

巻頭言

1 21世紀最大のイノベーションは原子力にある

池田信夫

時論

2 高速炉研究開発を見直すチャンス 足が地に着いた戦略を

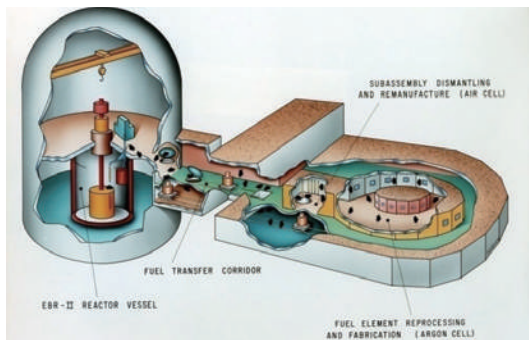
井上 正

解説

10 将来の高速炉サイクルオプションとしての統合型高速炉 (IFR) の技術的可能性—小型金属燃料高速炉と乾式サイクル施設を併設した IFR

新しいこの IFR 概念を、福島第一原子力発電所の炉心溶融事故で発生した燃料デブリの処理に適用する技術的可能性を検討した。

田中伸男



IFR 概念図 (米国アルゴンヌ国立研究所の高速増殖実験炉 EBR-II と燃料サイクル施設の例)

From Abroad

21 Scientific Wanderlust Across The Ocean

海の向こうの研究放浪記, アメリカ国立研究所編

アメリカで研究活動を続けてきた日本人の一人として、日本と異なる生活や研究活動の様子を紹介する。

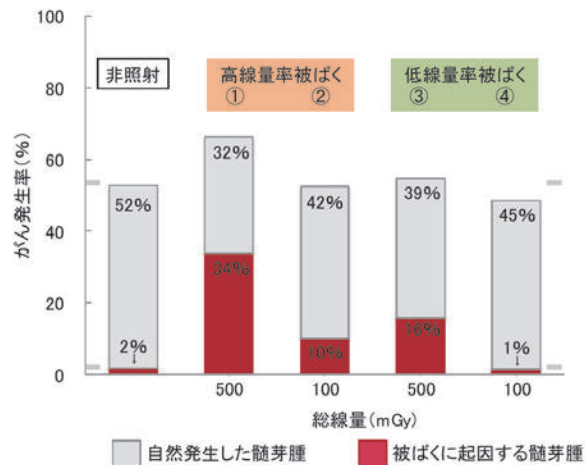
河野俊彦

解説

36 「じわじわ」被ばくの発がん影響を動物実験で明らかに—モデルマウスを用いて低線量率被ばくに起因する発がんリスクを直接的に評価

モデルマウスを用いて低線量率被ばく後に発生したがんの原因を調べた結果、低線量・低線量率被ばくした場合、そのリスクは線量率が小さくなると見えなくなることがわかった。

鶴岡千鶴, 柿沼志津子



髄芽腫の発生率 低線量率被ばく群③は、同被ばく総線量の高線量率被ばく群①に比べて、「被ばくに起因する髄芽腫」の頻度は低下した。さらに、線量率が小さい低線量率被ばく群④では非照射群と同程度であった。(詳細は p.38)

31 人工知能技術による異常検知システムとその産業応用

あらかじめ学習した正常パターンからの逸脱をもとにセンサが異常を検知できるシステムの開発が進んでいる。ここでは音響・振動データからのインフラ診断や、病理画像検査等の医療画像診断支援への適用事例を紹介する。

村川正宏

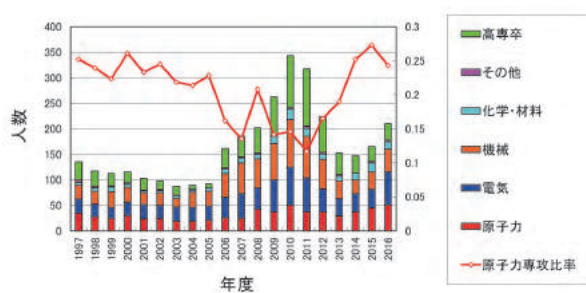
解説

26 日本の原子力における人材育成の現状と課題

—フランスの原子力人材育成に学ぶ

日本では原子力人材を育成するために「原子力人材育成ネットワーク」を設置している。フランスでは、政府主導のもと一元的な人材育成活動が展開されている。私たちは海外事例から何を学ぶことができるか。

藤原健太郎



談話室

45 情報技術全盛時代の新たなワークモデル

テクノロジーを生み出し、活かす時代に向けた新たなワークモデルを構築した。

中村天江

47 『対話の場を創る』

杉田恵子, 櫻木正彦

会議報告

48 ICGR2016 (地層処分国際会議) International Conference on Geological Repositories

石田圭輔

理事会だより

50 大学における教育・研究環境の危機的 状況—2017年春の年会理事会セッション の背景について

中島 健

4 NEWS

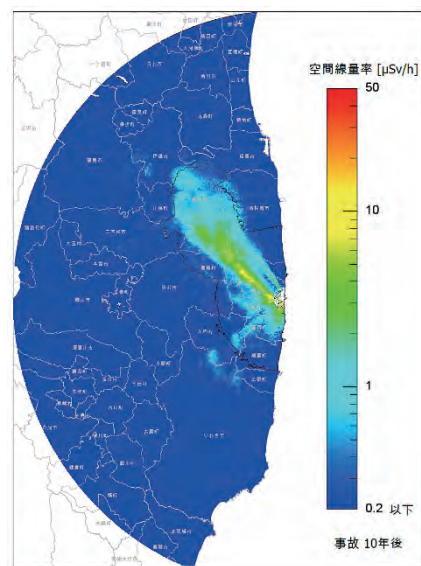
- 原子力委, 基本的考え方まとめる
- 更田氏が原子力規制委員長に昇格
- 高速炉開発「戦略ロードマップ」策定へ
- 原電がエクセロン社と合併会社設立
- 海外ニュース

連載講座 福島環境回復に向けた取り組み (第2回)

40 事故進展と放射性物質の放出・沈着 分布の特徴

1F事故の進展と放射線物質の放出・大気拡散・沈着過程の解明が、シミュレーションおよび環境測定データの解析により進められている。

斎藤公明, 永井晴康, 木名瀬栄, 武宮 博



事故 10年後の空間線量予測図

- 49 新刊紹介「高速スペクトル原子炉」 千葉 豪
- From Editors
- 51 会告 日本原子力学会「第7回総会」のご通知
- 52 会報 原子力関係会議案内, 共催行事, 新入会一覧, 誤記訂正, 英文論文誌 (Vol.54, No.6) 目次, 和文論文誌 (Vol.16, No.2) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

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

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

21世紀最大のイノベーションは原子力にある

巻頭言



株式会社アゴラ研究所所長

池田 信夫 (いけだ・のぶお)

学術博士(慶應義塾大学)。東大経済学部を卒業後、1978年にNHK入社。93年に退職後、国際大学GLOCOM教授、経済産業研究所上席研究員などを経て、現在はSBI大学院大学客員教授を兼任。

原子力産業に逆風が強まっている。東芝の経営危機の最大の原因は、米子会社ウェスティングハウスの原発建設コストの激増だといわれている。原子力規制委員会は、原発の運転期間を40年に制限する制度で、全国4ヶ所の原発5基の廃炉を決めた。新規制基準で算定すると、原発のコストは石炭火力より高くなるからだ。世界的にもコスト増で建設計画の中止が相次ぎ、原子力産業は絶望的だといわれているが、それは本当だろうか。

原発の最大のコストは、事故リスク対応費用などの「社会的コスト」だが、本当のコストは石炭火力のほうがはるかに高い。気候変動のリスクは不確定だが、大気汚染で毎年650万人が早期死亡しており、このうち石炭火力による死者が1割程度と推定される。特に中国では、PM2.5と呼ばれる微粒子の被害が深刻だ。

技術的に考える限り、原子力は圧倒的に安全で低コストであり、エネルギーミックスにトレードオフは存在しない。それが他の電源より高く見えるのは政治的成本のためであり、これは100年ぐらいの長期では無視してよい。中国やロシアが世界市場で原発を安く売り始めたら、安全保障の観点からも座視できない。彼らの出す価格が「本当のコスト」に近いので、政治家も理解するだろう。

原子力は重量あたり石炭の300万倍のエネルギーを出すことができ、埋蔵量も(海水ウランを含めれば)9000年分ぐらいある。ウラン以外の核燃料や核融合を入れると、その可能性は無限といってよい。50年前、原子力は「測るには安すぎる」ので電気代がゼロになるといわれたが、その可能性は理論的には今もあるのだ。

20世紀最大のイノベーションはコンピュータだったが、その成長は鈍化してきた。情報には稀少性がないので、高い利益を上げ続けることがむずかしい。IT産業で高い収益を上げているのは、稀少性の高いインフラ型の企業だけである。未知のイノベーションがない限り、収益性という点では情報産業の未来は明るくない。

だがエネルギーには稀少性があり、技術的なポテンシャルもきわめて大きい。マイクロソフトの創業者ビル・ゲイツが第4世代の原子炉(TWR)に多額の投資をしていることでも明らかだ。彼は「21世紀最大のイノベーションの可能性は原子力にある」という。私も長期的には原子力の未来に楽観的である。

だが短期的には、楽観できない。原子力の政治的成本はきわめて大きく、特に安全保障がからむと民間企業には耐えられない損害が発生するリスクがある。東芝の不可解な事件は、そういう問題を示唆している。政治的な理由で「原発ゼロ」にすると、日本の原子力技術を支える人材が絶えてしまうおそれがある。

だから原子力と火力を同じ条件で比較することは正しくない。今のように不合理な「国民感情」でコストが大きく上振れするのは、それを民間の事業と位置づけているためだ。特に日本では、政府が意思決定を行って民間がコストを負担する「国策民営」という無責任体制で原子力開発が進められてきた。福島第一原発の廃炉や除染などに21兆5,000億円もかかるのは、どう考えても合理的とはいえない。

これを改め、原発を「一時国有化」してはどうだろうか。これは資本主義の原則からみると好ましくないが、民間企業のコントロールできない「外部性」の大きいインフラ産業を国有化することは珍しくない。その第一歩として、東電の原子力部門を(福島も柏崎刈羽も含めて)国営企業として完全分離することが考えられる。

(2017年4月21日記)



高速炉研究開発を見直すチャンス 足が地に着いた戦略を



井上 正 (いのうえ・ただし)

電力中央研究所 名誉研究アドバイザー
昭和 49 年電中研に入所。核燃料・サイクル
関係の研究、特に高速炉用セラミック燃料の
物性研究、返還ガラス固化体の評価、乾式リ
サイクル技術、分離核変換等の研究開発等に
従事。現在原子力学会福島特別プロジェクト
代表を務める。

東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故もあり、昨今の石油、天然ガスなどの化石燃料の利用、今後の既設軽水炉の再稼働、新エネルギーの普及、将来の我が国の人口減少などを考えると、高速炉の実用化時期を予測するのは容易ではないが、発電手段として早急に高速炉の導入を図らなければならない必然性も現状では見当たらない。また、高速炉の燃料サイクルは完成、成熟の段階には至っていない。しかし、資源小国である我が国においてはウラン(U)、プルトニウム(Pu)は純国産であることからセキュリティ上重要なエネルギー資源であることには違いない。このたび「もんじゅ」が廃炉になることが決定されたが、この機をとらえ高速炉とその燃料サイクル開発について、もう一度研究開発の在り方、戦略を再考するよい機会ではないかと筆者は考えている。

ここで高速炉開発を振り返ってみると、実験炉である「常陽」の運転が 1977 年に始まり、高速中性子を用いた各種試験(運転制御、Na 取扱技術、材料試験など)が開発された。また、発電用の原型炉として「もんじゅ」が 1995 年に運転を開始したが、同年末にナトリウム漏洩事故を起こし停止を余儀なくされた。その後の経緯は周知のとおりである。一方、「常陽」についても 2007 年に照射用リグのトラブルにより停止したままで現在に至っている。このようにいずれの高速炉も長期にわたり停止していることは、それが我が国の原子力開発に与えてきた影響も含め、全体(高速炉の開発・利用計画、技術面、運営管理面など)を総括してその課題を明確にしておく必要がある。

一方、原子力発電に対する国民の関心(懸念)は放射性廃棄物の処理・処分の安全、安心になってきており、な

かでも高レベル廃棄物の地層処分は地元の反対も多く実現していないのが現状である。このため、高レベル廃棄物の処分に当たっての環境負荷の低減は今後追求すべき重要な課題である。中でも長半減期の核種、特にその大半を占め毒性も高い超ウラン元素(Pu とマイナーアクチニド(MAⁱ))を含めて TRU)は高速炉で燃焼できるため我が国ではオメガ計画として 1980 年代から(旧)日本原子力研究所、(旧)核燃料サイクル開発機構、電力中央研究所がその研究(MA 分離技術、核変換技術)を実施してきた。その後はオメガ計画を包含する形で、1999 年から高速炉サイクル実用化戦略調査研究(FS)、高速炉サイクル実用化研究開発(FaCT)の中で研究が継続されてきたが、福島第一原子力発電所の事故によりほぼ中断されたままである。筆者はオメガ計画の時から 25 年以上本研究と関連研究に従事してきた。その経験から高速炉サイクルを長年眺めており感じたことを以下に記したい。

「もんじゅ」は本来 MOX 燃料高速炉による発電の実証が目的であったが、冒頭述べたようにその緊急性が遠のいたため、国民の間からもその位置づけ、目的が問われた。このためもあり数年前から「もんじゅ」の位置づけ、目的の一つに MA の核変換という大義名分が謳われたのだが、このあたりから、「もんじゅ」の目標が不明確となり付け焼刃的になり、地に足の着いた検討がなされていないように筆者は感じている。核変換技術の開発のためには、一連の必要となるインフラ整備が不可欠であるが、そこでは「もんじゅ」はそのための照射炉という役割だけであり、どこで MA を調達、製造するのか、ど

ⁱ ウランが中性子を吸収してできるネプツニウム、アメリシウム、キュリウムを総称してマイナーアクチニド(MA)という

ここで MA を混合した燃料を製造するのか、照射後の燃料集合体解体はどこで行うのかなど、現実に基づいた検討がなされたとは考えられなかった。以上述べたようなこともあり「もんじゅ」が廃炉となることが決まった今、高速炉の開発の目的、目標をしっかりと定め、今後の高速炉(高速炉開発には炉の開発と同時にその燃料サイクル技術を開発することは表裏一体である)の開発方策を考える良い機会ではないかと考える。

ここで海外に目を向けると、混合酸化燃料(MOX 燃料)を使ったナトリウム冷却高速炉はフランスではフェニックス炉(2008年運転停止)、スーパーフェニックス炉(1998年末に運転停止、現在廃止措置中)が運転され、ロシアでは商用炉 BN-800 で、インドでは PFBR で MOX 燃料が使われようとしており、MOX 燃料高速炉はほぼ成熟した技術となっている。しかし、高速炉による MA 変換技術は使用済み燃料からの MA 分離技術を含め、MA 燃料の物性研究、小規模な MA 含有燃料の照射試験などダーウィンの海の中にある研究段階である。先にも述べたが次世代の高速炉は Pu 利用と共に高レベル廃棄物処分の環境負荷低減から MA の核変換が重要な要素となる。このような状況を見ると現在は MA を高速炉で燃焼させるための基盤研究を推進すべき時期であると考えられる。このためには先に述べた FaCT を実用技術としての観点から総括が必要であり、それに基づいた施設計画(日本原子力研究開発機構施設の統廃合)を作成し、着実に MA 燃焼計画の推進を図っていく必要がある。幸い我が国には高速炉「常陽」がある。MA 研究の照射炉として利用できるし、「常陽」がある大洗・東海地区にはその燃料を製造し、照射後試験を実施する施設条件(現在の安全基準に対応させる必要があるが)は整っているのではないかと思う。

一方、「もんじゅ」なきあと、日仏協力でフランスの ASTRID 計画(これから建設にとりかかる段階)に参加して共同開発するという計画も聞かすが、我が国で実施で

きることは、我が国に技術蓄積を図ることをまず第一に戦略を立てるべきであろう。その取り組みの進捗を見て ASTRID に協力することで何を実施し、何が得られるかよく見極めてから協力を進める必要があるのではないか。また、日仏協力でこれらの研究を実施する条件として、申すまでもないが両国イーブンの関係で進める必要がある、「常陽」を使った研究などもその中に組み入れ、「常陽」整備のための資金ⁱⁱを両国で分担するのも考えるべき方策ではないだろうか。このほか、多国間協力として廃棄物の減容に資する照射試験(GACID プロジェクト)もあるが、各国の温度差、使用・製造施設条件、資金等を考えると、これも地に足の着いた計画とは思えず、これまでの検討状況、今後の見通しを含めて見直す必要を感じる。

最後に我が国における燃料サイクル関係、基礎となる放射化学研究も、近年ほとんどその進捗がみられていない。それと共に我が国における技術蓄積も乏しいものになっており、自ら研究を実施し技術の進歩に貢献できる人材を育てていける研究環境を整備する必要がある。この放射化学研究は福島第一原子力発電所で今後長期に続く溶融デブリ取り出し、デコミ作業にとっても不可欠なものであることは言うまでもない。

以上、今後の高速炉とそのサイクル開発についての戦略の再構築の必要性を我が国の現状、筆者のこれまでの経験、知見をもとに述べてきた。本分野に関する研究開発は、最初の計画を間違えると我が国ではなかなか修正が困難なことから、これまでの進め方、進んできた道を真摯に総括し、今後を担う若い人たちの英知を入れ地に足の着いた戦略を立てて進めてほしいと考える次第である。

(2017年3月29日記)

ⁱⁱ 資金の代わりに人材提供という考えがあるが、人材にはポストドクレベルから深い経験を有する(相手の計画に有益となる)ものまでであり、その等価性をよく評価する必要がある。



原子力委、基本的考え方をまとめる

原子力委員会は4月26日、今後の原子力政策の長期的な方向性を示唆する「原子力利用に関する基本的な考え方」の案をまとめた。

「考え方」では原子力利用の基本目標を「平和利用を旨とし、安全性の確保を大前提に国民からの信頼を得ながら、原子力技術が環境や国民生活及び経済にもたらす便益の大きさを意識して進めることが大切である」と明記。個別の目標としては(1)東電福島原発事故の反省と教訓を真摯に学ぶ(2)地球温暖化問題や国民生活・経済への影響を踏まえた原子力エネルギー利用を目指す(3)国際潮流を踏まえた国内外での取組を進める(4)原子力の平和利用の確保と国際協力を進める(5)原子力利用の大前提となる国民からの信頼回復を目指す(6)廃止措置及び

放射性廃棄物の対応を着実に進める(7)放射線・放射性同位元素の利用により生活の質を一層向上する(8)原子力利用のための基盤強化を進める——の8項目を掲げた。

その上で今後の重点的取り組みとその方向性については(1)ゼロリスクはないとの前提での安全への取組(2)地球温暖化問題や国民生活・経済への影響を踏まえた原子力エネルギー利用の在り方(3)国際潮流を踏まえた国内外での取組(4)平和利用と核不拡散・核セキュリティの確保(5)原子力利用の前提となる国民からの信頼回復(6)廃止措置及び放射性廃棄物への対応(7)放射線・放射性同位元素の利用の展開(8)原子力利用の基盤強化——をあげている。

(原子力学会誌編集委員会)

更田氏が原子力規制委員長に昇格

政府は4月18日、衆参両院の議院運営委員会理事会に国会同意が必要な人事案を提示した。今年9月までが任期の田中俊一氏・原子力規制委員会委員長の後任には更田豊志氏が昇格し、更田氏の後任に大阪大学副学長の

山中伸介氏が就任する。更田氏の任期は5年、山中氏の任期は更田氏の残任期間である平成32年9月まで。国会の同意を得て正式な発令となる。

(同)

高速炉開発「戦略ロードマップ」策定に向けWG初会合

将来の高速炉実現に向けて今後10年程度を見込んだ「戦略ロードマップ」を検討するワーキンググループが3月30日、経済産業省庁舎(東京・霞が関)で初会合を開いた。

昨年12月に原子力関係閣僚会議がまとめた「高速炉開発の方針」では、これまでの研究開発の経験により得られた知見と教訓を十分に踏まえ、「国内資産の活用」、「世界最先端の知見の吸収」、「コスト効率性の追求」、「責任体制の確立」の4原則をあげており、これに則った向こう10年の開発方針を具体化すべく、2018年を目途に「戦略ロードマップ」を策定するとしている。

これを受け、同ワーキンググループでは、経産省、文部科学省、三菱重工業、電気事業連合会、日本原子力研究開発機構の実務担当者により、(1)開発目標、(2)将来実現を目指す高速炉の諸元決定の進め方、(3)今後獲得すべき技術・時期、(4)国際協力と国内技術基盤の活用イメージ——について検討を行う。

ワーキンググループの初会合では文科省大臣官房審議官の板倉周一郎氏が、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故を踏まえ進めてきた「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」の経験なども活かしていくべきなどと先鞭をつけた。また、高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉をめざした開発については、電事連原子力開発対策委員長の豊松秀己氏が軽水炉の知見活用について、三菱重工原子力事業部長の門上英氏が将来的な許認可にも資する技術の蓄積について、それぞれ経済性、安全性の観点から意見を述べた。イノベーションの進展や他電源との競争激化など、エネルギー政策を巡る不確実性が見込まれる中、資源エネルギー庁次長の多田明弘氏は人材育成の課題を強調した。

原子力機構からは田口康副理事長が出席し、高速実験炉「常陽」の新規制基準適合性審査を、同日原子力規制委員会に申請したことを披露するとともに、続く審査に真摯に対応し、早急な運転再開を目指す考えを強調した。

「常陽」は燃料・材料開発などに資する照射試験において世界的な貢献が期待されており、「高速炉開発の方針」でも廃止措置に移行する「もんじゅ」に替わり、運転を通じ

て高速炉特有の課題に対応した要素技術開発を行うとされている。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

原電がエクセロン社と合併会社設立、英国での原発運転保守支援で

日本原子力発電は4月13日、米国大手電力のエクセロン社と、合併会社「ジェクセル・ニュークリア」(ジェクセル社)を設立したと発表した。新会社は、日本の商業用原子力発電のパイオニアである原電が長年の運転経験から培ってきた技術力と、エクセロン社の優れた安全性と高い稼働率を実現させる運転管理モデル(ENMM)を活用して、英国ホライズン社がアングルシー島で開発を進めるウィルヴァ・ニューウィッド原子力発電所計画に対し、運転保守に係るアドバイザー業務を実施する。ジェクセル社の社長には原電常務取締役の肥田隆彦氏が

就任。

新会社設立について原電社長の村松衛氏は、英国から輸入した炭酸ガス冷却炉(GCR)に始まり、BWR、PWRと、炉型の異なる発電所の運転経験などを積んできた同社の経験をあげた上で、「大変うれしく思う。パートナーであるエクセロン社と力を合わせ、当社のノウハウを活かして、着実にこのプロジェクトを支援していく」などと述べた。原電が先般発表した2017年度の経営基本計画には、本プロジェクトを積極的に支援していく考えが明記されている。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】

WH社が倒産法に基づく再生手続申請

米ペンシルバニア州を本拠地とするウェスチングハウス(WH)社は3月29日、親会社である東芝の事前承認に基づき、同社と米国内の関係企業および米国外の事業会社群の持ち株会社が、連邦倒産法の再建型処理手続である第11章の適用をニューヨーク州連邦破産裁判所に申請したと発表した。第11章手続では、債務者が手続期間中に財産の占有・管理権限を持つ占有債務者(DIP)として事業を継続することが可能なため、WH社は基幹事業を維持しつつ、同社製AP1000の建設計画に関わる財政問題解決の道を探っていくと明言。差し当たり、破産状態から脱却するための再建計画作成に集中する考えを示した。また、2013年に米国内で開始した2件のAP1000建設プロジェクトでは、同手続の初期評価期間中も作業を継続することで各オーナーと合意したとしており、中国で建設中の既存プロジェクトおよび将来的な案件についても押し進めていく方針を明らかにした。

発表によると、WH社グループは再建期間中の基幹事業維持のために第三者からの資金調達(DIPファイナンス)として8億ドルを確保済み。東芝はこのうち2億ドルを上限に債務保証を提供する予定。破産法手続の開始にともない、同社はWH社グループを2016年度通年決算の連結対象から外することができる。WH社グループ

もDIPファイナンスを通じて、運転中プラントの支援や核燃料、機器製造、エンジニアリング、廃止措置、除染、サイト復旧、放射性廃棄物管理といった事業を継続し、事業ユニットの再建も図ることが可能だとした。また、手持ちの銀行信用状は全額が現金担保されており、依然として有効な状態。DIPファイナンスによって、新規に信用状を発行してもらうことも可能であり、倒産法第11章の適用申請がアジアや欧州、中東、およびアフリカ地域における同社の運営に影響することはないとの考えを強調している。

これに対して、サウスカロライナ州で2基のAP1000をV. C. サマー原子力発電所2、3号機として建設中のスキナ社は同日、倒産法手続に移行する評価が行われている間、プロジェクトの共同オーナーであるサンティー・クーパー社とともに建設計画のコストとスケジュールを再評価すると発表した。両社はWH社の申請が裁判所の承認を受けることを条件に、2基の完成に向けた作業の継続で合意するための協議をWH社と実施。その一方で、この合意により両社には、WH社が提示した情報や同社が期日までに提出できなかった資料も精査する時間が得られたとしており、同プロジェクトにとって最も保守的な方向性を定めたいとしている。また、現地の報道によると、AP1000設計を採用したA. W. ポーグル原子力発電所3、4号機増設計画をジョージア州で進めているサザン社は、「契約上の財政責任をWH社と東芝に取らせるため、あらゆる手段を継続的に

講じていく」と述べた模様である。

一方、東芝が筆頭株主となっている英国のニュージェネレーション(NuGen)社は同日、西カンブリア地方ムーアサイドにおける AP1000 × 3 基の建設計画について、今年第 2 四半期に予定していた計画庁への開発同意書(DCO)申請を見送ると発表した。理由としては、2016 年 7 月に完了した第 2 回目の公開協議で、予想をはるかに超える数の参加者や示唆に富む詳細な意見が多数得られ、その評価作業の完了までに今後数か月を要するためだと説明。これらを DCO 申請書に盛り込むための協議を実施するほか、提案計画に変更が生じた場合は正当な手続や関係者との対応も必要であることから、この機会をフルに利用して発電所設計の評価も行いたいとしている。

X-エナジー社がペブルベッド高温ガス炉の概念設計開始

米国メリーランド州で革新的な原子炉設計ソリューションを開発している X-エナジー社は 3 月 16 日、ペブルベッド高温ガス炉「Xe-100」(熱出力 20 万 kW, 電気出力 7.5 万 kW)の概念設計を正式に開始したと発表した。熱電併給が可能な「Xe-100」は建設工期が短く、機器の組立も工場できるといふ小型モジュール炉(SMR)。燃料としてウラン酸化物を黒鉛やセラミックスで被覆した粒子を用いているため、物理的にメルトダウンの恐れがない設計であるほか、冷却材喪失時においても運転員の介入なしで安全性が保たれるという。米エネルギー省(DOE)も低炭素な発電が可能な次世代原子炉の 1 つとして、同設計に対して 5 年計画で最大 4,000 万ドルの投資支援を行っており、X-エナジー社としては 10 年以内に「Xe-100」を利用可能にするという目標の達成を目指して開発を進める方針。また、プログラムが概念設計段階に進展するのに合わせ、サザン社傘下で 6 基の商業炉を運転するサザン・ニュークリア社から、ベテラン専門家を開発チームのプログラム管理コンサルタントとして招いたことを明らかにした。

米エネルギー省のペリー新長官、ユッカマウンテンを視察

米エネルギー省(DOE)の R. ペリー長官は 3 月 27 日、オバマ前政権が使用済燃料深地層処分場の建設計画を打ち切ったネバダ州ユッカマウンテンのサイトを視察したと発表した。新長官としての宣誓を 3 月 2 日に行っている以来、初の公式視察であり、D. トランプ大統領は 3 月 16 日に 2018 会計年度予算案の中で同処分場建設計画

の許認可関係活動を再開する経費と中間貯蔵プログラムの開始経費として 1 億 2,000 万ドルを提案したばかり。同州選出議員の一部には、長官が訪れることが事前に知らされていない「サプライズ視察」だったこともあり、現地メディアでは物議を醸している。ペリー長官は同日の午前中にユッカマウンテン・サイトを視察した後、締め括りとして同州の B. サンドバル知事とサイトの状況について会談。今後、処分場建設計画について多くの連邦政府や州政府、地元、商業的なステークホルダーなどと協議するプロセスの第一歩になったと述べた。一方、州知事は長官の訪問に謝意を示したものの、処分場建設計画に対する断固たる反対意見を改めて表明。この会談が交渉の始まりとはならない点を強調した。

ユッカマウンテンに使用済燃料と高レベル放射性廃棄物(HLW)の深地層処分場を建設する計画については、オバマ政権の打ち切り決定に従い、DOE が 2010 年に建設認可申請の取り下げを原子力規制委員会(NRC)に通知した。同計画の強硬な反対論者だった H. リード上院院内総務(ネバダ州選出)が上院の 2012 会計年度予算案に同計画の建設認可申請審査経費を付けなかったことから、NRC の実質的な審査活動は 2011 会計年度末の同年 9 月で停止された。その後、これらの廃棄物の管理処分対策を審議していた政府の有識者特別(ブルーリボン)委員会は 2012 年 1 月に最終報告書を公表。管理処分施設を地元の合意に基づく手法で新たに選定することや、集中中間貯蔵施設と深地層処分場を少なくとも 1 つずつ、早急に建設するなど、8 項目の勧告を提示した。ユッカマウンテン関連では 2013 年、裁判所命令により残余予算の範囲内で DOE の許認可申請の審査を再開することが決定し、NRC は 2015 年 1 月に安全性評価報告書の全 5 巻を完成させたほか、2016 年 5 月に環境影響声明書の最終補足文書を公表している。

【英国】

WH 社製 AP1000 が英国の事前設計認証審査をクリア

英国の原子力規制局(ONR)は 3 月 30 日、ウェスチングハウス(WH)社製の第 3 世代 PWR 設計「AP1000」が包括的設計審査(GDA)における規制課題 51 項目をすべてクリアしたことから、ONR と環境庁がそれぞれ設計容認確認書(DAC)と設計容認声明書(SoDA)を発給したと発表した。同設計が安全・セキュリティと環境保全面で英国の厳しい基準を満たしており、同国内で建設・運転し得ることを証明するもので、2012 年に仏アレバ社製欧州加圧水型炉(EPR)に発給して以来、2 件目。DAC と SoDA の発給をもって同設計の採用原子炉で建設開

始許可が保証されるわけではなく、建設プロジェクトではサイトに特化した許認可や評価活動などが別途要求される。また、同設計採用炉の安全系部分について ONR が建設を許可する際は、これらが予め必要となる。今回の決定については、英国西カンブリア地方のムーアサイドで AP1000 × 3 基の建設を計画するニュージェネレーション(NuGen)社が、歓迎のコメントを発表。ONR の R. サベッジ首席原子力検査官も GDA 完了報告書の中で、今年後半に同社がサイト許可(NSL)申請することを期待していると述べた。

WH 社は 2007 年に GDA を申請しており、2011 年 12 月に暫定的な設計容認確認書(iDAC)と設計容認証明書(iSoDA)の発給を受けた時点では英国内の採用顧客が未定だったため、審査活動の一時中断を要請。NuGen 社がムーアサイド原子力発電所建設計画で AP1000 の採用を決定したのを受け、2014 年に審査が再開された。AP1000 を採用した原子炉は現在、米国の A. W. ポーグルおよび V. C. サマーの両原子力発電所で合計 4 基、中国でも三門と海陽の両原子力発電所で合計 4 基が建設中となっている。同社はこの前日、親会社である東芝の事前承認に基づき、米連邦倒産法の再建型破産処理手続をニューヨーク州の連邦破産裁判所に申請したが、建設中プロジェクトの作業は同手続の初期評価期間中も継続すると明言。今回の決定に関しては、これら 8 基の建設経験がムーアサイド計画で活かされることになるとの認識を示した。

【フランス】

日仏、首脳会談で高速炉協力を表明

3月19～21日に欧州を歴訪した安倍首相は、20日、フランスでオランド大統領と会談し、両国間の友好関係の拡大を確認するとともに、その場で行われた世耕経済産業相とロワイヤル環境・エネルギー・海洋相による「民生用原子力協力に関する意図表明」への署名をとともに歓迎し、原子力安全、核燃料サイクル、高速炉、廃炉などにおいてさらなる協力を進めていくことで一致した。

日仏間の原子力分野における産業協力和共同研究開発の強化を目指す「民生用原子力協力に関する意図表明」では、冒頭、温室効果ガス削減の国際枠組み「パリ協定」の締結を歓迎し、「安全性の確保を大前提として、CO₂を排出せずに、供給信頼性が高く経済的なエネルギーへのアクセスを提供し、気候変動の悪影響を軽減する」と、原子力の役割がうたわれた。その上で、「世界の原子力安全、核セキュリティおよび核不拡散」、「核燃料サイクル」、「高速炉」、「廃炉および除染」、「産業協力」、「核融合エネルギー」のそれぞれについて、取り組むべきこと

を記している。

高速炉については、「高速炉およびそれに関連する核燃料サイクルの分野において長い協力の歴史を有する」とした上で、フランスで開発が進められている高速炉(実証炉)「ASTRID」に関する日仏間協力の進捗を確認し、さらに深化させるための議論を開始することとされた。日本側では、2016年12月に原子力関係閣僚会議が決定した「高速炉開発の方針」において、「国際ネットワークを利用した最先端知見の吸収」が原則の一つに掲げられており、「ASTRID」による協力に関しては、高速炉特有の技術課題の解決に向け、要素技術の開発を相互分担しながら進めていくとしている。

産業協力については、核燃料サイクル事業を行うニュー・アレバ社への出資に関するフランス政府、アレバ社、三菱重工、日本原燃との間での法的文書への署名に関して、「六ヶ所再処理工場および MOX 向上の円滑な稼働および安定した運営に向けたより力強い協力に資するもの」などと歓迎している。

【ハンガリー】

パクシュ 5, 6 号機建設計画にサイト許可

ハンガリーの国家原子力庁(HAEA)は3月31日、国営電気事業者の MVM グループが進めているパクシュ原子力発電所 5, 6 号機(各 120 万 kW のロシア型 PWR)増設計画にサイト許可を発給したと発表した。同国は現在、唯一の原子力発電設備である 1～4 号機(各 50 万 kW のロシア型 PWR)で総発電電力量の約半分を賅っているものの、1980 年代に運転開始したこれらの 4 基では経年化も進んでいる。機器の最新化を含めた運転期間の延長手続を 1 号機から順に行っているが、Ⅱ期工事となる 5, 6 号機の建設は将来的に既存炉をリプレースするのが主な目的。現地の報道では、今後最終的な環境認可と建設許可が発給されるのを待って、2018 年には着工できるとの見通しが伝えられている。

ハンガリー政府がこの増設計画をロシアからの融資で実施すると発表したのは 2014 年 1 月のことで、両国政府はその翌月、総工費の約 8 割にあたる最大 100 億ユーロ(約 1 兆 1,900 億円)をロシアが完成後 21 年間の低金利ローンでハンガリーに融資することで合意した。同年 12 月には、パクシュⅡ期工事開発会社が 2023 年と 2025 年の 5, 6 号機完成を目指して、(1)エンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約、(2)完成炉の運転・管理契約、(3)燃料の供給契約——をロシアのエンジニアリング企業 NIAEP—ASE 社と締結した。しかし、欧州連合の執行機関である EC(欧州委員会)は 2015 年 11 月、こ

れが公的調達に関する EU 指令に準拠しているかについての調査と、EU 域内の競争法である EU 機能条約 (TFEU) における国家補助規則との適合性調査を開始した。EC は 2016 年 11 月に公的調達に関しては違反行為がなかったと認め、一方、同建設計画への投資は TFEU 第 107 条 1 項の規定範囲内で国家補助が含まれると 3 月 6 日に裁定。国内のエネルギー市場で競争原理の歪みを過度に生じさせないように、政府が複数の対策を取ることを条件に、この投資を承認すると発表していた。

【ロシア】

マヤク施設で初めて 100 万 kW 級の 使用済燃料を再処理

ロシア国営原子力総合企業ロスアトム社の週刊メディアである「ストラナ・ロスアトム」の 3 月 13 日版によると、チェリヤピンスクにある生産合同マヤクの再処理施設 (RT-1) で初めて、100 万 kW 級ロシア型 PWR (VVER1000) の使用済燃料が再処理された。同施設ではこれまで、40 万 kW 級 VVER (VVER440) や 60 万 kW 級高速炉「BN-600」、砕氷船、研究炉などの使用済燃料のみ、再処理していたが、3 つあるラインの 1 つでは VVER1000 の燃料集合体を剪断できる機器の導入といった改造プロジェクトを段階的に実施した。昨年 12 月に黒海北部のロストフ (旧ボルゴドンスク) 原子力発電所から VVER1000 の使用済燃料の試験バッチを持ち込み、このほど再処理を完了した。その結果に基づいて、今年からは産業規模で VVER1000 燃料の再処理を開始する計画である。マヤクの D. コルパエフ副 CEO は今回の成果について、「諸外国に同型の原子炉を売り込む際に、使用済燃料の再処理サービス、および抽出したウランとプルトニウムで製造した新燃料を提供できることは、競争上重要な強みになり得る」との評価を示している。

1977 年に操業開始した RT-1 は現在ロシアで唯一の再処理工場で、年間の再処理能力は約 400 トン。同施設で再処理できない VVER1000 と黒鉛減速軽水冷却チャンネル型炉 (LWGR) の使用済燃料は、発電所内の貯蔵プール、もしくはゼレノゴルスクにある鉱業化学コンビナート (MCC) 内に移送し、MCC で本格的な再処理施設 (RT-2) (年間再処理能力 700~800 トン) が完成するまで集中管理することになっている。ただし、RT-1 における実際の作業量は年間 150 トンほどで、稼働中の VVER440 が順次、運転期間を終了するのにともない、持ち込まれる使用済燃料の量も減少していく見通し。その一方で、VVER1000 の使用済燃料は年間 200 トン以上発生し、すでに 6,000 トン以上が貯蔵中となっている。このためマヤクでは RT-1 で VVER1000 の使用済燃

料 200~250 トンが再処理可能になるよう、5 年以上をかけて設備の最新化を進めていた。

コルパエフ副 CEO によると、出力の異なる VVER で使用済燃料の再処理工程に大きな違いはなく、RT-1 では今や、VVER1000 の使用済燃料を産業規模で再処理する準備が完了。2017 年の後半にサラトフ州にあるバラコボ原子力発電所から約 20 トンの使用済燃料を受け入れる予定であり、これは原子炉 1 基の年間排出量に相当する。到着後は 1 か月以内に再処理を終え、技術的および経済的な指標を見定める。具体的には、再処理原価のデータを明確化するとともに技術的プロセスを合理化し、顧客にとって魅力的な再処理サービスが提供できるようコストの引き下げを図るとした。

ロシア国内で民生用原子力発電所の運転を担当するロスエネルゴアトム社とは来月にも契約を結ぶ計画だが、マヤクはその際、同社の原子力発電所が排出する全種類の使用済燃料を扱える能力を実証する方針。また、ゆくゆくは海外で稼働する VVER1000 や外国メーカー製原子炉の使用済燃料、あるいは破損した燃料集合体の使用済燃料も再処理していく考えを明らかにした。

【サウジアラビア】

中国製高温ガス炉のフィージビリティ・スタディ実施へ

サウジアラビアの「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市公団 (K. A. CARE)」は 3 月 16 日、国内で中国製高温ガス炉 (HTR) を建設するための共同フィージビリティ・スタディ (FS) の実施について、中国の原子炉建設会社である中国核工業建設集団公司 (CNEC) と協力協定を締結した。今年 1 月に調印した了解覚書に基づくもので、両者はその後、サイトの選定や規制体制の構築、人材育成その他の側面について、FS の実施協力協定締結に向けた諸条件の検討を進めていた。今後は HTR プロジェクトに関する投資や建設工事、知的所有権関係の協力、原子力サプライ・チェーンの構築といった課題について、共同で解決策を模索する。同 FS はまた、サウジ政府が HTR プロジェクトの実施判断を下す際、判断材料の 1 つになるとしている。

サウジは原油資源を温存しつつ国内の電力需要急増に対処するため、2040 年までに 1,200 万~1,800 万 kW の原子力発電設備建設を目標としている。すでに様々な原子力開発利用国と原子力平和利用協力協定を締結済みで、韓国とは 2015 年 3 月、韓国原子力研究所 (KAERI) が中東諸国向けに設計した海水脱塩と熱電併給が可能なモジュール式小型炉「SMART」について、サウジ国内で 2 基建設する可能性を探るための了解覚書を締結した。一

方の中国は、陸と海の新シルクロード構想「一帯一路」に基づき、中国が知的財産権を有する原子炉を世界中に輸出していく方針。脱塩や熱電併給などの多目的利用が可能で固有の安全性を有する第4世代のHTRは、有力な輸出用設計の1つに位置付けられている。CNECは中国のHTR開発で中心的役割を担う清華大学と協力関係にあり、これに華能集团公司を加えた3者は現在、電気出力20万kWの実証炉を山東省石島湾で建設中である。

今回の協力協定は、アジア諸国を歴訪していたサウジのサルマン国王が北京で習近平国家主席と会談した際に結ばれており、両首脳立ち会いの下でK. A. CAREのH. ヤマニ総裁とCNECの顧軍・総経理が署名した。これと同時にK. A. CAREは、原子力安全の規制に関する協力で中国環境保護部と了解覚書を締結。サウジの地質調査所は、ウランとトリウムを鉱床に関する協力でCNECと了解覚書を締結している。

【ケニア】

ケニアの原子力導入計画で中国が人材育成協力

ケニアの原子力導入計画に協力している中国広核集団有限公司(CGN)は3月22日、関連の人材育成協力を含む複数の協力協定をケニア原子力発電委員会(KNEB)と締結したと発表した。2015年9月に両者が調印した原子力平和利用分野における協力覚書に基づくもの。ケニアが2030年までに100万kW級原子炉4基の建設を計画していることから、CGNとしては中国が輸出用の第3世代設計と位置付ける「華龍1号」のケニアでの建設を目指して、同設計技術に沿った訓練と能力開発サービスを同国に提供する。また、原子力発電の技術と事業関連で協力していく際、前提条件となる情報共有関係の権利事項や義務事項を機密保持協定の中で明記。「華龍1号」とその改良型炉の開発を念頭に置いた研究開発や建設・運転、燃料供給、原子力安全、放射性廃棄物管理、廃止措置など、包括的な協力を行っていくことになる。

これらの協定は、3月14日から16日にかけてケニアの首都ナイロビで国際フォーラム「ケニア原子力エネルギー・ウィーク」が開催されたのを機に結ばれた。同フォーラムは東アフリカ地域における原子力関係者会合・展示会であり、ケニアの国会議員や関係閣僚・機関がKNEBの代表者とともに出席したほか、ケニアと同じく原子力発電の導入を検討しているナイジェリアとガーナの政府当局、国際原子力機関(IAEA)、世界原子力協会(WNA)の関係者などが参加。ロシアや韓国をはじめとする世界中の原子力企業が、中国チームとともにそれぞれの原子力技術、開発能力と経験、サプライ

チェーンなどを紹介した。現地の報道によると、ロシアの原子力総合企業ロスアトム社はケニアに対し、120万kW級のロシア型PWR(VVER)を政府間融資協定に基づく25年ローンで建設する案を提示した模様。また、KNEB側では原子力発電所開発の法的インフラとなる原子力規制法を2018年初頭に制定するため、年末までに案文を作成すると述べたことが伝えられている。

ケニアは人口4,700万人ほどで、現在の総発電設備容量は200万kW足らず。その約半分が水力によるもので、電化率は全人口の約30%に過ぎない。このため政府は2030年までにケニアを中所得レベルの新興国とする開発戦略「ケニア・ビジョン2030」に従って、持続可能な経済成長のカギと位置付けたエネルギー源の開発計画を進めている。原子力導入計画では様々な国と協力関係を結んでいるところで、2016年5月にロスアトム社と、同年9月には韓国電力公社(KEPCO)と原子力平和利用分野全般の協力で了解覚書を締結した。政府が2011年11月に開始したプレ・フィージビリティ・スタディもすでに完了。IAEAの専門家チームは2015年8月に「総合原子力インフラ審査(INIR)」を同国で実施し、原子力発電インフラの開発準備が大幅に進展していると結論付けていた。

【インド】

クダングラム2号機が営業運転開始

インド最南端のタミルナドゥ州でクダングラム原子力発電所の建設を請け負ったロシアの原子力総合企業ロスアトム社は3月31日、試運転中の2号機(100万kWのロシア型PWR)がすべての試験や作業を終えて営業運転モードに移行したと発表した。事業者であるインド原子力発電公社(NPCIL)がロスアトム社傘下のエンジニアリング企業ASEエンジニアリング社と、2号機の暫定的な受容証明書に調印したもの。これをもって同炉は、ロシア側の責任項目に含まれる不具合や技術的欠陥が生じた場合に機器の設計・サプライヤーであるASE社が保証義務を負うという1年間の保証運転期間に入った。NPCILは2018年4月に最終的な受容証明書に署名する予定である。

同発電所では2014年12月に1号機(100万kWのロシア型PWR)がインド初の大型軽水炉として営業運転を開始。2号機は2002年に本格着工した後、2016年8月に送電を開始しており、今年1月末には初めて定格出力に達していた。また、Ⅱ期工事にあたる3、4号機(各100万kWのロシア型PWR)についても2016年10月に起工式が行われ、翌月からロシアのエンジニアリング企業AEMテクノロジー社が大型機器の製造を開始している。

将来の高速炉サイクルオプションとしての統合型高速炉 (IFR) の技術的可能性—小型金属燃料高速炉と乾式サイクル施設を併設した IFR

笹川平和財団 田中 伸男

米国アルゴンヌ国立研究所が開発した高速炉と乾式サイクル施設を統合した統合型高速炉は受動的安全性、核不拡散性、放射性廃棄物の減容化において優れた核燃料サイクル方式である。またこのシステムは福島第一原子力発電所事故で生じた燃料デブリの処理に適用可能な技術と考えられる。実際にこの技術を使った場合、デブリ処理に要する時間、施設の安全性、建設コストを試算するとともに今後の技術的課題などの技術的可能性を検討した。

KEYWORDS: *Integral Fast Reactor, IFR, Pyroprocessing, Fukushima Debris, Nuclear Fuel Cycle, PRISM*

I. はじめに

1. 研究目的

将来の高速炉サイクルオプションの一つとして、ナトリウム冷却小型金属燃料高速炉と乾式サイクル施設を併設した統合型高速炉 (IFR) 概念が考えられている。ナトリウム冷却金属燃料高速炉と乾式サイクルの組合せは、我が国の高速炉サイクルの実用化研究開発プロジェクトにおいても、ナトリウム冷却酸化物燃料高速炉と湿式再処理の組合せに次ぐ、副概念と位置付けられ¹⁾、基礎・基盤的な検討が行われてきている。この IFR 概念の技術的可能性について調査するために、2011 年 3 月の東京電力(株) (現、東京電力ホールディングス(株)) 福島第一原子力発電所の炉心溶融事故で発生した燃料デブリを一例として、その処理(燃料デブリを再処理し、回収したプルトニウムやネプツニウム、アメリシウムなどの超ウラン元素 (TRU) から燃料を製造し、発電炉で燃焼させてリサイクルさせ、TRU を減少させていくこと)による放射性廃棄物の減容と有害度低減効果について、その実証に至るまでの技術的可能性と課題を検討する。

また、この研究を推進するための日米の高速炉サイク

ル分野での研究協力課題の候補についても検討する。

具体的には、燃料デブリ等の処理に有効と考えられる乾式再処理法と安全性に優れた小型金属燃料高速炉概念を対象に、その技術的可能性や解決すべき課題等を取り纏める。

燃料デブリ取り出し後の処理方法については、燃料取り出し後に判断されると考えられるが、本研究は処理方法に対する一つのオプションとして、取り出した燃料デブリを再処理して回収した U/TRU から燃料を製造し、小型高速炉で燃焼させ、デブリ中の TRU を減少させていく方策を IFR 概念として検討するものである。

2. 研究内容

福島第一原子力発電所の燃料デブリを対象に、これらを処理し、炉においてリサイクルするシステムの技術的可能性を、下記のテーマ別に調査する。

- (1) 乾式再処理システムの概念検討
- (2) 小型金属燃料高速炉の出力規模と概念検討
- (3) 小型金属燃料高速炉の受動的安全性と炉心損傷の影響評価

3. 検討体制・チーム

本検討を実施するにあたり、笹川平和財団に国内専門家による研究会を組織した。研究会は佐賀山豊氏(日本原子力研究開発機構)を主査として、藤家洋一氏(NPO ニュークリア・サロン)、山口彰東京大学教授、守田幸路

Technical Feasibility of an Integral Fast Reactor (IFR) as a Future Option for Fast Reactor Cycles ; Integrate a Small Metal-fueled Fast Reactor and Pyroprocessing Facilities ; Nobuo Tanaka.

(2017 年 1 月 26 日 受理)

九州大学教授、藤田玲子氏(科学技術振興機構)、尾形孝成氏(電力中央研究所)、小竹庄司氏(日本原子力発電(株))、佐藤浩司氏(日本原子力研究開発機構)、難波隆司氏(同)が参加し、日立 GE ニュークリア・エナジー(株)、三菱重工業(株)、(株)東芝で分担検討した内容を議論した。また、米国アルゴンヌ国立研究所の Tanju Sofu 氏、Mark A. Williamson 氏、Yoon I. Chang 氏、米国エネルギー省の Sal J. Golub 氏、コロンビア大学の Nicola De Blasio 氏と研究会メンバーと意見交換を実施し、そこでの意見を一部反映した。

II. 研究成果

統合型高速炉 IFR(Integral Fast Reactor)は、1984 年に米国アルゴンヌ国立研究所が提唱した、固有の安全性を備えた小型の金属燃料を用いたナトリウム冷却高速炉プラントと、高温冶金法を用いた乾式再処理施設、射出鑄造(成型)燃料製造施設などを組合せ、同一サイトに設置したクローズド燃料サイクルシステム概念である。

その特長として次のような点が挙げられている。

- ・ウラン資源の有効利用：高速中性子を利用した燃料増殖
- ・固有安全性(受動的安全性)：炉心反応度係数の多くが負であり、冷却材温度上昇に対して大きな負のフィードバック効果
- ・廃棄物管理：マイナーアクチニド(ネプツニウム、アメリシウム、キュリウムなど)の燃焼等による放射性廃棄物の発生量低減、長期放射性毒性(有害度)の低減
- ・核拡散抵抗性が高い：プルトニウムを単離できない乾式再処理を利用、燃料輸送が不要
- ・経済性：コンパクト、クローズド燃料サイクル、小型高速炉(工場生産・現地組立)を採用

IFR 概念は、高速増殖実験炉 EBR-II とその燃料サイクル施設を用いた研究開発を通して構築された。米国エネルギー省は、1985 年からこのような金属燃料プール型炉の研究開発を先進液体金属炉計画として行ったが、1994 年に米国議会の決定によりこの計画は中止された。

しかし、その後も米国 GE 社(現 GE 日立ニュークリア・エナジー(GEH)社)は革新的小型モジュール原子炉 PRISM(Power Reactor Innovative Small Module)の研究開発を継続しており、最近では、2012 年に GEH 社が、英国で保管中の民生用プルトニウムの処理方策の公募に PRISM と先進リサイクルセンターを組み合わせた概念を提案している。

わが国の高速炉サイクルの将来オプションの一つとしてのこの IFR 概念の技術的可能性を調査するため、福島第一原子力発電所の燃料デブリ処理を一例として検討した。

1. 福島第一原子力発電所の燃料デブリの推定

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災とそれに伴う津波により、東京電力(株)福島第一原子力発電所では全電源が喪失し、1~3 号機の燃料が溶融する深刻な事故が発生した。溶融した燃料は、その事故の進展過程で、燃料のさやである被覆管や、原子炉容器などの構造材料などと反応して複雑な組成の、複雑な形状の物質へと変化したと推定されるが、これを燃料デブリと称する。溶融燃料は、燃料デブリとして原子炉容器内に留まる場合(炉心領域デブリ)もあるが、場合によっては原子炉容器を貫通し炉容器外に達する。この場合には、コンクリートと反応してさらに複雑な化学組成・形状の燃料デブリ(MCCIⁱデブリ)が生成する。

福島第一原子力発電所原子炉の廃止措置に向けては、この燃料デブリの取り扱いが一つの大きな課題であるが、ここでは、これらを乾式再処理法にて適切に処理し、燃料成分であるウランや TRU を回収し、回収した TRU を用いて燃料を製造し、これを安全性に優れる小型金属燃料高速炉でリサイクルするシステムを検討する。

処理法を検討するにあたっては、燃料デブリの組成がどのようになっているかを知る必要があるが、現状はまだ、原子炉内の燃料デブリを採取して調査分析するまでには至っていない。

本検討では、デブリの性状、組成に関する既往の知見を文献や公開情報に基づいて調査した。炉内のウラン酸化物や被覆管、構造材料などの量は 1~3 号機毎に評価されており、ウラン酸化物は約 300 トン、構造材料等を含む全体で約 530 トンとされている²⁾。また、各号機での炉心・格納容器の状態については、東京電力自身が定性的に評価している³⁾他、溶融した燃料の炉内での分布は解析コードなどで推定されており⁴⁾、本検討では図 1 に示すようなデブリの分布を仮定した。それらから、炉心領域デブリが約 120 トン、MCCI デブリが約 740 トンと推定した。

また、それらの組成・性状についても計算コードによる推定⁵⁾、米国スリーマイルアイランド原子力発電所 2 号炉事故での情報⁶⁾、福島第一原子力発電所事故特有な事象の影響などが検討されている^{5, 7, 8)}。これらをもとに、デブリの主要組成を次のように推定した。

(1) 炉心領域デブリ

- ・(U, Zr)O₂(ウラン・ジルコニウム混合酸化物)
- ・ステンレス・ジルカロイ合金
- など

(2) MCCI デブリ

- ・(U, Zr)O₂
- ・(Zr, U)SiO₄(ウランを含有したジルコン)
- ・CaAl₂Si₂O₈(灰長石(かいちょうせき)；塩基性火

ⁱ MCCI : Molten Core Concrete Interaction

SAMPSONコードによる解析⁴⁾等を参考にして、重金属の移行率を右記の数字のように仮定

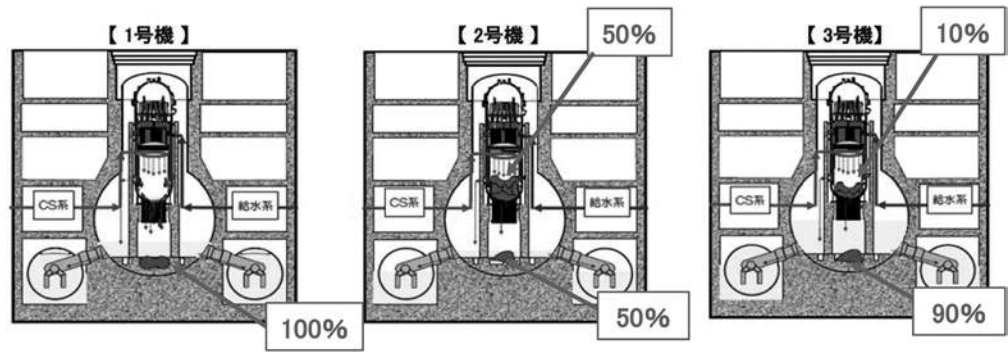


図1 福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定

成岩の主要造岩鉱物)など

2. ナトリウム冷却小型金属燃料炉と乾式再処理システムによる燃料デブリ処理スキーム

日本原子力研究開発機構(JAEA)の公開レポート⁹⁾に基づき、福島第一原子力発電所サイト内の核物質の重量とその内訳を整理した。本研究においては、震災後40年以内の廃炉を想定し、その中で震災後の経過年数が最も長く、ネプツニウム、アメリカシウムなどのマイナーアクチニド(MA)の含有率が最大で、ボイド反応度が厳しくなる時点の組成を、1～3号機のデブリの平均燃料組成として用いた。この場合、TRU重量は1.94トン、重金属重量は251トンであった。

燃料デブリには、軽水炉の使用済燃料中に含まれるプルトニウム及び上述のMAなどの燃料成分が含まれている。これらTRUは高速炉において効率よく燃焼できることから、高速炉の炉心燃料として炉心に装荷して燃焼させることによってTRUを減少させていくことができる。この使用済燃料からTRUを取り出して、燃料製造と高速炉での燃焼を繰り返すことで、最終的に使用済燃料から抽出される高レベル廃棄物中の長期放射性毒性を減じることができる。

デブリに含まれるTRUをナトリウム冷却金属燃料高速炉で燃焼することを想定し、燃料デブリの燃焼スキームと高速炉の出力規模を次のように設定した。

- デブリ中のTRUを小型金属燃料炉心で一通り燃焼し(ステップ1)、その使用済燃料中のTRUをプラント寿命中リサイクルしてTRU重量を減少する(ステップ2)、2段階のスキームを考案。
- 燃料デブリ中の核燃料を全て燃料集合体にする処理期間を、福島第一原子力発電所廃炉工程と整合する15年と暫定。
- 小型金属燃料炉心の単位出力当たりのTRU核変換特性(燃料重量、TRU燃焼速度)が、概念検討が進んでいるGEH社の熱出力84万kWt(電気出力31.1万kWe)のPRISM TRU燃焼炉¹⁰⁾と同じであると仮定した。すなわち、燃料取替は全炉心の1/4ず

つ行う4バッチ炉心。燃料交換間隔であるサイクル長は1年。炉外の燃料滞在期間(最短の燃料冷却期間)は2年¹¹⁾など。

- この結果、1.94トンのデブリ起源のTRUを、15年の間、燃料として装荷可能な容量として、小型金属燃料炉心の熱出力を19万kWt(電気出力7万kWe)と設定した。

このようなスキームを成立させるためには、炉の他、燃料サイクル施設が必要である。本検討は、燃料デブリを処理し、TRU量を低減するために、高速炉と燃料サイクルを統合した統合型高速炉(IFR)の概念を適用することの可能性を調査するもので、図2に示すような米国アルゴンヌ国立研究所の施設¹²⁾がその典型的なイメージである。

デブリの燃料への転換と高速炉運転のスキームを図3に示す。[I]では、デブリを処理し、高速炉の初装荷燃料を製造する。[II]では、デブリの処理を実施して燃料を製造することと並行して、炉の運転が行われ使用済燃料が発生する。この状態はデブリがなくなるまで継続する。この[I]及び[II]がステップ1を示している。デブリがなくなった後は、使用済燃料を処理してリサイクルする[III]、すなわちステップ2に移行する。

このスキームによるTRU量の減少の様子を図4に示す。後述する熱出力19万kWtの炉心概念検討におけるTRU燃焼特性をもとに、デブリ処理・燃焼スキームにおける重金属、TRUのマスマランスを評価した結果、初装荷燃料は炉の運転開始前の4年間で製造すればよいこと、炉の運転開始後6年間で、デブリの一通りの処理が終了すること、すなわちステップ1の期間は当初暫定した15年より短く10年となることが分かった。当初1.9トン存在したデブリ中のTRUは、高速炉サイクルの運用開始から25年後には、原子炉内に約0.8トン、使用済燃料中に約0.4トンの合計1.2トンまで減少するとともに、燃料集合体の中で管理された状態となる。

原子炉で燃焼させた使用済燃料は一定期間(本検討では16ヶ月を想定)ナトリウムプールで十分に冷却した後、再処理と燃料製造を行うこととしている。運転後24.7年経過して燃料を取替えた時点で、16ヶ月以上冷却

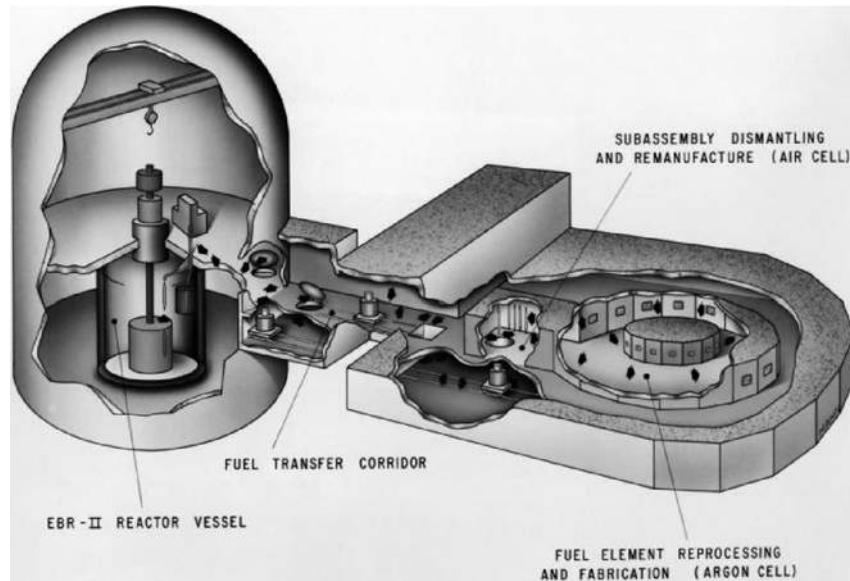


図2 高速炉と燃料サイクル施設を統合した IFR 概念図(米国アルゴンヌ国立研究所の高速増殖実験炉 EBR-II と燃料サイクル施設 (FCF) の例)¹²⁾

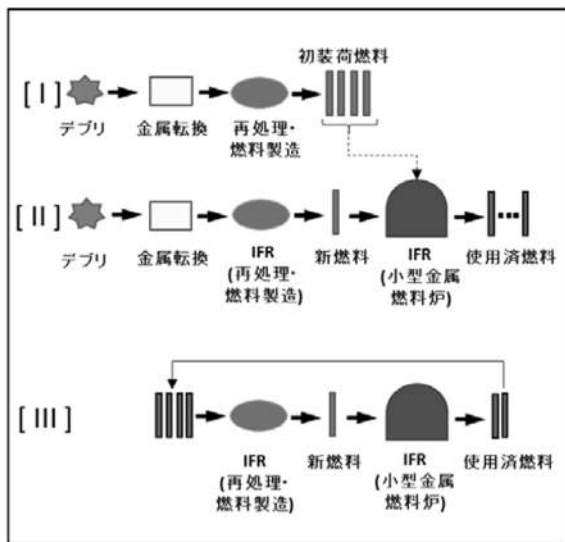


図3 デブリ処理スキーム概念図

された使用済燃料がなくなるため、これ以降は連続的に運転ができるようには、再処理と燃料製造ができなくなる。冷却期間が16か月経過後は、使用済燃料から TRU を取り出し、更に1サイクル(8ヶ月)継続して、25.3年まで炉は運転可能であるが、この後は、この施設だけでは連続的な運転はできなくなり、冷却期間を待って再処理と燃料製造を行い、炉に装荷するという断続的な運転となる。

この25.3年以降の対応策としては、次の2つが考えられる。

- a) この炉の運転は25.3年で終了し、残存する燃料は再処理して、別の高速炉の新燃料として利用する。
- b) この炉で25.3年以降も他の軽水炉使用済燃料再処理等から回収した TRU を供給して、連続運転を継続する。

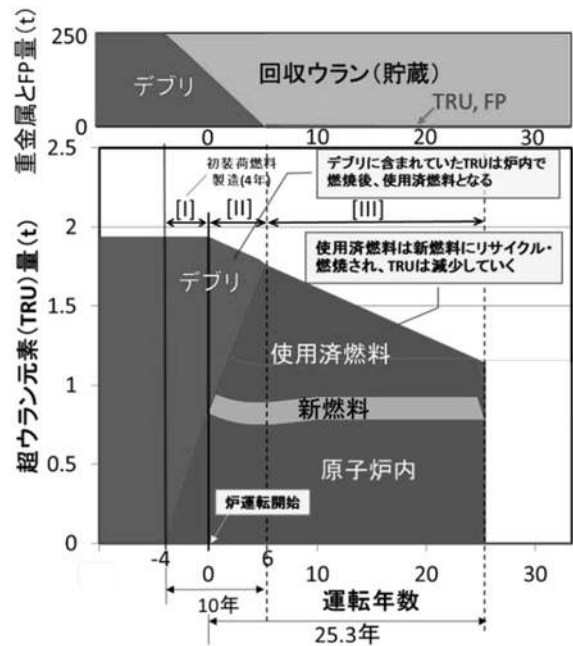


図4 IFR 運用と超ウラン元素の減少

※被災した福島第一原子力発電所(1~4号機)の使用済燃料2,724体の処理も可能。[1号機292体、2号機587体、3号機514体、4号機1,331体。(4号機の1,331体は2014年12月22日までに使用済燃料プールから取出済み)]

このような運転はオプションであると考え、図4には連続的な運転が可能となる25.3年まで運転する期間の変化を図示している。

3. 乾式再処理システムの概念検討

金属燃料高速炉に対しては、これまで熔融塩電解に基づく乾式再処理(金属電解法)と射出鑄造(成型)による燃

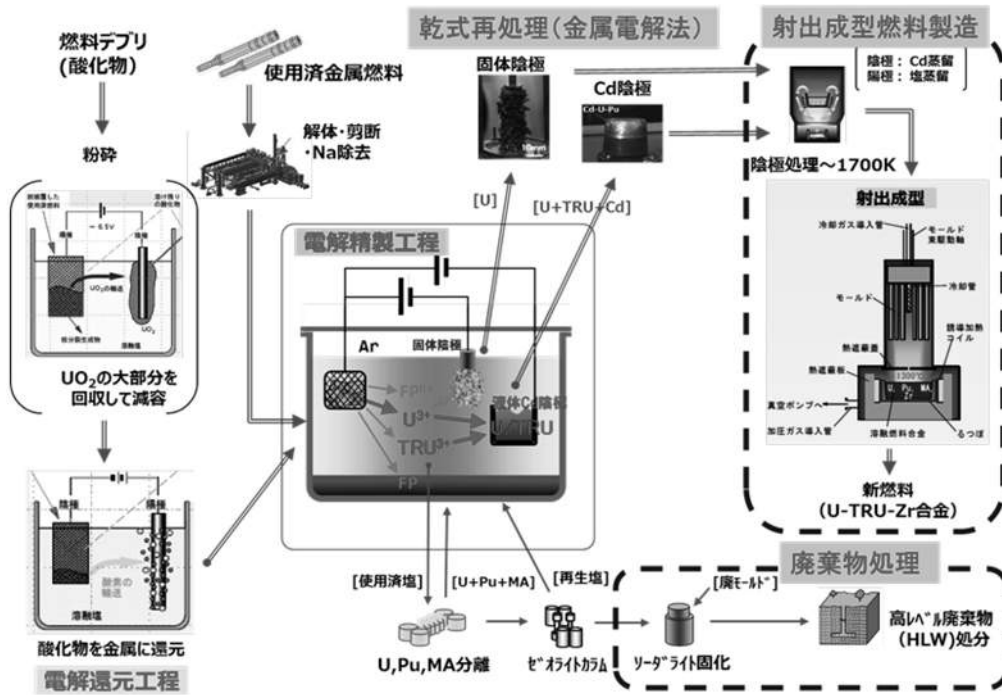


図5 乾式サイクル技術(酸化物・金属燃料用)

燃料製造技術を組み合わせたシステムが開発されており、これらの技術が活用可能である。但し、燃料デブリはII 1. 節で示したように、通常燃料と異なる酸化物が主体となることから、これを適切に処理し金属電解法へつなげる技術が必要となる。

II 1. 節で推定した組成で代表されるデブリを処理する技術として、公開文献等を中心に10種類程度を調査し、これらを①溶解(還元)分離の見通し、②ウラン、プルトニウム、MAの一括回収の見通し、③金属燃料製造との適合性、④廃棄物発生量(参考)を観点として概略評価した。まず①の観点を重視して絞り込み、次いで②、③の観点を考慮して、最終的に電解還元法を用いるプロセスを選択した。電解還元としては、塩化リチウム中での還元と塩化カルシウム中での還元の2方式を想定した。いずれの方式にも課題があり研究開発が必要であるが、利用可能な知見が豊富な塩化リチウム中での還元と引き続き電解精製技術を対象に開発することが望ましいと考えられる。乾式サイクル技術のイメージを図5に示す。

乾式再処理と燃料製造の概略プロセスフローと核燃料のフローを図6に示す。デブリ処理スキームに基づき、4年で初装荷燃料を製造するためには、重金属(燃料)ベースで年間30トンの処理が必要となる。デブリは前処理により粉碎後、電解還元へ供され、還元物は次工程の電解精製工程へ供給される。ここでウランと、ウラン+TRUがそれぞれ回収され、燃料製造の原料となる。

電解精製工程の陽極の残留物は処理され、ウランは回収される。

また、電解精製工程の塩はリサイクル処理される。燃料製造は回収した燃料の一部を用いて適切なウラン、TRUの割合に調整し、射出鋳造と呼ばれる方法で棒状の燃料に成型され、炉に装荷される。年間の製造量は0.72トンとなる。

なお、回収されたウランの大部分は、貯蔵保管される。

上記で発生するプロセス廃棄物は通常の金属燃料サイクルの一環として開発されている安定固化処理技術で廃棄物とし、地層処分することが考えられる。具体的には、熔融塩廃棄物はソーダライトと呼ばれる鉱物型固化体にして、高レベル放射性廃棄物として処分することが、また、陽極残渣等の金属廃棄物はセメント固化体にして、TRU廃棄物として処分することが考えられる。

一連のデブリ処理を行う当初10年間は、再処理は年間30トンの処理容量であるが、それ以降は、年間1トン程度となる。

4. ナトリウム小型金属燃料炉心の概念検討

PRISM TRU 燃焼炉の仕様¹⁰⁾に基づき、熱出力19万kWtの小型金属燃料炉心の概念・仕様を設定した。炉心燃料には、U-Zr母材をベースとする合金燃料U-TRU-10% Zrを使用し、燃料集合体仕様としてPRISM TRU 燃焼炉心と同じものを用いた結果、炉心燃料集合体が48体、制御棒7体、ガス膨張式モジュール(GEM)2体、炉心高さは60cmとなった。炉心構成の概要を図7に示す。

この炉について、受動安全性の観点から、ボイド反応度が負を前提条件とし、燃焼反応度の目安制限値を、設定した主炉停止系で制御可能と推定された値、3%

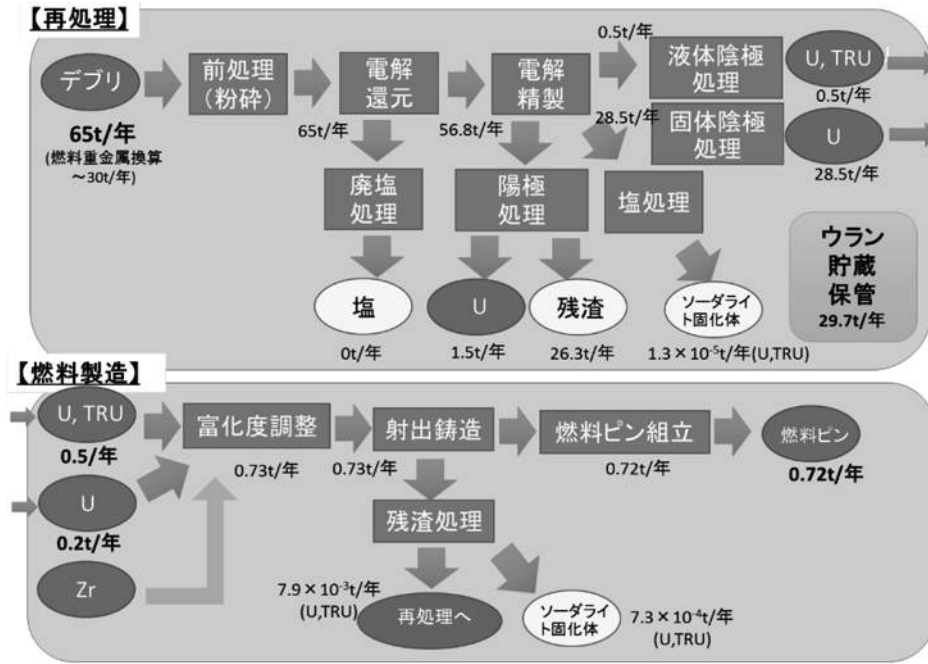


図6 マスフローとシステム構成の説明(炉心領域デブリのケース)

炉心構成の比較

	PRISMのTRU燃焼炉心	基準炉心
原子炉出力	84万kWt(31.1万kW)	19万kWt(7万kW)*1
炉心燃料	U-TRU-10Zr	U-TRU-10Zr
集合体数		
燃料集合体	192	48
制御棒	9+3(USS)	7
GEM	6	2
反射体	78	66
遮へい体	54	42
炉心高さ, cm	62.8	60.0

*1:熱効率を同じと仮定した値

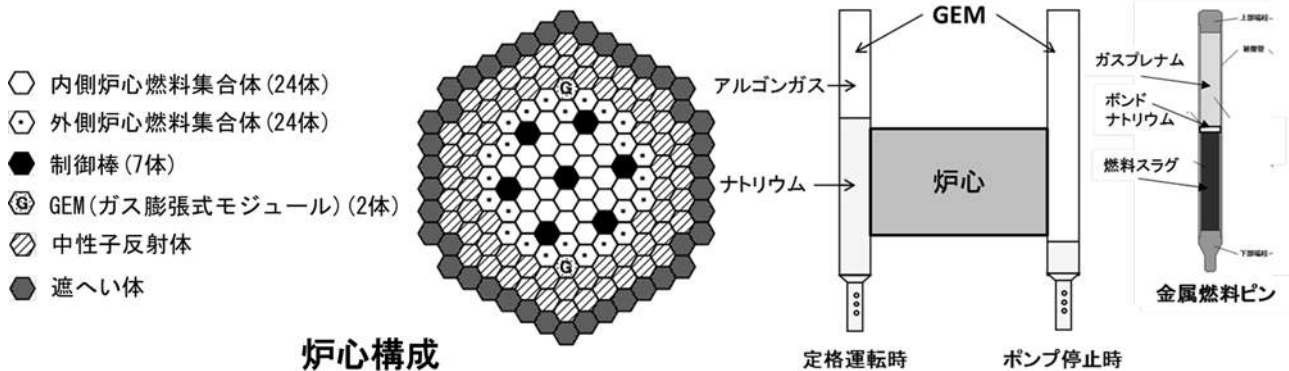


図7 炉心設計(リファレンス炉心)

dk/kk' 以下と設定した。

デブリ処理のステップ1及びステップ2それぞれについて、平衡炉心を構成し、燃料のTRU富化度を求め、炉心の核特性とTRU燃焼速度を評価した。燃焼反応度を目安制限値以下とするため、8カ月運転毎に炉心燃料の

1/6を交換する、8カ月運転×6バッチ燃料交換炉心とした。

その結果、外側炉心でTRU富化度(TRUの割合)が35.1%(U-35.1%TRU-10%Zr)となった。この炉心のTRU富化度は米国での開発・試験実績を上回るものと

なっている。燃焼反応度はステップ1, 2とも目安制限値を下回り、炉心部と上部ガスプレナム部を合計した正味のボイド反応度はステップ1, 2とも負であり、いずれも設計条件を満足した。こうして得られた TRU 燃焼速度から評価した TRU 量の経時変化は図4に示した通りである。

5. 小型金属燃料炉の安全性について

(1) 受動的安全性による炉停止

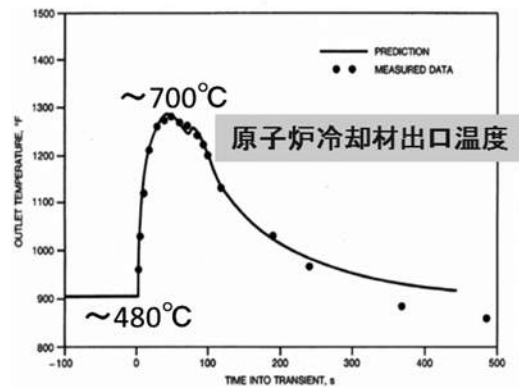
原子炉の安全設計では、プラントの運転期間中に発生が想定される様々な異常の発生頻度に応じて、「異常な過渡変化」と「想定事故」が考えられている。これらの異常に対して、原子炉停止系や崩壊熱除去系の工学的システムによって、安全に「止める」「冷やす」が遂行される。これによって、炉心燃料の健全性は確保され、外部への放射性物質の放散に繋がらないように設計・評価されている。

1979年のTMI事故後、世界各国では確率論的安全評価が進められ、想定事故の範囲だけでなく、発生頻度は更に低いが、安全システムの多重故障等によって炉心損傷に至る事象を、工学的な安全設備に頼らずに、自然現象の法則によって静定させ、炉心損傷を防護する受動的安全性に関する研究が活発に進められるようになった。併せて、軽水炉でそれまで研究が進んでいなかった炉心損傷の事象推移に関する研究も進められ、その炉心損傷によって周辺環境に放射性物質を放散させない緩和対策に関する研究も進められた。

ナトリウム冷却高速炉の安全設計の歴史は、1960年代の開発当初から、想定事故に対して十分な設計裕度で判断基準を満足させるとともに、仮想的な炉心崩壊事故（高速炉では炉心損傷の事象推移が早く、熔融燃料が再臨界に至る可能性も考慮して炉心崩壊事故と言われる。）の影響を原子炉容器及び格納容器内に閉じ込めることが安全設計・評価の中心課題として扱われてきた。TMI事故後の影響を受け、高速炉でも、受動的安全性の研究が進められ、特に、小型金属燃料炉の安全上の特徴は、実験炉 EBR - II (原子炉の熱/電気出力 6.25 万 kWt/2 万 kWe) における実証試験で広く世界に認識されるようになった。

実験炉 EBR-II では、1985年5月から1986年4月にかけて小型金属燃料炉の固有安全性実証試験が行われた¹²⁾。①定格運転状態から主循環ポンプが停止する流量減少型事象(ULOF)の結果例を図8(a)に、②定格運転状態から2次系主循環ポンプや蒸気発生器への水供給ポンプが停止する除熱失敗型事象(ULOHS)の結果例を図8(b)にそれぞれ示した。ともに外部電源喪失による主循環ポンプの停止と原子炉停止操作に失敗するという事象を模擬したものであるが、前者は炉心冷却材の流量低下で炉心全体の温度が増加し、より厳しい事象となる。

(a) ULOF 試験



(b) ULOHS 試験

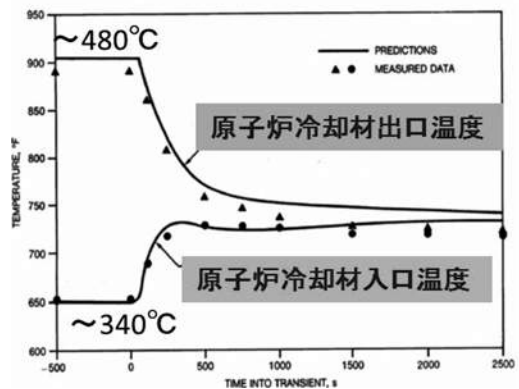


図8 米国の実験炉 EBR-II での小型金属燃料炉の固有安全性実証試験¹²⁾

後者は、二次系の流量低下から炉心冷却材の冷却が不十分となり、炉心入口温度の上昇が炉心冷却材全体の温度増加をもたらすもので、炉心燃料温度の上昇は比較的緩慢となるが、当該事象に至る可能性のある異常事象の発生頻度は前者よりも高くなる。

EBR-II 試験では、上述のいずれの場合にも炉心燃料は破損せず、原子炉は安全に停止した。EBR-II は、本研究で検討している炉心に比べて約 1/3 の大きさであることから、炉心燃料、構造材、冷却材等の負の反応度効果はより大きく作用し、受動的な炉停止機構がなくとも、自然に炉停止した後、定格運転状態と同等な温度範囲で静定している。

図9に今回検討した小型金属燃料炉における燃料温度、冷却材温度、構造材温度など炉心の温度増加に伴う炉心全体の反応度への影響の伝播経路を示す。炉心燃料温度が上昇する異常の場合、炉心部冷却材温度係数や燃料集合体の熱湾曲効果などで局所的に正の反応度が投入されることが想定されるものの、燃料温度係数、構造材温度係数、炉心周辺の冷却材温度係数等の負の反応度効

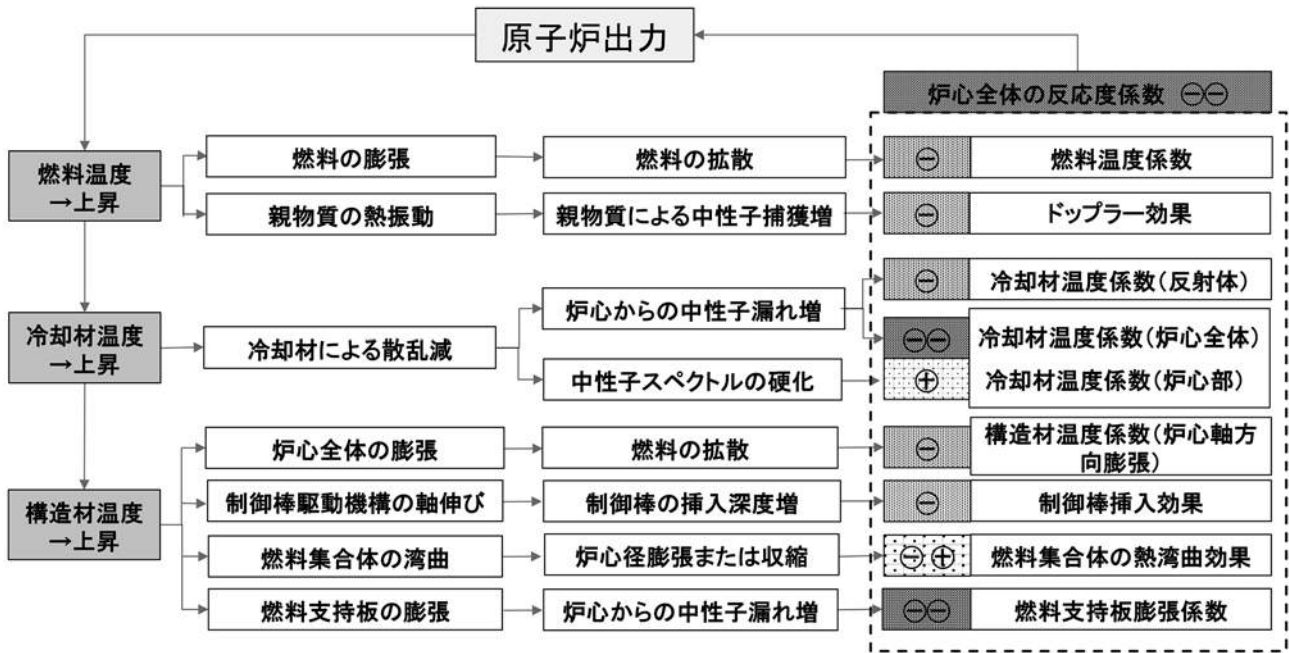


図9 小型金属燃料炉の受動安全特性

果が卓越し、炉心全体では負の反応度効果となり原子炉出力は低下する。すなわち小型金属燃料炉は炉心燃料温度が上昇する異常事象に対して、受動的に炉心出力を低下させ、静定する受動的安全性を有している。

更に、受動的安全性を達成する諸現象の不確かさに対する懸念を払拭することや、高温静定状態を安全に低下させられるように、本検討では受動的な炉停止機構を採用した。具体的には、外部電源が喪失して全ての主循環ポンプが停止して、原子炉スクラムに失敗する異常事象(ULOF)に対しては、ポンプ停止に伴う吐出圧の低下により図7に示すように炉心外周部に配置したGEM(ガス膨張機構)内のガス領域が拡大して、炉心外周部から中性子が漏れ出して大きな負の反応度効果を与える機構を採用した。制御棒の誤引抜きによる出力増加型の事象(UTOP)に対しては、制御棒の引抜き範囲を制限して、炉心に投入される正の反応度を制限するロッドストップ機構によって、炉心損傷前に事象静定させることとした。

なお、東電福島第一原子力発電所では、地震によって安全確保に必要な系統・機器は損傷せず、地震とともに発生した外部電源喪失により主循環ポンプは停止したが、原子炉停止操作も問題なく遂行され、そして非常用電源も起動して崩壊熱除去系統は正常に機能した。しかし、その約50分後に発電所を襲った巨大津波により、非常用電源をはじめ、バッテリー等の直流電源の全てが喪失し、崩壊熱除去に必要なバルブの開閉状態の把握から開閉操作もできないバッテリー電源の喪失と、炉心冷却のための注水操作(海水投入も含む)に長時間要したことが、大規模な炉心溶融に至った原因である。

同様な起因事象に対して、高速炉でも耐震設計により強地震に耐える設計が可能であることから地震によって安全機能が喪失することは軽水炉と同様に考えられない。ついで、津波による全電源の喪失を仮定した場合でも、高速炉の崩壊熱除去系は、ナトリウムを自然循環させて大気に熱を逃がす単純な方法であり、冷却材ナトリウムの注入操作等は不要であり、また、直流電源がなくとも手動操作による空気冷却器の操作によって除熱量を一定規模で制御することが可能である。すなわち、福島第一原子力発電所の事故当初、一番重要であった注水作業を不要とできるナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去系は、炉心損傷に至る可能性を一層低くできる事が期待できる。

(2) 炉心損傷時の影響緩和

小型金属燃料炉心は受動的な安全特性のため炉心損傷の発生頻度は小さくなるが、炉心損傷時の影響を緩和し、放射性物質の放散可能性を抑制することも示していく必要がある。このため、本検討では仮想的に、受動的な炉停止機構の効果を見直し、更に事象推移で想定される種々の不確かさを考慮して、上述したULOF、UTOP、ULOHSのようなスクラム不作動型の事象(ATWS)からの炉心損傷の事象推移について小型金属燃料炉心の特徴を考慮して検討した。ULOHS型事象では、図8に示したEBR-IIの応答と同様で炉心損傷に至らない。ULOF型事象では、炉出力規模が大きいことでEBR-IIの応答より幾分厳しくなり、燃料被覆管が破損する可能性があるが、後述する金属燃料の破損及び破損後挙動によって、溶融燃料が集中化して機械的エネルギーの有意な放出に至る可能性が低いことを説明できる可能性がある。制御棒誤引抜きによる出力上昇型の事象(UTOP)で受動的

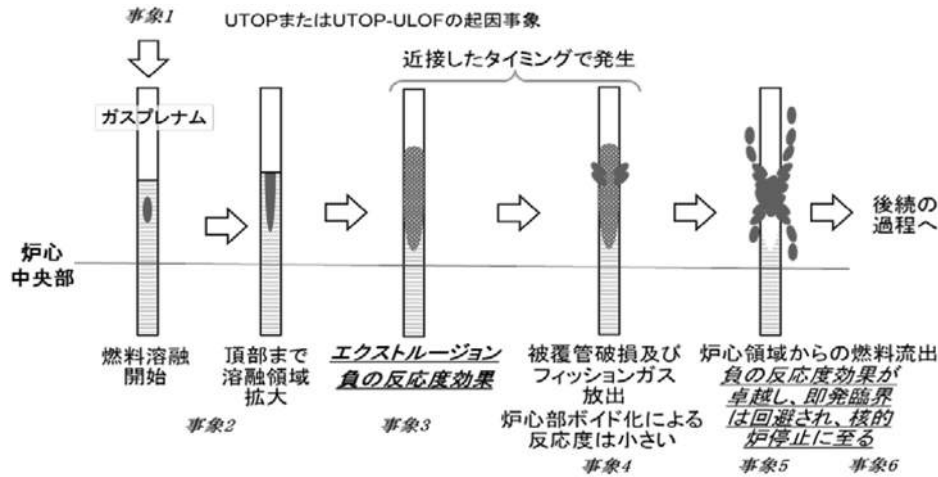


図10 金属燃料ピンのUTOP又はUTOP-ULOF型事象時の事象進展破損後挙動

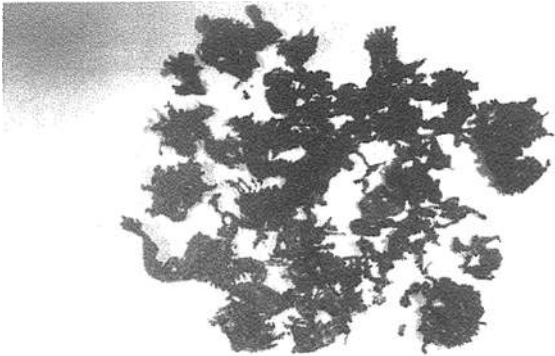


図11 ナトリウム中で固化した金属燃料¹³⁾

な炉停止機構(ロッドストップ)の効果を見れば、出力が上昇して被覆管が破損し、溶融燃料が冷却材中に放出される(図10参照)。

しかし、金属燃料では燃料ピン破損が炉心の上端部分で生じる性質があるため、冷却材流路に放出された溶融燃料は炉心外に流出して負の反応度効果を与え、機械的エネルギーの有意な放出に至らず終息することが期待できる。炉心損傷後の溶融燃料の冷却も、冷却材と接触・混合した溶融金属燃料は、多孔性のデブリ(図11参照)になるとの実験結果があり、集中し難い特性が期待される。

このように、金属燃料の特性と、小型炉心の特徴を考慮することにより、酸化物燃料炉心とは異なった方法で、炉心損傷事故時の再臨界を回避する方策を実現することが期待できる。このためには、米国で開発された金属燃料用のSASコード等による炉心損傷事象解析を行い、包括的な炉心損傷シナリオを構築するとともに、それらの妥当性を裏付ける実験データの取得・拡充が必要である。

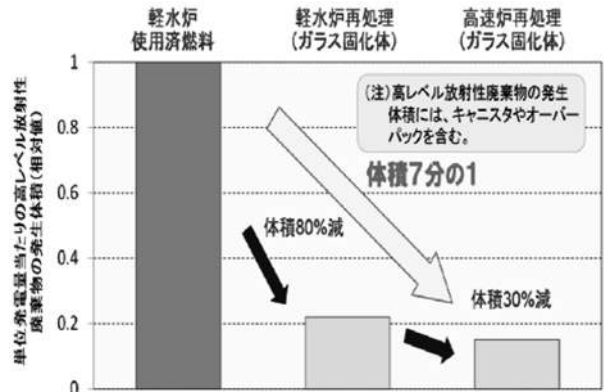


図12 廃棄物発生量の低減¹⁴⁾

6. 放射性廃棄物の減容と放射性毒性(有害度)低減効果

国際放射線防護委員会(ICRP)は、人体への経口摂取による被ばくリスクを考慮して、各放射性核種に対して年摂取限度を定めている。放射性毒性とは、原子炉から排出される使用済核燃料、またはその再処理により発生する放射性廃棄物に含まれる放射性核種(崩壊系列の娘孫核種を含んだ値)の放射能を年摂取限度で割ったものである。

燃料デブリは、放射性毒性の観点では、通常の軽水炉使用済燃料に近い。そのため、燃料デブリを適切に処理し、高速炉でリサイクルすることにより、TRUを減少させると共に、使用済燃料中と原子炉の炉心内に管理された状態に移行させることになる。

高速炉サイクルは、TRUをサイクルシステムに閉じ込めることにより、システム外に排出する長半減期同位体を少なくできるため、廃棄物減容、有害度低減に大きな効果を持つ。一般論としては、軽水炉使用済燃料の直接処分に比べ、高レベル放射性廃棄物発生量は、軽水炉再処理を行うケースで、約22%に、高速炉リサイクルを行うケースで約15%に低減する(図12参照)。

表1 乾式サイクル施設の建設コスト比較

項目		本検討	FS研究*1	電中研報告*2	ANLレポート*3
処理能力(t/y)		30tHM/y (LWR炉心デブリ65t/y, MCCIデブリ110t/y)	38tHM/y (FBR使用済み燃料)	40tHM/y (FBR使用済み燃料)	100tHM/y (LWR使用済み燃料)
製造能力(t/y)		0.72tHM/y 回収・貯蔵U:約30t/y (合計約260t)	38tHM/y	40tHM/y	-(記載無)
建設費	再処理	下記参照	1340億円	1342億円	約450億円 (\$450,273k, 100円/\$換算)
	燃料製造		629億円	560億円	
	合計		1969億円	1902億円	

当施設の建設費は数百億円程度にできる可能性がある。但し、今後の詳細評価が必要。

- デブリ処理施設（LWR燃料）では対象物の放射能や崩壊熱は大幅に少ないため、LWR再処理施設コスト（ANL）に近い可能性あり
- 今回の施設物量評価では小規模新燃料施設の合理化検討は実施していない
- 処理期間を長くし、施設規模を小さくすることで、建設コストを低減する案も考えられる。

*1: 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズII-(2)燃料サイクルシステム、JAEA-Research 2006-043
*2: 電力中央研究所報告、金属燃料乾式再処理プロセスのマスバランス評価とプラント概念設計、研究報告:L11009、平成24年7月
*3: Summary Report, Conceptual Design of a Pilot-Scale Pyroprocessing Facility, ANL/NE-Landmark-CRADA-12

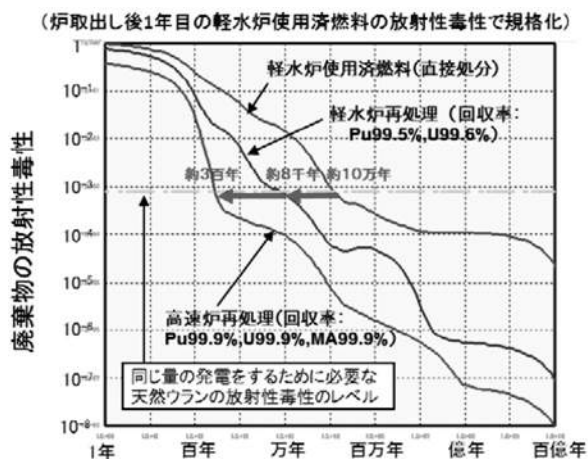


図13 放射性毒性の継続期間の短縮¹⁴⁾

原子炉からの取り出し1年後の軽水炉使用済燃料の放射性毒性で規格化した、軽水炉使用済燃料の全量直接処分ケース、軽水炉再処理ケース及び高速炉リサイクルケースでの廃棄物の相対的な放射性毒性の経時変化を図13に示す。軽水炉燃料の直接処分(使用済燃料そのもの)の場合、毒性が同じ量の発電に必要な天然ウラン量の毒性並に低減するまでに約10万年を要するのに比較して、軽水炉再処理後には約8,000年、高速炉リサイクルの場合には約300年とされる。

7. 経済性の概略検討

(1) 小型金属燃料高速炉の建設コストの概算

熱出力19万kWt(電気出力7万kWe)小型金属燃料高速炉の建設コストを概略評価するため、まず、プラント主要仕様を設定し、概略主系統図、原子炉構造概念図、

原子炉建屋配置概念図を作成し、この図面を基に既往研究の物量データ等を参考に概略の物量データを算出した。

この概略物量をもとに、JAEAの経済性評価コードを用いて建設費を概略評価した結果、建設費は約1,100億円、建設単価約160万円/kWeと概略評価された。但し、この数字は、設計検討の上算出した結果ではないため、大きな不確実性があると考えられる。

(2) 乾式リサイクルシステムの建設コストの概算

年間再処理容量約30tHM、年間燃料製造容量0.72tHMの乾式リサイクル施設の建設コストを概略評価するため、概略プロセスフロー、プロセス内の燃料物質収支を検討し、主要機器の処理容量から主要機器台数を概算し、主要セル容積、必要建屋規模(容積)を既往の研究例を参考に概略評価した。

表1に、これまでの乾式リサイクル施設の建設費の評価結果を参考として示す。本施設の建設費は、数百億円程度にできる可能性があるものの、再処理部分の不確かさは大きく、設計検討も実施していないことから、処理量が同等な他の設計研究での評価値も参考にしていく必要があると考えられ、今後の詳細評価が必要である。

III. まとめ：システムの実現に向けた主要なR&D課題

IFR概念の実用に向けた炉およびサイクルシステムの主要なR&D課題は下記のとおりにまとめられる。なお、これらのR&Dの実施に当たっては米国との研究協力が重要である。

1. 小型金属燃料炉の主な課題

ナトリウム冷却小型金属燃料炉の炉心設計の観点からは、炉心燃料の TRU 富化度を、照射実績等のある 25% 前後までとして、燃焼反応度の低減と冷却材反応度の低減を両立させた炉心設計、例えば燃料ピンの太径化や炉心サイズの大型化等、を行うことが技術的成立性を高める上で重要である。

システム設計と物量評価の観点では、プラント全体のシステム設計を行い、熱流動解析と構造健全性評価、原子炉容器直接冷却系等の崩壊熱除去系の性能評価、耐震成立性検討等を進めることが、技術的成立性や建設コスト評価を行う上で重要である。

また、安全性評価と試験研究に関して、小型金属燃料炉の安全上の特長や、既に得られている実験データを活用して、①原子炉緊急停止が失敗した時の事象(ATWS)等の設計基準を超える事象想定に対しても受動的な炉停止と炉心冷却が可能であること、②炉心損傷を仮定しても、その事象推移を緩和し、炉心燃料の集中化による再臨界の発生を回避できる方策と炉心損傷シナリオの構築とその妥当性を裏付ける追加的な炉内・炉外試験データの取得を進めていくことが許認可性を見通す上で必要である。

2. 乾式再処理システムの主な課題

乾式再処理システムについては、まず、通常燃料と異なる組成を有するデブリを処理するために、リチウム(Li)塩による電解還元・電解精製プロセスを対象に、下記の検討が必要である。

- ・還元された燃料成分と、生成する Li/Zr 複合酸化物との分離法の検討
- ・この複合酸化物が電解精製工程に持ち込まれた時の挙動把握と対処法の検討
- ・燃料デブリを対象とした還元挙動の把握
- ・コンクリートと反応した MCCI デブリの電解精製工程におけるシリコン、ジルコニウム、アルミニウム、鉄等の挙動把握と有力な前処理方法の検討
- ・燃料デブリが水に浸漬したことに伴う、吸湿性の高い Li 塩の取扱いの検討

Li 還元技術課題が大きいことが明らかになった場合には代替技術としてのカルシウム(Ca)還元について下記の検討を行うことが重要である。

- ・(電解)還元挙動の把握
- ・高温運転(約 850℃)における構造材料の健全性の検討

－ 参考文献 －

- 1) 文部科学省研究開発局, “高速増殖炉サイクルの研究開発方針について,” 2 11 2006. [オンライン]. Available: http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/toushin/06112004.htm.
- 2) T. Washiya, K. Yano, N. Kaji, S. Yamada, M. Kamiya, “Study on treatment scenarios for fuel debris removed from Fukushima Daiichi NPS,” Proceedings of ICONE23-1953, Chiba, Japan, 2015.
- 3) 東京電力ホームページ, 福島第一原子力発電所 1~3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第 1 回進捗報告より抜粋, 2013.
- 4) 内藤, “SAMPSON コードによる事故事象進展の解析,” 日本原子力学会秋の大会福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション, 2015.
- 5) 日本原子力研究開発機構, “東京電力福島第一原子力発電所における燃料デブリ特性把握・処置技術開発平成 24 年度研究開発成果報告書,” JAEA-Review, 2013-066, 2013.
- 6) 鷲谷, “デブリの化学的特性と各種再処理技術の適用可能性検討・デブリ特性の把握と処理方策の検討,” 日本原子力学会「2012 年春の年会」企画セッション「次世代再処理技術」研究専門委員会報告「次世代再処理技術から見たデブリ処理の技術的課題」, 2012.
- 7) 鷲谷, “IRID における福島第一原子力発電所廃炉に関わる技術開発”(3) デブリ性状把握に係る技術開発,” 日本原子力学会「2014 年秋の大会」総合講演・報告 3, 2014.
- 8) 鷲谷, 荻野, 鍛冶, 宮本, 川野, “燃料デブリの性状把握,” 日本原子力学会「2015 年秋の大会」福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション B-3, 2015.
- 9) 西原, 岩元, 須山, “福島第一原子力発電所の燃料組成評価,” JAEA-Data/Code 2012-018, 2012.
- 10) B. Triplett, et al., “PRISM: A competitive small modular sodium-cooled reactor,” Nucl. Technol., 第 178 巻, 2012.
- 11) W. H. Hunnum, D. C. Wade, H. F. McFarlane, R. N. Hill, “Nonproliferation and safeguards aspects of the IFR,” Prog. Nucl. Energy, 第 31 巻, 1/2, pp. 203-217, 1997.
- 12) C. E. Till and Y. I. Chang, “Plentiful Energy: The Story of Integral Fast Reactor,” CreateSpace, 2011.
- 13) J. D. Gabor, et al., “Breakup and Quench of Molten Metal Fuel in Sodium,” Proc. of Int. Topical Mtg. on Next Generation Power Reactors, Seattle, pp838-843, 1988.
- 14) 青砥, “高速炉の役割と「もんじゅ」への取り組み”, 国際シンポジウム「放射性廃棄物低減に向けた現状と将来の展望～ゼロリリースを目指して～」平成 26 年 10 月 9 日.

著者紹介



田中伸男 (たなか・のぶお)
公益財団法人笹川平和財団会長
元国際エネルギー機関(IEA)事務局長
(専門分野)エネルギー安全保障

From Abroad

Scientific Wanderlust Across The Ocean —海の向こうの研究放浪記, アメリカ国立研究所編—

ロスアラモス国立研究所/東京工業大学 河野 俊彦

アメリカで研究活動を続けてきた日本人の一人として、日本と異なる生活や研究活動の様子を紹介する。海外研究機関への就職から、ビザ、赴任、仕事や生活、英語の問題など、とりとめない話題を綴っていく。本稿は海外就職ガイドではなく、小さな車窓である。列車の窓に流れるちょっとばかり風変わりな景色が、ふと次の駅で降りて電車を乗り換えてみようという好奇心を芽生えさせるかもしれない。個人の体験の枠内ながらも、普段は垣間見ることもない車窓からの風景を映し出せればと思う。

KEYWORDS: *research abroad, application for jobs abroad, work as a foreign national, technical discussion in English, Life in Los Alamos*

I. はじめに

海外生活経験のある日本人研究者は、今ではさほど珍しくはないし、そもそも海外留学で箔が付く時代でもない。とは言え博士研究員あるいは訪問研究員として数ヶ月から数年を海外で過ごすケースが主流であることは変わらず、実際に海外の研究教育機関に長期間雇用される人はさほど多くはない。筆者は縁あってその少数派としてアメリカ生活を10年以上続け、現在は東京工業大学の海外研究者招聘プログラムの一環で日本に短期間帰国している。ドイツ語由来の言葉 Wanderlust、つまり放浪癖・旅行熱がそのまま仕事に結びつき、道祖神のまねきにあひて、取もの手につかぬ生活をしている。

かつて異邦人目線での生活の違いを綴ったこともあるが、今回の日本滞在で自分の浦島度の高さを実感しており(左右確認せずに道路を渡ったり、印鑑を上下逆さまに捺いたり、300円の支払いにクレジットカードを出したり)、それはそれで少々違った視点から海外の日々を書けそうである。生活の便利さと治安に於いて世界最高水準を誇る日本を去るのはそれなりにハードルが高いが、その先にある異国の研究生活がどのようなものかを Los Alamos National Laboratory (LANL) の職員として働く自分の体験範囲内で紹介したいと思う。当然ではあるが本稿の内容は LANL 並びに東工大とは全く何も関

Scientific Wanderlust Across The Ocean: National Laboratory in the United States: Toshihiko Kawano.

(2017年3月10日 受理)



写真1 Fuller Lodge, Los Alamos

係ない。言っておかないと気持ち悪いので、念の為に一筆書き添えておく。

II. 海外に出ること

1. アメリカ研究機関への就職

国外に就職先を求める一般的な方法は、公募である。海外からも引く手数多という優秀な人物は、はっきり言って極少数である。コミュニケーションや慣習の違いによる仕事効率上の不利益を補えるだけの利点が無ければ、外国人を採用するリスクを取ることは少ない。応募する際にプラス材料になるのは、日本国内での肩書ではなく、業績と推薦書、それに職務内容の需要と供給の関係となる。

それなりに名の知れた職場であれば世界中からの応募があるので、競争率は極めて高い。まず応募書類選考があり、short listに残った数名を面接する。日本の会社面接のようにずらりと並んだ人事の前に一人座らせられる一発勝負型(テレビドラマに基づく筆者のイメージ)では無く、少人数で比較的長く話し合うスタイルが多い。朝から夕方まで30分刻みでグループ全員と対話することもある。それに加えて1時間ほどのセミナーを行う。最近ではInternetを使ったセミナーも行うが、やはり最終的には面談によってその人となり評価することが多い。

応募書類には履歴書(CV, Curriculum Vitae)と数通の推薦書が含まれる。一般に日本人が書く推薦書は「推薦してない」場合が多い。日本の謙虚さなのか、あるいは応募者自ら作成した下書きに推薦者がサインしただけなのか、淡々と業績を羅列したものがしばしば見受けられるが、1の事を10に誇張するアメリカの推薦書が溢れる中では弱く見える。もちろんそういう国民性が選考時に考慮されることもあるが、やはり強い推薦文章が書かれているほうが応募者にとってはプラスである。

全てが首尾よく進めば、応募先から offer letter が届く。年俸などが記載され、それにOKのサインをすれば晴れて海外就職となる。年俸は公募時にある程度の範囲が提示されているが、実際に幾らになるかは経歴等を考慮して人事が決定するようである。ちなみに年俸は年末の業績査定で変化する。毎年数%の昇給があるが、業績不振による給与カットも一応可能らしい。

2. アメリカへ引っ越し

上限はあるが、海外引っ越しの費用は職場が支払ってくれる。私の場合、まず指定の米国内業者に連絡すると、そこから日本国内の代理店へ連絡が入り、後は見積もりから通関手続きまで全て業者任せとなった。米軍基地がある関係か、佐世保の運送業者が福岡まで引っ越し作業をしに来た。

貴重品や重要書類等は全て手荷物、渡米後すぐに必要な衣類等は予め航空便で送っておき、その他は船便と分ける。船便は一月以上かかるので最初の一ヶ月はかなり質素な生活を余儀なくされるが、それにも増して厄介な問題が目白押しとなる。Social Security Numberの取得、住居、銀行口座、クレジットカード、運転免許証、車の購入、子供の学校等など。加えて、住所の証明が無ければ免許が取れない、みたいな順序問題もある。これらを書き始めたら留学手引書一冊になってしまうので割愛するが、普通に生活できるようになるのは船便が到着する頃である。

今回の日本滞在では、着任初日に手渡された事務書類に溜息をつきつつ印鑑を捺した。当時アメリカでも保険や年金の書類にサインしたが、ここまで多くは無かった



写真2 Ashley pond, Los Alamos

と記憶する。ただ選択肢が多く、さらに見慣れない英単語が次々に現れる面倒から、取り敢えず一番普通なのを友人に教えてもらって選んだ。よく分からないところがあれば、空欄にしておけば後で何とかなるということも学んだ。日本に比べて事務書類の厳格さが一般に緩いのは、専門職の役割分担がはっきりしていることと、無駄な仕事は増やさないアメリカ流儀のおかげだと思う。

III. 仕事の環境

1. 外国人として働く

LANLについてはWikipedia等で紹介されているので割愛するが、New Mexicoの広大な敷地と一万人規模の職員を擁する国立研究機関である。意外に思われるかもしれないが、自分を含めてかなりの数の外国人が正規職員として働いている。海外の研究者が就職するとき、まずH-1Bと呼ばれる就労ビザが発行され、そこから俗にグリーンカードと呼ばれる永住権を取得することになる。永住とは言いグリーンカードは10年毎に更新する必要がある。多くの人はその10年の間に市民権を申請して米国籍となるが、自分の仕事の場合は米国籍は取り立てて必須では無い(と思っている)ので、まだ日本国籍を残している。もし仕事上でエネルギー省の機密情報へのアクセスが必要な場合は、米国籍を取得した上で、さらにQ Clearanceと呼ばれる資格が必要となる。

米国籍が必須ではないとは言え、米国籍研究者と仕事上同等ではなく、立ち入りできるエリアは制限されている。また予算関連のシステムにアクセスできないので、自分の研究費であってもその残高を直接見ることができない。しかし同僚の肩越しに間接的には見るできるので、何のための制限なのかよく分からないのも事実。その他日本国籍のままでは不便なのは、政府関連施設や他の国立研究所へ出張する際に毎回外国人入所手続きを取らねばならないこと、微妙な情報が関係する予算申請が困難なこと、(あと何があったっけ)。しかしながら給与等待遇上の差は全く無いので、米国籍が無くても困



写真3 Bethe House on Bathtub Row

らないというのが正直な所である。

多重国籍を許す国の出身者にとって、米国民となるハードルは低い。一方日本は二重国籍を認めないので、米国籍を取れば日本の国籍を手放さなければならない。変な話であるが、日本国籍を保持する利点は海外出張時の便利さにある。日本帰国時はもちろん日本国民として入国審査を通過できる。アメリカに戻るときも、永住権保持者としてアメリカ市民と同等の手続きで終わる。また日本のパスポートがあればビザが免除される国も多い。これほど便利なパスポートはあまり無い。

2. 毎日の暮らしから

ポストクや学生を除き、基本的に研究者には個室が用意される。また全ての事務手続きが電子化されているため、赴任直後に専用のコンピュータが支給され、1日の多くの時間をその画面と対峙することに費やす。実際、事務書類を印刷するのは直筆のサインが必要な場合程度で、プリンターが日々吐き出しているのは論文類ばかりである。未だに全ての電子メールを一旦印刷して読む方も稀におられるが、これは万国共通。

オフィス在室中はドアを開けたままにしていることが多い。共同研究者のみならず、異分野研究者が道場破り議論で乗り込んでくるのは日常茶飯事である。逆に閉まったドアが不在を意味するとは限らない。他人に聞かれては困る微妙な会話が進行中であったり、あるいは入室を許したが最後、数時間の拘束を余儀なくされる訪問者が接近中とか。夕方6時過ぎても帰ろうとしない訪問者に「バスの時間があるから」とやんわり会話切り上げを伝えたとき、「車で家まで送っていくから心配するな」と言われたときの絶望は筆舌に尽くし難い。

当然ながら英語中心の生活なので、海外とのやり取りの障壁は時差だけである。アメリカが朝ならヨーロッパは夕方、なんとかコミュニケーションが取れる時間帯となるので、午前中に欧州の研究者とのメールが行き交うことがよくある。また自分がオフィスに到着する時間を

見計らって国際電話をかけてくる輩もいる。時差を気にしなければ、合衆国内の誰かと情報交換している状況と全く変わらない。一方、アメリカで日が沈む頃に東洋に日出ずるため、夕方から日本語通信が始まるが、メールに対する意識が少々手紙的なせい、さほど活発さはないように思う。何年もご無沙汰している方のメールの「いつもお世話になっております」の文面に違和感を覚えるのは、あまりにぶっきら棒な英語メールに慣れたせいだけでもあるまい。

お互いをファーストネームで呼び合うのに慣れるまでは、やや時間を要した。年上の大学教授や職場の部長をBob だの John だの気軽に呼ぶのは、日本人の儒教的精神構造に著しく反する行為である。それはさておき、私の下の名前は4音節あり、西洋人は発音しにくいらしい。初対面の相手でも自己紹介したら即ファーストネームで呼び合うお国柄、何とか下の名を発音しようとするものの、何度も私に訂正された挙句、何かもっと簡単なニックネームは無いのかと聞かれる。私の場合だとToshi あたりが呼びやすいようだが(そう呼ばれたことは無い)、そこは妥協せず正式名で無理矢理呼ばせるのが密かな楽しみとなっている。Hが2つあるせいか、特にフランス人にとって苦手な名前のように、かなり楽しませて貰った。とは言え負けず嫌いな相手である。発音を特訓してくるので、しばらくすると完璧な呼び方を習得する。その上、フランス語の面倒な固有名詞を私が言う時、事細かに発音を訂正してくるリベンジもあった。

3. 旅する日々

広大な国土を持つアメリカ、日本のような日帰り出張はまず無い。New Mexico から東海岸へ出張する場合、フライト時間の合計が5時間、さらに国内の時差で2時間を失うので、到着するだけで1日が終わる。もっとも帰りは2時間得をするので、Washington D.C. での午前中だけの会議であれば、午後の便でなんとか帰ってくることは可能である。

でもそれは航空機のトラブルが無ければの話。特に冬は雪でフライトが遅れたり、最悪の場合は飛ばないこともある。乗務員の連続勤務時間超過で、途中の空港に着陸して乗務員が交代したこともある。航空機そのもののトラブルも何度か遭遇した。そんな書き尽くせない経験上、乗り継ぎ時間はたっぷり取るようにしているが、それでも乗り継ぎ便に置いてけぼりを喰らって途方に暮れることは避けられない。そんな厳しい旅路、一度の出張でなるだけ多くの仕事を済ませようとするせいか、滞在も長くなりがちである。一週間のホテル暮らしと、必ず一度は遭遇する置いてけぼりを乗り切る精神力と旅慣れが研究者には必要となる。

海外出張も度々あるので、いかに効率よく海外の都市



写真4 Varenna, Lake Como, Italy

を結ぶかは研究に次いで要求される技能でもある。ヨーロッパの中規模都市へ飛ぶとき、どこか大きなハブ空港を經由して Schengen 協定側に入る。Amsterdam Schiphol, Paris Charles-de-Gaulle, Frankfurt am Main, どこを選ぶかは好みの問題だが、空港内の移動エネルギーを最小に抑えるコストは支払うべきである。嘗て Paris の乗り継ぎとターミナル移動は悪名高かったが、今では(通路さえ間違えなければ)便利になっている。航空会社のマイル会員には絶対になっておくべきである。それなりに高いステータスになれば、出入国審査の長蛇の列を避けるべく Express Lane へのご案内される。マイルを使って往路フライトをビジネスクラスへアップグレードできれば(往々にして空席待ちになるが)、会議初日の疲れ具合が格段に違う。日本では出張時のマイルを個人で貯めるのを禁じている所が多いようであるが、これは不公平なご褒美と言うよりも投機的慰労だと思う。

4. 国際会議

メールで海外の研究者と瞬時に通信できる時代とは言え、画面の文字よりも実際の人との交流が研究活動には欠かせない。そのため、参加者 50~100 名程度の国際ワークショップを企画することがよくある。パラレルセッション無しで全員が講演できる中規模会議で、これ以上のサイズになるとお祭りの要素が強くなる。私が関与した会議も幾つかあるが(例えば参考資料 1-4)、会議主催の重要なポイントは実は開催地である。風光明媚な観光地であればちょっとした休暇気分で参加者も増える。東京や New York, Paris も魅力があるが、ホテルだと会場費が高騰するので、無料で貸してくれそうな大学・研究所関連の施設を探す。動機が不純でも結果が重要。

会議開催とは言え実際の会場との交渉や雑務は職場の専門のスタッフが行うので、プログラム作成と報文集の出版が主な作業となる。1 年ほど前から参加者を募り、送られてきたアブストラクトを元にプログラムを作成す

る。全く分野外だったり意味不明なものもあり、読むだけならそれなりに楽しいが、参加は丁重にお断りしている。旅費を全額負担して欲しいと堂々と書いてくる人も稀にいて、取り敢えず何でも言ってみるもんなんだなと感心する。そう言えば、空港でのチェックイン時に必ず「ビジネスクラスにしてくれ」と頼んでみる友人がいる。成功したことがあるらしい。

5. 研究費

日本の研究機関のシステムと大きく異るのは予算であろう。多くの研究者は PI (Principal Investigator) として予算申請し、それが通ればプロジェクトを主導する。研究代表者がいるとは言え、研究室ヒエラルキーを形成するわけではない。自分の持つプロジェクト予算から他グループの共同研究者へ予算を回すのは比較的自由であり、その配分も会計年度(10月から翌年9月)内で変わることがある。逆に PI 自身が他のプロジェクトの共同研究者に名を連ねることも普通である。

一般に研究者はお金の流れに関しては全くの素人であり、実際の経理は専属の budget analyst が行う。研究者が決めるのはプロジェクト参加者の給与、旅費や購入物品の大まかな割合程度で、予算・決算の正確な数字を出すのはプロの仕事であり、たとえ数学の学位を持っていると金に関しては科学者は信用されない。支払う給与にはさらに諸経費(overhead)が上乘せされるが、これは大雑把に見積もることができて年俸の約 2 倍である。年収 1000 万円の研究者であれば、予算は 3000 万円必要になる。アメリカでの研究費の額の大きさに驚く人が多いが、予算に給与が含まれているのが主な理由である。

国内・海外出張費も予算の重要な項目であり、私は毎年これに数百万円を割り振っている。多すぎるように見えるが、同僚の国際会議参加の負担と、出張費に給与と諸経費が含まれる。海外出張を減らして経費削減することもできなくはないが、やはり研究の効率的な遂行と促進には人との交流が欠かせないので、これは必要な投資と割り切っている。

翌年度への繰越金は、あまり極端で無ければ認められる。この繰越金が毎年の予算の揺らぎを吸収するバッファになっている面もある。かつて日本の職場で見たような、会計年度内に 1 円単位で使い切るような面倒なことは無い。ところで自分の予算で一度だけ 10 万円ほど赤字を出してしまったことがある。経理からその旨告げられたもののどうすれば良いのか分からずに事務員に相談すると、“oops, sorry” でいいわよとの返事であった。

プロジェクトの進捗状況報告は定例の会議として開かれるが、さほど多くはない。メールでは不便な相談が必要となるときに臨時の会議予定が入るが、多くの場合は少人数で集まって 30 分から 1 時間程度で解散する。合意を得るために集まると言うより、他の人の意見を聞く場と

して設ける場合が多い。特に意見が無ければ出席する必要は無く、会議中に無言であれば、当然ながら意見は無いものとみなされる。普段から会議嫌いの自分にとって、このスタイルは非常に楽である。進捗状況の報告事項がとくに無ければ、会議を欠席することもある。もっとも欠席を続けていけば、翌年度の予算に響くのは言わずもがなである。

6. 英会話

英会話と十把一絡げに言っても、実際には状況に応じて難易度は変わる。意外に思われるかもしれないが、基本的に最も容易なのは科学技術に関する議論である。専門用語が程良くブレンドされ、文章構造も基本的である。さらに海外の職場とは言え Native English 度はさほど高くない場合が多く、何だ分かるじゃん小さな自尊心が芽生える。同僚の訛った喋り方が感染してくるのも、基本的にはこの段階である。

次の段階は生活一般や事務手続きで、次第に「学校では習わない英語」が増えてくる。ホームセンターで壁紙は何処にあるかと店員さんに聞いたら「We don't care」と返され、一瞬「俺の知ったことかよ」と言われたのかと思って落ち込んだ。事務員が乱発する「らぬう」が LANL だと理解するのに 10 分間を要した。旅費精算用の Receipt をうっかりレセプトと読んでしまったのは、今となっては良い思い出である。とは言え基本的に対面方式での会話なので、意思疎通は図りやすい。

英会話ができると胸を張れるのは、電話英語を極めたときである。音声が悪い、相手の顔は見えない、相手の英語が訛っている、こちらの言うことが伝わらず何度も「Pardon? Sorry? Excuse me?」ネットで種々のサービスを受けられるようになったものの、基本的に電話苦行はまだ続く。病院や歯医者予約電話をかけた瞬間「はい、こちらは Dr. ○○の○○オフィス、何か御用?」まで一気にまくし立てられ、自分が誰に電話をかけたのかすら分からない。



写真 5 Oppenheimer and Groves

ところで英会話に慣れてくると、副詞 ABC 病に感染する段階が必ずある。会話中にリイ副詞、すなわち Actually, Basically, Certainly (Clearly), Definitely, Exactly が頻発する症状である。実際(actually)上の方の文章で「基本的に(basically)」を故意(deliberately)に乱発してみたが、これは本当に(certainly)煩わしい。

IV. おわりに

星野道夫氏の「旅をする木」という本をたまに読み返すことがあり、それが自分の放浪癖を焚き付けるようである。ヨーロッパの小さな町を歩いているとき、どうして自分はここに居るんだろうとふと考え、根無し草という言葉が頭を過る。嘗て早朝の福岡空港を立ち羽田発最終便で帰る日帰り出張を繰り返していた頃に沸き起こった感覚でもある。それが少しばかり遠くまで広がっただけなんだと思う。ただ日本国内とは少々異なる環境になっただけで。

海外研究所での研究生活、と言うよりそれを取り巻く日々をとりとめなく書き綴ってみたが、如何だっただろうか。このような体験記は全く一般性が無いので海外生活ガイドにはならないが、海の向こうの仕事風景を垣間見るつもりで読んで頂けたら幸甚である。

— 参考資料 —

- 1) 河野俊彦, 11th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, 核データニュース, No. 85, p. 12, 日本原子力研究開発機構 (2006).
- 2) 河野俊彦, 岩元大樹, International Workshop on Compound Nuclear Reaction and Related Topics, 核データニュース, No. 89, p. 12, 日本原子力研究開発機構 (2008).
- 3) 加藤幾芳, 12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, 核データニュース, No. 94, p. 11, 日本原子力研究開発機構 (2009).
- 4) 岩田順敬, 13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, 核データニュース, No. 103, p. 12, 日本原子力学会核データ部会 (2012).

著者紹介



河野俊彦 (かわの・としひこ)

ロスアラモス国立研究所 理論部門
(専門分野/関心分野)核物理, 核反応理論,
核データ

日本の原子力における人材育成の現状と課題 フランスの原子力人材育成に学ぶ

日本原子力産業協会 藤原 健太郎

日本では2010年、組織横断的な原子力人材の育成活動をより効果的、効率的に展開するため、「原子力人材育成ネットワーク」を設置した。このネットワークは現在、74に及ぶ企業や大学等の原子力関連団体・企業から構成されており、これにより各組織間での施設や講師、教育プログラム等の情報共有が容易になった。一方でフランスでは、政府主導のもと一元的な人材育成活動が展開されている。日本はフランスなどの海外事例にも学びながら、より戦略的な原子力人材育成を進める必要性に迫られている。

KEYWORDS: Human Resource Development, Education and Training, Network, France

I. はじめに

原子力人材の育成活動の促進および各組織間での情報共有を目的として、日本の産官学の関係企業・機関の相互協力に基づいた「原子力人材育成ネットワーク (JN-HRD ネットワーク)」が2010年11月に設立された。

しかしながら、東日本太平洋沖地震に伴い発生した福島第一原子力発電所の事故により、原子力エネルギーを巡る状況が一変し、その影響は今もなお継続している。原子力人材の育成・確保にとってもその影響は小さくなく、次世代を担う若者の原子力への関心の低下、現場実務経験の減少、大学の原子力教育環境の悪化等が顕在化している。

一方でフランスでは、政府主導により原子力教育情報のハブ機関である I2EN(フランス国際原子力学院)が2011年に設立された。また、原子力分野の人材に教育訓練を提供する INSTN(フランス原子力科学技術学院)がフランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)の傘下に設立されているなど、フランス政府のもと一元的な人材育成活動が展開されている。

ここでは、日本およびフランスの原子力人材育成に対

する取り組みを紹介するとともに、今後日本の原子力人材育成のあるべき姿について検討する。

II. 原子力人材育成ネットワーク

1. 概要

原子力人材育成ネットワークは日本政府の支援を得て、教育機関、電気事業者、メーカー、研究機関や行政機関など74にも及ぶ原子力関連団体・企業から構成されている(2017年3月現在)。その発足以来、参加機関の個々の人材育成活動の独立性を尊重してゆるやかな連携を保つこととし、お互いに情報交換を進めながら、効果的かつ効率的な人材育成の実施を目指してきた。図1に原子力人材育成ネットワークの参加機関を示す。

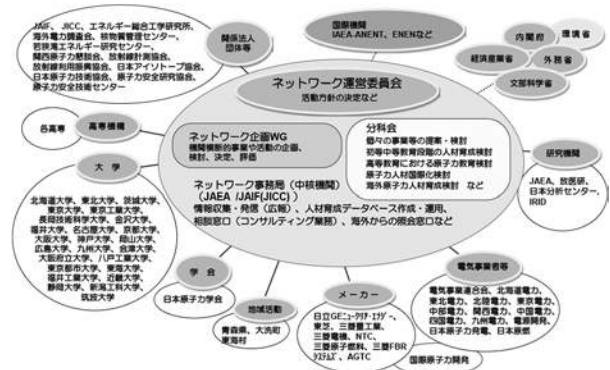


図1 ネットワーク参加機関

Current status and issues of human resource development in nuclear energy in Japan ; Comparison of nuclear human resource development between Japan and France : Kentaro Fujiwara.

(2017年3月28日 受理)

2. 運営体制

原子力人材育成ネットワークは現在、(国研)日本原子力研究開発機構(JAEA)、(一社)日本原子力産業協会(JAIF)、(一財)原子力国際協力センター(JICC)が共同でネットワーク事務局を運営している。

このネットワークでは原則として活動自体は各団体が個別に実施するが、ネットワークとして機関横断的な事業を実施することもある。なお、組織間の情報共有や連携などは分科会単位で実施する。ネットワークの運営体制を図2に示す。

①運営委員会

ネットワークの最終意思決定機関であり、活動の基本方針を決定する。

②企画ワーキンググループ

運営委員会での決定事項にもとづき、活動全体の企画、検討、評価を実施するほか、検討結果や実施結果を運営委員会に報告する。

③初等中等教育支援分科会

小学生・中学生・高校生を対象とした理科教育に関する情報提供、イベントの開催支援などを行う。また小中高の教員に対する原子力教育の推奨、原子力関連情報(原子力利用、安全性等)の提供を行う。

④高等教育分科会

大学生、大学院生及び高等専門学校生を対象とした原子力人材育成に関する情報提供、研修等の開催支援などを実施する。また、企業、学生間の交流の推進や求人・求職情報の調査を行う。

⑤実務段階の人材育成分科会

原子力産業界(電力会社、メーカーなど)の実務者を対象とした原子力人材育成に関する情報提供、研修等の開催支援などを行う。

⑥国内人材の国際化分科会

原子力に携わる国内の人材を対象に、国際的に活躍するための人材育成活動を実施・支援する。

⑦海外人材育成分科会

原子力に携わる海外の人材を対象に、日本の保有する技術や知識を普及するための人材育成活動を実施・支援

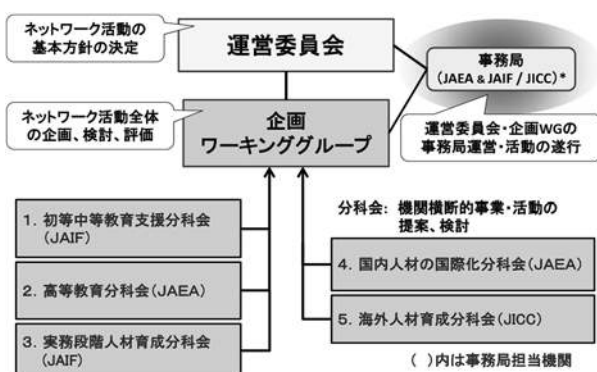


図2 ネットワークの運営体制

する。また、相手国との将来的なパートナーシップを強化することを目的とする。

3. 人材育成ロードマップ

原子力人材育成ネットワークでは戦略検討会議を設置し、2014年より人材の育成・確保を戦略的に推進するための方策について議論を続け、人材育成・確保の諸課題について産官学の役割・責任分担を整理し、今後10年の時間軸を入れたロードマップを展開するに至った。ロードマップの育成対象は教育段階、若手、中堅、海外人材の4区分としている。

また、原子力人材育成ネットワークが2015年4月に取りまとめた「原子力人材育成の課題と今後の対応—原子力人材育成ロードマップの提案—」の中において、特に国をあげて戦略的に取り組むべき3つの重要事項を下記のようにまとめた。

- (1) 研究炉等大型教育・研究施設の維持
- (2) 海外原子力人材育成の戦略的推進
- (3) 戦略的原子力人材育成のための司令塔の設立検討

「(1)研究炉等大型教育・研究施設の維持」では、研究炉等の維持管理に多大の労力と費用を要し、大学単独での維持管理が難しくなってきたことや福島第一原子力発電所の事故により、国内の研究炉が全て停止し、大学の原子力基礎基盤教育に支障をきたしていることが指摘されている。このため日本が保有する研究炉等的大型教育・研究施設の今後のあり方の検討、維持管理方法の見直しおよび更新等について国の支援策の検討が必要であることが提言された。

次に「(2)海外原子力人材育成の戦略的推進」では、福島第一原子力発電所事故後にも発展途上国を中心に多くの国々が、エネルギーの安定供給と地球環境問題への対応の観点から、原子力発電の導入を計画していることが背景にある。これらの国々の日本に対する原子力技術の評価ならびに原子力人材育成面での期待は依然高い。日本はこれら海外の要請に応えるとともに国際展開の本格化に向けて競合する他国に負けまい、海外向け人材の育成活動に積極的に取り組む必要がある。

そして特に今回重点を置きたい項目は「(3)戦略的原子力人材育成のための司令塔の設立検討」である。これは、福島第一原発事故の反省を踏まえた人材育成ならびに国際連携の進展に伴い、ネットワーク事務局に従来求められた以上の役割や機能が要求されるようになってきていることに端を発している。このためネットワーク事務局機能を強化し、国内外の原子力人材育成に係る日本の活動を俯瞰して全体調整を図り、さらには国際標準となりうる人材育成プログラムを確立すること等により原子力人材育成を戦略的に推進する司令塔となる中核的な組織を設立する必要性に迫られている。

4. ネットワークの活動事例

(1)原子力人材育成データベースの構築

原子力人材育成ネットワークでは、参加機関からの人材育成に関わる情報(教育訓練プログラム、施設、講師等)を収集し、データベースとして登録している。データベースの目的は日本の原子力人材育成に係る現状を正確に把握し、新たな教育・訓練プログラムの作成において協力関係を支援することである。データベースのURLは下記であり、誰でもアクセス可能である。

http://jn-hrd-n.jaea.go.jp/database/db_top.php

(2) Japan-IAEA joint 原子力エネルギーマネジメントスクール

若い世代に国際的な教育の場を経験してもらうこと、および各国の原子力エネルギー計画を管理するためのリーダーを育成することを目的として、2010年に初めてイタリア・トリエステで原子力エネルギーマネジメントスクールが開催された。その後は2012年にアラブ首長国連邦(アブダビ)と日本(東海村)、2013年にアメリカ(テキサス)と日本(東京と東海村)で開催されており、2014年には初めて日本主催として東京と東海村で開催した。その後も毎年、日本主催で本スクールを開催している。

本スクールの受講生は、原子力に関連した政府機関、研究機関、メーカー、電力会社からの40歳以下の若手専門家であり、国内外から参加している。表1に日本での開催開始時からの年度ごとのスクール参加者数を示す。

このスクールでは講義、グループワーク、テクニカルツアーが3週間にわたって実施される。講義は日本、IAEA、中国や韓国などからの有名・著名な専門家が実施し、これにはエネルギー戦略、核不拡散、国際法、経済、環境問題などが含まれている。グループワークでは原子力や環境問題について議論し、テクニカルツアーでは日本のメーカーの工場や原子力発電所、政府研究機関などを訪問する。

全体のプログラムの終了後には、40問程度の最終試験とキーワード理解度自己評価が実施される。キーワード理解度自己評価とは講義に関連するキーワードを抽出し、プログラム開始時と終了後にどの程度知っているかを調査することで学習効果を測定する手法である。キーワードには、Milestone approach, API1000, PRA, Safety goalsなどが挙げられる。

自己評価を実施した結果、図3で示されるように受講者が講義の重要項目を理解したという実感を得たことが確認された。

表1 日本開催におけるスクール参加者数の推移

	2012	2013	2014	2015	2016	合計
合計	39	33	32	35	32	171
海外	21	17	21	19	17	95
日本	18	16	11	16	15	76

(平均値) 受講前: 1.41 → 受講後: 2.05

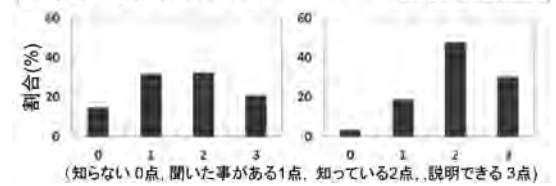


図3 受講者のキーワード理解度自己評価(2016年度)

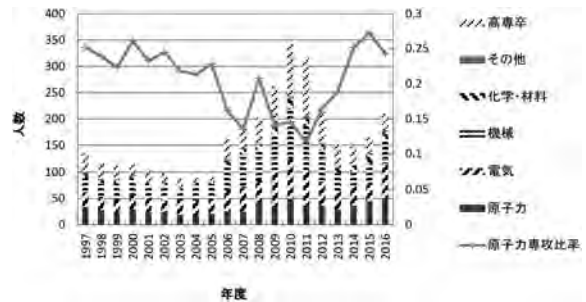


図4 電気事業者の原子力部門における各年度の採用状況(2016年6月)

(3)原子力産業界における採用状況調査

原子力人材育成ネットワークでは、原子力企業における人材育成・確保の現状を把握し、産官学における人材育成促進策を検討するための参考とするため、毎年の原子力関連企業・機関の採用状況を調査している。

例として電気事業者の原子力部門への配属状況を図4に示す。調査対象は北海道電力、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電、電源開発の電気事業者11社であり、2016年度は6月時点の原子力部門配属数(配属予定数を含む)を計上している。

図4が示すとおり、東北地方太平洋沖地震から減少傾向ではあったが、原子力分野の学生の採用数はほぼ横ばいのため、原子力専攻比率は増加している。なお近年は採用数にやや増加傾向が見られる。

Ⅲ. フランスの原子力人材育成

日本と異なり、フランスは政府主導のもと、戦略的な原子力人材の育成を進めている。その例を下記に述べる。

1. I2EN(フランス国際原子力学院)

I2EN(International Institute Of Nuclear Energy: フランス国際原子力学院)とは、現在のフランスにおける教育・訓練プログラムの評価・認定、海外向けに一元的な教育・訓練プログラムを提案するなどの役割を担う、フランス国内の原子力教育情報のハブ機関である。

フランスの前サルコジ政権は、国内で原子力産業に携わる人材の大規模な世代交代を見据え、また同国の原子力産業の海外進出の支援等のために多くの人材を雇出す

る必要性から、2008年10月に主に技術者ポストへの採用を想定し修士号レベルの人材育成を拡充するという方針を示した。さらにその後、原子力教育の国際協力に注力する方針が掲げられ、2010年3月の「民間の原子力利用へのアクセスに関する国際会議」において、サルコジ前大統領が「欧州最大規模の(教育・訓練の)キャンパス」を開設する意向を示したことを受けて、2011年にI2ENが設立された。

I2ENの運営は、15のパートナー機関による拠出金で賄われており、パートナー機関は下記の通りである。

- 5つの政府機関(外務・国際開発省、国防省、経済・生産再生・デジタル省、国民教育・高等教育・研究省、エコロジー・持続可能開発・エネルギー省)
- 2つの教育代表機関(大学および職業訓練校)
- 4つの公的研究機関(ANDRA(放射性廃棄物管理機構)、CEA(フランス原子力・代替エネルギー庁)、CNRS(フランス国立科学研究センター)、IRSN(放射線防護・原子力安全研究所))
- 3つの企業(AREVA(アレバ社)、EDF(フランス電力会社)、ENGIE(エンジー社))
- GINN(約400社からなる下請事業者連盟)

またI2ENは高校、大学、原子力訓練施設などの27のアソシエート(協力)機関と連携を結んでいる。アソシエート機関には拠出金負担の義務はない。(図5参照)

I2ENはパートナー機関からなる理事会を有しており、1月と6月の年に2回で会合が開催される。議長は政府原子力部門の高等弁務官が務め、各パートナー機関から代表者が委員として参加する。委員の任期は原則3年間であり、任期継続は1回まで認められる。理事会では年次活動計画と予算の策定、前年度の年次報告と財務報告の承認、海外に関する活動と措置の決定、規則の承認、パートナー機関やアソシエート機関の加入、除籍の決定などの役割を有している。

また毎年9月に、パートナー機関とその他のアソシエート機関の代表者が集合して、現在および将来の活動方針や方向性などについて議論する総会が開催される。総会はフランスの原子力やエネルギーに対する教育・訓



図5 I2ENのパートナー機関とアソシエート機関

支援の範囲	知識の共有	対象例
人材能力開発	40+ 1970年代より、40年以上も同盟国との人材能力開発の指導と協力が成功	
教育訓練(全タイプ)	55+ 55以上の世界でトップクラスの大学との連携。共同訓練施設の設置。	
原子力発電所の運転	850+ 過去30年間に訓練された外国人運転員の訓練生は850人以上	
	346 435の原子炉のうち、346の原子炉(世界の約80%)へ製品とサービスを提供	
現地化	100% (up to) 研究分野の支援を含めた能力確立と技術伝承を通じた現地の原子力産業の持続可能な開発の可能性—原子力発電と燃料サイクルまで—	

図6 フランスの原子力人材育成の取組み

練のシンクタンクとなっている。

一方で、I2ENは国内外の専門家からなる専門委員会を設置している。専門委員会は原子力教育・訓練プログラムを評価して認証を与え、毎年高等弁務官へ報告書を提出している。専門委員会のメンバーは政府原子力部門の高等弁務官が産官学の関係機関から選出し、理事会が承認する。選出された専門家は6年間、専門委員会へ出席する必要がある。任期の継続は1回である。

I2ENの事務局はパートナー機関からの出向職員5名(AREVA, EDF, CEA)、大学からの派遣職員(就業時間は全体の10-20%程度)1名の計6名で運営されている。職員は理事会で決定した事業計画を実施していくほか、総会や理事会、専門委員会を運営している。

I2ENの資金はパートナー機関の拠出金であり、年間予算は約100万€(約1.2億円:1€=120円相当、以下同じ)である。これは職員給与、教育・訓練プロジェクトの運営、海外事業などの資金に充てられる。

図6にフランスの原子力人材育成に対する取組みを示す。フランスではI2ENを中核的な組織として、積極的な海外展開を進めていることが分かる。

2. INSTN(フランス国立原子力科学技術学院)

INSTN (Institut national des sciences et techniques nucléaires: フランス国立原子力科学技術学院)は、フランスが原子力開発に乗り出した1956年に、原子力・代替エネルギー庁(CEA)の傘下に設立された唯一の原子力専門大学院である。フランス国内外に向けて一元的な原子力専門の学位取得コースや教育訓練コースを提供しており、運転員、エンジニア、研究員などの人材育成に貢献している。INSTNは設立から60年にわたり、CEAと産業界によって開発してきた知識とノウハウを伝達することで、原子力産業の成長を支援し続けてきた。

教育の分野としては、原子力発電所の運転とメンテナンス、安全とセキュリティ、廃棄物処理と廃炉、放射線防護や放射線測定、核医学や放射線医療、ナノテクノロジーなどの原子力関連分野を網羅した上級教育の場所となっている。

INSTNはフランス内に計5ヶ所の施設(Saclay、

Cherbourg, Marcoule, Grenoble, Cadarache)を有しており、本部はフランス・パリ近郊のSaclayにある。5つの省(国民教育・高等教育・研究省, 財務・公会計省, エコロジー・持続可能開発・エネルギー省, 厚生省, 国防省)の監督下であり, CEA 研究所やその他の原子力産業界の専門家とも強く連携している。

INSTN は原子力工学学位(5ヶ月のインターンシップを含む)や医学物理学学位(2年間の病院実習を含む)などを授与できるほか, フランス国内の大学や欧州内の大学とのパートナーシップと連携して31の修士の学位を与えることができる。

INSTN はまた, 産業界に対する継続的な職業訓練として, 原子力発電所の運転, 核燃料サイクル, 原子力安全や同位体元素の使用, 放射線防護, 放射化学, 意思決定についての情報プログラムなどの訓練を提供しており, IAEA は2015年5月に原子力技術・産業, 放射性医薬品の分野の教育訓練における共同研究センターに指定した。

年間予算は約3,100万€(約37億円)であり, フランス政府からの資金によってそのほとんどが運営されている。事業年度は1月より開始される。

INSTN では5つのサイトに115名の内勤スタッフ(プログラム管理者含む)のほか, CEA の研究者やフランス国内外の教員, 産業界・医療分野・規制当局などの技術者や専門家約1,400人(CEA が約75%)が講師として登録されている。学位取得プログラムを受講している学生は毎年約1,100人(30%は海外から), 職業訓練コースに登録されている訓練生は毎年約6,400人である。訓練生にはCEA, EDF, AREVA の技術者だけでなく, 海外の原子力関連企業や薬品会社の社員, 学校教員なども含まれる。

INSTN の特徴的な活動として, ISIS 研究炉を利用した遠隔訓練が挙げられる。この研究炉は700kW の開放型プールの研究炉であり, 1年間で400人の訓練生を受け入れている。原子炉起動や臨界近接を経験できるほか, 中性子検出システムを設定できたり, 50~500kW の間で出力を調整して減速材温度効果を確認できたりする。さらにこの訓練は, インターネットを通じて実習状況を配信することが可能であり, 受講生は遠隔地にいながら研究炉実習に参加できる。施設内に設置されている

4つのカメラにより, 受講者は交通費などのコストをかけずに訓練に参加できるメリットがある。

またバーチャルリアリティ(VR)を利用した訓練の1つとして VERT (Virtual Environment Radiotherapy Training)がある。これは線形加速器を3次元に模擬したシステムで, 仮想的な患者に対して照射コースを試行し, 患者の被ばく線量を視覚的に把握できる。VERT は2014年から運用されており, 放射線医療分野の生徒や専門家の訓練に貢献してきた。

IV. まとめ

フランスの人材育成は「体系的・中央集権的・協力的」であり, 欧州委員会(European Commission: EC)や政府が主導的な役割を果たしている一方で, 日本では各々の企業・機関がそれぞれ人材育成活動を展開しているのが実情である。

原子力人材育成ネットワークの提言による「戦略的原子力人材育成のための司令塔設立の検討」に対応するためには, 原子力人材の育成について司令塔を担うフランスの I2EN がよい例になると思われる。組織の垣根を越えたより効果的・効率的な原子力人材の育成のため, さらに海外でも活躍できる人材を育成するためにも, 海外の良好事例に学びながら, 日本として一元的な戦略を練ることができる組織体制を構築していく必要があるだろう。

— 参考資料 —

- 1) エネルギー基本計画, 経済産業省資源エネルギー庁, 2014.
- 2) 原子力人材育成の課題と今後の対応—原子力人材育成ロードマップの提案—, 原子力人材育成ネットワーク, 2015.
- 3) FRENCH NUCLEAR EDUCATION AND TRAINING, International Institute Of Nuclear Energy, I2EN 2015.

著者紹介

藤原健太郎 (ふじわら・けんたろう)
日本原子力産業協会 人材育成部
(専門分野/関心分野)原子力発電所の
試験・試運転, 2015年より現職



人工知能技術による異常検知システムとその産業応用

産業技術総合研究所 村川 正宏

本稿では、人工知能技術に基づいて膨大なセンサデータから異常を自動検出するシステムについて説明する。センサが設置された環境での大量の正常データを機械学習することで、その学習した正常パターンからの逸脱として異常を検知できる。このシステムの産業応用として、音響・振動データからのインフラ診断や、病理画像検査等の医療画像診断支援への適用事例を紹介する。

KEYWORDS: *Artificial intelligence, Anomaly detection, Machine learning, Industrial application, Structural health monitoring, Medical image diagnosis*

I. はじめに

近年のセンサ技術、通信技術の進歩により、IoT (Internet of Things) とよばれるように、実世界の膨大なセンサデータが容易に取得できるようになってきた。例えば、監視カメラは比較的安価に設置できるようになり、多数のカメラがネットワーク接続され、時々刻々と映像が蓄積されている。またマイクはさらに安価であり、さまざまな機器に組み込み周囲の音響データを取得可能である。さらに、種々のセンサ類もスマートフォン等と組み合わせることで容易にデータを蓄積可能である。

これらのセンサデータは、クラウドサーバ上に蓄積されるのが一般的となっており遠隔地からもチェックすることができるが、すでに人手で確認するには不可能な量となっている。折角データを取得したものの、死蔵されている例も多く聞く。そこでこれらのデータに対して人工知能技術を使って異常を検知することができれば実用的な有用性は高い。取得したセンサデータにおいて何かおかしいことがおきている兆候を自動的に検知することで、人に気づきを与えることができる。その後は、監視員やユーザがその特定されたセンサに対して注意深く経過を観察したり、異常の原因を調査するフェーズに移行すればよい。

Anomaly detection system using artificial intelligence and its industrial applications : Masahiro Murakawa.

(2016年12月28日 受理)

本稿ではこのような人工知能技術を用いた異常検知システムの研究開発について、産業技術総合研究所(産総研)人工知能研究センターでの取り組みについて紹介する。以下Ⅱ章で、構築した異常検知システムの概要を説明したのち、Ⅲ章でそれを適用した具体的な応用事例について4例ほど紹介する。風力発電の状態監視、橋梁等の打音検査の高度化、病理画像診断支援、内視鏡画像診断支援である。これらの事例はそれぞれ異なる応用分野ではあるが、同じ異常検知の考え方を用いている。

Ⅱ. 機械学習による異常検知

1. 教師あり学習と教師なし学習

異常検知を人工知能で行う場合には、データから学ぶ統計的機械学習が用いられる。統計的機械学習にはさまざまな手法があるが¹⁾、一般には教師あり学習と呼ばれる、人間が与えた教師データ(正解ラベル付きデータ)を基にその統計的性質から判別器等の学習を行う。しかし異常検知という問題領域で特に考慮すべきは、得られる教師データの量である。つまり、異常な事例は稀にしか起こらないので、「異常」のラベル付きの教師データはなかなか集まらない。よって、センサデータからなにが異常であるかを機械学習しようにも、教師データが集まるまでなにもできないことになる。

この問題を回避するために、教師なし学習と呼ばれる学習手法を用いる。この手法では、人間が正解ラベルを与えることなく、得られたデータのすべてもしくは大部分が正常であるとの仮定のもと、機械学習を行う。正常

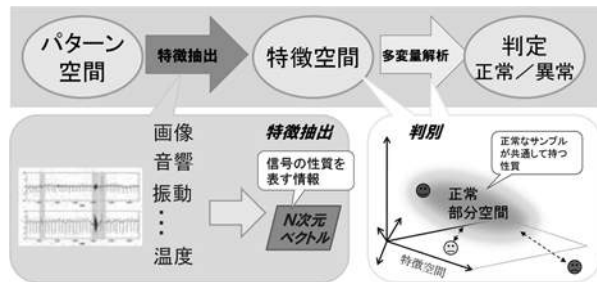


図1 適応学習型汎用認識システムによる異常検知

な事例は、センサを設置した場所で大量に得ることができるので、その統計的な性質から「正常」がなにであるかを機械学習すればよい。学習した正常パターンからの逸脱として異常が検出できる。この異常検知の枠組みに関しては、良い教科書²⁾があるので興味がある方はそちらを参照されたい。産総研においては、この「正常」を学習する枠組みに基づき、静止画、動画像、音響データなどに適用可能な汎用的な異常検知システムの研究開発を行っている。以下ではこのシステムについて説明する。

2. 適応学習型汎用認識システムによる異常検知

産総研では1980年代より、大津が中心となり適応学習型汎用認識システムの研究を行ってきた³⁾。この認識システムの基本的な考え方は、特徴抽出の理論的な要請に従い図1に示すように2段階の処理を行うことにある。1段目で汎用的な特徴量を抽出し、2段目で例示から適応学習し、問題に応じて最適な認識処理を行う。

まず1段目では、生のセンサデータから高次局所自己相関量(HLAC: Higher-order Local Auto-Correlation)と呼ぶ汎用的な特徴量を抽出する。一般的な相関量は2点関係をみるが、この特徴量は3点間の相関を調べる。対象が静止画の場合、 f を画素値としたときに、HLAC特徴量は、

$$x_n^f(a_1, \dots, a_N) = \int f(r)f(r+a_1) \cdots f(r+a_N)dr$$

で表せる。ここで静止画像内の参照点を $r \in R^2$ 、 N 個の局所変位 $a_i (i=1, \dots, N) \in R^2$ は画像内の二次元座標を成分として持つ二次元のベクトルとする。次数 N と局所変位 a の組み合わせはいくつも考えられるが、HLAC特徴では次数 N を2までとし、局所変位 a を 3×3 の局所領域に限定する。平行移動により等価となる組み合わせを除くと局所変位 a の全組み合わせは、図2に示すように0次は1個、1次は4個、2次は20個となり、抽出される特徴量は計25次元のベクトルとして表せる。

1段目の高次局所自己相関に基づく特徴抽出は静止画だけでなく、動画像への拡張(CHLAC)⁴⁾、音響信号への拡張(FLAC)⁵⁾などが行われており、さまざまなパターン信号への適用が可能である。対象が動画像の場合は、X-Y-T空間内で図2を立体に拡張した局所変位パター

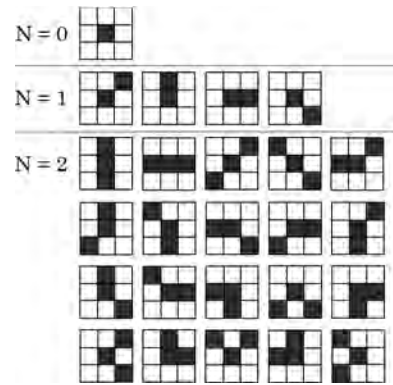


図2 高次局所自己相関の局所変位パターン

ンを数え上げることになるが、局所領域を静止画の場合と同様に限定すれば全ての組み合わせを考慮しても279次元(濃淡動画の場合)ですむ。相関を3点関係へと高次元化することで、例えば静止画では輪郭の局所直線方向に加えて曲率(凸凹)、動画像ならば速度から加速度へと、得られる特徴が詳細になっている。

2段目の処理では、1段目で抽出した特徴ベクトルに対して、適応学習的な処理である多変量解析手法を用いる。異常検知に適用する場合には、この2段目の処理に、主成分分析を用いて異常検知を行う。1段目で有効な特徴量を抽出したことで、2段目が線形処理でも実用的に十分な性能が得られることが多い。もちろん対象とする問題の複雑度によっては、非線形的手法を用いてもよい。

異常検知の基本的な考え方として、1段目で抽出された特徴量は全空間内のある限定された領域に集中して分布することになる(教師なし学習の「正常」パターンの仮定)。学習フェーズでは、主成分分析を用いる場合にはこれを部分空間法により近似してモデル化し、正常部分空間とよぶ。具体的には、得られたデータに対する特徴ベクトルの自己相関行列の固有値問題を解くことにより、正常部分空間を張る基底ベクトルを得る。

ひとたび正常部分空間が得られれば、実際の異常検知フェーズにおいては、検知対象の特徴ベクトルの正常部分空間からの逸脱度を異常検知指標とする。この逸脱度は、正常部分空間の直交補空間への射影成分に基づいて計算することができ、この逸脱度が閾値を超えたときに異常と判定することができる。

これら2段階の処理からなる異常検知システムは、対象に関する知識やモデルを一切必要としない点で汎用的である。また、個別の恣意的な論理判断を用いず多変量解析を用いて総合的に判断しており、情報のロスが少なく頑健な方式となっている。さらに、認識対象の切り出しなどの処理も不要であり、基本的に計算量が一定の積和演算主体のため、対象が動画像であっても組み込み用PCでもリアルタイム処理が可能という高速性も備えている。以下ではこのシステムの具体的な産業応用事例を

紹介する。

Ⅲ. 産業応用事例

本章では、筆者のグループで取り組んでいる異常検知システムのインフラ診断および医療診断支援への応用事例を述べる。インフラ診断においては、風力発電機の故障予兆検知や橋梁等の打音検査の高度化の研究開発を行っている。医療診断支援においては、病理診断や内視鏡検査の高度化を目指している。

1. 風力発電機の故障予兆検知

世界的に再生可能エネルギーの普及が進む中、国内でも「再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT)」が開始され、風力発電の導入拡大が期待されている。一方で、風車は内部の構成要素が多岐にわたり、専門的な知識と訓練が必要でメンテナンス作業が複雑な点、各種トラブルの発生頻度に対するメンテナンス作業の非効率性、故障要因のトラブルシューティングに多大な人的・時間的労力が必要とされるなど、風車運用に関する課題も多い。特に今後は洋上風力の導入拡大が見込まれることもあり、情報技術利活用による遠隔での風車の状態監視システム(CMS: Condition Monitoring System)に対する必要性が高まっている。

我々は、NEDO 事業「スマートメンテナンス技術研究開発(分析)」において、機械学習に基づくCMSの高度化を目指している。国内の複数の事業者にご協力いただき、全国27サイト、41基の風車にCMSを設置させていただき、そこで収集された振動データから異常検知を行っている。目標は、1~3ヶ月以上(部品に依り異なる)前に故障トラブルを検知することである。これにより、計画的な部品調達や機材手配が可能となり、故障による風車のダウンタイムを削減できる。

本課題における異常検知システム⁶⁾では、Ⅱ章で説明した1段階目の特徴量抽出には、FLAC特徴量に加え、従来のRMS値等の典型的な時間領域・周波数領域特徴量を組み合わせて用いる。2段階目の処理としては、混合ガウス分布モデルに基づき、正常状態のモデル化を行う。これは、風車においては正常稼働状態であっても運転条件によってデータが動的に変化するためであり、複数の正常状態をクラスタリングにより教師なし学習でモデル化する。

開発したシステムによる発電機入力部(約2,000回転/分)に対する異常検知結果例を図3に示す。2015年7月10日付近で逸脱度が正常状態モデル学習時の閾値を継続して超える結果を示しており、本システムにおける異常検知の起点とみなすことができる。実際に7月10日以降の振動データの精密エンベロープ解析によれば、軸受損傷周波数にピークが確認されており、本システムにおける異常検知の逸脱度としても損傷状態を検出できた

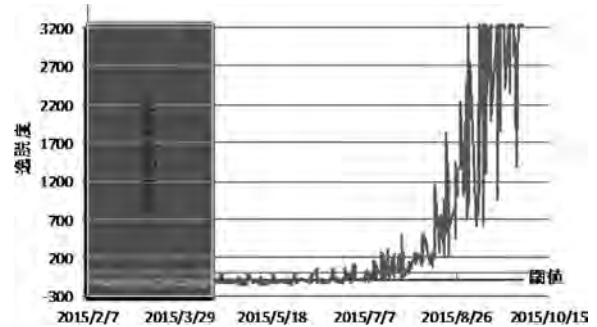


図3 発電機入力部での異常検知結果例

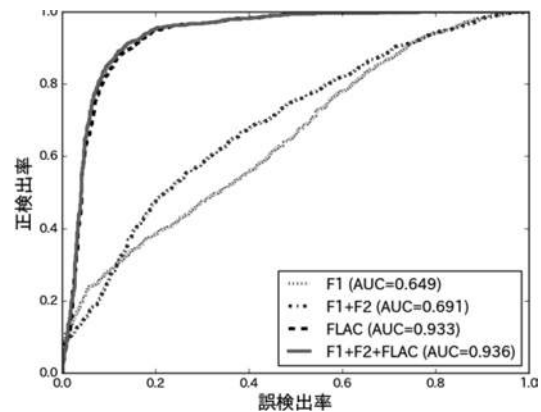


図4 主軸受での異常検知に対するROCカーブ(カーブが左上にいくほど検出性能が高い。F1: 従来の時間領域特徴量, F2: 従来の周波数領域特徴量, FLAC: 高次局所自己相関に基づく特徴量)

といえる。実際の現場メンテナンスにおいても8月~9月にかけて異常の兆候が確認されており、その後実際に軸受が交換されていることから、早期の異常予兆検知に成功している。

また、主軸受(約20回転/分)を対象とした異常検知にも成功している⁶⁾。主軸受のような低速回転機器では、振動実効値に損傷の兆候が明確には現れず、外乱要因としてのノイズの影響も大きいことから、異常検知は難しいとされている。しかし図4に示すように、本システムでは従来特徴量のみを用いる場合と比べて、大幅に検出率を向上できている。FLAC特徴抽出により、振動データ中の精密な周波数変化パターンを学習することが可能となったと考えられる。今後は、特に低速回転機器での検証事例がまだ2例に留まっていることから、さらに事例を積み重ねシステムの信頼性を評価する。

2. 橋梁等の打音検査の高度化

近年、社会インフラの老朽化が進み、第三者被害を防止する観点での維持管理方式が重要視されるようになった。そうした中で、国交省により橋梁等の総点検が打ち出され、2020年にかけてインフラの点検需要は急増する。しかしながら、熟練点検員の数は高齢化と労働人口の減少に伴いむしろ減少する傾向にあり、点検員の確保

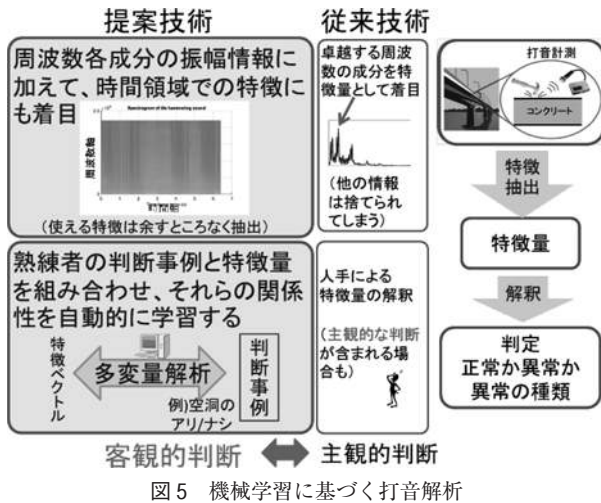


図5 機械学習に基づく打音解析

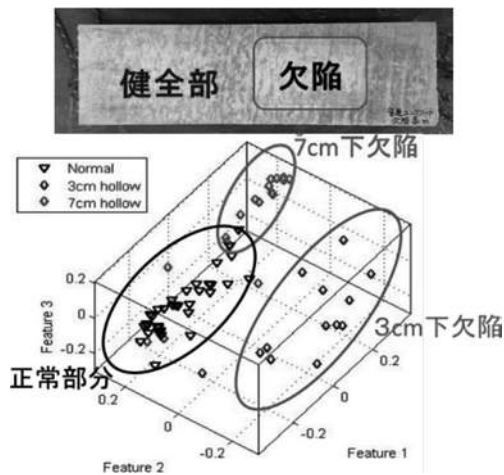


図6 コンクリート試験体での損傷検知例

が難しいケースも見られるようになってきている。この課題に対して我々は、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」で、学習型打音解析技術の研究開発を行っており、点検員の技術に左右されず正確に損傷の検出が可能な打音検査技術の開発を目的としている。

異常検知システムを用い、図5に示すようにハンマーなどによる打音のデジタル化とその収集、蓄積、分析による、構造物の欠陥自動検知を行う。打音解析手法については、まず教師無し学習により検査対象ごとに正常パターンを統計的に学習させる⁷⁾。橋梁などの土木構造物は、形状、材質、経年劣化など状態が様々であり、教師有り学習を行うためには、網羅的なデータ収集が必要となる。しかし本手法では教師なし学習により、さまざまな種類の欠陥のデータが集まらなくとも、まずは欠陥の有無を判断することができ、対象物や検査装置によらない汎用的な手法となる。次の段階として、この教師なし学習の判定結果に対して熟練者による教師ラベルをつけて蓄積し、蓄積した結果をもとに判別学習を行う(教師有り学習)。これにより、打音の微妙な差異を判別し、欠陥検出の精度を向上できるようになる。図6にコンク

リートの欠陥(空洞)を模擬した試験体を用いた実験結果例を示す。収集したハンマーによる打音の特徴量から、健全な部分に対し、表面から2cm下の欠陥、さらには、表面から7cm下の深い欠陥について明確に異常として検知することができた。

現在プロジェクトでは、本打音解析手法の有効性を実証するための打撃装置の開発と、高速道路管理会社と連携した実構造物での検証実験を行っている。異常検知結果に基づく欠陥マップなどの自動作成機能も備えることで、検査報告書の作成も含めたトータルな作業工数の削減を目指す。

3. 病理画像診断支援

近年、医療分野のIT化により、膨大な診療データが日々取得されているが、迅速な診断を要する病理検査や内視鏡検査などでは、蓄積データを十分に活かした診断を実現できていない。そこで我々は、蓄積された診断済みの画像データを機械学習することで、診断を支援する技術開発を医療機関等と連携して行っている。

病理検査の分野では、Whole Slide Imaging (WSI) 装置(病理ガラス標本をデジタル化する装置)の高性能化が進み多くの現場で導入されつつある。デジタル病理画像に基づく診断を効率的に行うため、病変と疑われる箇所を素早く自動検出し医師に提示する診断支援システムが必要とされている。

我々はII章で説明した考え方にに基づき、がん細胞・組織などの病変を検出する異常検知システムを研究開発している⁸⁾。従来手法では、がん組織とは画像上でどのような性質をもっているかを定義しようとしていたが、がん組織の特徴を網羅的に定義するのが難しかった。それに対して本手法では、がん組織の性質を事前に定義せずとも、正常なWSI画像を多く蓄積しその性質を学習することで、「正常ではないものが異常」という基準で病変として疑わしい部位を自動検出できる。

胃のWSIデータを対象に、26箇所の病変(がん)を含む14枚のWSIデータに本技術を適用する実験を行い、約96%(=25/26)の精度での異常検出に成功している。図7に本システムによる検出例を示した。本システムでは、同じ正常データであっても組織の違いによってその性質が異なることを利用し、まず組織を自動分類した後に、それぞれ個別に異常判定することにより精度向上を図っている。今後は、さらに事例数を収集し、判別が難しい早期のがんの検出精度の向上を目指す。

4. 内視鏡画像診断支援

内視鏡の検査においては、医師は患者に苦痛を与えない機器操作、異常を見落とさない観察、正確な診断の全てを同時に行うため豊富な経験と知識が必要である。そこで人工知能技術により医師を支援するためのシステム



図7 胃のWSIデータに対する異常検知例：灰色で塗りつぶされた部分が異常の度合いが高い箇所

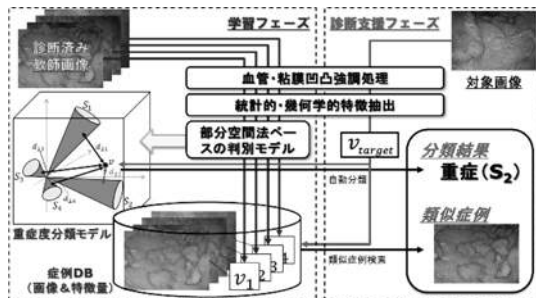


図8 重症度分類・類似症例検索による内視鏡診断支援

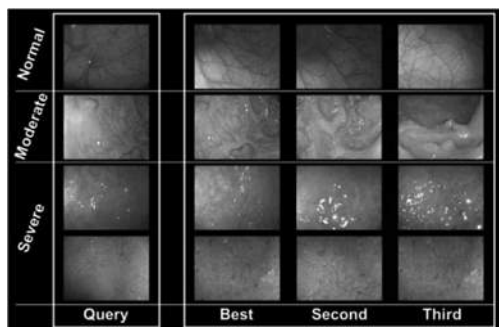


図9 大腸内視鏡画像での類似症例検索の例

として、異常検知をすることに加えて、その検知した箇所の重症度と、それに類似した過去の症例を提示するシステムを研究開発している⁹⁾。図8に全体像を示すが、II章で説明した考え方に基づき1段目の特徴量抽出はすべてのタスクに共通して行い、その特徴量をベースに2段目の多変量解析の部分を変えることで、それぞれのタスクを実現している。

図9に大腸内視鏡検査での類似症例検索の事例を示す。左側のクエリ画像に対して、過去に診断された内視鏡画像症例データベースから類似した画像を検索し上位3枚を提示した。特徴量に基づいた検索を行うことで、厳密に画像が一致していなくとも、似た粘膜の状態を持つ画像を検索することができる。これにより、その画像

に紐づけられた過去の治療履歴や投薬履歴を医師に提示可能となり、医師の経験と知識を補うことができる。

IV. おわりに

本稿では、筆者のグループが研究開発を行っている人工知能を用いた異常検知システムの概要と、その産業応用事例を紹介した。本稿で紹介した分野以外にも、異常検知は産業応用の裾野が非常に広い技術である。一方で機械学習という観点では、教師データの正常例と異常例がアンバランスに得られるという特徴的な性質をもつ問題領域である。また学問的にも発展途上であり、最新の研究成果を実応用に即時投入できる面白さがあり、今後多くの技術者の参入を期待したい。今後の展望としては、機械学習結果の可読性の問題に取り組んでいる。機械学習結果を近似して可視化することで異常検知システムのユーザの「納得感」を高めることが、この人工知能技術の普及に向けたひとつの鍵になると考えている。

— 参考文献 —

- 1) C.M. ビショップ著, パターン認識と機械学習, 2012.
- 2) 井出 剛著, 入門 機械学習による異常検知, 2015.
- 3) 大津 展之, 適応学習型汎用認識システム: ARGUS, *Synthesiology*, Vol. 4, No. 2, pp.70-79, 2011.
- 4) T.Kobayashi et al., Action and simultaneous multiple person identification using cubic higher order local auto-correlation, *Proc. ICPR*, pp. 741-744, 2004.
- 5) J. Ye et al., Audio-based sports highlight detection by Fourier local auto correlation, *Proc. INTERSPEECH*, pp.2198-2201, 2010.
- 6) J. Ogata et al., Development and evaluation of vibration-based anomaly detection system using actual wind turbine data, *Proc. WVEC*, 2016.
- 7) J. Ye et al., Statistical impact-echo analysis based on Grassmann manifold learning, *Proc. EWSHM*, pp. 1349-1356, 2014.
- 8) J. Qu et al., Computational cancer detection of pathological images based on an optimization method for color-index local auto-correlation feature extraction, *Proc. ISBI*, pp.822-825, 2014.
- 9) H. Nosato et al., A content-based image retrieval method for optical colonoscopy images based on image recognition techniques, *Proc. SPIE* 9414, 2015.

著者紹介



村川正宏 (むらかわ・まさひろ)

産業技術総合研究所 人工知能研究センター

(専門分野/関心分野) 機械学習, 適応信号処理, 最適化手法。機械学習技術の実世界応用に従事。

「じわじわ」被ばくの発がん影響を動物実験で明らかに

モデルマウスを用いて低線量率被ばくに起因する発がんリスクを直接的に評価

量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 鶴岡 千鶴, 柿沼 志津子

がんはさまざまな要因で発生するため、被ばくによる発がん影響を直接調べることは困難である。一般に、高線量・高線量率被ばく時のがん発生率は被ばく線量に比例して増加し、この増加分が被ばくによるものと合理的に考えられている。しかし、低線量率被ばくではその増加が小さく、被ばくの影響だけを取り出して論ずることは困難でありこれまで明瞭な議論をすることができていない。そこで被ばくに起因するがんと自然に発生したがんを区別することができる特殊な発がんモデルマウスを用い、低線量率被ばく後に発生したがんの原因を調べ、低線量率被ばく後の「被ばくに起因するがん」の発生率は、同じ線量を高線量率被ばくさせた時に比べ低くなることを示した。さらに線量率を小さくすると、「被ばくに起因するがん」は減少した。これらの結果より、低線量・低線量率被ばくは高線量率被ばくに比べ、被ばくに起因する発がんリスクが小さくなること、またそのリスクは線量率が小さくなると自然に発生したがんとの差が見えなくなることを明らかにした¹⁾。

KEYWORDS: *Low-dose-rate exposure, Carcinogenesis, Ptch1 heterozygous mouse,*

I. はじめに

がんはさまざまな要因により発生する。食事とタバコはその要因の約6割を占めている²⁾。

原爆被爆者の健康調査の結果から、被ばくした線量が増加するとがん死亡についての過剰相対リスク(被ばくしていない集団に比べ、被ばくした集団ではがんによる死亡が何倍増加したかを示す値)が大きくなることが知られている³⁾(図1)。しかし、100mGy以下の低線量域におけるリスクは、高線量域と同様に比例関係にあるのか、それとも実質的なしきい値が存在するのか、あるいは別の相関があるのかさだかではない。原爆による被ばく影響は、高線量率で一度に被ばくをした影響である。

放射線の被ばくにはこの様な高線量率被ばくによる影

響以外に、少ない放射線を「じわじわ」と長時間被ばくする低線量率被ばくがある。その様な被ばくの代表的な疫学調査として、高自然放射線地域(インド・ケララ、中国・陽江など)の住民健康調査がある^{4,5)}。がん発症および死亡についての過剰相対リスクは積算線量が数百mSvになっても増加がみられなかった。これらの調査

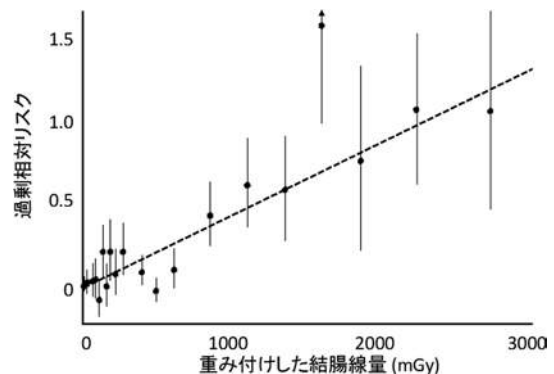


図1 原爆被爆者における固形がんの線量効果関係 (95%信頼区間) 参考資料(3)より作成

Evaluation of radiation-induced tumor for low-dose-rate exposure using Ptch1 heterozygous mice: Chizuru Tsuruoka, Shizuko Kakinuma.

(2017年3月8日 受理)

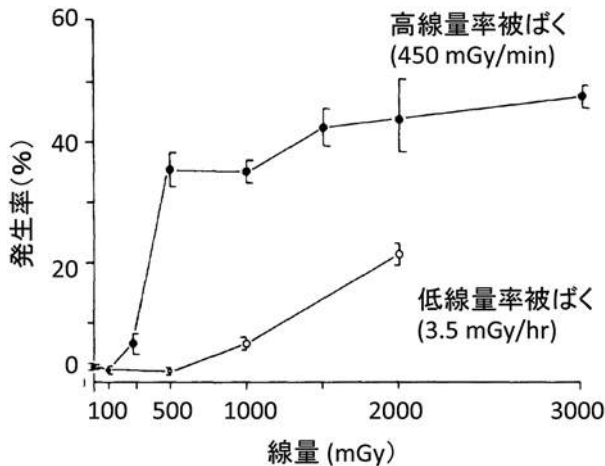


図2 マウス卵巣腫瘍の線量効果関係
総線量が同じ場合の発生率%
参考資料(6)より作成

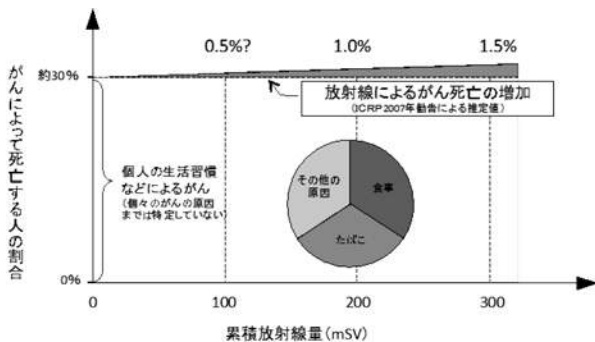


図3 低線量率被ばくによるがん死亡リスク
(ICRP2007年勧告による推定値)
環境省「放射線による健康影響等に関する統一した基礎
資料平成27年度版 ver.2015001」より作成

と先に示した原爆被爆者のデータをまとめて考えると低線量率被ばくは高線量率被ばくよりリスクが小さくなるのが考えられるが、異なる集団であることや調査手法が異なることから、決定的な証拠とはなっていない。動物実験においては、マウス卵巣腫瘍の発生率が、高線量率被ばく後に比べて低線量率被ばく後では低くなることが示されている⁶⁾(図2)。しかし、高線量率被ばく100mGy以下、低線量率被ばく500mGy以下における発生率は非照射時に比べて増加しておらず、低線量域での放射線による発がん影響を明確に示すことができていない。

ICRP(国際放射線防護委員会)では、原爆被爆者のデータを基に低線量率被ばくによるリスクを推定しており、大人も子どもも含めた集団では100mSvあたり0.5%がん死亡率が増加するとして防護を考えることにしている(図3)。しかし、がんの死亡率は年齢や性別・地域などにより変動し、また今現在、病理診断等の方法でがんの原因が放射線被ばくかどうかを確認する方法は確立されておらず、100mSv以下の増加分(1,000人中5人)を実際に検出することは困難である。

そこで発がんした「がん」を調べて、被ばくが原因で発生したか、それともそれ以外の要因によって発生したかを区別できる実験方法を動物実験により見だし、被ばくに起因するがんのみを取りだして低線量率被ばくによる発がんリスクを直接的に議論できないかと考えた。

II. *Ptch1* 遺伝子ヘテロ欠損マウスの特徴

髄芽腫発生の特徴

Ptch1 遺伝子ヘテロ欠損マウスは、*Ptch1* 遺伝子の1対の遺伝子のうち一方に変異が生じていて、さらに残りの正常な遺伝子の機能が何らかの原因により失われることで小脳のがんである髄芽腫を発生する。このマウスは髄芽腫を自然発生すると共に、出生前後に被ばくをするとさらにその発生頻度が増加する^{7,8)}。

被ばくに起因する髄芽腫の特徴

通常、遺伝子には父方と母方から異なる配列を受け継いでいる対立遺伝子がある(ヘテロ接合性)。このどちらか一方の遺伝子(父方もしくは母方)が消失することを「ヘテロ接合性の消失(LOH)」と呼ぶ。我々はこれまでに、このLOHの特徴を利用して、*Ptch1* 遺伝子を含んでいる13番染色体を解析した。その結果、正常な*Ptch1* 遺伝子の消失領域が「自然に発生した髄芽腫」と、「被ばくに起因する髄芽腫」とで異なることを明らかにした^{7,8)}(図4)。また、その際13番染色体においてLOHが生じている領域のゲノムコピー数は、「自然に発生した髄芽腫」では2コピーに、「被ばくに起因する髄芽腫」では1コピーになっていることを明らかにした。このような特徴を利用することにより、被ばくに起因するがんを直接的に評価することが可能になった。

III. 実験の方法

Ptch1 遺伝子ヘテロ欠損マウス([C3H/He × C57BL/6]^{*Ptch1*+/-}F1)の生後直後の1日齢に高線量率(540mGy/min)のガンマ線を、総線量500mGy①または100mGy②照射した。一方、低線量率(5.4mGy/hr③、または1.1mGy/hr④)で、生後1日齢から4日齢(4日間)で総線量が500mGy③または100mGy④になるように照射した。(図5)。照射後、500日までマウスを観察し、健康状態の悪化したマウスより解剖を行い、発生した髄芽腫部分及び正常組織(耳)を凍結保存した。

これら凍結サンプルよりDNAを抽出し、LOH解析を行い、非照射、高線量率及び低線量率被ばくにより発生した髄芽腫を「自然に発生した髄芽腫」と「被ばくに起因する髄芽腫」に分類した(図4)。

IV. 結果と考察

病理解析により髄芽腫の診断を行ったのち、生後500

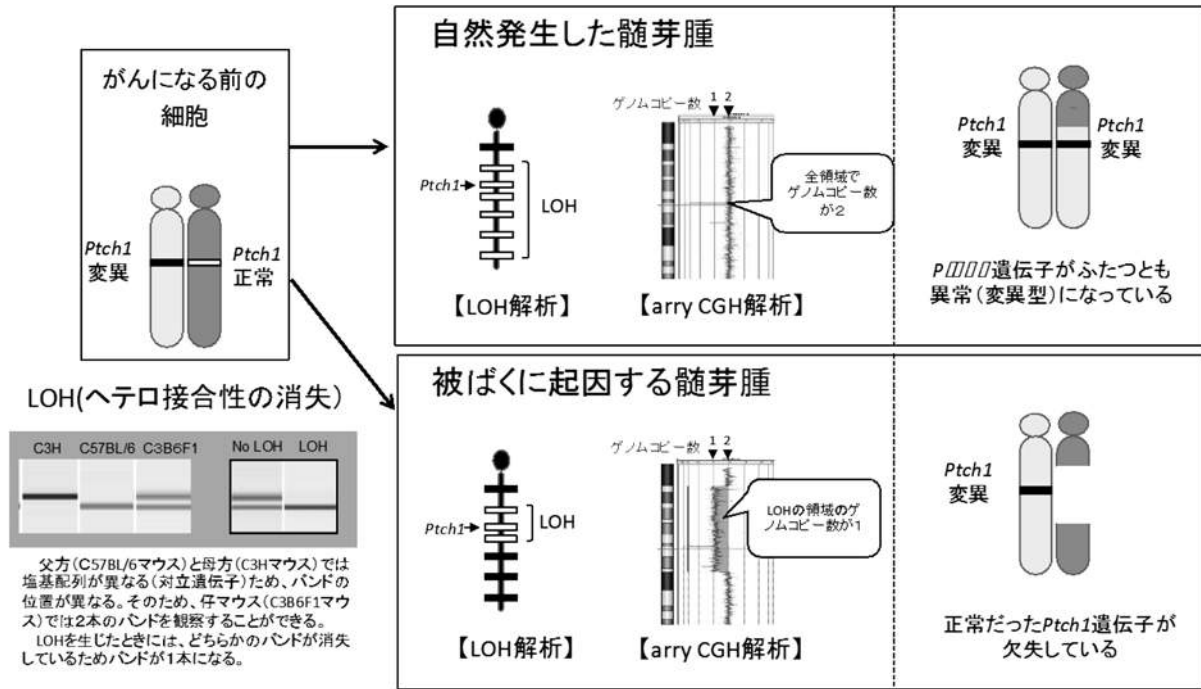


図4 自然発生した髄芽腫と放射線に起因する髄芽腫の識別の原理

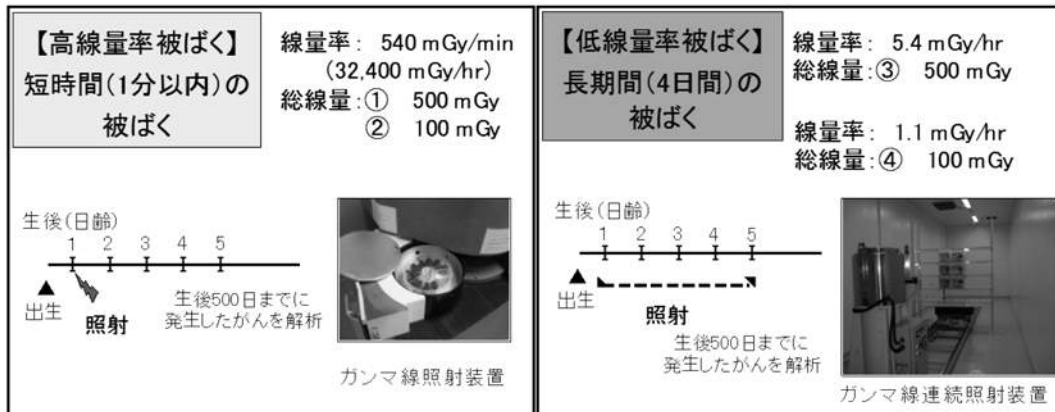


図5 高線量率被ばくおよび低線量率被ばくの照射条件

日までに発生した髄芽腫の発生率を算出した(図6)。その結果、高線量率被ばくでは、500mGy 被ばく群①は非照射に比べ発生率が増加したが、100mGy 被ばく群②は非照射群と発生率に差がなかった。線量依存的にがんの発生率が低下した。一方、低線量率被ばくでは、500mGy 被ばく群③、100mGy 被ばく群④共に、非照射群に比べ非照射群と発生率に差は認められなかった。

発生した髄芽腫を図4の方法により「自然発生した髄芽腫」と「放射線に起因する髄芽腫」に分類し、それぞれの発生率を求めた(図6)。高線量率被ばく①(総線量：500mGy)では、発生した髄芽腫の約半分(66%中34%)が「放射線に起因する髄芽腫」で、総線量が1/5の100mGy 被ばく②では「放射線に起因する髄芽腫」の割合も減少した(52%中10%)。この高線量率被ばくにおける結果は、これまでの報告(8)と一致した。一方、総線量が500mGyと同じでも、高線量率被ばく①に比べて低線

量率被ばく③では、「放射線に起因する髄芽腫」が減少した。さらに、線量率の小さい低線量率被ばく④では「放射線に起因する髄芽腫」は、非照射群との差は見られなくなった。これらの結果より、「被ばくに起因する髄芽腫」の発生率は被ばく線量および線量率に依存することが示された。

放射線を被ばくするとゲノムに傷が生じる。この傷の数は、被ばくの総線量が同じ場合は同じ数生じると考えられるが、被ばく線量が減少すると少なくなり、また、線量率が小さくなると単位時間あたりに生じる傷の数が少なくなる。ゲノムの傷は、修復タンパクによって修復されることが知られており、低線量率被ばくの方が修復されやすいと考えられる。そのため、低線量率被ばくでは高線量率被ばくよりも放射線に起因するがんが抑制されている可能性が示唆される。

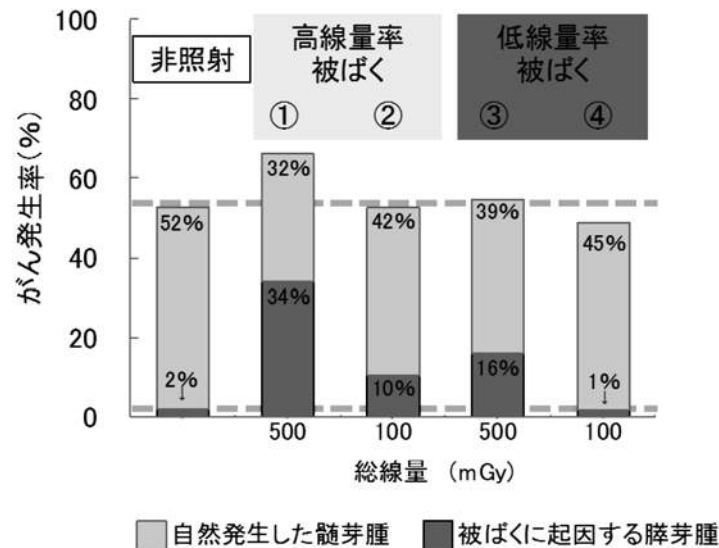


図6 髄芽腫の発生率

高線量率被ばく群①および②の「被ばくに起因する髄芽腫」は、線量に依存して減少した。

低線量率被ばく群③は、同被ばく総線量の高線量率被ばく群①に比べて、「被ばくに起因する髄芽腫」の頻度は低下した。さらに、線量率が小さい低線量率被ばく群④では非照射群と同程度であった。

V. おわりに

低線量率被ばくによる健康影響については、科学的なデータがまだ十分ではない。本報告は、従来の統計学的手法では発がん率の増加が見えない、低い線量率の被ばくの場合に、「被ばくに起因するがん」が実際にどれくらい発生しているかを直接的に示した。しかし、その程度は小さく、また線量率が十分に低くなれば、発がんへの影響は見えなくなることも実験的に明らかにした。

がんは被ばくする年齢、性別、がんの種類(臓器等)により、放射線に対する発がんリスクが異なる。今後、同様の手法を用いて様々な実験動物や被ばく条件での研究を展開していくことによって、低線量率被ばく影響の全容解明に近づくことが期待される。

— 参考資料 —

- 1) C.Tsuruoka et al, Radiation Research,186(4), 407-414, 2016.
- 2) Cancer causes control 7, S3-59, 1996.

- 3) K.Ozasa et al, Radiation Research,177(3), 229-243,2012.
- 4) RR.Nair et al, Health Physics, 96(1),55-66, 2009.
- 5) Z.Tao et al, Health Physics, 102(2), 173-181, 2012.
- 6) RL.Ullrich et al, Radiation Research, 80(2), 325-342, 1979.
- 7) S.Pazzaglia et al, Oncogene, 25, 5575-5580, 2006.
- 8) Y.Ishida et al, Carcinogenesis, 30(9), 1694-1701,2010.

著者紹介



鶴岡千鶴 (つるおか・ちづる)

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 放射線影響研究部
(専門分野/関心分野)放射線生物学



柿沼志津子 (かきぬま・しづこ)

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 放射線影響研究部
(専門分野/関心分野)放射線生物学

福島環境回復に向けた取り組み

第2回 事故進展と放射性物質の放出・沈着分布の特徴

日本原子力研究開発機構 齋藤 公明, 永井 晴康, 木名瀬 栄, 武宮 博

1F事故の進展と放射性物質の放出・大気拡散・沈着過程の解明が、シミュレーションおよび環境測定データの解析により進められている。大規模環境調査により福島周辺における放射線環境の経時変化等の特徴が明らかになりつつあり、この知見に基づいて空間線量率の分布状況変化モデルが開発された。事故後に測定された種々の環境測定データは集約され、データベースを通して簡単な解析ツールとともに継続的に公開されている。

KEYWORDS: *atmospheric dispersion, deposition, source term, dose rate in air, deposition density, temporal change, prediction model, ecological half life, land use, data provision*

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(以下、1F)の事故では、事故の進展に伴い様々な種類かつ多量の放射性核種が大気中に放出され東日本の広い範囲に沈着し、その後、時間とともに沈着分布が変化してきた。本稿では、環境で起こったこれら一連の現象の詳細を知るために行われた、実測、モデル、シミュレーションを用いた研究の結果とその公表についてまとめて紹介する。

II. 事故進展と放射性物質の大気放出

1. 放出事象と大気拡散・沈着プロセス

1F事故で大気中に放出された放射性物質により、どのように陸域の汚染が生じたかは、様々な環境モニタリングデータや大気拡散シミュレーションを用いた解析により解明が進められてきた。これらのうち、放射性物質の大気放出量を推定する解析¹⁾では、1Fの事故進展に関する情報を参照し、原子炉事象と大気放出の関連を考慮しながら、放出率の時間変動を求めている。この解析結果から、東日本域の陸域汚染をもたらした主要な大気放出と拡散事象は、2011年3月12日、3月14~16日、および3月20~21日に発生したと考えられている。

3月12日:

Challenges for enhancing Fukushima environmental resilience (2); Features of radionuclide release and deposition with accident progress : Kimiaki Saito, Haruyasu Nagai, Sakae Kinase, Hiroshi Takemiya.

(2017年3月3日 受理)

■前回タイトル

第1回 環境回復に関する取り組みの進展

1号機の原子炉圧力が上昇したことから、圧力を下げたためのベント操作が行われ、14時30分頃から圧力が低下した。その後、15時36分に水素爆発が発生した。これらの事象により放出された放射性物質は、北方向に流れて福島県北東部に沈着をもたらした後、宮城県の女川原子力発電所周辺を通過して太平洋上に流れた。大量放出があったと推定されているが、放射性プルームの通過時に降水はなく、乾性沈着であったため後述の事象と比較して沈着量は少なかった。なお、3月13~14日に3号機でも同様にベント操作や水素爆発が発生しているが、この期間は放射性プルームが太平洋上に流れる気象条件が続いたため、陸域への影響は1F近傍に限定されていた。

3月14~16日:

1F事故により最も放出量が増加し、重大な陸面汚染をもたらされた期間と考えられている。2号機の原子炉圧力上昇への対応として、3月14日の21時から3月15日未明にかけて圧力容器の主蒸気逃し弁開操作が数回行われ、それに伴う放射性物質の放出の影響と考えられる空間線量率上昇が風下方向で測定された。この放射性プルームは、南方向に流れ、福島県南東部から茨城県北部の沿岸域を通過して関東平野に流入し、関東地方の各地で空間線量率の上昇が観測された。関東地方の平野部では、低レベルの乾性沈着であったため、この放射性プルームの通過後に空間線量率が急激に減衰したが、放射性プルームが北関東の山岳地域に達したところに西から移動してきた降水域と重なり、高い濃度の湿性沈着が発生した。

次に、3月15日7~11時にかけて2号機の格納容器圧力が急激に低下し、この間に放射性物質の大量放出が発生した。はじめ放射性プルームは南に向かい、徐々に北西の方角に進路を変え、福島県中通りおよび1Fの北西

地域において、相当量の放射性核種の乾性沈着と湿性沈着を生じさせた。

さらに、3月15日午後から16日朝にかけて、2号機および3号機の原子炉圧力の低下が見られ、これに伴うと考えられる放射性物質の大量放出により、1F周辺地域に高濃度の湿性沈着がもたらされた。この間の放射性ブルームは、北西から南の方角に進路を変えていたが、地表沈着量測定²⁾において、 ^{137}Cs に対する ^{131}I の比率が1F南方向で高くなっていった。3月15日16時頃3号機でベント操作と圧力低下が報告されており、これ以降に3号機起因の ^{131}I 放出量が増大したと示唆される。

3月20～21日：

3月20日の放射性ブルームは、北西方向に流れ奥羽山脈沿いに北上した後北東に向かい、宮城県北部から岩手県南部を通過する際に降水と重なり、湿性沈着により汚染分布が形成された。一方、3月21日の放射性ブルームは、福島沖の海上を南下した後、茨城県付近から南西方向に向きを変え陸上に流れ、茨城県南部から千葉県北西部を通過する際に降水と重なって湿性沈着した。

この期間の放出要因について、大気拡散シミュレーションによる解析³⁾が行われている。3月20日と21日の沈着エリアでの環境測定で得られた ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比を、1号機から3号機の炉内インベントリ解析による放射能比と比較すると、3月20日の沈着エリアは3号機、3月21日の沈着エリアは2号機の放射能比の特徴を示していた。この分布を大気拡散シミュレーションで再現するには、3月20日20時頃に主たる放出が3号機から2号機に変わる必要がある。この期間の原子炉事象としては、3月20日11時過ぎに3号機でベント操作があり、これに起因すると考えられる圧力低下が測定されたが、2号機については特別な事象はない。2号機は放出が継続している状態に対して、3月20日に3号機の放出が増加したことが示唆される。

2. 大気放出量推定の概要と課題

陸域汚染の形成過程の解明に活用した放射性物質の大気放出量推定¹⁾は、環境中における放射性物質濃度または空間線量率の測定値から大気拡散シミュレーションを用いて逆解析する手法を用いている。一方、1Fの1号機から3号機でどのように炉内事象が進展し、放射性物質の環境放出に至ったかについて、過酷事故解析コードを用いた解明も進められている。国連科学委員会(UNSCEAR)の2013年レポートでは、これらの解析手法による放出量推定結果を以下のようにまとめている。 ^{131}I の総放出量は約100～500PBq(PBq=10¹⁵Bq)の範囲、 ^{137}Cs は6～20PBqの範囲で、1号機から3号機における ^{131}I および ^{137}Cs の総インベントリの約2～8%および約1～3%であった。これらの結果は、放出総量についてはおおむね一致するが、放出率の時間変化パター

ンや原子炉事象との関連には大きな違いがあった。

過酷事故解析コードによる解明では、これまで環境中で実測された放射性物質の状態を再現できるような放出の時間変化が得られていない。一方、環境データからの逆解析では、放射性核種の組成や化学形に関する情報不足による推定結果の不確実性に課題がある。現在これらの異なる解析を融合する研究が進められており、今後、放出量推定のさらなる精緻化が期待される。それにより得られる放射性物質の大気中濃度と陸面沈着量の時空間分布は、住民の被ばく線量評価や環境回復に活用できる。また、炉内事象の詳細な解析結果は、廃炉を進めるうえで重要な情報となる。

III. 放射性物質の沈着分布と経時変化

1. 初期沈着量分布の特徴

1F事故以降、原発周辺の大規模環境調査が繰り返して実施され、放射性物質や空間線量率の分布や経時変化の特徴が明らかになりつつある⁴⁾。2011年6月の調査でマップを作成するのに十分な数の地点で検出された放射性核種は、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I 、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{89}Sr 、 ^{90}Sr 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ であった。この時点ですでに、空間線量率への寄与の99%以上が放射性セシウムからのものであった。また、長期的な被ばく線量の観点から、放射性セシウムが圧倒的に重要であることが確認された。

地上測定と航空機モニタリングの結果を統合した結果から、 ^{137}Cs の日本全土への総沈着量は2PBq程度であると推定された。 ^{137}Cs の推定放出量には大きな幅があるが、放出量されたセシウムの10～30%程度が日本の陸地に沈着したと考えられる。80km圏内全域についてみると、土地利用の面積とほぼ比例して、放射性セシウムの70%が森林域に、20%が農地に、5%が建物用地に沈着したと概算された。もう少し狭い地域に注目すると、沈着量と土地利用面積が必ずしも比例するわけではないことが確認された。

放射性セシウムについて、原発から北西方向に沈着量の大きな地域があり、また中通りの沈着量も相対的に大きいことは良く知られている。その他の核種についても基本的な沈着の様子は似ているが、放射性セシウムとの沈着量の比率はそれぞれ特徴を有している。 ^{131}I および $^{129\text{m}}\text{Te}$ の ^{137}Cs に対する比率は、いずれも原発南側の海岸沿いで高い。 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の比率は、南方だけではなく北方にも比率が高い地域が存在する。また、第2次調査での広域の結果を見ると栃木から群馬に達する広い地域で、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ は ^{137}Cs と良い相関関係がある。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の比率は広域にわたり分布を持っており、この分布をもとに各時期の放出に主に寄与した原子炉の推定が行われていることについては、IIで既に述べた。

2. 経時変化

2011年から2015年までの4年間の調査で明らかになった経時変化についてまとめる。幾つかの異なる測定方法を用いて行われてきた大規模環境調査の結果によれば、図1に示すように、空間線量率は状況毎に異なる減少傾向を示してきた。自動車サーベイで測定した80 km圏内の道路上の測定値の減少は非常に早く、自然ガンマ線の寄与を含めた解析でも、平均空間線量率は2011年6月に比べ4年間に約5分の1に減少した。状況の変化し難い平坦地を選びサーベイメータにより行った測定では、平均空間線量率は4年間に約4分の1に減少した。歩行サーベイにより測定した空間線量率は、走行サーベイと平坦地測定の間空間線量率が分布することが確認されている。一方、放射性壊変により空間線量率は同じ期間に5分の2までは減らないことがわかる。従って、人間が関係する様々な環境中での空間線量率は、放射性壊変による減衰に比べて顕著に速く減少してきたことになる。

攪乱のない平坦地ではセシウムの水平方向への動きは小さいが、地中の深い方向へ徐々に浸透してきた。平坦地において空間線量率が物理減衰よりも速く減少することの主な原因は、セシウムの地中への浸透によるガンマ線遮蔽効果の増加であることが確認されている。一方、道路やその周囲の人工建造物に付着したセシウムは風雨等により除去されやすいことが知られており、これにより道路上の空間線量率は急速に減少してきたことが推測される。また、森林では樹冠に沈着した放射性セシウムが林内雨等を通して徐々に地上に移行して、現在は相当部分が林内の地上近くに存在すると考えられる。森林から外部へのセシウムの移行は小さい。これらの結果として、森林内の空間線量率は物理減衰に近い形で減少してきたと考えられる。

空間線量率の減少に影響する重要な要因として、土地利用状況ならびに人間活動があることが、取得データの統計解析により明らかになりつつある。走行サーベイデータの統計解析によれば、空間線量率の減少は都市域や水域では早く、森林域では遅いことが明らかになっている。これは上記のセシウムの動きとも符合する。ま

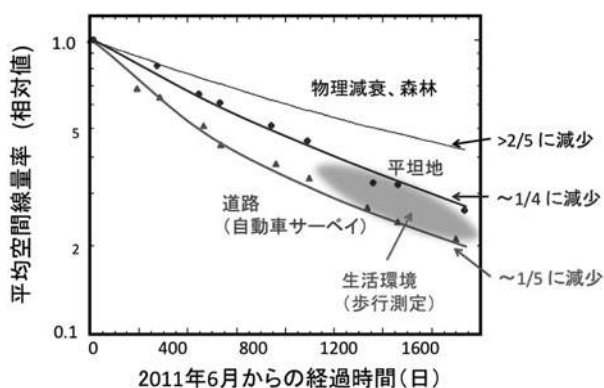


図1 80 km 圏内の空間線量率平均値の経時変化

た、避難指示区域の内外を分類して空間線量率の減少傾向を比較すると、区域外の方が明確に空間線量率の減少が速い。除染のみでなく人間の様々な活動が空間線量率の減少を加速することが推測される。空間線量率の減少と関係するこれらの要因、特に除染を含む人間活動の影響についての定量的な解析は今後の重要な課題である。

IV. 空間線量率の推定

1. 空間線量率推定の概要

1F から80km 圏内の空間線量率が、その線源の放射性壊変による減衰よりも速い減少傾向を示すことはⅢでみた通りである。こうした空間線量率の経時変化、特に将来予測は、適切な除染などの防護措置の選択、避難指示区域の見直しなどに資する基礎情報として有用になるため、信頼性の高い推定手法の開発が望まれる。

原子力機構が開発した空間線量率の分布状況変化モデルは⁵⁻⁷⁾、1F から80km 圏内を対象にして、1F 事故後に実施された走行サーベイなどによる空間線量率の膨大な測定データをもとに統計的解析手法により導出したモデルパラメータを適用し、1F 事故30年後までの空間線量率を推定可能とする。

空間線量率の起因となる放射性セシウムを対象とする空間線量率の分布状況変化モデルは次式(1)で表す。

$$D(t) = (D_0 - D_{BG}) \left\{ f_{fast} \exp\left(\frac{-\ln 2}{T_{fast}} \cdot t\right) + (1 - f_{fast}) \exp\left(\frac{-\ln 2}{T_{slow}} \cdot t\right) \right\} + \frac{k \exp(-\lambda_{134} t) + \exp(-\lambda_{137} t)}{k + 1} + D_{BG} \quad (1)$$

ここで、 $D(t)$ は経過時間 t における空間線量率、 D_{BG} は平均的なバックグラウンド空間線量率、 T_{slow} は減衰が遅い成分の環境半減期、 k は ^{134}Cs の ^{137}Cs に対する初期空間線量率比(同じ濃度)、 λ_{134} は ^{134}Cs の壊変定数、 λ_{137} は ^{137}Cs の壊変定数である。式(1)中の初期空間線量率 D_0 は、生活圏の空間線量率を、減衰が速い成分の環境半減期 T_{fast} および減衰が速い成分の割合 f_{fast} は、土地利用形態別の値を、それぞれ走行サーベイの空間線量率測定データから導出・設定している。なお、環境半減期は、放射性セシウムの壊変による影響を取り除き、放射性セシウムの環境中での挙動に影響を及ぼすウェザリングや人間活動などの様々な要因により、環境中の空間線量率が半分になるまでの時間を示す。

分布状況変化モデルにより推定した空間線量率の経時変化の一例を図2に示す。図2は、帰還困難区域の森林以外に分類したメッシュおよび避難指示区域外の都市に分類したメッシュについて、事故発生時の空間線量率で規格化した相対値としてプロットした。空間線量率が放射性壊変による減衰よりも速い減少傾向を示すことが確認できる。また、ウェザリング効果による空間線量率の

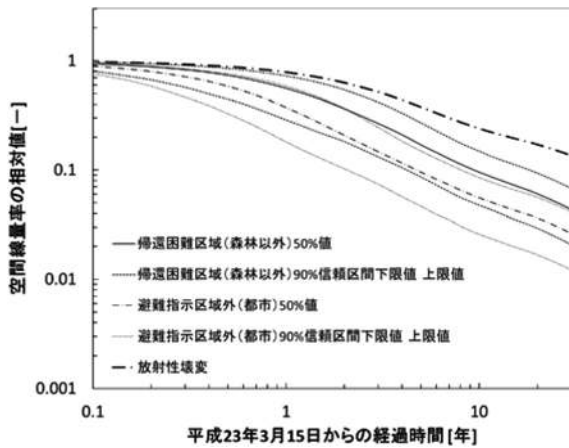


図2 帰還困難区域(森林以外)および避難指示区域外(都市)の空間線量率変化

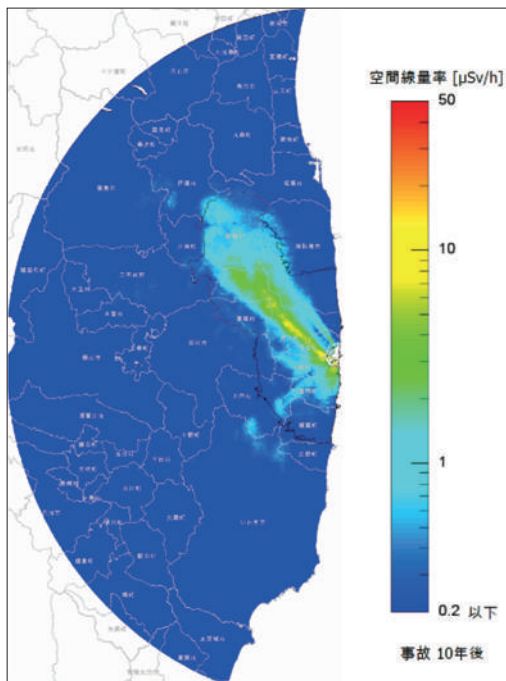


図3 事故 10年後の空間線量率予測図⁶⁾

減少を主とする帰還困難区域(森林以外)に比べ、人間活動に影響された避難指示区域外(都市)の方が空間線量率の減少が速いことが示される。なお、分布状況変化モデルは、統計的な分布を有するモデルパラメータを用いるため、不確かさを表すために図では、50%値(推定値が有する分布の中央値)に加えて、90%信頼区間下限値と上限値(推定値が有する分布の5%値と95%値)を示している。

図3にモデルパラメータの中央値を適用した将来予測結果(事故10年後)を示す。事故10年後の年間20mSv(3.8μSv/h)を超えるエリアは、事故6年後に比べ、約5分の3程度に減少することが示唆された。

2. 今後の展開

空間線量率の分布状況変化モデルを応用し、炉内イン

ベントリ計算や実測などによる核種組成比を用いて、1F事故初期時の空間線量率推定手法を開発している。こうした一連のモデルと空間線量率推定図は、生涯線量算定やグランドシャインの線量再構築に役立つと考える。また、今後新たな測定データ・知見が得られれば、空間線量率の分布状況変化モデルの見直しを実施し、さらなる検討を加える予定である。

V. 環境モニタリングデータの集約と公開

1F事故以来、省庁や地方自治体により多数の環境モニタリングが実施され、公開されてきた⁸⁾。これらのデータは、福島復興支援計画の立案や、II~IVにおいて記載された研究の礎となる重要なデータであることから、原子力機構では、関係省庁や自治体から個別に公開されている環境モニタリング結果を集約、一元管理した環境モニタリングデータベースを構築し、一般に公開している(<http://emdb.jaea.go.jp>)。

本データベースには、21の機関により実施された総計4億6千万に上る環境モニタリングの結果が登録されており、空間線量率、土壌における核種濃度、陸水における核種濃度、大気における核種濃度、海水/海底土に含まれる核種濃度、食品に含まれる核種濃度等のデータに分類され、公開されている。

計測技術の進展により、1F事故に関する環境モニタ

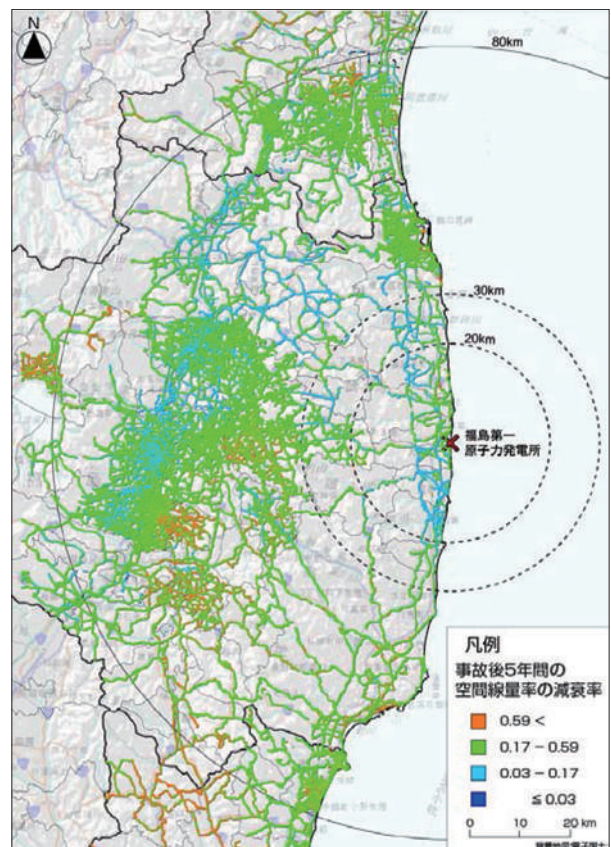


図4 走行サーベイ結果の経時変化マップ

リングによって得られたデータは膨大な数に上っている。そのため、本データベースでは、モニタリング結果を数値データとして公開するだけでなく、マップやグラフといった広域の分布状況や経時変化傾向を直感的に把握しやすい形式に加工し、公開している。加工の際には、視点やレジェンド(色付けの凡例)等を統一化することで、環境モニタリング結果の相互比較を容易にしている。

また、放射性物質の分布特性や経時変化傾向の分析を支援するために、利用者の目的に合わせたマップやグラフの作成や、データ分析を支援するツールの公開も行っている。これらのツールは、ネットワークを介して環境モニタリングデータベースと連携し、利用者の目的に応じて対象とするデータをダウンロードし、解析する機能を有している。

環境モニタリングデータベースでは、これまで事故後の最新の測定結果を随時公開してきた。しかしながら事故後から5年を経過し、多数の環境モニタリングデータが登録されてきたことから、それらのデータを用いて事故から現在までどのように分布状況が変化してきたのかという経時変化状況に関する情報の提供も開始した。

国により継続的に実施されてきた走行サーベイによる80km圏内における空間線量率分布の経時変化傾向を図4に示す。事故直後に対する5年後の空間線量率の比率(バックグラウンドを含む)を色で表している。放射性壊変による減衰(~0.38)は緑のレンジに含まれる。水色及び青は減衰が放射性壊変より速い領域、茶色は遅い領域を示す。地域により明らかに減衰傾向が異なっている。

原子力機構では、福島県や京都大学と協力し、福島県下を走行する路線バスにKURAMA-IIと呼ばれる空間線量率移動測定装置を搭載し測定を実施するとともに、ネットワーク技術、データ処理技術を活用してデータを即時に集約、分析し、公開するという新しい情報公開事業も進めている(<http://info-fukushima.jaea.go.jp>)。公共交通機関を活用することで、測定コストを低減するとともに、住民の居住地周辺を連日走行するという路線バスの特性を利用することで、住民居住地を中心とした放射線分布情報を長期的かつ高頻度に提供することを可能としている。

長期的かつ高頻度なモニタリングを広範囲に実施することの効果として、空間線量率に対する積雪のような一時的な影響や除染による人為的な影響を捉えられるということが挙げられる。放射性物質の長期的な変動を正確に評価するうえで、これらの影響を把握し、分離することは重要である。本事業で公開されたデータを活用することで、評価の高精度化が期待できる。

本事業では、2013年より現在まで毎日測定が実施されており、32台の路線バスを用いて全県規模の測定が展開されている。

VI. 終わりに

事故進展と放射性物質の放出から拡散・沈着、沈着した放射性物質の長期的な挙動、それに伴う空間線量率の変化の系統的な調査・研究は、事故を体験した日本の研究者が長期的に取り組むべき課題であり、今後、分野を越えた連携を強めつつ継続して実施することが不可欠である。なお、本稿の内容の一部は、文部科学省および原子力規制庁からの委託により実施した事業の成果を含む。

— 参考資料 —

- 1) G. Katata, M. Chino, T. Kobayashi, H. Terada, M. Ota, H. Nagai, M. Kajino, R. Draxler, M. C. Hort, A. Malo, T. Torii, Y. Sanada: Atmos. Chem. Phys., 15, 1029-1070 (2015).
- 2) K. Saito, I. Tanihara, M. Fujiwara, T. Saito, S. Shimoura, T. Otsuka, Y. Onda, M. Hoshi, Y. Ikeuchi, F. Takahashi, N. Kinouchi, J. Saegusa, A. Seki, H. Takemiya, T. Shibata: J. Environ. Radioactiv., 139, 308-319 (2015).
- 3) M. Chino, H. Terada, H. Nagai, G. Katata, S. Mikami, T. Torii, K. Saito, Y. Nishizawa: Scientific Reports, 6:31376, DOI: 10.1038/srep31376 (2016).
- 4) K. Saito, Y. Onda: J. Environ. Radioactiv. 139, 240-249 (2015).
- 5) S. Kinase, T. Takahashi, S. Sato, R. Sakamoto, K. Saito: Radiat. Prot. Dosim., 160(4), 318-321 (2014).
- 6) 木名瀬栄: 日本原子力学会誌, 58(6), 362-366(2016).
- 7) 日本原子力研究開発機構: 平成27年度原子力規制庁委託事業「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約」成果報告書(2016), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf08/Part2.pdf>
- 8) 例えば <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja> (規制庁放射線モニタリング情報ページ), <https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/01010d/monitoring-all.html> (福島県放射線モニタリング結果ページ)等

著者紹介

齋藤公明 (さいとう・きみあき)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)環境放射線測定/線量評価

永井晴康 (ながい・はるやす)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)環境中物質動態/緊急時対応

木名瀬栄 (きなせ・さかえ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)放射線防護/線量計測

武宮 博 (たけみや・ひろし)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子力計算科学/計算機科学

談話室

情報技術全盛時代の新たなワークモデル

リクルートワークス研究所 労働政策センター 中村 天江

AI, IoT, ロボティクス…。情報技術が百花繚乱の盛り上がりを見せている。従来、テクノロジーといえば、宇宙技術や重電、輸送技術のように、専門家が発明と制御を担う、高度に閉じたものだった。しかし、情報技術は、実社会での応用範囲が極めて広く、インターネットを介して瞬く間に普及する。それにともない、利用者も、開発者も、裾野が大きく拡大している。

このことは、情報技術に素養のある人にとっては、大変なチャンスをもたらすと同時に、そうでない人にとっては脅威となる。「テクノロジーが雇用を奪う」という言説は枚挙にいとまがない。しかし、テクノロジーが仕事に与える影響については、この数年でとらえ方が随分と変わった。まず2009年、未来学者フォードが「テクノロジーが雇用の75%を奪う」を発表した。2013年には、オックスフォード大学オズボーン准教授らの「47%の職業がテクノロジーに代替される可能性がある」が耳目を集める。ところが、2016年に入るとマッキンゼーが、テクノロジーに代替されるのは仕事の全体ではなく、仕事を構成するタスクの一部であるとの報告をまとめる。推計によれば、「45%の職業で一部のタスクが自動化される可能性があるが、完全に自動化される職業は5%に満たない」。テクノロジーにより消失する仕事の比率が、みるみる減り、今では、なくなる仕事は数%であり、大

半の仕事では、タスクの組み替えによる、職務の再定義が重要になると考えられている。

だとするならば、仕事が劇的に減少するいつかの未来を懸念する前に、眼前の変化をいかに乗り切るかにこそ焦点をあてるべきだ。ビジネスモデルを、仕事のプロセスを、それに必要なスキルセットを、私たちはいかに変えていけるのだろうか。

情報技術全盛時代に向け、日本は大きな潜在力がある。世界に通用するオリジナリティのある製品に関する経済複雑性指標は15年連続1位であるし、PISA(国際学習到達度調査)では、科学的リテラシーも数学的リテラシーもトップレベルにある。だが、その一方で、諸外国に比ベイノベーションの実現率が低いという、科学技術・学術政策研究所の分析もある¹⁾。潜在力を、競争力に昇華していくことが、強く期待されている。

情報技術を活用したビジネスの変化と、それを担う人材の育成・輩出は、両輪で進むものの、日本人のキャリア形成は、諸外国に比べ、専門性が曖昧で、キャリアの自律度が低いという特徴がある(図1:リクルートワークス研究所調査)。終身雇用のもとでは、会社の命令に応じて転勤や異動し、ジェネラリストとなっていた方が、キャリア形成で有利だったからだ。だが、これからは、より深いテクノロジーの理解と、より早いテクノロ

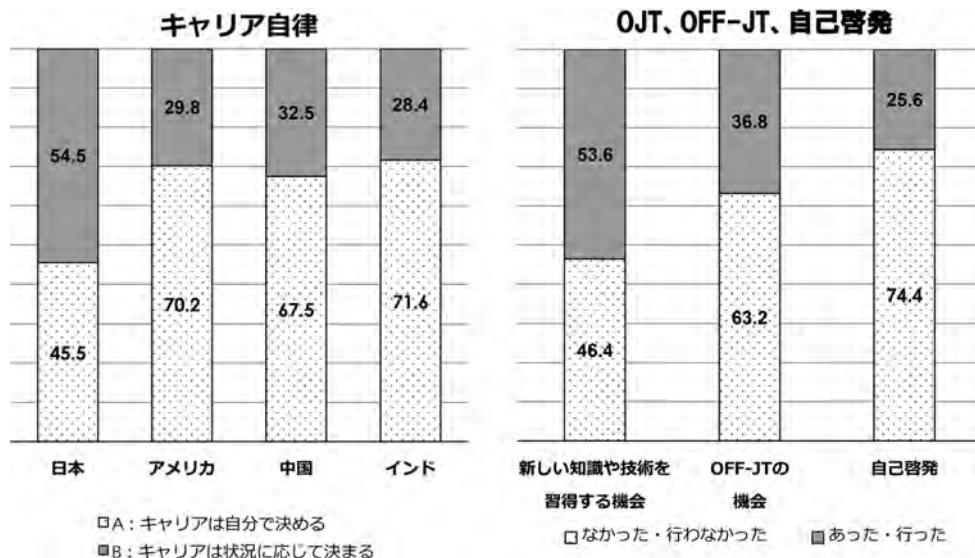


図1 日本人のキャリア形成

ジーの活用が必須となる。

そこでわれわれは、テクノロジーを生み出し、活かす時代に向けた、新たなワークモデルを構築した(図2)。「Work Model 2030」は、専門性と地域軸の2×2の4つのプロフェッショナルと、雇用とフリーランス/起業という2つのステージからなる。

これまで専門性は、「スペシャリスト」「ジェネラリスト」と分類されることが多かったが、Work Model 2030では、「テクノロジスト」「プロデューサー」とした。長きにわたり特定の専門領域を究めるスペシャリストに対し、テクノロジストは新たな技術を生み出し、活用し、さらには自らの専門性そのものも開発していく。社内人脈と社内調整にたけたジェネラリストに対し、社内外の多様なテクノロジストをまとめ、新たな付加価値や収益の源泉を生み出していくのがプロデューサーである。テクノロジーを創り出す人、テクノロジーを活かす人、そのようなテクノロジストたちを活かす人、それをビジネスに昇華する人という役割分担を明確にし、それぞれがプロフェッショナルリティを高めることで、好循環が回るようになる。さらに、仕事を生み出す商圈を、「グローバルで稼ぐ」「ローカルで稼ぐ」にわけた。日本では地域に関して、グローバル人材の不足や、地域に留まりたいのに転勤を求められるといった、矛盾が生まれている。ナショナル、つまり日本全体で働くことを前提とするのではなく、個人の志向とビジネスの範囲を一致させていくことが、さらに重要になっていくだろう。

Work Model 2030では、雇用ステージに加えて、フリーランス/起業ステージがある。企業に雇われて働く人は、1955年は43.5%だったが、2015年には88.5%と、今では9割が雇用ステージで働いている。日本は、副業は原則禁止、転職環境は整っておらず、起業率も低いた

め、社内キャリアがそのまま職業人生となっている。同質性の高い人たちの密なコミュニティは、イノベーションや、個人が新たな仕事に挑戦し、適応の阻害にもつながることが知られている。雇用ステージに加え、フリーランス/起業ステージを拡充していくことで、ダイナミックなキャリア展開とセーフティネットをつくることができる。会社員を辞め、フリーランサーとして働き、いずれ開業する。フリーランスで働きながら、勉強し、キャリアチェンジする。副業を通じて、視野を広げ、新たなアイデアを得る。個人の能力と志向を解き放つためのワークモデルである。

今後、個人に最も求められるのは、これまで以上に早いスピードで、仕事も専門性も変化していく中で、変化を起こし、変化についていくことだ。新しいことに取り組むには、好奇心と学ぶ力が欠かせない。優れたIT人材の多くが、この2つの特性を兼ね備えている。テクノロジーが進展し、専門性が分化・深化していく中では、専門家のコミュニティも、関心も移り変わっていく。新たな仕事機会をもたらす、キャリアチェンジを支えるのは、人的ネットワークという研究結果もある。好奇心が刺激される会社とは違う居場所を見つけることもまた、これからのキャリア形成の要となるだろう。これらの話は原子力分野においても、無関係ではあるまい。

変化を楽しめる、そんな社会に変化していくための、議論を深めていきたいと考えている。

(2017年2月20日記)

— 参考資料 —

- 1) 科学技術・学術政策研究所「国際比較からみた我が国の企業におけるイノベーションに向けた取組みの現状—第3回全国イノベーション調査から—」(2013).

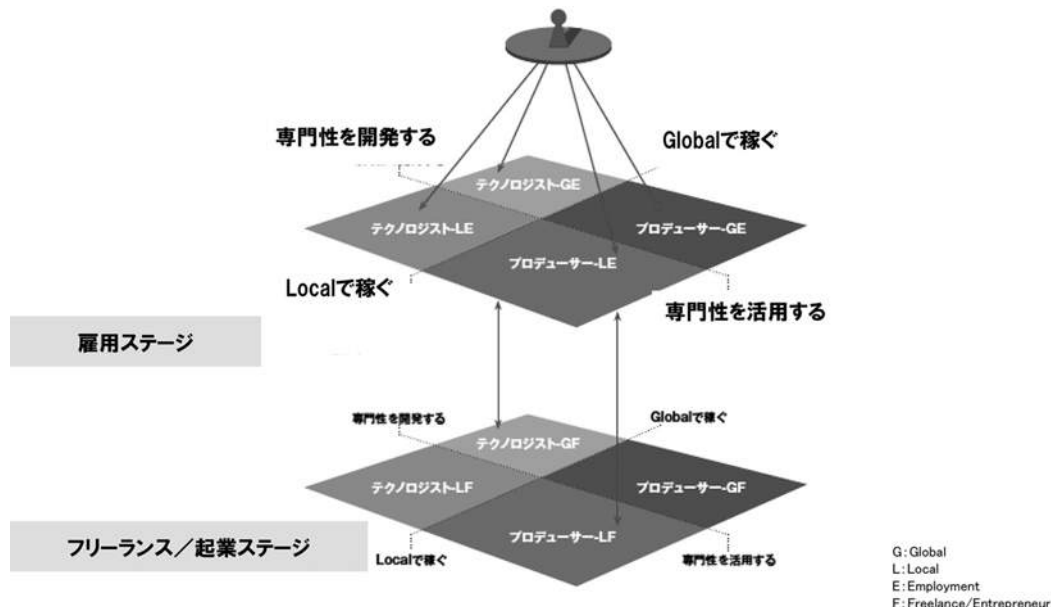


図2 Work Model 2030

談話室

『対話の場を創る』

NPO 法人フューチャー北海道 杉田 恵子, 櫻木 正彦

I. はじめに～対話事始め

対話の場を作ってもう5年になる。いや、もっと前から、場は作っていた。例えば、学級委員長として学級会を、あるいは町内子供会の場を。大人になってからも、会議や勉強会を開催する側として。しかし、それを“対話の場を作っていた”とは、言えない。“人を集めて話してもらった”に過ぎない。

平田オリザ氏は著書「対話のレッスン」(講談社学術文庫)の中で、「対話とは他者との異なった価値観の擦り合わせだ」と述べている。さらに「その擦り合わせの過程で、自分の当初の価値観が変わっていくことを潔しとすること、あるいはさらにその変化を喜びにさえ感じることが対話の基本的な態度である」と述べている。

どのような仕掛けをしたら、平田氏の言うような対話の場になるのか。我々のこの5年間の活動の中から幾つかを振り返りつつ、改めて目指す姿を描きたいと考えている。

II. まちづくり

北海道室蘭市の北西部、蘭北地区において、一昨年から計4回のまちづくりワークショップを実施した。当地区のクリニックの家庭医が、少子高齢化や商店街の衰退を憂い、手伝ってほしいと依頼されたことがきっかけだった。

ワークショップでは各町内会の町内会長をはじめとする40人程が参加し、少人数グループで、あるいは参加者全体のディスカッションで、このまちの過去、現在を洗い出し、未来を描き、ビジョンを作り、現在はこれを叶えるための活動がどんどん立ち上がっている。

いかにも成功を生み出したかのようなこのワークショップ。ここに対話はあったのだろうか。確かに、日頃顔を合わせていながらも“まち”というテーマで話すのは初体験。新しい発見もあったかもしれない。ただし、同じまちに生き、同じまちを憂い、いわば同胞。実は、ワークショップの前後に、私達は、町会長のお宅へ何度も伺ってヒヤリングをした。時には不審者がられ、怪訝がられ、でも何度も何時間もお話を伺った。私はあの場こそが対話の場だったと感じている。生まれも育ちも背景も、このまちへの思いも違う者同士が、価値観をぶつけ、擦り合わせ、共感し合い、叱咤し合う。

ワークショップの対話の場作りは、あくまでも点でしかない。まちづくりというプロセスをデザインしたうえで対話をどのタイミングでどのように作るか、これからも試行錯誤は続く。

III. トランスサイエンス問題

主催ではないが、高レベル放射性廃棄物の処分地をめぐる意見交換会で、グループファシリテーターを担った経験が幾度かある。事業者、研究者、住民など、進めていく必要のある人から強く感情的に反対している人…という意味では、多様な意見をお持ちの方々。

そこで主催者は言った。「ここは、一定の結論を出すことを目的としていない対話の場です。多様な意見の相互交流ができ、身近な問題として冷静に率直に意見交換ができればよいのです」

しかし実際は、自己紹介もままならず、怒号が飛び、質疑応答が成立しない。ここに対話はあったのか？場作りとして何をすべきだったか。

初めて関わってから3年が過ぎた。主催者が言う“対話”とは何を指すのか、一度尋ねてみようと思っている。

IV. 終わりに

対話の場を作ってもまだ5年だ。これまで作った場を振り返り、互いの価値観を出せる場になっていただろうか。もっと本当にぶつかり合える場であるべきだったのではないか。質疑応答はかみ合っていたのか。と、検討すべき課題は山積みだ。

そもそも対話が必要な場だったのか、とも振り返らなければいけない。あたかも魔法のごとく“対話”がもてはやされて、それですべてが丸く収まるかのように考えることはとても危険だ。

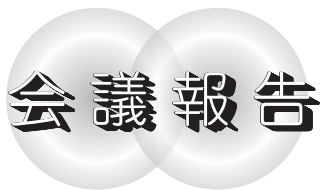
誰と誰が何のために、どのような対話が必要なのかを、事前にしっかり考え、悩み、“人を集めました”“話しました”で終わらないダンドリをすることが必要だ。

「今日は本気で話し合えた」「他の人の意見も理解できた」そんな感想を多く持ち帰ってもらうためにも、さらに研究・実践を重ねていきたいと考えている。

対話の場を“創る”。たくさんの要素を編み込むように“創る”。

それが私達の活動である。

(平成29年3月10日記)



ICGR2016(地層処分国際会議)

International Conference on Geological Repositories

2016年12月6～10日(パリ, フランス)

ICGRは、高レベル放射性廃棄物の地層処分について、政府や実施主体等の関係機関のトップクラスが集まり、情報を共有し、各国での事業の進展に資することを目的とした会議。これまでに4回開催された。

- 第1回：米国・デンバー(1999年)
- 第2回：スウェーデン・ストックホルム(2003年)
- 第3回：スイス・ベルン(2007年)
- 第4回：カナダ：トロント(2012年)

(第4回は当初2011年に日本での開催予定で準備を進めていたが、東日本大震災により中止となり、翌年カナダにおいて開催された)

今回も、フィンランドやスウェーデンなど地層処分事業の先進的な国に加えて、ルーマニアやハンガリー、台湾など比較的新興の国から政府や規制関係者、実施主体のトップや上級管理職が参加した。会議の進め方は全てパネル討論式で実施され、パネリストが順にそれぞれのプレゼンを行った後、パネリスト間での質疑応答・議論が行われ、会場からの質問も受け付けた。

Session 1：各国の地層処分事業

スイス、英国、米国、スウェーデン、カナダ、日本から事業の現状について報告があった。事業の進展に拘わらず、様々なステークホルダーとの信頼醸成が、共通の課題として挙げられていた。パネルディスカッションでは、実施主体と規制機関の関係や、東電福島第一原子力発電所事故を踏まえたPA(パブリックアクセプタンス)の在り方、SNSを活用した若者への情報提供や教育分野における取り組みについて議論があった。事業が進展している実施主体の課題や技術開発の方向性などの情報を得ることができた。

Session 2：フランスにおけるCigéoプロジェクト

フランスが進めている地層処分プロジェクトCigéoについて情報提供があった。プロジェクトを実施するための地域の選定経緯や今後の処分施設の建設プロセス、立地地域における理解活動などについて説明があった。パネルディスカッションでは、安全性の説明方法やコスト算出の議論が中心であった。本パネルディスカッション以外においてもコスト算出については注目のテーマであったことから、地層処分事業進展における重要項目のひとつであることを認識した。

Session 3：処分事業を進めるためのステークホルダー間の対話

OECD/NEA、カナダ、ハンガリー、フランスから、規

制機関や一般公衆を対象とした対話活動等の事例について、国際的な場での議論や事業のトン挫の経験などさまざまな視点からの報告があった。パネルディスカッションでは、処分事業の期間を踏まえると若い世代の参画促進が重要であることや、早い段階からの規制機関の関与が一般公衆の信頼醸成に重要であるとの情報提供があった。各国の事業進展における規制機関の役割の重要性を知ることができた。

Session 4：地層処分事業に対する国際協力の付加価値

国際機関(OECD/NEA, ICRP, IAEA, EC, IGD-TP, EDRAM)から、現在進めている国際研究プロジェクトについての説明があった。これらのプロジェクトを効率的に運用することで、自国のみで実施する場合には高額となる研究開発費を削減することができると考えられ、海外協働プロジェクトへの参画に関する戦略構築が重要と考える。

Young Professionals 会合

今回、特別Sessionとして、各国の若手技術者等を招へいし、若手のモチベーション向上のための方策や地層処分の分野への長期間の関与について議論した。

参加者からは、責任ある仕事をどんどん若手に任せてほしい、大学や外部の研究機関で研究などをして、再度復職できるようなシステムがあると良いなど意見があり、このような活動は、各国の若手の状況や考え、課題などを共有することができ有意義で、より良い仕事環境を構築するために重要な機会であるとの認識を持った。

ブース展示

日本の地層処分事業を紹介するポスターや紹介VTRの展示を行った。日本が行っている移動展示車や対話活動に対して興味を持っていただき、質疑応答を通して情報交換を行うことができた。

最後に、本会議のまとめがあり、成功へのかぎは、全てのステークホルダーの関与を継続すること、信頼性と独立性を有する規制機関、専門的な実施主体、信頼性の維持、地元住民とのwin-winの関係、地元レベルおよび国レベルの議員のサポートなどが挙げられるとして締めくくった。

(原子力発電環境整備機構 石田圭輔,
2017年4月4日記)

新刊紹介 高速スペクトル原子炉

Alan E. Waltar, Donald R. Todd, Pavel V. Tsvetkov(編著),
高木直行(監訳), 717p. (2016.11), ERC 出版(定価 5,400 円)
ISBN 番号 978-4900622586

本書は、名著と言われる「FAST BREEDER REACTORS」の改訂版であり、原著者の一人である Alan Waltar 氏が改訂作業に携わっている。訳書は 700 頁を超え、大きく、序論、中性子工学、システム、安全性、その他の高速炉システム、そして付録に分かれている。評者はこのうち安全性まで(500 頁程度)目を通した。

あくまで個人的な感想であるが、本書も名著と言えるであろう。高速スペクトル炉のリファレンス本として、本棚の手の届きやすい場所に配置している。

中性子工学、燃料・材料、熱流動、プラントシステム、安全性に関して、基本的な事柄を含めつつ、高速炉に特有な点に分かりやすく述べられている。燃料ピン熱設計や燃料の概論、炉停止失敗事象の箇所は大変読みやすかった。核変換性能の比較など、最近の知見を多く取りこんだ箇所もあった。多くの数式を用いた若干複雑な内容となっている箇所もある

が、理解はできなくても雰囲気を感じることは出来た。

訳書ではあるが、違和感無く読み進められたのは、それぞれの分野に造詣が深い人々が訳者として選ばれたからであろう。日本の高速炉開発の中心を担っている訳者の方々の熱意に深い敬意を表したい。

高速スペクトル炉の商業化が実現するとすれば、少なくともそれは一、二世後と考えられ、まさにこれからこの分野に参入する若い人々が主役となる。本書がそういった人々へのエールになることを期待するものである。このような形での若い世代への技術継承は極めて重要ではあるが、若い世代との接点としての役割を担う大学教員の一人として最近感じているのは、将来の進路を迷う若い世代は、原子力に携わる我々現役世代に対して「人として真に信頼に足るか」という視点を持ち、それも自身の将来の判断材料にしているのではないかと、いうものである。読者の皆さんは、若い世代の信頼に応えられていると、胸を張って言えますか？
(北海道大学・千葉 豪)



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—
(5月2日第11回編集幹事会)

【論文誌関係】

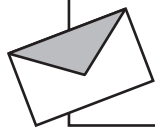
- ・平成 29 年 3 月 16 日～4 月 15 日に英文誌へ 35 論文、和文誌へ 6 論文の投稿があった。
- ・英訳出版 WG から、経費の仮見積もり結果が報告された。作業が膨大になるので、専属の臨時職員の雇用を要望することとした。
- ・次年度の論文誌編集委員候補者追加分を承認した。
- ・投稿ガイドラインの Article と Technical Material の説明文の原案を検討した。
- ・Actinides 2017 国際会議担当者より、会議論文集を Progress in Nuclear Science and Technology により出版したいとの申し出があり、これを承認した。
- ・ロシアの研究炉関係国際会議主催者から JNST 特集号として会議の選抜論文を掲載してくれないかとの問い合わせがあった。

【学会誌関係】

- ・委員長から次年度理事への引継ぎ項目をまとめた申し送り事項の素案の説明があった。
- ・平成 30 年度以降に公開予定の J-STAGE での記事の公開時期については、2 年経過後となっているが、編集委員会では半年経過後にする案が出ており、委員長が今後関連委員会に確認するという説明があった。
- ・編集長より、3～5 月号のアンケート結果をまとめた原稿の説明があり、至近号に掲載予定。
- ・次年度の学会誌編集委員会の組織と役割について承認された。
- ・巻頭言、時論、各記事の企画、進捗状況について検討した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

理事会だより



大学における教育・研究環境の危機的状況

—2017年春の年会 理事会セッションの背景について—

1. はじめに

理事会では、本年春の年会(於 東海大学)において、「今、大学における研究・教育現場から訴える」と題したセッションを教育委員会との共催により開催致しました。このセッションは、①研究炉に関わる研究環境と課題、②核燃・RI施設に関わる研究環境と課題、③学部・大学院に関わる教育研究と課題、について現場からの報告を行い、その後のパネルディスカッションにおいて、今後の進め方について議論するものです。このセッション全体の報告は、別途本誌に掲載される予定ですので、本稿では主に、理事会がこのセッションを開催することになった背景について、最新の状況も含めて述べることにします。

2. 原子力施設を取り巻く最近の状況

国内の研究用原子炉全てが、新規制基準への適合性確認のために運転を停止してから、約3年が経過しました。本年3月17日に近畿大学原子炉が、研究炉として初めて施設定期検査等に合格し、4月中旬より再稼働することとなりⁱ、ようやく再稼働の具体的な見通しが得られるようになりましたが、長期間にわたる停止は、研究炉を利用した研究及び人材育成に大きな影響を与えています。また、昨年10月には日本原子力開発機構(JAEA)より、国内唯一の材料照射炉であるJMTRの廃止が公表され、安全研究を含む今後の原子力研究の在り方を大きく見直す必要が生じています。さらに、研究炉を今後も維持するためには、使用済燃料の処理処分や施設の老朽化・廃炉措置に関する課題を解決する必要があり、大学などの一研究機関では対応しきれない状況となっています。

核燃料や放射性同位体を取り扱うことのできる施設(核燃・RI施設)においても、予算や人員の減少に伴い、施設の廃止あるいは規模の縮小が進んでいます。JAEAでは、上記JMTRの廃止とともに、所管する約半数の核燃・RI施設の廃止計画を公表しましたⁱⁱ。一方、大学においても、核燃・RI施設の廃止、縮小が進められており、これら施設を用いた研究や人材育成への影響が懸念されています。

そのような状況の中、原子力規制委員会では、昨年1

月に実施された国際原子力機関(IAEA)による総合規制評価サービス(IRRS)ⁱⁱⁱを踏まえた原子炉等規制法の改正作業が行われ、本年4月7日の参議院本会議において、「改正原子炉等規制法^{iv}」が賛成多数で可決・成立しました。この法改正は、原子力施設の検査制度の見直しを柱としており、事業者が主体となって検査を実施する制度が3年以内に実施されることとなります。このような検査制度を適切に運用するためには、規制する側とされる側(事業者)に高いレベルの技術的能力が必要となりますが、電力会社のように施設の維持管理に多くの人員と予算を割くことが困難な大学にとっては、この新制度は非常に大きな負担になる可能性があります。また、放射線障害防止法の改正も併せて行われており、RI施設においても、今後は防護措置の義務付け、テロ対策の充実・強化が要求されます。この新たな要求事項に対応できないRI施設は、今後使用が制限されることとなります。

3. 本会の対応について

このような原子力施設、特に大学の施設の、危機的な状況を踏まえ、本会では、昨年より活動を開始した「原子力アゴラ」特別専門委員会(本年度より調査専門委員会に変更)の下に、研究炉の役割について調査・検討を行う「研究炉等の役割検討・提言分科会」を立ち上げ、これまでに教育・人材育成の観点からの研究炉の実績調査を行い、その結果を踏まえた提言を中間報告書として取りまとめました。また、本年1月には、「大学等核燃およびRI研究検討・提言分科会」を設置し、国内大学の核燃およびRI施設を用いた研究環境についての調査を開始しました。

今回の理事会セッションでは、上記2つの分科会活動を踏まえた施設(ハード)面の報告に加え、学部・大学院という教育現場のソフト面についての現状と課題の報告も行われ、実験・実習を通して現象を体得することの重要性が改めて示されました。最後のパネルディスカッションでは、十分な時間が取れなかったものの、上に述べた研究・教育環境の現状に対する危機意識を多くの関係者で共有することができ、今後予定している提言の取りまとめに向けた第一歩を進めることができました。

(中島 健)

ⁱ 近畿大学原子力研究所ホームページ(2017.3.17付)より
http://www.kindai.ac.jp/rd/research-center/aeri/download-data/news_16.pdf

ⁱⁱ 2016年10月に施設中長期計画の「案」を策定、本年4月に「計画」として決定した。

ⁱⁱⁱ INTEGRATED REGULATORY REVIEW SERVICE (IRRS) MISSION TO JAPAN, IAEA-NS-IRRS-2016.

^{iv} 正式には、「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」