

巻頭言

1 中間貯蔵事業と立地地域

宮下宗一郎

解説

23 原子力防災の現状と課題

1F事故から8年たち、国内では原子力防災のための取り組みが進みつつある。原子力学会の理事会と社会環境部会は春の年会でこれをテーマにしたセッションを企画し、防災に関する状況を共有し、議論を深めた。

荒木真一, 土信田法男, 原口弥生ほか



28 中国における原子力開発動向 —原子力発電動向を中心に—

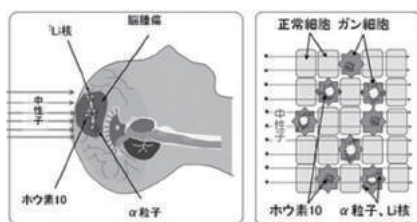
中国はエネルギー資源に恵まれているにも関わらず、原子力発電開発に積極的だ。昨年には世界で初めてAP1000とEPRの発電を開始させた。安全規制体制は整い、原子力事業者、原子力産業も順調に育ちつつある。

渡辺 揺, 江川弘和

35 中性子を用いた次世代型がん放射線 治療: ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) —原子炉から小型加速器へ—

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は原子炉ベース照射システムで行われてきたが、2012年には加速器ベース照射システムを用いたものが登場した。BNCTの歴史的、技術的背景と、BNCT施設の現状を紹介する。

櫻井良憲, 熊田博明, 鬼柳善明



BNCTの原理

時論

2 太陽光発電業界と原発業界が 共存する方法を考える

宇佐美典也

4 知る立場から知らせる立場へ

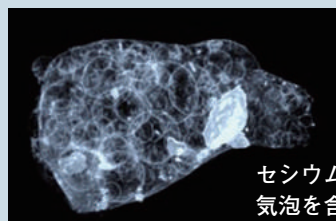
木越康二

特集 福島第一事故由来物質に対する 環境モニタリング手法の最先端

12 福島第一原発事故で放出した放射性粒子

この事故では過去の原子力災害ではみられなかった不溶性セシウム粒子という、新たな種類の放射性粒子が見つかった。

佐藤志彦



セシウム粒子の中には
気泡を含むものも

15 福島第一原子力発電所事故に伴う 海底土広域測定手法

放射性セシウムの面的分布を把握できる測定手法を用いて、福島近海の地形に応じた、広域分布を測定した。

大西世紀, 鎌田 創, 浅見光史

19 事故7年後の福島の放射線分布状況 および環境モニタリング技術の最前線

原子力機構では環境中での放射線モニタリングにより、避難指示区域解除などの決定に利用される情報を提供している。

眞田幸尚

40 Column

「浜岡原子力発電所を訪ねて」
「ソーシャルインフルエンサーと原発」
「『天文学的』なお値段」
「『選択』を引き受けて生きるということ」
「市民、そして中・高校生と共に」
「エネルギー利用の心理学」

井内千穂
妹尾優希
野間美智子
服部美咲
坂東昌子
渡辺 凜

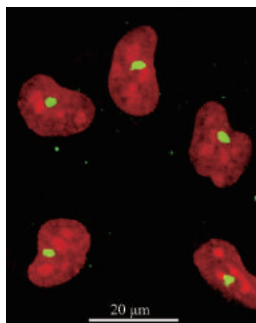
解説シリーズ

最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構(4)

43 「量子生命科学」の発進

量子生命科学とは、極微の空間・時間スケールや超高感度での生体内部の観測や生体分子の計測、生命機能のモデリングにより、生命全般の根本原理を明らかにし、産業応用を図るものだ。

藤巻 秀ほか



ヒト肺がん細胞核を陽子線マイクロビームで照射し、DNA二本鎖切断が生じた部位を可視化した(明緑色部分)。図中 Bar は 20μm。

解説シリーズ 安全かつ効率的な廃止措置に向けて(3)

48 米国の原子力発電所廃止措置の教訓

廃止措置を完了した商業炉は世界で15基あり、そのうち12基が米国にある。世界で最も廃止措置が進んでいる米国から、私たちは何を学ぶことができるのか。

コリン・オースティン、山内豊明

報告

60 災害に備えるために必要となる原子力関係者の倫理(その1) 倫理規程制定・改定の歴史と2018年改定のポイント

会員のより高い倫理観の醸成と行動を目指した本会倫理委員会の活動について、1F事故後の倫理規程の改定および研究会等の開催にスポットを当て、2回にわたって紹介する。

倫理委員会

視点 社会を語る(2)

68 <社会>を語る二つのアプローチ

齋藤圭介

理事会だより

69 2019年春の年会「理事会セッション」を終えて

中島 健

6 NEWS

- 原子力学会、創立60周年でシンポ
- 経団連、電力システム再構築で提言 ほか

連載講座 核融合トリチウム研究最前線(第10回)

55 炉材料表面および内部のトリチウム分布

今回はトリチウムイメージングプレート技術一切断法を用いて、核融合炉のプラズマ対向壁材料や真空容器材料の候補材である金属、界面を含む異種金属被覆材料の表面から内部のトリチウム濃度分布を可視化・定量化した結果を紹介する。

大塚哲平

FOCUS 国内外の原子力教育事情(4)

64 東京大学原子力国際専攻での教育の取組み

藤井康正

談話室

66 日々是好日ー福島浜通りだより(1) ほんと安らぐ村の暮らし

吉川彰浩

67 リケジョの思い(4) スパゲッティをゆでながら

口町和香



- 27 From Editors
- 70 会告「第9回総会」のご通知
- 71 会報 原子力関係会議案内、人事公募、共催行事、AESJ-NEWS 配信のご案内、「2019年春の年会」学生ポスターセッション受賞者一覧、和文論文誌(Vol.18, No.2) 目次、英文論文誌(Vol.56, No.6) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

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

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

中間貯蔵事業と立地地域

巻頭言



むつ市長

宮下宗一郎（みやした・そういちろう）

東北大学法学部卒業。国土交通省、外務省
在ニューヨーク日本国総領事館領事を経て、
現職。

2018年12月、むつ市に立地する使用済燃料中間貯蔵施設の事業開始時期が延期されました。これが7回目の延期であり、私が市長となってからは3回目のことです。事業者は、新規制基準適合性審査の手続きの中で無理な目標を立てさせられ、それを達成できずに謝罪するということが繰り返されてきました。この約束のあり方そのものを見直す必要があると思います、今回、補正申請上では2021年度となっている事業開始時期については約束しませんでした。設工認の認可後に示されることとなる内容をしっかりと検証した上で約束し、この事業を前に進められればと思っています。

審査は、人の想像力や科学の限界を超えて安全性を突き詰めており、前例がないことから慎重になり、長引いているという印象を持っています。しかしながら、延期が繰り返される度、誘致した立地地域の民意や心が離れていくこともまた実感しています。

政治の責任とは何かと考えると、「約束を守ること」だと思っています。「国策への協力」という観点から同様に、それはブレません。ただ、地域振興として約束されていたものも進んでいないのが現状です。事業の遅れは、地域施策の根本である財政計画にも影響を及ぼしており、これが地域経済に広く影響しています。それが無ければ、もっと豊かな生活を組み立てる施策ができたのではないかと思います。

国策として、事業者が期間を定めて進めている。これは、地域との約束でもあり、事業者や原子力規制委員会を含めた国は、その約束が守られるよう対応する必要があると思います。

一つの産業に頼っているまちは、産業構造の転換により衰退します。エネルギーも技術の進展によって大きく変わる可能性があります。中間貯蔵事業が行われる約50年は、原子力政策においても核燃料サイクルを進めることが約束されています。地域づくりに関して、中間貯蔵事業の最も大事なところは、この50年という期限を守り、搬出後の地域をどうイメージしていくかということです。地域はその後も自立していなければなりません。

むつ市は“中間貯蔵施設も”ある地域です。他に良いものが沢山あります。カウントダウンが始まるのは事業開始です。50年という期間は、長い歴史の中ではあっという間であり、その中で産業構造の転換に取り組んでいなくてはなりません。

また、事業の志や正しさについて説明できなければ、中間貯蔵事業を進めることはできません。大事なことは、自分の故郷が国のエネルギー政策を支える地域であることに、子ども達が大人になってからも誇りを持てるよう、どう表現していくかだと思います。

原子力政策は、国そのもののあり方をどうすべきかが根幹にあります。島国の経済大国で、エネルギー需給をどう分担していくのか。国民と国家、地域と地域が、それぞれに課題を抱える中で協力しあわなければなりません。「立地」といわれるものは、自衛隊を始め、皆同じような構図ですが、福島第一原子力発電所の事故後、それを分断するような論理が横行しているのが現状です。これを逆転し、「家族的な紐帯」で国民と国家、地域と地域がこれまで以上につながっていくことを期待しています。

（2019年3月26日記）



太陽光発電業界と原発業界が共存する方法を考える



宇佐美 典也 (うさみ・のりや)

作家、コンサルタント

岡山県立大学客員准教授

1981年生まれ。東京大学経済学部卒業後、2005年経済産業省に入省。2012年に退職し、太陽光発電事業や半導体分野でのコンサルタントなどを務める。著作は「逃げられない世代」(新潮新書)など。

私は2005年から2012年まで経済産業省で7年半ほど働き退職し、その後2012年から現在に至るまで事業者として、コンサルタントとして太陽光発電業界に携わり続けてきた者である。職歴から原子力発電に関して一般的な知識は持ち合わせてるつもりではあるが、決して専門家というわけではない。

過日「再生可能エネルギーの未来」をテーマにした討論番組で原子力の専門家と対論することがあった。当日私は再エネ業界からの視点で論陣を張ったのだが、議論を通して「外から見える業界像と中から見える業界の現状」というものは全く異なるものだ」と感じた。その点は、対論者も原子力業界でも同様との見解だった。再エネと原子力の共存のあり方を探索し提言することが今、日本のエネルギーの将来のあり方を問う上で欠かせないという趣旨のもと本論を展開する機会を得るに至った。

I. 外から見える再エネ業界：業界活動の活発化

どうやら外から見ると最近の再エネ業界は「元気」に映るらしい。

確かに最近の再エネ業界は政策提言活動が活発化しており、それがニュースとして報じられることも多い。例えば2018年11月に立ち上げられた太陽光発電事業者連盟(ASPEn)の設立総会は華々しいものであった。会場は城南信用金庫本店で、様々な事業者が一堂に会し、小泉純一郎元総理と中川秀直自民党元幹事長が来賓として出席、二人とも「脱原発」「原発ゼロ」に対する決意を述べ、それが各種媒体で報じられた。

こうした報道を外から見ると確かに太陽光発電業界は順風満帆で勢いづいているように見えるのかもしれない。しかしながら現実は大きく異なる。数年前ならともかく、今は太陽光発電業界に籍を置くもの誰しもが、多かれ少なかれそれぞれの立場で先行きに対する経済的不安を感じている。とはいえ一口に太陽光発電業界といっても立場は色々あるわけだが、ここでは代表的に、発電事業者、設計・建設事業者(Engineering, Procurement and Construction: EPC)、地方銀行、それぞれの事情について簡単に解説していくことにしたい。

II. 発電事業者、EPC、地方銀行、それぞれの事情

このうち最も追い詰められているのは太陽光発電専業のEPCである。理由はシンプルで、年々FIT(固定価格買取制度)の買取価格が下落していること、系統の空き容量が不足してきていること、過去の権利取得案件に対する規制が年々強化されていること、などの複合的な要因で新規プロジェクトがほとんど成立しない状況が続いているからだ。ほとんどのEPCはこの先2~3年の工事案件はあるが、その後のスケジュールは白紙という状況である。2014年以降、太陽光発電関連事業者の倒産ⁱは年々増加しており、このままの状態が続けば多くのEPCは存続困難に陥るだろう。彼らの危機感は相当なものである。

続いて発電事業者についてだが、太陽光発電事業者は、あくまで傾向としてだが、いわゆる「脱原発」寄りのスタンスを最も取りやすい。なぜなら原発の再稼働は太陽光発電事業の採算性悪化に直結するからだ。太陽光発電は人為的に発電量がコントロールできない自然変動電源なので、系統網に導入しすぎると必然的に需要を超えて電気を供給してしまう。そこで太陽光発電が需要を超えて発電しそうな場合には出力制御の措置が系統側からの指令で取られることになるのだが、これは事業者側の視点から言えば「売電量が減る」ということである。FITを利用した太陽光発電事業の売上は単純に「売電価格×売電量」で決まるので、売電量の減少はそのまま事業の収益性が落ちることに繋がる。今後しばらくは太陽光発電所の仕掛け案件が完成して増えていくことが見込まれるが、原子力発電の再稼働が進めば進むほど押し出される形で太陽光発電の出力制御量が増えることになるため、太陽光発電事業者は経済的事情で「脱原発」のスタンスを取りがちになる。

ⁱ <https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1901/11/news038.html>

最後に地方銀行の事情についてである。近年のゼロ金利政策の影響で、地方銀行は既存貸出先の金利低下に苦しんでいる。金融庁の調査では過半の地銀が本業の貸出業務で赤字という状況である。こうした地銀の経営問題はスルガ銀行の不動産の不正融資問題の温床にもなった。既存貸出先の金利が低下し、不動産融資にも限界が見えてきている地銀にとって、太陽光発電事業、特にメガソーラー事業は非常に好ましい貸出先である。事業として安定しており、なおかつそれなりの金利も見込める。地銀にとっては「仮に太陽光発電事業が縮小するというなら代わりの貸出先はなにかあるのか？」という議論になるだろう。

Ⅲ. 原子力発電業界と太陽光発電業界が共存するために考えるべきこと

このように私から見る限りは、太陽光発電業界の最近の政策提言や業界活動の活発化は、具体的な経済的不安に根ざしたもので、決して狂信的な再エネ礼賛主義に基づくものではない。従って仮に原子力業界として太陽光発電業界と共存していく道を選ぶとしたら、対話しながら彼らの不安自体を取り除いていく必要がある。そこでプレイヤー別に私から見える論点を以下に提示していきたい。

1. EPC

まず「対 EPC」について考えよう。

彼らの持っている潜在的な不安は「近い将来、太陽光発電の工事案件がなくなってしまうのではないか」というものだ。実際にこのまま行けば前述した通りメガソーラーの既存の権利は消滅し、売電価格が下がる中で新規プロジェクトも成立しなくなる。そこで今後注目されるのが自家発電用途向けの太陽光発電市場の拡大である。いささかマッチポンプのようであるが、原子力発電の長期停止と再エネ賦課金の国民負担が増したことで、2011年以降大幅に我が国の電気料金は上昇した。高圧用途で概ね 20 円/kWh といったところであろう。他方太陽光発電のシステム費用は緩やかながら年々低下を続けており、この結果自家発電用途向けの太陽光発電の導入が経済合理性を持つようになってきている。仮に商業施設向けの省エネ規制の強化や、非製造業の再エネ賦課金の負担割合を増加させるような政策が実行されれば、自家発電用途向けの太陽光発電市場は拡大し、EPC としても生き残りの道が見えてくることになるだろう。

2. 太陽光発電業者

続いて「対太陽光発電事業者」について考えよう。

太陽光発電事業者が一番気にしていることは「原発再稼働に伴う出力制御量の増加」である。前述の通り原発が再稼働するとベース電源が増加するので、その結果ピーク電源である太陽光発電の出力制御量が押し出される形で増えることになる。これをある程度軽減する方法としては、太陽光発電の供給超過に伴って生じる余剰電力を揚水発電の揚水動力源として活用する方法があり、現在でも実行されている。しかしながら仮に原子力発電の再稼働が進むと、かつてのように揚水発電の揚水動力源が夜間の原子力発電の余剰電力中心になってしまう恐れがある。そうなるとなおさら太陽光発電の出力制御量が増えることになる。原発の再稼働が進むにつれ太陽光発電の出力制御量が増えていくことは避けられないことではあるが、揚水発電の運用方針に関しては太陽光発電業界に有利になる運用を認めることで、太陽光発電事業者の不安を軽減することができないか、原子力発電業界としては検討する価値があるように思える。

3. 地方銀行

最後に地方銀行についてであるが、これは要は地銀にとって原子力発電事業が太陽光発電事業者に変わる優良な貸出先になりうるかどうか、という問題である。これには原子力発電事業を安定させるための制度的議論が必要であろうが、この点については私は特段の専門性を有していないので、皆さんに議論を任せることにしたい。

以上、長々と「太陽光発電業界と原子力発電業界の共存」をテーマに述べてきたが、最後にいささか私見を述べることにしたい。

私は太陽光発電業界に身を置くものであるが、現状のような原子力発電業界と全く対話がない対立構造が続くことは双方にとって、また国民にとって望ましくない事態を招く可能性が高いと考えている。それは薄々多くの事業者が感じていることで、2018年には太陽光発電業界には前述の ASPEn の他にも、やや ASPEn に比べれば穏健な立場の日本再生可能エネルギー事業者協議会 (JSEC) という業界団体も立ち上がって政策提言活動を活発化させている。

個人的にはまずは原子力発電業界としてこうした業界団体と対話のチャンネルを作って、少しずつ日本のエネルギー政策に関して共通したビジョンを持っていくことが重要なように思える。

(2019 年 5 月 5 日 記)



知る立場から知らせる立場へ



木越 康二（きごし・こうじ）

東京学芸大学附属国際中等教育学校
5年生

東京学芸大学附属国際中等教育学校5年生。
昨年度より、原発問題に関わる「放射線の生
体への影響」や「地層処分」に関する講演会や
プログラムに参加している。2019年2月に
開催された「地層処分事業の理解に向けた選
択型学習支援事業交流会」にも参加し、高校
生の立場として発表した。東京都出身。

昨年より、学校の校外学習で原発・放射線・地層処分などの問題について理解を深めてきた。はじめに、学びの場を提供してくださる方々、学生にもわかりやすいように知識を教えてください方々、そのような人々とかかわりを持ってくれた同級生、校外学習の参加を勧めてくださった先生方に感謝したい。

問題の所在

福島原発の事故以降、原発や放射線に関する情報はニュースや新聞などでも取り上げられた。それ以降、原子力発電の割合が激減したり、各地で放射線量を測ったりするようになった。しかし、地層処分についてはどうだろうか。地層処分に関しては私も昨年まであまりよく知らなかったというのが正直なところだ。私が知らなかったように、多くの人が地層処分について知らないということがこの問題の根底にはあると思う。この問題を解決する第一歩として、一人でも多くの人が地層処分について知ることが求められる。今回は地層処分に焦点をあてて述べていきたいと思う。

地層処分について多くの人に知ってもらうことが必要であるが、先日参加した地層処分事業交流会では多くの人が情報共有について頭を悩ませているのがわかった。私もこの問題に関わった以上、何かしたいとは思いますが何をどう共有すればいいのかよくわからない。情報共有をするうえで、何を発信するのかということと、どうしたらそれをみてもらえるのかという二つの問題があると思う。

理想と現実

私たちは何を知ってもらうべきなのだろうか。そもそも、「知る」とはどこまでの知識があれば知っていることになるのだろうか。私は昨年から地層処分に関する講演会やプログラムに参加してきたが、私もまだまだわからないことは多い。「知る」目的は一人でも多くの人が地層処分について知って、みんなで考えることであり、それ

が解決への第一歩なのだと思う。解決への道を考えたとき、単に科学的に地層処分の仕組みや安全性を理解するだけでは十分ではないように思える。「地層処分問題の解決」の定義は難しいが、一つのゴールとして、最終処分場を決めることが挙げられる。そのためには科学的なアプローチだけではなく、国政や自治体事情などを理解する社会的なアプローチも大切になってくると思う。

社会的アプローチの一例として、地層処分のプログラムの一環で行ったディスカッションには考えさせられるものがあった。全国各地から集まった中学生に「自分が市区町村のトップだったら、最終処分場を受け入れるか？」という問いで議論してもらった。多くの人は受け入れないという考えを示した。いくら安全といえども、もしも何かの問題が起きたときにどうしようもなくなってしまうということや、住民の支持を得るのが難しいと思うということが理由として挙げられた。数少ない受け入れる派の考えは、自分の自治体を受け入れれば地層処分の問題が一步前進するというものだった。議論の大勢は、どこかに地層処分を受け入れてほしいけれど自分の住んでいる地域には来てほしくないというものだった。このディスカッションはまさに社会の縮図のような状態だったように思える。私はこのディスカッションにファシリテーターとして参加したが、ここで感じたのは理想と現実のギャップだ。どこかの自治体を受け入れないとこの問題はゴールへと向かうことができないということディスカッションに参加していた人はわかっていた。しかし、実際に自分の住んでいる地域になるとどうしても賛成するのが難しくなってしまう。また、自治体の中で受け入れを考えている人がいても、多くの反対派がいることで、実際には手を挙げてほしいのに手を挙げられない自治体もあるのではないかと思った。

そのプログラムの一環でNUMO(原子力発電環境整備機構)の方から地層処分についての講演を聞いた。その場にいた中学生や私たち高校生にも理解できるようわかりやすく丁寧な説明をいただいた。私たち人間が数万



図1 中高生で地層処分について考えるプログラム
(2018年12月22~24日)

年という単位で地上管理することは難しく、宇宙処分や海洋底処分など様々な処分方法を検討したうえで、地層処分が適切な方法であるということは納得のできたことだった。また、原発が稼働するにしろしないにしても、過去に出た使用済み核燃料がすでにあるため、この地層処分問題は避けて通ることができないというのも印象に残った。安全性についても、地下は地震の影響を受けにくいことやガラス固化体に異なる4種類のバリアを使っているということを聞き、私たちは安心していただけを覚えている。しかし前述のディスカッションがあったのはその翌日である。

住民の多くが反対するのは地層処分についてあまりわからないが、原発や使用済み核燃料という言葉に対して抵抗があるからかもしれない。地層処分についてしっかりと仕組みや安全性を知ってもらうことができれば一定の理解が得られるのではないかと。このようなことがNUMOの方の講演で言われていた。しかし、地層処分についてひと通りNUMOの方から説明を受けたにもかかわらず、ディスカッションで反対意見が多かったことから、十分な説明があっても住民の支持を得て地層処分を進めることはとても難しいとわかった。私がもどかしいと思ったのは、NUMOの方は安全性について説明するうえで、ゼロリスクはないということを絶対に言うておかなければいけないことである。原発神話の前例があるように「絶対安全」という説明ほど信頼できないものはないと思うので、私にとってはゼロリスクではないということに説得力を感じた。ゼロリスクはないけれど、限りなくリスクをゼロに近づける努力をしているというのがNUMOの主張だと私はとらえているが、ゼロリスクはない＝安全ではないという考え方をしている人が一定数いるというのも知っておかなければいけない。

何処へ向かうべきか？

意見を一つにすることは難しい。しかし、意見が違っていてどう解決に向かうかが大切だと思う。今問題なのは

意見が一致しないことではなく、意見を言う舞台に立っていない人、意見を聞く準備ができていない人がたくさんいるということだ。NUMOの方が講演会でおっしゃったように、地層処分は避けては通れない。どこかで必ず解決しなければいけない問題であり、そのタイムリミットも残り少ないということが多くの人の共通認識になれば、解決への第一歩が踏み出せると思う。

私が知っていることや、私が実際に行動できることは限られているが、私でもできる情報共有の内容として、地層処分は避けては通れないということを何かしらの方法で発信していきたいと思う。

これをどのように発信するかということも難しい問題である。例えば友達とつながっているSNSで生真面目に地層処分問題についての問題提起や自分の考えを述べたところで誰も見ない。逆にもし自分のフォローしている人がそんなことばかり発信していたら、わたしはフォローを解除してしまうと思う。たしかにSNSは私たちの世代では大人気で友達もみんな使っている。かといってみんなが見たいのは地層処分の投稿よりも芸能人の投稿なのだと思う。手段としては有効でも、それを見てもらうためには魅力的な何かが必要になる。しかし地層処分の情報共有は人を楽しませる目的ではないのでそこが難しいところである。

多くの人に知ってもらうという点では、前述の地層処分のプログラムにおいて、広告という手段を挙げる学生もいた。しかし、これが難しいのもわかる。現代の広告は一目でわかる内容が求められている。そのために文章を簡略化したキャッチコピーや強烈なビジュアルを用いているのだ。その点では地層処分に関する内容は一言や二言では伝えきれない。テレビのCMにしても、ネットの広告にしても同じことがいえてしまう。情報の発信方法やどうしたらみてもらえるのかということについては、わからないというのが正直なところである。

おそらく本稿を読んでくださる方々も情報共有に苦戦しているのだと思う。地層処分に関して一定以上の理解をするためには何度も繰り返し講演会やプログラムに参加し、一つ一つ理解をしていくしかないと思う。そのために情報共有の内容もある程度絞って少しずつ伝えていくしかないのではないかと。また、多くの人に知ってもらうことは、解決に向かうためのプロセスであり、ゴールではない。地層処分問題が一定のゴールにたどり着くためには、情報共有のその先のステップが必要となる。危機感の共有ができれば意見が一致することはなくても、一致しない中でどのように解決に向かうことができるのかを話し合えるようになる。まずはその段階に行きつくために、これからも私にできること、私にできる情報共有について模索していきたい。

(2019年3月10日記)

福島第一事故由来物質に対する環境モニタリング手法の最先端 1

日本原子力学会の放射線工学部会は 2018 年秋の大会で、福島第一事故由来物質に対する環境モニタリング手法の最先端に関する知見をまとめた。本稿はその内容をもとに、登壇者に改めて執筆をお願いしたものである。

福島第一原発事故で放出した放射性粒子

日本原子力研究開発機構 佐藤 志彦

福島第一原子力発電所事故では大量の放射性物質が環境中に放出したが、チェルノブイリ原発事故のような炉心が直に大気と触れるような事象は発生しなかったため、核燃料を主とした放射性粒子の放出はないものと考えられていた。しかし 2013 年以降、放射性セシウム (Cs) を取込んだケイ素が主成分の微粒子が報告され、Cs-bearing particle, 不溶性セシウム粒子などの名称で放射性粒子の存在が認知されるようになった。この想定になかった未知の放射性粒子に対し、さまざまなバックグラウンドを持つ研究者が、日夜、発生原因の解明を試みている。本稿では不溶性セシウム粒子がなぜ不思議な存在であるか、そしてどうして福島第一原発の廃炉で重要かを紹介する。

KEYWORDS: *Radioactive particle, Cs-bearing particle, Cs micro particle, Isotope ratio, Glasswool*

I. 福島第一原子力発電所事故と放射性粒子

放射性粒子とはその名の通り放射能を帯びた粒子のことで、原子力発電所事故などにより環境中へ放出されてきた。古くは 50 年代の核実験時にその存在が指摘されていたが、特に注目されるようになったのは、1986 年に発生した旧ソビエトのチェルノブイリ原発事故で、核燃料を主成分とするフェューエルホットパーティクルが欧州各地で見つかった。しかし福島第一原発事故ではチェルノブイリ原発事故と異なり、炉心が大気に露出する事故でなかったこと、文部科学省や大学などの調査でウラン、プルトニウムの放出量が極微量であることが確認されていたことから、放射性粒子の放出は問題視されていなかった。ところが事故初期に行われたイメージングプレート (IP) など、放射性物質の分布を可視化するツールを用いた研究で、スポット状の汚染が報告されており、ついに 2013 年に Adachi ら¹⁾ が 2011 年 3 月 15 日に茨城県つくば市で捕集した大気浮遊塵から Cs 含有粒子 (Cs-bearing particle) の存在を報告したことで、福島第一原発事故での放射性微粒子の放出が決定的となった。その後、研究が進むにつれセシウム粒子、Cs Micro Particle, Cs ボール等の名称で呼ばれるようにもなったが、本来であれば水に対し溶けやすい Cs が不溶性を示すことから、「不溶性セシウム粒子」と呼ばれることもある。本稿でも不溶性セシウム粒子に名称を統一して紹介

する。

II. 不溶性セシウム粒子の分離と分析

不溶性セシウム粒子を研究するためには、まず環境試料から粒子を分離する必要がある。一口に粒子といっても大きさはさまざまで、取り扱いが異なる。まず IP で不溶性セシウム粒子のある場所を確認し、数ミクロンメートルの粒子に対してはマイクロマニピュレーターや¹⁾、水とともに試験管等に入れ、放射能の有無をガンマカウンターで確認する操作を繰り返すことで分離する²⁾。一方、1 ミリメートルに迫る大きさの肉眼でも見ることのできる粒子は、GM サーベイメーターで 1 粒を追いかけることで分離することも可能である。分離した不溶性セシウム粒子は、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線スペクトル測定や、走査型電子顕微鏡 (SEM) 等の非破壊分析により、放射性核種、外観、構成元素などのキャラクタリゼーションを行う。さらにシンクロトロン放射光を用いた蛍光 X 線分析、X 線回折、XAFS、3D トモグラフィーなどで詳細な物性情報を得る。また長半減期核種の同位体測定では二次イオン質量分析 (SIMS)、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) などが用いられる。これらの手法はチェルノブイリ事故の時のホットパーティクル分析で成熟した技術であり、IAEA-TECDOC-1663 にも詳細が紹介されている。

III. 不溶性セシウム粒子の基礎物性

不溶性セシウム粒子の研究が進むにつれ、いくつかの特徴が明らかになってきた。まず粒子の主成分はケイ素

Radioactive particles emitted at the 1FNPS accident ; Overview of insoluble Cesium particle : Yukihiko Satou.

(2018 年 11 月 2 日 受理)

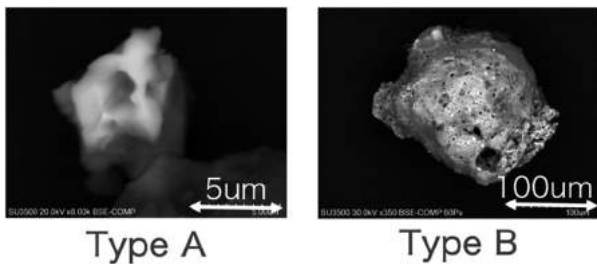


図1 代表的な2種類の不溶性セシウム粒子

であり、一部でウランを含む粒子も見つかっているが^{3~5)}、基本的に核燃料由来のホットパーティクルとは構成元素そのものが大きく異なっている。そして不溶性セシウム粒子が水に溶けない性質を示すのは主成分がケイ素だからに他ならない。これまでに2種類の明確に由来の異なる不溶性セシウム粒子が見つかった(図1)。 γ 線スペクトル測定によるCs同位体比($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$)の評価、および試料採取の行われた地点から、1号機と2、3号機由来であることが判明しており⁶⁾、発見された順番に2、3号機由来をType A、1号機由来をType Bと呼称している。なお最初に見つかったセシウム含有粒子はType Aに分類されているが、放出源となった原子炉は2、3号機のどちらかは特定されていない。これはセシウム同位体比が2、3号機で極めて似ていることに加え、放出時において水素爆発等の劇的な事象が発生しておらず、イベントからの推定が難しいためである。また見つかる粒子の大きさにも違いがあり、Type Aは数マイクロメートル程度の粒子であるのに対し、Type Bは1ミリメートルに迫る大きい物も存在している。これらの違いは不溶性セシウム粒子の放出した時の事象に依存しており、Type Aは比較的穏やかな放射性プルームに乗って3月14日深夜から放出されたのに対し、Type Bは3月12日午後の1号機水素爆発で大きな初速度が与えられて飛び出したためと考えられる。

Adachiらは最初に不溶性セシウム粒子を発見した時にセシウム含有粒子(Cs-bearing Particle)として紹介した。この名称はType Aに含まれる元素としてのCs濃度が濃く、SEMに付帯するエネルギー分散型X線解析(EDS)でCsを検出することができたからである。しかし後にType Bが見つかる γ 線としてのCsは検出されるが、EDSではCsが検出されなかつた。これはType Bの粒径は大きい⁷⁾が、単位体積あたりの放射能(比放射能)はType Aに比べ小さく(図2)、EDSでは検出限界が高いため、Csを検出することができないためである。なおそのような粒子中のCsは、シンクロトロン放射光の明るい光で蛍光X線分析をすることにより分布を把握することが可能である。

以上のように不溶性セシウム粒子は少なくとも二つの放出源から、異なるタイミングで環境へ飛び出した。それにも関わらず主成分は共通してケイ素という特徴があ

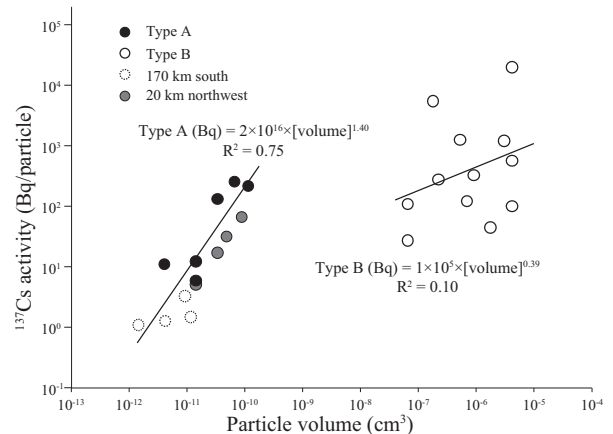


図2 2種類の不溶性セシウム粒子のCsと体積の関係

る。そしてこの種の放射性粒子は過去の原子力災害などでは報告されておらず、福島第一原発事故における固有の現象である。

IV. 不溶性セシウム粒子の内部構造

不溶性セシウム粒子は内部にも重要な情報が隠されている。2種類の粒子の内部構造には大きな違いがあり、Type Aは基本的に大多数の元素が密に詰まり、サブナノスケールの世界では均一な元素分布を示している。またFurukiら⁷⁾はType A粒子を透過型電子顕微鏡(TEM)でさらに微細な観察を行い、Fe-Zn酸化物のナノパーティクルを見出した。加えて一部の粒子からはウランのナノパーティクルも見つかっている。一方、Type Bは内部に無数の気泡が存在し(図3)、さらにFeやZn等の構成元素も特に関連性なく不均一な分布を示している^{6,8)}。また表面付近にCsを含むFeより重い元素が集まる特徴が確認されている。したがってType Aとは単純に大きさが異なるだけでなく、生成過程そのものが異なっており、その違いがCsの比放射能に違いにも現れていると推定される。

V. ケイ素の供給源

不溶性セシウム粒子の主成分はケイ素であるが、粒子ができるためにはまとまった量のケイ素が原子炉の近くで供給される必要がある。数多くのType Bを分析する

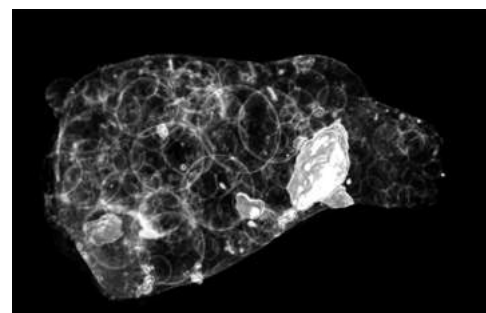


図3 無数の気泡を含むType BのCT像

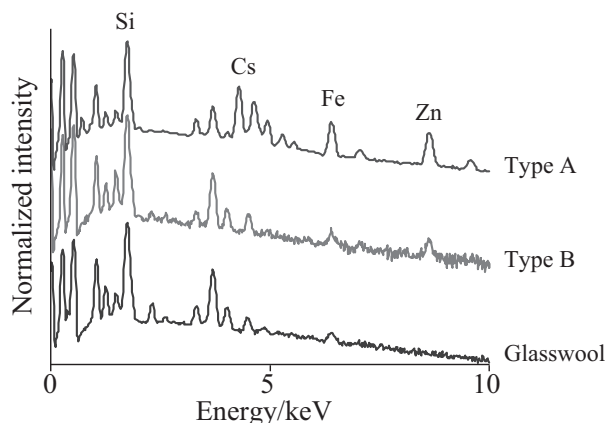


図4 不溶性セシウム粒子と断熱材のEDS スペクトル

なかで、粒子表面に数十マイクロメートルほどの太さの繊維状ケイ酸化合物が付着している粒子が複数見つかった。繊維は粒子の表面に溶け込むように付着し、元素組成も粒子と類似していた。ケイ酸繊維の太さ、原子炉という巨大熱プラントという特徴から、原子炉周辺で使用されている断熱材のグラスウールに着目し、EDSを取得したところ、グラスウールと Type B のEDSの結果はよく似ていた(図4)。またグラスウールの断熱材にCsが吸着する様子も確認された。さらに Type B の比放射能が Type A に比べ小さいのも、まず炉心から何らかの放出経路を経て格納容器の外まで流出したCsが断熱材に吸着し、水素爆発の熱と爆風により微粒子化して飛散する生成プロセスを想定すると、概ねケイ素の供給源として、グラスウール断熱材は妥当と考えられる。一方、2号機から放出した Type A のケイ素供給源については、Furuki らの提唱した MCCI 説に加え、原子炉圧力容器内のステンレス鋼材不純物説、サブレーションプール内塗料説なども検討されているが、供給源を裏付ける決定的な証拠はまだ得られておらず、今後の説明が期待される。

VI. 課題と今後への期待

福島第一原発事故では過去の原子力災害ではみられなかった不溶性セシウム粒子という、新たな種類の放射性粒子が見つかった。放射性粒子は粒子そのものの物性や、放射能に関する情報に加え、粒子の生成過程にかかわる履歴を保持したまま環境中に放出されるため、事故時の炉内状況を解明するための手段になり得る。さらに原子炉周辺で滞留する場所の特定ができれば、作業に伴う突発的な放出防止など廃炉工程上のリスク低減にもつながると期待される。一方、今日でも福島第一原発由来との理由から、使用する装置や設備に制限を受けることが多々ある。不溶性セシウム粒子が持つすべての情報を確実に引き出すためには、先端分析機器の使用は不可欠であり、そのために幅広い領域の研究者・技術者から協力を得ることが重要である。

— 参考文献 —

- 1) Adachi, K., et al., Sci Rep. 3 2554 (2013).
- 2) Miura et al., Geochem. J., 52 145-154 (2018).
- 3) Abe, Y., et al., Anal. Chem., 86, 17, 8521-8525 (2014).
- 4) Imoto, J., et al., Sci. Rep., 7 5409 (2017).
- 5) Ochiai, A., et al., Environ. Sci. Technol. 52 5 2586-2594 (2018).
- 6) Satou et al., Geochem. J., 52 137-143 (2018).
- 7) Furuki et al., Sci. Rep. 7 42731 (2017).
- 8) 小野ら, 分析化学 66 4 251-261 (2017).

著者紹介



佐藤志彦 (さとう・ゆきひこ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)放射化学, 環境放射能, 事故進展シナリオ推定

福島第一原子力発電所事故に伴う海底土広域測定手法

海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 大西 世紀, 鎌田 創, 浅見 光史

環境中に放出された放射性セシウムは、大半の海域における海水中での濃度が検出限界未満になった後も、海底土中には残存しており、現在原子力規制庁事業によって海底土のモニタリングが実施されている。モニタリングでは採泥と曳航調査により、海底土の性状、放射性セシウムの鉛直分布および広域分布が測定されている。これまでの調査により、放射性セシウムは地形に応じて分布しており、また、海底土からの海水への溶出は限定的であることがわかっている。

KEYWORDS: *Radioactive cesium, Marine sediment, Towed spectrometer, NaI (TI) scintillation detector, Dissolution test*

I. 海底土中の放射性セシウム

2011年3月の東日本大震災により福島第一原子力発電所事故が発生し、環境中に多量の放射性セシウムが放出された。現在の海水中における放射性セシウム濃度は、原子力発電所港内を除く大半の海域で検出限界未満になっている¹⁾が、海底土粒子への吸着により、海底土中には未だ放射性セシウムが残っている。吸着と溶出が等しくなった平衡状態では、海水と海底土における濃度比は一定になり、以下で定義される分配係数 (Distribution coefficient) で表される。

$$\text{分配係数} = \frac{\text{堆積物の放射性物質濃度 (Bq/kg)}}{\text{海水中の放射性物質濃度 (Bq/kg)}}$$

海底土のセシウム分配係数の推奨値は、IAEA レポート²⁾では外洋で 2×10^3 となっており、長期的には、海底土における濃度は、海水中での 2,000 倍程度になると考えられる。

放射性セシウムの分布状況把握のため、陸上では航空機等を用いた調査³⁾が行われている。一方、海域においても同様の分布把握のためのモニタリングが実施されており、以下では公開されている報告書^{4, 5)}を元に、曳航式スペクトロメータと採泥サンプルによる、放射性セシウム広域測定の手法およびその結果について解説する。

II. 海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する調査研究事業

原子力規制庁事業「海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する調査研究」では、平成 25～27 年度にかけて、東北沿岸海域における放射性セシウムの分布状況を把握し、環境への中長期的な影響予測を目指した調査を実施してきた。この調査研究では、船舶曳航式スペクトロメータを用いた広域の分布測定と、曳航調査の定量化および海底土性状の調査のためのサンプル採泥が行われている。

1. 曳航式スペクトロメータによる広域調査

(1) 検出器および測定手法

福島沿岸海域での曳航調査には、曳航式スペクトロメータ RESQ (Radiometric Environment Survey and Quantification) システム⁶⁾が用いられている。図 1 に概要を示す RESQ システムは、NaI (TI) 検出器、制御回路、電池、錘、圧力計、温度計、加速度計、ソナーにより構成されている。水中ケーブルで結線された各機器は、水密容器に格納され、海底からの衝撃や摩擦による損傷を

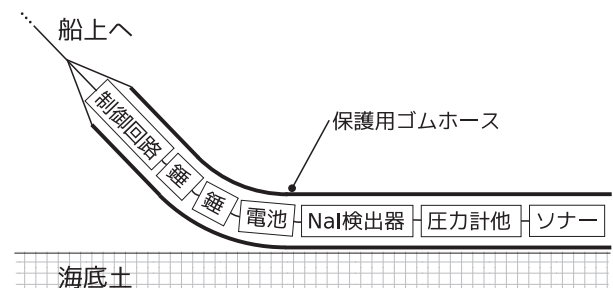


図1 曳航式スペクトロメータ RESQ システム概要
(図は文献⁷⁾より転載)

Monitoring method for radioactive cesium in marine sediment after Fukushima NPP1 accident : Seiki Ohnishi, So Kamada, Mitsufumi Asami.

(2018年11月27日 受理)

防ぐために全体をゴム製のホースで覆われている。NaI (Tl) 検出器で測定されたガンマ線スペクトルデータは、制御回路内のロガーに保存され、RESQ システム全体を船上に揚収した後、シリアルケーブルで接続された PC へと回収される。

放射性セシウム濃度の定量化には、光電ピーク計数率 (^{134}Cs :796, 802keV, ^{137}Cs :662keV) が用いられる。光電ピークは、比較的波高の大きな信号で形成され、衝撃等によるノイズが混入しにくい。このため曳航時に機械的振動が伴う曳航式スペクトロメータの解析では、この部分を利用している。さらに、海底土は比較的原子番号の小さい元素で構成されており、数百 keV 光子との相互作用では、コンプトン散乱が支配的となるため、質量減弱係数が物質に依存しない。このように海底土の元素組成を考慮する必要がないことも、光電ピーク計数率を用いる利点であり、RESQ システムの解析では、深さを cm ではなく重量深度(深度×密度 単位: g/cm^2)で表すことで、海底土の組成に依存しない検出器応答を用いている。

光電ピーク計数率から放射性セシウム濃度への換算には、下記の換算係数が用いられる。

$$C(\beta, L) = \frac{\frac{1}{L} \int_0^L f(\zeta) d\zeta}{\int_0^\infty f(\zeta) R(\beta, \zeta) d\zeta} \quad (1)$$

ここで、 C : 換算係数 ($\text{Bq}^{-1} \text{kg s}^{-1}$)、 β : 検出器の沈み量 (g cm^{-2})、 L : 混合長 (g cm^{-2})、 f : 放射性セシウムの鉛直分布 (g cm^{-2})、 R : 検出器応答関数 ($\text{Bq cm}^2 \text{s}^{-1}$)、 ζ : 海底土内深さ (g cm^{-2}) である。式(1)の分母は、鉛直分布と検出器応答の積を積分したもので、鉛直分布 f に対して想定される計数率を表し、分子は求める深さまでの平均濃度に対応する。曳航測定で最終的に求められる値は、「ある深さまでの表層平均放射性セシウム濃度」であり、混合長はその表層の深さを決める。事故直後から文部科学省等によって行われている既往の採泥サンプル調査では、海底土表層 3cm 平均の放射性セシウム濃度を測定している例が多いことから、混合長 L には 3cm に対応した重量深度が採用されている。この係数 C を光電ピーク計数率に乗じることで表層平均濃度が求められる。応答関数 R は検出器固有の値であるため、事前に放射線輸送計算によりデータベース化される。また、鉛直分布 f は、曳航測定と並行して行う採泥サンプル調査によって取得される。

式(1)によると、換算係数を求めるためには、放射性セシウムの鉛直分布が必要であり、曳航測線上の任意の点で換算係数を直接に求めることは不可能である。また、陸上では、放射性降下物の土壤中鉛直分布はほぼ指数分

布に従うことがわかっている⁸⁾が、海中では海流による表層の海底土の移動があることから、後述するように、指数分布で近似することはできない。そこで曳航調査では並行して必ず柱状採泥が行われる。まず複数の地点で海底土を柱状採泥し、その鉛直分布から採泥点での換算係数を求める。次に得られた複数の換算係数に重み付けをし、補間を用いて測線上の任意の点での換算係数を得ている。

(2) 福島沿岸海域における曳航測定結果

原子力規制庁調査事業では、福島沿岸海域を中心に、年度ごとに 600~900km の曳航調査測線を設定し、RESQ システムにより放射性セシウム広域分布を測定している。代表例として、図2に平成27年度 ^{137}Cs 測定結果を示す。

福島沿岸海域での分布の特徴を見ると、福島第一原子力発電所からその南側を中心に沿岸近傍で高い値を示す一方、5km 沖から北東には岩盤の露出した海域が広がるため、西から東へ行くに従い放射性セシウム濃度は小さくなる。さらに東側では、海底土が粒径の小さなシルト質になるため、再度濃度が大きくなる傾向にある。平成26~27年度間の差分による、同測線の海底土中 ^{137}Cs 増減の分布を示したものが図3である。

図では ^{137}Cs が前年度よりも 25Bq/kg 以上減少した海域を背景色よりも明るい色で、25Bq/kg 以上増加した海

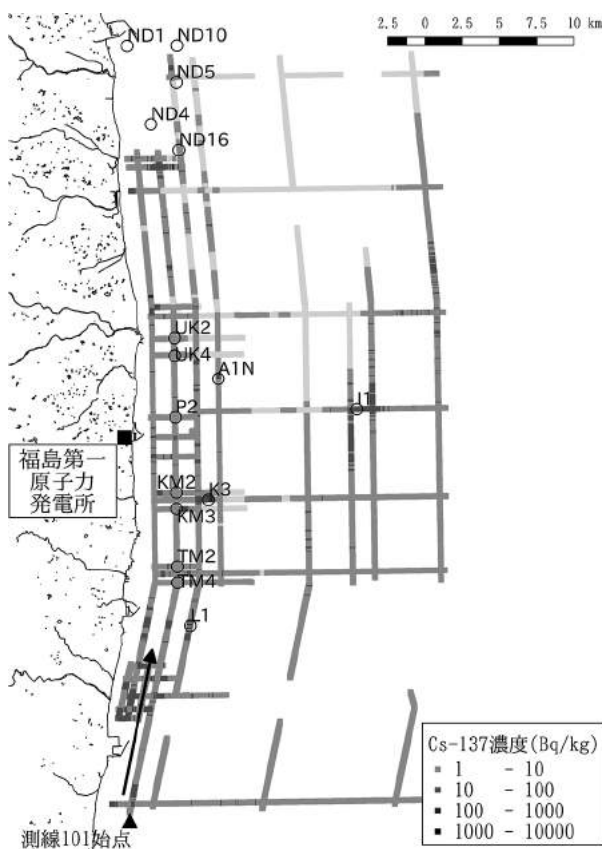


図2 福島第一原子力発電所近傍の ^{137}Cs 分布および代表的な採泥地点

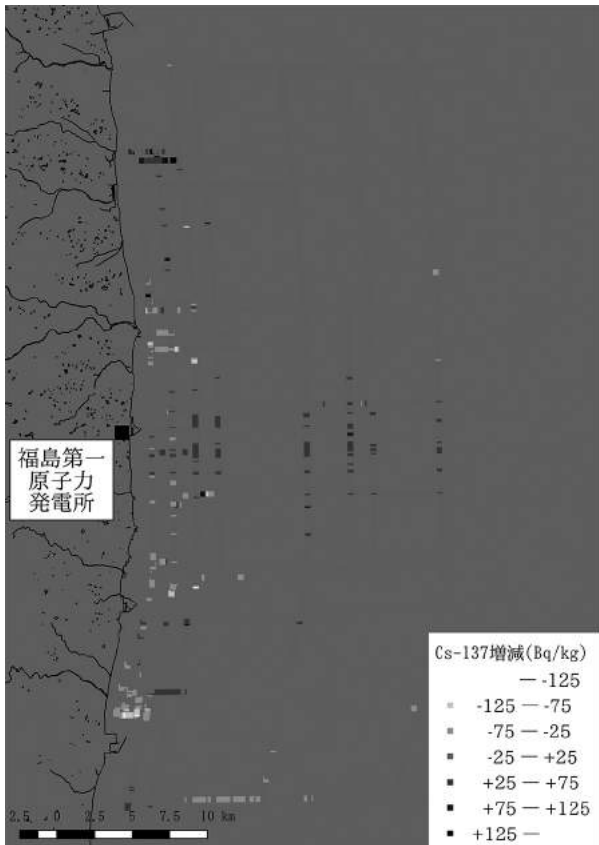


図3 福島第一原子力発電所近傍の平成26～27年度にかけた ^{137}Cs 分布変化(背景色は $\pm 25\text{Bq/kg}$ と同色)

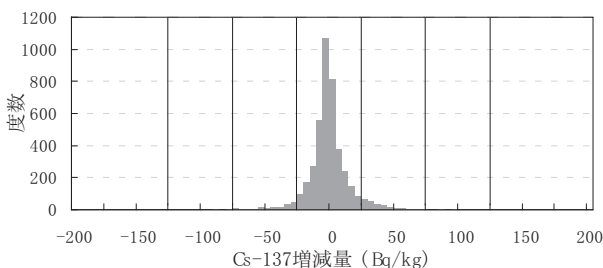


図4 ^{137}Cs 増減ヒストグラム

域を暗い色で描画している。大半の点では変化量が $\pm 25\text{Bq/kg}$ 未満であるため、背景色と同色となっている。これを度数分布表で定量的に示したものが図4であり、90%以上の測点で変化量は $\pm 25\text{Bq/kg}$ 未満であることが確認される。

図2では、沿岸付近を中心に特異的に放射性セシウム濃度が大きくなっている分布(アノマリー)が散見される。沿岸付近は、放射性物質の吸着量が小さいと考えられる岩礁帯であることから、どのような場所にアノマリーが出現するかを見るため、測線101(図2中左下起点の南北測線)の一部を抜粋し、深度(右軸)と濃度(左軸)を重ねて図5として表示した。測線の25kmおよび32km付近で高濃度を示す地点が存在しており、これらは窪み地形の位置に形成されている。この点以外にも局所的に 500Bq/kg 程度の濃度を示す地点がみられるが、

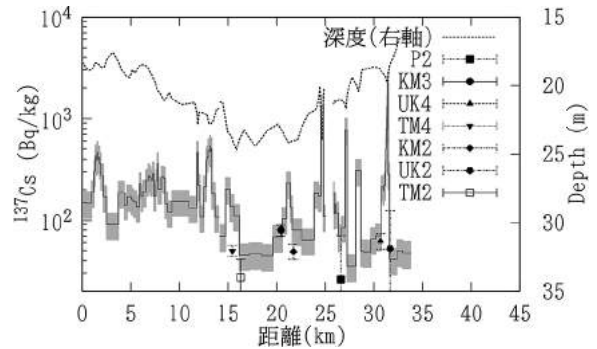


図5 測線101に沿った深度および ^{137}Cs 濃度分布(P2～TM2は図2中に示す採泥サンプル)

これら増加地点の大半は地形の起伏に対応していることが示されている。

2. 採泥サンプル調査

(1) 福島沿岸域採泥サンプル調査

曳航式スペクトロメータは、海底土表層でガンマ線スペクトルを測定しているため、これに放射性セシウムの鉛直分布情報を含めるためには、採泥サンプル調査が必要となる。福島沿岸海域では、年度ごとに90点程度の採泥点を曳航測線上に設定し、マルチコアサンプラの投入による採泥を行っている。得られた柱状サンプルを鉛直方向に分割して、高純度ゲルマニウム検出器で測定することによって、放射性セシウムの鉛直分布を取得している。一例としてA1N、K3採泥点での ^{137}Cs 鉛直分布を図6に示す。

表1 人工海水への ^{137}Cs 溶出率(報告書⁴⁾より転載)

	測点	含水率	^{137}Cs 濃度 (Bq/kg)	溶出率 (2回平均)
原発沖	A1N	20%	34	5.3%
	I1	32%	93	1.3%
	K3	32%	340	1.4%
	L1	17%	34	10.3%
新田川 河口沖	ND1	21%	200	2.8%
	ND4	80%	22	2.6%
	ND5	19%	2.7	14.4%
	ND10	42%	220	1.5%
	ND16	36%	40	1.2%

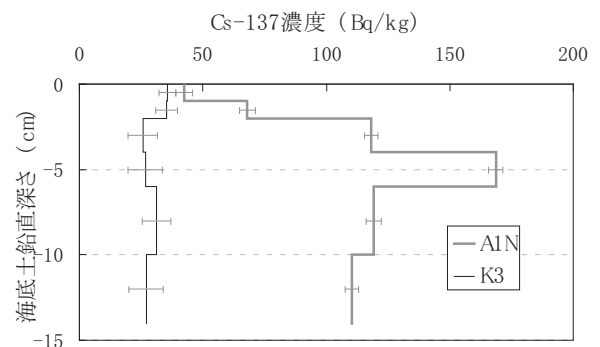


図6 平成27年度採泥サンプルにおける ^{137}Cs 鉛直分布例

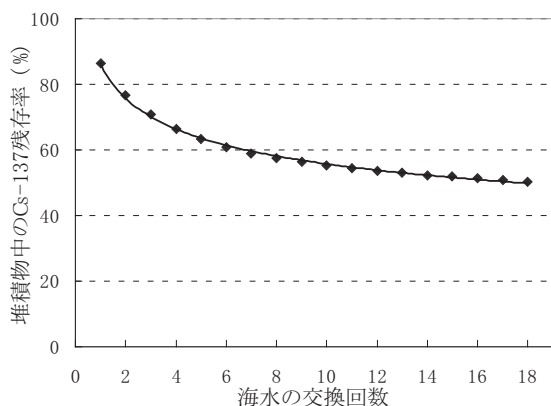


図7 溶出回数による海底土中残存 ^{137}Cs 放射能濃度の変化 (報告書⁴⁾より転載)

図6のように、陸上における土壌中の鉛直分布とは異なり、海底土内の鉛直分布は指数関数的に分布しない。この鉛直分布を式(1)に代入して換算係数が算出されている。

(2) 溶出試験

曳航測定の数値化に加えて、放射性セシウムの移行挙動把握のための海底土の物理化学的特性調査が行われている。具体的には河川からの流入と海底土からの溶出による影響を検証するため、放射性セシウム濃度、有機物特性分析、X線回折等が行われている⁴⁾。以下に、溶出試験結果について述べる。

溶出試験では、平成26年から27年にかけて福島第一原子力発電所近傍や新田川沖等で採取された海底土に対して、25℃2日間の振とう後の人工海水への放射性セシウム溶出量が測定されている。測定には金沢大学尾小屋地下実験施設の極低レベルGe半導体検出器が用いられた。

溶出試験結果では、溶出率は採泥サンプルに依存し、1%から15%程度というばらつきが見られた。さらに最大溶出量を見積もるために、表層海底土(H23.11.1採取, ^{137}Cs :790Bq/kg-dry)を用いて、連続溶出試験を行った結果が図7である。

この連続溶出試験結果は、固液比が1:40と大きく、前述の溶出試験と直接比較することはできない。また実海域よりも溶出しやすい条件であることに留意する必要がある。しかしながら、図6によると、溶出試験を繰り返すたびに、溶出率は低下していき、飽和する傾向にあることが示されている。

III. まとめ

東北沿岸海域で実施されている海底土内の放射性セシウム分布の状況把握のためのモニタリング状況についてまとめた。放射性セシウムは、海底土の性質および地形に応じて分布することが明らかにされている。溶出試験の結果では、放射性セシウムは比較的強く海底土に吸着され、溶出量は飽和する可能性が示唆されている。

－ 参考文献 －

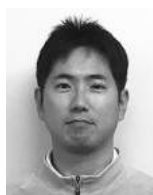
- 1) 原子力規制庁, 福島第一原子力発電所近傍の海水のモニタリング, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/278/list-1.html>.
- 2) IAEA, 2004, Technical Report Series 422.
- 3) 原子力規制庁, 航空機モニタリング結果, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html>
- 4) 平成26年度放射性物質調査委託費 事業報告書成果報告書, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10925/view.html>
- 5) 平成27年度放射性物質調査委託費 事業報告書成果報告書, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/13000/12079/view.html>
- 6) Blair Thornton, *et al.*, Deep-Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Pap. 79 (2013) 10.
- 7) 大西世紀他, 海上技術安全研究所第18巻第2号, 海上技術安全研究所 (2018) 195-210.
- 8) IAEA, 2003, IAEA-TECDOC-1363.

著者紹介

大西世紀 (おおにし・せいき)

海上技術安全研究所

(専門分野/関心分野)放射線遮蔽, 放射線計測, コード開発



鎌田 創 (かまだ・そう)

海上技術安全研究所

(専門分野/関心分野)放射線検出器, 核データ



浅見光史 (あさみ・みつふみ)

海上技術安全研究所

(専門分野/関心分野)大気海洋環境変動予測, 放射線挙動



事故 7 年後の福島の放射線分布状況および 環境モニタリング技術の最前線

日本原子力研究開発機構 眞田 幸尚

2011 年に発生した福島第一原子力発電所事故から 7 年が経過しようとしている現在でも政府や自治体をはじめとする様々な環境中の放射線モニタリングが実施されている。原子力研究開発機構は、事故直後から有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリングをはじめとする放射線モニタリングの実施主体となっている。本稿では、著者が関わっている事業を中心とした環境中での放射線モニタリングの現状についてまとめるとともに、避難指示区域における住民帰還の観点から生まれている新たなニーズと解決する新技術について紹介する。

KEYWORDS: Accident of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Airborne radiation monitoring, Ground-based measurement, Radiation imaging

I. はじめに

福島第一原子力発電所事故から 7 年が経過し、現在でも周辺環境では様々なモニタリングが実施されている。主な環境中でのモニタリングは原子力規制庁の受託事業として実施されており、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリング、無人のヘリコプターを用いた発電所周辺のモニタリング、車両を用いたモニタリングおよびサーベイメータを用いた定点測定等である。これらの測定結果は、除染範囲の決定や避難指示区域解除等の政策の意思決定に利用される重要な情報を提供しているが、実際に帰還する住民のニーズとしては、自宅の敷地内における放射性セシウムの存在状況や微小なホットスポットの位置情報などより詳細な情報を求めている。ここでは、現時点における大規模な放射線モニタリングの情報を整理するとともに、事故直後からの線量率の変化傾向の考察および住民のニーズに応えるための放射線計測技術の新技術について紹介する。

約¹⁾および有人のヘリコプターを用いたモニタリングである「80km 圏内外における航空機モニタリング事業」²⁾が挙げられる。これらの事業による測定結果は事故直後から蓄積されており、それらの測定結果を比較することによって変化傾向に関する情報を得ることができる。

測定手法毎に対象物が異なるので、相互に比較することにより様々な考察が可能となる。例えば、車両サーベイは道路上の測定結果であることから他のモニタリング結果と比較すると空間線量率は低くなり、この差から道路上の降雨等による洗い流し(ウォッシュアウト)の効果を定量的に評価できる。一方、航空機モニタリングの測定結果は、森林も含めて測定できない場所はないが上空からの測定範囲が広いことから、地上における局所的な空間線量率の分布を再現することは難しい³⁾。

その他にも、福島県をはじめとした自治体や関係省庁により、目的に分けて様々なモニタリングが行われている。これらのモニタリングは年度ごとに改定される総合モニタリング計画³⁾に沿って実施されている。

II. 環境モニタリングの状況

1. 大規模モニタリングの実施状況

現在、政府の行う大規模なモニタリングは、原子力規制委員会が行う、車両や無人ヘリなど様々なツールを駆使したモニタリング事業である「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

2. 事故後 7 年における空間線量率の分布状況

図 1(a)および(c)に福島第一原子力発電所から 80km 圏内におけるサーベイメータを用いた定点測定結果および車両モニタリングによる測定結果を示す。このように、両者とも同様な空間線量率の分布傾向を示しており、測定時期に応じて空間線量率の減少が確認できる。また、図 1(b)に有人ヘリによる航空機モニタリング結果および図 1(d)に無人ヘリコプターによる福島第一原子力発電所から約 5km 圏内におけるモニタリング結果について示す。これらの空からのモニタリング結果は測定できない範囲がないため全体像を把握しやすい。無人

Radiation distribution situation seven years after the Fukushima dai-ichi nuclear power plant accident and the leading edge of technology for environmental radiation monitoring: Yukihisa Sanada.

(2018 年 10 月 22 日 受理)

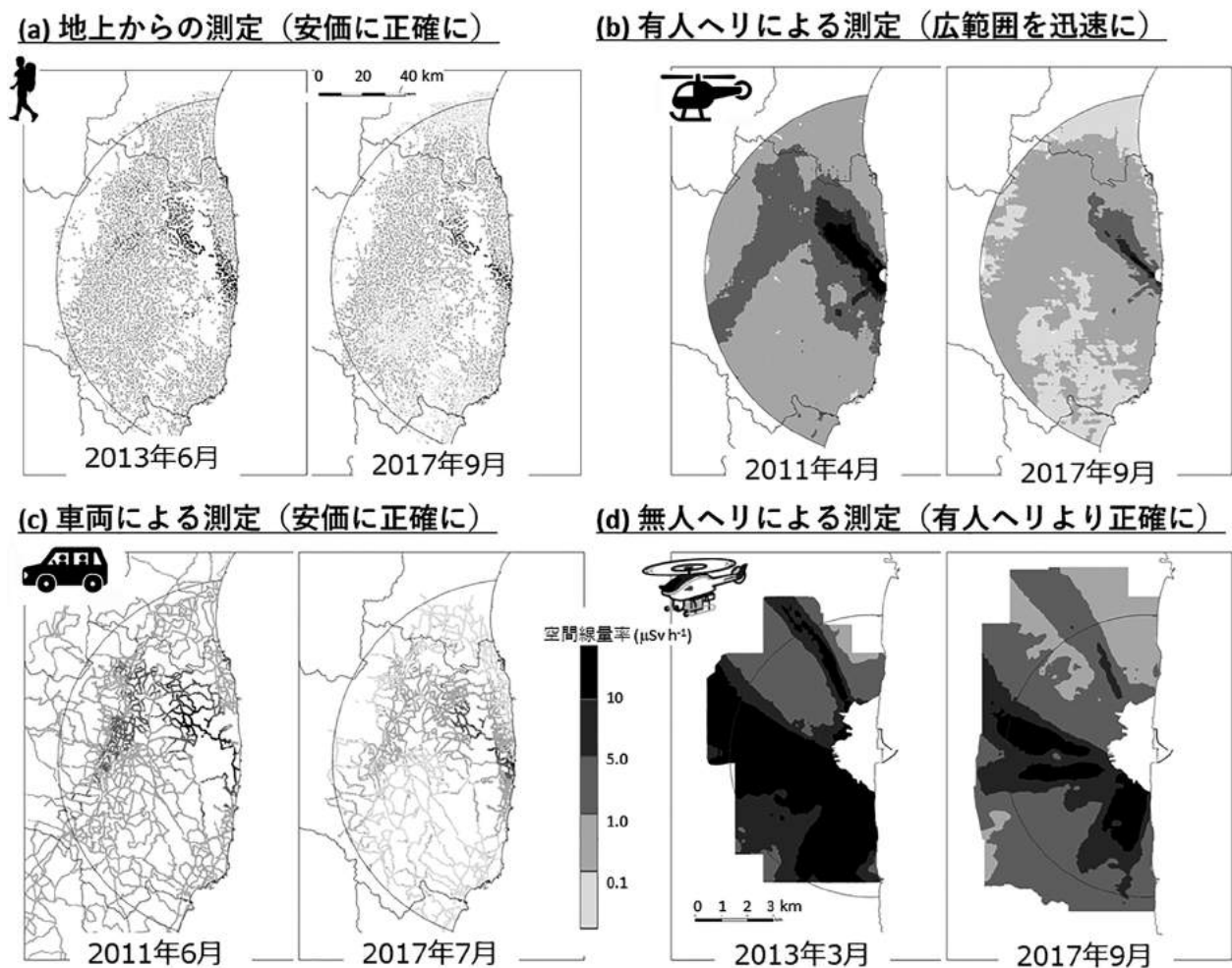


図1 代表的な広域な空間線量率測定結果

ヘリコプターは有人ヘリコプターよりもさらに低高度をフライトできるため、詳細な放射線分布が得られ、事故後のブルームの跡が視覚的に確認できる。また、福島第一原子力発電所の敷地に近い場所においても、空間線量率は減少傾向にあることがわかる。

3. 変化傾向の評価

図1に示したような、空間線量率の減少傾向を定量的に評価することは、将来の予測や住民の被ばく評価のために有用である。事故後からの放射性核種の変化傾向の評価は、複数の指数関数での近似が用いられることが一般的である。空間線量率の近似式の傾きは実効半減期として表され、そこから放射性セシウムの物理的半減期を差し引いたものを環境中でのウエザリングを示す環境半減期として定義される。図2には、福島第一原子力発電所から80km圏内における車両モニタリングと航空機モニタリングで求めた空間線量率を最初に行ったモニタリング結果を1に規格化し時系列でプロットした。図中には2重指数関数($y = a \exp(-bx) + c \exp(-dx)$): a, b, c, d は定数)で近似した曲線を示している。この2重指数関数の傾きはそれぞれ初期の早い成分と2年後以降の遅い成分

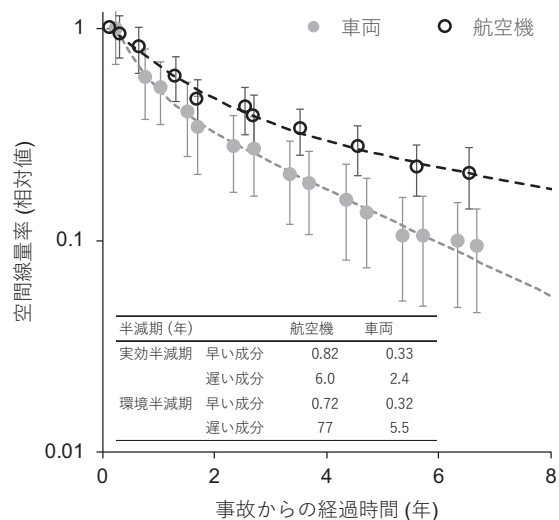


図2 航空機モニタリングおよび車両モニタリングによる発電所から80km圏内における空間線量率の変化傾向。最初のモニタリングを1として相対値の平均値をプロット。誤差棒は標準偏差。(2017年時点で0.2μSv/h以上の地域に限定)

分を示している。結果をみると、環境半減期の早い成分は航空機モニタリングで0.72年、車両モニタリングで0.33年と違いが確認でき、これは、車両の測定対象である道路上における放射性セシウムの洗い流しの効果に起因する。この効果は、環境半減期の遅い成分をみると現在でも続いていることが分かる。一方、航空機モニタリングの結果が示すように全体的には物理的半減期のみの減少傾向に近づいていることが分かる。これらの半減期の評価結果は、対象とするエリアや期間によって若干の差が出るものの、概ね近い数値が報告されている^{4, 5)}。今後も継続的なモニタリングを実施し、変化傾向を把握することが望ましい。

Ⅲ. 放射線計測技術へのニーズと新技術

1. 逆問題解析の応用と3次元イメージング

前述のように現在の放射線測定へのニーズはより精密な測定に変化してきており、ハード面やソフト面で様々な開発・改善が行われている。Sato et al. (2017)⁶⁾は小型のコンプトンカメラを開発し、福島第一原子力発電所内における放射線イメージングに成功している。このようなハード面の改善だけでなく多方向で取得された測定データから3次元的な分布を求める手法についても研究が進んでいる。有人ヘリや無人機を用いた空からのモニタリング情報は、動きながら計測することから1地点における測定情報の不確かさは大きいが多方向からの放射線計測情報を得ることができる。このような複数方向からの放射線情報を元に強度分布(画像)を構築する方法は、PETなどに代表される医療放射線計測技術に通ずる。Sasaki et al. (2018)⁷⁾は、医療放射線計測技術の画像再構成技術として使われている逆問題解析手法の一種である ML-EM (Maximum Likelihood - Expectation Maximization) 法を空からの測定データの解析に適用した例を報告している。図3に本手法で使用されているパラメータの関係を示す。まず、測定位置と計算位置間の距離や遮蔽係数などのパラメータを実測や計算シミュレーションで求める。これらのパラメータを各々の測定位置と計算位置について計算し、それらが最適になるように逆問題的な計算を繰り返す。本手法を約1km²の場

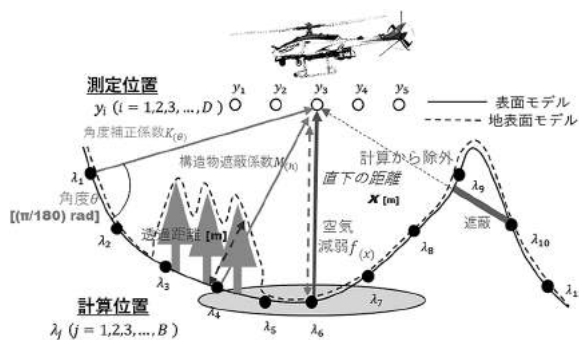


図3 ML-EM法で使用するパラメータ

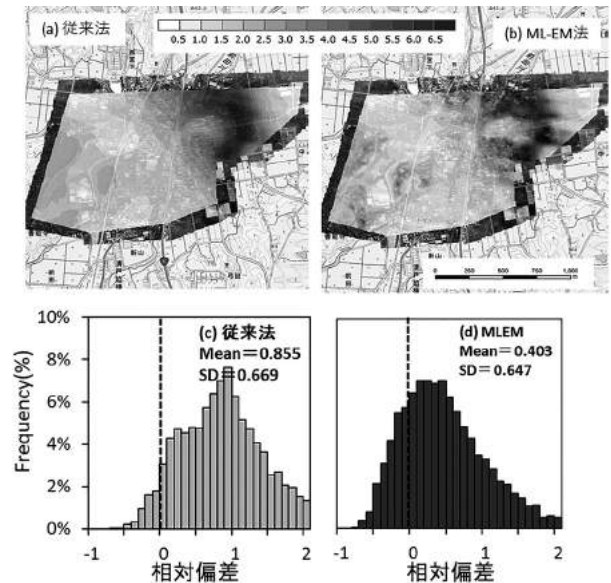


図4 ML-EM法の適用例と地上測定値との比較
(a),(b)空間線量率マップ：単位は $\mu\text{Sv/h}$
(c),(d)地上値との比較

所で計測した無人ヘリによるモニタリングに適用した結果について図4に示す。図4(a)および(b)には、ML-EM法の解析結果をコンター図で示している。また、図4(c)および(d)には、地上で歩行による測定を行った結果との比較を示す。比較には無人ヘリの測定結果と地上での測定結果の差を地上の測定値で除した数値を相対偏差とし、0.1区間ごとのヒストグラムとして示している。このように、従来の手法に対して、相対偏差が0に近づいており、精度の向上が認められる。

この手法は、空からだけでなくすべての環境中での放射線計測手法に適用可能であること、技術革新の著しい写真測量やレーザ測量による3次元測量手法と相性がいいことから様々な応用が期待できる。

2. 水底モニタリング技術の高度化

福島県内には3,700か所の農業用のため池があり、池底に蓄積した放射性セシウムの濃度分布の把握は、営農再開時の課題であった。これまで、土壌サンプルの採取しか濃度の測定手法はなかったが、ファイバー型の検出器を用いることによって水平方向の面的な分布評価を可能とする技術が開発されてきた⁸⁾。一方、深さ方向の分布情報は、除染時の目安となるだけでなく、インベントリーの評価も可能となることから、簡便な評価方法が必要とされてきた。

Ochi et al. (2018)⁹⁾は水底をダイレクトに計測した γ 線のスペクトル情報に着目し、水平方向の情報を評価する手法の開発に成功している。本手法は、水底表面で測定した γ 線スペクトルの低エネルギー側の計数率と直接 γ 線の比が、放射性セシウムの存在深さにより変化することを利用している(図5)。本論文では、50か所以上の

福島県内のため池において、実際に γ 線スペクトルと水底の堆積物コアのデータセットを比較し、両者の相関関係を見出している(図6)。このような技術は今後の避難指示区域の解除に向けても重要な情報を提供すると考えられる。

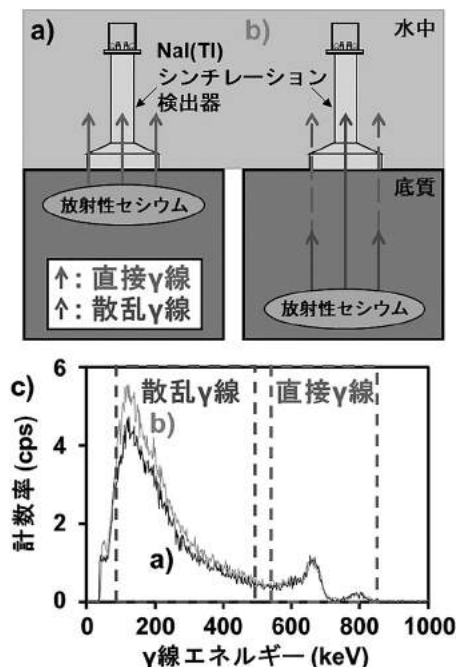


図5 底質表面での γ 線スペクトルの測定イメージ
a)放射性セシウムの分布深さが浅い場合
b)放射性セシウムの分布深さが深い場合
c)底質中の異なる放射性セシウムの分布深さにおける γ 線スペクトルの変化イメージ

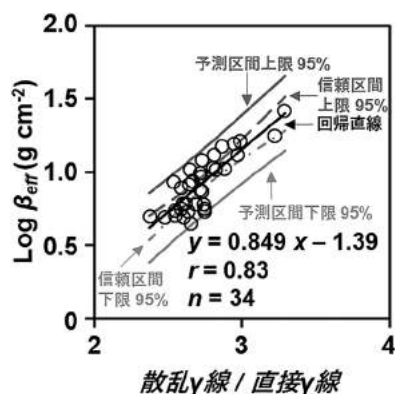


図6 水底の堆積物サンプルの深度方向実測結果と堆積物表層での γ 線スペクトル測定の散乱 γ 線と直接 γ 線の比との関係

IV. まとめ

政府が行う大規模モニタリングに関わる筆者の視点で、事故から7年が経過した現在の空間線量率の分布状況の変化および多様化する放射線計測に関するニーズに対する新技術について紹介した。政府では、現在も残る避難指示区域について特定復興再生拠点を整備し、将来的に解除する方向で議論が進められている。今後も住民の安全安心のため、確実なモニタリングを実施していくとともに、将来の原子力防災の対応のためにも新たな放射線計測技術の研究・開発が望まれる。

— 参考文献 —

- 1) 原子力規制委員会, 平成28年度放射性物質測定調査委託事業「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, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/14000/13159/view.html> (2018年10月閲覧).
- 2) 眞田幸尚他, 平成28年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technol. 2017-034, pp. 117. 2017.
- 3) モニタリング調整会議, 総合モニタリング計画, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/204/list-1.html> (2018年10月閲覧).
- 4) Kinase S. et al., Long-term predictions of ambient dose equivalent rates after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident., J. Nucl. Sci. Technol. 54, 1345-1354. 2017.
- 5) Sanada, Y. et al., Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident., J. Environ. Radioact., 192, 417-425. 2018.
- 6) Sato, Y. et al., Radiation imaging using a compact Compton camera inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station building., J. Nucl. Sci. Technol., 55, 965-970. 2018.
- 7) Sasaki, M. et al., Development of analysis method for airborne radiation monitoring using the inverse problem solutions. Prog. Nucl. Sci. Tech. 2018, 6, 63-67. 2019.
- 8) 眞田幸尚, 福島第一原子力発電所事故後におけるプラスチックシンチレーションファイバーを用いた環境計測, 光学, 45, 300-305. 2016.
- 9) Ochi, K., et al., Development of an Analytical Method for Estimating Three-Dimensional Distribution of Sediment-Associated Radiocesium at a Reservoir Bottom. Anal. Chem., 90, 10795-10802. 2018.

著者紹介

眞田幸尚 (さなだ・ゆきひさ)

日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター

(専門分野/関心分野)放射線計測・環境放射能・原子力防災



原子力防災の現状と課題



内閣府 荒木 真一,
茨城県 土信田 法男,
茨城大学 原口 弥生, ほか

東京電力福島第一原子力発電所事故から8年たち、国内では原子力防災のための取り組みが進みつつある。原子力学会の理事会と社会・環境部会は2019年春の年会でこれをテーマにしたセッションを企画し、防災に関する状況を共有し、議論を深めた。

KEYWORDS: *nuclear emergency preparedness and response, regional evacuation planning, nuclear disaster preparedness and response: lesson from support of victims*

I. はじめに

会合ではまず、原子力学会の駒野会長が登壇し、セッションの趣旨をこのように述べた。



原子力学会は2014年にまとめた福島原発事故調査委員会報告の中で、緊急事態への準備と対応体制の強化として下記のような提言を行った。

- ・ 情報不足の初期段階では、施設の状態に応じて事前に決めた判断基準に従った対応をすべき
- ・ 国、地方自治体、事業者など関係者は、緊急時のオンサイト/オフサイトでの役割と責任分担を明確化すべき
- ・ 危機管理に関して、事前に様々な手順や対応方針を、演習などを通じ明確にすべき
- ・ 放射性物質の拡散予測は、情報不足の事故初期の避難には活用が難しいとの限界を知った上で、その取扱いを明確にすべき
- ・ 自治体、警察、消防、自衛隊の動きは、他の一般災害の防災対策と類似点もあるので、海外事例も参考に
- ・ すべての事故対応にあたる者は、放射線防護の原理や被ばく影響に関して知識を十分もつべき

なお、これらの提言についてはその後、ほぼ実施の枠組等ができていることを確認(2016年3月にHPで公表)しているが、実際どのように各地域で実現されているかが最も重要である。

Present Status and Issues on Nuclear Emergency Preparedness and Response : Shinichi Araki, Norio Doshida, Yayoi Haraguchi, Yasuo Komano, Shoji Tsuchida.

(2019年3月29日 受理)

また、学会では原子力災害のみならず、さまざまな災害に対して学協会連携が必要だとの認識のもとで、56学会からなる防災学術連携体に参画している。この連携体は東日本大震災を契機に、自然災害の防災減災・災害復興を対象に研究成果を災害軽減に役立てるために創設されたものである。

このほかに2018年には原子力防災をテーマにした原子力総合シンポジウムを開催し、緊急事態への備えや対応の最新動向について議論を深めた。

一方、原子力規制委員会による審査が終了した発電用原子炉の再稼働が進められるなか、地元自治体では避難計画を含む原子力防災業務計画の策定が行われている。原子力防災は重大事故発生時の住民の安全確保の上で非常に重要であり、計画策定後も常にその改善が求められている。このような状況を踏まえ、本会として原子力防災に対してどのように取り組んでいくべきかを検討するために、本セッション「原子力防災の現状と課題」を企画した。

このセッションでは、国の専門家、自治体の防災担当者、防災にかかる研究者による講演を行った後、総合討論を行い、避難計画を中心とした原子力防災の課題とその解決に向けた取り組みについて議論する。

II. 原子力防災の現状

続いて原子力防災を担当している内閣府官房審議官の荒木真一氏が、「原子力防災の現状(仕組み)」というテーマで、次のように講演した。



ここでは我が国の原子力防災の現状(仕組み)として、平時・緊急時における原子力防災体制、原子力災害時の

基本的な対応行動、各自治体の避難計画を含む地域の「緊急時対応」の取りまとめ状況および計画策定に際しての課題、訓練や研修の現状等について紹介する。

平時・緊急時における原子力防災体制

現在の原子力防災体制については、平時は、内閣総理大臣を議長、内閣官房長官、環境大臣、内閣府特命担当大臣(原子力防災)および原子力規制委員長を副議長とし、すべての国務大臣等を議員とする原子力防災会議が常設されている(環境大臣を事務局長とする事務局体制)。緊急時においては、原子力緊急事態宣言がなされた際には内閣総理大臣を本部長とし、すべての国務大臣等を本部員とする原子力災害対策本部が臨時に設置される(上記の副議長が副本部長)。

また、現地では、自治体と共に住民の避難の支援等の防護措置等への対応を行うため内閣府副大臣を本部長とする原子力災害現地対策本部がオフサイトセンターに設置される。

原子力災害時の基本的な対応行動

所在市町村での震度6弱以上の地震、所在市町村沿岸を含む津波予報区での大津波警報発令、原子力規制委員長が重大な事象と認めた場合等により警戒事態となった場合は、原子力規制委員会・内閣府原子力事故合同警戒本部が設置され、その後事態の悪化に伴い施設敷地緊急

事態から、全面緊急事態となった場合は、原子力災害対策本部が設置される。

各自治体の地域防災計画・避難計画の策定と支援

原子力発電所立地地域ごとに、地域原子力防災協議会を設置して、地域防災計画・避難計画の充実化の支援を行い、それらを「緊急時対応」として取りまとめ、原子力災害対策指針等に照らして具体的かつ合理的であることを確認している。

取りまとめるにあたり、要配慮者の安全な避難を行うための対策、バス等の移動手段の確保、複合災害時の避難、安定ヨウ素剤の事前配布、避難受け入れ自治体による「受け入れ体制」の整備、避難退域時検査・簡易除染実施体制の整備等が課題とされている。

「緊急時対応」の取りまとめ状況

これまでに川内地域、伊方地域、高浜地域、泊地域、玄海地域、大飯地域の地域原子力防災協議会において「緊急時対応」を取りまとめ、原子力防災会議に報告し了承されている。他の地域についても今後さらに自治体との連携を強化し、「緊急時対応」のとりまとめを加速していく。

訓練や研修の現状

原子力災害発生時の的確な判断に基づいた活動を実施

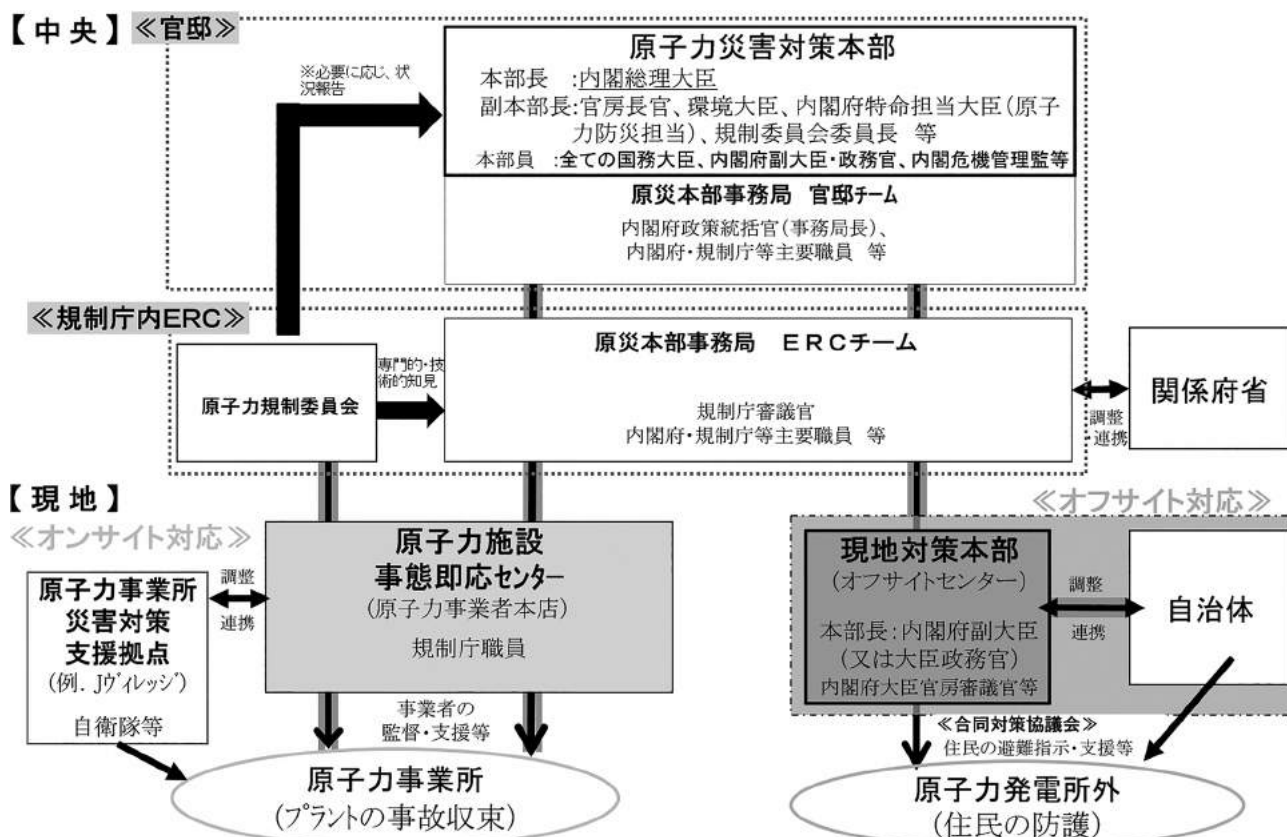


図1 原子力緊急事態時の危機管理体制

し、組織の対応能力の検証と向上を図るとともに、緊急時対応の実効性を高めることを目的として、原子力防災訓練を行っている。平成30年度の原子力総合防災訓練には191機関、住民約1万6千人を含む約2万1千人が参加した。

また、原子力防災に関する知識を高めるために、原子力防災研修事業を行うことにより、原子力防災業務従事者の人材育成に取り組んでいる。

なお、内閣府原子力防災 ホームページは下記の通り。
https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/index.html

Ⅲ. 広域避難計画策定における課題

次に、茨城県で原子力防災を担当している原子力防災調整監の土信田法男氏が登壇。「広域避難計画策定における課題」というテーマで、次のように述べた。



現況

茨城県では、防災基本計画(原子力災害対策編)などに基き、あらかじめ避難計画を策定することとされている市町村の取組を支援するため、平成27年に広域的な避難先や避難経路、避難の流れなど基本的な事項を定めた茨城県広域避難計画を策定した。

これに沿って現在、東海第二発電所から概ね30km圏

内の14市町村において避難先市町村と避難に関する協定を締結し、避難所の割振りや避難所までの経路設定など具体的な協議が進められている。なお、東海第二発電所から5km圏内のPAZには8万人、30km圏内のUPZには88万人が住んでいる。

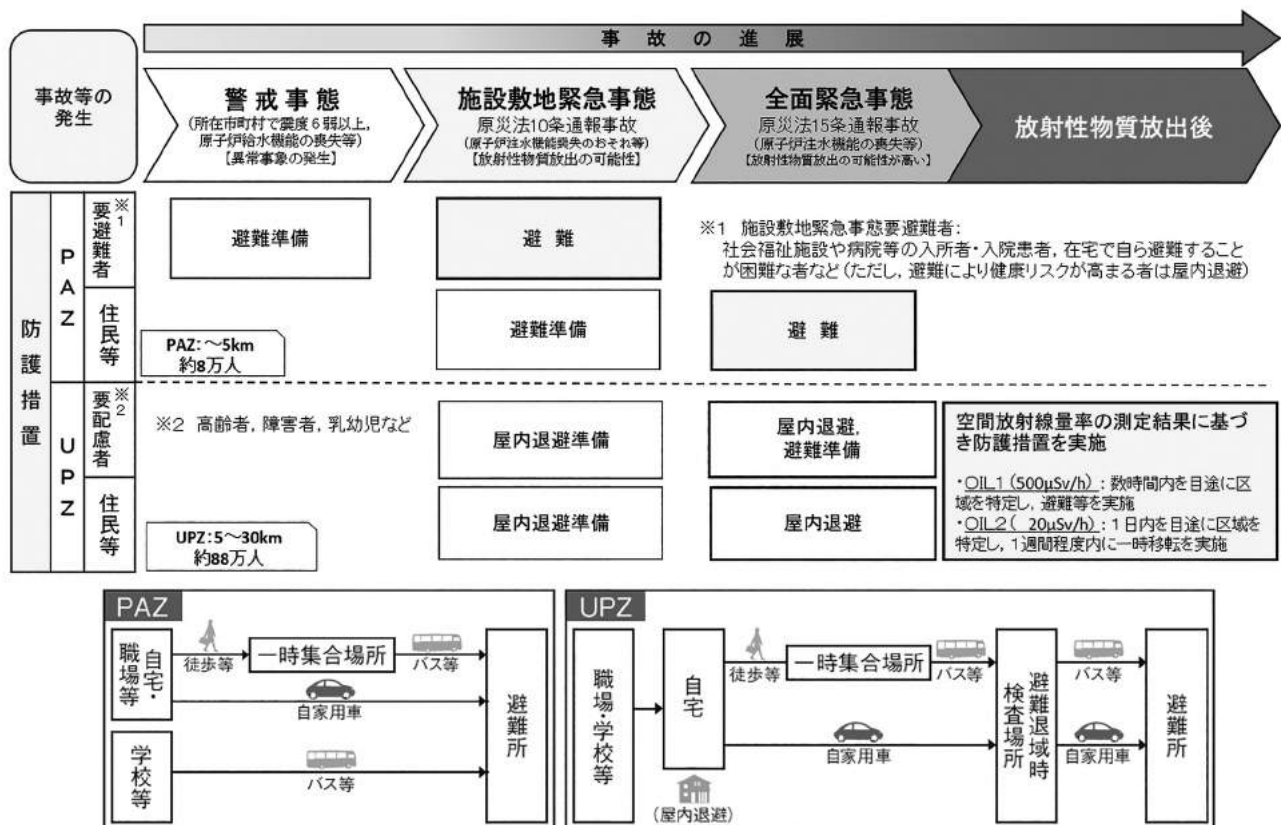
避難手段や放射線防護対策など

避難計画の策定にあたっては、同一地区の住民の避難先は同一地域に確保することや、避難経路が避難する住民や車両で錯綜しないように設定した。また、高齢者や障がい者など要配慮者の避難については十分な配慮をすることとした。なお、避難手段は自家用車を基本とし、そのほかに公的機関が手配したバスや車両、自衛隊車両、鉄道、フェリーなどあらゆる手段を検討することとした。

また、無理な避難によってリスクが高まる人たちや手配車両が到着するまで待機が必要な人たちのために、一時的に屋内退避するための病院などを対象に、放射線防護対策を実施している。

今後の課題

万一の際にUPZ内の全市町村の住民が避難する避難先はすべて確保した。今後は避難退域時検査場所の確



- ・PAZ (Precautionary Action Zone): 予防的防護措置を準備する区域 : 5キロ圏
- ・UPZ (Urgent Protective Action Planning Zone): 緊急防護措置を準備する区域 : 30キロ圏

図2 防護措置の概要

保、検査要員の確保や技術の習熟、検査資機材の整備が課題である。また、複合災害時における第二の避難先の確保や道路などの被災状況を住民へ伝達する手段や停電時の対応、複数の原子力事業所における事故発生時の対応も課題である。

さらに避難途中でのトラブル対策として、渋滞時のガソリン補給やトイレ対策、事故車への対応、屋内退避時の対応としては電気、水道、ガス等の屋内退避のためのライフラインの確保、食糧や医薬品など必要な物資の手配・提供、事故の状況など必要な情報の提供などが検討課題である。

これらについては引き続き市町村とともに検討を進めるとともに、関係機関や交通事業者等民間の協力も頂きながら課題の解決を図っていく必要がある。

また、他県等との広域的な調整を要する課題など、県のみでは解決が困難な課題に対しては、内閣府主催の東海第二地域原子力防災協議会作業部会において国とともに検討を進めていく。

IV. 被災者支援から見えてきた原子力防災の課題

最後に登壇したのが、環境社会学を専門としている茨城大学教授の原口弥生氏。同氏は「被災者支援から見えてきた原子力防災の課題」というテーマで、次のように語り始めた。



東日本大震災・福島第一原発事故後、多くの県外避難者が茨城県で生活を送っている。その方々への支援活動を通して、この8年間、今となってみると信じがたい壮絶な経験・想いを聞いてきた。避難者支援の経験から、現在提案されている原子力防災の課題について、元原子力規制委員長の田中俊一氏が述べたことがらを紹介する。

- ・放射線被ばくによる確定的な健康影響は見られなかった。
- ・無計画に無理な避難をしたことで多数の犠牲者が出た。
- ・半減期の長いセシウム 137 が大量に環境放出され、環境が汚染されたために住民の避難が長期化した。
- ・放射性ヨウ素による甲状腺被ばくを防止する対策が機能しなかった。
- ・環境中の放射線量(空間)や放射能濃度等情報が的確に提供されなかった。

被ばく防護・最小限化と妊婦・子ども

原子力災害対策は被ばくを防ぐ・最小限化することが目的とされている。3.11 後も子どもの被ばくは、大きな論争を呼んでいるし、当事者には口に出せない不安を残している。現在進められている原子力防災計画では、子

どもに関してわずかな記載があるのみで、学校と職場は同列に扱われ「子どもを被ばくから守る」という強い姿勢は感じられない。このため、UPZ 圏内の子供や妊婦とその家族も、PAZ 圏内の避難開始と同じタイミングで避難を開始できる体制や、UPZ 内でも事前に安定ヨウ素剤を配布していくことを要望する。

避難後の生活再建と心・福祉へ

原子力防災は上記のように、放射線被ばく対策が主であるが、避難生活が始まると同時に心身・生活・福祉という問題が浮上する。震災から8年が経過し、茨城では半数以上が自宅を確保し、生活は安定している方が多い。ところが、筑波大学アンケート結果からも震災から5年経過した時点での心の状態は、通常時に比べて著しくうつ傾向や PTSD 症状が高いことが示されている。今年度においても新興住宅地に移り住んだ複数の方がうつ症状を訴えられるなど、外から見える生活再建と、当事者の心の状態の乖離がみられることには留意が必要である。

心のケアに加え、県外避難者が望む「二重住民票」は実現しておらず、茨城では多くの避難者が避難元に住民票を置いたままの生活を送っている。「どう避難するか」だけではなく、避難後の生活をどうサポートするのかという視点が欠落している点は非常に残念である。

茨城県内の 3.11 県外避難者受入れ態勢

茨城県内のほぼ全ての市町村が県外避難者の受け入れを行っており、その経験からどのような教訓が得られているのだろうか。東日本大震災の被災地域である茨城県が、県外避難者を受け入れたという意味では、困難な状況もあったと思われる。とはいえ、県外避難されてきた方からは「避難所にやっと着いたと思ったら、ここには入れないって言われた。悲しくて、情けなかった」などの言葉を聞いており、2012 年に報告者が行った広域避難者アンケートでも、自由記述において受入れ先の市町村への苦情に近いコメントが少なかった。

制度面においても、応急仮設住宅として民間賃貸住宅借上制度が実施されたが、茨城県内では市町村議会を通したために住宅の提供が2012年1月にずれこんだ自治体もあった。避難者には、他県に比べ提供が半年遅くなるなどの負担を強いたことになる。

茨城県内の96万人の避難は簡単ではないが、PAZ、UPZに関わらず、子供の放射線被ばく防護は最優先での実施を望む。「30km圏外に避難できれば、それで良い」のではなく、要介護者を含めた避難生活の環境整備や長期的視点が必要だ。また、3.11の経験を踏まえ、複合災害の視点も必要。さらに住民の当事者意識を高めるために、各自治体の避難シミュレーション情報の提供などの取り組みが効果的ではないかと考える。計画がどんなに

緻密で多様な視点から検討されていても、住民の当事者意識の欠如や無関心が改善されなければ、実効性は伴わない。

V. 総合討論

会合ではその後、このセッションの座長を務めた関西大学の土田昭司氏の司会のもとで登壇者らと討論。土田氏はまず、原子力防災を考える際には「事故を起こさない防災」「被害を出さないし、出た場合でも拡大させない減災」「事故が起きた後に速やかに負担なく復旧する縮災（レジリエンス）」という3つの視点を指摘。原子力防災において防災は当然だが、一方で事故は起きるとの前提で減災を高めること。さらに自治体と住民は「事故を起こさないという意味での防災」には関わることができないため、自治体と住民にとっての防災は減災しかないと述べた。

さらに他の災害と違って原子力災害の特徴は縮災、レジリエンスが困難であると指摘。また、「防災」には国や自治体による「公助」、NPOやボランティア、町内会による「共助」、保険などによる「自助」のいずれも必要であることを指摘した。

続いて会場参加者との質疑に入り、地元から参加した人を交えた討論では、緊急時の場合の要支援者への対応の難しさや、移動することが難しい人が施設にとどまった場合の医療従事者や介護者の安全の確保、自治体の関

与、96万人が仮に避難した場合の実効性、訓練の重要性などが指摘された。また、住民の中にはこうした避難計画にふだんは関心をもたないものの、いったん事故が起これば段階的避難などの手順を無視して我先に避難する人が少なくなく、こうした人々への周知と参画が必要だと指摘もなされた。

* 本原稿は当日の講演内容を、予稿集や当日の発表資料などで一部補足しています。〔文責〕佐田 務（本誌）

著者紹介

荒木真一（あらき・しんいち）

内閣府（原子力防災担当）

土信田法男（どしだ・のりお）

茨城県防災・危機管理部原子力安全対策課

原口弥生（はらぐち・やよい）

茨城大学人文社会科学部

駒野康男（こまの・やすお）

原子力学会

土田昭司（つちだ・しょうじ）

関西大学社会安全学部



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10日第10回論文誌編集幹事会）

- ・3月16日から4月15日までに英文論文誌に30報、和文論文誌に2報の新規投稿があった。
- ・論文誌編集委員会の2018年度事業報告と委員長引き継ぎ事項を確認した。
- ・第1分野2名、第2分野2名の編集委員候補を承認した。
- ・第7分野を主とした論文審査分野の見直し案を検討して仮決定した。
- ・英文化WGの進捗が報告された。
- ・廃炉関係特集号の入稿状況とPreface案が紹介された。英文誌は9月号、和文誌は9月号印刷の予定。
- ・JNST International Advisory Board運営細則案がメール審議により承認された。

- ・英文誌特集号刊行に関する手順書改定案を検討した。
- ・PNSTの冊子体納品は継続し、非売品とすることとした。

（5月10日第11回学会誌編集幹事会）

- ・2021年に企画している「福島事故から10年」の特集号の検討をした。早いものは来年秋に依頼を開始する。
- ・60周年シンポジウムの講演からピックアップした記事企画案が承認された。
- ・巻頭言、時論、その他の記事企画の進捗状況を確認し、掲載予定について検討した。
- ・炉物理部会の連載講座の進捗状況を確認した。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

中国における原子力開発動向

原子力発電動向を中心に

海外電力調査会 渡辺 揺, 江川 弘和

中国はエネルギー資源に恵まれているし、電力は有り余っている。しかし原子力発電開発等を積極的に進めている。中国が原子力発電開発を始めたのは1984年だが、現在では原子力発電を支える開発推進体制、安全規制体制は整っているし、開発を担う原子力事業者、原子力産業も育っている。このような背景を持ちながら、2018年には世界で最初にAP1000とEPRの発電開始を実現させた。さらに、新型炉開発や原子力プラント・機器輸出にも積極的に取り組んでいる。

KEYWORDS: China, Nuclear Energy, Nuclear Power Plant

I. 中国のエネルギー構造

1. 中国の一次エネルギー生産と自給率

中国の一次エネルギー生産量は、原油換算で約23億6,000万t(2016年)である。この量は、同年比で我が国の67倍、米国の1.2倍の規模で、世界全体の一次エネルギー生産の約17%を占めた。中国は世界最大の石炭埋蔵量を誇っており、一次エネルギー生産の7割前後が石炭である。一方、1990年頃に一次エネルギー生産全体の約2割を占めていた原油は、最近では1割を切っている。その分天然ガス、水力、原子力の割合が増えている(図1)。

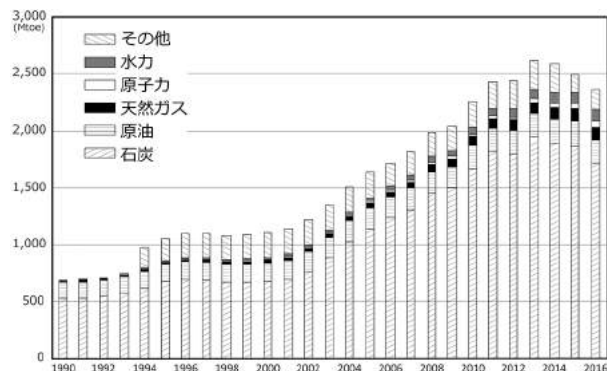


図1 中国の一次エネルギー生産

Development of Nuclear Power in China: Haruka Watanabe, Hirokazu Egawa.

(2018年12月17日 受理)

中国の一次エネルギーの自給率を経年的に眺めると、2002年頃から自給率が100%を切って緩やかに低下するトレンドを示している。主力エネルギーである石炭も、2009年からは純輸入国となっている。そして、2016年には自給率が80%を割り込でしまった。この年には、原油の自給率は40%を割り込でいるし、天然ガスのそれは70%を割り込でいる。

2. 日中の一次エネルギー生産量・供給量比較

表1に2016年における我が国と中国との一次エネルギーの生産量と供給量(消費のために供給されたもの)を示した。中国は一次エネルギー生産量で我が国の約67倍と大変にエネルギー資源に恵まれているが、自給率では8割を僅かに切っている。我が国は、一次エネルギー供給量(消費量)で中国の7分の1だが、一次エネルギー生産量が余りにも少ないために、自給率は8.3%となっている。なお、2010年における我が国のエネルギー自給率は約20%であった。そのうち約75%は原子力が担っていたが、2016年には原子力の寄与は2010年の約6.3%へと激減している。

表1 日中の一次エネルギー生産・供給比較

	一次エネルギー生産量	一次エネルギー供給(消費)量	自給率 %
中国	2360.5百万t	2958.0百万t	79.8
日本	35.4百万t	425.6百万t	8.3
中国/日本	66.7倍	7.0倍	—

(出所: IAEA『WORLD ENERGY BALANCES(2018edition)』を元に作成)

表2 中国の電源別発電状況

発電種別	発電設備容量		発電電力量		見掛平均稼働率(%)
	万kW	比率(%)	億kW時	比率(%)	
総計	177,703	100.0	64,179	100.0	41.2
水力	34,119	19.2	11,945	18.6	40.0
火力	110,604	62.2	45,513	70.9	47.0
原子力	3,582	2.0	2,483	3.9	79.1
風力	16,367	9.2	3,057	4.8	21.3
太陽	13,025	7.3	1,182	1.8	10.4
その他	6	0.0	...	...	0.0

出所：中国電力企業联合会速報(2018年2月発表)

注1 風力は系統接続分のみ。

注2 「太陽」のほとんど大部分は太陽光発電だが、太陽熱発電も含む。

注3 見掛平均稼働率は(発電種別発電電力量kW時×100)÷(発電種別年末発電設備容量kW×24時×365日)として計算した。

3. 中国の電源別発電状況

表2に中国の電源別発電状況を示す。中国の総発電設備容量は約17億8,000万kWと、我が国の6倍近くである。その内訳を見ると、水力が約3億4,000万kW、火力が約11億1,000万kW、風力が約1億6,000万kW、太陽が約1億3,000万kWといずれも世界最大の設備容量を誇っている。そして原子力発電だけが2017年末で約3,600万kWと、我が国に次ぐ設備容量となっている。

なお、中国が世界最大の包蔵水力を有する水力発電では、世界最大の三峡発電所の設備容量は2,240万kWで、我が国の一般水力の総計2,163万kWを1地点で凌駕している。

表2の見掛平均稼働率の火力の欄を見ると47%となっている。火力発電の場合、稼働率は80%程度が一般的であり、発電設備に十分な余裕があるといえる。少し実態を踏まえると、風力や太陽による電力を優先していることや、発電設備容量が電力需要を大幅に上回っていることから、火力発電を絞ることで電力需給を合わせているということになる。

太陽や風力による発電で得られた電気は、どちらも設備容量が1億kWを優に上回っているが、太陽による電気が最も高コストという状況にある。また、風力による電力は石炭火力と競争できるほどに低廉になってきていると言われる。この辺のことをみると、我が国の再エネに対するFIT制度はこのままでいいのかという疑問無しとしない。

II. 中国の原子力発電動向

1. 原子力発電を支える基盤

中国政府における開発推進体制、安全規制体制を説明する。政府機関として、国务院、日本でいうと内閣ということになるが、ここに国家発展・改革委員会という省があり、日本でいうと内閣府の中の経済財政・経済社会システム・経済財政分析といった部門が合わさった部門となる。中国では横割り省と言うか、多くの省に関係する省を委員会と呼んでいる。この発展・改革委員会は、

計画経済を実施している中国経済の中心となる省である。この発展・改革委員会の中に国家エネルギー局がある。ここで原子力発電開発に関する計画立案等も行う。次に工業信息化部(日本語に直訳すると工業情報化省)、ここに国家原子能機構(CAEA)という部門がある。中国はIAEAの理事国で、中国国内でのIAEAの受け皿がCAEA(China Atomic Energy Agency)ということになる。CAEAは発電以外の原子力政策や原子力の国際協力を担当している。そして原子力発電の規制当局は、生態環境部(中国では日本でいう「省」は「部」または「委員会」と表記される)の国家核安全局である。一方、原子力発電事業者としては、中国核工業集团公司(CNNC)、中国広核集团有限公司(CGN)そして国家電力投資集团公司(SPIC(State Power Investment Co.))の三者がある。CNNCは、原子力軍事利用の原爆開発を行った中国核工業省から始まったのだが、1988年から平和利用部門のみに特化させてCNNCとなり、原子力発電、核燃料製造そして将来的にはバックエンドも担うことが予定されている原子力事業者である。CGNは香港に電力を供給することの必要性から、フルターンキーでフランスEDF(Electricite de France)によって大亜湾原子力発電所を建設・運営するために設立されたことから始まった原子力事業者であり、現在は中国で最大の原子力発電設備を有する原子力事業者で、水力・風力・太陽光といった再生可能エネルギーによる発電も行う事業者である。さらに、かつて中国では電力工業省が国営電気事業を行っていたが、国営電気事業の発電部門を分割して五つの大きな発電会社を発足させた。その中で原子力発電も担えるものとして設立されたのが、中国電力投資集团公司である。さらに話は複雑になるが、2006年に中国政府と米国政府の間にウエスチングハウス社のAP1000に関する技術移転をするという合意が成立した。その中国側の受け皿として誕生したのが国家核電技術公司以、この会社と中国電力投資集团公司を合併させて成立したのが、SPIC即ち国家電力投資集团公司である。このように、三者三様の経緯をもって成立したものである。ただし、三つの原子力事業者は、全て国有企業である。

最後に原子力産業だが、中国では原子力発電所の設計・エンジニアリングは、先に紹介した3原子力事業者もしくはそれらの傘下の会社が行う態勢となっている。そして、これ等の設計・エンジニアリングのもとで上海電気集団総公司、東方電気股份有限公司、哈爾濱(ハルビン)電気集団公司、中国第一重型機械集団公司、中国第二重型機械集団公司といった5大メーカーグループが、サプライチェーンの先頭に立つという構図となっている。

2. 原子力発電所の開発経緯

1984年に中国最初の秦山原子力発電所30万kW(以下、秦山I発電所)の建設が国家重点プロジェクトに組

み込まれた。そして、1985年に同発電所は建設着工した。1987年には大亜湾原子力発電所1号機が、その翌年には同2号機が建設着工した。自主設計、自主建設の秦山I発電所とフルターンキーで建設する大亜湾原子力発電所という二つの路線で中国の原子力発電開発は進んだ。その後、中国ではキャンドウ炉を導入したり、ロシアのVVERを導入してみたりもしたし、秦山原子力発電所二期工事として自主設計、自主建設に加えて、プラント・機器の自主製造にも取り組んだ。いわゆる国産化の流れである。同様に、大亜湾の後継機である嶺澳および嶺澳IIでも国産化の流れが進められた。このような動きは1996年頃からのようであった。原子炉の国産化を進めたのだが、秦山サイトで聞いたところでは、国際的な原子炉プラント・機器価格の70%を目指して開発を進めたとのことである。我が国が原子力発電開発を盛んに行ったのは、1970年代後半から1990年代前半にかけてであった。この間においてPWRについてもBWRについても第二世代炉の改良標準化を鋭意推し進めた。このようなことで、原子力産業も大いに成長したのだが、中国においても2006年頃から同様な動きを示した。中国の原子力発電の大開発期の始まりは、2007年に発表された「原子力発電中長期発展計画(2005~2020年)」であった。当時は、2020年末に4,000万kWの設備容量と1,800万kWの建設中規模とすることが目標であった。その様な計画を打ち立てた背景として、年率10%を上回る経済成長を続けていたこと、さらに米国政府と中国政府との間で米国企業ウエスチングハウス社の第三世代炉であるAP1000の技術を移転するということが合意されていたこと等があった。またこのような動きを察知したフランス政府は、フランスアレバ社の第三世代炉のEPR技術を中国に移転することを提案して、中国にEPRの建設を受け入れさせた。EPRの建設受け入れと共に、中国独自でも大亜湾原子力発電所でフランスが中国に輸出した三LOOP PWRの生産ライセンスも後々中国に与えるという約束もした模様。2009年2010年頃は、2020末の原子力発電規模を1億kWとするべきといった発言が中国の原子力業界の中から出されるほどになっていた。2011年には我が国の福島第一原発で原子力事故が発生した。この事故の影響を乗り越える2011年から今日までの間に、原子力発電中長期計画の2020年末の目標を運転中容量5,800万kW、建設中容量3,000万kWに上方修正したし、新規着工の原子力発電所は第三世代炉と同等以上の安全性を持つものとし、中国独自でも華龍1号という第三世代炉を設計し、現在建設しているところまで、中国の原子力発電業界および原子力関連産業は大発展した。

2011年3月に発生した福島第一原発での原子力事故後の対応の早さと広さの我が国政府と中国政府との違いは、原子力政策史といった観点から大変に参考となるも

のと思われるが、紙幅の関係もあり今回は触れない。機会があれば、一度整理してみたいと思う。

3. 原子力発電の最前線

中国が第三世代炉であるAP1000とEPRの建設着工は、いずれも2009年若しくは2010年であった。建設開始当時は、着工から概ね60ヶ月で営業運転に入る計画であった。しかしながら、世界で最初に建設する第三世代炉の建設ということもあり、プラント・機器の製造・建設の技術的課題が顕在化して、営業運転は数年単位で遅延した。課題は、次の様なものであった。

- ・主冷却ポンプの製造(RCP、主としてAP1000)
- ・鍛造部材を含む压力容器の製造
- ・バルブ(爆破弁)の製造(主としてAP1000)
- ・計装制御システム(特にデジタル化技術)
- ・不燃化電線電纜の製造
- ・プロジェクト工程管理
- ・製造・建設のモジュール化

2017年11月に中国国家核電技術公司の方々と技術交流をする機会があり、そのときにはこれ等の課題は殆ど乗り越えたということであった。そして、2018年に入ると、建設中の第三世代炉で核燃料の装荷に始まる営業運転に向けた最後のステップに入ったと言うニュースが次々と飛び込んできたのである。それらを表3に纏めた。中国で営業運転というのは、100%フル出力で7日間(168時間)の運転を達成した時点で必要な条件を全て満たしたことになるが、さらに政府機関の高官の臨席を伴うセレモニーをもって営業運転開始としている。一方、IAEAの基準では、電力網への初併入をもって発電所とみなすということにしているようである。ロシアのVVERを第三世代PWRとするかどうかで表現を考えなければならぬが、中国はAP1000、EPRという第三世代PWRを世界で最初に建設して運転を始めた国となったのである。第三世代PWRを持っていない我が国からすると、原子力発電所の建設、運営において、ついに中国に追い越されてしまったとの感を強くした2018年であった。

これまで述べてきた中国の原子力発電開発の大まかな動きについては「図2 中国の原子力建設の動向」に纏めた。また、着工日および営業運転開始日(計画年)を付し

表3 2018年度における第三世代炉の運転開始に向けた動き

発電所名	炉型	燃料装荷完了	初臨界達成	初併入	営業運転開始
台山1号	EPR	2018.4.16	2018.6.6	2018.6.29	2018.12.13
三門1号	AP1000	2018.4.29	2018.6.21	2018.6.30	2018.9.21
三門2号	AP1000	?	2018.8.17	2018.8.24	2018.11.5
海陽1号	AP1000	2018.6.25	2018.8.8	2018.8.17	2018.10.22
海陽2号	AP1000	2018.8.11	?	2018.10.13	2019.1.9

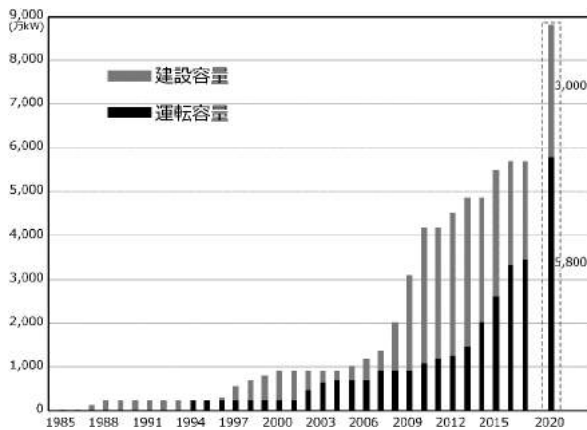


図2 中国の原子力建設の動向

た中国の運転中および建設中の原子力発電所一覧をそれぞれ表4および表5に示す。

Ⅲ. 中国の原子炉輸出と新型炉開発の動向

1. 原子炉輸出の経緯と動向

(1) 原子炉輸出の先導となったパキスタン向けの輸出

中国が最初に原子炉を輸出したのは、パキスタンに対してであった。パキスタンのチャシュマ発電所1号機として、秦山Ⅰ発電所と同じ炉型(CNP300)を輸出した。チャシュマ1号機の建設工事着工は1993年、営業運転開始は2000年となっている。当時、西側諸国は、インドおよびパキスタンの原子力利用に対する協力を停止していた。このような状況の中、パキスタンと中国はインドに対抗するという共通の方針から友好関係をにであった。なお、秦山Ⅰ発電所が営業運転は1994年であったことに対し、その一年前からチャシュマ1号機の建設に着工している。この点については、秦山Ⅰ発電所が初併入したのは1991年12月であり、1992年の2月頃には調整運転とは言いながらフル出力で運転していた。その後、第1回目の燃料交換の際には二次系も含めて大規模な分解点検等も実施し、これ等を含めて調整運転期間とし、大亜湾1号機の運転開始を待ったような姿で同じ1994年に営業運転開始としたのであった。このようなことから、秦山Ⅰ発電所は実質的には遅くとも1992年には営業運転と同様な状況となっていたことから、1993年にチャシュマ1号機の建設着工していても不自然ではないのである。

2011年にはCNNCによりチャシュマ2号機も完成されている。さらに、2009年にチャシュマ3、4号機の設計契約が締結され、2016年と2017年にそれぞれ完成している。チャシュマ1~4号機は、全て秦山Ⅰ発電所と同型のCNP300という型式である。

中国独自で開発している第三世代炉PWRである華龍1号(HL1000型)が、2015年に中国の福清5、6号機および防城港3号機が、2016年には防城港4号機の建設着工

が行われた。そして、これらと時を同じくするように、2015年にカラチ2号機、2016年にはカラチ3号機が、華龍1号を導入するということで建設着工している。

さらに、パキスタン原子力委員会とCNNCとはチャシュマ5号機の建設についても協力協定を締結しており、中国からの原子炉輸出が一層進められる動向にある。

(2) ルーマニア向け輸出

チエルナボーダ原子力発電所3、4号機(Candu6型)の建設に関し、CGNが51%を出資し、ルーマニア側が49%のマイナー出資により建設する方向で商談が進んでいる。

(3) アルゼンチン向け輸出

CNNCとアルゼンチン原子力発電会社との間に、アチャート3号機(Candu6型)の建設に関する基本合意が2014年2月になされた。さらに、2015年11月には華龍1号を5番目の原子力発電所として建設する契約に調印したという。

しかし、2018年5月18日付の現地報道では、アルゼンチン通貨の急落等で、アチャート3号機の建設計画を一時棚上げにするという決定がなされたとのことである。

(4) 英国向け輸出

EDFは、英国で原子力発電所を所有、運転している。そのEDFと密接な関係にあるCGNはEDFとの間で戦略的投資契約を締結した。その締結の場に、中国習主席、英国キャメロン首相が列席していた。その基本的な骨組みは次の通りとのこと。

・Hinkley Point C プロジェクト(EPR型2基)

EDF66.5%出資、CGN33.5%出資

・Sizewell C プロジェクト(EPR型2基)

EDF80%出資、CGN20%出資

・Bradwell B プロジェクト(華龍1号2基)

CGN66.5%出資、EDF33.5%出資

Hinkley Point Cについては、英国政府、EDF、CGNの3者が2016年9月契約最終締結となっている。それ以外のものについては、これからさらに交渉が有るものと思われるが、英国政府は華龍1号が採用される予定のBradwell Bプロジェクトの最終承認はまだ行っていないとの立場とのことである。

(5) トルコ、南アフリカ、サウジアラビアへの活動

トルコにはSPICがCAP1400という炉型で売り込み活動を行っている。南アフリカにも同様の売り込み活動を行っていると言われる。

さらに、サウジアラビアでは今後の20年で16基程度の原子力発電炉を建設しようとする計画があると言われており、これに向けた動きも予想されている。加えて2016年1月、中国習主席がサウジアラビアを公式訪問した際、両国間の14の協力強化合意文書の一つとして、サウジアラビアの原子力推進機関のKA-CAREと中国

表4 中国の原子力発電所(運転中)

2019年1月31日現在

発電所名		所在地	主要出資者	炉型(設計国)	電気出力 (発電端万 kW)	着工日	商業運転開始日	
秦山Ⅰ期 qinshan		浙江省 海塩	CNNC	CNP300(中)	31.0	1985.3.20	1994.4.1	
秦山Ⅱ期 qinshan	1			CNP600(中)	65.0	1996.6.21	2002.4.18	
	2				65.0	1997.4.1	2004.5.3	
	3				66.0	2006.4.28	2010.10.21	
	4				66.0	2007.1.28	2012.4.8	
秦山Ⅲ期 qinshan	1			CANDU6(加)	72.8	1998.6.8	2002.12.31	
	2				72.8	1998.9.25	2003.7.24	
方家山 fangjiashan	1			CPR1000(中)	108.0	2008.12.26	2014.12.15	
	2				108.0	2009.7.17	2015.2.12	
三門 sanmen	1			浙江省 三門	AP1000(米)	125.0	2009.4.19	2018.9.21
	2					125.0	2009.12.17	2018.11.5
田湾 tianwan	1			江蘇省 田湾	VVER1000(露)	106.0	1999.10.20	2007.5.17
	2	106.0				2000.9.20	2007.8.16	
	3	112.6				2012.12.27	2018.2.15	
	4	112.6				2013.9.27	2018.12.22	
福清 fuqing	1	福建省 福清		CNP1000(中)	108.0	2008.11.21	2014.11.22	
	2				108.0	2009.6.17	2015.10.16	
	3				108.0	2010.12.31	2016.10.24	
	4				108.0	2012.11.17	2017.9.16	
昌江 changjiang	1	海南省 昌江		CNP600(中)	65.0	2010.4	2015.12.25	
	2				65.0	2010.11	2016.8.12	
大亜湾 dayabay	1	広東省 深圳	CGN	M310(仏)	98.4	1987.8.7	1994.2.1	
	2				98.4	1988.4.7	1994.5.7	
嶺澳 lingao	1				99.0	1997.5.15	2002.5.28	
	2				99.0	1997.11.28	2003.1.8	
	3			108.0	2005.12.15	2010.9.20		
	4			108.0	2006.8	2011.8.7		
台山	1	広東省 台山	EPR(仏)	175.0	2009.11.18	2018.12.13		
寧徳 ningde	1	福建省 寧徳	CPR1000(中)	108.0	2008.2.16	2013.6.18		
	2			108.0	2008.11.12	2014.5.4		
	3			108.0	2010.1.8	2015.6.10		
	4			108.0	2010.9.29	2016.7.21		
紅沿河 hongyanhe	1	遼寧省 瓦房店	CGN SPIC	CPR1000(中)	111.9	2007.8.15	2013.6.6	
	2				111.9	2008.4.15	2014.5.13	
	3				111.9	2009.3.11	2015.8.16	
	4				108.0	2009.8.15	2016.9.19	
陽江 yangjiang	1	広東省 陽江	CGN	CPR1000(中)	108.6	2008.12.16	2014.3.26	
	2				108.6	2009.6.4	2015.6.5	
	3				108.6	2010.11.15	2016.1.1	
	4				108.6	2012.11.17	2017.3.15	
	5			ACPR1000(中)	108.6	2013.9.18	2018.7.12	
防城港 fangchenggang	1	広西自治区 防城港		CPR1000(中)	108.0	2010.7.30	2016.1.1	
	2				108.0	2010.12.18	2016.10.1	
海陽 haiyang	1	山東省 海陽	SPIC	AP1000(米)	125.0	2009.9.24	2018.10.22	
	2				125.0	2010.6.20	2019.1.9	
合計		45 基			4,558.1			

表5 中国の原子力発電所(建設中)

2019年1月31日現在

発電所名		所在地	主要出資者	炉型(設計国)*1	電気出力 (発電端・万 kW)	着工日	営業運転開始 予定日
紅沿河 hongyanhe	5	遼寧省 瓦房店	CGN SPIC	ACP1000(中)	108.0	2015.3.29	2020
	6				108.0	2015.7.24	2021
陽江 yangjiang	6	広東省陽江	CGN	ACP1000(中)	108.0	2013.12.23	2019
防城港 fangchenggang	3	広西自治区 防城港			華龍 1 号(中)	115.0	2015.12.24
	4			115.0		2016.12.23	2020
台山 taishan	2	広東省 台山		EPR(仏)	175.0	2010.4.15	2018
福清 fuqing	5	福建省 福清市	CNNC	華龍 1 号(中)	108.7	2015.5.7	2019
	6				108.7	2015.12.21	2020
田湾*2 tianwan	5	江蘇省 田湾		ACP1000(中)	111.8	2015.12.27	2020
	6				111.8	2016.9.7	2021
華能山東石島湾 shidaobay		山東省 石島湾	華能	高温ガス実証炉 (中)	21.1	2012.12.21	2017
合計		11 基			1,191		

*1 炉型および電気出力はIAEA「PRIS」ウェブページより引用。

*2 IAEA「PRIS」では田湾5、6号の炉型はそれぞれCNP1000、CPR1000と記載しているが、ここでは原子力産業協会『世界の原子力発電開発の動向2017』の炉型ACP1000を採用。

核工業建設集団(CNEC)との間で、中国が山東省石島湾で建設中の高温ガス実証炉HTR-PM型(20万kW)を想定した高温ガス炉建設協力覚書が調印されたという。この高温ガス炉は、主として海水淡水化に使用されるものと思われる。

2. 新型炉の開発

(1) 政策上の位置づけ

2017年1月に発表された「エネルギー発展第十三次5ヵ年計画(2016～2020年)」では、新型炉の開発に関連する記述としては、「スマート小型炉、商用高速炉、60万kW級高温ガス炉等の自主的かつ独創的なモデルプロジェクトを適時実行し、原子力エネルギーの総合利用を推進すると謳われている。

さらに、「エネルギー技術革新行動計画(2016～2030年)」の中で、次世代炉の2020年目標として、次の項目が掲げられている。

- ・小型モジュール炉のモデルプロジェクトを完成
- ・高速炉の実証炉を建設
- ・高温ガス炉700℃実証プロジェクトを建設
- ・超高温ガス炉の950℃での運転、水素生産の可能性の追求
- ・溶融塩炉、進行波炉等の先進的原子炉の基幹設備、材料、技術のブレークスルー

(2) 開発期間

基礎研究開発は、中国科学アカデミー傘下の上海大学応用物理研究所、清華大学核及新能源技術研究院(高温

ガス炉)、CNNC傘下の研究機関である中国原子能科学研究院(高速炉)等の大学や研究機関において行われている。中国は、“軽水炉－使用済燃料再処理工場－高速増殖炉”といった閉じた原子燃料サイクル路線をとることとしている。その原子燃料サイクルを担うCNNCの傘下の機関で高速炉の研究開発も進められているものと思われる。

一般的に新型炉の実証炉以降の設計、建設は3大原子力事業者(中国核工業集团有限公司、中国広核集团有限公司、国家電力投資集团有限公司)の関連企業で行われている。

中国では多くの研究開発が進められている。紙幅の関係からそれらを個別に紹介は出来ないが、この後に小型モジュール炉(SMR)、高温ガス炉および高速炉の開発概況を紹介する。

(3) 小型モジュール炉(SMR)

小型モジュール炉(SMR)とは、一般的には電気出力30万kW級以下の発電用軽水炉で、原子炉をモジュール化し工場で量産することで製作費を低減するとともに、モジュール単位で現場へ輸送・据付することで、原子力発電所建設コストの大きな部分をしめる建設工事費の削減を目指すものである。また、原子炉を小型化することで炉内発熱量も小さく出来ることから、残留熱除去系等の原子炉安全系システムに、大型電動駆動ポンプによる冷却のような能動的な安全系システムに替わり、自然対流等を用いた受動的な安全系システムを採用することで、安全性を高めることを目的としている。

SMR を海上に設置できるように改良したものを浮揚型 SMR と呼んでいる。SMR は、三大原子力事業者がそれぞれモデルプロジェクトの完成に向けて開発を進めている。

なお発電用軽水炉ではないものの、小型モジュールタイプのものとして、一部の低温熱供給炉や高温ガス炉も SMR の範疇に入ると考えられるものもある。

(4) 高温ガス炉

高温ガス炉は、中性子の減速材に黒鉛を使用し、また原子炉からの熱を取り出す冷却材にヘリウム(He)ガスを用いて約 950℃ の高温を取り出すことを狙ったものである。

中国では、清華大学核及新能源技術研究院にて、直径 7~8cm 程度の球体の中に粒状の核燃料が詰められたペブルベッドを大量に筒状の原子炉炉心に詰めた姿の高温ガス炉が開発されてきた。

北京市北西部の清華大学で研究炉が 2003 年から運転されている。2012 年 12 月には、山東省石島湾で高温ガス炉実証炉の建設着工がなされていた。この実証炉は熱出力 25 万 kW の原子炉 2 基を用いて、電気出力 21 万 kW の 1 基の気力タービンを駆動するものである。取り出し温度は約 700℃ と言われている。固有の安全性を有することから、格納容器を不要としている。

(5) 高速炉

中国では、核燃料再処理実証施設の開発と並行して、原子燃料サイクルの確立を目指して、中国核工業集团有限公司傘下の中国原子能科学研究院(CIEA)が高速実験炉 CEFR(電気出力 2.5 万 kW)の開発を行っている。同炉は 2000 年 5 月に建設着工し、2010 年 7 月初臨界、2011 年 7 月に電力系統に併入したと言われる。

以上の様な実績を踏まえ、次に実証炉建設と言うことになることが予想される。その通り、CIEA では 100 万 kW 級の実証炉建設計画や、ロシア製 80 万 kW の高速炉 BN - 800 の導入計画が検討されたといわれる。現在では、実証炉を 60 万 kW 級の CRR600、商業炉を 100 万 kW 級の CFR1000 とした模様である。

IV. おわりに

中国は、フランス、カナダ、米国からプラントを導入したが、それらの技術を獲得するとともに、それらの国々の原子力事業者や原子力産業との良好な関係を形成することにも成功している。一方、国内において原子力事業者や原子力産業の育成にも成功している。さらに中国ではロシアの VVER を導入しているしロシアの高速炉に関する情報も得られているようである。現在の原子力発電技術については、中国で調査することが何よりも

必要な状況になっている。

－ 参考資料 －

- 1) IAEA, WORLD ENERGY BALANCES, 2018edition.
- 2) 中国統計局, 中国統計年鑑, 各年.
- 3) 中国電力企業联合会, 速報, 2018 年 2 月.
- 4) 中国国務院, 原子力発電中長期発展計画(2005~2020 年), 2007 年 11 月.
- 5) 中国国務院, 中華人民共和国社会経済発展第十三次 5 年計画要綱, 2016 年 3 月.
- 6) World Nuclear Association, 「Nuclear Power in China」, Country Profiles, World Nuclear Association, 2018 年 7 月 (Updated July 2018).
- 7) World Nuclear Association, 「Nuclear Power in Pakistan」, Country Profiles, World Nuclear Association, 2018 年 5 月 (Updated May 2018).
- 8) World Nuclear Association, 「Nuclear Power in Romania」, Country Profiles, World Nuclear Association, 2017 年 10 月 (Updated October 2017).
- 9) World Nuclear Association, 「Nuclear Power in Argentina」, Country Profiles, World Nuclear Association, 2018 年 5 月 (Updated May 2018).
- 10) World Nuclear Association, 「Nuclear Power in the United Kingdom」, Country Profiles, World Nuclear Association, 2018 年 11 月 (Updated November 2018).
- 11) World Nuclear Association, 「Nuclear Power in Turkey」, Country Profiles, World Nuclear Association, 2018 年 5 月 (Updated May 2018).
- 12) World Nuclear Association, 「Nuclear Power in South Africa」, Country Profiles, World Nuclear Association, 2017 年 11 月 (Updated November 2017).
- 13) World Nuclear Association, 「Nuclear Power in . Saudi Arabia」, Country Profiles, World Nuclear Association, 2018 年 5 月 (Updated May 2018).
- 14) 中国發展改革委員会能源局, 中国製造 2025 - エネルギー設備実施プラン, 2016 年 6 月, 発改能源[2016]1274 号.
- 15) 中国發展改革委員会能源局, エネルギー發展第十三次 5 年計画, 2017 年 1 月, 発改能源[2016]2744 号.

著者紹介



渡辺 揺 (わたなべ・はるか)

海外電力調査会(日本原燃株式会社)
(専門分野/関心分野) 土木工学修士/原子力発電, 再処理工場, 中国の原子力発電動向, 青森県の地域振興・産業開発



江川弘和 (えがわ・ひろかず)

海外電力調査会 調査第一部
(専門分野/関心分野) 海外の原子力発電動向, 発電設備の M&A に関連する経営分析

中性子を用いた次世代型がん放射線治療：ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)

原子炉から小型加速器へ

京都大学 櫻井 良憲, 筑波大学 熊田 博明,
名古屋大学 鬼柳 善明

世界初のホウ素中性子捕捉療法(BNCT)が1951年に米国の研究用原子炉を用いて実施されて以降2012年まで、BNCTは原子炉ベース照射システムでのみ行われてきた。2012年、京都大学複合原子力科学研究所に設置された加速器ベース照射システムを用いて世界初の加速器BNCTが実施された。現在、加速器ベース照射システムの開発が国内外で精力的に進められており、BNCTは特殊な粒子線治療法からより一般的な療法へと移行していく時期にある。BNCTの歴史のおよび技術的背景について説明するとともに、国内外のBNCT施設の現状について紹介する。

KEYWORDS: boron neutron capture therapy, BNCT, neutron irradiation system, reactor-based system, accelerator-based system

I. はじめに

中性子を用いた次世代型がん放射線治療として、ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy; BNCT)が着目されている¹⁾。図1の左図は脳腫瘍への照射の様子を、右図はがん細胞近辺の様子を示す。BNCTでは、中性子吸収断面積の大きい核種であるホウ素(^{10}B)をあらかじめ選択的に腫瘍細胞に取り込ませておき、中性子との $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反応により発生する α 粒子およびリチウム(^7Li)核により、がん細胞を破壊する。発生する α 粒子および ^7Li 核は線エネルギー付与(Linear

Energy Transfer; LET)が大きく、生体内での飛程はそれぞれ8~9 μm および4~5 μm と、細胞の直径約10 μm と同程度である。従って、 ^{10}B が取り込まれているがん細胞に破壊効果が集中する。特に、がん細胞と正常細胞が混在している悪性度の高い腫瘍に対してクオリティ・オブ・ライフ(Quality of Life; QOL)の向上が期待できる。現在、BNCTでは、悪性脳腫瘍、悪性皮膚黒色腫(メラノーマ)、難治性頭頸部腫瘍、胸膜中皮腫、等を対象としている²⁾。

これまで、BNCTは研究炉で実施されてきたが³⁾、最近では、加速器ベースの施設が建設され^{4~6)}、また、病院併設も行われている^{7~10)}。このように、現在、BNCTは特殊な粒子線治療法から、より一般的な療法へと移行していく時期にある。本解説では、BNCTの歴史のおよび技術的背景について説明するとともに、国内外のBNCT施設の現状について簡単に紹介する。

II. BNCTの歴史的背景

BNCTの原理は1936年にLocherにより提唱され¹¹⁾、原子炉を用いた治療が長く行われてきた³⁾。世界初のBNCTは1951年に米国のブルックヘブン国立研究所(BNL)で悪性脳腫瘍に対して行われた。米国では1961年までBNLおよびマサチューセッツ工科大学(MIT)で63例の臨床が行われたが、 ^{10}B 化合物および熱中性子ビームの線質等の問題のために治療成績は悪く、1994年

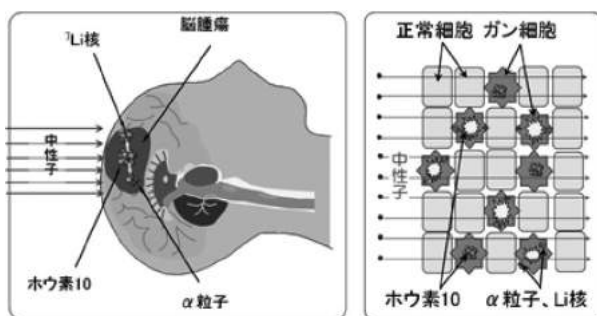


図1 BNCTの原理

A next generation radiotherapy using neutrons: Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) ; From reactor to accelerator : Yoshinori Sakurai, Hiroaki Kumada, Yoshiaki Kiyonagi. (2018年12月17日受理)

に熱外中性子を用いた治療が再開されるまで米国の BNCT は中断されていた。

ヨーロッパでは、ヨーロッパ委員会共同研究センター (JRC) およびフィンランド技術開発研究センター (VTT) の研究炉に設置された熱外中性子照射場で、それぞれ 1997 年および 1999 年より臨床が開始された。2000 年以降は、チェコ原子力研究所 (NRI-Rez) 等でも臨床が開始された。

他に、アルゼンチン、韓国、台湾、中国、等で、1990 年代前半より基礎研究が進められ、2003 年には、アルゼンチン原子力委員会 (CNEA) の研究炉で、熱・熱外中性子の混合照射によるメラノーマに対する臨床が開始された。2010 年には、台湾の国立清華大学 (NTHU) で、熱外中性子照射による頭頸部腫瘍に対する臨床が開始された。

日本では 1959 年より基礎研究が開始された。1968 年には日立教育訓練用原子炉 (HTR) において悪性脳腫瘍を対象に臨床が開始され、1974 年まで合計 13 例の BNCT が行われ、当時の米国の治療成績を上回る結果が得られた。1977 年に武蔵工業大学炉 (MuITR) において臨床が開始され、1987 年には世界初のメラノーマに対する BNCT が行われた¹²⁾。1989 年の MuITR 停止後は、京都大学複合原子力科学研究所 (KURNS) の京都大学炉 (KUR) 等で臨床が実施されることとなった。1996 年までに合計 200 例を超える BNCT が行われた。なお、初期の日本の脳腫瘍 BNCT は、深部線量分布を改善するために開頭手術下で行われた。

1995 年、KUR の熱中性子照射場が改修され、熱外中性子照射も可能となった¹³⁾。1998 年には、日本原子力研究開発機構 (JAEA) の四号炉 (JRR-4) にも、KUR と同様のコンセプトの中性子照射場が完成した¹⁴⁾。日本初の熱外中性子照射による BNCT は、2001 年に KUR で、難治性頭頸部腫瘍に対して行われた。頭頸部に対する BNCT としては、世界初の試みであった。以後、KUR では、肝臓、肺等の体幹部腫瘍への適応拡大が進められた。

加速器ベースシステムの検討は 1980 年代初頭より開始されていたが、加速器ビーム電流の安定性やターゲット除熱の問題から、実用可能な中性子ビーム強度を有するシステムは実現していなかった。ようやく、2008 年末に、KURNS でサイクロトロンベース熱外中性子源 (C-BENS) が完成した⁴⁾。現在、加速器ベースシステムの開発が国内外の様々な研究グループにより精力的に行われている状況である¹⁵⁾。

Ⅲ. BNCT の技術的背景

1. 原子炉ベース照射システム

原子炉の炉心では²³⁵U の核分裂により平均 2MeV 程度の高エネルギー中性子が発生する。これを適度に減速かつフィルターすることで、熱中性子あるいは熱外中性

子が得られる。従って、原子炉ベースの中性子照射場は、単色エネルギーのものではなく、数十 MeV までの幅広いエネルギーの中性子が混在する「混合照射場」となる。

高エネルギー中性子に対する減速材およびフィルターとしては、アルミニウム (Al)、アルミナ (Al_2O_3)、フッ化アルミニウム (AlF_3)、イオウ (S) 等が用いられている。熱中性子に対するフィルターとしては、カドミウム (Cd) やフッ化リチウム (LiF) が広く用いられている。また、混在する γ 線を低減するためのフィルターとして、ビスマス (Bi) や鉛 (Pb) が用いられている。

2. 加速器ベース照射システム

加速器ベースシステムでは、加速粒子が中性子生成核反応を起こす「ターゲット」が中性子源となる。ターゲット材料と加速粒子が起こす核反応および粒子エネルギーの選択が、加速器ベースシステムの設計の鍵となる。

加速器としては、リニアック、静電加速器、サイクロトロン等が検討されてきた。核反応については、⁷Li の (p,n) 反応、ベリリウム (⁹Be) の (p,n) あるいは (p,xn) 反応、重水素 (²D) あるいは三重水素 (³T) の (d,n) 反応、タングステン (W) の核破砕等が検討されてきている。

減速材・フィルターについては、原子炉ベース照射システムと同様のものを利用できる。数 10MeV の中性子が混在するターゲット核反応を選択した場合、高エネルギー中性子を有効に活用し、かつ、効率よく減速するために、Pb、鉄 (Fe)、フッ化マグネシウム (MgF_2)、等も用いられている。

3. 線量評価手法

BNCT がより一般的な療法へと移行していくには、照射システムだけでなく、線量評価手法の高度化も重要である。上述のように、BNCT 用照射場は、原子炉ベースでも加速器ベースでも、BNCT に利用する熱および熱外中性子に加え、高速中性子および γ 線が混在する混合照射場となっている。また、完全に平行なビームを得ることができず、むしろ等方に近い照射場となっている。これらのことが、BNCT における線量評価を複雑にしている。

治療計画立案においては、通常の放射線治療と同様に治療計画システムを用いるが、挙動が複雑多様な中性子と生体組織との反応による線量、さらには付随する γ 線の寄与も考慮した線量評価の必要があるため、フルモンテカルロ法ベースのシステムが 1990 年代から実用化されている。KUR での BNCT ではアイダホ国立研究所 (INL) とモンタナ州立大学 (MSU) との共同開発によるシステム：SERA が用いられてきた。また JAEA も計算コードに MCNP を採用した JCDS を開発し、JRR-4 での臨床研究に適用された。また、この JCDS の基盤技

術を用いて加速器 BNCT 対応システムとしてツクバプラザが筑波大学で開発されている¹⁶⁾。

照射場の特性評価、品質保証／品質管理、実際の BNCT 等において、熱、熱外、高速中性子、 γ 線に加えて硼素に由来する線量を弁別しながら、三次元かつリアルタイムで線量評価を簡便・低労力で行うことが、究極の目標となっている。この究極的な線量評価を念頭に様々な線量評価手法が検討されているが、一つの手法のみでは実現は困難であり、複数手法を組み合わせる必要がある。

例えば、照射場や患部近傍でのリアルタイム線量モニターとしては、多重電離箱システムやシンチレーション光ファイバー検出器の開発が進められている。また、BNCT 中のホウ素による線量分布を三次元的に評価するために、即発 γ 線 SPECT (PG-SPECT) 等のイメージングシステムの開発が進められている。これらを組み合わせることで、BNCT 中のリアルタイム三次元線量評価システムを構築することが検討されている。

IV. 国内外の BNCT 施設の現状

2019 年 4 月現在、国内で BNCT を実施している施設は、KURNS⁴⁾および南東北 BNCT 研究センター⁷⁾の 2 施設のみである。KURNS では原子炉ベースおよび加速器ベース 2 つの照射システムを、南東北 BNCT 研究センターでは加速器ベース照射システムのみを用いている。加速器ベース照射システムが建設あるいは開発中で、近い将来 BNCT が実施される施設としては、関西 BNCT 共同医療センター⁸⁾、筑波大学⁵⁾、国立がん研究センター⁹⁾、江戸川病院 BNCT センターの 4 施設がある。名古屋大学では、現時点では臨床を行う予定はないが、実用的な加速器ベース照射システムの開発が進められている。他に、大阪大学、京都府立医科大学、等でも加速器ベース照射システムが検討されている。

一方、国外の BNCT 実施施設は、アルゼンチン CNEA、台湾 NTHU、中国 China Institute of Atomic Energy and Beijing Capture Technology Corporation の 3 施設で、いずれも原子炉ベース照射システムのみを利用している。加速器ベース照射システムについては、アルゼンチン、米国、フィンランド、イタリア、中国、等で開発中である。

以下、国内の BNCT 施設として、KURNS、南東北 BNCT 研究センター、関西 BNCT 医療センター、筑波大学、国立がん研究センター、名古屋大学、の 6 施設の現状を紹介する。また、海外の状況についても概観する。

1. 京都大学複合原子力科学研究所 (KURNS)

KURNS は、原子炉ベースおよび加速器ベース、二つの照射システムにおいて BNCT が実施されている世界的にも希有な研究機関となっている。原子炉ベース照射

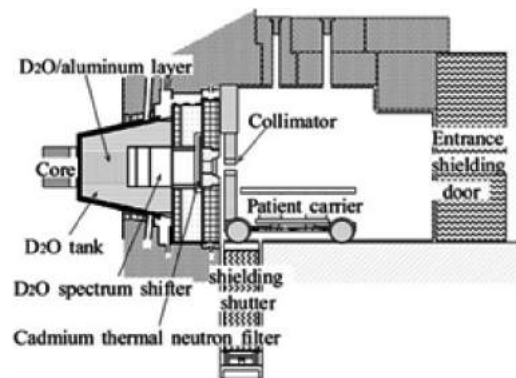


図2 KUR-HWNIFの概要¹³⁾

システムである KUR 重水中中性子照射設備 (HWNIF) では、主に重水を減速材としている。重水厚さの調整、および、カドミウム製熱中性子フィルターの開閉により、ほとんど純粋な熱中性子から熱外中性子まで様々なエネルギースペクトルを持つ中性子照射が可能である。図2に本設備の概要を示す。

2019 年 4 月現在、本設備では、総計 580 件程度の BNCT 臨床が実施されている。最近 5 年間では、脳腫瘍および頭頸部腫瘍で総計件数のほぼ 40% ずつを占め、残り 20% は中皮腫等の体幹部腫瘍やメラノーマ等で占められている。本設備は、加速器ベース照射システムでの治験の対象にしていない疾患に対する臨床研究に利用されるとともに、BNCT に関する基礎研究にも活用されている。

加速器ベース照射システム C-BENS は、2009 年に設置された。住友重機械工業社製サイクロトロン HM-30 により 30MeV まで加速された陽子をペリリウムターゲットに衝突させることにより中性子を発生する。発生した高エネルギー中性子は、Pb、Fe、CaF₂等で構成される減速体系により、BNCT に適した中性子エネルギーまで減速される。混在する γ 線は、コリメータ手前の Pb 層により低減される。図3に C-BENS の減速体を示す。本システムは熱外中性子照射専用となっている。1mA

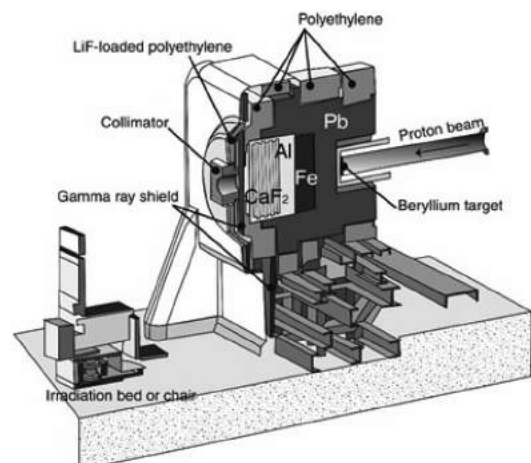


図3 C-BENSの減速体の構造⁴⁾

の陽子電流で得られる中性子強度は、KUR-HWNIF の2倍強である。

2012年より、本システムを用いた治験が脳腫瘍および頭頸部腫瘍を対象に開始された。2018年5月に治験は一段落している。

2. 南東北 BNCT 研究センター

2015年、南東北 BNCT 研究センターに、世界初の病院設置型加速器ベース照射システムが設置された。KURNS のC-BENS と同様に、住友重機械工業社製サイクロトロンをベースにしたシステムであり、減速体系も同様である。照射室を二つ有している。2016年より、脳腫瘍および頭頸部腫瘍を対象にした治験が開始され、2018年5月に一段落している。

3. 関西 BNCT 共同医療センター

本センターは、BNCT のための研究・治療拠点として、2015年に大阪医科大学内に設立された。KURNS、南東北 BNCT 研究センターに続き、住友重機械工業社製サイクロトロンベース照射システムが設置された。2019年4月現在、コミッショニング中である。

4. 筑波大学

筑波大学は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、茨城県、民間企業等との産学官連携プロジェクト「i-BNCT プロジェクト」を推進している。本プロジェクトの照射システムは、いばらき中性子医療研究センター内に設置されている。2019年4月現在、システムの実験を行っているところである。

筑波大学のシステムでは、線型加速器により加速した陽子をベリリウムターゲットに衝突させることにより中性子を発生する。C-BENS 等のサイクロトロンベース照射システムと異なり、陽子の加速エネルギーは8MeVである。ターゲットで生じる中性子の最大エネルギーが低く抑えられることから、減速体系はよりコンパクトになる。減速体系は、図4に示すように、Fe、フッ化マグ

ネシウム(MgF_2)、等で構成されている。陽子電流は5mA を目標としている。

5. 国立がん研究センター

国立がん研究センターは、2010年より、株式会社CICS と病院設置型 BNCT システムの共同研究開発を進めてきている。2015年より同センター中央病院に線型加速器ベースの照射システムの設置を開始し、2019年4月現在、治験に向けて準備中である¹⁷⁾。

国立がん研究センターのシステムでは、KURNS や筑波大学のシステムと異なり、ターゲットにリチウムを用いている。陽子の加速エネルギーは2.5MeV であり、ターゲットで発生する中性子の最大エネルギーは800keV 程度である。ベリリウムターゲットを用いるシステムよりも、コンパクトな減速体系にすることができる。減速体系は MgF_2 等で構成され、陽子電流は20mA を目標としている。

リチウムターゲットの場合、減速体系をコンパクトにできるという利点はあるが、リチウムの融点が高いため劣化が早いという欠点がある。ターゲット交換のために、頻繁に利用が中断される。国立がん研究センターのシステムでは、この欠点を補うために、リチウム自動再生装置を開発している。

6. 名古屋大学

名古屋大学では、産学連携のもと、低エネルギー大電流静電型陽子加速器を用いた照射システム NUANS - BNCT の開発を進めている⁶⁾。2019年4月現在、IBA 社製 Dynamitron ベースの照射システムの実験を行っているところである。本システムは、BNCT 照射システムの実証研究用であり、臨床に利用する予定はない。名古屋大学のシステムでも、ターゲットにリチウムを用いている。陽子エネルギーは2.8MeV、電流は15mA を目標としている。図5に示すように、減速体系は MgF_2 等で構成されている。発生中性子エネルギーが低いため、鉄フィルターが無く、全体にコンパクトな構造になっている。

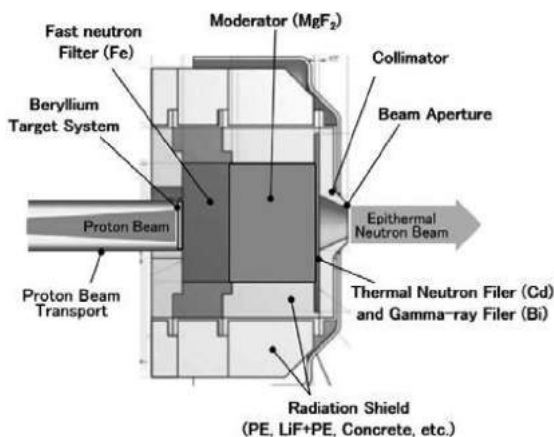


図4 i-BNCT の減速体の構造⁵⁾

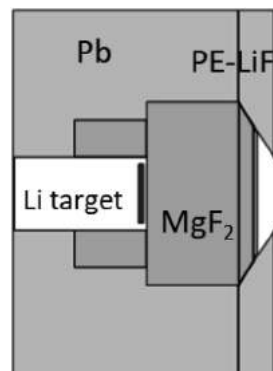


図5 NUANS-BNCT 減速体の構造⁶⁾

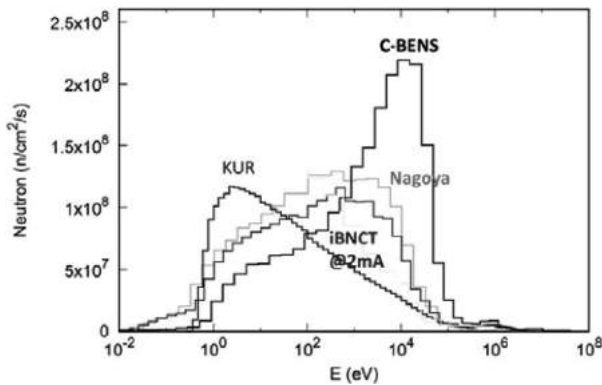


図6 国内4つの照射システムで得られる熱外中性子ビームのエネルギースペクトルの比較

7. 海外の状況

フィンランドのヘルシンキ大学病院では、Neutron Therapeutic社の2.5MeV、20mAの静電加速器をベースとした施設を建設中である。中国では、廈門市ヒューマニティ病院 BNCT センターで、2019 年秋のスタートを目指して、タンデム加速器を用いた計画が進められている。これらはいずれも Li ターゲットを用いている。アルゼンチンでは1.5MeV、30mAの静電加速器を開発中であり、d-Be 反応を使用する計画である。また、韓国では、10MeV、8mAの線形加速器が製作されている。これは iBNCT と類似の施設で Be をターゲットとして用いる。イタリアでは、5MeV RFQ 加速器で Be をターゲットとして用いる計画がある。

図6に、KUR-HWNIF、C-BENS、iBNCT、名古屋大学システムで得られる熱外中性子ビームのエネルギースペクトルを示す。原子炉ベース照射システムである KUR-HWNIF と比べて、三つの加速器ベース照射システムでは比較的能量が高いところにピークがある。加速器ベース照射システムでは、より深部の治療を目指しているためである。

V. おわりに

BNCT の歴史的および技術的背景について説明するとともに、国内外の BNCT 施設の現況について簡単に紹介した。1951 年に世界初の BNCT が米国で行われてから 67 年経過している。国内外の BNCT 研究に携わる、医学、生物学、化学、薬学、物理、工学、等の各分野の研究者達の長年の努力の末、ようやく他の放射線治療・粒子線治療と比肩できるレベルに達しつつある。BNCT を「特殊な療法」から「一般的な療法」に移行するには、これからの 10 年が重要であると考えている。

— 参考資料 —

- 1) W. A. G. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa, eds., Neutron Capture Therapy: Principles and Applications, Springer-Verlag, 2012.
- 2) S. Kawabata, S. Miyatake, N. Nonoguchi, et al., Appl. Radiat. Isot. 67 (2009) S15.
- 3) E. Bavarnequin, Y. Kasesaz, F. M. Wagner, J. Instrumentation, 2017 JINST 12 P05005.
- 4) H. Tanaka, Y. Sakurai, M. Suzuki, et al., Nucl. Instr. Meth. B 267 (2009) 1970.
- 5) H. Kumada, A. Matsumura, H. Sakurai, et al., Appl. Radiat. Isot. 88 (2014) 211.
- 6) A. Uritani, Y. Menjo, K. Watanabe, et al., JPS Conf Proc 2018; 22: 011002.
- 7) 南東北病院: <https://southernthokubnct.com/>
- 8) 大阪医科大学: <https://www.osakamed.ac.jp/kbmc/>
- 9) 国立がん研究センター: https://www.ncc.go.jp/jp/ncch/clinic/radiation_oncology/bnct/index.html/
- 10) 江戸川病院: <http://www.edogawa.or.jp/bnct.html>
- 11) G. L. Locher, Am. J. Roentgenol. 36 (1936) 1.
- 12) Y. Mishima, M. Ichihashi, S. Hatta, et al., Pigment Cell Res. (1989) 226.
- 13) Y. Sakurai and T. Kobayashi, Nucl. Instr. Meth. A 453, 569 (2000).
- 14) K. Yokoo, T. Yamada, F. Sakurai, et al., in: B. Larsson, J. Crawford and R. Weinrich (Eds.), Advances in Neutron Capture Therapy, Vol. I, Medicine and Physics, Elsevier, Amsterdam, 1997, p.326.
- 15) A. J. Kreiner, M. Baldo, J. R. Bergueiro, et al., Appl. Radiat. Isot. 88(2014)185-189.
- 16) H. Kumada, K. Takada, Y. Sakurai, et al., Radiat. Prot. Desim. 180(1-4), (2017) 286-290.
- 17) S. Nakamura, S. Imamichi, K. Masumoto, et al., Proc. Jpn. Acad. Ser. B 93 (2017) 821-831.

著者紹介



櫻井良憲 (さくらい・よしのり)
京都大学
(専門分野/関心分野) 放射線医学物理学、
放射線工学、ホウ素中性子捕捉療法



熊田博明 (くまだ・ひろあき)
筑波大学
(専門分野/関心分野) 放射線医学物理学、
ホウ素中性子捕捉療法、陽子線治療



鬼柳善明 (きやなぎ・よしあき)
名古屋大学
(専門分野/関心分野) 加速器中性子源、
ホウ素中性子捕捉療法、中性子イメージング

浜岡原子力発電所を訪ねて

フリージャーナリスト 井内 千穂

新聞記事によくある断面図を見て、原子炉格納容器から突き出た円を二つの腎臓のようなものと勝手に思い込んでいたら、それはドーナツ型のプールだった。自分の愚かな勘違いに呆れる。点検中で、格納容器と圧力容器の上蓋が開いていた。あのように開くとは知らなかった。知らないことばかりだ。

このたび、浜岡原発の奥深く、4号機の原子炉格納容器内まで入って見学する機会に恵まれた。技術的な詳細は、説明を聞いても素人には理解が追いつかないが、南海トラフ巨大地震を想定し、さらに新規規制基準を踏まえた追加的安全対策を粛々と積み重ねていることは伝わってきた。簡略化された図だと余白に見える空間に、実際には様々な配管やそれを補強する支柱があり、想像していたより狭く感じる。

原発を安全に守る基本は「止める」「冷やす」「閉じ込める」の三つという説明の中があった。とくに「冷やす」機能に必要な電源供給については、3ルートの送電線からの受電、非常用の発電機を浸水から守る対策に加え、敷地内の高台にガスタービン発電機を新設し、蓄電池や電源車も配備している。また、緊急時に海水取水ポンプ、高台には淡水貯槽を新設、隣接する川の水も確保する。放射性物質の大規模放出を防ぐフィルタベントも新設。ゼロにはならないリスクに対し、何重もの代替手段を講じて立ち向かう営みには、人類の宿命が凝縮されていた。審査合格までには、さらに「活断層がないことの証明」という別の壁が立ちはだかる。

噂に名高い海拔22メートルの防波壁は、漫画「進撃の巨人」に出てくる巨大な壁を思わせた。厚さ2メートルあっても、ネット上には「薄い」という批判が散見される。壁を乗り越えてくる巨人の如き津波は恐怖そのものだが、壁のない側に広がる一般社会でも、見えない巨人たちが睨んでいるようだ。

Column

ソーシャルインフルエンサーと原発

コメニウス大学 妹尾 優希
医学部英語コース

スロバキアよりこんにちは。本稿では、前回に引き続き SNS における原発事故関連の情報拡散についてお話しします。私も参加させていただいた「現場からの医療改革推進協議会第13回シンポジウム」(昨年11月24~25日開催)で、坪倉正治医師がこのテーマの発表をしており興味を持ちました。また本誌2018年12月号でも、発表の元となった論文の共著者の宇野賀津子医師による記事がありました。論文では福島第一原子力発電所の、事故後半年間における震災関連の情報を含む約2,500万のTweeter投稿を対象に、アカウントの特徴や、Retweetの頻度を調査しています。結果によると、震災から半年の間の約半数TweetがRetweetでした。Retweetが一度でもされているアカウントのうち、上位2%のアカウントがRetweetの8割を占め、その中でもごく少数の強い影響力を持つ“インフルエンサー”アカウントの投稿が繰り返しシェアされている、と示されています。論文ではさらに、この“インフルエンサー”を、Tweetの内容によって三つのグループ(ファクトベース、感情的な内容、マスコミ関係者)に分け、グループ別に情報の普及範囲を調査しています。結果、これらのグループ間での情報共有はなく、グループ内で限定的に情報のやりとりが行なわれている、と示唆されていました。この論文の結果をまとめると、原発事故に関する SNS での情報は、ごく少数の影響力をもつアカウントが発信する断片的な内容が、大半を占める傾向にあると言えます。これを踏まえ、いつどこでまた起こるかわからない原発事故の災害対策の一つとして、“インフルエンサー”がシェアすることのできる簡易な内容の英語のコンテンツを充実させることで、原発後の情報混乱の防止につながるのではないかと思います。

参考文献：Tsubokura M, et al. PLOS ONE. 2018;13(9):e0203594. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203594>

『天文学的』なお値段

児童文学作家 野間 美智子

突然ですが、私の趣味はフランス語です。4月1日に新しい元号が発表になり、そのことについて、フランス語教室で何か聞かれるだろうと思ったので、ネットでフランスの記事を探していると、別の記事が目飛び込んできました。それは「フクシマ：8年後、汚染水の汚染除去における天文学的コスト」という見出し。昨年8月、福島第一原発の視察に参加したこともあり(12月号に寄稿)、汚染水の問題は深刻であると理解していたため、そのまま読み進めていきました。

記事の内容はかなり詳しく記されていて、汚染水を海に廃棄する計画により、国・東電と地元の漁師の方々との対立していることにも触れています。あわせて、汚染除去のコストについても言及していますが、とにかく『天文学的』や『目玉が飛び出る』といった形容詞を多用しているのが目を引きまします。東電が30年から40年で見積もっているのに対し、ワシントンポストからの引用で廃炉に200年かかるの見積もった場合、4兆ユーロから5.7兆ユーロ(日本円は省きます)かかるそうです(実際にそこまで年数がかかるか疑問はありますが)。8月、視察に行った際も廃炉の年間予算を聞きましたが、あまりにも数が大きいため、考えることを放棄してしまいそうになっていました……。つい廃炉作業そのものに目が行きがちですが、コストのことも考えなくてはいけないと改めて思いました。今後のエネルギーについても、日常生活における電気の消費の仕方についても、事故から8年経った今、改めて自分の考えを見直していくつもりです。

Column

「選択」を引き受けて生きること

フリーライター 服部 美咲

飯舘村の多くの地区が避難指示解除されて3年目になる。日々野菜や山菜の放射能濃度や空間線量を計測し、健康にどの程度影響するかを学び、自ら納得して自信をもって飯舘の生活を営む人がいる。ベリーの一種「なつはぜ」でジャムなどを作り、ネット通販や都内で販売を始めた。あるとき、客に「海外の友人に贈るため、ジャムの『飯舘』の文字を黒塗りしてほしい」と頼まれたという。彼女は激さず、飯舘村に帰村して生活している現状を穏やかに説明し、「飯舘を海外にも紹介してくださいね」と笑顔を見せた。

「自由」には2つの意味がある。「他者に束縛されない」自由、そして「自ら選択できる」自由である。他者に強制されなければ即ち自由というわけではないようだ。コロンビア大学のシーナ・アイエンガーは、「自ら選択できる」自由による生命力の賦活効果に着目した。自らの選択で状況をコントロールできる場合、我々は無力感や抑うつ気分に陥りにくいという。

国や権威に選択を委ねさえすれば、自ら選択するために学ぶ努力や、自ら選択した結果への責任の重圧なく生きることにはできるかもしれない。しかし、他者に選択を委ねることの代償として、不信や不安、不満は、私たちの心に暗い影を落とす。不当な束縛に根拠を以て抗い、選択のために学び、その結果を背に負う覚悟にこそ、人間の尊厳は宿る。他地域に先行して、「依るか知るか」の選択を引き受ける福島の人々に、活き活きと漲る力を見る。

市民，そして中・高校生と共に

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

2011年3月11日，私は東大理学部で諮問会の最中で，報告が終わる頃揺れ始めた。揺れが続くと委員の金森先生が「これは相当大きな地震だ。宮城沖かな」と。11階の建物から避難する人々が続々と安田講堂前におりてきた。顔見知りも多い。建物があんなに大きく左右に揺れるのをみたのは初めてだった。

続いて起こったTEPCO事故は，原子核理論や素粒子論に従事する私達に重くのしかかった。「何ができるか？」を真剣に考えた。丁度，その年にJSTで採択された課題「科学のウソ突破作戦」から「放射線と原子力」への変更要望を出して始まったのが市民講座だ。同時に「低線量研究会」を発足させた。連日勉強会を開き終電まで議論を戦わした。市民や学生も巻き込んだ勉強会は，まったく異質の展開に私たち科学者を導いた。専門分野に特化した科学者間の溝は，市民との真摯な鋭い疑問で乗り越えられることに気が付いた。プロに対して鋭い質問が投げかけられ考え直す，それが実って「放射線データ32」単行本となった。専門を超えて議論が広がる。さらにすごい力を発揮したのは，高校生たちとの合同会議だった。専門用語や既成の事実を高校生たちが質問で切り込むと既成概念に縛られていたプロの科学者も考え直す。そして他分野の話に突っ込みを入れるようになる。それは凄い発見だった。こうして専門の壁が徐々に埋まる。私たちが当面する課題は，個々の専門分野の壁を乗り越えないと解決できない。それが可能になる手応えをつかんだ。そんな状況を海外で話すとびっくりされる今日この頃だ。市民も学生も科学者も同一の場で率直に意見交換する場の経験は，次世代の科学と市民とのあり方に貴重な示唆を与えてくれるのである。

Column

エネルギー利用の心理学

アジア太平洋エネルギー研究センター 渡辺 凜

ひたすら焚き火が燃えるだけの動画が世界中で流行っているらしい。YouTubeで「bonfire」と検索すると，暖炉，湖畔など様々なシチュエーションの動画があり，再生数は数百万に達している。日本語でも多くの動画がヒットし，「集中力を高める」「うつ病を癒す」と効果を謳うものもあった。炎の映像だけでテレビ番組になったこともあるそうだ。

半信半疑のまま，お風呂で温まり，電気を消して，プロジェクターで壁に焚き火を投影してみた。なるほど，明るさと暖かさと，パチパチメラメラの心地よさを，火事の心配なく気軽に楽しめる。

しかし，この「焚き火」の疑似体験は，高度な社会インフラなくしては成り立たない。まず東京ガスと東京都水道局のおかげでお風呂に入り，温まった。東京電力のおかげでプロジェクターを稼働させ，インターネットを通じて動画を入手した。こう考えると，暗に日常の複雑さと危うさを見せつけられた気がして，寒気さえ感じた。

これが本物の焚き火なら，社会インフラが機能しなくても使える。そして明・暖・癒に加え，お湯を沸かしたり，洗濯を干したり，乾物を作ったりできる。燃えた後の炭も使える。本物の焚き火は，身近で，それゆえ現代のエネルギーインフラよりも多面的に人間の生活と関わっていた。

エネルギーの専門家は薪などの資源を「traditional biomass」と呼び，エネルギー効率などの観点から，廃止して電化を進めるべきだという考えに立つ。これが間違っていると言いたいのではない。しかし，エネルギーの利用は人々の生活に様々な形で入りこみ，人々の身にも心にも作用することを，専門家は忘れがちではないだろうか。元来，効率と二酸化炭素排出とコストだけで論じられる問題ではないのだ。

最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構

第4回 「量子生命科学」の発進

量子科学技術研究開発機構 藤巻 秀, ほか

量研では、新しい学術領域「量子生命科学」の確立を目指した活動を、国内外の研究者と共に精力的に進めている。量子生命科学とは、最先端の量子技術と量子科学の知見を総合的に利用し、従来不可能であった極微の空間・時間スケールあるいは超高感度での生体内部の観測や生体分子の計測、生命機能のモデリングなどを実現することにより、量子論・量子力学を基盤とした視点から生命全般の根本原理を明らかにすることを目標とし、その原理の産業応用も視野に入れた分野である。本稿では、平成31年4月に量研内に発足した「量子生命科学領域」における研究のアプローチを紹介する。

KEYWORDS: *Quantum Life Science, Fluorescent Nanodiamond, Hyperpolarized MRI, Quantum Biology, Structural Biology, Radiobiology, Quantum Information, Quantum Cognition*

I. 背景

“量子”と“生命科学”を組み合わせたら何が生まれるだろうか？畑違いの巨人同士が手を結べば、何か凄いことが起こるに違いない。平成28年4月に量子科学技術研究開発機構(量研)が発足し、新たに“量子”の看板の下に多様な研究者たちが顔を突き合わせた時、そのような発想が生じるのは自然なことであった。最先端の量子計測技術は、時間・空間・エネルギー分解能の極めて高い、あるいは観察対象への侵襲性の極めて低い、生体分子・細胞・器官・個体の計測や観測を可能にするだろう。これにより、生体分子が働くメカニズムの根本的な解明から、生きたままの細胞・器官・個体システムの総体的かつ動的な理解にまで至る、細分化されていない、連続した学問体系が構築できるかもしれない。これを実現しようとするのが、新たな学術分野である「量子生命科学」である。量研は、平成31年4月に「量子生命科学領域」を設置し、まず以下のテーマに着手することとした。

Launch of Quantum Life Science: Shu Fujimaki, Ryuji Igarashi, Yoichi Takakusagi, Motoyasu Adachi, Akinari Yokoya, Taro Tamada, Hidetoshi Kono, Naoya Shikazono, Tatsuhiko Imaoka, Ken Akamatsu, Teruaki Konishi, Makiko Yamada, Noriaki Yahata.

(2019年1月30日 受理)

II. 量子センサーによる細胞計測

17世紀にガリレオが物体の運動を数学で記述し、18世紀にラボアジェが質量保存の法則を発見して以来、計測はあらゆる自然科学の根幹を成す最も重要な作業であり続けている。実際、現代科学では定量的に議論することが科学的議論の必要条件となっており、生物学の分野でも、細胞現象を定量的にモデル化することが近年一層重要性を帯びている。蛍光細胞イメージングの発展が生物系のモデル化を可能にさせつつあるが、従来から用いられてきたこの手法には、計測の定量性の低さや長時間測定の高コスト、得られる情報のバリエーションの乏しさなど、生物系を定量的に扱う上でいくつかの大きな限界が存在した。

これを突破する新しい発想として、ここ数年、量子を計測プローブとして用いる量子センサーが注目を集め始めている。量子センサーは、スピン量子などの量子状態を計測することで、その周辺環境の分子状態や温度、pHなど多様な情報を引き出す技術である。NMR(核磁気共鳴法)やESR(電子スピン共鳴法)などの磁気共鳴法と類似した原理に基づく計測技術であるが、量子センサーの最大の特徴は圧倒的な感度と安定性にある。既存の磁気共鳴法は、スピンの共鳴の検出に $10^{14} \sim 10^{16}$ 個程度の莫大な数のスピン量子を必要とするため、細胞の計測を行えるほどのスケールダウンは不可能であった。これに対

し、ダイヤモンド結晶中のたった一つの窒素-空孔中心 (NV 中心) の持つ三重項電子スピンの光検出によって容易に計測可能であることが 1997 年に報告されたことで、NV 中心を量子センサーとして活用する動きが活発化した。近年では、細胞内局所温度の精密計測や、単一細胞の発生する微小な磁場や神経細胞の発生する活動電位の可視化、生体内の長時間選択イメージングなども量子センサーによって実現可能となった。

この様に量子センサーは新たな生命計測手法として大きな可能性を有しているが、世界的にも量子センサーの生命計測応用は始まったばかりである。その中でも量研は (1) 量子センサー作成技術、(2) 量子センサーの機能化技術、(3) 豊富な生命計測プラットフォームという、特筆すべき 3 つの大きなメリットを有している。特に (1) 作成技術に関しては、NV 中心作成において最も重要な過程であるイオンビームによるイオン注入や電子線照射の高度な技術を有しており、量子センサーを国内外の研究機関に提供してきた。更にこの量子センサーを破碎してナノサイズ化したナノ量子センサーは、(2) 結晶表面を化学修飾することで生体適合性を向上させたり、生体分子への特異的結合機能、あるいは pH や圧力など実験者の目的に沿った計測機能を付与させたりすることができ、生命計測への応用範囲が格段に広がる。今後、量研はこうした生命計測用のナノ量子センサーを開発するとともに、(3) 豊富な生命計測プラットフォームを活用することで、細胞機能や核内現象、脳機能など複雑な生体システムを定量的に議論することのできる、新たなアプローチを提案していく。

Ⅲ. 超偏極—核磁気共鳴法

量研では、核磁気共鳴法 (NMR/MRI) の本質的な弱点である「感度の低さ」を克服するための量子操作技術「動

的核偏極」についての研究を行っている。動的核偏極は、生体の構造や生理機能を調べるために投与する「分子プローブ」が有する、そのままでは検出困難な弱い NMR 信号を増幅して「超偏極」という状態とし、核磁気共鳴の基本である複数回スキャンの積算をすることなしに、わずか 1 回のスキャンで超高感度な信号検出を可能とするための技術である (図 1A)。具体的には、 ^{13}C のような NMR に対して活性な核種で標識した分子プローブとラジカル化合物をガラス性溶媒中で混合し、極低温磁場下でマイクロ波を一定時間照射してその後瞬時に溶出すると、 ^{13}C の NMR 信号を数万倍に増幅させた分子プローブを取得できる。これを速やかに NMR/MRI 装置へ供すれば、信号を足がかりとした生体内代謝反応の非侵襲追跡などが可能となる (図 1B)。

この技術が適用可能な分子プローブとしては、 $[1-^{13}\text{C}]$ ピルビン酸の応用開発が最も進んでいる。がん特異的な乳酸脱水素酵素 (LDH) 活性の上昇をターゲットに、その代謝物である乳酸の生成度を指標として、治療効果予測や悪性度診断が可能となった (図 1C)。2010 年からは、カリフォルニア大学にて前立腺がんを対象とした世界初の臨床試験が開始されており、対象疾患や臨床試験数とも徐々に拡大している。

現在、量研においては CREST 分子技術 (東大、山東チーム) との協働で、ピルビン酸を始めとした様々な分子プローブの創製、各種疾患動物モデルにおける応用計測、創薬研究への応用を進めている。また、材料科学を基盤とした、より高性能なラジカル分子やアプリケーションの創出、偏極率向上技術など、本法の新たな可能性の開拓を目指してその研究開発に取り組んでいる。

Ⅳ. 量子生物学

古典物理学では説明できない量子的現象が、生物学的システムの中に現れることを示唆する結果が最近報告されるようになった。これらの新しい生物学は量子生物学 (Quantum biology) と呼ばれ、注目を集めつつある。その代表例は、光合成系において、アンテナ分子と呼ばれる光捕集タンパク質が光合成系の活性中心に光エネルギーを転送するプロセスに、「量子コヒーレンス」が関与するという発見である。光捕集タンパク質は 100% の効率でエネルギーを伝達し、また光を吸収してから反応中心で電荷分離を起こすまでの光合成の全過程の量子効率率は条件によっては 90% にも達することが以前から知られていたが、この驚くべき能力の謎が実は量子的現象に基づいている可能性が示された。実験技術の面では、数十 fs [フェムト秒] 領域の極短パルスレーザーが開発された結果、「2 次元フォトンエコー法」による fs オーダーでの量子ダイナミクス解析が可能となったことが、この分野を進展させた。これは、パルスレーザーによって分子中の電子を励起し、それを観測することにより、光吸

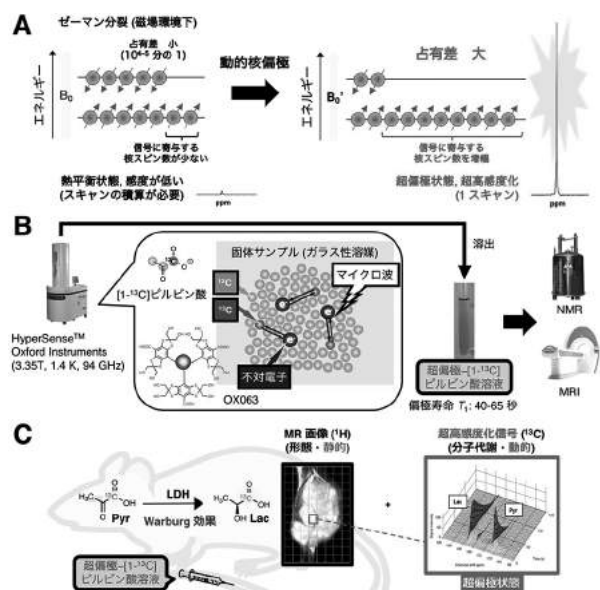


図 1 動的核偏極による NMR/MRI の超高感度化

収する複数の色素分子間のエネルギー伝達の過程や、吸収による分子励起状態の量子的重ね合わせによる位相の干渉を実測するという手法である。一方動物においては、鳥類であるヨーロッパコマドリの「渡り」を可能にしているナビゲーション・コンパスの地磁気感知システムに、「量子もつれ」が関係していることが報告された。目の中に存在するクリプトクロムというタンパク質に太陽光に含まれる青色光が照射された結果、そのタンパク質に結合する色素分子から電子が発生することでラジカル対が生じ、電子が量子もつれ状態で μs [マイクロ秒]という長い時間存在することによって地球の僅かな磁気を感知しているとされている。

この他にも、視細胞の中に存在するロドプシンの働きや嗅覚のメカニズム、さらにはDNAの突然変異においても量子的現象の関与が示唆されている。しかし、こうした生体中の量子的現象に関しては、まだ多くの論争が続いているだけでなく、例えば光合成に関しては、実際に細胞レベルでの機能性に迫る実験的研究が必要とされ、また渡り鳥のコンパスに関しては、タンパク質による光受容がどのように情報化され細胞から神経に伝わり、鳥がどのように地磁気を見ているのか、あるいは感じているのか全く明らかになっていないのが現状である。

量研では、これらの謎に挑戦する。光合成や磁気受容に加え、ミトコンドリアの電子伝達系やDNA分子上の電荷移動などを研究ターゲットとし、立体構造と電子状態の強力な解析ツールである極短パルスレーザーと放射光の利用に加え、内外の理論研究者との緊密な連携により、生体における量子的現象の役割の解明に向けた研究を進めて行く。さらに将来的には、これらのナノデバイス化による応用まで研究を展開することを目指している。

V. 量子構造生物学

タンパク質やDNAなどの生体高分子の立体構造を基に生命現象の起こる仕組みを理解しようとする「構造生物学」は、X線結晶構造解析およびNMR分光法を中心に発展、成熟してきた。さらに、近年のクライオ電子顕微鏡の技術革新は、超分子複合体のような大型分子の「原子分解能」での構造解析を可能にしつつある。しかし、一般的に使われる「原子分解能」とは $2\text{\AA}$ 程度を示し、その原子間の距離・角度情報を知るためには、別途低分子構造解析から得た情報からの推定が必要となる。また、これらの手法からは生体高分子の構成元素のおおよそ半数を占める水素原子の観測が困難であるため、タンパク質による化学反応(触媒反応)を理解する上で重要なプロトン、ヒドリドの情報を精度よく得ることができない。つまり、一般に化学反応を理解する上で原子中の電子状態の変化を知ることは必要不可欠であるのに、生

体高分子においては、そのような状態を見ることがほとんどできていない。

電子状態を知るために、量子化学計算が行われている。これまでの量子化学計算は、X線結晶構造やNMR構造に基づいて構造精密化計算を行い、得られた構造に対して電子状態を求めることで、化学反応を理解してきた。古典分子動力学計算と比べ、量子化学計算はシミュレーション計算の時間刻みあたり10の6から7乗倍の計算コストがかかるため、最先端のコンピュータを用いても数百原子程度の小さい領域(例えば、タンパク質の活性中心付近)のわずかな数ナノ秒間の状態変化しか調べることができない。そのため、量子化学計算の結果は、多くの場合、生体分子のある状態の一つの構造(スナップショット)に対するものに過ぎず、果たして化学反応状態を表しているものかどうかはしばしば問題になっている。電子状態は生体分子全体の構造変化に伴って変わるが、そうした電子状態の変化を数ナノからサブミリ秒にわたって追いかけることは実現していない。

量研は、量研が有する高輝度放射光や中性子結晶構造解析の技術を活用し、これらの課題に挑戦していく。近年の放射光X線の高輝度化は、生体高分子においても内・外殻電子状態を把握することを可能にしつつある。また、中性子結晶構造解析は原理的に水素原子の観測に長けた技術であり、原子核位置の情報を得ることができる。この超高分解能X線から得られる外殻電子の情報と、高分解能中性子から得られる高精度な原子核位置情報は、化学反応の過程で実際に見られる構造の情報であり、実際にどの構造に対して量子化学計算を行うべきかを示すため、量子化学計算の信頼性を格段にあげ、「量子レベル」で生命機能(生体高分子の巧みな働き)の理解が進むと期待される。

さらに量研では、スナップショットではあるが電子状態までわかる高分解能の構造データ、低解像度ではあるが動的な散乱から得られるX線・中性子小角、中性子準弾性の構造情報、分子の構造変化と電子状態の変化をシームレスにつなぐマルチスケールシミュレーション計算の開発を行っている。これらの取り組みにより、分子が働く仕組みを「高精度」かつ「連続的」に理解する、従来の「原子」構造生物学を超えた、「量子」構造生物学の創成を目指している。

VI. 量子放射線生物学

本来、放射線と生体のファーストコンタクトは量子力学的な事象である。たとえば光電効果やそれに伴う電子の励起、電荷が分子内を移動する現象、さらにはDNA塩基対の間で水素原子核がトンネル効果で移動する現象などがそれである。こうしてピコ秒～ナノ秒までの間に付与された放射線のエネルギーは、数年、数十年も体の中に残って影響を及ぼし、やがて確率的な「発がん」に至

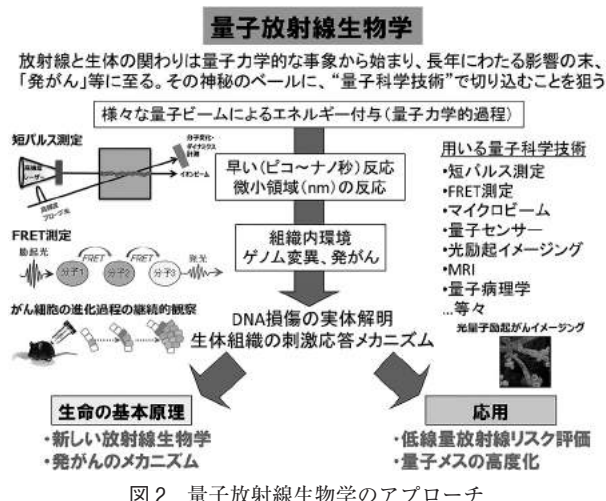


図2 量子放射線生物学のアプローチ

る。この生命と放射線の関わりを研究する放射線生物学は、量研が前身の時代から半世紀以上にわたり取り組んできた分野であるが、その神秘のベールに、改めて我々は「量子科学技術」で切り込みたいと考えている(図2)。

細胞への放射線影響の主因は、複数の DNA 損傷が nm オーダーの範囲に局在する「クラスター DNA 損傷」であると考えられている。近年分析技術が進展し、放射線誘発クラスター DNA 損傷の存在が実験的に確かめられるようになってきた。しかしながら、その生成機構や微細構造は未だ明らかになっていない。我々は、この放射線影響機構を理解するための基盤的な謎を解明するために、新たな量子科学技術を適用する。DNA 損傷生成においては、超短パルスレーザー駆動放射線と様々な高輝度プローブ光を組み合わせ、放射線照射直後(ピコ秒後)から標的(水、細胞等)をリアルタイム観測することを検討している。微細構造については、DNA 損傷を量子ドット等で標識し、量子力学的効果によって励起エネルギーが移動する現象である FRET(蛍光共鳴エネルギー移動)を計測することにより、近接した複数の DNA 損傷の位置を明らかにしたいと考えている。

次に細胞スケールで考えた時、DNA が存在する細胞核は放射線誘発細胞致死を始めとする細胞応答の第一の標的である。しかし、細胞の生命の維持は数多くの細胞小器官の働きによって支えられているため、そこへの放射線の作用は、いわば第二の標的として切り分けて解明しなければならない。このための先端的量子科学技術として SPICE-NIRS マイクロビーム細胞照射装置がある。陽子線を直径 $2\mu\text{m}$ のスポットにまで集束し、細胞核(直径 $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 程度)、細胞質、またはその両方を「狙い撃ち」することができる(図3)。放射線の当たる場所、タイミング、エネルギーの量などを変えながら、多角的に細胞の機能を解析することにより、放射線に対する細胞の生存戦略を覗き見ることができるはずである。

さらに高次の生体組織を考えると、それは培養された細胞のように均一な世界ではなく、組織幹細胞、それか

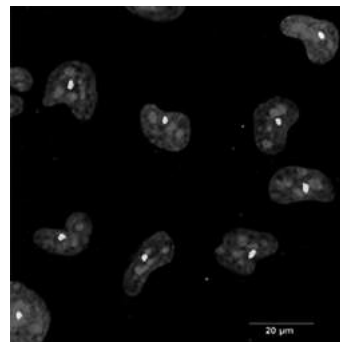


図3 ヒト肺がん A549 細胞核(薄灰色部分)を陽子線マイクロビームにて「狙い撃ち」照射した。細胞核に陽子線 500 個を照射し、免疫蛍光染色法を用いて DNA 二本鎖切断が生じた部位を可視化した(白色部分)。図中 Bar は $20\mu\text{m}$ 。

ら産み出される様々な分化細胞や、組織内環境を構成する間質細胞、細胞外基質、血管、免疫系など、多種の細胞が共存する「社会」である。この細胞社会の中のどこに量子エネルギーの痕跡が残され、「がんの原因」となる突然変異を産み出し、最初のがん細胞を作るのか？細胞社会のどのような環境変化が、それをがんとして成長させるのか？そしてそれらの変化は、初期に付与された量子エネルギーの量や時空間的分布などの物理的特徴と、どのような関係にあるのか？我々は、微細な運動、温度、電磁場、イオン濃度等を測定できるナノ量子センサーを個体の組織に応用して、放射線の影響を調べる予定である。さらに、放射線が付与した量子エネルギーがゲノム DNA のどのような場所に突然変異を残すのかを調べつつ、その変異を持った細胞や組織幹細胞、分化細胞等の様子を蛍光タンパク質等で検出するモデル動物を作製し、多光子励起イメージングや MRI 等の量子科学技術により「生きたまま」追跡する。

以上の研究を通じて、人類の未解決課題である「低線量放射線影響の解明」や量子エネルギーの医学利用の発展に貢献したいと考えている。

VII. 量子論的認知脳科学

ボーアなど量子論の創始者たちは、ウィリアム・ジェームズなどの心理学者の著書から発想を得ていたという。そのような歴史的経緯は、認知科学と量子論の密接な関係を暗示している。たしかに、量子論の領域では、観測問題など量子論の解釈を巡る認知的な議論が広げられている。一方で、マクロな観測者の思考、知覚、判断などの認知科学の対象となる心の働きの理解に対して、量子論的な数学的枠組みを適用する試みはほとんどない。

認知科学はこれまで、古典確率論の数学的枠組みによって構築されてきた。しかし、実証研究が進展するにつれ、古典的論理の枠組みではもはや理解することのできない人間の推論や認知判断が多数存在することが判明した。例えばよく知られる例に、カーネマンとドヴエール

スキーが考案した「リンダ問題」がある。実験参加者は、リンダという女性の記述「リンダは 31 歳，独身，非常に聡明で，はっきりものを言う。大学では哲学を専攻し，学生時代は人種差別や社会正義に関心を持ち，反核デモにも参加していた」を読み，今の彼女を推測し，次のどちらの可能性が高いかを回答する。A) 銀行員。B) 銀行員であり女性運動家。B は A の部分集合なので，B の確率が A よりも高くなることはないにもかかわらず，多くの実験参加者は B と回答する。この確率判断の誤りは非常に頑健であり，このような認知バイアスは連言錯誤と名付けられている。現在の主流の認知科学の枠組みでは，他の古典的論理では説明できないこのようなパラドキシカルな認知現象の例は，それぞれが例外的な認知バイアスとして扱われており，なぜこのような認知バイアスがあるのかの説明になっていない。

ところが，近年，量子確率論の数学の枠組みを用いれば，記憶，知覚，態度，言語などの分野にまたがって，別々に認知バイアスとして知られてきた各種の例を，包括的に説明可能だという見通しが立ちつつある。特に，事象間（リンダが銀行員であるという事象と女性運動家であるという事象）の「同時操作不可能性」「重ね合わせ状態」「量子もつれ状態」など，量子論に特徴的な数学的構造に対応するものを認知プロセスに仮定することで，実際に計測された心理データをより高い精度で説明できる可能性が理論研究によって示されてきた。

しかしながら，これまでは理論研究による探索が主であり，実際の人間の認知判断と照らし合わせた脳科学的な実験的実証がなされていない。量研では，このギャップを埋めるため，MRI と脳波を用いた脳イメージング実験による量子認知科学実証研究を行い，量子情報理論を用いて重ね合わせ状態などのパラメータを推定し，パラメータと連動する脳活動の時空構造を明らかにする。このことにより，心の作動原理の理解が大幅に前進するとともに，心（＝意識）の生成メカニズム解明に向けた新しい学術基盤「量子論的認知脳科学」の創出が期待できる。

VIII. 量子生命科学への誘い

量子生命科学は非常に幅広い分野にまたがる領域である。量研は「量子生命科学会」(平成 31 年 4 月に「量子生命科学研究会」から改組)等の場を積極的に活用して，国内外の様々な研究者と連携を深めていく。読者諸氏にも，この新しいムーブメントにぜひ参加して頂きたい。

－ 参考文献 －

- 1) 五十嵐龍治，ダイヤモンドを用いた光検出磁気共鳴顕微鏡：新しい *in vivo* イメージング技術，生物物理，2017, vol. 4, p. 212-215.

著者紹介

◆以下の著者の所属はすべて，

量子科学技術研究開発機構 量子生命科学領域

藤巻 秀 (ふじまき・しゅう)

(専門分野・関心分野)植物栄養学・量子生命科学

五十嵐龍治 (いがらし・りゅうじ)

(専門分野・関心分野)生物物理学

高草木洋一 (たかくさぎ・よういち)

(専門分野・関心分野)放射線科学・生体医工学・創薬科学

安達基泰 (あだち・もとやす)

(専門分野・関心分野)タンパク質工学・量子生物学

横谷明徳 (よこや・あきなり)

(専門分野・関心分野)放射線生物物理学・非平衡熱力学・システムズバイオロジー

玉田太郎 (たまだ・たろう)

(専門分野・関心分野)構造生物学・立体構造情報に基づく生命機能の理解と高機能分子の創製

河野秀俊 (こうの・ひでとし)

(専門分野・関心分野)分子シミュレーション・タンパク質・核酸分子の機能発現メカニズムの理解

鹿園直哉 (しかぞの・なおや)

(専門分野・関心分野)DNA 損傷・放射線生物学

今岡達彦 (いまおか・たつひこ)

(専門分野・関心分野)放射線発がん・量子生命科学

赤松 憲 (あかまつ・けん)

(専門分野・関心分野)DNA 損傷・放射線・化学物質影響科学

小西輝昭 (こにし・てるあき)

(専門分野・関心分野)放射線細胞生物学・マイクロビーム

山田真希子 (やまだ・まきこ)

(専門分野・関心分野)認知神経科学・脳・意識・自己意識

八幡憲明 (やはた・のりあき)

(専門分野・関心分野)精神医学・神経情報科学・脳・意識・自己意識

安全かつ効率的な廃止措置に向けて

第3回/最終回 米国の原子力発電所廃止措置の教訓

エナジーソリューションズ コリン オースティン,
日本原子力発電 山内 豊明

シリーズ第3回では、世界で最も廃止措置が進んでいる米国の経験と教訓を紹介する。廃止措置を完了した商業炉は世界で15基あり、そのうち12基が米国にある。一方、現在の日本の原子力業界は、約30年前の米国の状況とよく似ている。日本は、米国がこれまでに学んだ経験や教訓を上手く活用することにより、米国が初期に費やしたような多額の出費を回避して、効率的に廃止措置を進めることができると考えられる。

KEYWORDS: *US Decommissioning experience, Lessons Learned, Project Management, Risk Management, Regulation, Stakeholder Involvement*

I. はじめに

米国の原子力産業は、過去30年にわたって、廃止措置を成功させるための経験と教訓を学び、発展させてきた。本稿は、現在日本原子力発電株式会社と廃止措置で技術提携しているエナジーソリューションズ社がまとめた米国の廃止措置の教訓を加筆修正したものである。

米国でも、商業用原子力発電所の廃止措置の初期には、以下のような現在の日本が直面している問題と共通の多くの問題に直面していた。

- ・発電事業から廃止措置および廃棄物管理プロジェクトへの移行
- ・廃止措置作業のための新しいサプライチェーンの構築
- ・廃止措置に最も適した方法、技術、アプローチの決定
- ・使用済燃料の長期保管先の確保
- ・大量に発生する廃棄物対策
- ・廃止措置の目的に合った安全管理および放射線管理
- ・規制の変更および利害関係者との連携
- ・利用可能な限られた資金でのプロジェクトマネジメント

今日の日本と同様、米国においても、30年前は廃止措置について産業界の経験と環境条件は非常に限られていた。ベストプラクティスとアプローチ、成功した技術、プログラム、リソース(人と資金)、廃棄物管理、規制、

Lessons Learned of NPP Decommissioning on US: Colin A Austin, Toyoaki Yamauchi.

(2018年11月16日 受理)

利害関係者との関係は、30年以上にわたる経験を積み重ね、多くの教訓を継続的に発展させることで形成されてきた。これらの成功と失敗には多くの費用が費やされたが、米国で現在実施されている廃止措置プロジェクトを成功裡に導く要素の多くはその教訓から導かれている。

最も大切なものは、経験である。経験がなければ、机上の知識から廃止措置の計画を策定し、費用を評価しなければならない。廃止措置の方法等を文献等で検索すれば、先行プラントで使用した装置や方法に関する情報を得ることはできるが、廃止措置を行うためのスキルを得ることはできない。経験豊富な廃止措置マネジメントチームは、コストとスケジュールを策定・管理し、日々発生する問題に対処し、新しいサプライチェーンを管理し、従事者を再訓練し、安全と規制の遵守を最優先事項として、規制とステークホルダーから要求される事項の変化に対応を図りながら、これらのすべての作業を遂行するのである。これは廃止措置に限らず、一般産業でも当たり前のことであり、地道な練習と実践経験なしに一流アスリートのパフォーマンスは生まれないことと同じである。

原子力発電所の建設は、運転とは異なるスキル、経験、組織が必要であることを関係者はみな認識し、受け入れている。すなわち、プラントメーカーと発電会社は別組織になっている。しかし、原子力発電所の廃止措置を成功させるためには、建設や運転とは異なる一連のスキル、経験、組織が必要であるということを国際社会が認識するには時間がかかった。米国においても、これを認識するためには時間を要したが、現在ではそれが受け入れられて、コスト効率の良い安全で順応性のある廃止措



図1 廃止措置ライフサイクルサービス

置が実証されている。具体的には、米国では廃止措置の実施ライセンスを、必要なスキル、組織文化および経験を有する廃止措置専門会社に付与する新しいビジネスモデルが採用されている。廃止措置専門会社が一社または共同で、発電所の停止から廃止措置計画の策定と実施、廃棄物輸送および処分そしてサイト解放まで、全てのサービスをワンストップで提供すること(図1参照)により、各プロセスの原価管理を可能にして、プロジェクト全体の最適化を達成している。このアプローチにより、Zion では、1,085MW の PWR 原子炉 2 基の廃止措置を 10 億ドル未満、わずか 9 年で完了している。この実績は、当初旧所有者で見積もられた廃止措置費用よりも少なく、旧所有者が計画していた廃止措置完了スケジュールより 12 年以上も早い。

廃止措置の実施にあたって、多くの組織はスケジュールとコストを最適化することに注力し、これができれば最適化されたスケジュールとコストは実行可能であると信じている。しかし、Zion の例をみるとこれが当てはまらないことが分かる。当初 Zion では廃止措置の実施において、スケジュールが大幅に遅れ、コストも 100～400%増加した。計画においてスケジュールとコストを最適化することは、廃止措置を実施する組織が実行できるスキルがあってこそ意味がある。Zion においては、その後、廃止措置に特化した組織モデルを採用した、廃止措置経験のある会社が実行したことにより、プロジェクトを最適化し計画の範囲内でのスケジュールとコストで完遂することを確実にした。

廃止措置経験のない組織は、適切な技術力のある解決策に注目しがちである。このような組織は、スケジュールとコストを削減、最適化してくれる魔法の杖を求めていると言える。また、廃止措置を技術的な問題とし、運転中の延長ととらえて意思決定を行う。しかしながら、廃止措置は原子力発電所の生涯の中で、これまでとは全く異なるフェーズに入っている。プラントや機器はもはや機能がなく価値をもたない廃棄物である。ポンプはもはやポンプではない。タンクはもはやタンクではなく、クレーンももはやクレーンではない。これらはすべて廃

棄物として処分される物体である。発電所のレイアウトは運転のために設計されているが、廃止措置においては不適切である。壁や天井を取り除き、床に穴をあけて、廃止措置に最適なレイアウトに変えていく。これらの変化を可能にするため、会社は意思決定と業務遂行にあたり、従来と全く異なる考え方と組織が必要となる。

以下セクションⅡからⅦにおいて、スケジュールとコストを削減するために、米国の経験や教訓の中で日本での活用が可能と思われるいくつかの分野について述べる。しかしながら、もっとも重要なことは、廃止措置を実施する組織が解決策を見つけ、意思決定し、マネジメントしていくための正しい廃止措置の意識をもち、また、これらを実行できるだけの権限を持つことである。

Ⅱ. 廃止措置における課題

1. 使用済燃料の搬出先

米国では、使用済燃料を保管又は処理するための国営貯蔵施設または再処理施設がないため、ISFSI (Independent Spent Fuel Storage Installation) として知られる使用済燃料貯蔵システムが作られた。原子力発電所の廃止措置における最初のクリティカルパスは、廃止措置施設からの使用済燃料の搬出である。

廃止措置施設に使用済燃料が貯蔵されている状態においては、核燃料物質の放射能インベントリが極めて多いため、内包する放射線リスクが高いことに加え、燃料の冷却・臨界防止措置等の不具合による核燃料物質の漏えい・放射線被ばく等のリスクが高い。一方、使用済燃料搬出後は、上記のリスクがなくなるため著しくリスクレベルが下がり、リスクの大部分は解体工事に伴う作業安全に関するものとなる。このように、使用済燃料を搬出することは当該廃止措置施設のリスクプロファイルを変更させる重要な措置であり、核燃料物質の貯蔵に対する措置や設備維持管理が不要となり、廃止措置活動が簡素化されるため、コスト低減に直接寄与する。日本においても、立地地域における了解を前提に、米国と同様のアプローチを採用することにより、再処理施設の操業状況とは無関係に廃止措置を進めることが可能となり、廃止措置プロジェクトに伴うリスクとコストを直ちに低減することができる。

2. 解体・除染技術

原子力産業界では、革新的な技術や新規技術を採用すること、遠隔および自動化技術を最大限に活用することに依然として高い関心が寄せられる。しかし、廃止措置プロジェクトでは、実証されていない革新的なアプローチや新規技術の使用を避けることが重要であることを経験から学んだ。新規技術は不確実性が高いため、その導入においては、設備故障や既存設備との干渉、継続使用における不具合の発生等、多くのリスクをはらんでい

る。これらのリスクが顕在化すると、当然その対応が必要となり、想定外のコストの増加およびスケジュールの遅延をもたらす。また、多くの場合、放射線管理区域での追加作業が発生することにより、作業員の被ばく線量も増加する。

廃止措置のアプローチとしては、可能な限り、簡単で実績のある技術を採用することがポイントである。

施設の解体において、自動ロボットの使用は最小限に抑えることが推奨される。ロボット制御技術は、集約的であり信頼性が低い傾向があるためである。また、遠隔切断の操作には、熟練した経験豊富なオペレータが必要となる。水中原子炉内部構造物の解体では、水質や可視性に影響を与えるヒューム(微粉)を生成するガス切断法ではなく、機械的切断を選択すべきである。一方、気中での一般機器等の解体に対しては、火炎切断またはダイヤモンドワイヤー切断を選択すべきである。

廃止措置においては、施設の解体工事に入る前に、放射性物質で汚染された弁やポンプ、配管等を網羅的に除染する「系統除染」を行うことが多い。しかしながら、そもそも、除染とは、放射性物質が消えてなくなる訳ではなく、物質間を移動するだけであり、廃棄物量は逆に増えることになる。従って、系統除染の要否については、廃棄物処分費用まで考慮した全体費用と被ばく線量を比較して、総合的に判断する必要がある。米国では、廃止措置段階における系統除染の実績は少なく、近年では殆ど行われていない。除染が必要となるのは、深刻な燃料破損が起り、アルファ核種による汚染があるような場合においてのみであり、それ以外は系統除染を行わない状態での廃棄物の放射能区分に応じた廃棄物処分が行われている。

3. 廃棄物の処理処分

当然のことであるが、原子力発電所の廃止措置は大量の放射性廃棄物の発生を伴う。日本と同様に、米国における廃止措置の初期には、廃棄物処分費用は非常に高価であり、可能処分容量も非常に限られており、以下のような廃棄物量を最小化する技術ニーズがあった。これらの技術により、廃棄される廃棄物の量を減少させることができた。

- ・圧縮、破碎、焼却
- ・金属溶融・リサイクル
- ・水処理
- ・水蒸気改質 など

これらの廃棄物最小化技術の多くは、日本にも導入可能であり、廃棄物処分場が確保されて、操業されるまでの間、廃棄物保管スペースを減少させることによって、日本の廃止措置プロジェクトに直ちに利益をもたらすことができる。

米国が学んだ重要な教訓は、廃止措置から発生する廃

棄物について、予め事業者と廃棄物処分場の運営者と規制当局が合意した廃棄物受け入れ基準(Waste Acceptance Criteria: WAC)を設定することである。WACは、例えば、廃棄体の大きさの仕様、廃棄体の内包物の成分、廃棄体の表面線量率上限等であり、これらが決まっていないと事業者は発生した廃棄物をどのような形態に処理すればよいのか判断できない。廃止措置プロジェクトは、本質的には廃棄物処理プログラムである。廃棄物の発生から、廃棄物を処理するまでに行われる全ての活動は、廃棄物の最終処分経路と整合しなければならない。そうしないと、廃棄物は、将来再度の処理および再梱包等が必要となり、コスト、スケジュールおよび作業員の被ばく線量が増大する。事業者が廃止措置活動を少しでも前進させたいと考えていることは理解できるが、その計画が最終廃棄物処理経路とよく整合していることが重要である。

米国が学んだもう一つの重要な教訓は、人や環境へのリスクを増加させることなく、廃止措置に相応しいWACとすることである。運転中の廃棄物処理処分費用は、廃棄物の発生量も少なく、発電原価に占める割合が低いため、コスト効果を厳格に追及するニーズはそれほど高くないことになる。しかし、いくら効果的な廃棄物最小化対策を実施しても、廃止措置では大量の廃棄物が発生する。米国では、これらの廃棄物処理処分費用は、廃止措置の総コストの50%以上を占めている。したがって、廃止措置のニーズに合致する新しいWACを確立するために、規制当局および廃棄物処分場の運営者と協働してWACを決定することは、廃止措置事業者にとって非常に重要である。

Ⅲ. プロジェクトマネジメントとコントロール

廃止措置のプロジェクトマネジメントは、ガイド・管理・実施・監視・修正・報告を行う実績あるシステムとツールを用い、プロジェクト活動に精通し、廃止措置の目的に合致することができる、経験豊富なプロジェクトマネージャーに依るところが大きい。経験豊富な廃止措置専門会社は、プロジェクトマネジメントプロセスを継続的に評価・改善し、各プロジェクトをより効率的に進めている。

プロジェクトマネジメントにおいては、WBS(Work Break down Structure)によってプロジェクト実行に係る業務を系統的に分解し、個々の作業内容や成果物を定義した上で、他作業との関連も含めて構造化・階層化して表示する。詳細なプロジェクトベースライン(基本計画)範囲、スケジュールおよびコスト見積もりは、WBSを通して策定され、統合される。WBSは、労務(要員)、設備、資機材、物資、下請契約、旅費、宿泊費など、必要なすべての作業活動およびリソース(人、資金)に関す

る方法を特定し、定義している。なお、ベースラインは実現可能な計画にすることが重要である。実現できそうもない計画は関係者のモチベーションを失わせ、かえって大きな費用上振れの原因となる。

プロジェクトマネジメント組織および EVMS (Earned Value Management System: 出来高管理システム) は、以下の機能を提供する。

- ・コストとスケジュールの統合
- ・リソース (人、資金) の配分スケジュール
- ・クリティカルパス活動
- ・ベースラインの変更管理プロセス
- ・EAC (Estimate At Completion: 最終推定コスト) の評価
- ・プロジェクト進捗度のモニター (週 1 回など)
- ・コスト・パフォーマンス・インデックス (CPI) およびスケジュール・パフォーマンス・インデックス (SPI) を含む当初から現在までのベースラインに対する実績の分析
- ・プロジェクト進捗状況等のモニタリング、解決策の特定

組織を構築し、コミュニケーションを行い、廃止措置作業パッケージを作成し発行するプロセスと共に、効率的で明確な作業管理プログラムを設定することは、廃止措置の計画的遂行を推進する。廃止措置作業パッケージは、作業員が何をすべきかを明確にし、作業が効率的かつ安全に完了するように、作業計画、前提条件、アプローチおよび具体的な指示を定義する。廃止措置作業パッケージは、計画段階に策定された WBS と整合がとられる。多くの廃止措置作業者を現場に動員する前に、計画チームは十分な数の作業パッケージを策定し、作業が終了する前に、その時間と生産性が最適化されていることを確認すべきである。

多くのプロジェクト組織は、原子力発電所の廃止措置プロジェクトをうまくマネジメントするためには上述のシステムと活動が必要だと言っている。一方、廃止措置のプロジェクトと一般的で予測可能なプロジェクトとの間には重要な違いがある。それは、廃止措置プロジェクトは、かなりリスクが高いという点である。一般のプロジェクトは、範囲、コスト、スケジュールに焦点を当てており、しばしば「三頭ドラゴン」と呼ばれるが、予測しにくいプロジェクトでは、リスクがプロジェクトマネジメントモデルの主要な構成要素になる。これらのプロジェクトでは、その性質上、ベースラインの策定が限られた業務経験に依存すると共に、多くの不確実性と予測不可能性を有することになる。一例として、Zion プロジェクト (図 2 参照) では、独自のアプローチに基づき、この高リスク環境における廃止措置プロジェクトをマネジメントするために必要なツールを開発し、実証している。

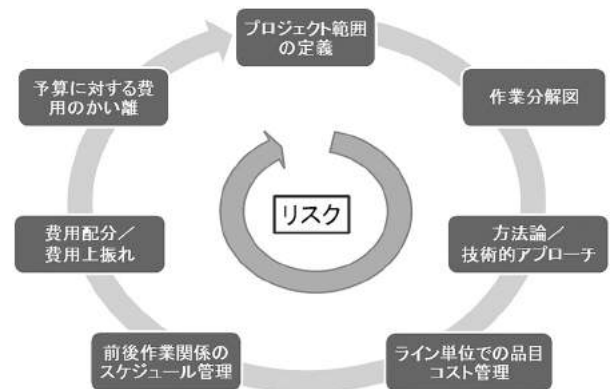


図2 リスクマネジメントのためのプロジェクトマネジメント

IV. 廃止措置の規制

廃止措置の活動、廃棄物処理および放射性物質等の安全対策に関連する地方および国 (米国の場合は、州も含む) の規制を遵守することは重要であり、回避することはできない。交渉可能なのは、規制の運用方法である。多くの状況において、規制をどのように遵守するかは、規制そのものと混同される可能性がある。米国の規制を遵守するための枠組みの多くは、原子力発電所の運転のために確立されたものであり、このアプローチは、日本を含む原子力発電を有する多くの他の国々において同様である。しかし、廃止措置時における安全要件と事故リスクは、運転時とは大きく異なる。その結果、規制を遵守する方法は、廃止措置への移行に合わせて変わるはずである。簡単な例としては、ドラム缶に包装された廃棄物から、より大きなコンテナの梱包に進化し、最終的には全く包装せず、大きな塊 (例えば、蒸気発生器) としてそのまま取り扱うものへの変化である。これらは、規制そのものに変更を加えることなく、規制を遵守する方法に変更を加えたものである。

米国の廃止措置計画 (PSDAR) は認可制ではなく、規制委員会への届出制であり、公聴会を開催してステークホルダーの合意を得た上で、実際の廃止措置作業が開始される。その記載内容も概略手順と工程、費用、環境影響評価である。また、廃止措置段階に入れば、原子炉監督プロセス (ROP) は除外される。さらに、公聴会で廃止措置費用が公開されていることから、過剰な規制で費用増になることは規制組織の評判リスクとなる。

日本の事業者や規制当局が直面する廃止措置の規制課題には、以下のものがあると考えられる。

- ・放射性廃棄物処分施設の立地、許可および運営ならびに廃止措置中に発生する大量の放射性廃棄物を取り扱うための関連する規制制度は、まだ十分に確立されていない。放射性廃棄物 (L1, L2 および L3 廃棄物) のすべてのレベルについて、廃棄物受け入れ基準 (WAC) を含む最終施設および規制上の制限に不確実性がある。

- ・原子力発電所の運転から廃止措置へと意識と活動が十分変わっていないことおよび廃止措置段階の原子力発電所の監視と検査を行う方法が十分に確立されていない。
- ・廃止措置の任務に関しては、運転中の規制と要件のレベルが異なるが、新しい任務のリスクプロファイルと一致していない。

米国で得られた廃止措置規制に係る経験は、日本の廃止措置にも直接移転可能である。重要なことは、運転から廃止措置への変化を理解している規制当局と事業者との関係である。運転から廃止措置への変更を反映する段階的アプローチが必要であり、規制当局と事業者が協力することにより、合理的に解決することができる。米国では NRC と NEI が対話を継続して、改善を続けており、2019 年には廃止措置段階の規制が改善され、新たに廃止措置規制が制定される見通しである^{1, 2)}。

V. 人材育成

運転状態から廃止措置への移行は大きな変化である。まず、組織体制が変わらなくてはならず、また、組織のルールや責任権限も変わるだろう。仕事の内容や必要なスキルも変わり、物理的な職場環境も変わる。原子力施設における職務は、放射線管理施設における職務に替わり、最終的には一般的な産業施設における職務となる。プロジェクトを通した継続的な大きな変化を扱うことができる人材が必要となる。このため、研修やスキル取得および配置転換の包括的な計画が必要となる。実際、以下の通り日々の仕事に変化する。

- ・技術的安全制御のみを実施していたが、管理的な安全制御が増える
- ・機器による運転管理が減り、実際に手を動かすような管理活動が増える
- ・厳格な安全に基づく運転手順の遵守よりも、個人の意思決定が増える
- ・環境と優先順位が常に変化する

廃止措置の最適化を成功させるために、これらの変化において大きな職業文化の転換が必要になるということを認識することが、極めて重要である。これは組織のどのレベルの人材においても、経営層であっても担当であっても、あてはまる。

VI. ステークホルダーとの関係

ステークホルダーとの良好な関係は、廃止措置プロジェクトの成功にとって必要不可欠である。関係不良およびステークホルダーマネジメント策定の失敗は、廃止措置プロジェクトにおいて重大な問題を引き起こし、大幅なコストの上昇およびスケジュールの遅延をもたらす。利害関係者には、まず、廃止措置施設、放射性廃棄物中間貯蔵、放射性廃棄物の処理および最終処分によっ

て影響を受けるコミュニティ(地域社会)、組織および事業体を特定することが必要である。また、原子力発電所の運転から廃止措置への変化がもたらす主要な地域社会への影響にも対処しなければならない。

総合的なステークホルダーの関与は、プロジェクト実施に関する潜在的な懸念、作業員・公衆・環境への影響およびクリーンアップ後のサイトの望ましい最終状態と再利用に対応するために重要である。考慮すべき事項を入手し、実行と管理方法を決定し、作業員、公衆および環境を放射性物質および有害物質からどのように保護するかが、除染や解体方法、放射性廃棄物の最終処分場立地および廃棄に関する合意形成の構築に対する信頼度に影響する。

ステークホルダーとコミュニティとの連携の目標は、以下のとおりである。

- ・廃止措置への移行を支援するとともに、地域社会への影響について理解を深めること
- ・地域社会や適切なステークホルダーとの関係を構築すること
- ・地域社会から信頼されること
- ・明確、正確、タイムリーかつ一貫性のある情報を提供すること
- ・ステークホルダーの要望に的確に対応すること
- ・プロジェクトを停止または遅延させ、コストを増加させる論争を最小限に抑えること
- ・廃止措置を担当する事業者の評判を保護すること
- ・廃止措置プロジェクトに関わる広報上の課題について、継続的に情報発信すること

日本では、地方自治体や地域社会が、原子力発電所の廃止措置、地元労働者の活用、放射性廃棄物の輸送・処分方法や場所に関する意思決定に多大な関与を果たすことが想定される。米国では、多くの電力事業者と廃止措置事業者が、地元市民、政府職員、指導者、活動家、環境グループの代表者からなる横断的な CAP (Community or Citizens Advisory Panel: 地域社会諮問委員会) を設置することで、多様な意見を効果的に受け取ることができ、プロジェクトにおける課題の理解を得て、対処する機会を提供できることを学んできた。

例えば、Zion, La Crosse, SONGS のプロジェクトでは、電力会社と協力して、CAP の設立、トピック、議題の設定、会議の頻度、適切な管理者と個別技術専門家(中小企業)の協力を支援し、地方自治体および規制当局のステークホルダーのフィードバックが確実に得られるようにした。会議は、通常は四半期ごとに、プロジェクトの進展または関心の高い話題がある場合はより頻繁に開催された。廃止措置事業者も、近隣の地方公務員やユニオン(組合)の役員と、期待される活動、地域への影響、廃止措置事業者や組合員が廃止措置プロジェクトに取り組むことについて、早期にコミュニケーションをとって

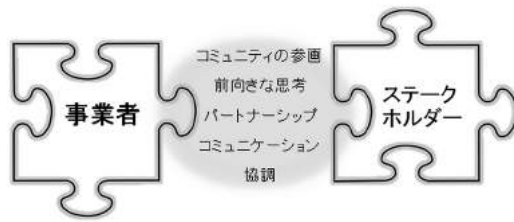


図3 米国におけるステークホルダー・コミュニケーションの概念

きた。廃止措置プロジェクトでは、必要な廃止措置計画の了解をタイムリーに取得できる十分な情報を提供している。絶滅危惧種を含む現地の野生生物種への影響を調査し、影響を受ける種を責任ある方法で保護または移転した。現在および計画中の現場作業に関する情報を直接提供するため、廃止措置施設訪問および見学を受け入れている。図3は、米国における事業者(電力会社および廃止措置事業者)とそのステークホルダーとの間の効果的コミュニケーションの関係の概念を表している。

最終的には、効果的なコミュニケーションおよび透明性は、地方自治体、電力会社、廃止措置事業者、公衆および規制当局にとって有益である。廃止措置と放射性廃棄物処理処分目標はすべての当事者間で調整され、相互の信頼が得られ、プロジェクトの効率性と意思決定が改善される。

VII. その他米国の廃止措置の教訓

米国では、30年以上にわたる商業用原子力発電所の廃止措置および廃棄物管理の経験により、多くの原子力産業、規制当局(例えば、原子力規制委員会)において、現在および将来の廃止措置プロジェクトに適用する教訓を学んできた。廃止措置の教訓とは、広範囲にわたるため、これさえ行えば成功できるという特効薬のようなものはない。むしろ、多くの個別に得られる教訓の集合体である。これらの中から、日本における廃止措置の環境条件で、有効と思われる教訓の一部を以下に記す。

- ・運転から廃止措置への移行に伴い、運営方法や規制を変更することは重要である
- ・廃止措置は、プロジェクトであり、複雑な「廃棄物処理プロジェクト」である。エンドステートの条件および廃棄物処理の計画と実施が必要である。
- ・資金は利用可能かつ予測可能であること
- ・使用済燃料搬出後、規制要求は大幅に減少するため、可能な限り早期に燃料を搬出する
- ・リスクの軽減とベースラインの簡素化は、成功確率を高める
 - 研究開発(R & D)と革新的技術の採用はプロジェクトリスク(コスト)を高める
 - サイトと施設の特性および主要なリスクを可視化する
- ・経験と知識のあるマネージャーの監視と関与が重要

である

- ・強力なプロジェクトマネジメント、プロジェクトコントロールおよびタスク計画とその追跡が必要である
 - 廃止措置プロジェクトは建設プロジェクトとは異なり、経験マニュアルがない
 - 不確実性を管理するスキルが求められる
- ・廃止措置について、目的と内容に相応しい規制に変更する必要がある
 - リスク(原子力、放射線、産業)に基づくグレーデッドアプローチ
 - 規則と規則を遵守するための運用を混同してはならない
- ・電力会社および廃止措置事業者の「役割と責任」の区分が重要
- ・廃止措置マネジメントは、プロジェクトの意思決定に責任を負わなければならない
- ・ステークホルダーの関与
 - 迅速、高頻度、率直なコミュニケーション
 - サプライズは避けること

日米では廃止措置を取り巻く環境が異なるものの、米国での経験の多くが大なり小なり日本に適用可能であると考えられる。

VIII. まとめ

日本ではいくつかの原子力プラントの廃止措置が実施されてきているものの、実績は未だに限られている。2011年の不幸な福島第一原子力発電所事故が起こるまでは、日本の原子力発電所は運転期間の延長を視野に入れつつ運転を継続してきていたため、廃止措置に備える必要がなかった。しかしながら、福島第一原子力発電所事故後、日本の原子力発電所をとりまく状況は大きく変わり、多くの発電所が廃止措置段階又は準備中にある。

現在の日本の原子力業界の状況は、30年前のアメリカの状況と比較することができる。このため日本は、米国が経験したような過酷で高額な試練を再び繰り返すことなく、すでに米国において得られている経験や教訓を活用することができる。それらを学ぶことにより日本は、安全で統制がとれて、合理的な費用で、原子力発電所の廃止措置を進めることができると考えられる。

IX. 解説シリーズのおわりに

本解説シリーズでは、これまで3回にわたって、廃止措置にかかる日本の現状と課題、英国および米国の経験と教訓を紹介してきた。

今、国内の十数基の商業炉や研究開発用原子力施設がそれぞれの所有者の下、同時並行的に廃止措置が進められようとしている。言うまでもなく、経験のない難しいプロジェクトを同時並行で進めることは、多くの不確実

性と予測不可能性を抱える中で学習効果を反映することができず、全体リスクを高めることとなる。60年前、国策民営で原子力発電を導入する際、同時並行ではなく、計画的に商業炉を導入してきた。しかしながら、現在、国内廃止措置の全体プログラムを策定して計画的に進める仕組みや制度はない。

現在、英国では政府系の原子力廃炉庁(NDA)が中心となって、米国では民間の廃止措置専門会社がビジネスとして廃止措置を進めている。アプローチの方法は異なっているものの、これまで記述してきたように両国の30年に及ぶ廃止措置経験から得られた最も重要な教訓は共通である。それは、これまでの原子力産業のカルチャーとマインドの変更である。

日本では、殆どの原子力施設の現場で同一サイト内に運転施設と廃止措置施設が混在している。そのため、廃止措置カルチャーとマインドを日本の組織の中に定着させるのは難しい。野球のルールを理解することと上手くプレイすることが違うように、頭で理解することと実際にプレイすることは全く違う。ともすれば、廃止措置の現場では運転のマインドで設備を保全することになってしまう。廃止措置従事者は、廃止措置のプレイヤーとしてトレーニングが必要である。また、全ての原子力関係者も、米英の廃止措置経験を理解して、この違いを受け入れ、協力する必要がある。そして、規制組織や地元自治体、サプライチェーンなどの関係者もこの違いを理解

して協力してもらう必要がある。

それぞれの組織が役割を明確にし、安全で円滑な廃止措置の終了のために自らが行うべきことを考え、組織間で責任を押し付けあうことなく、協力してプロジェクトを進めていかねばならない。最後に、廃止措置が若い世代にとっても魅力ある事業になるよう現役世代で努力していきたい。

－ 参 考 資 料 －

- 1) SECY-18-0055, "Proposed Rule: Regulatory Improvements for production and Utilization Facilities Transitioning to Decommissioning (RIN3150-AJ59)", May 7, 2018.
- 2) SECY-14-0118, "Request by Duke Energy Florida, INC., For Exemptions from Certain Emergency Planning Requirement" Dec 30, 2014.

著 者 紹 介



Colin Austin (コリン・オースティン)
エナジーソリューションズ社
(専門分野/関心分野)原子力化学工学,
廃止措置, 放射性廃棄物対策

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

連載
講座核融合トリチウム研究最前線
—原型炉実現に向けて—

第10回 炉材料表面および内部のトリチウム分布

近畿大学 大塚 哲平

本稿では、トリチウムイメージングプレート技術を用いて、核融合炉のプラズマ対向壁材料や真空容器材料の候補材である金属や、界面を含む異種金属被覆材料の表面から内部のトリチウム濃度分布を可視化・定量化した結果を紹介する。本手法により、金属の表面近傍にはトリチウムが高濃度に偏在し、内部に溶解したトリチウムとは異なる放出挙動を示すことが明らかになった。

KEYWORDS: Tritium, Fusion reactor materials, dust, F82H, Tungsten, Imaging plate, PHITS, Diffusion, Trapping

I. はじめに

核融合炉の第一壁やダイバータなどのプラズマ対向材料の表面は放射性水素同位体トリチウム燃料のプラズマに曝される。また、炉を構成する真空容器内側の表面はプラズマに直接曝されることなく、熱化したガス状(水素分子状)のトリチウムに曝される。炉材料のトリチウム汚染の問題は、材料表面へのトリチウムの吸着および内部への蓄積として考えることができる。本連載講座の第6, 7回でも紹介したように、炉材料へのトリチウム蓄積挙動として、水素同位体の炉材料への溶解、拡散、捕獲そして透過などの材料中水素パラメータに関する研究が精力的に行われている。従来、材料中水素パラメータは水素透過実験や昇温脱離分析実験によって調べられてきており、信頼性の高いデータが蓄積されている。一方で、これらの手法は、材料内部がブラックボックス化されているがゆえに、初期条件としての材料中の水素同位体分布は未確認であることが多く、透過データや昇温脱離放出データの解釈を誤った方向に導く可能性がある。

図1¹⁾は、ダイバータ材料であるタングステン、真空容器材料である低放射化フェライト/マルテンサイト鋼の主成分である α 鉄、および比較のための発熱型水素溶解金属ジルコニウムについて、573Kにおいて13.3kPaの

水素ガスと各金属とを長時間接触させて、内部に水素を吸収させ、室温にて真空中で10分間静置した際の、表面から内部にかけての蓄積分布(深さ分布)の概念図を示している。図1の左軸は金属表面に吸着した水素の表面濃度を、右軸は金属内部に溶解した水素の体積濃度(密度)を表している。金属の単位表面積あたりの原子数は約 10^{19}m^{-2} であり、金属の単位体積あたりの原子数は約 10^{29}m^{-3} である。水素の金属表面への吸着分子(原子)が第1層のみのラングミュア吸着であるとして、水素分子から解離した水素原子が金属原子と同程度数吸着したとすれば、その表面水素濃度は約 10^{19}m^{-2} と考えることが

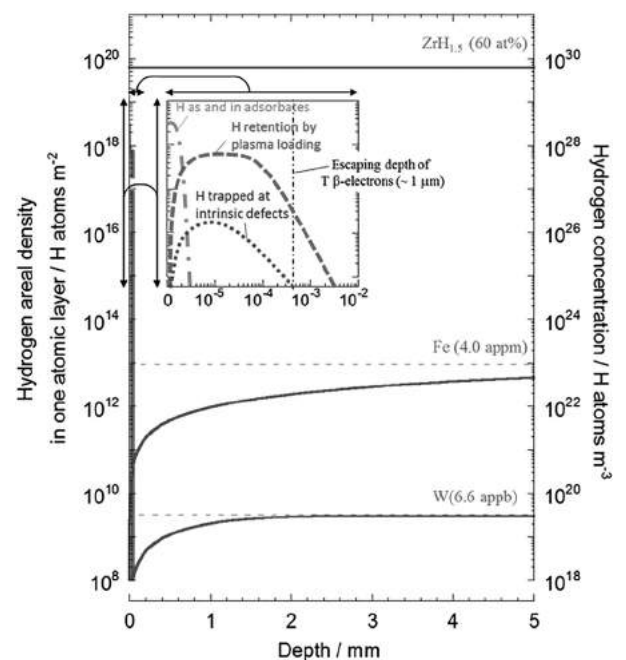


図1 各種金属の表面から内部(5mm深さまで)にかけての水素濃度分布(左軸:表面濃度, 右軸:体積濃度)

Research frontier of tritium for fusion reactor- toward the DEMO reactor (10); Quantification of tritium retained in nuclear fusion reactor materials: Teppei Otsuka.

(2018年11月1日 受理)

■前回タイトル

第9回 トリチウム安全閉じ込め

できる。図中の一点鎖線は解離吸着した水素原子が表面から数原子層まで入り込んでいる様子を示している。比較として示したジルコニウム水素化物($\text{ZrH}_{1.5}$)に注目すると、単位体積あたりの水素化物に含まれる水素濃度(右軸)を表面あたりに換算した濃度(左軸)は約 10^{20}m^{-2} であり、吸着水素の表面濃度を十分に上回っている。また、水素は発熱型水素溶解金属であるジルコニウムから放出されないで、水素濃度は内部から表面にかけて一定に保たれる。一方、吸熱型水素溶解金属である α 鉄やタングステンの水素溶解度は極めて小さいので、溶解水素の表面濃度は吸着水素の表面濃度よりも6桁以上も小さいことになる。また、 α 鉄やタングステン中の水素拡散係数は大きいので、水素は拡散により放出されるであろう。

原型炉実現に向けて、炉材料のトリチウム汚染状況を把握し、適切な除染方法を適用することが極めて重要である。たとえば、金属表面のトリチウム汚染が金属の水素溶解度だけでは説明できないくらいに高いことは経験的に良く知られている。このことを理解するには、図1に示したように、材料表面から内部にかけてトリチウムがどのように分布しているのか、またトリチウムから発せられた β 線がどのように表面から放射されるのかを理解する必要がある。本連載講座では、図1の金属表面から内部にかけてのトリチウムの深さ分布の概念が得られた経緯を実験結果とともに紹介する。

II. トリチウムイメージングプレート法

1. 原理と応用

トリチウムイメージングプレート法(TIPT)は、トリチウムを材料に導入し、材料表面にイメージングプレート(IP)の測定表面を向かい合わせて近接させることにより、トリチウムから発せられる β 線をIPの測定表面に塗布された輝尽性蛍光物質に入射させ、入射 β 線エネルギーの時間積算強度(β 線強度)をIPの輝尽性蛍光強度に変換して測定するものである。IPの輝尽性蛍光物質による測定原理は文献2)に詳しく報告されている。ここでは、IPによる材料中のトリチウム β 線の検出の原理について述べる。トリチウム β 線のエネルギーは最大で 18.6keV 、平均で 5.7keV である。図1中の材料中の β 線(電子)の飛程は最大(平均)で、炭素: $3\mu\text{m}$ ($0.5\mu\text{m}$)、 α 鉄: $1\mu\text{m}$ ($0.1\mu\text{m}$)、ジルコニウム: $1.2\mu\text{m}$ ($0.6\mu\text{m}$) およびタングステン: $0.4\mu\text{m}$ ($0.06\mu\text{m}$) である。このため、IPは材料内の β 線の飛程よりも浅い領域に分布したトリチウムを検出することができる。図1において、水素をトリチウムに置き換えて考えてみる。金属表面からトリチウム β 線をIPで測定しようとするとき、ジルコニウム水素化物については内部の一定濃度のトリチウム(水素)を反映した β 線強度が得られる。実際に、

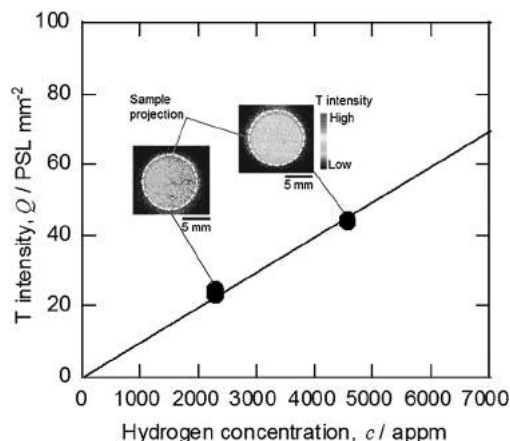


図2 既定濃度のトリチウムを含んだジルコニウムとIPにより測定されたトリチウム β 線強度との関係

表1 遷移金属に 13.3kPa , 873K で水素(トリチウム)をガス吸収法により導入した後の、金属表面のIP測定結果

Metal	Cu	Ni	Fe	Mo
Surface T intensity [10^3 PSL mm^{-2}]	2.4	0.8	1.1	0.7
H conc. [appm] at 13.3kPa , 873K	7.6	31	100	24

ジルコニウムに既定濃度のトリチウムを含んだ水素を吸収させ、均一化させた後、表面をIPで測定すると、図2に示すように、水素(トリチウム)濃度と β 線強度には良い線形性があり、これを検量線として用いることが可能である。

一方、吸熱型水素溶解金属である α 鉄や銅に条件を揃えてトリチウムを導入しても、表1に示すように、金属の水素溶解度とトリチウム β 線強度との間には相関が見いだせない。これが表面に吸着したトリチウムによるスクリーニング効果である。核融合炉においては、さらにプラズマからエネルギーをもったトリトン(トリチウムイオン)が金属中の入射深さまでに注入されるため(図1の破線)、さらに内部のトリチウム挙動を窺い知るのは難しくなる。

金属の最表面のみにトリチウムが存在する場合とは異なり、表面から β 線飛程よりも浅い領域にトリチウムが存在する場合、トリチウムから発せられた β 線は金属との相互作用を繰り返してから、最表面から放射される。この際、表面にIPの測定表面を近接させておくと、各深さのトリチウムからの β 線強度が重畳した積算強度がIPで測定されることになる。逆に、IPで測定された β 線強度を材料中の各深さのトリチウムからの β 線強度の寄与毎に分解して、トリチウム濃度を逆算できれば、材料中のトリチウム β 線の飛程よりも浅い領域のトリチウム深さ分布を測定することができる。図2に示すように、既知の密度をもつフィルムを厚さを変えて挿入することにより、各深さのトリチウムからの β 線を逐次遮蔽しながら、 β 線強度の減衰曲線を得ることができる。

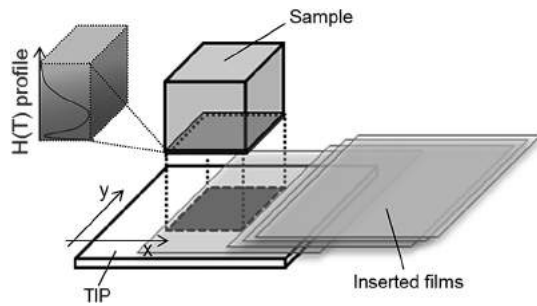


図3 フィルム挿入法の概念図

この減衰曲線をモンテカルロシミュレーションで再現できるようなトリチウム濃度分布を与えるわけである。これが TIPT—フィルム挿入法であり、文献3)に詳細が述べられている。

飛程よりも深い領域のトリチウム濃度分布を得るためには、図1で示した材料表面近傍に偏在したトリチウムを取り除く必要がある。従来、表面と平行に試料を数mmの厚さの試料片に、数回から数十回に分けて切り分けて(セクションングして)、トリチウム濃度分布を得る方法が用いられてきた。TIPTは、トリチウムを試料に導入した後、試料を一度だけ切断して、その切断面のトリチウム分布をIPによって測定する手法(切断法)である。これにより、数cmオーダーの濃度分布をIPの測定分解能 $25\mu\text{m}$ で測定することができるようになった。次節では、TIPT—切断法によるトリチウム(水素)深さ分布測定を水素拡散係数の決定に応用した例について述べる。

2. タングステン中の水素拡散係数測定

材料にトリチウムを導入する方法には、高温ガス吸収法、プラズマ注入法および陰極電解チャージ法などがある。プラズマ注入法では、DCグロー放電の電極に試料を埋め込む方法や、アイダホ国立研究所(INL)の線形トリチウムプラズマ実験装置(TPE)を用いる方法を開発してきた³⁾。図4(a)は、TPEによってプラズマからトリチウムを様々な核融合炉材料に注入した実験状況を示している。図4(b)は、材料の一端面をタングステン製マスクで覆うことにより、マスクの穴を通して限定した材料表面領域にトリチウムを注入した際の概念図、(c)はトリチウム注入後に、注入面および注入面に対して試料を垂直に切断し、切断面のIP測定を実施した際の概念図である。

図4(d)は、573Kにおいて1時間かけて、タングステン試料の一端面からトリチウムを含んだ重水素($T/D=1\%$)を注入した後、注入面、および、試料を切断(分割)して現れた切断面を $100\mu\text{m}$ 程度研磨した表面についてTIPTを適用した結果を示している。図中、まず注入面には円形状に均一にトリチウムが分布しており、プラズマから表面濃度一定の条件でトリチウムが注入さ

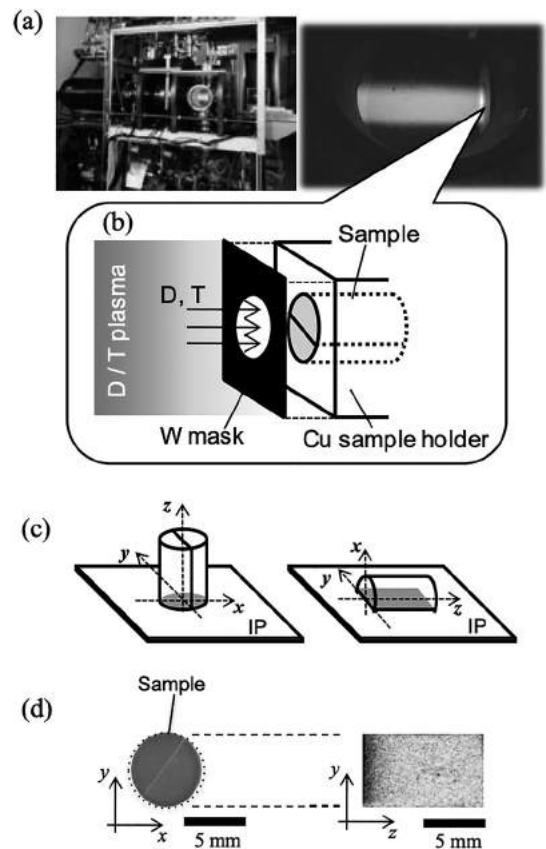


図4 (a)TPE(INL)によるプラズマからのトリチウム導入の実験状況写真および(b)概念図、(c)TIPTの概念図および(c)タングステン試料のIP測定結果

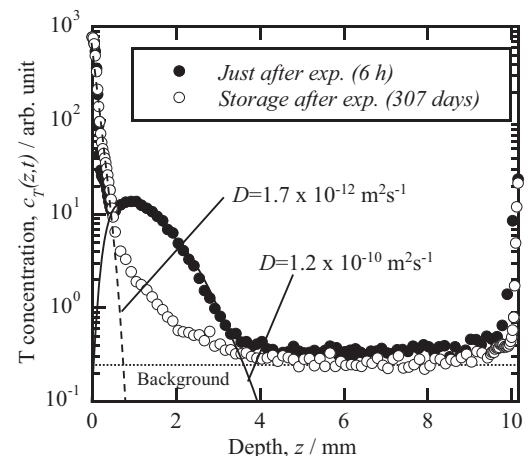


図5 573K、1時間かけてプラズマから純タングステンに注入されたトリチウムの深さ分布

れたことが示唆される。切断面では注入表面から内部にかけての重水素(トリチウム)濃度のグラデーションが見られ、トリチウムが内部に侵入したことが明瞭に示されている。この切断面のトリチウム濃度分布の黒化度を定量化し、表面から内部への深さ分布として表示したものが図5である。図中、トリチウムは注入面および注入面とは反対の裏面から数百 μm 深さまでの領域に偏在していた。また、注入面から数百 μm 深さより深い領域では、トリチウム濃度は1mm深さを境として注入面側と、

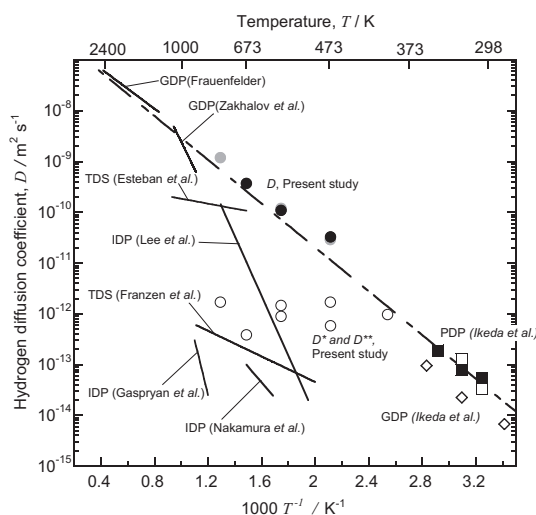


図6 純タングステン中の水素拡散係数

その反対側(4mm 深さまで)に向かって減衰することがわかった。この注入面から4mm 深さまでの濃度分布を形成するトリチウムを内部成分とすると、その濃度は表面に偏在したトリチウム(表面偏在成分)の濃度の1/10程度であった。

注入面におけるトリチウム濃度が一定の境界条件で、表面偏在成分が拡散進入によって生じたと仮定し、フィックの第2法則の解より、みかけのトリチウム拡散係数を求めた。一方、内部成分については、1mm 深さを境に注入面へも濃度分布が形成されていたことから、表面偏在成分と同様の条件で拡散進入した後、約1分間の冷却期間中にトリチウムが注入表面から拡散放出されたと仮定し、フィックの第2法則の数値解をフィッティングすることにより、トリチウム拡散係数を求めた。

図6は、INLのTPE実験および九州大学のDCグロー放電実験により得られた純タングステン中の水素拡散係数データを示している。ここで、水素同位体効果(質量効果)については、20%程度の解析誤差の範囲内であるため無視できるものとしている。図中、内部成分について求められた水素拡散係数は、高温で得られた文献データの extrapolation に良く一致していることがわかる。一方、表面成分について求められた値は extrapolation から2桁程度小さく、温度依存性も小さかった。また、実験終了後、室温で307日間後に同様の実験を行ったところ、内部の拡散成分が放出されたあとも表面偏在成分は残ったままであった。これは表面偏在成分がタングステン材料表面近傍のプラズマ注入によって誘起された欠陥に強く捕獲されたトリチウムであることを示唆している。また、注入面に対して裏面で観察された表面偏在成分は純タングステンの粒界や転位、表面酸化膜などに捕獲されたものであると考えられる。

3. タングステン被覆 F82H 内部のトリチウム分布観察

図7は、タングステン被覆 F82H の被覆材表面から DC グロー放電によってトリチウムを注入した後、被覆材と F82H との界面を含んだ断面のトリチウム分布を調べた結果^{5, 6)}である。図7(a)のようにタングステン被覆材表面の限定した領域にのみトリチウムを注入したため、(c)に示すように注入面には円形状のトリチウム分布が見られた。一方、被覆材断面では注入領域は明確ではなく、被覆材全体にトリチウムが分布していることがわかる。図7(c)のトリチウム濃度を定量化し、タングステン被覆材表面から界面を跨いだ F82H 内部へのトリチウム深さ分布を図8(a)に示した。図中、注入面から数百 μm 深さまでにトリチウムが偏在していたが、それより深い領域のトリチウム濃度はほぼ一定であった。また、界面を跨いで、F82H 中にトリチウムが拡散進入していることが確認できた。図8(b)はタングステン被覆 F82H へのトリチウム濃度分布の形成機構の概念図である。プラズマによって注入されたトリチウムはタングステン表面近傍にプラズマ注入によって誘起された水素捕獲サイトに捕獲されて、高濃度に偏在する。本研究で用いたプロトタイプの真空プラズマ溶射(VPS)タングステン被覆膜は多孔質であったので、熱化し水素分子状となったトリチウムは容易に膜全体に均一に分布する。タ

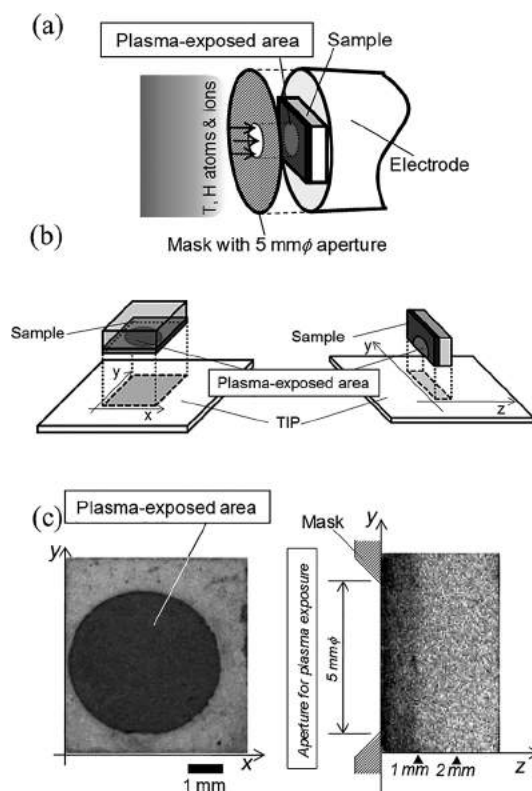


図7 (a) タングステン被覆 F82H の被覆材表面から DC グロー放電によってトリチウムを注入した後、(b) 注入面および切断面に TIPT を適用した様子の概念図、および (c) 注入面および切断面のトリチウム分布

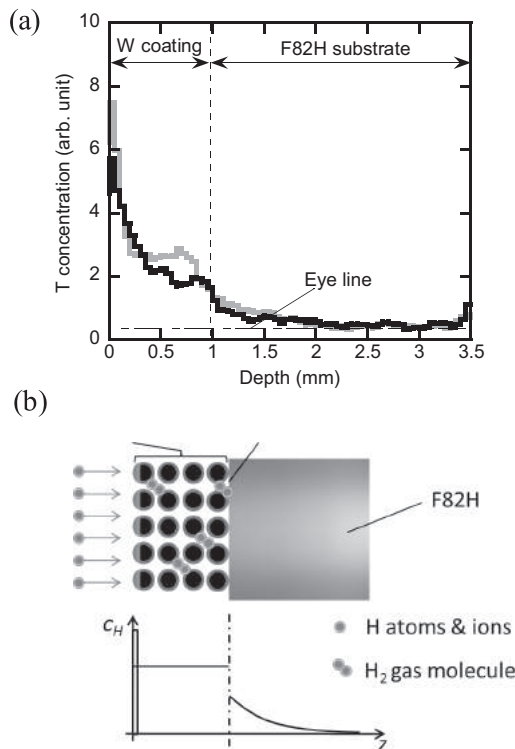


図8 (a)タングステン被覆 F82H 中のトリチウム深さ分布および(b)トリチウム深さ分布の形成機構の概念図

ングステン被覆と F82H との界面に達したガス状トリチウムの一部は、限られた領域を通して F82H に溶解し、拡散・透過する。このような知見は、単に透過放出挙動を調べるだけでなく、あわせて表面から内部のトリチウム深さ分布を明らかにすることにより得られたものである。

Ⅲ. まとめ

TIPT によって、金属表面から内部にかけてのトリチウムの分布状況が明らかになってきた。

核融合炉のプラズマ対向壁材料や真空容器材料には、

トリチウム蓄積量を小さくするために、水素溶解度が低い金属が選ばれる。金属のトリチウム汚染を考えた場合、相対的に、表面近傍には内部の 10~100 倍のトリチウムが偏在することになる。これら表面近傍の偏在成分は、内部に溶解したトリチウムの拡散放出が終わりに近づいた後も、強く保持されたままであり、もっと長い期間にわたって脱捕獲による再結合や同位体交換で放出されるので注意が必要である。

今後、原型炉実現に向けて様々な先進複合材料や被覆材が開発されるであろう。この際、熱的・機械的性質の健全性に加えて、プラズマまたはガス状のトリチウムの材料への進入・蓄積の機構を明らかにしていく必要がある。

— 参考資料 —

- 1) T. Otsuka and T. Tanabe, Materials Transactions, 58, 10, (2017) 1364-1372.
- 2) Y. Iwabuchi, N. Mori, K. Takahashi, T. Matsuda and S. Shinoya, Jpn. Appl. Phys., 33, 178 (1994).
- 3) K. Sugiyama, T. Tanabe, T. Saze, T. Nishizawa, Fusion Engineering & Design, 81 (2006) 1111-1116.
- 4) T. Otsuka, M. Shimada, R. Kolasinski, P. Calderoni, J.P. Sharpe, Y. Ueda, Y. Hatano, T. Tanabe, Journal of Nuclear Materials, 417 issue 1-3, 1135-1138, (2011).
- 5) T. Otsuka, T. Tanabe and K. Tokunaga, J. Nucl. Mater., 438, S1048-S1051 (2013).
- 6) T. Otsuka, T. Tanabe, K. Tokunaga, N. Yoshida, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, Journal of Nuclear Materials, 415, S769-S772, (2011).

著者紹介

大塚哲平 (おおつか・てっぺい)

近畿大学 理工学部

(専門分野/関心分野)原子炉・核融合炉材料と水素同位体の相互作用に関する研究



災害に備えるために必要となる原子力関係者の倫理 その1 倫理規程制定・改定の歴史と2018年改定のポイント

倫理委員会

日本原子力学会倫理規程は、「社会環境の変化も考慮した不断の見直しを行うこと」として、倫理委員会での検討に基づき、理事会承認により改定が行われている。東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、「1F事故」)後も、なぜ事故を防ぐことができなかったのか、倫理規程あるいは委員会の活動に何が足りなかったのか等について議論を重ね、倫理規程改定を実施した(2014年)。最新の倫理規程は、さらなる議論を重ね、組織文化やリーダーシップ等を中心に改定したものである(2018年)。また、倫理委員会の重要な任務として会員への倫理規程の浸透があり、このための倫理事例集の発行、学会大会での企画セッションや倫理研究会の開催を継続的に行ってきた。近年は、「災害に備えるために必要となる原子力関係者の倫理」と題した研究会等において、組織文化や技術者・研究者倫理に関わる議論を深めている。

このたび、学会誌の誌面をいただき、2回に分けて倫理委員会の活動を紹介する。本稿では、倫理委員会や倫理規程制定の経緯を振り返りつつ、倫理委員会の活動概要や意義、1F事故後の倫理規程改定ポイントを紹介する。

KEYWORDS: *Ethics committee, Code of Ethics, Case studies booklet*

I. 倫理委員会の生い立ち

1. 委員会発足の背景

原子力学会が技術者倫理への取り組みをはじめた最大のきっかけは、1998年の使用済燃料輸送容器データ改ざん問題¹⁾である。使用済燃料輸送容器調査検討委員会の報告書では、「企業および技術者のモラル」の確立が大きく取り上げられ、技術者倫理教育の必要性が謳われた。学会としても、この問題が明らかになった後、約1年の準備期間を経て、日本原子力学会倫理規定制定委員会²⁾(以下、「制定委員会」。当時は「倫理規定」と呼称していた)が活動を開始した。なお、第1回の会合直前に開かれた準備会が開催されたのは、JCO臨界事故当日であった。

制定委員会の約2年の活動成果に基づき、学会員の心構えと言行の規範である「日本原子力学会倫理規程(以下、「倫理規程」)」が制定された。制定後、制定委員会の精神を継承する組織として、日本原子力学会倫理委員会(以下、「倫理委員会」)が設置された。倫理委員会は、理事会直結の常設委員会である。

Ethics for individuals and organizations working for nuclear field, which is needed to prepare for disasters; (1) History of establishment and revision of the code of ethics, and the essence of the latest revision: The Aesj Ethics Committee.

(2019年4月10日受理)

2. 委員会の任務、責務

第1回倫理委員会は2001年12月に開催され、学会副会長や理事を含めた12名の委員により活動がスタートした。倫理委員会の任務は、倫理委員会規程³⁾第2条において、以下の6点が定められている。

- ① 本会の制定した倫理規程(前文、憲章、行動の手引)の改定案の作成等、倫理規程に関する事項
- ② 倫理問題の事例集や教材の発行
- ③ 研究会等の実施
- ④ 原子力関連の倫理に関連する事項の現状調査
- ⑤ 倫理問題に関する意見の表明
- ⑥ その他必要な事項

また、倫理委員会発足時から承継している委員会の責務は、以下の4点である。

- ① 規範は時代とともに変化するものであることを忘れず、常に社会環境の変化も考慮した規程を維持するとともに、その遵守状況を見守っていくこと(倫理規程制定の基本精神)。
- ② 会員が、原子力界はもとより、昨今の技術と社会の狭間において生じている事柄を、常に自らの問題として捉えることを目的とした取り組みをすること。
- ③ 会員が、原子力に携わる者、あるいは技術者として、誇りと高い倫理観を持つ必要性を強く認識することを目指した取り組みをすること。
- ④ 自己の確立に向け、会員一人ひとりの倫理的判断能

力と行動力を高めるためのサポートをすること。

II. 倫理規程の制定および改定

1. 制定までの活動

1999年9月30日に準備会が開かれた制定委員会は、その日に起きたJCO臨界事故により、より一層原子力界における倫理に関わる問題や倫理の重要性を痛感させられる中、同年10月22日に第1回会合を開催し、以後、討議が重ねられた。当時の資料からは、顔を合わせて行う会合に加えて、メールベースでの議論も活発に行っていた様子を伺うことができ、海外を含む他の学会の倫理綱領等を参考にしつつも、全委員が真剣に、一から自分たちの倫理規程を作ろうとする強い意思を感じとることができる。

このような強い意思の表れのひとつが、制定時には日本の他の学会には見られなかった「行動の手引」の存在である。当時、国内のいくつかの工学系学協会が倫理規程を制定していたが、それらは、憲章のみ、あるいは前文と憲章で成り立っており、行動の手引に類するものは含まれていなかった。しかし、制定委員会は、倫理について会員が具体的に考えることが重要であると考え、詳細な解釈を与え、意図することを説明し、会員の守るべき項目を明確にすることを可能とする「行動の手引」を倫理規程に含めることとした。このことは、制定委員自らが深く悩んだからこそと思われる。

また、2ヶ月の「公衆審査」の実施も、特徴的な制定プロセスである。「原子力学会倫理規程(案)」を、学会誌⁴⁾とホームページに公開すると共に、幅広く意見をいただけるよう働きかけも行い、結果、学会内外から20件を超える意見やコメントが集まった。制定委員会は、これらの意見やコメント一つひとつに回答するとともに「寄せられた意見と委員会の見解」をまとめ、学会誌に公表した。さらに、原子力学会2001年春の年会では、総合報告と討論も行っている。これらの活動に基づいてさらなる推敲が重ねられ、2001年6月に倫理規程が制定された。

このような制定委員会の活動やその思いは、倫理委員会による改定作業に引き継がれ、現在も倫理規程は行動の手引が含まれているとともに、改定にあたっては公衆審査を実施している。

2. 倫理規程の改定(制定～1F事故まで)

倫理委員会では、常に社会環境の変化も考慮した倫理規程を維持することを目指し、概ね委員の任期(2年)内に改定を検討することとし、2003年、2005年、2007年、2009年と改訂した(2009年までは「改訂」と呼称)。

しかし、2011年の改定作業中に1F事故が起き、事故における倫理的な問題や、会員あるいは倫理委員会の活動に何が不足していたのか、また反省と教訓としてどのように倫理規程に反映させるのかといった議論を重ねた

が、改定までには時間を要する状況が続いた。

3. 1F事故を踏まえた2014年改定のポイント

原子力学会の2013年度総会において学会定款が改定され、また学会による事故調査報告書⁵⁾作成における議論もおおよそまとまってきたことを受け、具体的な倫理規程改定作業を再開した。

この改定では、当時の倫理規程(2009年改訂版)全体を眺めると項目間で類似性があること、また粗密の度合いが異なりバランスに欠けていることなどの反省から、米国PE協会(National Society of Professional Engineers)の基本綱領を参考にして整理し直すと共に、事故の反省や学びの重要性をどのように織り込むのか、さらに、学会の倫理規程をより実効性のあるものにするための視点として、以下の5点を重視した。

- ①学会組織への会員の所属意識
- ②個人と所属組織の係わり合い
- ③倫理観を実務に実装する(行動する)重要性
- ④安全文化との係わり合い
- ⑤〇〇してはいけないではなく、ポジティブな倫理の提示

4. 2018年改定のポイント

最新の倫理規程は、2014年の改定後、2016年改定を経て、2018年1月に改定したものである。

今回の改定では、会員のモチベーション維持や社会と会員のよりよい関係構築を重視しており、特に、“ポジティブな倫理”を更に進めるために一人ひとりが組織の各階層でリーダーシップを発揮することを行動の手引きに追加した。

また、より多くの会員に読んでいただき、倫理規程と自らの行動を比べ、考えていただく事が重要であることから、文章を読みやすくすることに留意しており、法令遵守や組織の私的利用禁止など、原子力従事者である以前に社会人として備えておくべき内容は割愛した。

現在は、次の改定に向け、2017年秋以降に発覚が続いているメーカ等における品質不正問題における倫理的な考察を行い、倫理規程改定作業において汲み取るべき点はないかといった議論を始めている。

III. 倫理委員会の活動

常に、“より”会員に響く心構えと言行の規範になるように改定されている倫理規程であるが、たとえこの倫理規程を暗唱できても、行動に繋がっていなければ意味はない。そのため、倫理委員会では、倫理規程の浸透のための活動も積極的に行っている。

1. 倫理規程理解促進のための事例集

会員が倫理規程を実際の行動に繋がれるようにする

ためにより有効な手段である事例学習⁶⁾を推進する目的で、現在までに4冊の事例集を発刊している。

(1) ケースブック発行

1F 事故前には、「原子力を中心とした技術者の倫理ケースブック」と題した3冊の事例集^{7~9)}を発刊している。これら3冊は、いずれも、常に最新の倫理規程の改定を反映しているが、掲載している事例は、類似の実例からの創作(仮想事例)である。また、原子力産業以外の産業にも関わっている方も少なくないことから、そのような方にも気楽に手にとっていただき、具体的な場面を想定してディスカッションできることを重視し、あえて事例の舞台を原子力産業以外とし、イラストやメモのスペースを多くするといった工夫をした。

さらに、事例の検討を倫理規程に基づいて行って欲しいという思いから、倫理規程を掲載することはもちろん、事例が倫理規程の各条項と関係しているかが一目で分かる一覧表をつけると同時に、各事例の終わりにも、どのような規程に基づいた検討をすればよいのかを記載している。

(2) 東日本大震災良好事例集発行

1F 事故後の事例集の企画検討において、事故以前に発行したケースブックのように原子力産業以外を舞台としたものを踏襲するのではなく、1F 事故に関係する事例を扱うべきとの意見は多くの委員で一致した。しかし、一方で、原子力技術に携わっている安全の担い手である会員やその周囲の方々が、事故、あるいはその後の社会風潮、事故後の規制制度等の中で、この技術に携わる矜持(誇り、プライド)を失いかけているとの指摘もなされた。これらの意見を受け、倫理委員会で議論した結果、最終的に、東日本大震災で被災した福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所、東海第二発電所、女川原子力発電所に関わる良好事例として6事例を収め、2016年3月に発行した¹⁰⁾(図1参照)。

事例集を倫理規程と合わせて読むことで倫理規程の意味をより深く考察・理解することができる。この機会に、是非、事例集を手にとっていただき、実事例だからこそその「身につまされ感」を持ちながら、事例に取り組み、原子力に携わる者としての矜持を意識しながら、原子力安全に向けて自らはどう行動すべきかを、積極的に検討して欲しいと願っている。

2. 倫理規程や課題等を会員と共有する「場」

倫理委員会の活動には、倫理規程や事例集の説明はもちろん、技術者倫理とはなにか、倫理委員会はどういう活動を行っているのか、企業や研究組織はどういう倫理の問題に直面しどのような活動を展開しているのか、といったさまざまな会員に関わる倫理の話題に対する会員の興味に応え、活動を支援するような「共有する場の設定」も必要である。



図1 事例集「原子力分野の事例に学ぶ技術者倫理」
(http://www.aesj.or.jp/ethics/03_/03_05_/参照)

倫理委員会では、企画セッションと倫理研究会を軸に、さまざまな「場」を設けている。以下にその概要を述べ、詳細は次号のその2で紹介する。

(1) 企画セッション

技術者倫理への興味の有無に関わらず学会員の集まる年会・大会において開催する企画セッションは、倫理規程や事例集を手にとったことがない、倫理委員会の活動に参加したことがない会員にアピールできる場であり、活動の裾野を広げる機会となる。そのため、倫理委員会では、委員会設立以後、毎度、時事や開催場所といったことに配慮しながら、企画セッションを開催している。

(2) 倫理研究会

過去には、大学生を対象に行ったこともあるが、ここ数年は、倫理研究会を、組織において倫理や安全文化、品質保証を担当しておられる方、あるいは技術士を目指している/すでに技術士でいらっしゃる方等に参加いただき、より深い議論を可能とする場と考え、年1~2回の頻度で開催している。テーマは、年会・大会の企画セッションのフォローアップや、事例集を用いた事例学習の実践等となっている。

(3) 学会誌・ホームページの活用

学会誌への掲載として、過去には「倫理つれづれ」というコラムの掲載や、企画セッションや研究会を開催するたびに活動報告を行っていたが、担当委員の負担等や、より深い内容にすべきではないかの観点から、近年は学会誌を活用しているとは言い難い状況が続いている。学会誌は会員すべてに届く会報であるので、今後は、本報をきっかけに、倫理研究会での検討内容など、積極的に学会誌の活用を検討したい。

また、倫理委員会では専用のホームページを持ち、委員会での検討状況や研究会の案内などを掲載している。このホームページの運営も、技術的な問題と労力の問題を抱えているが、みなさまにとって有益な情報をタイムリーに発信していくよう心掛けている(参照 URL: <http://www.aesj.or.jp/ethics/>)。

IV. 最後に

1F 事故から 8 年が過ぎ、今もなお、多くの方にご迷惑やご心配をおかけしている中、原子力学会倫理委員会として、どのような活動をすべきかの悩みは絶えない。しかし、電気エネルギーが命や生活およびそれらの質を左右し、また国力、経済活動にも影響を与える中、そのための技術である原子力技術の重要性は簡単に否定できるものでもない。

倫理委員会では、事故を二度と起こさない強い意思と、どんなに努力しても想定外はあり得るという前提に立ちながら、今後も積極的な活動を展開していく所存である。是非、会員のみなさまには倫理規程を改めて一読し、その意味するところを深く考察して普段の活動に活かしていただくと共に、事例集の活用や研究会への参画など倫理委員会活動への一層のご理解とご支援をお願いしたい。

執筆担当：

宇奈手 一之(倫理委員会)

大場 恭子(倫理委員会)

－ 参考資料 －

- 1) 使用済燃料輸送容器調査検討委員会：使用済燃料輸送容器のデータ問題について，2002 年 12 月 3 日．
- 2) 日本原子力学会倫理規定制定委員会：原子力学会倫理規程の制定にあたって，日本原子力学会誌，Vol.43，No.8，pp. 1-8，日本原子力学会，2001 年 8 月．
- 3) 日本原子力学会：倫理委員会規程，<http://www.aesj.or.jp/ethics/document/pdf/kitei/kitei01.pdf>

表 1 倫理規程の改定履歴

制定・改定(改訂)日	承認履歴
2001 年 5 月 23 日	第 433 回 理 事 会 承 認
2001 年 6 月 27 日	第 43 回 通 常 総 会 決 定
2003 年 1 月 28 日	第 449 回 理 事 会 改 訂 承 認
2005 年 11 月 25 日	第 477 回 理 事 会 改 訂 承 認
2007 年 9 月 19 日	第 490 回 理 事 会 改 訂 承 認
2009 年 11 月 26 日	第 505 回 理 事 会 改 訂 承 認
2014 年 5 月 28 日	第 7 回 理 事 会 改 定 承 認
2016 年 5 月 12 日	第 8 回 理 事 会 改 定 承 認
2018 年 1 月 31 日	第 6 回 理 事 会 改 定 承 認

注記：2011 年に日本原子力学会は一般社団法人に移行

- 4) 日本原子力学会倫理規定制定委員会：会告，原子力学会誌，Vol.42，No.11，前付①－④，日本原子力学会，2000 年 11 月．
- 5) 日本原子力学会著，東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会著：福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言：学会事故調 最終報告書，丸善出版，2014 年 3 月．
- 6) 安藤恭子，札野順：技術者倫理教育と価値共有プログラム（第四報）－ケースを使った教育手法とその役割－，日本工業教育協会平成 16 年度工学・工業教育研究講演会講演論文集，pp. 351-352，(社)日本工業教育協会，2004 年 7 月．
- 7) 日本原子力学会倫理委員会[編]：原子力を中心とした技術者の倫理ケースブック～そのときあなたは冷静な判断ができますか～，2006 年 7 月．
- 8) 日本原子力学会倫理委員会[編]：原子力を中心とした技術者の倫理ケースブック 2～判断に迷わない明るい職場をめざして～，2008 年 9 月．
- 9) 日本原子力学会倫理委員会[編]：原子力を中心とした技術者の倫理ケースブック 3～あなたの常識は，社会の非常識になっていませんか～，2010 年 9 月．
- 10) 日本原子力学会倫理委員会[編]：東日本大震災における原子力分野の事例に学ぶ技術者倫理，2016 年 3 月．

東京大学原子力国際専攻での教育の取組み

東京大学 藤井 康正

KEYWORDS: Education, Curriculum

I. 原子力国際専攻の沿革

東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻は、工学系研究科原子力工学研究施設と、東京大学の全学組織である原子力研究総合センターを改組する形で、原子力専攻(専門職大学院)と共に、2005年4月に設置された。この原子力2専攻は、学内の二つの研究組織を出自とする教育組織である。

原子力専攻は専門職大学院として東海地区に設置され、その一方で、原子力国際専攻は、いわゆる普通の修士課程と博士課程の教育研究を担う専攻として本郷キャンパスに設置された。工学系研究科には、原子力工学専攻を前身とするシステム量子工学専攻も2008年3月末まで存在し、本専攻が設置された当初の3年間は、本郷ではこの2専攻が併存して原子力関連の大学院教育を実施した。後発して設置された本専攻のカリキュラムは、従来の原子力工学分野に加え、原子力社会工学として提唱された新しい分野を含むものであった。

ところで、原子力国際専攻の「国際」の意味するところについてよく質問を受けるが、設置準備時の経緯を知る教授からは、それは将来的にIAEAなどの国際機関で活躍できる人材の輩出を目指しているところから来たと聞いている。また、本専攻の英語名称は、Department of Nuclear Engineering and Managementとされ、従来の工学に加えてマネジメントに係る分野も教育研究の対象とすることが明示されている。原子力に係る新しい学問分野として、前述した原子力社会工学に取り組む決意が、英語名称に反映されている。

設置当初の本専攻の陣容は、教授3名、准教授2名であった。専攻の組織規模としては臨界質量ギリギリであったようであるが、2008年4月のシステム量子工学専攻の発展的解消に伴い、その一部を吸収して教授6名、准教授4名へと過渡的に増員され、現在は教授5名、准教授3名で落ち着いた。学生定員も、修士、博士ともにそれぞれ3割ほど増員された。そして、システム量子工

学専攻の大部分は、造船系と資源系の二つの専攻と合併してシステム創成学専攻へと改組され、原子力分野とは直接関係を持たなくなった。その結果、工学系研究科における原子力に係る大学院教育は、基本的には本専攻に一本化されることとなった。

本専攻の大学院教育は、前述の専攻専任教員だけでなく、2005年の設置当初から、原子力専攻に所属する教員(講師以上)全員が本専攻を兼担する体制で進められている。また、日本原子力研究開発機構をはじめ関係機関の方々には、客員教員や非常勤講師として、本専攻の教育研究に多大なるご支援を戴いている。

学部組織としてのシステム量子工学科(旧原子力工学科)は、大学院より8年早く2000年4月に、他学科との合併でシステム創成学科に改組されている。本専攻と原子力専攻の教員は、システム創成学専攻などの教員と共に、同学科の学部教育も担当している。同学科のカリキュラムには原子力や放射線に関する講義は12単位分しかなく、しかもほとんどが選択科目のため、原子力に関する学部教育は残念ながら十分に行えていない。このことは、システム創成学科から本専攻への進学者数を確保することにとっても苦勞する要因の一つとなっている。

学部と大学院の教育の連続性に配慮して、本専攻の大学院入試は、システム創成学専攻と技術経営戦略学専攻と協力して準備されている。入学後のカリキュラムはこれらの3専攻は別々であるが、2013年4月に開始された「レジリエンス工学横断型教育プログラム」は、3専攻で共通講義を開設したりして共同運営している。

II. 原子力国際専攻のカリキュラム

設置当初の原子力国際専攻の教育研究は、「先進原子力エネルギー」、「原子力社会工学」、「先進レーザー・ビーム科学と医学物理」の3分野で構成され、原子力の平和利用推進のためには、国際関係論的視点や工学倫理的素養を身に付けることが重要との判断で、国際保障措置特論や科学技術社会特論など、特徴的な講義がその頃から準備されていた。

本専攻設置当初の時間割では、テレビ会議システムを用いて、東海地区の専門職大学院の講義を本郷で受講す

Education in the Department of Nuclear Engineering and Management, the University of Tokyo : Yasumasa Fujii.

(2019年2月28日 受理)

ることも想定された。ただ、学部を卒業したばかりの大学院生が学習すべき内容と、社会人対象の専門職大学院で教えられる内容との間には、小さくはない隔たりがあることも認識され、東海地区からの遠隔講義の中継は、2012年以降は見合わされることとなった。

本専攻のカリキュラムは、東電福島第一原子力発電所の事故を受けて大きく見直された。現行のものは、次の4方針に基づいて、2012年4月から実施されている。

- (1) 原子力基盤科学・工学の習得に加え、人・社会に関する知識、態度、内外文化、考え方、常識などの理解に基づく、リスク・コミュニケーション、倫理などを含み高度な社会リテラシーを基盤教育に含める。
- (2) 問題の全体像を理解するために、基盤知識を効率的に習得可能な、コアプログラム、専門基礎、特論の3段階で構成される体系的講義を行う。
- (3) 領域横断型のプロジェクト演習では、複数の研究室の専門領域や先端的研究課題に取り組むことで、構想力、俯瞰力およびリーダーシップを養う。
- (4) 国内外機関連携による課題解決型のプロジェクト演習や修論研究、博論研究を通じて、未踏分野の開拓や新たな技術革新に繋がる研究へと果敢に挑戦し、人類社会の持続と発展に貢献する人材を育成する。

本専攻の教育研究対象を図1に示す。設置当初に提唱



図1 原子力国際専攻の教育研究対象

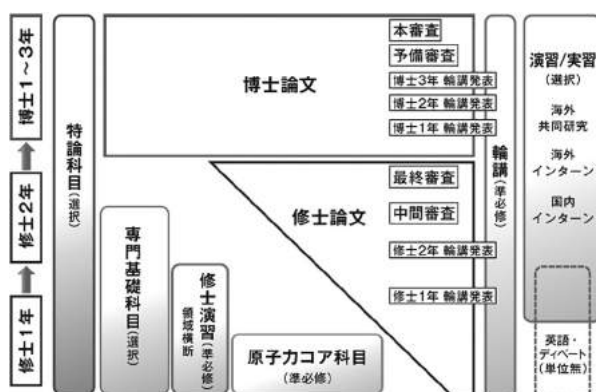


図2 原子力国際専攻のカリキュラムの概要

された原子力社会工学の看板はここにはないが、リスク・コミュニケーションや倫理などを含む「高度教養」と、原子力安全／エネルギーにおける「核セキュリティ・核不拡散」として、その内容の多くは受け継がれている。

図2には本専攻のカリキュラムの概要を示す。講義科目は、①原子力コア科目(人・社会に関する教養・原子力に関係する基礎的知識)、②専門基礎科目(原子力の各専門分野において必須となる知識と思考方法)、③特論科目(原子力に関係する最先端の専門学術)に分類され、それら以外に体験型学習として、④輪講(研究に関するプレゼンテーションと質疑応答)・演習・実習科目を設けている。原子力コア科目は、学部教育の不足を補うもので、海外からの聴講生にも対応して夏学期にクォータ制で開講されている。輪講は修論と博論の追加的審査と位置付けて、講義室にて1年に1度の英語での口頭発表を義務付けている。また、講義は原則としてすべて英語で実施している。学生実験の機会としては、東海地区の設備を利用したビーム実習がある。

Ⅲ. 学生数など

本専攻の学年当たりの学生数は、留学生も含めると修士課程で25～35名、博士課程で約10～20名である。本専攻修士課程への本学工学部からの進学者数の割合は半分弱であり、研究科内の他専攻と比較すると大きくはない。昨今の志願者全体数の動向は横ばいか微増で、福島事故以前の水準には戻っていない。大学院在籍者の留学生割合は約4分の1であり、最近の入試のためだけにわざわざ来日して一般入試を受験する外国人も増えている。

本専攻は原子力専攻と同時に、IAEAによるInternational Nuclear Management Academy(INMA)のためのPeer Review審査を2017年9月に受け、無事に認定を受けることができた。来年度以降はこの教育プログラムの要件を満たす修了者には、IAEAの名前で修了書を発行することになる。これも本専攻のブランドの一つとして、国内外の優秀な学生の獲得につなげられればと思う。

福島原発事故で得た教訓を省み踏まえつつ、引き続き「原子力」の旗の下で、本専攻関連教員一同、人類社会の発展に貢献できる人材の育成に尽力していきたい。

著者紹介



藤井康正(ふじい・やすまさ)

東京大学

(専門分野)エネルギー環境経済システムの分析



～福島浜通りだより～

第1回 ほっと安らぐ村の暮らし

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

福島第一原子力発電所の事故から約8年、福島県双葉郡を中心として取組をしている立場から、現地の日常をお伝えする機会を頂くことになった。

たわいもない日常はニュースにはならない。刺激ある情報を求める人の本能がなすことだと思う。たわいもない日常を伝え、その裏側に起きたこと、抱えていることを受け取り手が考えることが、終わりになき正解のない「復興」というものを進めていくものだと思っている。

私は、阿武隈高地に位置する福島県双葉郡川内村で村民の皆さん、支援団体の皆さんと一緒に川内村だからこそその「豊かさ」を子供たちに伝える取組「川内村コミュニティプロジェクト」に参画している。その一コマを今回お届けしたい。

「おはようございます!」、冬の寒さを打ち消すように元気な小学生たちの声が響いた。この村の子供たちは相手が知らないおじさんであろうと、きちんと挨拶してくれる。こちらも負けずと「おはようございます!」と声を張る。それにしてもこんなに気持ちの良い挨拶を交わしたのはいつぶりくらいだろう。

この日は、村民の方のご自宅をお借りしてのしめ縄作り、餅つき体験などを通し、川内村に根付く文化を子供たちに体験して学んでもらうものだった。

集まった子供たちは、無邪気に庭を駆け回っている。土曜日に、学校ではない場所に友達が集まるのだから、興奮してしまうのは当たり前だ。企画を回そうとする大人達はあたふたする。だけれど楽しそうに走り回る子供たちを叱り飛ばすようなことはない。「みんな集まれ～」と主催者が声をかければすっと集まるのだ。なんとも無邪気で素直な子供たち。無垢なるものを感じてしまう。

昨年度、収穫した藁を使いしめ縄作りが始まった。先生はご自宅を貸してくださった村のおじいちゃん。「こうして両手で挟んで、もじっていくんだ」、二股に分かれた藁をねじるのではなく、もじっていく。「縄を作る時は右巻きに、しめ縄、神様に向けての場合は左巻きにするんだよ」巻き方一つへの意味合もそっと教えてくれる。

先生に見習って始めてみたがこれが難しい。両手に挟

んだ藁を火おこしのようにすり合わせるのだが、全く縄にならない。悪戦苦闘する子供たちに目を向ければ、何で出来ないのだと必死に手をすり合わせている。その姿を村の人達は面白おかしく見守っている。気が付けば、上手くいかない子供の隣に座り、丁寧に教える姿があった。それは自分の孫の様に、慈しむ愛情に溢れていた。あらあらと目を細めている姿に自分の小さき頃もきっとこんな風景はあったのだろうと想起した。一人の子供が上手く出来ずに悔し涙を流していた。「大丈夫・大丈夫」と丁寧に一緒に寄り添うおばあちゃん。やっとの思いで出来た藁を誇らしげに掲げた子供は、また子供たちの輪の中に入っていった。

この日は元気な子供たちにとっても寒い一日。休憩の時間は、めいめい勝手に炬燵に入るなり、ストーブに当たるとなりしてもらったのだが、子供たちはまるで自分の家の様に縦横無尽に走り回っている。楽しそうな様子ではあるが、それを当たり前のように気にも留めない村の人達がいた。「あの～人の家を走り回るといこの姿にとまどうのですが」と聞くと「元気でいいね」と楽しそうに見ている。どこかにやっていけない線引きはきっとあるのだろうが、その緩やかさは、村の子供たちは我が子と変わらない思いから来ているのだろう。異様と感じている私がこの村の常識からはかけ離れていた。

冷えた身体を炬燵で温める。ここでは震災がどうか、復興がどうかといった話はない。走り回る子供たちの喧騒が心地よく、テーブルに置かれたお茶菓子をほおばりながら、まるでおばあちゃんの家に来たかのようにくつろぐ。ふ～と肩の力が抜けていく、同じように暖をとる大人達、肘と肘がぶつかるような距離感が気にもならない。何を話したのか、これが面白いほど思い出せないのだが、会話などはそうしたもののだろう。

この日、子供たちに川内村の豊かさを伝えるどころか、子供たちと村の日常に教えられ、救われたような気持ちになった。

「また遊びに来てもいいですか」そう尋ねると、いつでもおいでと返事が返ってきた。

(2019年2月15日 記)

談話室

リケジョの思い(4) スパゲッティをゆでながら

料理をするようになったのは、大学に入ってからのことです。下宿先に引っ越して間もない頃は、よくスパゲッティを作っていました。基本的に麺をゆでるだけでよく、料理初心者にはありがたい食材でした。麺をゆでる間は特にすることもなく、暇を持て余すことになりました。はじめは本を読んでいましたが、火と吹きこぼれが気になって全然集中できません。何度かやるうちに結局、箸で麺の面倒を見るようになりました。

麺を鍋に投入して数分経つと、麺がやわらかくなって鍋の中で泳ぎ始めます。アルデンテにしたいな、と思い

ながらぼんやりと鍋を見ていると、いつからか麺が束になってドーナツのような形をつくっています。しかも、ドーナツの穴のほうから外側に向かって回転しているのです。さっきまではばらばらに泳いでいたじゃないか。どうしたんだ、おまえたち。箸でつついたりしてドーナツを壊しても、すぐに元のドーナツへと戻っていきます。これは一つの秩序ではなからうか。少し攪乱されても修復して己を保つ姿は、まるで生き物のようにも見えます。どんな仕組みになっているんだろうと、ああ、だんだんゆで時間がどうでもよくなってきました。

まず、この麺はどうして回転するのでしょうか。この上から下への動きは、対流かと思いつきます。なべ底と湯の表面あたりに温度差があって、温かい方から冷たい方へ、まさにドーナツ状にお湯が流れているのでしょう。麺はそれに流されてドーナツ状になり、回転しているのです。麺を箸でつついても対流という大枠は変わらないから、麺たちは対流のドーナツの中に戻っていくのでしょうか。こうして形を保っているのだな、おそらく。

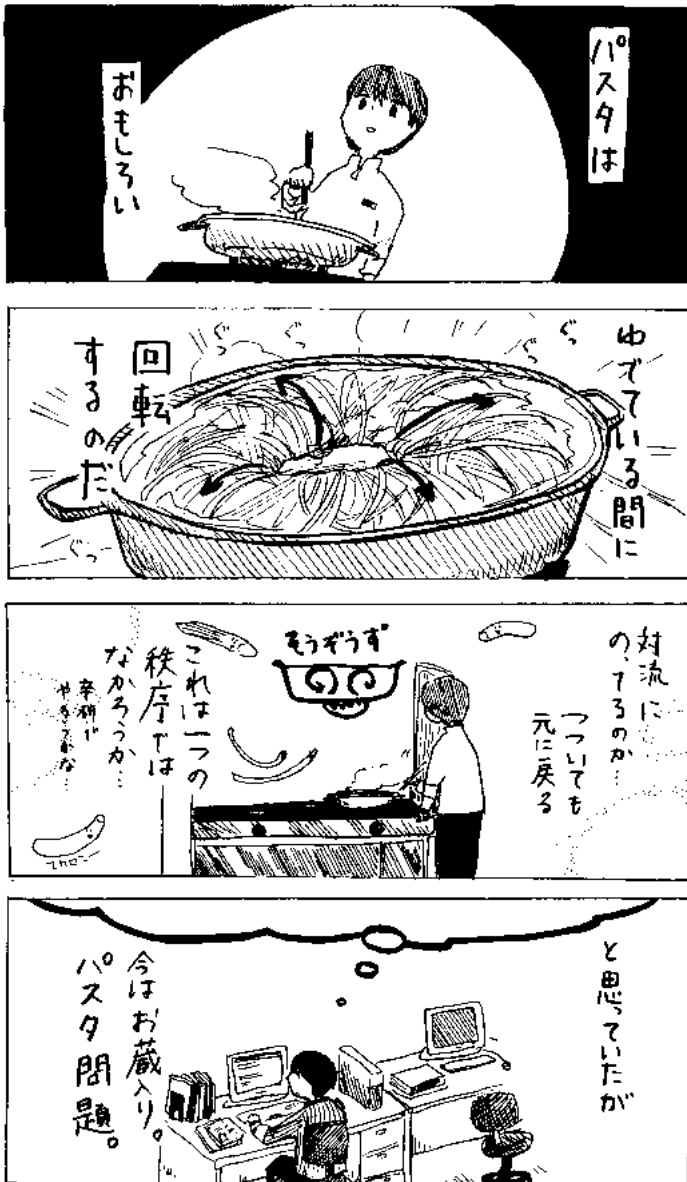
もしかしたらドーナツ状になるかどうかは、鍋やパスタの種類などによるのかもしれませんが。鍋が異なるものでも対流自体はどの鍋でも起こるでしょうから、その対流にパスタが流されてなんらかの形をつくることは間違いないでしょう。パスタがペンネでもマカロニでも、対流に乗って流れそうです。生き物に似ているけれど、何か結びつくところがあるのだろうか。またパスタ自身がお湯の流れを変えたりはしないのだろうか…おっと、吹きこぼれる。危ない危ない。アルデンテはおあずけだな。

このパスタの動きについて、大学4年の卒業研究で研究しようとしたこともありましたが、結局そちらは化学反応についての論文を読むことにしたのでした。現状、パスタ問題はお蔵入りです。

著者紹介

口町和香（くちまち・わか）

北海道大学理学院物性物理学専攻、修士1年です。統計物理学と研究を学ぶ傍ら、科学コミュニケーションを手掛けています。



視 点

〈社会〉を語る

〈社会〉を語る二つのアプローチ

岡山大学 齋藤 圭介

私たちの多くは日本社会で生活しています。日本社会のなかで生活していることは間違いありませんが、いくら努力しても、日本社会に手で触れることも目でみることもできません。私たち社会学者も、とらえどころがない社会をどうすれば科学的に論じることができるのか、まいにち頭を悩ませています。

たとえば、2011年3月11日の東日本大震災のさい、混乱をきわめた日本社会の状況を記述・理解しようと多くの社会学者は現地向かいました。社会学者として、被災地の様子を自分の目でみて、その場で起きている社会現象のメカニズムを把握するためです(もちろん、こうした学問的営為が直接的ではないにせよ被災者の役に立つことや、被災地の復興につながると信じてのことです)。そうした社会調査の結果が、続々と論文・著作として刊行されています。そこでは、大別して二つの社会へのアプローチの仕方——質的アプローチと量的アプローチ——をみることができます。

質的アプローチとは、代表的にはインタビュー調査や現場のフィールドワークなどが有名です。被災者の方からお話を伺い、被災された当事者の視線をとおして社会を記述しようとするアプローチです。被災者一人ひとりの個性が高い生々しい語りをとおして、社会を垣間見ることになります。被災者から理路整然とした語りをきけることはまれであり、喜怒哀楽はもとより多くは葛藤や困惑、自身の不甲斐なさなど、人間的な感情が吐露されます。複雑な感情を抱え、一人ひとり異なる顔をもった生身の人間の語りをとおして、そうした人々が生活をしている社会の記述を目指すアプローチといえるでしょう。

他方、量的アプローチとは、代表的には大規模なアンケート調査などが有名です。大量の質問紙(アンケート)を配布して、個人の情報をデータのかたちに変換することで、一人ひとりの感情ではなく、社会全体としての傾

向を把握していこうとするアプローチです。分析のさいには、高度な統計学の知識を用いることもたびたびあります。なにか大きな自然災害があったさい、私たちは被災者の数に注目し、その被害の大小を判断しがちです。ここでは被災者の一人ひとりの顔はみえてきませんが、量的アプローチは社会全体の動向を知るにはもっとも適した社会調査といえるでしょうし、復興などの社会政策を考えるさいには、判断の根拠という意味できわめて重要な役割を担います。

さて、みなさんは、どちらのアプローチがより社会の実像を正しく把握できると思いますか。じつはこの問いには、社会学者も明確な答えを持っていません。

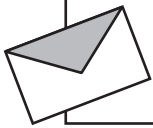
ところで、一人の社会学者が質的と量的のどちらの社会調査も実施することはまれで、どちらかの社会調査のみを実施することがほとんどです。その理由の一つは、質的と量的の両方の社会調査のアプローチはそれぞれ専門分化をしており、学すべき多くの事柄があるため一つの調査法を勉強し使いこなすだけでも大変だからです。また、どちらかのアプローチに先鋭化すれば、その分、そのアプローチの強みを活かせるということもあるでしょう。

社会学者がおこなっている社会調査という学問的営為は、まったく異なる二つのアプローチで社会に接近していこうとするものです。二つの社会調査の方法論は、社会へのアプローチの仕方が異なること以上に、何に着目をしたら社会を論じたことになるのか、という認識論の水準で社会の捉え方そのものが異なっているともいえます。この違いは、第1回で紹介した社会名目論と社会実在論の違いともおおむねパラレルだといえるでしょう。

質的と量的の二つのアプローチの差異については、引きつづき次回お話ししたいと思います。

(2019年3月7日記)

理事会だより



2019 年春の年会「理事会セッション」を終えて

本学会の年会・大会では、理事会が主催する企画セッション(理事会セッション)が毎回行われています。通常の企画セッションは、学会の部会や各種委員会が各々の活動報告や関連する分野に関する最新知見の紹介、課題の議論などを行うのに対して、理事会セッションでは、広い分野にまたがる課題や、学会活動そのものに関する議論を主に行っています。この理事会セッションは、理事会の命を受けた企画委員会が立案から実施までを担っています。直近の2019年春の年会(茨城大学)では、社会・環境部会との共催により、「原子力防災の現状と課題」と題する理事会セッションを開催しました。筆者は企画委員会副委員長として、このセッションの立案からかかわってきましたので、ここでは、セッション開催までの経緯と開催後の感想を述べさせていただきます。なお、このセッションの詳細については、近く本誌に掲載される予定ですので、そちらをご覧ください。

開催までの経緯

例年と同様に今回の理事会セッションのテーマについても、1年ほど前から企画委員会で検討が行われました。テーマの選定にあたっては、原子力を取り巻く状況や過去のセッションにおけるテーマなどを踏まえて議論を行いました。原発の再稼働が進む中、地域避難計画についての関心が高まっており、特に、年会の開催場所である茨城県は周辺人口が最大の東海第二原発を抱えていること、また前会長の上坂充氏が原子力防災について今後学会で議論するとしたことから、2018年7月の企画委員会において「原子力防災」を取り上げることが決定しました。テーマの選定後は、セッションの位置付けおよび構成の議論です。当初案では無料公開セッションとして広く一般の方に聴講してもらうことを考えたのですが、まずは学会員が原子力防災の課題をしっかりと理解することが必要との結論に至り、無料公開は行わないこととしました。構成については、原子力防災の現状を国の専門家あるいは研究者に紹介してもらい、その後、現場で防災に携わっている人、具体的には茨城県の防災担当者、に地域の現状と課題を挙げてもらい、それについての議論を行うこととしました。この議論においては、住民の目線に立った声も聴く必要があるということで、福島第一原発事故の被災者支援を行っている研究者の話を伺うとともに、何名かの住民を招待しました。さらに、通常の企画セッションは90分の時間枠ですが、それでは討論の時間が不足することから、特例として120分の枠を

設けることとしました。以上のような企画委員会での議論を基に提案を行い、11月の理事会および12月の部会等運営委員会での議論を経て、開催が正式決定致しました。この作業と並行して、講師選任の議論が行われました。原子力防災の現状については、原子力防災指針を策定した原子力規制委員会や大学で防災の研究を行っている研究者の名前も挙がりましたが、最終的には原子力防災の担当省庁である内閣府に依頼することとなり、荒木真一 審議官(原子力防災担当)に引き受けていただきました。茨城県の防災については、県の原子力安全対策課に人選を依頼し、土信田法男 原子力防災調整監を推薦いただきました。また、住民目線の声については、被災者支援を行っている茨城大学の原口弥生 教授にお願いしました。さらに、招待する住民も主に原口氏に推薦してもらうこととしました。セッション成否を担う重要な役割である座長には、企画委員でもある社会・環境部会長の土田昭司 関西大学教授に引き受けてもらいました。

理事会セッションの当日、会場は約130名という多数の参加者(招待者14名を含む)で埋まり、企画した立場としては一安心です。荒木氏、土信田氏による講演では、それぞれの立場(国および県)からの課題が示され、今後の訓練等を通じた改善の重要性が強調されました。原口氏からは、特に子供と妊婦の被ばく防護および福島第一原発事故の反省を踏まえた計画策定の必要性が訴えられました。その後、招待者である住民からの質問・意見に応じる形で約50分の総合討論が行われ、要支援者の避難対応の実効性、UPZ内の屋内退避の有効性、SPEEDIを使わないことの妥当性、市町村の避難計画の策定状況などについて議論が行われました。このセッションを通して、参加者は原子力防災の現状と課題を(ある程度は)確認できたのではないかと思います。これまでも住民と国あるいは自治体との意見交換会が行われていますが、今回の討論では学会という場で開催したことにより、両者が同じ目線に立った議論が行われたものと思います。学会として、原子力防災に関する議論を行うことの必要性を再認識したセッションとなりました。

(理事 中島 健)

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