Study Project 2. 4 Volume II (2007). http://download.lww.com/wolterskluwer_vitalstream_com/PermaLink/HP/A/00004032-920070900-00003.pdf
2) E.K.Vasilenko et al., Health physics, 93(3), 190-206 (2007).
3) R.W.Leggett, R. W et al.,Radiation Research, 164(2), 111-122. (2005).
4) I.Thierry-Chef et al., Radiation Research, 167(4), 380-395 (2007).
5) I.Thierry-Chef et al.,Radiation Research, 183(6), 632-642 (2015).
6) V. V. Khokhryakov et al., Health Physics, 104(4), 366-378 (2013).
7) V. F. Khokhryakov et al., Health Physics, 82(4), 425-431


[iii] MWDS-2008 を用いた Sokolnikov らの疫学調査では作業者の約 15％は中性子被ばくがあったと報告された[10]。

(2002).
8) B.N.Fountos et al., Radiation Protection Dosimetry, 173(1-3), 4-9 (2016).
9) A.Birchall et al.,Radiation Protection Dosimetry, 176(1-2), 10-31 (2017).
10) M.Sokolnikov et al.,PloS one, 10(2), (2015)e0117784.
11) K.Vasilenko et al., Mayak Worker Study Project 2.4 Volume Ⅲ (2007).
http:// download. lww. com/ wolterskluwer_vitalstream_com/PermaLink/HP/A/00004032-920070900-00004.pdf

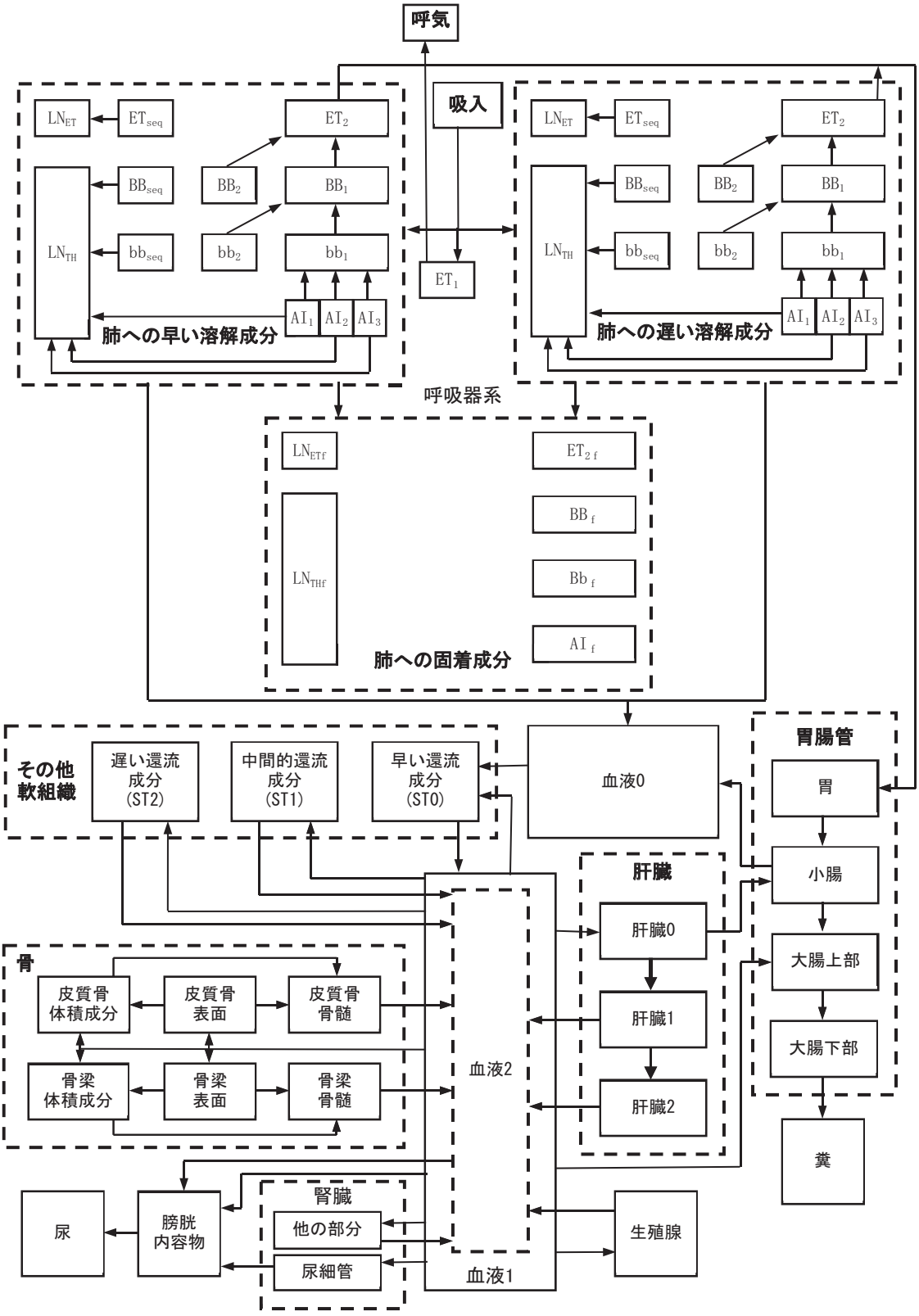



図2　MWDS-2008のプルトニウム動態挙動モデル(データ出典：文献3のp114のFig.4の組織系，文献6のp371のFig.3の呼吸器系，および文献11のp21のFig.4.1の胃腸管系に基づいて著者作成)
呼吸器系コンパートメント　$ET_1$：前鼻道，$ET_2$：後鼻腔＋口腔＋咽頭＋喉頭，BB：気管支領域，bb：細気管支領域，AI：肺胞-間質領域，LN：リンパ組織(胸郭内および胸郭外)

# Mayak 核技術施設作業者の放射線疫学調査研究 Ⅲ．放射線疫学調査結果

Mayak 作業者コホートは，プルトニムによる高いα線内部被ばくと放射化学施設，原子炉等からの高いγ線外部被ばくにより有意な放射線健康影響が直接観察でき，他の職業人コホートに比べ女性の比率の高い慢性被ばくコホートである。そして年代によっては女性も男性に匹敵する高い被ばくを受けていたという特徴がある。本稿ではこのコホートの放射線疫学解析結果について解説する。

***KEYWORDS: inhalated plutonium, lung cancer, non-LLB（lung-liver-bone）solid cancer, leukemia, incidence, mortality, chronic exposure, excess relative risk, RBE,***

## Ⅰ．放射線リスク評価

本稿では，吸入摂取によるプルトニム内部被ばくの影響を強く受ける可能性がある肺がん，肝臓がん，骨がんと，影響が大きくないと考えられる上記３種類以外の固形がん（以降，非 LLB 固形がん[i]と記す。），ならびに白血病（CLL[ii]を除く）に関して 2018 年現在までに公表された放射線疫学調査研究結果を過剰相対リスク（Excess Relative Risk: ERR）で示す。この場合の ERR とは被ばく群の死亡率（または罹患率）と性，年齢，生活習慣等を一致させた対照群（非被ばく群）の死亡率（または罹患率）との比から１を引いた値であり，放射線被ばくに起因するがんによる死亡率（または罹患率）の増加の割合を示す指標である。ERR/Gy は死亡率（または罹患率）が線量に比例して直線的に増加するとした場合の 1Gy の被ばくに対する ERR 値である。これは統計量であるため通常，平均値とその 95%，または 90%信頼区間（Confidential Interval: CI）の上下限値で表示される。

### 1. Mayak 作業者コホート放射線リスクの概要

2018 年現在までに公表された最新の Mayak 作業者コホートに関する放射線疫学調査研究情報の一覧を表１に示し，放射線リスクを ERR で表２に示す。

### 2. 非 LLB 固形がん

#### (1) 死亡率

Sokolnikov ら[1, 2]は表１の条件で，到達年齢，性，喫煙状況，誕生コホート等を変数として，非 LLB 固形がんの死亡率解析を実施した。代表器官線量として外部γ線被ばくによる結腸吸収線量を用いている。結腸線量は外部γ線被ばくに対しては，大半の体内器官の線量と類似しており，原爆被爆生存者の疫学解析（LSS[vi]）でも使用されている。MWDS-2008 で使用されたプルトニウム動態挙動モデルから非 LLB の器官は吸入されたプルトニウムによる内部被ばく寄与は極めて少ないと考えられるため，外部γ線被ばくに対する ERR が解析された。非 LLB 固形がんを線量の関数で表すと，統計的に有意な非線形性は見られなかったため，直線（L）モデルを用いて，内部被ばくの寄与を調整した場合と調整しなかった場合の ERR/Gy を表２に示す。その結果，内部被ばくの寄与が死亡率を有意に変えるという証拠がないことが確認された。

#### (2) 罹患率

Hunter ら[3]は表１の条件で，到達年齢，性，喫煙状況等を関数として，非 LLB 固形がんの罹患率解析を行った。外部γ線被ばく線量として個人線量当量 Hp（10）が用いられた。内部被ばくの調整有無両者の ERR/Gy を表２に示す。両者の ERR が有意に変わらなかったことで，死亡率と同様に，罹患率への内部被ばくの寄与は小さいと考えられる。罹患率の ERR は Sokolnikov ら[1]が評価した死亡率の ERR/Gy より値が小さいが，死亡率の計算には結腸吸収線量を使用しているのに対して，罹患率の計算では個人線量当量 Hp（10）を用いていることが主な原因と考えられる。

### 3. 肺がん

#### (1) 死亡率

肺がんは Mayak 作業者コホートにとって，プルトニウム吸入による内部被ばくや外部γ線被ばく以外に喫煙の影響が大きいと考えられている。肺がん死亡率解析については，Sokolnikov ら[4]，Gilbert ら[5]が表１の条件で解析を行った。Gillies ら[6]は被ばく線量が原爆被爆者の線量にも匹敵する Mayak 作業者コホートと被ばく線量の比較的少ないセラフィールド作業者コホートをプール解析[vii]することにより，幅広い外部および内部被ばく線

---

[i] 本稿では solid cancers other than Liver, Lung, and Bone cancers（肺，肝臓，骨がん以外の固形がん）は Non Lung-Liver-Bone という用語に因み「非 LLB がん」と記載する。プルトニウム内部被ばくの影響を肺がん，肝臓がん，骨がんほど受けない固形がんの総称であり，原爆被爆生存者コホートと同じく結腸吸収線量を代表線量としている。

[ii] 白血病（leukemia）のうち，慢性リンパ性白血病（Chronic Lymphocytic Leukemia: CLL）の発症は放射線被ばくと関連性が無いと考えられている。

表１　Mayak 作業者コホートに関する放射線疫学調査研究情報

| 評価リスク | 出典論文 | 追跡調査期間 | 人・年 | 線量評価システム | ラグタイム*1 |
|---|---|---|---|---|---|
| 非 LLB 固形がん（死亡） | Sokolnikov ら（2015[1)]，2017[2)]） | 1948～2008 | 956,896 | NWDS-2008 | 5 年 |
| 非 LLB 固形がん（罹患） | Hunter ら（2013[3)]） | 1948～2004 | 535,982 | NWDS-2008 | 0 年 |
| 肺がん（死亡） | Sokolnikov ら（2008[4)]） | 1948～2003 | 228,616 | Doses-2005 | 5 年 |
| | Gilbert ら（2013[5)]） | 1948～2008 | 108,988 | NWDS-2008 | 5 年 |
| | Gillies ら（2017[6)]） | 1947～2008 | 1,444,849 | NWDS-2008 等*2 | 10 年 |
| 肺がん（罹患） | Labutina ら（2013[7)]） | 1948～2004 | 535,877 | NWDS-2008 | 10 年 |
| | Gillies ら（2017[6)]） | 1947～2008 | 1,444,849 | NWDS-2008 等*2 | 10 年 |
| 肝臓がん（死亡） | Sokolnikov ら（2008[4)]） | 1948～2003 | 228,616 | Doses-2005 | 5 年 |
| 肝臓がん（罹患） | Labutina ら（2013[7)]） | 1948～2004 | 535,877 | NWDS-2008 | 10 年 |
| 骨がん（死亡） | Sokolnikov ら（2008[4)]） | 1948～2003 | 228,616 | Doses-2005 | 5 年 |
| 骨がん等（罹患）*3 | Labutina ら（2013[7)]） | 1948～2004 | 535,877 | NWDS-2008 | 10 年 |
| 白血病（死亡）*4 | Shilnikova ら（2003[8)]） | 1948～1997 | 721,675.50 | Doses-1999 | 2 年 |
| 白血病（罹患）*4 | Kuznetsuova ら（2013[9)]） | 1948～2004 | 536,126 | NWDS-2008 | 2 年 |

*1：放射線に被ばくしてから被ばくに起因するがんが発症するまでの最短の潜伏期として仮定した時間
*2：Gilles らは Mayak 作業者コホートとセラフィールド作業者コホートのプール解析を行っており，セラフィールドコホートの線量評価には ICRP Publ.30 および 66 等のプルトニム動態挙動および線量評価モデルを使用している。
*3：骨がんならびに関連する結合組織
*4：CLL を除く白血病

表２　Mayak 作業者コホートに関する放射線疫学解析結果

| 評価リスク | 出典論文 | 人数*1 | 器官平均吸収線量*2 | 過剰相対リスク（ERR/Gy） |
|---|---|---|---|---|
| 非 LLB 固形がん（死亡） | Sokolnikov ら（2015[1)]，2017[2)]） | 25,757（24.70%） | 外部：結腸線量 354mGy | 外部γ線被ばく（内部被ばく調整済）<br>0.12（95% CI:0.03-0.21,P=0.01[iii]）<br>外部γ線被ばく（内部被ばく調整なし）<br>0.16（95% CI:0.07-0.26,P < 0.001） |
| 非 LLB 固形がん（罹患） | Hunter ら（2013[3)]） | 22,366（25%） | Hp（10）線量[iv] 510mGy | 外部γ線被ばく（内部被ばく調整済*3）<br>0.06（95% CI:-0.01-0.14,P=0.12）<br>外部γ線被ばく（内部被ばく調整なし）<br>0.07（95% CI:0.01-0.15,P=0.06） |
| 肺がん（死亡） | Sokolnikov ら（2008[4)]） | 17,740（25.40%） | 肺線量<br>内部：190mGy*5<br>外部：530mGy | 内部被ばく 60 歳*4<br>男 7.1（95% CI:4.9-10）<br>女 15（95% CI:9.8-95）<br>外部被ばく<br>0.19（95% CI:-0.05-0.39,P=0.006） |
| | Gilbert ら（2013[5)]） | 14,621（25.30%） | 肺線量<br>内部：115mGy<br>外部：397mGy | 内部被ばく 60 歳*4<br>男 7.4（95% CI：5.0-11）<br>女 24（95% CI：11-56）<br>外部被ばく<br>0.13（95% CI：-0.04-0.38） |
| 肺がん（死亡） | Gillies ら（2017[6)]） | 45,817*6（18%） | 肺線量*7<br>内部<br>Slow：89mGy<br>Fast:：64mGy<br>外部：260mGy | 内部被ばく 60 歳*4<br>MWC（男）＋ SWC（男＋女）*8<br>Slow：4.73（90% CI：3.53-6.18）<br>Fast：7.00（90% CI：5.22-9.17）<br>外部被ばく<br>MWC（男＋女）＋ SWC（男＋女）<br>Slow：0.37（90% CI：0.22-0.55）<br>Fast：0.39（90% CI：0.23-0.57） |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 肺がん<br>（罹患） | Labutina ら<br>（2013[7]） | 22,373<br>（25.40％） | 肺線量<br>内部：150mGy<br>外部：450mGy | 内部被ばく 60 歳[*4]<br>男 7.1（95％ CI：4.5-10.9）<br>女 39.1（95％ CI：14.6-119.5）<br>外部被ばく<br>男 0.2（95％ CI：0.03-0.5）<br>女 0　（収束せず[v]） |
| | Gillies ら<br>（2017[6]） | 45,817[*6]<br>（18％） | 肺線量[*7]<br>内部<br>Slow：89mGy<br>Fast：64mGy<br>外部：260mGy | 内部被ばく 60 歳[*4]<br>MWC（男）＋ SWC（男＋女）[*8]<br>Slow：5.33（90％ CI：3.90-7.13）<br>Fast：7.97（90％ CI：5.82-10.69）<br>外部被ばく<br>MWC（男＋女）＋ SWC（男＋女）<br>Slow：0.30（90％ CI：0.13-0.52）<br>Fast：0.34（90％ CI：0.15-0.57） |
| 肝臓がん<br>（死亡） | Sokolnikov ら<br>（2008[4]） | 17,740<br>（25.40％） | 肝臓線量<br>内部：270mGy[*5]<br>外部：530mGy | 内部被ばく　全年齢[*4]<br>男 7.1（95％ CI：4.9-10）<br>女 15（95％ CI：9.8-95）<br>外部被ばく<br>0.19（95％ CI：-0.05-0.39，P=0.006） |
| 肝臓がん<br>（罹患） | Labutina ら<br>（2013[7]） | 22,373<br>（25.40％） | 肝臓線量<br>内部：310mGy[*3]<br>外部：430mGy | 内部被ばく　全年齢[*4]<br>男 6.1（95％ CI：2.0-23.1，P＜0.001）<br>女 24.0（95％ CI：6.4-141.2，P＜0.001）<br>外部被ばく<br>線量との有意な相関なし。 |
| 骨がん<br>（死亡） | Sokolnikov ら<br>（2008[4]） | 17,740<br>（25.40％） | 骨線量<br>内部：980mGy[*5]<br>外部：570mGy | 内部被ばく　全年齢[*4]<br>男 0.76（95％ CI：＜0-5.2）<br>女 3.4（95％ CI：0.4-20）<br>外部被ばく<br>0.35（95％ CI：＜0-4.4，P=0.006） |
| 骨がん等<br>（罹患）[*9] | Labutina ら<br>（2013[7]） | 22,373<br>（25.40％） | 骨表面線量<br>内部：1170mGy[*3]<br>外部：520mGy | 内部被ばく　全年齢[*4]<br>線量とともに ERR は増加するが，統計的有意性なし。<br>外部被ばく　全年齢<br>記載なし。 |
| 白血病[*10]<br>（死亡） | Shilnikova ら<br>（2003[8]） | 21,557<br>（24％） | 外部被ばく線量[*11]<br>810mGy | 被ばく後<br>全期間：1.0（90％ CI：0.5-2.0）<br>3～5 年：6.9（90％ CI：2.9-15）<br>5 年より後：0.45（90％ CI：0.1-1.1，P=0.02） |
| 白血病[*10]<br>（罹患） | Kuznetsuova ら<br>（2016[9]） | 22,373<br>（25.40％） | 赤色骨髄<br>外部：390mGy<br>内部：10mGy[*12] | 外部γ線（内部被ばく調整済）<br>3.46（90％ CI：1.57-7.65）<br>内部被ばく<br>3.63（90％ CI：＜0-15.85，P=0.15） |

[iii] P 値（probability value）：この場合，被ばく集団と非被ばく集団が全く同じ母集団からの任意抽出の小集団であると仮定した場合，ERR/Gy の推定値が 0.12 となる確率は 1％となる。すなわち ERR の値 0.12 が同じ母集団からの任意抽出の結果として発生したと考えられる確率は 1％という意味である。P 値はサンプル数が増すと統計的検定能力が上がり，P 値が低くなるため，無意味な差でも有意と判定されることがある。この P 値の弱点を補うために P 値と並んで「95％または 90％信頼区間（CI）」が使用される。

[iv] Hp（10）線量の単位は Sv であるが，γ線被ばくであるため，Sv 値をそのまま Gy としている。

[v] 最尤法による解が収束しないため，信頼区間の表示はしないで，ERR=0 と設定している[7]。

[vi] LSS（life Span Study）とは原爆被爆者の健康に放射線が及ぼす影響研究を行うことを目的として設定された放射線疫学コホート研究である。1950 年の国勢調査時に生存していた約 12 万人からなり，放射線量については面接調査に基づき個人の線量が推定されており，生活習慣など他の要因については郵便調査が行われてきている。エンドポイントについては死亡調査とがん罹患調査である。

[vii] プール解析とは，複数の疫学解析の元データを集めて再解析する方法である。症例数が増えたデータを再解析することにより，検出力が上がり，より信頼度の高い結果が得られる。

*1：(　)内は女性の割合(%)
*2：外部：外部被ばくはすべてγ線被ばく，内部：内部被ばくはプルトニウムからのα線が主。
*3：プルトニウムモニタリング対象者のみ調整
*4：肺の内部被ばくのERRは性，到達年齢を変数とするモデルで表現されるため，性別，年齢を記載。肝臓，骨の内部被ばくは全年齢，および外部被ばくは全年齢。
*5：プルトニウムモニタリング対象者で有意な内部被ばくがある者のみ。
*6：Mayak作業者コホート22,374(女性12%)，セラフィ-ルド作業者コホート23,443人(女性12%)で1959年より前に雇用された女性の割合は5%，プール解析の女性の割合18%は著者算定。
*7：Mayakおよびセラフィールド両コホートのプール解析用コホートの平均線量について，論文内データを用いて著者算出。
*8：MWCはMayak作業者コホート，SWCはセラフィールド作業者コホート，硝酸プルトニウムの呼吸器系への吸収の遅い成分の吸収速度パラメータに関して2種類の値があり，遅い値($2.5 \times 10^{-4}$/d)を採用した場合をSlow，速い値($2.2 \times 10^{-3}$/d)を採用した場合をFastとしている。プルトニウムの内部被ばくのプール解析ではMayakコホートのERRは喫煙率の違いで男女の差が大きいため，女性は除いたと考えられる。セラフィールドでは男女の喫煙率の差がはるかに小さいと考えられ，女性を除いてもERRへの影響が実質的にないため，男女合わせたコホートを用いている。
*9：骨がんならびに関連する結合組織
*10：CLLを除く白血病
*11：赤色骨髄吸収線量ではなく，全身の外部被ばく線量。フィルムバッジ線量記録値を用いて評価されている。
*12：平均値ではなく中央値(median)である。90mGyを超える割合は10%に過ぎない。

量に対する肺がん疫学解析を実施した。

Sokolnikovらは性別，到達年齢，喫煙状況等の関数として，外部γ線および内部プルトニウム被ばくの肺吸収線量に対して，ERR/Gyを算定した。その結果を表2に示す。

GilbertらもSokolnikovらと同様な条件で，肺吸収線量に対するERR/Gyを算定した。その結果を表2に示す。女性のERR/GyはSokolnikovらの値15[4]より60%も高い値であるが，女性のERR推定は統計的不確かさが高かったためと考えられている。喫煙情報のある作業者12,708名(喫煙率：男性は74%，女性は4%)に対して解析を行うと，喫煙とプルトニウム内部被ばくの相互効果を含むリスクが見られ，それは相加的以上であり，相乗的以下であるという結果を示した[viii]。被ばく群の肺がんによる過剰死亡者数の解析の結果，68.2%は喫煙，10.1%はプルトニウム内部被ばく，12.4%は両者の相互効果，9.3%は喫煙やプルトニウム内部被ばく以外の要因に起因するという結果となった。ただし，Mayak作業者コホートの喫煙調査は喫煙経験の有無のみであり，一日あたりの喫煙量や喫煙期間の情報は含まれていないため，肺がんのリスク推定にある範囲の不確かさは残らざるを得ない。

GilliesらはSokolnikovらと同様の条件[ix]で肺吸収線量に対して，肺がん死亡率プール解析によるERR/Gyを算定した。この疫学解析では，硝酸プルトニウムの呼吸器系への吸収の遅い成分の吸収速度パラメータについて，表2に示す2種類の値に対して算定している。算定結果を表2に示す。Mayak作業者コホートでは男女の喫煙率の違いを反映して両者のERRが大きく異なるため，男性コホートのみをプール解析に入れているが，セラフィールド作業者コホートでは男女の喫煙率の差が小さいと仮定して，男女合わせたコホートをプール解析に入れている。一方外部γ線被ばくに対しては，プール解析にはMayakとセラフィールド両コホートの男女すべてを使用しており，ERR/Gyは表2に示すように統計的に有意な増加を示した。

Mayak作業者コホートはプルトニム内部被ばくによる肺がんリスクが十分な精度で明らかに直接観察可能な唯一のコホートである。上記3つの肺がん死亡率の疫学解析の結果から，プルトニウム内部被ばくのERR/Gyは，男性60歳で7～8程度，女性はその2～3倍の値，外部被ばくγ線に対する男女合計のERR/Gyは0.1～0.5程度であり，Mayak作業者コホート単独の解析では統計的有意性は見られなかったが，プール解析結果は統計的に有意であった。

(2)罹患率

Labutinaら[7]は死亡率解析と同等の条件で，肺吸収線量に対して，罹患率解析によるERRを算定し，表2に示す結果が得られた。Gilliesら[7]は肺がん死亡率だけでなく罹患率についてもMayak作業者コホートとセラフィールド作業者コホートのプール解析を行っており，表2に示す結果が得られた。2つの肺がん罹患率の疫学解析結果から，プルトニウム内部被ばくのERR/Gyは，男性60歳で7～8程度，女性は信頼区間幅が広いが，その約5倍，そして外部被ばくγ線に対する男女合計のERR/Gyは0.1～0.5程度であり，死亡率とほぼ同様の値であった。

## 4. 肝臓がん，骨がん

吸入摂取されたプルトニウムは血液を経由して主に肝

[viii] プルトニム内部被ばくの肺がんへの影響をf(x)，喫煙による肺がんへの影響をf(y)とすると，両者の複合効果f(x+y)はf(x+y)＞f(x)+f(y)でかつf(x+y)＜f(x)・f(y)という関係になる。

[ix] 喫煙情報は，Mayakと異なりセラフィールド作業者コホートでは現在使用できる喫煙情報は無いため，解析には喫煙因子は使用していない。英国全体の喫煙率は1948年から2005年で，男性は65%から25%に，女性は41%から4%に低下している。

臓と骨に沈着して長期間滞留するため，これらの器官・組織の内部被ばく線量は他の組織・器官よりも高くなる。ただし，肝臓がんは被ばく以外にも喫煙ばかりでなくアルコール摂取も影響する。

(1)死亡率

Sokolnikov ら[4]は肝臓がん，骨がんそれぞれの死亡率解析を実施し，表 2 の結果が得られた。男女の ERR が異なる理由は男性が女性より喫煙と飲酒が多いため，非暴露群の肝臓がん死亡リスク値(バックグラウンド値)を高めたことが一因である。外部γ線被ばくに対する全年齢の ERR/Gy は統計的有意な増加はない。このコホートで骨がんの症例数は 11 例しかなく，不確かさが大きい。

(2)罹患率

Labutina ら[7]は Sokolnikov らと同様な条件で肝臓がん，骨および関連結合組織のがん罹患率解析による ERR/Gy を表 2 に示すように算定した。肝臓がんは 37 例であったが，骨がん罹患に関しては症例数が 10 例と少なく，ERR は内部被ばくに関して増加傾向はあるが統計的有意性は見られなかった。

### 5. 白血病

(1)死亡率

Sokolnikov ら[8]は，性別，到達年齢等を変数として，CLL を除く白血病の死亡リスクを解析した。赤色骨髄ではなく，全身の外部γ線被ばく線量は 810mGy であり，表 2 に示すように被ばく後 3～5 年の ERR/Gy は 6.9(90% CI:2.9-15)であったが，5 年を超えると大きく低下するが，まだ統計的には有意な増加を示した。CLL を除く白血病の ERR について，内部被ばくの寄与を示す証拠は明らかでなかった。

(2)罹患率

Kuzunetsova ら[9]は，性別，到達年齢等を変数として，CLL を除く白血病の罹患リスクを解析した。赤色骨髄の外部γ線被ばく平均線量は 390mGy で，それによる ERR/Gy は 3.46(90% CI:1.57-7.65)でり，プルトニム内部被ばくによる赤色骨髄線量は小さくて中央値は 10mGy であり，それによる ERR/Gy は表 2 に示すように統計的に有意でなかった。

### 6. プルトニウムのα線の生物学的効果比

表 3 に示すように，Gilbert らおよび Gillies らは，Mayak 作業者コホートの肺がんの死亡や罹患リスクのプルトニム内部被ばくと外部γ線被ばくの ERR/Gy の比を用いて，プルトニムのα線の生物学的効果比(RBE)[x]を算出している。評価された RBE/Gy の不確かさはかなり大きいが[xi]，これらは ICRP Publ.103 のα線の放射線加重係数 20 と矛盾しない値であった。

表 3　プルトニムのα線の生物学的効果比(RBE)

| 評価リスク | 出典論文 | RBE 値 | その他 |
|---|---|---|---|
| 肺がん死亡 | Gilbert ら[5] | 20 | LSS コホートとの比較 |
| 肺がん死亡 | Gillies ら[6] | 10～25 | Mayak 作業者コホートのプルトニムによる内部被ばくと外部γ線被ばくのリスクの比較 |
| 肺がん罹患 | | | |

## Ⅱ．他の疫学研究との比較

Mayak 作業者コホートの外部γ線被ばくの ERR 値の妥当性を見るため，他のコホートの ERR との比較が行われた。プルトニムによる内部被ばくの影響が小さい非 LLB がんと白血病のリスクに関して Mayak 作業者コホートと他のコホートとの比較結果を表 4 に示す。Sokolnikov らは，非 LLB がんの罹患リスクについて Mayak 作業者コホートと LSS コホートを比較しており，Mayak の方が小さい値を示すが，信頼区間を考慮すれば，両者の相違は明らかに有意であるとは言えないことを示している。Hunter らは非 LLB がんの死亡リスクについて Mayak 作業者コホートと LSS コホートを比較しており，Mayak の方が有意に小さい値であるが，両者の相違は症例数が少ないため信頼性が十分でないことと，LSS が結腸線量を用いているのに対して，Mayak が，体表面から 10mm の位置の線量である個人線量当量 Hp(10)を用いているため大きめの線量を用いていることを指摘している。Kuznetsuova らは，白血病(CLL を除く)の罹患リスクについて Mayak と LSS および英国の放射線作業登録従事者コホート 3rdNRRW[xii]の結果を比較している。3 コホート中で，Mayak が最も高い値を示すが，3 者の ERR 値に統計的に有意な相違はない。LSS が急性被ばくであるのに対して Mayak は慢性被ばくであるが，両者のリスクの比較による線量率効果は不確かさのため明らかになってはいない。

[x] 生物学的効果比(Relative Biological Effectiveness: RBE) は放射線の種類により生物学的影響の強さが異なることを表すための指標で，ある生物学的効果(例えば，発がん，染色体異常など)を与える線量を，同等の効果を与える基準放射線の線量で割って逆数にしたものである。基準放射線としては X 線またはγ線が用いられる。

[xi] 肺がん死亡率のエンドポイントの RBE=21(95% CI:9-178)(呼吸器系モデルのパラメータ：Slow)[6]

[xii] 英国の放射線従事者国家登録(NRRW: National Registry for Radiation Workers)によるコホート研究の第 3 次調査結果。

表4　Mayak 作業者コホートと他のコホートの ERR との比較

| 評価リスク | 出典論文 | コホート | ERR | 平均線量 |
|---|---|---|---|---|
| 非 LLB 固形がん（死亡） | Sokolnikov ら（2017[2]） | Mayak | 外部γ線（内部被ばく調整済）0.12（95% CI：0.03-0.21，P=0.01） | 結腸線量 354mGy |
| | | LSS*1 | 0.35（90% CI：0.19-0.55）*2 | 結腸線量 109mGy*1 |
| 非 LLB 固形がん（罹患） | Hunter ら（2013[3]） | Mayak | 外部γ線（内部被ばく調整済）0.06（95% CI：-0.01-0.14，P=0.12） | Hp（10）線量 510mGy |
| | | LSS | 0.47（95% CI：0.40-0.54）*3 | 結腸線量 0.2Gy |
| 白血病（CLL を除く）（罹患） | Kuznetsuova ら（2016[9]） | Mayak | 外部γ線（内部被ばく調整）3.46（90% CI：1.57-7.65） | 赤色髄線量 390mGy |
| | | LSS | 2.78（90% CI：0.17-4.36）*4 | 赤色髄線量 640mGy |
| | | 3rdNRRW | 1.78（95% CI：0.0.17-4.36） | 赤色発髄線量 25mGy |

*1　Mayak と比較のため，被爆時 20～60 歳の LSS 構成員に限定
*2　Mayak 作業者コホートの性比（男 0.75，女 0.25）に調整
*3　30 歳以上で被爆して到達年齢 70 歳の ERR 値
*4　25 歳時被爆で到達年齢 60 歳の ERR 値

## Ⅲ．まとめ

Mayak コホート構成員は職業人であるため個人線量計による外部被ばくモニタリングを受けており，INWORKS 疫学調査研究等と同様の手法で器官・組織の高品質の線量再構築が行われた。γ線外部被ばく疫学解析結果は，LSS の結果等と比べて，統計的な有意差は明らかでないという結果を示した。プルトニウムα線内部被ばくに関しては，吸入摂取により肺がん，肝臓がん，骨がんの過剰発生が有意に観察できる唯一のコホートと位置付けられている。稼働初期の尿検査データが無いという限界はあるが，精密な体内動態挙動モデルを用いた高品質の内部被ばく線量再構築が実施された。Mayak 作業者コホートの男性は喫煙率が 74%と高く，疫学解析結果によれば，肺がん過剰死亡者の約 68%は喫煙によるものであり，プルトニウム被ばくに起因する割合 10%に比べると，喫煙のリスクがはるかに大きいことも明らかになった。慢性被ばくによるプルトニウム被ばくと外部γ線被ばくによる肺がん死亡率を比較することにより，α線の RBE の点推定値は放射線加重係数値とほぼ一致した結果が得られた。新たな Mayak の線量評価システム MWDS-2013 では，線量再構築に不確かさを組み込んだ改訂がされており，今後，これを用いた疫学解析結果によってプルトニウム内部被ばくに関するさらに信頼度の高いリスク評価値が得られることが期待される。

### ― 参考資料 ―


1) M.Sokolnikov et al.,PloS one, 10(2), (2015) e0117784.
2) M. Sokolnikov et al., Radiation and Environmental Biophysics, 56(1), 121-125 (2017).
3) N.Hunter et al., British Journal of Cancer, 109(7), 1989- 1996 (2013).
4) M.Sokolnikov et al.,International Journal of Cancer, 123(4), 905-911 (2008).
5) E.S.Gilbert et al.,Radiation Research, 179(3), 332-342 (2013).
6) M.Gillies, et al.,Radiation Research, 188(6), 725-740 (2017).
7) E.V.Labutina et al.,Health Physics, 105(2), 165-176 (2013).
8) N.S.Shilnikova et al.,Radiation Research, 159(6), 787-798 (2003).
9) I.S.Kuznetsova et al.,PloS one, 11(9), (2016) e0162710.


### 著者紹介


**岩井　敏**（いわい・さとし）
原子力安全推進協会
（専門分野/関心分野）放射線防護，線量評価放射線リスク

**熊澤　蕃**（くまざわ・しげる）
元 旧日本原子力研究所
（専門分野/関心分野）放射線リスク評価，不確かさ数理解析

**仙波　毅**（せんば・つよし）
原子力安全推進協会
（専門分野/関心分野）原子力施設の放射線管理，水化学管理，放射線影響と防護体系

**石田健二**（いしだ・けんじ）
原子力安全推進協会
（専門分野/関心分野）保健物理，低線量放射線影響，幹細胞生物学

**高木俊治**（たかぎ・しゅんじ）
三菱総合研究所
（専門分野/関心分野）放射線計測，放射線防護

解説シリーズ

最先端の研究開発　量子科学技術研究開発機構

# 第3回　量子ビーム科学研究

量子科学技術研究開発機構　佐藤 隆博，越智 義浩

量子科学技術研究開発機構における量子ビーム科学研究においては，イオン，電子，ガンマ線，中性子，レーザー，放射光など世界に類のない多様な量子ビームを有する研究プラットフォームを活用し，量子ビームの相補的利用や材料科学や生命科学への応用などユニークな研究開発を推進している。また，量子科学技術研究開発機構では，平成31年度から機構における量子科学技術研究の重点領域として6つの研究開発領域を設置し研究開発の推進が図られる。本稿では，量子ビーム科学研究で主として実施する「量子材料・物質科学領域」と「量子光学領域」の2領域における主要テーマである量子計測材料・デバイス研究，および高強度レーザー技術や極短パルスレーザー技術開発に係る最新研究成果について紹介する。

***KEYWORDS: quantum-beam, quantum-sensing, spintronics, high power lasers, attosecond x-ray, laser acceleration***

## Ⅰ．量子ビーム科学研究の中軸となる研究領域

量子科学技術研究開発機構（以下，QST）における量子ビーム科学研究においては，従来から最先端の量子ビーム技術開発と，その材料科学や生命科学への応用によるユニークな研究を推進している。また，QSTでは平成31年4月から，QSTにおける量子科学技術の重点研究領域を設定し研究開発の推進が図られる。その中で，量子ビーム科学部門（以下，量子ビーム部門）では，高崎量子応用研究所（以下，高崎研）を中心とした「量子材料・物質科学領域」と関西光科学研究所（以下，関西研）を中心とした「量子光学領域」の2領域を主に担うこととなり，生命科学研究については他部門の生命科学研究とともに，新たに「量子生命科学領域」として一体的に運営される。本稿では，量子ビーム部門で推進される「量子材料・物質科学領域」および「量子光学領域」に該当する最新の研究成果について紹介する。

「量子材料・物質科学領域」では，“量子計測・情報デバイス”，“EUV超微細化技術”，“有機インフォマティクス”，“医療ナノデバイス”，“水素利用先進材料”を主要研究テーマと定め，その推進に集中的に取り組んでいる。“量子計測・情報デバイス”では，最先端の量子ビーム分光・加工技術を駆使した量子センシング・コンピューティングデバイスの創製，“EUV超微細化技術”では，軟X線発生技術とレジスト材料創製技術とを融合した次世代超微細化プロセス技術の開発を進めている。“有機インフォマティクス”では，世界トップの放射線加工・解析技術とマテリアルズ・インフォマティクスによる先端有機機能材料創製を目指しており，“医療ナノデバイス”では，生体親和有機材料のナノ構造制御，機能制御による再生医療・医療診断用デバイスの開発，“水素利用先進材料”では，界面・構造制御による高密度水素貯蔵材料，燃料電池触媒等の先進機能材料開発を推進している。また，「量子光学領域」では，“粒子加速”，“超高速計測”，“医療・産業応用”，“高強度レーザー技術・極短パルスレーザー技術”を主要テーマとして推進している。“粒子加速”では，量子メス実現に向けた重粒子線加速や，電子加速，ガンマ線発生技術等の開発を目指しており，“超高速計測”では，電子に起因する超高速現象を捉える計測技術の開発，“医療・産業応用”では，レーザー技術，計測技術等の医療，産業，防災等への実用化に向けた研究開発を行っている。また，“高強度レーザー技術・極短パルスレーザー技術”では，光量子科学の基盤となる高強度レーザー技術および極短パルス

*Research of Quantum Beam Science*：Takahiro Satoh, Yoshihiro Ochi.
（2018年11月30日 受理）

レーザー技術の開発を推進している。

各領域の中核テーマについては，機構内外との連携を強化し拠点化を推し進める構想であり，「量子材料・物質科学領域」では，“量子計測・情報デバイス”を中核研究テーマとし，電子線，イオンビーム，放射光などの各種量子ビームの相補利用を活用していくための量子機能材料研究拠点化を目指している。「量子光学領域」では，“高強度レーザー技術・極短パルスレーザー技術”を中核テーマと位置付け，レーザーの医療・産業応用への実績を活かした高強度レーザー拠点化を推進していく計画である。

## Ⅱ．量子材料・物質科学研究

### 1. 固体量子センサ

ダイヤモンド中には数百ともいわれるカラーセンターが存在する[1)]。その中でも，図1のように炭素を置換した窒素(N)と隣接位置の空孔(V)との複合欠陥であるNVセンターは，1997年に単一欠陥の電子スピン共鳴スペクトルの観測が報告[2)]されて以来，室温・常圧動作の量子センサとして，近年注目を集め盛んに研究が進められている。

ダイヤモンドNVセンターは赤色に発光する。この発光の強度はNVセンターの電子スピンの状態に依存し，電子スピン共鳴によりスピン状態を反転させると発光強度が変動する。また，ダイヤモンドが化学的に安定であり，生体親和性を持つことも長所である。

QSTでは，窒素を含有するダイヤモンドに電子線照射することで原子空孔を導入し，熱処理によりNVセンターを形成する技術を有していた。しかしながらこの方法では，照射中に原子空孔が複合欠陥を形成し，電子スピン特性の優れたNVセンターが得られない問題があった。この問題を克服するため，筑波大学と共同で「高温電子線照射技術」を開発し，照射中，試料を高温に保つことで複合欠陥の形成を抑制し，効率よくNVセンターを形成することが可能となった。さらにこの技術を用い，試料として100 ppm程度の窒素を孤立置換型不純物として含む高温高圧合成ダイヤモンドを用い，真空中，700～800℃で，2 MeVの電子線を，285時間にわたって照射した。途中および最後に1,000℃，2時間の熱処理を真空中で行うことで，NVセンターを高濃度(45 ppm)に含む高品質ダイヤモンド結晶の作製に成功した。

図1　ダイヤモンドNVセンターの模式図

このような高濃度NVセンター含有ダイヤモンドを用いて，筑波大学，住友電気工業株式会社，ハーバード大学(米国)，ウルム大学(ドイツ)，プリンストン大学(米国)，カリフォルニア大学バークレー校(米国)などとの共同研究により，理論的に存在が予測されていた「時間結晶」の室温観測に成功した[3)]。「時間結晶」は，連続的並進対称性を自発的に破り，時間的な繰り返しの周期性という離散的並進対称性が現れる現象である。

QSTの持つ材料創製技術をさらに活かすため，量子コンピュータの理論的基礎研究，量子慣性センサや固体量子センサなどの量子デバイス応用研究で世界的な成果を数多く上げている東京工業大学と連携し，材料創製から量子デバイス応用までの一貫した総合的研究開発を行うことを目的として，東工大大岡山キャンパスに「QST量子機能材料産学協創目黒ラボ」を平成30年8月1日付で開設し，固体量子センサの医療，ヘルスケア，車載，社会インフラ応用などの実現，社会実装を目指している。

### 2. グラフェンスピントランジスタ

情報デバイスによる電力消費の著しい増大の問題に対するブレークスルーとして，スピントロニクスという新しい技術が注目されている[4)]。スピントロニクスでは，電子が持つ電荷に加えて，これまでのエレクトロニクスでは利用されていなかった電子スピンを情報処理に用いることで，デバイスの処理速度を飛躍的に高め，電力消費を著しく低減することが可能である。これまでのスピントロニクスの研究は，磁気ランダムアクセスメモリ等の記録デバイスについて行われてきた。しかし，今後，スピントロニクスが情報技術の主役へと発展を遂げ，情報処理を行う際に中心的な役割を担うには，スピンを用いた演算デバイスの実用化が望まれる。なかでも，回路内を流れる電子のスピンの向きを制御することで情報の処理を行うスピントランジスタの実現は，スピンを用いた演算デバイスへの応用に不可欠である[5)]。

スピントランジスタの開発において，まず重要なことは，素子の回路内でスピンを運ぶ導線の材料の高性能化である。グラフェンは，従来の金属や半導体と比較してスピンを長距離にしかも高速に運ぶことが可能であることや[6)]，厚さが一原子しかなくナノスケールのデバイスへの応用にも適していることから，演算デバイスに用いるスピンの導線の材料として特に有望視されている。

グラフェンを用いたスピントランジスタを実現するためには，グラフェンを流れる電子のスピンの向きを制御するスピン操作の技術が不可欠である。通常の金属や半導体などでは，材料が持つ磁性や材料を流れる電子が感じる磁場(スピン軌道相互作用)を利用して電子のスピン

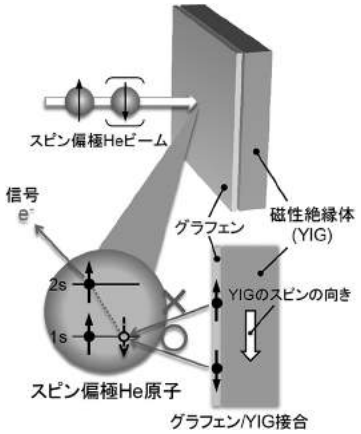



図2　スピン偏極ヘリウム(He)原子ビームによるスピン検出の原理。スピン偏極 He 原子をグラフェンに照射すると，He 原子は，グラフェンの表面で，それ自体が持つスピン(上向き)とは反対方向のスピン(下向き)を持つグラフェンの電子を検出して信号を発する。

の向きを制御できる[7]。しかし，グラフェンは磁性を持たず，スピン軌道相互作用も極めて弱いため，グラフェンそのものの性質を使ってスピンを操作することは困難である。このような問題に対して，QST では，電流が流れない絶縁体の性質を持つ磁性体をグラフェンに原子レベルで接触させることで磁性絶縁体からの作用によりグラフェンを流れる電子スピンの向きを制御できることを明らかにした[8]。

具体的には，絶縁体の性質を持つ磁性体として磁気光学デバイスやスピントロニクスの分野で広く用いられるイットリウム鉄ガーネット(YIG)の薄膜をグラフェンと原子レベルで接触するよう貼り合わせた接合を作製し，図2のように，量子ビームの一種であるスピン偏極ヘリウムビームを用いて，グラフェンと YIG の接合に含まれるグラフェンの電子のスピンを観測した。グラフェンは厚さが一原子分の厚さしかないが，スピン偏極ヘリウムビームは物質の最表面で散乱され下地には透過しないため，試料の表面にあるグラフェンのスピンを高感度に検出することができる。上記のような観測の結果，グラフェンの中を高速に動き導線の役割を担う電子(ディラック電子)のスピンが YIG の電子のスピンの向きと同じ方向に揃うこと，即ち，YIG の磁性を利用してグラフェンを流れる電子のスピンの向きを制御できることが明らかになった。

この研究成果は，グラフェンを用いた高速・省エネなスピントランジスタの実現やそれを用いたスピン演算デバイスの実用化に繋がることが期待できる。今後，QST は，放射光メスバウア分光，偏極陽電子ビーム等の現在保有している多彩な量子ビーム分析技術を駆使するだけでなく，磁性材料やスピントロニクス研究開発で世界を先導する東北大学等との連携を強化し，スピントロニクス演算デバイスの実用化を目指すこととしている。

## Ⅲ．量子光学研究

### 1．高強度レーザー技術・極短パルスレーザー技術

主要施設である，世界トップクラスのピークパワー(1PW=$10^{15}$W)を誇る J-KAREN(ジェイ カレン)[9]，軟 X 線領域である波長 13.9nm にて極めて空間コヒーレンスの高いレーザー光を発生可能なプラズマ軟 X 線レーザー装置[10]，繰り返し 1kHz にて 10mJ の近赤外線ピコ秒パルスを発生可能な QUADRA-T(クアドラ ティー)[11]は施設共用装置として運用しており，外部ユーザーも利用可能である[12]。

J-KAREN(図3)はチャープドパルス増幅法(CPA)[13]を基盤としたレーザー装置であり，主増幅部では Ti:Sapphire を増幅媒質として用いている。平成 24 年にはピークパワー 0.2PW を達成し，レーザー駆動による高エネルギー陽子線発生に成功するなどの成果をあげている。その後，出力性能，繰り返し性能，集光性の更なる向上を目指した高度化に着手し，平成 29 年に繰り返し頻度 0.1Hz にてピーク出力 1PW を達成した。可変形鏡システムを導入したフィードバック波面制御により集光性能の向上も図られ，当時世界最高であったターゲット上での集光強度は $3\times10^{22}$W/cm$^2$を実現し，利用実験への供給を開始している。高強度レーザーを用いた高強度場科学実験では，レーザーパルス到達前のノイズ成分ですらプラズマ生成に寄与する程度の強度となりうることから，パルスコントラスト(レーザーパルスとノイズ成分の S/N 比)をいかに高くできるが極めて重要な課題となる。J-KAREN では，CPA を 2 段階に分け，その途中で過飽和吸収体によるパルスのクリーンアップを行うダブル CPA 方式を世界で初めて導入した他，前段増幅部に光パラメトリック CPA 方式(OPCPA)を採用し，緻密な制御を行うなど，独自の技術開発により $10^{-12}$という極めて高いコントラスト比を実現している[9]。J-KAREN は，$10^{22}$W/cm$^2$を超える集光強度を 0.1Hz で定常的に供

図3　J-KAREN レーザーは世界トップクラスの集光強度(～$10^{22}$W/cm$^2$)を達成し，施設共用装置として運用されている。

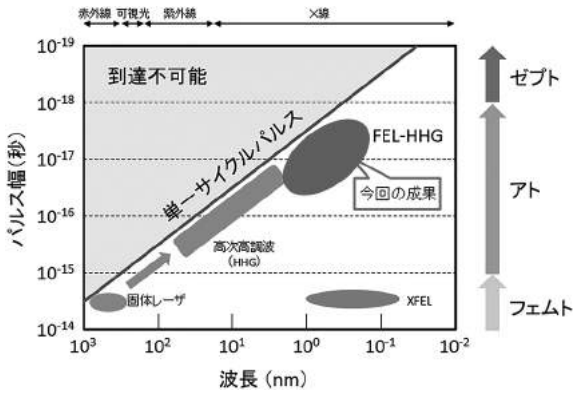



図4　自由電子レーザーに振幅と位相を制御したシード光を注入することで，位相制御された1nm以下の波長のアト秒パルスを発生することが可能。

給可能な世界屈指の高強度レーザー施設であり，国内外の研究機関との共同研究や施設共用制度による利用が始まっている。

近年，近赤外線領域(波長＝約1μm)の極短レーザーパルスをガス中に集光することで得られる高次高調波発生技術(HHG)により，時間幅が数十アト秒(1アト秒＝$10^{-18}$秒)で波の性質のそろった光パルスを紫外線の波長領域で発生し利用することが可能となってきている。QSTは，予め光パルスの振幅と位相を制御した微弱なレーザーを自由電子レーザー(FEL)の光共振器に連続的に注入し，発生したFEL光のパルス先頭部の位相をピン止めすることで，パルス全体の位相が制御できることを見出した。この手法により，位相を制御したFELパルスの発生が可能となる。さらに，HHGの短波長化に有利な4μm以上の中赤外線領域を選びFELを動作させることで，波長1nm以下(エネルギー1keV以上)のアト秒X線を10MHz以上の繰り返しで生成することが可能となる(図4)。この成果は，アト秒X線光源の実現に新たな道筋をつけるものであるとともに，電子の「励起」や「緩和」などにより極めて短時間に生じる化学反応や物質変化の観測や制御のための有力な手法として期待される[14]。

## 2. レーザー加速技術

現在，主要な研究テーマとして行っている量子メスの実現を目指したレーザー駆動イオン加速実験については，本稿第1回にて既に紹介されている[15]。

$10^{22}$W/cm$^2$という高い集光強度を実現したことにより，光の圧力にて直接荷電粒子を加速する輻射圧加速の実証が視野に入っている。輻射圧加速では，超高強度レーザーと薄膜の相互作用により，繭のような形状となるプラズマ中に電磁波が閉じ込められることでレイリー長を超える長距離のイオン加速が可能である(図5)。また，イオンと電子がほぼ等しい速度で前方に動くため，イオンエネルギーは電子エネルギーを大きく上回り，非常に高い加速効率が得られることが理論的に示唆されている[16]。実証実験ではnmスケールの薄膜をターゲットとして用いることから，レーザーパルスコントラスト性能が極めて重要であり，今後，更なる集光性能やレーザー波形制御技術の向上を図ることで輻射圧加速の実証を目指す。

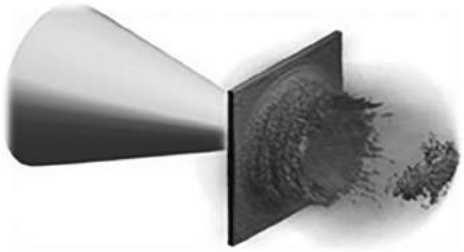


図5　輻射圧加速ではレーザーエネルギーを効率的にイオンの加速エネルギーに変換することが可能。重粒子線がん治療器(量子メス)の小型化につながる技術として期待される。

## 3. レーザー技術の医療・産業応用

採血なしに血糖値を測定する技術(非侵襲血糖測定技術)の開発は，可視光や近赤外光等を用いてこれまで20年以上にわたり行われ，一部では既に製品化を目指した開発も行われている。しかしながら従来の手法は，糖以外の各種の血液中の成分(タンパク質，脂質等)や環境条件(体温等)の影響を大きく受けるため，臨床応用に必要とされる十分な測定精度を得ることができていなかった。これに対し，中赤外光の領域では，特定の物質(グルコース)のみに選択的に光エネルギーを吸収させることができることから，吸光度から比較的容易にグルコースの量を計測することが可能である。しかし，セラミックヒーターなどの従来光源は，中赤外光領域での輝度が極端に低いため，血糖値測定に必要とされる十分な精度が得られなかった。我々は，固体レーザーの最先端技術と光パラメトリック発振(OPO)技術を融合させることにより，手のひらサイズの高輝度中赤外レーザーの開発に成功し，一定の条件の下，国際標準化機構(ISO)が定める測定精度(血糖値75mg/dl未満では±15mg/dl以内，75mg/dl以上では±20%以内に測定値の95%以上が入っていれば合格)を満たす非侵襲血糖測定技術を初めて確立した。本技術の社会実装を図るため，平成29年7月にQST認定ベンチャー「ライトタッチテクノロジー株式会社」を設立し，製品化に向けた取り組みを進めている。

トンネル等の社会インフラにて，コンクリート内部に生じた欠陥等の検出は，従来人の手による打音検査によって行われている。我々は，内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)にて，高強度レーザー技術を用いて，打音検査を遠隔・自動化する装置の開発を行った。通常の打音検査におけるハンマーの代わりに表

図 6　公道トンネルにおけるレーザー打音の実証試験。レーザー打音装置は移動車両(トラック)に搭載されている。

面を振動させるための「振動励起レーザー」，耳の代わりに表面の振動を計測するための「レーザー干渉計」，検査位置へレーザーを導くための「スキャナー」を組み合わせることでトンネル覆工コンクリートの打音検査を遠隔で行う。レーザーの繰り返し数を高めたことで，1 秒間に最大 50 点のデータを取得することが可能となった。レーザー装置の小型化，安定化，堅牢化を実現したことで，平成 30 年度には，開発した装置を移動車両(トラック)に掲載し，100km 程度の距離を移動し，実際に公道上のトンネルでの実証試験に成功した(図 6)。

## ― 参 考 文 献 ―


1) A. M. Zaitsev, *Optical Properties of Diamond: A Data* Handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2001.
2) A. Gruber et al., "Scanning Confocal Optical Microscopy and Magnetic Resonance on Single Defect Centers", Science 276, 2012-2014, 1997.
3) S. Choi et al., "Observation of discrete time-crystalline order in a disordered dipolar many-body system", Nature 543, 221, 2017.
4) L. W. Molenkamp et al., "Special Issue on Spintronics", IEEE Trans. Electron Devices 54, 904-906, 2007.
5) S. Datta et al., e "Electronic analog of the electro- optic modulator", Appl. Phys. Lett. 56, 665-667, 1990.
6) N. Tombros et al., "Electronic spin transport and spin precession in single graphene layers at room temperature", Nature 448, 571-574, 2007.
7) 高梨弘毅，"固体中におけるスピン流の創出と制御"，応用物理 3，255～263, 2008.
8) S. Sakai et al., "Dirac Cone Spin Polarization of Graphene by Magnetic Insulator Proximity Effect Probed with Outermost Surface Spin Spectroscopy", Adv. Funct. Mater. 28, 1800462, 2018.
9) H. Kiriyama, et. al., "High- Contrast, High- Intensity Petawatt-Class Laser and Applications", IEEE J. Quantum Electron. 21, 160118 (2015).
10) Y. Ochi, et al., "Development of a chirped pulse amplification laser with zigzag slab Nd: glass amplifier dedicated to x-ray laser research", Appl. Opt. 46, 1500-1506 (2007).
11) Y. Ochi, et al., "Yb: YAG thin- disk chirped pulse amplification laser system for intense terahertz pulse generation", Opt. Express 23, 15057-15064 (2015).
12) 施設共用 HP　http://www.qst.go.jp/site/qubs/1954.html
13) D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. 56, 21-221 (1985).
14) R. Hajima and R. Nagai, "Generating Carrier- Envelope-Phase Stabilized Few-Cycle Pulses from a Free-Electron Laser Oscillator", Phys. Rev. Lett. 119, 204802 (2017); http://www.qst.go.jp/soshiki/4/1255.html
15) 白井敏之，"量子メスの研究開発"，原子力学会誌 60，15-19 (2018).
16) T. Esirkepov, et. al., "Highly Efficient Relativistic- Ion Generation in the Laser-Piston Regime", Phys. Rev. Lett. 92, 175003 (2004).


## 著 者 紹 介

**佐藤隆博**（さとう・たかひろ）
量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門
(専門分野・関心分野)量子機能材料，加速器分析技術

**越智義浩**（おち・よしひろ）
量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門
(専門分野・関心分野)高強度レーザー技術，量子光学

解説シリーズ

# 安全かつ効率的な廃止措置に向けて

## 第2回 英国における原子力廃止措置の経験

駐日英国大使館　キース フランクリン，
日本原子力発電　山内 豊明

シリーズ第2回では，英国の廃止措置経験を紹介する。約60年前，日本が初めて商業炉を導入した先の英国では，これまで30年以上原子力施設の廃止措置に取り組んでおり，多くの経験から学びを得ている。英国の経験によれば，廃止措置の鍵は業界改革である。その改革とは，安全で効率的な廃止措置を進めるには「技術ソリューション」より，「人」と「プロセス」を重視する方針転換である。我が国の原子力関係者は英国の経験を理解し，改革を進め，安全かつ効率的な廃止措置を目指すことが重要である。

***KEYWORDS: Decommissioning, Industry Transformation, New Mission, Structural & Cultural Transition, People, Process, Technology***

## Ⅰ．はじめに

英国において，原子力施設の廃止措置に関する工法やプロセスは，コストを最小限に抑えるべく長年改善が重ねられてきた。効果的な廃止措置とは，最先端技術を使用することではなく，如何にそのプロセスを管理するかということである。本記事は，駐日英国大使館国際通商部原子力担当チームが英国の長年にわたる廃止措置の経験から学んだ教訓をまとめて2018年に発行した「英国に学ぶ原子力廃止措置の秘訣」を加筆修正したものである。

## Ⅱ．英国の原子力廃止措置の経験を日本と共有

英国と日本は，1960年代の国内初の商業炉東海発電所の共同建設以来，原子力の歴史を共有してきた。両国が原子力施設の廃止措置という長期プロジェクトに着手している今，共通の課題に直面している。

島国という共通点を持つ日英両国において，原子力施設はスペースの限られた海岸沿いの地域に立地している。原子力産業の構造は施設の建設から運転維持を念頭に置いて構築されているが，廃止措置を効率的に進めるためは技術ソリューションよりマネジメントのアプローチを適用して業界変革を進める必要がある。さらに，それと同時にそれぞれ独自のニーズや視点を持つ広範なステークホルダーの原子力産業に対する信頼を構築・維持していく必要がある。

英国はこれまで30年以上原子力施設の廃止措置に取り組んできており，この経験から価値ある知識と学びを得ている。この経験を日本と共有し，英国が経験した成功や苦い教訓が，日本で効率的な廃止措置プログラムを計画・実施する一助となることを願う。

## Ⅲ．英国廃止措置の課題と経験

英国は，安全性の高い原子力発電・燃料サイクル施設の運転と廃止措置の経験において，世界をリードしている。英国の原子力の歴史は1940年代の原子燃料生産・再処理に始まり，1957年にはそれに続いて世界初の商用原子炉であるコールダーホールが建設された。

今や英国には60年の原子炉運転経験があり，既存の改良型ガス冷却炉(AGR)および加圧水型原子炉(PWR)の運転が2040年まで継続することで，さらに蓄積が進む。また英国には原子力新規建設計画もあり，ヒンクリーポイントCの建設工事が進められており，2025年には運転を開始する予定である。

原子炉の運転に並んで，英国は世界でも最も複雑な原子力施設のひとつに数えられるセラフィールド・サイトの運営というユニークな経験も持っている。セラフィールドには金属燃料(マグノックス)・酸化物燃料(AGR・PWR)両方の使用済み燃料再処理施設や，70年前に建設された廃棄物処理・貯蔵施設など，危険度の高いレガシー施設がある。また，1957年に火災が起きた後に閉鎖された原子炉ウィンズケール1号機も同サイトにある。

英国の原子炉廃止措置の経験は，1988年のバークレー

*Sharing UK Nuclear Decommissioning Experience*：Keith Franklin, Toyoaki Yamauchi.
(2019年1月11日 受理)

原子炉閉鎖に始まり，その後第一世代マグノックス原子炉全26基(10サイト22基とセラフィールド内の4基)の閉鎖，燃料抜き取り，廃止措置と続いた。そして，マグノックス廃止措置計画と，それに並行する各種試験炉，再処理施設，そして重度に汚染されたウィンズケール1号機の廃止措置を進めてきた。これらを通じて，英国は多くの費用を費やす一方で貴重な教訓を得ることができた。そして，業界改革の一環として2005年に英国内唯一の原子力開発機関であり，セラフィールドの運営や廃止措置実施主体であったBNFLを破たん処理し，原子力廃炉庁(NDA)等を設立した[1)]。

現在，英国はNDAを中心に，これまでに学んだ教訓を生かして，セラフィールド，マグノックスおよび研究施設の廃止措置プログラムを進めるとともに，そして今後予定されるAGR廃止措置計画の策定を進めている。

## Ⅳ．業界改革が最大の課題

英国の経験は，業界とそのステークホルダーが「原子力施設の効果的な運転」から「卓越した廃止措置実施」への構造的・文化的な移行を実現できるか否かが，廃止措置の成否を決める大きな要因であることを示した。規制機関を含む業界全体を新しいミッションに向けて再編するには，多くの組織で根本的な変化と改革が必要である。これは非常に難しい課題である。

過去の英国では，業界と組織の改革よりも技術と工学を重視しすぎる傾向があった。業界改革がどれほど重要か，この点に十分な注意を払わないことが前進する上で最大の障害となることを，十分理解していなかった。また，業界を新しい廃止措置ミッションという目的に適合させるための変革には痛みを伴うが，それを実行するためにリーダーがどれほど努力しなければならないかを過小評価していた。英国が学んだ主な教訓を以下に示す。

- どの組織が何をするのかについて合意を取り，その合意どおりに進めるという明確なガバナンス体系が決定的な土台となる
- 廃止措置ミッションに関わるすべての組織にとって，鍵となる組織的原則はプログラムマネジメントであり，「運転」思考からの根本的な転換である
- 既存の文化は大きな障壁となる。変化に抗うのは誰もが持つ自然な反応であるが，変革をもたらすにはそれを乗り越える必要がある
- 特にプログラム＆プロジェクトマネジメントで新たな技能や能力が求められる。最初の段階から適切な組織の中でその能力を育成することが重要である
- 継続的な変革を推進するリーダーを支え，「封じ込め」志向による進捗停滞を避ける必要がある
- 規制機関も変化に適応する必要がある。強力・有能・独立という特性を維持しつつ，長期目標の達成に方向性を合わせる必要がある

英国の廃止措置へのアプローチは過去30年間かけて発達してきた。当初の技術的・工学的解決偏重から，廃止措置のためのもっと広範な「人」と「プロセス」の配備を重視するアプローチに移行した。この方針変更により作業進捗速度の向上とコスト削減がもたらされた。具体的には，2009～2010年度のマグノックス最適化廃止措置プログラム(Magnox Optimized Decommissioning Programme)の結果で，英国内の10サイト22基のマグノックス炉の廃止措置債務90億ポンドに対して，10億ポンドのコスト節約(1基あたりで，70億円の削減)を達成した[1, 2)]。以下に述べる通りこれまでの運転段階とは異なった「人・プロセス・技術」のバランスの取れたアプローチを取ることの重要性をこのプログラムから学ぶことができたのである。

## Ⅴ．人・プロセス・技術のアプローチ

英国の経験は，廃止措置を成功させるには廃止措置を支える人とプロセスの配備を特に重視する必要があることを示した。技術も重要な要素であることに変わりはないが，廃止措置のタイムスケールやコストを管理し，削減していくためには，スタッフに意欲があること，ソリューションが安全かつシンプルで適切にデザインされ，目的への適合性が維持されることが決定的に重要である。図1に「人・プロセス・技術」という面で英国が廃止措置の経験から得た主な教訓を示す。

### 1．人

廃止措置の成功には人が重要な鍵となる。「所有者/運営者」から「プロジェクト実行組織」への転換には，「稼働中の施設を維持する」から「変化し続ける環境の中で安全性を確保しつつ予算とスケジュールを守り，従来の成果を上回る」への移行が必要であるため，原子力運転から廃止措置への移行は組織にとってもそこで働く人々にとっても文化的に困難を伴うものであるということを，英国の経験は示す。

原子力運転から廃止措置への効果的な移行を達成する最善の方法は，「プログラムマネジメント」のアプローチを採用することであり，以下のメリットが得られる。

- 世界レベルのプロジェクトマネジメントを実施する能

図1　英国における廃止措置の経験～人・プロセス・技術

力を，組織として構築
・目的に適合し過剰性能にならない工学的ソリューションの開発
・ステークホルダーの信頼を構築
・プロジェクトの範囲・スケジュール・費用が漸増するのを回避
・金額に見合う価値を実現し，費用負担者(英国 NDA の場合は納税者)に提示

組織の廃止措置戦略を定義し，明確に伝えることは非常に重要であり，トレーニングによる支援が必要である。特に，中心スタッフの技能開発を進めて優秀なプログラム/プロジェクトマネージャーに育て，能力が最も高い人材(ベストアスリート)を各計画・プロジェクトに配置しなければならない。これを達成する方法はいくつか考えられるが，効果が確認された方法は以下である。
・計画やプロジェクトを複雑度，価値，新規性，影響波及の可能性などの特性によって分類(通常 1～4)。例えばレベル 1 は最も困難，レベル 4 は複雑度が最も低いなど。
・計画やプロジェクトを 1～4 に分類し，例えばレベル 1 マネージャーにレベル 1 の計画を担当させる等(ベストアスリート)，配置先の計画・プロジェクトに適した資格と経験を各人に持たせるための適切なトレーニング・能力開発計画を見定める。

英国の経験は，例えば管理能力の向上やスキルと作業複雑度のマッピングなど，廃止措置の「人」という側面を注意深く管理，配分することで，非効率性ややり直しを減らすことができ，全体的なタイムスケールを短縮することが可能となる。また，廃止措置は原子炉運転段階とは異なり，施設状況が変化していくことから，これまでのような機能型組織のままでは，組織や人が状況の変化に追い付かず，従来通りのメンテナンス作業を継続して非効率となってしまう可能性がある。施設状況に応じてフレキシブルに要員や安全対策作業を効率的に配置，実施できるようにすることが重要である。

発電施設の運転から燃料取り出しと廃止措置，そして現場の浄化へという移行を注意深く管理することは，人という側面から見て重要である。それは，移行のプロセスが，リソース(要員，資金)プロファイルと遂行される作業内容に変化を引き起こすためである。また，人々が変化を怖れるのは自然であり，そのために必要な移行に強い抵抗を示すことがある。経験からは，大きな転換を管理するには専任の「移行担当ディレクター」を任命し，以下の達成に責任を持たせるのが効果的であることがわかった。
・スタッフ削減の管理に一貫性がある
・スタッフが公平な扱いを受けていると感じる
・リソースレベルが廃止措置ライフサイクルの各段階に適合している

図 2　ライフサイクル移行管理

・ライフサイクルの各段階で正しいスキルが確保されている
・残留スタッフが適切なトレーニング・開発を受け，新しい役割を理解している
・社内リソース(育成＝ Make)と外部リソース(調達＝ Buy)の配分が適切で，「育成・調達(Make/Buy)戦略」に沿っている
・スタッフ削減の費用が，スタッフ解放に配分された予算に沿っている

こうした移行過程における人々への支援は，早期に透明性を確保して行えば，「定常状態を維持する運転」から「焦点を絞った廃止措置実施」という必要な文化的転換に役立つことが示された。また，ライフサイクル転換の「人」という側面を注意深く管理することで，次の作業段階に向けて正しい知識やスキルを確保し，必要がなくなったスキルは除くことができる。さらに作業負荷のピーク時の専門的作業実施とサポートの提供にサプライチェーンを利用することを合わせれば，これによってリソース費用の最適化とコスト節約を実現できる。

## 2. プロセス

プロジェクトを効率よく，コスト効果の高い形で実行するためには，プロジェクト実施を支える実用本位のプロセスが重要である。複雑で小回りの効かないプロセス(例えば，多くて複雑な QMS など)はマネージャーの不満を招き，また完了遅延，コスト増につながる。また，正しいプロジェクトが実行され，正しいやり方で遂行されるようにするためには，効果的で実際的なガバナンスプロセスが重要であることも，経験によって示された。プロセスに必要な主要特性としては以下がある。
・プロジェクトの範囲が最初から正しく規定され，確固たるビジネスケースが明示されていること
・ライフサイクル全体を通じてプロジェクトを評価できるよう，ステージゲート法(プロジェクトを複数のステージに分けて，進捗をステージゲートで管理する手法)を採用したプロセスが使用されていること
・実行完遂をサポートするため，十分なリソース(要員・資金とも)が配分されていること
・適切な間隔でプロジェクト保証レビューが実施されること

「正しい」プロジェクトソリューションが選択・実施されるようにするためには，「シナリオ選択」プロセスが重要なツールとなる。

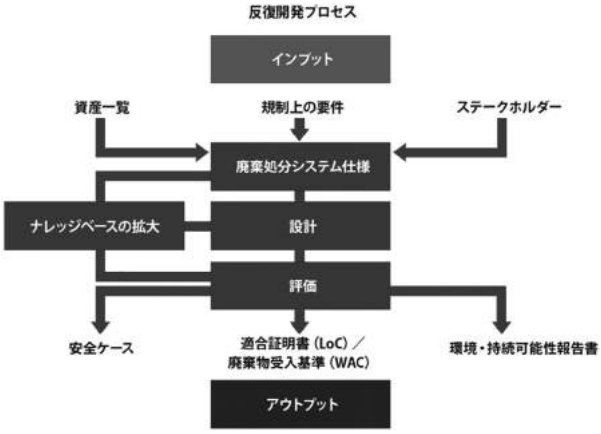



図3　廃棄物処理システムの反復設計プロセス

選択プロセスにより，最初の段階で「分野専門家」のチームが，プロジェクトソリューションの選択肢すべてを検討・分析する。このプロセスには，作業の実行に責任を持つマネージャーも参加しなければならない。

プロジェクト完遂のための適切なリソース配分には，一貫性のある育成・調達戦略が不可欠である。その戦略の必要条件としては以下がある。

・「育成」面が組織の人事戦略と整合していること
・専門的ソリューション実施にはサプライチェーンの専門家を使用するなど，作業遂行に「ベストアスリート」アプローチを採用すること
・内部リソース不足を把握し，作業負荷のピーク時に適切なサプライチェーンリソースを使って対処すること

プロジェクト実行を成功させるには以下の管理についてプログラム/プロジェクトマネージャーを補佐する専任の専門家チームのサポートが必要であることが経験から示された。

・計画立案（スケジューリング）
・コスト（見積り，管理）
・リスク（脅威，機会，不慮の事態）
・計画変更管理
・ステークホルダーとの対話

計画管理オフィス（PMO）を設置することで，マネージャーに対してコスト効果の高いタイムリーなフィードバックを出すことができる。

サプライチェーンとの契約システムとしても，早期にサプライヤーを巻き込むとともに，より長期にわたるサプライヤーとの契約枠組みを介することにより，サプライチェーンのイノベーションや「リード＆ラーン」の機会を増やすことができる。サプライチェーンとの契約枠組みにおいても，従来のリスク移転型（完全定額契約）からリスク管理型（実費償還＋インセンティブフィー契約）に移行することも有効である。

プロジェクト実施の成功には，ステークホルダーとの勇気ある対話をオープンで透明なやり方で進めることが不可欠である。ステークホルダーの信頼を失うのは易しいが，取り戻すのは難しい。ステークホルダーは広範にわたり，それぞれが異なるニーズを持ち，プロジェクトの異なる段階で異なるレベルの影響力を持つ。しかし，初期からの対話推進，透明性確保，相手の観点の理解，迅速な応答という原則は常に重要である。重要性が特に高いステークホルダーの例には以下がある。

・規制機関（原子力，環境，安全）
・地域住民
・政府省庁
・メディア（テレビ，新聞，ジャーナリスト）
・スタッフとサプライチェーン

包括的なステークホルダー管理計画の作成および運用は，廃止措置を支える重要なプロセスツールである。良好なステークホルダーエンゲージメントから得られるメリットを数量化することは難しいが，ステークホルダーの不満によって生じるダメージを過小評価してはならない。最悪のケースではプロジェクトの中止に至ることもあるのである。

以上まとめると，よくできたプロセスは安全性を高め，作業のやり直しを回避し，プロジェクト完遂を支え，実用的な「抑制と均衡」を提供する。よくできたPMOシステムは，管理チームにタイムリーなレポートとフィードバックを与えることにより，プロジェクト実施の向上につながる。

## 3. 技術

廃止措置の実施にあたり技術ソリューションが重要な要素であることに変わりはない。英国におけるイノベーションの経験からは，いくつかの基本原則が適用できることが示された。以下に廃止措置における技術ソリューションの例を示す。

(1)特性評価，サンプリング，試験の早期実施
・施設環境の理解
・具体的な特性評価の設計
・安全ケースの単純化
・信頼性と経験の蓄積

(2)安全で実用的な設計ソリューションの開発
・複雑なソリューションの設計より単純なシステム（例：油圧式，空気圧式，あるいは厳格な放射線管理下での手作業などのアプローチ）の使用を優先する
・特定の作業だけをこなす単純なシステムを設計する（例：大型廃棄物と残留廃棄物の回収を両方行う複雑な多目的機械を設計するのではなく，別々に回収を行う）
・設計ソリューションを現実的な条件下で早期に設計・試験し，設計が未試験のままで先の段階に進みすぎないようにする

(3)使用実績のある機器の使用
・他の産業分野で使用されている，実証済みの既成機器を使用。例えば，

図 4　廃棄物の処理に既存の一般産業機器を使用

◦壁表面切削機（鉱業）
◦金属配管設置の代わりに使い捨て「二重被覆」フレキシブルチューブやケーブル（石油化学産業）を使用

・新設計のカスタムソリューションよりも，実証済みの機器を応用（土木工学）
・複雑な機器による高危険性物質の長距離操作を避け，作業表面近くで遮蔽容器を使用
◦廃棄物や放射性物質の移動経路短縮
◦可動性の高放射性廃棄物・物質の移送を簡便化

こうした原則を適用することにより，初期のプロジェクトや他の成熟産業から学んだ教訓を生かし，一からの設計や作業のやり直しを回避することで時間とコストを節約するようにしている。わかり易い例としては，22 基のマグノックス炉の廃止措置を同時並行で進めるのではなく，先行炉の教訓を次の炉に反映できるように，22 基の全体プログラムを策定し，計画的に進めている。

また，技術的ソリューションを正しく使うことでステークホルダーの信頼も高まるため，ソリューション案に対してステークホルダーや規制機関の支持を得やすくなり，サイトから作業者へのリスク押し付けではなくリスク管理が行われていると認識されるようになるため，スケジュール改善にも役立つ。

以上のことは国内の廃止措置のレッスンズラーンとしても実証されている。例えば，東海炉に 4 基ある熱交換器の解体工事において，遠隔解体技術の習得のため，遠隔解体装置を用いて 1 基目の解体を行った。遠隔解体装置の設計，施工，操作技術について，多くの労力・費用・時間をかけて実証し，安全に解体することができた。一方，熱交換器自体は汚染レベルが低いので，比較対照のため，2 基目の熱交換器解体ではローテクな切断装置を用いて手作業で実施したところ，費用と期間は 1/3 以下で実施できる実績が得られている。また，同じく東海炉の廃棄物貯蔵庫からの廃棄物取り出し装置では，取り出しシステムに併せて廃棄物の分別システムも組み込んだ複雑なシステムとして設計，製作したが，運用実績として効率的な取り出し・分別する結果が残せなかった。これら東海での経験でも，技術開発や複雑なシステムよりも，ローテクであっても使用実績があり，着実な技術が効率的な廃止措置には有効であると認識できる。

## Ⅵ．英国の経験のまとめ

英国は，1988 年のバークレー原子炉閉鎖を皮切りに，30 年以上にわたり数々の原子力廃止措置を進めてきた。そこから英国が得た教訓は，革新的な技術ソリューションにとどまらない。技術ソリューションと並行して，目的に合わせた「人」と「プロセス」を如何に配備することができるか，それこそが安全最優先かつ最も効率的に廃止措置を進める鍵なのである。

## Ⅶ．おわりに

英国の経験は国や施設に関わらず，あらゆる廃止措置に共通であると考えられる。また，廃止措置は長期にわたるプロジェクトであり，現在も継続しながら改善し続けている。英国のこれまでの経験を踏まえると，これまでの建設や運転維持を目的に構築された日本の原子力業界の構造，カルチャーでは効率的に廃止措置を進めることは難しいと思われる。多くの原子力施設が廃止措置段階に移行した今こそ，日本の原子力業界が自らを変革していく必要があると考えられる。廃止措置が効率的かつ円滑に進めることは，国民のリスクを低減することであり，原子力業界の信頼回復にもつながる。ステークホルダーも含む日本の原子力関係者が，上述の「廃止措置を進める鍵」を理解した上で相互に協力するとともに，廃止措置関係者は自ら変革して，効率的な廃止措置の完遂を目指していくことが重要と考える。

― 参 考 資 料 ―


1) 長山浩章「英国における信託を使った原子力発電廃炉スキームと我が国への教訓」（信託研究奨励金論文集第 37 号）（2016. 11）61.
2) “Nuclear Decommissioning Authority Annual Report & Accounts 2010/2011”, P23.
3) “Nuclear Decommissioning Authority Annual Report & Accounts 2011/2012”, P28.


著 者 紹 介

Keith Franklin（キース・フランクリン）
駐日英国大使館
（専門分野/関心分野）原子力化学工学，廃止措置，放射性廃棄物対策

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

Short Report

# 厚板鋼材のレーザー切断技術

## －廃炉の時代の先端技術開発－

量子科学技術研究開発機構　田村 浩司，
日本原子力研究開発機構　遠山 伸一

原子炉の廃炉作業では，100mm を超える厚板鋼材の切断解体が必要とされる。このような鋼材の切断が可能なレーザー切断技術に関し，最新の研究開発成果について報告する。

## Ⅰ．はじめに

運転期間を終了した原子炉では，順次廃止措置が行われる。その際，原子炉構造物の切断解体が必要とされる。従来から実績のある切断法として，プラズマアーク法，アブレイシブウォータージェット法，機械式切断法などが知られている。一方，レーザー光を熱源とするレーザー法は，遠隔制御性が高く，ブレードなどの交換部品の必要性がないなど利点が多く，原子炉解体に適用できるならば有効な選択肢となりうると期待されている。

しかし，原子炉は圧力容器など 100mm を超える板厚の大きい鋼材で構成されている。従来，このような厚板鋼材の切断に関してレーザー法は知見や実績に乏しく，その適用性や有効性の展望に関しては，必ずしも肯定的なものばかりではなかったようである。

本稿では，ファイバーレーザーを用いた鋼材切断を様々な条件で試行し，原子炉に用いられるような厚板に関しても，適正条件により切断が可能であることを実証した成果や，厚板鋼材切断の廃炉現場適用に関連する先端的技術開発の成果に関して報告する。

## Ⅱ．厚板鋼材のレーザー切断

厚板鋼材の切断試験では，米国 IPG フォトニクス社製ファイバーレーザーの発振光を熱源として用いた。レーザー光を光ファイバーで導き，加工ヘッド内のレンズで集光し，鋼材に照射した。熱で溶融した金属を吹き飛ばして除去するためのガス（アシストガス）を，レーザー光と同軸状に噴射している。厚板切断は，たとえ可能であるとしても，レーザー光の照射配置，鋼材の移動速度や噴射ガス圧力など様々なパラメーターに依存すると考えられるため，切断可能な条件を探査して試行を行った。

図 1 はステンレス鋼（図左側の薄い部分）と低炭素鋼（図右の厚い部分）を組み合わせた鋼材試験片のレーザー切断試行結果である[1)]。それぞれ，沸騰水型（a）と加圧水型（b）原子炉の圧力容器壁を模している。図のように，切断溝部が直線状に左（加工ヘッド側）から右（出射部側）に抜けており，切断が達成された結果を示している。この配置は，実際の適用では加工ヘッドを容器内側に入れて行う切断に相当している。

このような試験結果から，圧力容器の板厚として想定される 300mm 程度の鋼材（炭素鋼やステンレス鋼）のレーザー切断が可能であることを示した。また，同様の切断手法で，大型配管を模した構造物や，複雑な形状を有する実際のゲートバルブの切断も示した。これらの結果は，レーザー切断が，圧力容器や廃炉現場の様々な対象構造物の切断に十分適用可能であることを示しており，レーザー切断の廃止措置における有効性を実証する結果である。

一方，切断に必要な諸条件がそろわないと，このような切断は達成されない。切断が達成できない場合，高出力のレーザーエネルギーが鋼材の外に抜けず，切断溝内に滞留してしまい，溶融金属が吹き戻したり，照射部分が大きくえぐり取られたりする。これは，作業上危険性の伴う事象である。そこで，どのような条件の組み合わせで切断が可能で，どのような場合に失敗するのか条件解析を行った。成功事例と失敗例を，それぞれの鋼材の入射面の切断部溝幅（カーフ幅）とアシストガス流量で条件整理し，切断可否をまとめたところ，おおよそ切断可能条件が，カーフ幅と流量のある条件範囲で実現できていることがわかった[2)]。これを，ガス流体に関する圧力計算を行うことで解析し，切断長に沿って溶融金属が移動できるガス圧力を維持できる場合に切断が可能となると考えると，この傾向がおよそ説明できることがわかった。このような解析を行うことにより，廃炉現場での高出力レーザーによる切断技術の適用を，より安全に予測・制御して行えるようにできるものと期待される。

このような高エネルギー熱切断の過程で，実際どのようなことが起きているのか，そのプロセスの観察は従来容易ではなかった。そこで，家庭用ビデオカメラを用いた簡便安価な方法を考案し，詳細な切断過程の観察を実現した[3)]。この方法により，照射部分の溶融金属がガス

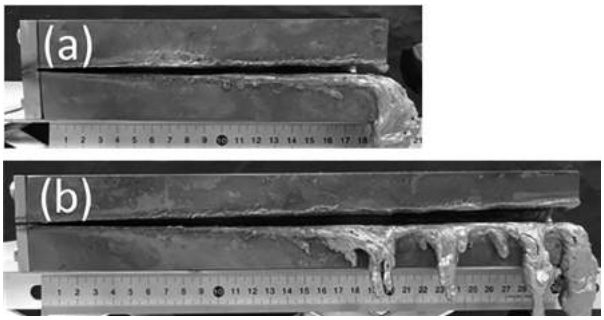



図１　圧力容器を模擬した厚板鋼材のレーザー切断結果[1)]

の風圧で変形している形態や，ガスにより切断溝部内を下流側に移動し，その過程で吹き飛ばされ除去される様子など，切断過程の詳細をリアルタイムで観察することができるようになった。また，加熱溶融した金属を吹き飛ばすレーザー法では，切断時における微粒子やヒュームの発生は避けられないが，原子力関連施設への応用では，これらは放射性廃棄物や汚染源ともなりうる。本手法は，このようなヒューム発生の様子も観察することができるため，今後，このような課題対処の一助となる可能性があるものと期待している。このような実際の切断過程のプロセスモニターは従来類例が少なく，切断プロセスの把握・解析に有用であると考えている。

この手法で，必要条件を満たさず切断が達成できない過程についても観察することができた。切断部が溶融金属で閉塞し，逃げ場を失ったレーザーエネルギーが壁面を削り，切断部に空孔部を生じる。ガス圧力の低下により，さらに切断溝部の入射面側に新たな空孔を作ることで，空孔が移動する過程を観察した。高出力レーザーの廃炉現場適用では，安全なプロセス管理が不可欠であるが，これら観測手法は，プロセス監視や，危険な状態を早期に知見する手法としても有効であり，レーザー法の安全な運用にも貢献するものと期待できる。

## Ⅲ．レーザー切断システムの構築

以上のような，300mm 厚の鋼材切断技術を実際の廃炉現場で利用するためには，小型化や遠隔操作の技術開発が必要である。そのために開発されたレーザー切断試験システム[4)]の概念図を図２に示す。本システムは，若狭湾エネルギー研究センターに構築されたものである。レーザー切断試験システムの全体システムは，バッテリー駆動の移動用ロボット台車に設置した産業用ロボットアームを制御し，３台のカメラによって切断する試料の形状を確認しつつ，ロボットアームの状態をノートパソコンに表示し，距離計で試料までの距離を測定して試料を切断することを特長とした試作システムである。加工ヘッドはプロセスケーブルで発振器(30kW)に接続されている。ロボット本体やケーブル類は，切断中にアシストガスにより飛散するヒュームが付着し，焼損するので，ステンレス繊維の布や，カーボン繊維等を用いた防

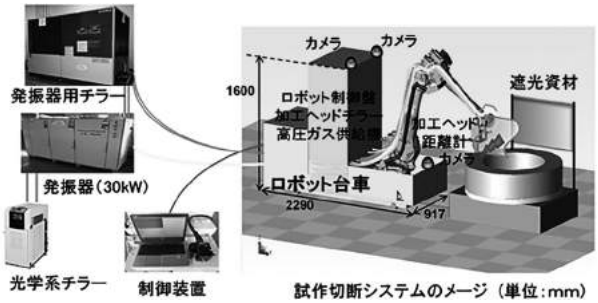



図２　レーザー切断システムの概念図[4)]

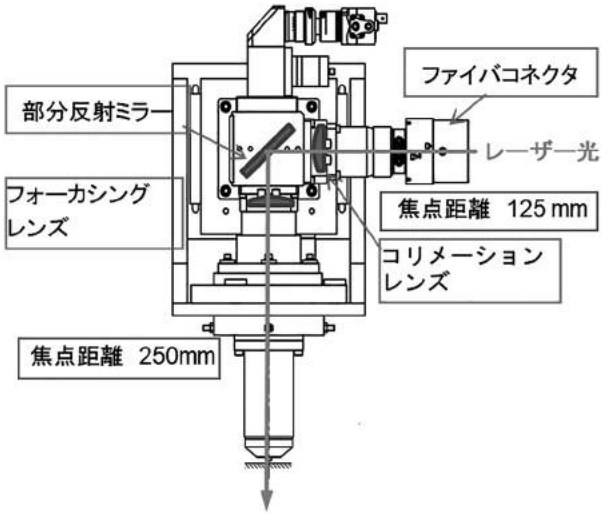



図３　加工ヘッド概略図

火性の高い遮光シートによって保護されており，ステンレス布にわずかの溶融が見られたものの，遮光シートに寸法変化や遮光性能変化は見られなかった。

ロボットアームで操作可能な小型軽量化のため，コリメーションとフォーカシングの焦点距離比を性能確認試験時の値 1:2 を維持しつつ焦点距離はそれぞれ 125mm と 250mm，各レンズ径は 50mmϕ，重量 15kg の小型軽量加工ヘッドを製作した。その概略を図３に示す。これにより，加工ヘッドの取り回しを容易にし，軽量化によりロボットアーム手首負荷を低減し伸長範囲を広くとることができた。性能確認試験ではレーザー光学系は直線形状であったが，本器では部分反射ミラー(誘電体多層膜)でビームを 90° 反射している。焦点距離比を同じにするのは，光学系の横方向倍率やビーム発散角等の基本的な光学特性を試験器と同じに保持するためである。ただし，２つのレンズのレーザー通過面積は，おおよそ焦点距離の二乗に反比例して小さくなるので，単位面積当たり５倍以上のエネルギーが通過しレンズへの熱負荷も増大し，熱収差が大きくなり，焦点距離の短縮化をもたらすおそれがある。そのため，実際の高出力レーザービームのプロファイルを直接測定してビームウェイストの移動(フォーカスシフト)距離や安定化時間の測定を行った。その結果フォーカスシフトは短時間にレイリー

長以下の長さに安定化でき，長時間の運転時においても切断性能の維持が期待できる。

ロボットアーム搭載小型軽量化加工ヘッドを制御して切断試験を実施した結果，300mm のステンレス材および炭素鋼材の切断能力を保持していることが確認できた。本ロボットアームは毎分 3m から低速では 6mm までの切断速度を設定することができ，切断材の厚みでは数 10mm から 300mm まで，レーザーの高い熱密度を生かし切断速度を選択でき，板厚数 10cm の鋼材においても高速切断が可能である。

切断システムの運転では，ロボットアームに取り付けた 3 台のカメラを用いて，切断の状況を確認しながら，また距離計を用いて試料までの距離を随時測定することにより，遠隔操作で 3 次元切断を実現する設計としている。ロボットアーム台車については，低重心でロボットアームの任意の形状でも安定に走行できることを基本に市販のリフターを改造しアームの伸長によるたわみが無いように補強を入れて設計し，コスト低減を図った。ロボット可動範囲内で加工ヘッドノズル先端の位置決め精度については，レーザー切断の特徴である狭いカーフ幅を実現し切断飛散物を少なくするため，可動範囲内でのプログラムによる繰り返し動作ではビームウェイストよりも小さい± 0.1mm 以内で位置再現精度を満たしている。またロボットアームの位置データの収集，3 台のカメラの画像表示とレーザー距離計による測定データの収集ができるオンライン測定系を有しており，対象物との距離測定についての測定誤差は，1mm 以内である。本切断システムは高出力レーザーを用いるので，切断時のカーフ面は非常に明るく飛散物も到来することから，切断前の測定データをロボットに教示するなどして，現状では切断中には測定系はモニター機能のみとしている。切断データを蓄積し，現場の切断方法や装置の移動・運転方法と合わせて検討し安全な遠隔切断手法の確立が今後の課題である。

## Ⅳ．おわりに

厚板鋼材のレーザー切断法技術開発に関して，最新の成果を報告した。これらの開発によりレーザー法は様々な対象物への適用，工期の短縮化，遠隔操作による被ばく低減も期待され，廃炉現場への適用をはじめ，福島事故収束，国土保全のための老朽社会産業インフラの解体など様々な応用への有望な選択肢となりうるものと期待される。

本技術開発の成果は，福井県の助成のもと，（公財）若狭湾エネルギー研究センターにおいて得られたものである。

－ 参 考 資 料 －

1) K. Tamura, R. Ishigami and R. Yamagishi, J. Nucl. Sci. Technol., 53, 916–920, 2016.
2) K. Tamura and S. Toyama, J. Nucl. Sci. Technol., 54, 1011–1017, 2017.
3) K. Tamura and R. Yamagishi, J. Nucl. Sci. Technol., 54, 655–661, 2017.
4) 遠山 伸一，峰原 英介，デコミッショニング技報，56, 55–65, 2017.

（2018 年 9 月 28 日 記）

## 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－

（4 月 2 日第 9 回論文誌編集幹事会）

・2 月 16 日から 3 月 15 日までに英文論文誌に 35 報，和文論文誌に 6 報の投稿が有った。
・論文誌編集委員会の 2019 年度の分野別編集委員選任の経過報告があった。
・第 7 分野からの意見を参考に論文審査分野の見直し案を検討した。
・英文化 WG の進捗が報告された。
・廃炉関係特集号の入稿状況が報告された。英文誌は 8 または 9 月号，和文誌は 9 月号印刷とする。
・編集委員会規程と JNST International Advisory Board 運営細則案の改訂案を了承した。編集委員のメール審議にかける。
・英文誌特集号刊行に関する手順書改定案を検討した。

（4 月 2 日第 10 回学会誌編集幹事会）

・巻頭言，時論，その他の記事企画の進捗状況を確認し，掲載予定について検討した。
・60 周年シンポジウムから記事企画の候補の検討を行った。
・学会誌アンケート結果で学会誌の所掌範囲ではない回答の纏めが担当者より提出された。当初の予定通り理事会で報告することとした。
・2019 年春の年会の企画セッションで，執筆が完了しているセッションや執筆打診中のセッションの状況を確認した。
・一部部会に打診中の連載講座の新企画について，新たに 2 部会から執筆可の回答があったという報告があった。
・最先端の研究開発シリーズの次のシリーズは，電中研としていたが原子力機構に変更し，企画を進めていくこととした。

編集委員会連絡先≪hensyu@aesj.or.jp≫

連載講座

# 核融合トリチウム研究最前線
## ー原型炉実現に向けてー
## 第9回　トリチウム安全閉じ込め

量子科学技術研究開発機構　岩井 保則，枝尾 祐希，磯部 兼嗣

核融合施設では，各種化学形で漏洩しうるトリチウムを施設内に閉じ込める設備を設け，万一の事故の発生に対してもトリチウム除去設備を用いて影響を緩和させる。トリチウム閉じ込めとトリチウムモニタリング，核融合施設の異常事象を想定したトリチウム除去設備の設計と実証研究例を紹介するとともに，固相からのトリチウム回収のあり方につき解説する。

*KEYWORDS: Fusion reactor, Tritium, Safety, Tritium confinement, Detritiation system, Recombiner, Scrubber column, ITER, Qualification, DEMO*

## Ⅰ．核融合炉におけるトリチウム閉じ込め

核融合施設の安全においては，トリチウムが施設全体に広範囲に分布することを踏まえ，施設内にトリチウムを閉じ込め，大量のトリチウムを含むガスをトリチウム燃料循環システムにて確実に処理することが重要となる。トリチウム閉じ込めの基本は，通常運転時の放射性物質の拡散を防止し，ALARA の原則に基づき汚染レベルを合理的に達成可能な低いレベルに維持することである。異常発生時においても，作業員，公衆，環境への放射線影響は許容レベル内を維持しなければならない。トリチウムの閉じ込めは施設内に多重の物理障壁を構築し，物理障壁毎に放射性物質を閉じ込めるための処理装置群と閉じ込めシステムを組み合わせることにより達成することができる。原子力施設では一般的に三重の閉じ込めシステムが設けられる。放射線作業従事者がアクセスする作業区域に放射性物質が放出されないように一次閉じ込めシステムを設ける。そのうえで，一般作業者，公衆，環境と接する作業区域の汚染を抑制するために二次閉じ込めシステムを設ける。一次閉じ込めシステム，二次閉じ込めシステムが機能しなかった際に，最終閉じ込めシステムが放射性物質による汚染から公衆と環境を守る。多重のトリチウム閉じ込めの概念の下で既存のトリチウム施設は設計され，安全に運用されている(図1)。

燃料として上限 4kg のトリチウムを保有する ITER における

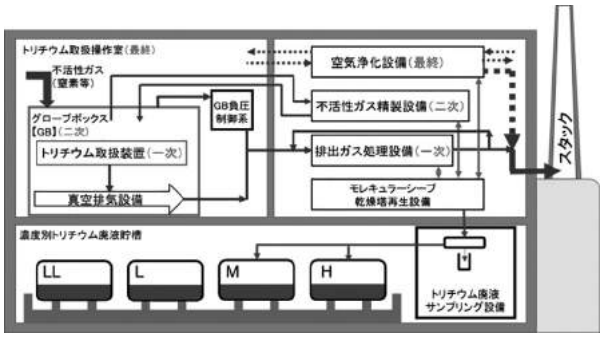



図1　トリチウムプロセス研究棟(原子力機構)における安全設備の概念系統図

おけるトリチウム閉じ込めの考え方も，既存トリチウム施設の経験と慣例，および原子力施設の閉じ込めガイドラインに基づいている[1)]。放射線作業環境は，5年間 100mSv の実効線量限度の勧告に基づき規定される年摂取限度を標準的な放射線業務従事者の作業時の年間呼吸量で割って得られる誘導空気中濃度(Derived Atmospheric Concentration ；DAC)を用いて管理される。トリチウムのみを考慮した場合の 1DAC は $3\times10^5$ Bq/m$^3$であり，1DAC が ITER の避難警報設定値となっている。ITER における主要システムに対しては，気密性の確保のための厳密な基準を適用し，品質保証と適切な管理により高気密性を実現する。そのためにはトリチウムに適合する材料のみを使用し，主要システムの総括のトリチウム漏洩速度は $10^{-9}$ Pa m$^3$ s$^{-1}$以下を遵守する。過加圧，過昇温，構造材を介したトリチウム透過に対する対策は適切に施す必要がある。真空容器のメンテナンス時に固相から回収されるトリチウムの除去などのトリチウム除去要求は通常時トリチウム除去システム(Normal Detritiation System；N-DS)が担う。また，安全性確保に対する本質的な対策として，機器内のトリチウム滞留量の最小化も重要であ

*Research frontier of tritium for fusion reactor-toward the DEMO reactor (9); Tritium safety confinement*：Yasunori Iwai, Yuki Edao, Kanetsugu Isobe.

(2018年8月20日 受理)

■前回タイトル
第8回　トリチウムプロセッシング

り，トリチウム燃料循環ループにおいては，設計段階で各プロセス機器内に滞留するトリチウムを最小化する対策を施す。そのうえで，これら機器をグローブボックス等に格納する。グローブボックスは専用のトリチウム除去システム(Glove Box Detritiation System；GB-DS)と接続し，トリチウムの閉じ込め・回収をおこなう。トリチウムプラントの室内圧力を微負圧に制御することで最終閉じ込めシステムを形成する。室内は常時，建屋の換気システムにより換気がなされているが，火災や地震等の異常事象に伴い室内にトリチウムが漏洩した場合，トリチウムモニター指示値の上昇を検知し，建屋の換気システムの自動隔離によりトリチウムを建屋内に閉じ込めた後，異常時トリチウム除去システム(Standby Detritiation System；SB-DS)を起動させて，室内の微負圧維持とトリチウムの除去をおこなう。漏洩の検知と建屋の換気システムの自動隔離は極めて迅速に実施することが可能であり，換気システム隔離前の過剰なトリチウムの環境への放出は起こらない。建屋に漏洩したトリチウムの室内拡散挙動は実験研究および数値研究が両面で進んでおり，換気システムが生み出している空気の流れと換気システム停止後の残留流れにより速やかに拡散し建屋内のトリチウム濃度は偏在することなく速やかに均一となることが示されている。異常時トリチウム除去システムは核融合炉を納める最も大きな区画においても負圧維持を行いながら，換気回数一回/日に相当するガス処理流量にてトリチウムが除去できるように設計されている。異常事象時に漏洩したトリチウムや不純物ガスは異常事象の進展等に伴う時間経過とともに刻々と濃度が変化していくことから，トリチウム除去システムの中でも，SB-DS の設計は処理要求ガス中に含まれる不純物ガスがトリチウム除去性能に与える影響を踏まえた動的な性能変化特性を十分に理解したうえで，要求性能を満たすように設計することが必要である。ITER においては，通常時，異常時の施設内の負圧維持要求・トリチウム除去要求の明確化に伴い，建屋換気システムおよびトリチウム除去システムの設計において，従来のトリチウム取扱い施設におけるトリチウム閉じ込め経験の知見に含まれていない技術項目が顕在化している。トリチウム除去システムは施設の異常発生中，発生後においても確実に機能の維持が求められるため，仏原子力規制当局の要求に基づくトリチウム除去システムの性能確証試験の実施により，設計の妥当性の検証を進めている。

トリチウム除去システムにて回収されたトリチウム水は，液相トリチウム回収を担うトリチウム水処理システムの液相化学交換塔にて濃縮し，電解により水素ガスに変換した後，トリチウムを燃料として再使用するため水素同位体分離システムにて高純度濃縮を行う。このように気相から回収されたトリチウムは最終的に燃料として再利用されるため，核融合施設内部においてトリチウムは閉じた循環を形成する。液相化学交換塔は環境へのガス放出を伴うため，施設からの通常時トリチウム放出を抑制するように設計することが必要である。

## Ⅱ．気相トリチウム回収

### 1．トリチウム閉じ込めとトリチウムモニタリング

トリチウムの管理基準濃度は水素分子状(HT)，水蒸気状(HTO)，メタンガス状($CH_3T$)，メタンを除く有機物およびその他の化合物に区分される。日本におけるトリチウムの法定管理基準濃度は放射線障害防止法告示別表第一に定められる。それぞれの化学形につき，作業室内中の一週間平均の空気中濃度限度や環境へ排出される排気中，排水中の三ヶ月平均の濃度限度が規定されている。濃度限度を満たしていることを確認するためのトリチウム測定は連続モニターが可能である電離箱(検出感度：約 $2\times10^4$ Bq/m$^3$)や比例計数管(検出感度：約 $2\times10^3$ Bq/m$^3$)，バッチ方式の液体シンチレーション測定器などを用いて実施されている。化学形により法定管理基準濃度が異なる規定に対しては，最も管理基準が厳しいメタンを除く有機物の管理基準を適用することが保守的となるが，核融合施設におけるモニタリングでは，合理的な管理のために，これら有機物も含めた弁別モニタリングを適用する必要がある。弁別技術の高度化とトリチウムモニタリング精度の向上は核融合施設内のトリチウムの分布と存在量把握の観点において喫緊の課題である。核融合施設内の環境モニタリングにおいては比例計数管を用いたラドンとの弁別技術や逆同時計数法による外部ガンマ線影響の除去技術などが既に実用化されている。

### 2．トリチウム除去設備

気相中からのトリチウム回収を担うトリチウム除去システムではトリチウムが水素と同様の化学的性質を持つことを利用し，触媒酸化反応器にて酸化させて水蒸気状トリチウム(トリチウム水：HTO)とし，トリチウム水蒸気回収システムにてトリチウムを回収する(図 2)。

トリチウムの酸化には貴金属水素酸化触媒を使用する。触媒を用いた水素酸化は原理的には極めてシンプルであるが，トリチウム除去システムへの適用においては，処理対象となるトリチウムの水素同位体としての濃度が極めて小さいことや，核融合炉に生じる可能性のある，あらゆる異常事象において，水素に由来する様々な副反応を考慮しつつ，高い除去効率でトリチウムを回収しなければならない要求に応えることに技術的な複雑さを有する。現在，ITER トリチウム除去システムで使用が想定されている触媒塔は運転温度と酸化対象のトリチウム化学種の違いにより 3 種類に分けられている。200℃の運転温度で主に水素分子状トリチウムの酸化を目的とする低温酸化触媒塔，500℃の運転温度でトリチウム化メタンの燃焼を目的とする高温酸化触媒塔，施設

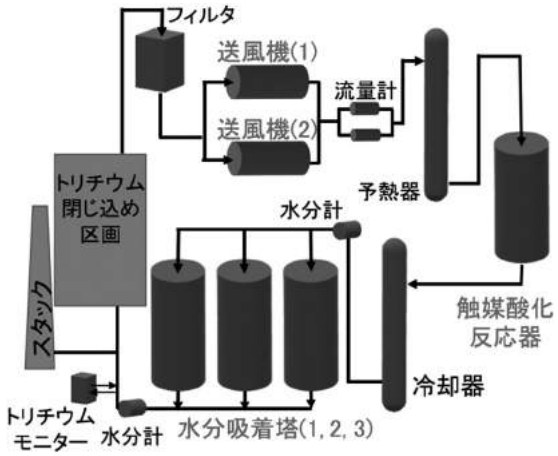



図2　トリチウム除去設備の基本構成
（触媒酸化-水分吸着方式）

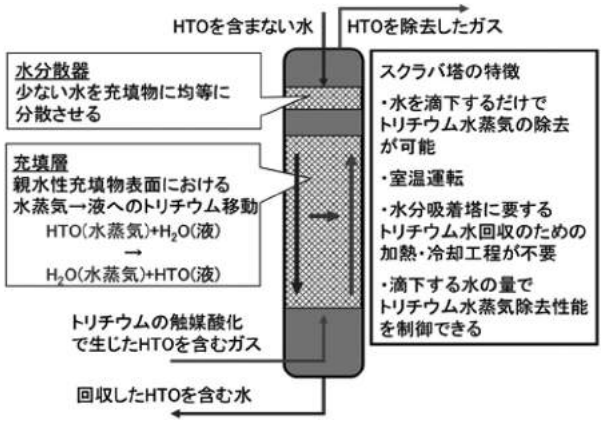



図3　スクラバ塔によるトリチウム水蒸気除去の原理

異常発生時において室温にてトリチウムを酸化する機能をもたせた室温酸化触媒塔である。N-DS，SB-DS の両者では想定処理事象において，処理を要するガスに含まれる不純物ガスが異なるため，異なった触媒塔の構成にて対応する。N-DS では低温酸化触媒塔と高温酸化触媒塔，SB-DS では室温酸化触媒塔と低温酸化触媒塔を組み合わせ，両触媒塔が補完し合い，要求されるトリチウム酸化効率を満たすように設計される。

トリチウム水蒸気回収システムとして ITER は向流水蒸気-水間水素同位体交換塔（通称スクラバ塔）を用いる。既存のトリチウム取扱い施設においてトリチウム水蒸気回収システムとして使用されてきたモレキュラーシーブ水分吸着塔は，大規模な核融合施設建屋による処理対象区画の増大に伴い，必要処理ガス流量の増加により塔の規模が過大になること，吸着・再生・スタンバイのモード切替におけるバルブの想定故障確率が許容値を超えること等から ITER はスクラバ塔の採用を決定した。スクラバ塔は親水性充填物が充填された塔内において，塔上部から滴下する純水により充填物表面を均一に濡らし，塔下部から供給される処理ガス中のトリチウム水蒸気と充填物表面の水との間でトリチウムの交換を行うものである（図 3）。親水性充填物の技術の進展を受け，効率的な交換が可能となり実用化が見通せる段階となった。既存トリチウム取扱い施設のトリチウム除去システムではスクラバ塔の使用実績がないため，ITER への適用に向けて，仏原子力規制当局の要請に基づき，パイロット規模スクラバ塔によるトリチウム水蒸気回収性能評価試験が実施された。

## 3. トリチウム閉じ込めと気相トリチウム回収に関する実証研究

核融合施設のトリチウム除去システムの設計において特に考慮を要するのは，地震および施設内の火災への対応である。地震対応においては想定地震動に対してシステムの機械的・機能的健全性を確保することが必要となる。火災に対しては火災時に生じる多くの不純物ガスがシステムのトリチウム除去性能に与える影響を評価し，その影響度を考慮した上で所定のトリチウム除去性能が達成できるように設計しなければならない。火災により生じる主要なガスとしては電線被覆材である高分子の燃焼により生じる炭化水素や水蒸気があげられる。電線被覆材にハロゲンが含まれる場合はハロゲン化水素の生成も考慮する必要がある。トリチウム除去システムへの影響を緩和させるために核融合施設で原則使用しないという対応が考えられるが，ハロゲンを含む高分子材は耐放射線性があり高線量区域においては他に選択肢がないという状況がある。火災によりトリチウム漏洩とともに炭化水素ガス・水蒸気・二酸化炭素等を含むガスをトリチウム除去システムにて処理しなければならない場合において，主に酸化触媒塔において以下の複合的な問題を考慮する必要が生じる。①水蒸気による貴金属触媒のトリチウム酸化触媒活性の低下，②炭化水素の燃焼により生じる反応熱による酸化触媒塔の過度な温度上昇，③ハロゲン化水素による触媒活性の低下，④酸化触媒塔におけるトリチウムと炭化水素間の副反応により生じるトリチウム化炭化水素の生成とその処理。電線被覆材の燃焼により生じる主要な炭化水素ガスはメタン，エチレン，プロピレン，ベンゼンである。火災以外にも中性粒子ビーム入射加熱系の高電圧絶縁用に用いられる六フッ化硫黄（$SF_6$），窒素を用いたプラズマ放電の結果生じるアンモニア（$NH_3$）の影響も評価を要する。スクラバ塔を用いたトリチウム水蒸気回収システムにおいても上記不純物ガスの影響を実験的に評価する必要がある。

ITER においては仏原子力規制当局からトリチウム除去システムの性能確証試験の実施と結果報告が要請されている。性能確証試験では酸化触媒塔，スクラバ塔において上記の不純物影響を個別に評価する段階が完了し，現在はトリチウム除去システムの一連のモジュールを用いた統合試験の準備を進める段階に移行している。

酸化触媒塔の性能確証試験では，トリチウム取扱い施

設で培ってきたトリチウムの触媒酸化の経験に加え，核融合施設で発生が想定される不純物ガスに対するトリチウムの触媒酸化への影響の評価と，既定の酸化効率を得るために必要な充填触媒量を導出するための総括反応速度係数の評価を要する。トリチウムを含む水素の酸化には白金触媒の活性が高く，白金触媒が既存トリチウム取扱い施設のトリチウムの触媒酸化塔に使用されてきた。不純物ガスの中で白金触媒のトリチウム酸化効率を最も低下させるのは水蒸気であり，必要な充填触媒量の導出は水蒸気存在下におけるトリチウム酸化の総括反応速度を基準とすべきことを明らかとした。水蒸気による触媒活性の低下は水蒸気が触媒の活性サイト周辺を被覆し，被覆層がトリチウムの活性サイトへの移動抵抗となることに起因している。よって量子科学技術研究開発機構では水蒸気影響を緩和させるために疎水性を有する触媒の開発を進めてきた。施設異常発生時に室温にてトリチウムを酸化する機能を有する室温酸化触媒塔においては水蒸気の触媒の活性サイトへの吸着が顕著となる為，疎水性触媒は水蒸気によるトリチウム酸化性能の低下を大幅に緩和できることを示した。トリチウムを含む水素の触媒酸化の速度には水素濃度依存性があり，特に室温では水素濃度依存性が顕著となる。火災による高分子材の燃焼により水素ガスが発生する場合は，水素濃度が上昇するためトリチウムの触媒酸化は促進される。対して空気中に自然に存在する水素濃度に限られる雰囲気に微量のトリチウムが漏洩する場合は最もトリチウムの酸化効率が低くなる。火災時に発生が想定されるエチレン，プロピレン等の炭素の二重結合，三重結合を有する炭化水素ガスがトリチウムとともに室温酸化触媒塔に供給された場合，触媒塔内ではトリチウム酸化の主反応とともに，炭化水素ガスの水素化反応によるトリチウム化炭化水素の生成が副反応として生じる。副反応による炭化水素内へのトリチウムの取り込みに伴い，主反応によるトリチウムの酸化効率が大幅に低下するのが問題である。副反応を抑制することがトリチウムの室温酸化には重要であり，室温で二重結合，三重結合を有する炭化水素ガスを酸化処理する触媒の研究開発を進めている。対して炭素の二重結合，三重結合を有しないメタンの同位体交換によるトリチウム化の速度は極めて小さいことを明らかとした。よって施設火災時のトリチウムをワンススルーで処理する SB-DS においては室温触媒塔，低温触媒塔上の副反応によるトリチウム化メタンの生成は極めて少なく，トリチウム化メタンを酸化処理する高温酸化触媒塔の必要性は低い。対して通常時にトリチウムを循環処理する N-DS においては長時間の循環操作によりトリチウム化メタンが徐々に生成されることは既設のトリチウム取扱い施設でも実測されており，トリチウム化メタンの処理に高温酸化触媒塔を要する。酸化触媒塔の性能確証では定常状態における各素反応の精査を基礎データとし，トリチウム処理においては濃度が動的に変化していくことを踏まえ，複合反応からなる動的な触媒酸化挙動を把握してきた[2)]（図 4）。

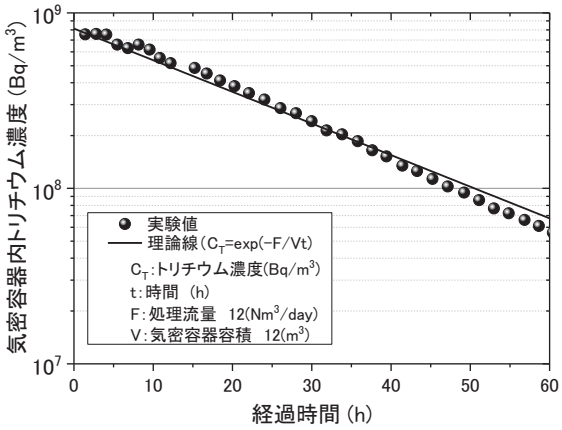



図 4　大型気密容器に接続したトリチウム除去システムを用いた火災模擬ガス下における除染性能実証の例

スクラバ塔によるトリチウム水蒸気除去については既存トリチウム施設での使用実績がなく，原理実証からの性能確証を進めてきた。スクラバ塔のトリチウム水蒸気除去においては塔内充填物に親水性を有する Sulzer 社製の特殊な CY 充填物を適用し，低滴下流量で水の塔内充填物への均一の分散を可能とする水分散器と合わせて，塔内充填物の均一な水濡れ性を確保し，効率的なトリチウム水蒸気と水間のトリチウム交換を実現している。塔内充填物の均一な水濡れ性が性能確保の鍵となるため，水濡れ性のスケール効果の把握が重要な課題であり，ガス流量基準で ITER 実機の 20％規模のパイロット規模スクラバシステムを用いて性能実証を進めてきた。スクラバ塔におけるトリチウム水蒸気の除去性能は処理ガス流量中の水蒸気モル流量を滴下水モル流量で割ったラムダ値が性能支配因子であることを実験で明らかとした。スクラバ入口におけるトリチウム水蒸気濃度を出口トリチウム水蒸気濃度で割ったトリチウム除去係数でスクラバ塔の性能を評価した場合，スクラバ塔の性能はラムダ値に強く依存し，滴下水モル流量を 20％増やすことでトリチウム除去係数は 10 倍に向上する。ITER のスクラバ塔はトリチウム除去係数の確保とトリチウム回収の結果として生じるトリチウム廃液の低減を両立させるため，ラムダ値 1 においてトリチウム除去係数 1000 が達成できるように実験で評価された物質移動係数に基づいて設計される。ITER のスクラバ塔は塔高 8m 程度を要するため，トリチウム除去システムにおいて地震影響が最も懸念される。スクラバ塔が設置される ITER トリチウム建屋の想定地震動に対してスクラバ塔のトリチウム除去性能が維持できることを証明するための機械的・機能的健全性を確保することが必要となる。実機スクラバ塔に地震動が与えられた場合に充填物・水分散器の変形の原因となる加速度の最大値を数値評価し，三次元加

振台を用いてパイロット規模スクラバ塔内の充填物・水分散器に実機想定以上のおよそ2倍の加速度を与えた後，加振後のスクラバ塔のトリチウム除去性能を評価する試験を実施した。加振後スクラバ塔のトリチウム除去係数が加振前に比べて低下する傾向は見られず，ITERサイトで想定される地震動に対して，トリチウム除去性能が維持できることを実証している。

## Ⅲ．固相トリチウム回収

核融合施設において，気体状および液体状を問わず，トリチウムに接する配管や材料はトリチウムにより汚染される。汚染はトリチウムが固相である材料中に吸着および溶解した状態であり，固相からトリチウムを回収することは，材料のトリチウム保持量を低減させることを意味している。したがって，固相からのトリチウム回収は固体トリチウム増殖材らのトリチウム回収や炉内や廃棄物のトリチウム保持量を低減させる観点で重要視されている。それ以外にも材料中に存在するトリチウムが，気相や液相へのトリチウム放出源となることから，解体・補修作業前に材料中のトリチウムを低減させておくことは安全かつ効率的な作業実施に不可欠である。固相におけるトリチウム保持量は材料の種類や温度だけでなく，材料が接するトリチウム環境やその履歴に依存するため，評価は容易ではない。固相からのトリチウム回収は，原理としては固相へのトリチウム侵入過程とは逆に，固相中のトリチウムを表面に移動させ表面から脱離させるか，熱や化学反応などで固相そのものの分解とともに放出させるかの二通りしかない。後者は材料中の全トリチウム保持量を評価するなどといった研究目的で使用されるが，ブランケットモジュールやダイバータカセットなどの融合炉機器からのトリチウム回収については前者の方法しかとりえない。したがって，固相よりトリチウムを回収することは，固相から表面へのトリチウムの移動と表面からの脱離を如何に促進するかが鍵となる。トリチウム回収の対象となる材料は，核融合施設においては固体金属やセラミックスが対象であり，これら材料中の水素(トリチウム)は温度とともに拡散速度が上昇するため，加熱することが有効な手段となる。しかしながら，固相におけるトリチウムの移動速度はその固相自身によって決まっており，温度以外の外部要因を任意で設定できないことから，材料の製造段階において，より短い移動距離で表面に達するような構造とする，金属間化合物などの高速拡散経路が存在するような材料設計とする等の工夫が必要となる。一方，脱離については，ガスパージや真空(低圧)とすることで回収側の化学ポテンシャルを低下させる方法が簡便であり，トリチウム取扱い施設において広く用いられている。また，水による同位体交換反応を利用した脱離が最も効果が高いことが知られており，水蒸気を含んだガス，例えば室内大気によるパージや水浸によるトリチウム回収も実施されている。しかし，この水蒸気や水によるトリチウム回収は，表面に吸着した水分子の除去が難しく，常に表面にトリチウム水が吸着した状態となることから，廃棄物など再使用されない材料が対象となることが多い。また表面のトリチウム保持量が多い材料に実施すると，その有効性ゆえ，回収側のトリチウム濃度が著しく上昇することもあるため，注意が必要である。固相からのトリチウム回収は，固相(材料)の性状と回収側環境により強く依存するため，経験に基づく手法の積み重ねで進展してきた。今後，ITERのメンテナンスといった運転経験を通し，原型炉で必要とされるトリチウム回収技術の知見が得られていくであろうが，その技術適用のためには裏付けとなる実材料を用いた研究開発が不可欠である。

－ 参 考 資 料 －

1) M. Glugla, et al., “The ITER tritium systems,” *Fusion Eng. Des.*, 82, 472-487 (2007).
2) Y. Edao, et al., “Effect of hydrocarbons on the efficiency of catalytic reactor of detritiation system in an event of fire,” *J. Nucl, Sci. Technol.*, 53, 1831-1838 (2016).

著 者 紹 介

岩井保則（いわい・やすのり）
本誌，61[2]，p.62(2019)参照.

枝尾祐希（えだお・ゆうき）
量子科学技術研究開発機構
(専門分野/関心分野)核融合炉を目指したトリチウム理工学，トリチウム回収，トリチウム除去システム

磯部兼嗣（いそべ・かねつぐ）
本誌，61[2]，p.62(2019)参照.

談話室

# リケジョの思い(3)
# つまずきは，扉になる

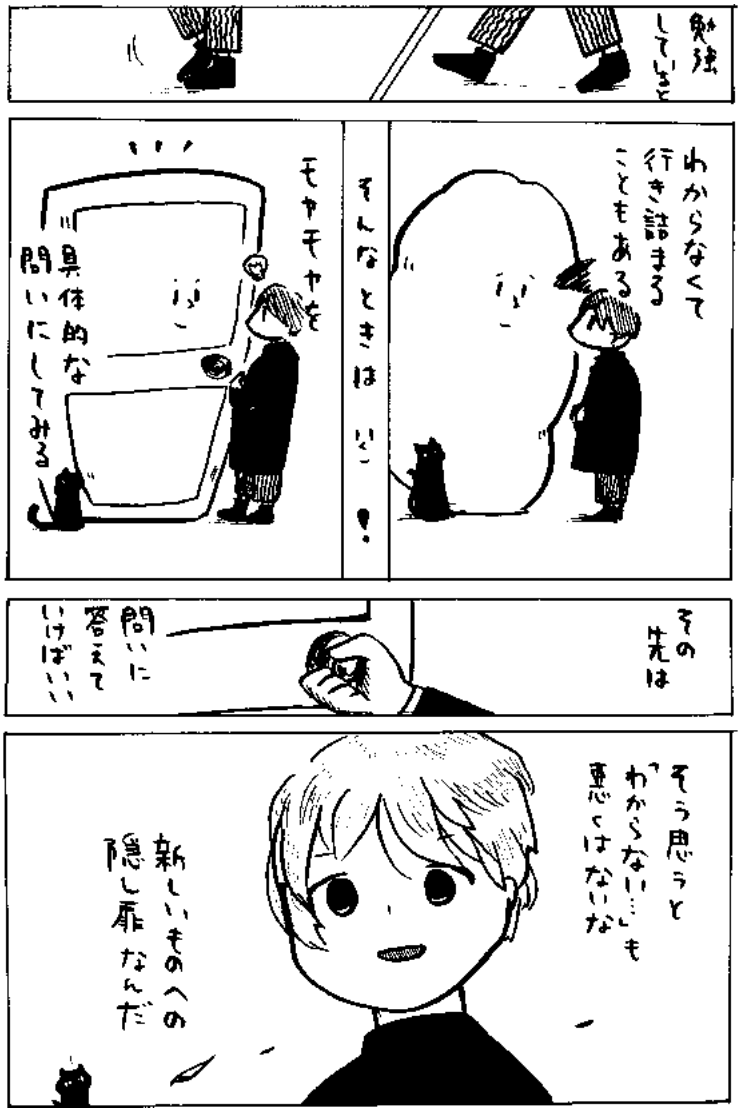
こんにちは。口町です。今日も研究室にいます。相変わらずパソコンの周りは本と紙であふれ…ゴホンゴホン。昨年の春に研究室に入ってから，いろいろなことを学んでいます。今日はそれを少しだけ，ご紹介したいと思います。

研究室では毎週ゼミがあります。勉強したことや興味のある論文について，研究室のメンバーの前で発表するというものです。そこでよく出てくる質問があります。「何がわからないの」というものです。納得していないみたいだけど，何を解決できればあなたは納得できるの，というわけです。その言葉から，あるとき気づいたのです。あ，そうか，私の疑問は今，曖昧なんだ。モヤモヤしているのを具体的な問題にすればいいんだ。そうすれば，あとはその問いに答えればいいことになる。モヤモヤを質問に変えることこそが大切なのです。

思えば，大学の勉強と同じようなことがありました。中学校のことです。学校の理科の教科書に，天気についての章があります。私はそれが苦手でした。どうしても高気圧，低気圧がわかりませんでした。高気圧とは，周りより気圧の高い部分。ふむ。では，図にしよう…あれ，なんだかうまくいかない。どうにか考えようとする。頭がぼんやりしてきて一向に進まない。こんな感じです。

おそらく中学生の私も，自分が何を疑問に思っているのかがよくわからなかったのでしょう。なぜか図が書けなくて，モヤモヤしている。ここには具体的な問いがありません。だから，考えようがなかったのだと思います。あのときの疑問を具体的にするとしたら，こうじゃないだろうか…気圧ってなんだろう？気圧が高いところがあったら，気圧が低いところに空気が流れて，均一になるんじゃないの？なんで気圧の高いところと低いところがあるのだろう。そうしたら，まずは気圧について調べたり考えたりすればいいことになる。それで納得できれば，一つの答え。もし納得できなくても，それはきっと中学校で習うよりも深いところにつながっていて，新しい世界にふれるきっかけになったことでしょう。それもまた一つの答えだと思います。問うことで，新しい世界を開いていけるのです。

もしかすると，勉強するときのつまずきは，ただの壁ではなくて隠し扉なのかもしれません。わからないことは，おもしろいことにつながっている。これも，大学で学んだことの一つです。




著者紹介

口町和香（くちまち・わか）
北海道大学理学部４年生です。
散逸構造を中心に学びつつ，科学コミュニケーションを手掛けています。

FOCUS 国内外の原子力教育事情（3）

# 東京大学原子力専攻（専門職大学院）の概要

東京大学　長谷川 秀一

*KEYWORDS: Nuclear Professional School*

## Ⅰ．原子力専攻（専門職大学院）

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻は，2005年4月に，日本で唯一の原子力分野の専門職大学院として，東海地区に設置された。すでに213名の修了者を輩出し，卒業生は各分野で活躍している。入学者の多くは，原子力の関係分野で勤務している社会人である。しかしながら，新卒学生や，原子力を知りたいという関連のない分野などからの入学もある。本専攻の標準修業年限は1年間であり，修士論文研究はない。必修科目を含む30単位以上を修了することにより，原子力修士（専門職）の学位が与えられる。さらに，設定されている科目を所定の成績で履修した修了者は，日本の原子力に関する主要な資格である，原子炉主任技術者，核燃料取扱主任者の試験の一部が免除されることになる。本専攻の運営には，専任教員ばかりでなく，日本原子力研究開発機構をはじめとして，多くの関係機関からのご援助をいただいている。このように，日本における通常の工学系大学院修士課程と異なることから，日ごろ専門職大学院について様々なご質問を受ける。この原稿執筆の機会を頂戴したので，本専攻の概要について紹介する。

## Ⅱ．原子力専攻の制度上の特徴

本専攻は，通常の大学院修士課程ではなく，専門職修士課程である。そのため，授与される学位も，「原子力修士（専門職）」である。ちなみに，東京大学には4つの専門職大学院が設置されている。専門職大学院とは，学校教育法第99条第2項に規定されている。そもそも，大学院の定義が第99条であり，「大学院は，学術の理論および応用を教授研究し，その深奥をきわめ，又は高度の専門性が求められる職業を担うための深い学識および卓越した能力を培い，文化の進展に寄与することを目的とする。」となっている。この第2項が専門職大学院であり，「大学院のうち，学術の理論および応用を教授研究し，高度の専門性が求められる職業を担うための深い学識および卓越した能力を培うことを目的とするものは，専門職大学院とする。」と実務に重点を置いた形で定義されている。そのため，通常，専門職大学院として想起される法科大学院のように，必ずしも国家資格とリンクしている必要はないようである。専門職大学院を修了した際に授与される学位は，同第104条に規定されており，「専門職大学院の課程を修了した者に対し文部科学大臣の定める学位を授与するものとする。」とある。そこで，本専攻修了者に対しては，原子力修士（専門職）の学位が授与される。

専門職大学院は，通常大学が受ける認証評価機関による評価に加えて，政令で定める期間ごとに認証評価を受ける必要がある（同第109条第3項「専門職大学院を置く大学にあつては，前項に規定するもののほか，当該専門職大学院の設置の目的に照らし，当該専門職大学院の教育課程，教員組織その他教育研究活動の状況について，政令で定める期間ごとに，認証評価を受けるものとする。ただし，当該専門職大学院の課程に係る分野について認証評価を行う認証評価機関が存在しない場合その他特別の事由がある場合であつて，文部科学大臣の定める措置を講じているときは，この限りでない。」）。本専攻においては，原子力分野の産業技術系専門大学院の認証評価機関として，2010年3月に一般社団法人日本技術者教育認定機構（JABEE）が文部科学大臣により認証されて以降は，5年ごとにJABEEによる認証評価を受ける必要がある。初回は，2014年度に認証評価を受け，2017年度に改善報告書検討結果が開示されている[1)]。次回は，2019年度に予定されている。

本専攻のもう一つの特徴は，原子力分野で主要な，原子炉主任技術者試験，核燃料取扱主任者試験での科目の一部免除である。原子炉主任技術者試験の実施細目などは，「昭和53年総理府令第51号原子炉主任技術者試験の実施細目等に関する規則」において規定されているが，その第2条（筆記試験）第3項に「学校教育法（昭和二十二年法律第二十六号）による大学院の専門職学位課程その他の課程であつて，原子力規制委員会が第一項の専門的

*Brief Introduction of Nuclear Professional School, The University of Tokyo*：Shuichi Hasegawa.

（2019年2月3日 受理）

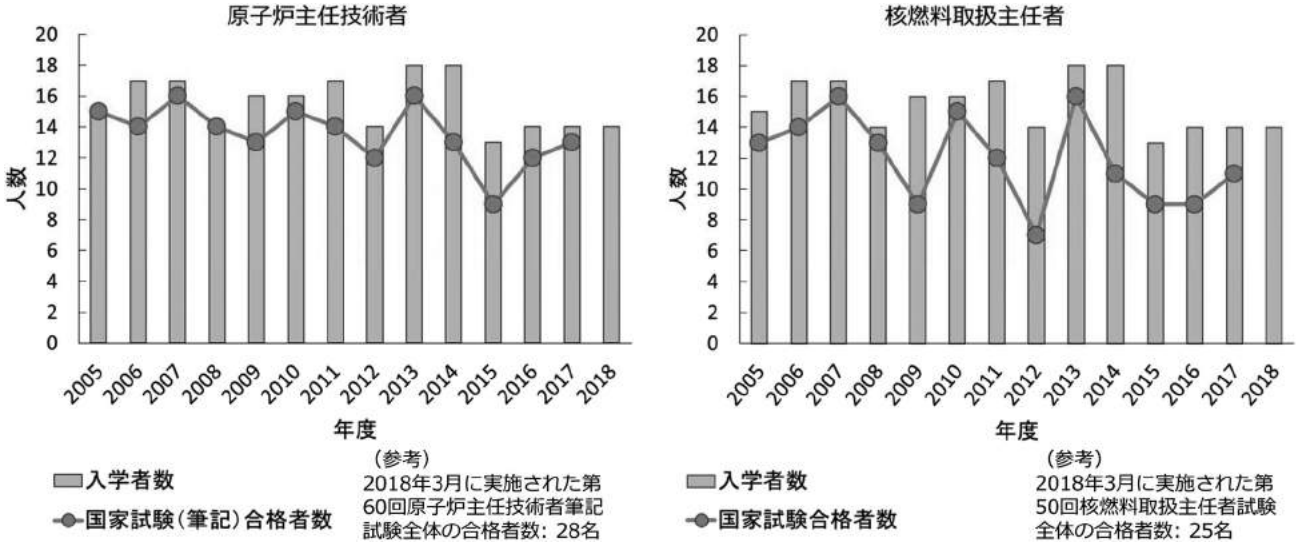



図１　入学者数と原子炉主任技術者（筆記）および核燃料取扱主任者合格者数の変遷

知識を修得させるために適当と認めるもの（以下「認定課程」という。）を修了した者（前項第一号から第六号までに掲げる事項に関する科目の単位を修得した者に限る。）に対しては，その申請により，これらの各号に掲げる事項について筆記試験を免除する。ただし，その者が，当該認定課程を修了した日から起算して五年を経過したときは，この限りでない。」と規定されている。

さらに，同第９条（課程の認定），第10条（認定の申請），第11条（認定基準），第12条（変更の届出），第13条（報告の徴収），第14条（認定に係る確認），第15条（認定の取消し）と関連する条項が続いている。特に第14条（認定に係る確認）において，「認定課程設置者は，その認定課程が認定基準に適合しているかどうかについて，五年ごとに，原子力規制委員会の確認を受けなければならない。」と規定されており，５年ごとに認定の確認を受ける必要がある。最近では2017年２月に確認を受けている[2)]。

以上のように，通常の工学系大学院での評価に加えて，５年ごとにJABEEによる認証評価および原子力規制委員会からの認定課程確認を受けている。このような背景を踏まえて入学者数（定員15名）と原子炉主任技術者試験（筆記）と核燃料取扱主任者試験の合格者数の推移を図１に示す。2018年を例にとると，試験合格者の半数程度が原子力専攻修了の学生であり，本専攻が大きな役割を果たしていることが見て取れる。

## Ⅲ．カリキュラム

入学生は原子力分野での勤務経験を有していると雖も，大学時代に原子力分野を勉強してきた学生は，むしろ少ない。そのため１年間で，放射線の基礎から原子炉理論，プラント，熱流動，構造，材料，核燃料サイクルなど原子力の基盤をなす広範な分野を，カリキュラムとしては，網羅する必要がある。本専攻の開講科目を図２に示す。各科目は，原子力基礎科目，原子力実務基礎科目，原子力実務隣接科目，展開先端科目，演習科目，実験・演習科目の６つに分類されている。全38科目の中で，大学院を修了するための必修科目は12科目である。これを含めて，30単位以上取得すれば，修了することができる。それに加えて，上で書いた通り，各資格に対する認定対象科目について一定の成績を修めることで，各試験において一部科目が免除されることとなる。カリキュラムは夏学期・冬学期に分かれており，夏学期に基礎，冬学期に応用を学習できるよう配置されている。さらに，午前中に講義，午後がそれに対する演習・実習とすることで高い学習効果が得られるよう工夫されている。このような形で，月曜日から金曜日まで，１日中時間割表は埋まっている。

学習内容については，例えば，講義と関連して「原子力教科書シリーズ」としてオーム社から出版されている[3)]。他の科目についても，出版の準備が進められている。さらに，日本語版を英訳したものが，Springer社から「An Advanced Course in Nuclear Engineering」としてシリーズ出版されている[4)]。このような教材の国際化の一環として，IAEAと共同でe-learningシステムの構築を進めている。これは，専門職講義での資料をもとにしたものであり，IAEAからも高く評価されている。IAEAでは，世界の主要な実務的原子力教育に注目しており，International Nuclear Management Academy（INMA）を立ち上げた。これによるPeer Reviewを2017年９月に受けた。東京大学は原子力国際専攻と原子力専攻という研究型と実務型の異なる２つの専攻を並行して運営している世界で唯一の大学であり，その点からも高い評価を受けている。これらを進めるにあたり，非常勤講師をはじめとする多くの外部の先生方にご協力をいただいている。また，様々な団体にご支援を賜っている。この機会を借りて感謝申し上げる。

2018年度　教育プログラムと必修科目、認定対象科目の関係※

| | 科目名 | 単位数 | 必修科目 | 原子炉主任技術者認定対象科目 | 核燃料取扱主任者認定対象科目 |
|---|---|---|---|---|---|
| 原子力基礎科目 | 放射線安全学 | 1.5 | ○ | ○ | ○ |
| | 原子核と放射線計測 | 1.5 | ○ | ○ | ○ |
| | 原子力法規 | 1.5 | ○ | | |
| | 原子炉物理学 | 2.0 | ○ | ○ | ○ |
| | 原子力熱流動工学 | 2.0 | ○ | ○ | |
| | 原子力構造工学 | 1.5 | | ○ | |
| | 原子力燃料材料学 | 2.0 | ○ | ○ | ○ |
| | 核燃料サイクル工学 | 1.5 | | ○ | ○ |
| 原子力実務基礎科目 | 原子力プラント工学 | 1.5 | | ○ | |
| | 原子力安全工学 | 2.0 | | ○ | |
| | 原子力保全工学 | 1.5 | | ○ | ○ |
| | 廃棄物管理工学 | 1.5 | | | ○ |
| 原子力実務隣接科目 | ヒューマンファクター | 1.0 | | ○ | ○ |
| | リスク認知とコミュニケーション | 1.5 | ○ | | |
| | 福島学 | 1.5 | | ○ | ○ |
| | 原子力特別講義 | 0.5 | | | |
| 展開先端科目 | 原子炉設計 | 1.5 | | ○ | |
| | 放射線遮蔽 | 1.0 | | | |
| | 放射線利用 | 1.0 | | | |
| | 原子力危機管理学 | 1.0 | | | |
| 演習科目 | 放射線安全学／放射線計測演習 | 1.0 | | ○ | ○ |
| | 原子力法規演習 | 1.0 | ○ | | |
| | 原子炉物理演習 | 1.0 | | ○ | ○ |
| | 炉心設計演習 | 1.0 | | ○ | |
| | 伝熱流動／原子力プラント工学演習 | 1.0 | | ○ | |
| | 原子力保全工学演習 | 1.0 | | ○ | ○ |
| | 材料力学／原子力構造力学演習 | 1.0 | | ○ | |
| | 原子力燃料材料／核燃料サイクル工学演習 | 1.0 | | ○ | ○ |
| | 原子力安全工学／安全解析演習 | 1.0 | | ○ | |
| | 放射線遮蔽演習 | 0.5 | | | |
| | 廃棄物工学演習 | 0.5 | | | ○ |
| | 技術倫理演習 | 1.0 | ○ | | |
| | リスクコミュニケーション／メディア対応演習 | 1.0 | | | |
| | 福島学演習 | 1.0 | | ○ | ○ |
| 実験・実習科目 | 原子力実験・実習1 | 2.0 | ○ | ○ | ○ |
| | 原子力実験・実習2 | 2.0 | ○ | ○ | ○ |
| | インターンシップ実習 | 1.0 | | | |
| | 原子炉実習・原子炉管理実習 | 1.0 | ○ | ○ | ○ |

※教育プログラムの一部の科目に変更の可能性があります。
認定対象科目とは、原子炉主任技術者試験筆記試験科目、および、核燃料取扱主任者試験科目のうち法令を除く科目に対応する原子力専攻の科目を指します。

図２　原子力専攻開講科目と必修・認定科目

以上のように，東京大学原子力専攻(専門職大学院)は，日本国内においては，原子力関連実務分野において第一線で活躍している方々を対象に，原子力の基礎と体系について理解していただくことで，常に「なぜ？」という疑問を持ち，それを自ら解決していくことで，原子力安全に貢献する人材を育成していると自負している。また，教育内容についても，IAEA などを通して，世界的な視野で随時自らを振り返って改善に努めている。最後に，現在の日本の原子力において，様々な立場を持つものが東海村で，まさに同じ釜の飯を食いながら１年間切磋琢磨できる学び舎は誠に貴重であり，今後の原子力の発展に資するものと信じている。

－　参 考 資 料　－


1) https://jabee.org/pgschool/result
2) http://www.nsr.go.jp/procedure/examination/index.html
3) 現在９冊が出版されている。
https://www.ohmsha.co.jp/tbc/text_series_0107.htm
4) 現在７冊が出版されている。
https://www.springer.com/series/10746


著 者 紹 介

長谷川秀一（はせがわ・しゅういち）
東京大学
(専門分野)レーザー応用工学，核種分析，核燃料サイクル工学

# 視 点

## 〈社会〉を語る

### 第１回　社会学者は社会を語れているのか

岡山大学　齋藤 圭介

日本社会にはじまり，社会問題，社会的影響，社会的責任，社会的コンセンサス……，私たちの日常用語には，社会という単語が多く用いられています。そして，社会という単語が意味する内容を，私たちはおおむね理解できていると考えています。しかし，果たして本当に社会という単語を，私たちは正確に理解できているでしょうか。

たとえば原子力をめぐる世論調査なども，社会調査の１つとして実施されています。そのさい，「日本社会の社会的関心として……」などと調査結果が紹介されますが，このときの社会とはいったい何を指しているのでしょうか。日常用語の社会は，きわめて多義的です。そのため，社会とはいったい何であるのかをきちんと学術的に説明しようとすると，いままで輪郭をともなって理解できていた（ように感じていた）この単語が，急に曖昧なものとなり，うまく説明することができなくなると感じる人は多いのではないでしょうか。

私たち社会学者は，社会を研究対象としています。そのため，社会学者は社会についてよく知っていて，つねに社会を論じていると思われるかもしれませんが，じつは社会学者こそが，社会を論じることの困難さをもっとも自覚しているといえます――痛感しているといったほうが適切かもしれません。なぜなら，そもそも社会とは，私たちの目でみたり手で触れたりすることができないものであり，この事実に，私たち社会学者は自覚的であるからです。

たとえば物理学は人間の目（肉眼）にはみえない分子や原子を扱います。しかし適切な機器を用いれば，分子や原子がそこにあるということが確実に同定できますし，いったんそうした仕組みを理解できれば，分子や原子は存在するものとして目の前の現象を理解していくことができます。では，ひるがえって社会はどうでしょうか。なにか大きな機器を用いれば，ある社会とそれとは別の社会の境界線を目でみることや手で触れることが可能になるのでしょうか。「これがＡ市の地域社会ですよ。今日の地域社会は昨日よりも大きいですね。紙袋に入れておきました。壊れやすいので持ち帰るときに気をつけてくださいね。」といった発言はナンセンスです。私たちは社会があることを経験的に知っていますが，社会をみたり，社会に触れた人はいないはずです。

では，社会はどこにあるのか。何を論じたら，社会を論じたことになるのか。この問いは，長いあいだ社会学者を悩ませてきました。社会学の世界では，社会があるという立場を社会実在論（social realism）といい，社会に実態はないという立場を社会唯名論（social nominalism）といいます。また，社会の捉え方の違いは，社会（的なるもの）に接近するための方法論や認識論の違いをもたらします。社会を単位にして社会を論じる立場を方法論的集合主義（methodological collectivism），対して個人を単位にして社会を論じる立場を方法論的個人主義（methodological individualism）といいます。社会学者のあいだでも，社会を論じるさい，どちらの立場がより妥当なのかは依然として論争が続いています。

ある吹奏楽団の集団を１つの社会と考えて説明してみましょう。彼ら/彼女らが奏でる音色は，全体で１つのまとまりをもち，個々の楽器から奏でられた音をただ寄せ集めた以上の何か心に響くメロディーをもつことがあります。個々の楽器の音を単純に足し合わせた以上の「何か」があると考える立場が社会実在論≒方法論的集合主義です。メロディーは個々の音には還元できないものですから，個々の楽器の音を超えた１つの実在としてメロディー（社会）が存在しているのだという考え方です。

他方，私たちが確実に聞こえ同定できる音は，個々の楽器の音のみです。メロディーを理解しようとしても，どこまで行っても目にみえ触れることができるのは個々の楽器とその奏者です。個々の音が重層的に重なり合い心地よく耳に響くメロディーというものは，実態がなく目にみえないし触れることもできません。メロディーはあくまで個々の音の寄せ集めであり，メロディーは１つの実在としては存在していない（＝存在しているのは楽器とそれを奏でる個人）と考えるのが社会唯名論≒方法論的個人主義です。

冒頭の問いに戻ります。「日本社会の社会的関心として……」といったときの社会とは何を指すのか。この小文を読んだあとでは，慣れ親しんでいたはずの〈社会〉の輪郭がぼやけてきて，明確な像をもつことが困難になったのではないでしょうか。この連載では社会を語る困難さや面白さを，社会学者のエピソードとともに紹介していきたいと思います。　（2019年２月４日 記）

# 理事会だより

## 本年度の予算方針 留意事項や重点項目

昨年6月に理事に就任し，財務を担当しております。今回は理事会からのメッセージとして，財務担当理事の当方より本年度の予算方針および予算執行時の留意点や重点事項について説明いたします。

### 学会を取り巻く状況，これまでの学会予算

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故から8年が過ぎ，この間，事故の収束と原子力に対する国民の信頼回復に努力が払われてきました。福島県内においては福島第一原子力発電所オンサイトでの廃炉に向けた作業，オフサイトにおける環境修復に関しては除染土壌などの中間貯蔵施設への搬出など進展しておりますが，日本国内における原子力発電所の再稼働は一部であり，より一層の取り組みが求められています。このような環境の中で，学会員の皆様には本学会の重要性，役割を認識され，学会活動を積極的に推進いただいております。

本学会の財務状況は，数年来続いている会員数の減少や賛助会費の減少等により厳しい情勢にあり，収入に当たる経常収益も減少傾向にあります。一方で，数年間にわたる経営改善の努力の結果，本会は収支の安定化が図られ，正味財産も増加傾向にあります。社会に貢献する，より魅力ある学会を目指して新しい地平を拓いて行くための活動に挑戦する予算を確保することが重要とも認識しています。

### 本年度予算

学会の事業環境は好転が見込めないため，引き続き常置委員会については予算を効率的に運用する方針としました。また，各組織単位での収支均衡運用の方針を継続し，学会本部収入の一定割合を各組織に割り振るとともに，これまでと同様，各組織の受託等の外部資金を加えて各組織の収入としました。具体的収入に関しては，福島第一事故以降の直近5年間に注目し，会費収入減少傾向継続，受託事業収入変動するものの若干の増加を考慮し，昨年度予算(予算外追加含)とほぼ同程度の255百万円といたしました。

一方支出に関しては，ここ数年続いている申請予算と実行予算の乖離がなくなるよう，昨年度の実績をベースに立てていくことを基本としました。また個別組織はきちんと収入により活動費をまかなうことが原則です。大会事業の収支改善と，経営合理化による収支改善を踏まえて，学会にとって重要な専門委員会や支部などの活動費，会員サービス向上，新たな活動分野への挑戦にも予算を振り向けました。なお，2017年に決定した会員獲得・国民の原子力理解を継続するため，蓄積した正味財産を有効に活用する方針は継続です。これらの活動を行うために必要な今年度の支出は317百万円で，昨年度予算(予算外追加含)よりも2.5百万円程度の増加です。

今年度予算の収支は71百万円の赤字の見込みとなっています。このうち，43百万円は定常的な活動ではなく，翻訳作業などの公益目的支出，会員獲得・理解活動，60周年行事に支出されるものです。また一昨年度に比較して多くなっている項目に関しては，その内容を吟味し，今後支出の削減が見込まれるものは，削減に必要な事項を計画的に検討するよう担当部門に依頼しています。これを手始めとして，定常的な活動により生じる赤字額を少しでも削減するように，検討を進める予定です。

### 予算に関連する規約類の変更

学会全体の予算の検討を行っている総務財務委員会では，実情に合った予算執行をできるように制度を見直すことや予算執行時の手続きを簡素化できるような検討も行っています。昨年度は「会員獲得・理解活動」の予算策定に関するガイドラインを見直し，活動を実施いただいた講師に対し，講師が会員であっても謝金を支払えるようにガイドラインの変更を立案しました。また，研究専門委員会の予算の上限額を昨年までの3倍とし，活動をより活発化できるように変更いたしました。

また，繰越金・配分金のシンポジウム・セミナー等への活用については，これまで同様セミナー等の開催は，独立採算を原則。但し，学会活動の更なる活性化の趣旨で，予算編成時に計画され理事会の承認が得られれば繰越金の活用が認められるよう既に規程を改定しています。繰越金のみでは不足の場合には，配分金の活用も認められています。

今後も予算管理を通じて，学会活動がより活発になるように勧めていきたいと思います。学会員の皆様も本学会の活動がより活発になるようご協力いただきたくお願いいたします。

(東芝エネルギーシステムズ㈱　三倉 通孝)