ATOMOΣ 日本原子力学会誌 2019.7

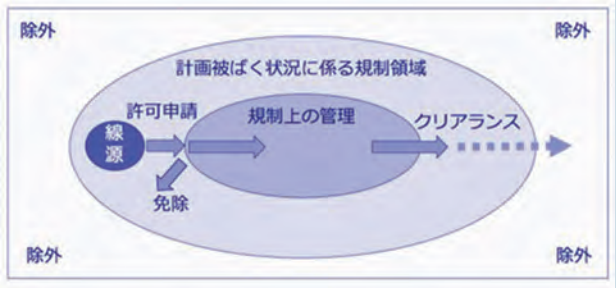
巻頭言

1 未知への一歩が，歴史を築きあげてきた
鈴木光司

特集 クリアランスの現状と課題

バックエンド部会と保健物理・環境科学部会は2018年秋の大会で，クリアランスの現状と課題に関する知見をまとめるとともに，今後の方向性について議論を深めた。

10 クリアランスにおける線量規準の考え方
荻野晴之



放射線防護に関する規制範囲（除外、免除、クリアランス）

14 わが国におけるクリアランスの現状
石井公也

17 物品搬出ガイドラインとクリアランス
橋本 周

21 IAEA 安全指針 RS-G-1.7 改訂の動向と主な論点
服部隆利

23 福島第一原子力発電所における低線量がれきの限定的な再利用の考え方
島田太郎，三輪一爾，武田聖司

時論

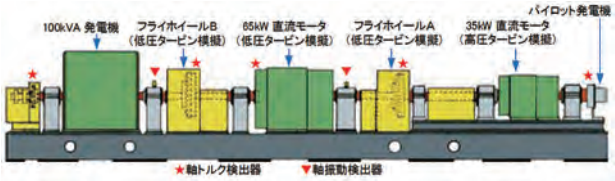
2 個々の原発問題に対する意識の差
小澤杏子

解説

27 電力系統の安定運用のために
ー再生可能エネルギー大量導入時の基幹系統への影響

電力系統の安定運用のためには系統セキュリティが重要だ。その維持のために必要な周波数，電圧，系統安定度という三つの要素について概説する。

北内義弘



電力系統シミュレータの大容量原子力発電機模擬モデル

FOCUS 国内外の原子力教育事情（5）

50 日米大学・大学院比較
ー北海道大学 vs. Purdue 大学
三輪修一郎

32 Column

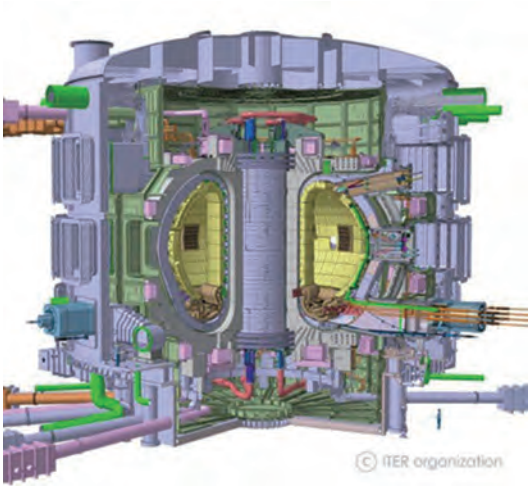
「パンドラの箱はとっくに開いている」 井内千穂
「ウラン探鉱とスロバキア」 妹尾優希
「安くなるのかもしれないけれど……」 野間美智子
「過去を責めず，未来に臨む」 服部美咲
「宇宙のロマン」 坂東昌子
「粛々と働くだけでは，状況は変えられない」 渡辺　凜

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（5）

35 核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発の進展（その1）

核融合エネルギーの実用化に向けたITER計画と幅広いアプローチ活動を２回に分けて解説する。今回は原型炉の研究開発戦略と，ITER計画で量研が製作を担当する超伝導コイルなどの装置の開発状況を紹介する。

竹永秀信，他



国際熱核融合実験炉「ITER」

連載講座　核融合トリチウム研究最前線（11）

41 トリチウム管理

核融合炉では，トリチウムを安全に閉じ込めることが重要だ。そのトリチウム管理・測定技術の現状と課題について述べる。

原　正憲，赤丸悟士，中山将人

理事会だより

59 会員サービスの向上への取り組み

高橋　信

4 NEWS

●福島県，被ばくとがん関連なし
●パリ協定長期戦略案まとまる
● JT60-SA の心臓部据付
●海外ニュース

報告

46 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2）原子力安全のための組織文化と倫理

今回は倫理委員会で議論を深めている組織文化や技術者・研究者倫理について紹介する。

倫理委員会

談話室

54 教えて！専門家の皆さん 統計分析のイロハ ービュフォンの針

服部杏菜，石井伸弥

56 リケジョの思い（5）もうひとりの自分

口町和香

日々是好日～福島浜通りだより（2）

57 おすそ分けの連鎖

吉川彰浩

視点　＜社会＞を語る（3）

58 〈社会〉がさきか，〈個人〉がさきか

齋藤圭介

53 From Editors
60 会報　原子力関係会議案内，新入会一覧，寄贈本一覧，英文論文誌　（Vol.56,No.7）目次，主要会務，編集後記，編集関係者一覧
後付　第９回総会資料

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

未知への一歩が，歴史を築きあげてきた

巻頭言

作家

鈴木 光司（すずき・こうじ）

慶応義塾大学文学部卒。1990年に『楽園』が日本ファンタジーノベル大賞優秀賞を受賞して作家デビュー。代表作は『リング』『らせん』『仄暗い水の底から』『シーズ・ザ・ディ』『エッジ』『鋼鉄の叫び』，『ブルーアウト』など。2013年にアメリカの文学賞，シャーリージャクソン賞を日本人として初受賞。

生まれ故郷，浜松の北に位置する生家には竹藪があり，抜けた先に小さな川が流れていた。

幼稚園の年長組に通う頃，ぼくは5歳年上の兄と一緒に筏を作り，川に浮かべて遊んでいた。

空の石油缶を4つばかり並べてベニヤ板に固定した簡易筏であったが，それでも，少年をふたり支えるだけの浮力を持っていた。

竹竿で突きながら小さな川を下り，もう少し幅のある川に合流し，しばらく進んだあたりが行かれる限度だった。それ以上進むと，もっと大きな川に注ぎ，やがて天竜川と合流して太平洋に流れ込むことが子ども心にわかっていたからだ。

遠州灘の荒波はぼくと兄の手に負えるものではない。能力の限界を悟って陸に上がり，筏に結わえたロープを引っ張って家に戻るほかなかった。

途中で引き返すことに，幼心は悔しさを感じたのだろう。いつの日か，知恵と体力を身に付け，さらに進んで海へと乗り出し，そのまま太平洋を横断してアメリカを目指そうという願望を抱くきっかけとなった。

小学校の高学年になると，ぼくは小説や芝居の脚本を書き始めた。

小説の処女作は，子どもたちが巨大な筏で太平洋を横断する冒険物語で，原稿用紙45枚まで書いたところで頓挫した。

6本書いた芝居の脚本はすべてアメリカを舞台とするアメリカ人が主役の西部劇で，学芸会で上演してぼくが主役をつとめた。

大学を卒業後すぐに結婚し，子育てをしながら執筆した『リング』が大ヒットし，『らせん』『ループ』とベストセラーが続き，ハリウッド映画でシリーズ化されたおかげで，念願の船を手に入れることができた。

25年の歳月をかけて海の仲間を増やしつつ，台湾，韓国，沖縄，小笠原諸島をはじめ，西日本の海域をすべて自船で網羅した後，海外に目を向け，地中海，インド洋，南太平洋でヨットを借りて島々を巡り，航海術を身につけていった。

太平洋横断するための船と技術は既に手に入れている。チャンスがあればいつでも太平洋横断は可能だ。

しかし，太平洋を手中に収めたと実感した今になって，思いを馳せるのは，宇宙である。

宇宙には限りない謎が秘められている。ダークエネルギー，ダークマターの正体は何なのか。重力理論と量子論が統一できない原因はどこにあるのか。エントロピーが増大するシステムでなぜ生命という精巧な構造ができたのか……。

宇宙に乗り出すことによって謎を解明する手掛かりが得られるのではないか。

50歳若かったら，ぼくは宇宙飛行士を目指していただろう。

還暦を過ぎて，まだ見ぬ世界への憧れはますます強くなる。人類が独自の歴史を築くことができたのは，未知の領域に新しい一歩を踏み出そうという心意気があったからこそだ。

宇宙船が太陽電池やソーラー電力セイルを使って行けるのは木星付近がせいぜいである。太陽系を離れ，より遠くに行くためには，原子力から得られるエネルギーが欠かせない。

（2019年4月26日 記）

時論

個々の原発問題に対する意識の差

小澤 杏子（おざわ・きょうこ）
東京学芸大学附属国際中等教育学校４年
中学校３年時，学校での授業をきっかけに原発問題に興味をもつ。新聞投稿や高校生同士での原発の是非の討論に参加し，2019 年３月には「福島スタディツアー」で高校生の立場として福島の現状を見学した。東京都出身，アメリカ在住経験あり。

福島第一原発事故から８年経った今，私たちは福島の現状をどれほど知っているだろうか。今の福島がどのような復興を遂げていて，どのような課題と向き合っているのか。

恐ろしい事故が起きた当時，どのメディアでも原発事故の話題があふれていた。何が要因で事故が起きたのか，事故の影響はどれほどなのか，事故後の対策はどうするのか。全国民が原発の話題に目を向けていただろう。被災した地域の方々は厳しい現状と向き合い，被害がさほどなかった地域は他人事としてこの事故について話していたのではないだろうか。事の大きさが違ってしまったが故に，被災者の方々には多すぎる傷を負わせてしまった。そこに，何も知らない私たちは心のない言葉を発してみたり，「福島」という名前だけで差別したりしてしまっていた。８年経った今，どれほど復興が進んでいるかは「外の人」にはわからないのは事実である。知らないからしょうがない，といえば丸く収まるかもしれないが，あまりにも自分を含む「外の人」の対応は無責任だと思った。今まで知らなかったことはどうにもすることができないが，より福島の今を，今までの努力を知れるような機会をより多くの人に作ることが大切だと感じた。

事故の翌年からは，小学校の教科書にも福島第一原子力発電所での事故が含まれるようになった。原発問題は非常に複雑で難しい内容である。小学生に理解させるのは難しいという人もいるかもしれないが，私は早いうちから原発問題を学べる機会があればよかったと，高校生になってからよく思うようになった。もちろん，教材では何があったのかなどは取り上げている。しかし，あまり深く学習しないというのが私の印象である。というのも，学校の授業では過ぎ去った過去のように事故の内容が取り上げられた。東京都内の小学校６年生だった私は，３月 11 日に学校から原発問題に関するパンフレットをもらったのを覚えている。その日の授業は，黙祷と校長先生の原発に関する話から始まった。私は，福島の深い現状を理解していなかったが故に，高校生になった今ほど３月 11 日を意識はしていなかった。むしろ，ほとんど福島のことなど知らなかった上に，自分には関わりのないことだと考えていた。私は東京に住んでいて，福島に住んでいるわけではない。福島に親族がいるわけでもない。福島で起きた事故は，事故に関与していた会社が東京電力であったとしても，自分には何の影響もない，などという安易な理由で他人事として捉えていた。おそらく，私と同じように考えていた生徒は無数に存在していたのであろう。私は，そのような考えを持ってしまうような環境を変えるべきだと考えている。幼い頃から原発事故と向き合い，より身近な内容だと捉えることができれば，福島に対する偏見や差別，風評被害なども減り，１日でも早く被災者の方々が住みやすい環境に近づけることができる。福島で８年前に起きてしまった原発を基とする多くの問題は，過去のことではない。未だ先の見えない課題が無数にある，私たち全員が向き合っていかなければならない，現在進行形の問題なのだ。

今の日本が，どれほど先の見えない原発問題を抱えているのか実感できたのは最近のことである。３月の中旬に，１泊２日で福島県をより深く知るためのスタディツアーに参加した時のことである。東京都内にある学校から参加した 20 名弱の高校生を，福島県民の方々は温かく迎え入れてくださった。ツアー初日の午前中は，楢葉遠隔技術開発センター見学に行った後，美味しいご馳走をいただいた。被災したとは思えないような地域の方々の笑顔，美味しいご馳走を目の当たりにして，「福島はもう大丈夫なんだ」という印象を受けた覚えがある。しかし，そんな楽観的な思考は午後の活動で塗り返される。福島は完全復興とは程遠い状況であるということを，私は知ることができた。訪問したさまざまな地域は，私が知っていた災害後の福島ではなかった。私がテレビや新聞で知っていた今の福島と，実際に自分で見た福島がどれほど違うか話し始めたらきりがないほどで，「本当の福島」を知った私は言葉を失ってしまったのだ。授業では全く聞いたことのない，教科書では見たことのないも

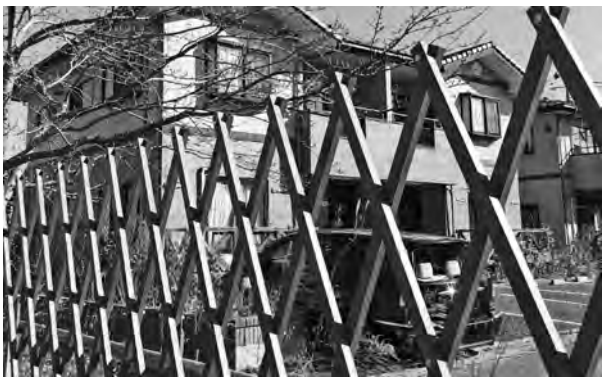


図　バリケードの様子

のの一つとして，およそ2mほどもあるバリケードの存在をあげることができる。帰還困難区域とすでに解除された地域を分けるために，バリケードを使って壁を作っているということを世の中の人は知っているのだろうか。壁のようなバリケードではないので，バリケードの向こう側がどのような状態なのかを見学することができた。そこで私が目にしたものは，想像を絶するものであった。8年前は普通に生活していた場所は8年間も放置され，建物は手入れがされず，劣化が進んでいた。まるで自分が映画の舞台に迷い込んだような感覚になってしまうほど，福島の帰還困難地域は日本の他の都道府県のような環境ではなかった。何らかの壁を作らないと，好奇心で侵入してしまう人がいるかも知れないということは勿論私もわかっていた。しかし，もし自分の家の前にもバリケードを張られたら，などと考えると，背筋が凍るような思いになる。福島で見てきた光景は，一生忘れないだろう。

私は中学校3年生の頃，一つの新聞投稿をしたことをきっかけに，高校生になってからはさまざまな原発問題に関する学校外での活動をしてきた。学校で受けた当時の事故や原発に関する深い内容は，当時の私にとって知らないことばかりであった。高校1年生では，福島県，京都府，そして東京都から集まった高校生たちで原発問題の課題や，是非について討論会や意見交換などを行なった。自分たちが持っている知識で話題を展開し，何が問題なのか，何がわからないかなどを何時間も話し合った。福島スタディツアーに参加した後，当時の自分を振り返ってみると，帰還困難区域および福島県の現状を甘く見ていた自分が恥ずかしくなった。私は，自分が原発の問題をよく理解していると思っていた。思い込んでいたからこそ，偏った発言をしてしまった可能性もあるし，他にも偏った意見を言ってしまう人は無数にいるだろう。しかし，このような偏った意見になってしまうのは，私たちが原発をよく知らないからである。私は原発の仕組みやその影響に興味を持って1年以上学習や活動を進めてきたが，それでも知らないことが山ほどあるということがわかった。つまり，原発などに興味がない人はもっと知識が浅く，私以上の偏った意見を発しているのであろう。原発事故の問題に対する個々の意識の差を0にすることは不可能であったとしても，その差を埋めることはできる。少しでも多くの人が原発問題と向き合うことさえできれば，福島に関わっている人たちの環境を改善することができるのではないか。

最後に，福島から帰ってきた私の原発問題に対する考えを述べたい。原発に反対か，賛成か。中学校3年生で授業を受けるまでは反対だった。というのも，原子力の仕組みを理解していなかったからである。しかし，私は中学校で受けた原発に関する授業以来，原子力を国のエネルギーの一部として使用することに賛成の立場になった。福島を訪れて，さまざまな問題がまだ解決してないという現実を知った上でもなお，私は原子力を推進するべきだと考えている。福島第一原発事故は防げた事故であると，とある東京電力の人が言っていた。もしそれが本当だとすると，同じ事故がもう二度と起きないように対応できるだろう。実際に福島スタディツアーでは，東京電力の方々がどのような対応をしているかということも知ることができた。火力エネルギーを使い続けることも，「一生続けられる」という保証のない，つまり先の見えないことである。現実的に，現段階では原子力に頼らざるを得ないと考えている。

反対派も推進派も最終的な目標は「原発0の日本」ではあることには間違いがない。しかし，そのステージに近づくには多くの問題が生じてしまうのが「現在」である。私は賛成しているからといって，「あの日」がもたらした爪痕がまだ残っているということを受け止めていないわけではない。むしろ，福島での光景を思い出すたびに，自分の「原発に賛成」という意見が揺らぐほどである。福島は今，元の環境を少しでも早く取り戻そうと全力で動き続けている。福島県ほど大規模なことは私にはできない。では，今の私にできることは一体なになのか。今すぐ原発を0にすることや福島での現状を完全に8年前に戻すことなどできない。今は，私たち個々が現実と向き合い，原発の深い事情を理解することが前に進む一つのきっかけになると思っている。なので，私はこれからも原発に関する活動をし続けて，一人でも多くの人が真剣に原発に向き合うきっかけを提供できるように心がけたい。「時論」に自分の意見を掲載することが，私にとっての大きな第一歩である。

（2019年3月29日 記）

News

福島県の甲状腺評価部会，「事故被ばくとがんは関連ない」

福島県は6月3日，福島市内で甲状腺検査評価部会を開き，38万人を対象に実施した検査で発見された甲状腺がんと放射線被ばくとの関連は認められないとの見解をまとめた。2014～15年に若年層を中心に行った検査結果をまとめたもの。チェルノブイリ事故後の場合には低い年齢層に甲状腺がんがより多く発見されたが，福島県内での調査結果では年齢層が高いほど甲状腺がん発見率が高く，一般的ながんの場合と同様だったとしている。また，国連放射線影響科学委員会（UNSCEAR）が年齢別・市町村別に推計した甲状腺吸収線量を用いて行った線量と甲状腺がん発見率との関連を調べた結果，線量の増加に応じて発見率が上昇するといった関係は認められなかったと判断した。

福島県では福島原発事故の影響で甲状腺がんが増えるのではないかとの懸念に対応するため，県民を対象に甲状腺検査を実施している。ただし，超音波診断装置を用いた甲状腺検査は，将来的に症状を引き起こさないがんまで診断してしまう可能性があるため，県ではその旨を伝えた上で希望者のみを対象に検査を実施してきている。

なお38万人を対象とした検査では27万人が受診し，そのうち71人が悪性ないし悪性疑いと判定された。

（原子力学会誌編集委員会）

「脱炭素社会」めざすパリ協定長期戦略案がまとまる

地球温暖化対策について検討する環境省と経済産業省の審議会は4月23日，合同会合を開き，パリ協定に基づく長期戦略案を取りまとめた。長期戦略の策定に向けては官邸レベルの有識者懇談会がすでに提言を取りまとめており，今回の案文はこれを反映させ，今世紀後半のできるだけ早期に「脱炭素社会」の実現を目指し，「2050年までに80％の温室効果ガス排出削減」に大胆に取り組むことを基本姿勢としている。今後6月のG20大阪サミットに向けて，パブリックコメントや一般向けの説明会を経て最終決定となる予定。

原子力については，エネルギー起源のCO_2排出削減を図る施策として，安全性を最優先に原子力規制委員会による判断を尊重し再稼働を進め，2050年に向けては，人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し，安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求，バックエンド問題解決のための技術開発や国際連携を進めていくとしている。また，イノベーションの推進として，小型モジュール炉や溶融塩炉などの革新的な原子炉開発についても触れられており，概ねエネルギー基本計画に則った記述となっている。

（資料提供：日本原子力産業協会，以下同じ）

量研機構，「JT60－SA」の心臓部を据付け

量子科学技術研究開発機構は5月8日，茨城県那珂市にある那珂核融合研究所で建設を進めている超伝導トカマク実験装置「JT60－SA」で，世界最大級の磁場コイル「中心ソレノイド」の据付け作業を行った。多くの報道陣が見守る中，D字型のトロイダル磁場コイルの集合体に囲まれた「JT60－SA」本体の中心に直径2m，高さ7m，重量約100トンの筒状をした「中心ソレノイド」がゆっくりと挿入された。

「JT60－SA」計画は，核融合エネルギーの科学的・技術的実現性を実証する多国間プロジェクト「ITER」計画を支援する日欧協力「ITER/BA（幅広いアプローチ）活動」の取組の一つ。「ITER」の約半分規模の機動性などを活かしながら，「ITER」の技術目標達成に資するデータを取得し，来るべき運転段階に反映させていく。さらに，発電を実証し経済性に見通しを付ける原型炉設計を展望した「ITER」の補完研究や，次世代の研究開発を主導する人材育成としての役割も担っている。

ドーナツ状の磁気のかごの中にプラズマを閉じ込めるトカマク型の核融合で，「中心ソレノイド」は，IH調理器やワイヤレス充電器と同じ原理でプラズマに大電流を流すという重要な役割を持っており，今回，その据付けが行われたことは，「JT60－SA」の完成に向けて大きな

マイルストーンを通過したこととなる。

2007 年の「ITER/BA 活動」の協定締結後，「JT60 − SA」は，その前身となる試験装置「JT − 60」の約 3 年間にわたる解体作業の後，2013 年 1 月より組立てが開始された。機器は日欧で調達取り組めを締結し製作が進められ，同年 3 月にスペインが製作した「クライオスタットベース」の据付けから作業が本格化してきた。今後は 2020 年 3 月の完了，同 9 月の初プラズマ生成を目指して，本体装置を覆う熱遮蔽体「クライオスタット」の設置や周辺機器の取付けなど，いよいよ最終局面に入る。

海外ニュース （情報提供：日本原子力産業協会）

【国際】

原子力関係学協会がクリーン・エネルギー研究開発費の倍増を宣言

欧州原子力学会（ENS）の発表によると，世界中で 8 万人以上の科学者を代表する 42 の原子力関係学協会が 5 月 13 日，仏国南東部のジュアン・レ・パンで，クリーン・エネルギー関係の研究開発費を倍増させるよう求める共同宣言を採択した。

5 月末にカナダのバンクーバーで開催される「第 10 回クリーン・エネルギー大臣会合（CEM）」に向け，仏原子力学会（SFEN）が中心となって取りまとめたもので，今後 5 年以内に原子力関係の研究開発と技術革新用の公共投資額を倍増させるため，最大限の努力を傾注していくと宣言。先進的原子力システムの革新的な応用に重点的に取り組むべきだとしており，それによって将来，クリーン・エネルギーによるエネルギー・ミックスも可能になると呼びかけている。

ENS は各国の政策立案者に対するこの国際的な呼びかけに加わっており，5 月 28 日と 29 日に CEM で予定されている関係イベントにおいて，原子力技術革新に関する広範な多国間協議が閣僚レベルと実務者レベルの両方で展開されることを期待。原子力に内在するすべての潜在能力を各国のクリーン・エネルギー・ポートフォリオ用に開放するとともに，各国と世界，両レベルの脱炭素化に向けて貢献させたいとの目標を掲げている。

ENS によると，核分裂と核融合を合わせた原子力研究開発に対する公的支援は 2000 年以降，世界レベルで見ても年間で常に約 40 億ドル程度に留まっている。また，多くの国では民間部門における原子力研究への投資熱意が低下。これは，原子力研究を取り巻く否定的な政治環境や市場環境，財政環境によるものだとした。

これに対して原子力産業界は近年，小型モジュール炉（SMR）や第 4 世代原子炉など，新しい原子炉設計の開発やデジタル化において技術革新の新たな波に取り組んでいる。また，脱塩や地域熱供給，産業界へのプロセス熱供給など，発電以外にも利用する動きも進展中。このようなプロジェクトは，その他のクリーン・エネルギー源とともに，原子力発電の活用で新たな機会を市場にもたらすと期待されるが，それには多額の研究開発資金と新しい技術革新アプローチが必要だと ENS は指摘した。

これと並行して近年は，多くの原子力研究開発インフラが時代遅れになってきた。革新的原子炉の開発支援のみならず，核医学開発で必要な放射性同位体の生産にもニーズは広がっている。ENS 高等科学評議会の E. プルースト会長は，「欧州原子力共同体の将来的な研究プログラムに対して，EU 予算の大幅な増額が必要だ」と断言。核分裂研究開発に対する最近の予算規模，年間 5,000 万ユーロ（約 62 億円）では明らかに不十分であり，このままでは次世代原子炉システムの開発であらゆる選択肢をオプションとして残しておくことや，専門的知見をただ維持することさえできないとした。

同会長はまた，欧州規模で実施される研究・技術革新の促進枠組プログラム「ホライズン 2020」では，「クリーンで安定した効率的なエネルギーのプログラム」に 12 倍以上の予算が割り当てられていると強調。同プログラムの対象には原子力が含まれておらず，このような状況が ENS を今回の共同宣言に参加させることになったと説明している。

【ロシア】

海上浮揚式原子力発電所，12 月に送電開始へ

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は 4 月 24 日，北極圏ムルマンスクで運転開始前の包括的な試験を実施していた海上浮揚式原子力発電所（FNPP）について，12 月にも最終立地点のチュクチ自治管区ペベクで送電網に接続し，営業運転を開始出来る見通しになったと発表した。

世界で唯一の FNPP である「アカデミック・ロモノソフ」号には，出力 3.5 万 kW の小型炉「KLT − 40S」2 基

で構成される海上浮揚式原子力ユニット(FPU)が搭載されており，どちらも3月31日に出力100%に到達した。同ユニットの主要機器と補助機器，および自動プロセス制御システムともに，安定した運転性能が確認されたとしており，民生用原子力発電公社のロスエネルゴアトム社は，試験結果に基づいて規制当局からFPUの受け入れ証書が発行され，7月には同FNPPの運転許可が発給されるとしている。

これと並行してペベクでは，FNPP用の陸上設備と港湾施設，および地元の送電網や市内の熱供給ネットワークに確実に接続するためのインフラが年末までに完成する予定。FNPPは今年の夏にペベク港に曳航され，極東地域最北端の同区域にこれまでエネルギー供給してきたビリビノ原子力発電所(1.2万kWのRBMK × 4基)や，チャウンスカヤ熱電併給発電所の設備容量を徐々にリプレースしていくことになる。ビリビノ発電所では今年1月，1号機の本格的な廃止措置に向けた閉鎖許可が，連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)から発給されている。

【スロバキア】

建設中のモホフチェ3号機，燃料装荷前の最終試験段階に

スロバキア政府が34%出資する同国最大の電力会社，スロバキア電力(SE)社は4月15日，建設中のモホフチェ原子力発電所3号機(PWR，47.1万kW)が，燃料装荷前の試験の最終段階に入ったと発表した。今年の夏頃に，燃料を初装荷する技術的準備が整うとしている。

同発電所では1987年に3，4号機が本格着工したものの，格納容器がないタイプの第2世代ロシア型PWR(V－213)設計であったことから，安全性の改良とそれにともなう資金の調達問題で，両炉の建設工事は1992年から約16年間中断した。2008年11月に工事が再開した際，主要機器はスコダ社が供給する一方，計測制御(I＆C)系については仏アレバ社(当時)と独シーメンス社，タービン発電機のエンジニアリングやプロジェクト管理に関しては，イタリア電力公社(ENEL)が担当することとなった。

3号機では昨年8月に，圧力容器や原子炉系統の配管，バルブ等で常温耐圧試験が終わり，12月からは1次系の高温耐圧試験が始まった。このほど，1次系の気密性確認など同試験におけるすべての作業に加えて，1次系と2次系機器の機能試験なども完了したことから，SE社は起動前の最終段階として大規模な点検を実施するとした。あらゆる重要機器やシステムについて，規定通りに運転前試験を行う考えである。

SE社の説明によると，規制当局が許認可を発給する前に，公衆衛生院など複数の政府機関が意見を提示することになっており，それにより正確な起動日が確定する。このプロセスには時間がかかるほか，予想される隣国オーストリアの反原子力団体「グローバル2000」の妨害活動が，特に大きく影響する見通し。燃料装荷で技術的な準備が整ってから実際の装荷に至るまで，約8か月を費やす可能性があるとしている。

このような作業等の遅れにより，当初54億ユーロ(約6,800億円)と見積もられていた2基分の完成総工費は，その5%分に相当する2億7,000万ユーロ(約340億円)の超過が予想されている。これについては，スロバキア・パワー・ホールディング社など，SE社の主要株主が全面的に手当てするとしている。

【ルーマニア】

停止中の原子炉増設計画，中国と暫定的投資家協定を締結

ルーマニアの国営原子力発電会社(SNN)は5月8日，建設工事が停止中のチェルナボーダ原子力発電所3，4号機(各70.6万kWのカナダ型加圧重水炉)を完成させるため，中国広核集団有限公司(CGN)およびCGN傘下の中・東欧諸国向け投資会社と，プロジェクトの継続に関する暫定的な投資家協定(PIA)を締結したと発表した。

PIAに基づき，SNNとCGNは今後60営業日以内に，チェルナボーダ3，4号機の完成に向け，技術およびと運営上の基盤となるプロジェクト会社を設置する。この会社は両社の合弁企業になる予定で，CGNとSNNがそれぞれ51%と49%を保有。設置当初の2年間に，建設作業を再開する前段階の重要ステップとして，プロジェクトの継続モデルを構築する方針である。

チェルナボーダ3，4号機は1980年代半ばに本格着工したものの，1989年のN．チャウシェスク政権崩壊により，それぞれ進捗率15%と14%段階の建設工事が1991年に停止。これらを完成させるという政府決定を受け，SNNは2009年にエネルゴニュークリア社をプロジェクト会社として設置した。

しかし，同社への出資を約束していた欧州企業6社は，経済不況等によりすべて撤退した。SNNが新たな投資家を模索するなか，CGNは2011年10月に出資参加の意思を表明。両炉に「CANDU6」型原子炉を供給予定のCANDUエナジー社は2014年7月，CGN傘下の中広核工程有限公司(CNPEC)と拘束力のある独占協力協定を結んでいる。また，SNNは翌2015年11月，両炉の設計・建設・運転・廃止措置に関する協力について，

CGN と了解覚書に調印していた。

今回の PIA 調印式には，ルーマニアの V．シュテファン副首相と A．アントン・エネルギー大臣に加えて，中国の在ルーマニア大使館・特命全権大使と経済参事官が同席。PIA の内容は，今年 4 月の SNN 株主総会で承認済みであるほか，CGN 側も中国国内の承認手続を完了したとしている。

エネルギー省のアントン大臣は，双方が利益を得る形で PIA 交渉が妥結した理由として，SNN 株主総会による協定内容の承認が大きいと指摘。これにより，3，4 号機の建設継続に向けた具体策を実際に開始可能になったと説明している。

【ウズベキスタン】

原子力導入でサイトの選定プロセスを開始

ウズベキスタン初の原子力発電所導入について，昨年 7 月にロシアと合意した同国政府が，建設サイトの選定プロセスを開始していたことが明らかになった。2020 年 9 月頃にサイト許可の取得を目指す方針で，原子力をエネルギー・ミックスに加えるため，様々な作業や計画を検討している国の仲間入りをしたことになる。

年間 690 億 kWh の電力需要があるウズベキスタンは，同国初の原子力発電設備として，120 万 kW のロシア型 PWR（VVER）を 2 基，国内に建設する方針。国内の天然ガス資源は，輸出用や高付加価値化学製品の原料として一層有効に活用する一方，世界で最も安全かつ近代的な初号機を 2028 年までに起動し，国家経済の成長や国民の生活水準向上に役立てていく考えだ。建設サイトの特定に資する地質調査については，プロジェクトを請け負ったロシア企業がすでに昨年 10 月，同国北西部のナボイ州で開始している。

サイト選定プロセスの開始は，同国政府の要請により今年 2 月に，首都タシケントで関連ワークショップを開催した国際原子力機関（IAEA）が 4 月 8 日付けで公表した。同ワークショップは，ウズベキスタンで新たに設置された原子力開発庁（Uzatom）が共催しており，内容はサイト評価にあたり考慮すべき安全面と非安全面に関するもの。Uzatom のほかに同国の原子力規制組織や関連する国営機関が参加し，IAEA が提供する安全審査サービスや安全基準，立地とサイト評価の支援に関わるリソースについて議論した。

同ワークショップではまた，健全な原子力発電プログラムの開発に関して IAEA が策定した「マイルストーン・アプローチ」も紹介された。プログラム開発で個別のアクションを必要とする 19 の原子力インフラ課題のうち，「サイトと支援施設」を取り上げており，同アプローチに沿って IAEA は，安全・セキュリティや法制面と規制面の枠組，人的資源開発，緊急時対応計画，保障措置などで総合的なサービスを提供する。これには，「統合原子力インフラ・レビュー（INIR）」や「立地評価・安全設計レビュー（SEED）」といったピアレビューと諮問ミッションが含まれるとしている。

【エジプト】

原子力導入計画にサイト許可を発給

エジプトで原子力発電の導入計画を担当する原子力発電庁（NPPA）は 4 月 10 日，同国北部エル・ダバにおける 4 基の原子炉建設計画に対し，エジプト原子力規制・放射線当局（ENRRA）から 3 月初旬にサイト許可を受領していたことを明らかにした。

同サイトおよびサイト固有の条件が，原子力発電所建設における国内の要件と国際的な要件を満たしていることが確認されたもの。NPPA は，2026 年の初号機起動を目指すエル・ダバ発電所・許認可プロセスにとって，大きなステップになったとしている。サイト許可は今後着工する 4 基すべてに適応する一方，次の段階である建設許可も含め，残りの許認可はすべてユニット毎の発給になる。

同建設プロジェクトでは，120 万 kW 級のロシア型 PWR（VVER）4 基の建設が計画されている。エジプト政府の電力・再生可能エネルギー省は 2017 年 12 月，プロジェクトを請け負ったロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社との契約書に調印。昨年 10 月には米国の GE パワー社が，ロスアトム社の発電機器製造部門であるアトムエネルゴマシ社との合弁事業体を通じて，4 基分のタービン系統機器を同プロジェクト用に納入すると発表した。

建設サイトのエル・ダバは，地中海沿岸のアレキサンドリアから西に 170km の地点。完成した原子炉 4 基は NPPA が所有・運転することになっており，これらで急増する同国の電力需要に対応したいとしている。

サイト許可の申請書は 2017 年に NPPA が提出していたもので，ENRRA は，原子炉の設置関係データのほかにサイト特性のデータ，原子炉の設計基準と概念，エジプト環境庁による環境影響声明書（EIA）の審査報告などを詳細かつ包括的に審査した。

また，この審査活動を支援するため，エジプト政府は今年 1 月，国際原子力機関（IAEA）から「立地評価・安全設計レビュー（SEED）」ミッションを招聘。発電所の安全性に関わるサイト特性のほかに，地震や津波といった自然災害，外部からもたらされる人為的な災害にも，特

別な注意が払われたとしている。

【米国】

NJ 州，商業炉 3 基に「ゼロ排出認証」を適用

米ニュージャージー（NJ）州の公益事業委員会（NJBPU）は 4 月 18 日，州内のホープクリーク原子力発電所（129.6 万 kW の BWR）とセーレム原子力発電所（117 万 kW の PWR × 2 基）の 3 基を温存するため，無炭素電源維持の目的で 2018 年に設置した「ゼロ排出認証（ZEC）」プログラムを適用すると発表した。

このプログラムは，イリノイ州とニューヨーク州で 2016 年に採択されたものと同様の内容で，地球温暖化防止の緊急性に鑑み，CO_2 を排出しない原子力発電所の早期閉鎖が環境に及ぼす影響を考慮。ZEC を通じて，両発電所には配電電力に応じた追加料金が支払われ，少なくとも 3 年間は運転継続が可能になる。両発電所は現在，同州のエネルギー・ミックスの中で約 32％のエネルギーを供給しており，クリーン・エネルギーの供給シェアは 90％に達している。

NJBPU によると，NJ 州民に電力供給している既存の原子力発電所が突然閉鎖された場合，その分の電力需要は天然ガスや石炭で賄われ，様々な汚染物質が大気中に大量に放出される。これにより，公衆衛生と環境への悪影響が懸念されるうえ，送電網が不安定な状態になるほか，地元の雇用も失われて州経済が影響を受ける可能性があるとしている。

ホープクリーク原子力発電所はパブリック・サービス・エンタープライズ・グループ（PSEG）が所有・運転する一方，隣接区域に立地するセーレム原子力発電所は，PSEG とエクセロン社が協同で保有している。温室効果ガスを排出しないエネルギー・インフラへの投資促進目的で，ZEC を盛り込んだ法案が 2018 年 5 月に制定された後，PSEG は同年 11 月，両発電所への ZEC 適用を NJBPU に申請。NJBPU スタッフは両発電所を「適格」と見なしたのにともない，公開ヒアリングや州民からのコメント募集を実施した。

ZEC プログラムの適用が決まったことから，両発電所は今後，1 kWh あたり 0.004 ドルのクレジットを電力小売り料金の中から受け取ることになる。今回の NJBPU による承認を受けて，同クレジットに対する支払金の徴収が直ちに開始される方針で，今後 3 年間に各プラントにはそれぞれ，年間約 1 億ドルが支払われる見通し。必要額より多く徴収された場合，超過資金は消費者に返還される。

また，3 年が終了する頃，NJBPU はプログラムを再評価する予定。州政府や連邦政府を通じて電気事業者がその他の助成金を受け取っていれば，ZEC との調整が必要になるとしている。

TMI 1 号機，9 月末までの永久閉鎖が確定

米国最大の原子力発電事業者のエクセロン社は 5 月 7 日，ペンシルベニア州のスリーマイルアイランド（TMI）原子力発電所 1 号機（PWR，89 万 kW）について，9 月末までに永久閉鎖する方針を確定したと発表した。

10 月以降も運転を継続する場合，交換用の燃料を 6 月 1 日までに購入する必要がある一方，ペンシルベニア州議会では上下両院ともに原子力発電所への支援措置を盛り込んだ法案審議が進んでおらず，5 月の会期は数日を残すばかり。2017 年 5 月に公表した計画どおり，2034 年まで運転継続が許されている同炉を早期に閉鎖する考えを固めたもの。

この決定について，米原子力エネルギー協会（NEI）の M. コースニック理事長は同日，「すべてのクリーン・エネルギー源について，州政府と連邦政府がともに，その価値を高く評価する政策や市場解決策を推し進めてこそ，国家的な利益につながる」との見解を表明している。

エクセロン社は 2 年前，市場における電力卸売価格の長期的な低下や再生可能エネルギー源に対する州政府の優遇政策等により，TMI 1 号機の収益が過去 5 年にわたって低迷していると発表。CO_2 を排出せず，地元経済にも貢献する原子力発電の利点に対し，州政府や連邦政府が相応の補償を与える政策を取らない限り，2019 年 9 月末頃に永久閉鎖することになるとした。また，同州を管轄する地域送電機関（RTO）のオペレーターである「PJM インターコネクション」が，2020 年～2021 年の設備容量を確保するために実施したオークションでも，同発電所が勝ち残れなかった事実を明らかにしていた。

同社はすでに 4 月 5 日，1 号機を 9 月に永久閉鎖した場合の詳細計画として「閉鎖後廃止措置活動報告書（PSDAR）」を米原子力規制委員会（NRC）に提出した。3 種類の廃止措置オプションのうち，汚染構造物を一定期間，安全に貯蔵する「SAFSTOR」を選択。取り出した使用済燃料は暫定的に貯蔵プールに保管し，2022 年末までに乾式貯蔵施設に移すとしたほか，2074 年に冷却塔の解体を開始するなど，大型機器や構造物の具体的な廃止措置プランを明記した。また，2017 年に 675 名だった発電所従業員も 3 段階で削減していき，2022 年には常勤スタッフ 50 名にするとしている。

同州ではこのほか，エクセロン社が所有する商業炉も含めて，5 サイト・8 基の原子力発電所が稼働中。このう

ち，ビーバーバレー原子力発電所（90 万 kW 級 PWR × 2 基）を操業するファーストエナジー・ソリューションズ社は昨年 3 月，財政事情により，これら 2 基を 2021 年までに早期閉鎖する方針を発表した。このためエクセロン社は，「1 日 24 時間稼働し続けて，毎年数 100 万トンの CO_2 排出抑制に貢献している州内の原子炉を，ペンシルベニア州民全員の将来的なクリーン・エネルギーとして確保するため，今後も議会その他のステークホルダーと支援策の法制化を働きかけていく」としている。

【カナダ】

ダーリントン発電所改修計画，2 号機に燃料チャンネル設置

カナダのオンタリオ・パワー・ジェネレーション（OPG）社は 4 月 15 日，大掛かりな改修プロジェクトが 2016 年に始まったダーリントン原子力発電所（93.4 万 kW のカナダ型加圧重水炉 × 4 基）の 2 号機で，燃料チャンネルの再設置が完了したと発表した。

2020 年初頭に全作業を終え，同年 2 月までにフルパワーで商業運転を再開することになっている。1990 年 10 月に営業運転を開始した同炉は，新しい機器でさらに 30 年間，運転を継続する。また，2 号機が復帰するのに合わせて，OPG 社は 3 号機の改修工事を始める計画。2026 年までに 4 基すべてで改修工事を完了し，それぞれ運転期間の 30 年延長を実現するとしている。

カナダでは 5〜9 年前までダーリントン発電所で 2 基，ブルース発電所で 4 基増設する計画が進められていたが，これらは現在すべて中止。2 つの新規立地点における新設計画も停止され，両発電所では運転期間の延長計画と大規模な改修プロジェクトが進行中である。

ダーリントン発電所は 1990 年代初頭以降，オンタリオ州における電力需要量の約 20％を供給。その運転期間を 2055 年まで延長することにより，オンタリオ州では年間 200 万台の自動車を排除したのと同等の温室効果ガスの削減効果があると OPG 社は指摘。加えて，州経済にも長期的にかなりの効果があり，シンクタンクの「カンファレンス・ボード・オブ・カナダ」の独自調査によれば，30 年間の運転期間延長で約 3,000 人分の雇用維持も含め，合計 899 億カナダドル（約 7 兆 5,300 億円）の経済的利益が同州にもたらされるとしている。

総予算が約 128 億カナダドル（約 1 兆 700 億円）という同改修プロジェクトでは，4 基のうち最初に営業運転を開始した 2 号機の作業が 2016 年 10 月に開始。続いて 3 号機，1 号機，4 号機の順に改修工事が行われると見られる。

2 号機の分解作業が昨年春に成功裏に完了したことから，この春にはカランドリア管や燃料チャンネル，フィーダー管の再設置も含めた，一連の複雑な組立作業が進展中。燃料チャンネルの設置は，綿密な計画立案と調整を必要とする非常に難度の高い作業で，OPG 社は 480 本の圧力管と 960 もの管端接続金具，および数千単位の機器付属品を正確に取り付けるなど，文字通り炉心を再構築する作業になったと説明した。

同炉ではフィーダー管の取り付け作業も続けられており，次のステップとしてはこの秋にも燃料を再装荷する。各システムを復旧させて，来年初頭の送電網再接続に備えるとしている。

【韓国】

APR1400 設計の新古里 4 号機が送電開始

韓国水力・原子力会社（KHNP）は 4 月 25 日，南東部の蔚山広域市蔚州郡で建設中の新古里原子力発電所 4 号機（PWR，140 万 kW）を初めて送電網に接続し，22 日の午後 5 時 40 分頃から送電を開始したと発表した。

同炉は，韓国電力公社（KEPCO）がアラブ首長国連邦（UAE）に輸出した原子炉 4 基と同型の 140 万 kW 級最新 PWR「APR1400」を採用。同設計として 2016 年 12 月に，初めて営業運転を開始した新古里 3 号機に次いで 2 基目となる。段階的な出力上昇試験や性能保証試験などを実施した後，8 月中旬にも本格的な商業運転に入るとしている。

2017 年 5 月に発足した文在寅政権は，脱原子力政策を国内で段階的に進めていき，2038 年までに商業炉を 14 基まで削減する計画である。ただし，2009 年から 2013 年にかけて着工済みの新古里 4 号機と新ハンウル 1，2 号機の建設工事は継続。2017 年 4 月に着工したばかりの新古里 5 号機と，当時建設準備中だった同 6 号機についても，中立の公論化委員会の勧告に基づき，予定どおり完成させることが決定している。

また，原子力発電所の輸出について，同政権は積極的に産業界を支援していく方針を表明。UAE での受注成功例を弾みに，政府と産業界および金融機関が力を結集して推進する考えだ。

特集　クリアランスの現状と課題 1

クリアランスにおける線量規準の考え方

電力中央研究所　荻野 晴之

ある物質の放射能濃度が極めて低く，一般的な再利用・再使用による線量が自然界の放射線レベルと比較して十分小さい場合には，人の健康に対するリスクが無視できると判断できる。この判断により，当該物質を放射性物質として扱う必要がないとして，放射線防護に係る規制の枠組みから外すという考え方を「クリアランス」という。クリアランスに用いる線量については，「自然界の放射線との関係」と「リスクとの関係」の両面から国際的な議論を経て，「年に 10 μSv のオーダーあるいはそれ以下」という判断規準がもたらされている。本稿では，国際放射線防護委員会（ICRP）の刊行物を中心に，クリアランスにおける線量規準の考え方をレビューする。

KEYWORDS: Decommissioning, Radiation protection, Exemption, Clearance, Dose criteria, Natural radiation, Radiation risk, ICRP, IAEA, Radiation Council of Japan

Ⅰ．はじめに

平成 30 年 8 月 23 日現在，商業用原子力発電所としては，福島第一原子力発電所 6 基を含む合計 22 基の廃炉が決定あるいは見込まれている[1)]。今後増えていく老朽化した原子力施設の廃止措置を安全かつ円滑に進めていくためには，放射性物質の濃度が極めて低く，「放射性物質として扱う必要のないもの」として放射線防護に係る規制の枠組みから外す「クリアランス」の重要性がますます高まると考えられる。

クリアランスに用いる線量については，「自然界の放射線との関係」と「リスクとの関係」の両面から国際的な議論を経て，「年に 10 μSv のオーダーあるいはそれ以下（of the order of 10 μSv or less in a year）」という実効線量で与えられた判断規準がもたらされている[2)]。この線量規準に基づいて国際原子力機関（IAEA）が示したクリアランスレベル[2)]は，日本の原子炉等規制法や放射線障害防止法にも取り入れられている。

本稿では，クリアランスの概念が成立するための前提条件を整理した上で，国際放射線防護委員会（ICRP）の刊行物を中心に，クリアランスにおける線量規準の考え方をレビューする。

Ⅱ．クリアランスの概念が成立するための前提条件

放射線防護に関する規制の範囲を定めるための概念として，規制除外（Exclusion），規制免除（Exemption），そして，クリアランス（Clearance）という 3 つのアプローチがある（図 1）。

規制除外とは，制御できない被ばくなどをそもそも規制の範囲外とすること，規制免除とは，ある条件を満たす放射線源をあらかじめ規制の対象から除いておくこと，そして，クリアランスとは，ある条件が満たされれば，規制されていた物を規制の枠組みから外すことを指す。下記に具体的な例を挙げる。

一つ目の規制除外の代表例は，地上レベルでの宇宙線や体内に含まれる K-40 から放出される放射線による被ばくである。これらの被ばくは規制を通じた管理に本質的になじまないことから，規制範囲の対象外としている。これが規制除外の考え方である。

二つ目の規制免除の代表例は，グロースターター（蛍光ランプを短時間に自動的に点灯するための小型の放電ランプに使用されている）に封入されている Pm-147 や Kr-85 といった少量の線源である。社会における利便性を考え，放射線安全上の極めて小さい線量を考えれば，これらを規制から離して社会の中で有効に利用していく

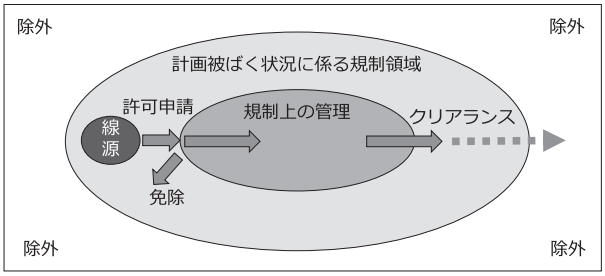


図 1　放射線防護に関する規制範囲
（除外，免除，クリアランス）

A review of approaches to setting the dose criteria for clearance： Haruyuki Ogino.
（2018 年 9 月 13 日 受理）

方が便益が大きい。さらに，これらを全て規制することは実質的に困難であり，そこに莫大な社会資源や資金を投入するより利便性を求める方が社会の利益となる[3)]。これが規制免除の考え方である。

参考までに，文部科学省放射線安全規制検討会の資料[4)]によれば，グロースターターの国内年間販売数量は2億個を超えており，国内で規制が免除されている密封線源の実に7割以上を占めている(平成14年当時の数値)。

三つ目のクリアランスの代表例は，原子力施設の解体に伴って大量に発生する有価物(コンクリートや金属など)の再利用である。当然ながら，高いレベルの放射性物質を含む場合には，放射性廃棄物としての適切な管理が施される必要があり，処理・処分に向けた取組みが着実に進められる必要がある。しかし，解体に伴って大量に発生する物のある割合は，放射能濃度が極めて低く，再利用・再使用による線量が自然界の放射線レベルと比較しても十分に小さいことから，人の健康に対するリスクが無視できる場合がある。これらの有価物までも放射性廃棄物として扱い，莫大な社会資源や資金を投入することは循環型社会形成促進の観点から適切でなく，防護が最適化されず，その行為は正当化されない[3)]。これらを規制の枠組みから外すことがクリアランスの考え方である。

参考までに，旧原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会の資料[5)]によれば，110万kW級の沸騰水型軽水炉(BWR)や加圧水型軽水炉(PWR)の廃止措置に伴って発生する1基あたりの廃棄物等の量は，低レベル放射性廃棄物に相当する物が約1万トン，放射性物質として扱う必要がない物が約50万トンと推定されている。また，商業用原子力発電所では初めての廃止措置が行われている東海発電所では，放射性廃棄物でない撤去物(大部分の機器，建屋コンクリート)が約13万トンと最も多く，次にクリアランス制度対象物が約4万トン(約9割がコンクリート)，低レベル放射性廃棄物(原子炉本体放射線遮蔽コンクリートなど)が約3万トンと推定されている。

Ⅲ．クリアランスにおける線量規準

クリアランスに用いる線量については，「①自然界の放射線との関係」と「②リスクとの関係」の両面から国際的な議論を経て，「年に10 μSvのオーダーあるいはそれ以下」という実効線量で与えられた判断規準がもたらされている[2)]。計画被ばく状況における公衆の線量限度が年に1 mSv(1,000 μSv)であるのに対し，クリアランスにおける線量規準は，その百分の一のオーダーである。

以下に，クリアランスにおける線量規準の考え方に用いられている2つのアプローチについて述べるとともに，表1に整理して示す。

表1　クリアランスにおける線量規準の考え方

①自然界の放射線との関係	②リスクとの関係
自然バックグラウンド放射線レベル ・世界平均値: **2.4 mSv/y** ・日本平均値: **2.1 mSv/y** ↓ 上記レベルの変動と比べて小さい線量レベルは、些細な線量と見なすことができる ↓ **約2 mSv/yの1～数%のオーダー**に相当する個人線量 **20～100 μSv/y**	**年死亡リスク** ・軽減に個人の資財を投入する人はほとんどいないレベル: 10^{-5}/y ・対策を講じようとする人がさらに少なくなるレベル: **10^{-6}/y** ↓ リスク係数を用いて年線量に換算 ・1.25×10^{-2} Sv^{-1} (ICRP Pub. 46) 年死亡リスクレベル10^{-6}/yに相当する個人線量 **100 μSv/yのオーダー** ↓ 線源の重畳(最大でも10)を考慮し、単一の線源に対して、 **10 μSv/yのオーダー**

1. 自然界の放射線との関係

放射線は自然界にも存在しており，世界平均では実効線量換算で約2.4 mSv(国連科学委員会2008年報告[6)])，日本平均では約2.1 mSv(原子力安全研究協会2011年報告[7)])の個人線量を与えている。公衆の個々の構成員は，国内のある場所から別の場所に移動する場合，自然放射線による被ばく量の違いを一般には考慮しない。したがって，自然バックグラウンド放射線の変動と比べて小さい線量レベルは，“些細な線量”と見なすことができる。この考え方に基づいて，自然バックグラウンド放射線(年に約2,000 μSv)の1～数%のオーダー，すなわち，年に20～100 μSvという線量規準が提唱されている(ICRP Publication 104 [8)]，67項)。

放射線医学総合研究所の1989年の報告[9)]によれば，日本国内における年間の自然放射線量(ラドンの吸入によるものを除く，宇宙，大地からの放射線と食物摂取によって受ける放射線量)は全国平均値で約990 μSvであり，これを県単位で比較した場合，最も高い岐阜県で1,190 μSv，最も低い神奈川県で810 μSvとなり，約400 μSvの差がある。これは，関東ローム層が大地からの自然放射線を遮へいする関東平野に対し，西日本では，自然放射性核種(ウラン，トリウム，カリウムなど)が比較的多く含まれる花崗岩が直接地表に露出している箇所の多いためと考えられている。

2. リスクとの関係

放射線防護に限らず，一般に，10^{-5}の年死亡リスク(1年間あたり10万人に1人が死亡するリスク)の軽減に自らの資財を投入しようとする人はほとんどおらず，さらに一桁低くなって，10^{-6}の年死亡リスク(1年間あたり100万人に1人が死亡するリスク)のレベルともなれば，対策を講じようとする人はさらに少なくなる(ICRP Publication 104[8)]，67項)。このような年死亡リスク(y^{-1})から年線量($Sv\ y^{-1}$)に換算するためには，疫学研究から求められるリスク係数(Sv^{-1})を用いる必要がある。

ICRP では，Publication 46[10] において，当時（1985 年）のリスク係数であった 10^{-2} Sv^{-1}（厳密には致死性のがんについて，1.25×10^{-2} Sv^{-1}）を用いて換算し，10^{-6}のオーダーの年死亡リスクに相当する線量が「年に 100 μSv のオーダー」としている。そして，ある個人が複数（最大でも 10）の線源から重畳して被ばくを受ける可能性を考慮し，単一の線源に対して，「年に 10 μSv のオーダー」という一桁切り下げた線量規準を示している。

リスク係数は疫学研究の進展によって変化するものである。事実，1985 年当時のリスク係数もその後変更されている。例えば，全集団に対する名目リスク係数で見れば，ICRP の 1990 年主勧告[11] では 6.0×10^{-2} Sv^{-1}となり，2007 年主勧告[12] では 5.5×10^{-2} Sv^{-1}となった。このリスク係数の変更が“些細な線量”の判断に与える影響について，米国放射線防護審議会（NCRP）レポート 116[13]（1993 年）で議論されており，変更は不要との結論が出されている。根拠は，変更されたリスク係数を用いてあるリスクレベルに対応する年線量を計算すれば，以前よりも約 1/5 から 1/4 の値になるが，“些細な線量”はリスク係数による計算だけに基づいたものではなく，線量としての大きさや，線量や健康影響の検出の困難さなども考慮して定めたため，とされている。

日本においても，クリアランス制度が原子炉等規制法に導入された際の国会審議において，リスク係数の変更がクリアランスにおける線量規準に与える影響に関する質疑があり，「年間 0.01 mSv というレベルについては，その後，ICRP や IAEA において見直されておらず，このレベルが現在でも，国際的に共通のものであると認識している」との政府見解が示されている[14]。

Ⅳ．放射線審議会基本部会報告書

クリアランスにおける線量規準の考え方に関連して，放射線審議会基本部会は平成 22 年 1 月，報告書「放射性固体廃棄物埋設処分およびクリアランスに係る放射線防護に関する基本的考え方について」[15] を取りまとめている。要点として，下記の二点が挙げられる。

まず一点目は，クリアランスにおける線量規準である。ICRP や IAEA における国際的な議論の動向を踏まえ，日本としての基本的な考え方を整理した結果，クリアランスレベルの導出に係る個人線量の規準としては，線量規準「年に 10 μSv」を用いることが引き続き妥当であるとしている。これは放射線審議会基本部会が昭和 62 年 12 月に取りまとめた報告書「放射性固体廃棄物の浅地中処分における規制除外線量について」[16] の内容を継承している。また，原子炉等規制法にクリアランス制度が導入された際の国会審議における政府答弁[14] とも一致する。

二点目は，放射性固体廃棄物埋設地の管理期間終了後における公衆の線量規準であり，この点については，放射線審議会基本部会昭和 62 年報告書[16] の内容が全面的に見直されている。昭和 62 年報告書[16] では，放射性固体廃棄物の浅地中処分において，放射線障害防止の観点からの管理を規制免除（原文では規制除外）する際の判断の規準とすべき線量としては，ICRP の Publication 46[10] に準拠し，年に 10 μSv を用いることが妥当であると述べていた。しかし，平成 22 年報告書[15] では，管理期間終了後における公衆の線量規準は，埋設事業の計画段階において，管理期間終了後の当該埋設地に起因する公衆の被ばく線量と比較することにより，計画や設計等の妥当性を判断するために用いられるものであるため，埋設された廃棄物という線源に着目した前向きの制限値として位置づけた線量拘束値を適用することが適切としている。そして，線量拘束値の具体的な値として，ICRP や IAEA の考え方に従って，年に 0.3 mSv を超えない値とすることが日本においても適切であるとし，この考え方は，浅地中処分，余裕深度処分（現在で言う中深度処分）および地層処分のいずれにも共通して適用できるものとしている。

クリアランスの線量規準を放射性廃棄物の処分に対して適用できないことに関連して，ICRP は，地層処分を対象とした Publication 122[17] において，「地層処分施設の規制管理が無期限に続くことは想定されていないとしても，地層処分施設での長寿命有害廃棄物の処分は，規制免除または廃棄物のクリアランスとはまったく異なる概念であり，したがってクリアランスの線量判断基準は適用されない」（54 項，脚注 2）と述べている。

Ⅴ．まとめ

本稿では，クリアランスに用いる線量である「年に 10 μSv のオーダーあるいはそれ以下」という判断規準が，「自然界の放射線との関係」と「リスクとの関係」という二つのアプローチに基づいて定められていることを，ICRP 勧告を中心に紹介した。さらに，放射線審議会基本部会が平成 22 年に発表した放射性固体廃棄物埋設処分とクリアランスに関する報告書の概要を紹介した。

クリアランスや規制免除を巡る議論では，「規制を要しない線量」という数値的な側面だけに関心が集中してしまいがちであるが，どのような背景からそのような概念が発展したのか，成立条件と併せて正しく理解しておく必要がある。これはクリアランスや規制免除に限らず，放射線防護に用いられる様々な数値（線量限度，線量拘束値，参考レベルなど）に共通する話である。ICRP が勧告する放射線防護体系は，科学，倫理，経験を三つの柱としており，最終的な勧告ではたった一行の記述になったとしても，その裏には多くのストーリーがある。ICRP の勧告を利用するものは，そのストーリーをできるだけ正確に理解した上で適用する必要があり，「ICRP が勧告しているから」ということだけを根拠にしてはな

らない。詳しくは，筆者のICRP科学秘書官補佐としての経験について本誌の「談話室」に投稿した記事[18]を参照されたい。

クリアランスレベルの導出にあたっては，「年に10 μSv」という単一の値が使われていることから，「年に10 μSvのオーダーあるいはそれ以下」にある“オーダー”の意味合いが薄れてしまい，あたかも厳密に遵守することが必要な数値規準として受け止められていることも多いように見受けられる。クリアランスレベルの遵守は，放射線測定や放射化計算等によって確認し，複数核種の寄与割合やクリアランス対象物の放射能濃度分布の均一性などを考慮して判断することになるが，クリアランスの線量規準が元来有する“オーダー”の意味合いに立ち返り，適切な保守性の範囲内で柔軟に運用していくことが重要となる。この点については，2017年に開催された第42回IAEA放射線安全基準委員会(RASSC)において，国際放射線防護学会(IRPA)のCoates会長(英国)も改めて指摘している[19]。そこでは，クリアランスレベルの遵守を判断する各過程において過剰な保守性を不必要に積み重ねてしまうと，少なく見積もっても全体で100倍の影響があり，クリアランス物から与えられる線量が結果として「年に0.1 μSv」となってしまうが，これは我々が目指してきた制度ではなく，保守性(Conservatism)を過剰に積み重ねることは必ずしも思慮分別のある(Prudent)手法とはならないことを強調されている。

今後日本においてもますますその重要性が高まると考えられる「クリアランス」を安定的に進めていく上で，クリアランスにおける線量規準の考え方を正しく理解しておくことは極めて重要である。本稿がその一助となれば幸いである。

― 参考文献 ―

1) 経済産業省資源エネルギー庁，日本の原子力発電所の状況，平成30年8月23日時点(2018).
2) International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3. No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014).
3) 小佐古敏荘，クリアランスレベルの法令取り入れについて(免除・除外・クリアランスとの関連において)，保物セミナー2004要旨集(2004).
4) 文部科学省原子力安全規制等懇談会，密封線源に係る免除レベルの法令への取入れについて(案)，第3回放射線安全規制検討会，平成20年12月11日，資料3-2(2008).
5) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会，主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて，平成11年3月17日(1999).
6) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes (2010).
7) 原子力安全研究協会，新版生活環境放射線(国民線量の算定)，平成23年12月(2011).
8) International Commission on Radiological Protection, Scope of radiological protection control measure, ICRP Publication 104, Ann. ICRP 37(5)(2007).
9) 放射線医学総合研究所，放射線科学，Vol. 32, No. 4(1989).
10) International Commission on Radiological Protection, Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste, ICRP Publication 46, Ann. ICRP 15(4)(1985).
11) International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3)(1991).
12) International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4)(2007).
13) National Council on Radiation Protection and Measurements, Limitation of exposure to ionizing radiation, NCRP Report No. 116, Bethesda, USA(1993).
14) 参議院議員近藤正道君提出放射性廃棄物のクリアランス制度に関する質問に対する答弁書，内閣参質一六三第七号，平成17年10月11日(2005).
15) 放射線審議会基本部会，放射性固体廃棄物埋設処分およびクリアランスに係る放射線防護に関する基本的考え方について，平成22年1月(2010).
16) 放射線審議会基本部会，放射性固体廃棄物の浅地中処分における規制除外線量について，昭和62年12月(1987).
17) International Commission on Radiological Protection, Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 122, Ann. ICRP 42(3)(2013).
18) 荻野晴之，国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告～科学秘書官補佐の経験から学んだこと～，日本原子力学会誌，談話室，2018年11月号(2018).
19) R. Coates, Prudence and Conservatism in Radiation Protection, IAEA RASSC 42, June 2017(2017).

著者紹介

荻野晴之（おぎの・はるゆき）
電力中央研究所
(専門分野/関心分野)放射線防護

特集　クリアランスの現状と課題 2

わが国におけるクリアランスの現状

電気事業連合会　石井 公也

わが国では，2005 年にクリアランス制度を導入し，これまでに測定・評価方法は 6 件認可され，現在 2 件が審査中である。これまでに約 5,000 トンのクリアランス物が測定結果の確認を終えており，その一部についてテーブル，ベンチ，ブロック等への再利用を行い，事業者内での再利用実績を蓄積している。さらに，低レベル放射性廃棄物収納容器の内容器への適用に向けて，2015～2017 年度経済産業省の「管理型処分技術調査等事業」として試験研究が行われ，将来の再利用範囲拡大に向けた実績が蓄積された。

一方，廃止措置実施中および準備中の実用発電用原子炉施設は 13 基となり，今後，それらの廃止措置作業が本格化していくため，クリアランス物が多量に発生してする。その中でクリアランス物の搬出先が確保されない場合には，発電所敷地内に蓄積されることになり，そういった状況は，廃止措置を円滑に進める上で支障をきたしかねない。クリアランス物の利用先拡大に当たっては，それぞれの段階でのクリアランス物の利用拡大が喫緊の課題となっている。

KEYWORDS: Clearance, Low Level Radioactive Waste, Decommissioning

Ⅰ．クリアランス制度の法制化について

クリアランス規準および内容については，前稿「クリアランスにおける線量規準の考え方」のとおりであり，ここでは，まず，クリアランス制度の法制化までの概要について記載する。

1999 年 3 月，原子力安全委員会は「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」をとりまとめ，主な原子炉施設（軽水炉およびガス炉）における固体状物質（コンクリートおよび金属）を対象に，我が国におけるクリアランスレベルの基準値を導出した。また，2001 年 7 月，同委員会は「原子炉施設におけるクリアランスレベル検認のあり方について」をとりまとめ，クリアランスレベル検認に当たっての基本的考え方を示した。

一方，1998 年 3 月には日本原子力発電㈱東海発電所が運転を停止し，2001 年 12 月から廃止措置に着手した。

こうした状況を背景に，クリアランス制度の法制化に向けて総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会おいて，クリアランスレベル検認に当たって必要な技術要件に関する基本的事項について検討され，2004 年 9 月に「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について」としてまとめられた[1)]。その中で，クリアランスレベル検認制度の運用に当たって留意すべき事項として，以下の内容が附言されている。

> また万が一，不測の事態により，放射性廃棄物として扱うべき物がクリアランスされた物に混入し，事業所外に搬出，廃棄されるような事態が生じたとしても，クリアランスレベルそのものが十分安全側に設定されていること，さらに，検認の対象物は事前の評価に基づき，十分クリアランスレベル以下であることが見込まれる物を選定していることから，直ちに健康への影響が懸念されるような事態には至らないものと考えられる。
>
> しかしながら，仮にそのような事態において，調査の結果，問題となるような状況が認められれば，国は必要に応じ事業者に対して放射性廃棄物の回収を含む適切な措置を講ずることも必要である。また，違法行為が認められれば，厳罰を適用することも必要と考えられる。さらに，上述の対応を容易にし，また国民の検認制度への信頼感を高めるためには，原子力事業者においてはクリアランス制度が社会に定着するまでの間，処分，再生利用の際の最初の搬出先が把握できるよう，例えば，埋設処分であれば処分場を，有価物として再生利用する場合には中間処理を行う会社等について，把握・記録するような枠組みを構築することが必要と考えられる。

このような検討を踏まえ，2005 年に「核原料物質，核

Current status of the implementation of clearance in Japan：Kimiya Ishii.
（2018 年 10 月 31 日 受理）

燃料物質および原子炉の規制に関する法律」が改正され，クリアランス制度が法制化された。その際の国会質問および答弁では「制度定着するまでの間，事業者が自主的に搬出ルートを確認し，業界内で再利用」との政府説明に対して，制度定着は「いつ，だれが判断するのか」との質問に，「国が適切な時期に広く意見伺いつつ判断」すると答弁されているが，現時点では制度定着の判断に至っていない。

Ⅱ．クリアランス確認実績

2018 年 8 月末時点のクリアランスの確認実績は表 1[2~4]のとおり。

制度ができた翌年，東海発電所がクリアランス申請をし，3ヵ月後に認可を得て，その後，398t の金属について国の検認を得ている。

2013 年 5 月には，浜岡 5 号のタービンについてクリアランス申請をし，1 年後に認可を得て，その後 524t の金属について国の検認を得て，終了している。

Ⅲ．クリアランス再利用実績

2018 年 8 月現在の東海発電所のクリアランス検認された金属（以下「クリアランス金属」という。）の再利用実績の例を図 1 に示す[5]。

東海発電所から出たクリアランス金属は，地元の金属製造メーカ（鉄工所）に搬入され，溶融し，鋳造されて，製品が製造されている。

さらに，放射性廃棄物処分容器（L1 容器）の内容器としての再利用を目的として 2015 年度～2017 年度に経済産業省委託として技術開発が行われた。こちらは，日本製鋼所と神戸製鋼所で受託され，室蘭市の日本製鋼所で試作され，内容器製造に係る必要な情報が得られるとともに，製造プロセスにおいても，線量等問題ないことが確認されている。そして，委託終了後，試作品は，鋳造し直し，低レベル放射性廃棄物輸送船のカウンターウェイト（荷役の船のバランスをとるための重り）として再利用するために，現在，建造中の船に搭載されている（図 2 参照）。

クリアランス金属を再利用するに当たっては，金属加工メーカをはじめ，金属加工メーカの立地している自治体および地域住民に対して，説明会を開催し，関係者および地域住民に情報発信しながら進めた。原子力発電所が立地する地域以外である室蘭市の日本製鋼所でクリアランス金属を加工できたことは，今後の再利用拡大に向けた大きな前進であると考える。

表 1　クリアランスの確認実績

申請者	対象物	申請日	認可日	確認日（最新）	重量
原電（東海）	**金属**	**2006.6.2**	**2006.9.8**	**2008.5.27（第2回）**	**398 t**
JAEA（JRR-3）	コンクリートがら	2007.11.8	2008.7.25 2010.8.3	2010.5.14（第1回） 2015.2.6（第10回）	3,866 t
JAEA（人形峠）	金属	2011.12.12	2012.8.31	2017.6.30（第4回）	43t
中部（浜岡5号）	**金属**	**2013.5.31**	**2014.5.1**	**2017.11.27（第6回）**	**524 t**
JAEA（ふげん）	金属	2015.2.13	2018.8.31	―	―
原電（敦賀1号）	金属	2016.9.13	―	―	―
中部（浜岡1,2号）	金属	2017.10.17	―	―	―

(a) 遮へい体
約 700kg/体，計 79 体，
J-PARK 向け

(b) ベンチ
計 87 脚，電気事業者（北海道電力～九州電力），電事連，JAEA，関係省庁等各所に配置

図 1　クリアランス金属の再利用実績の例

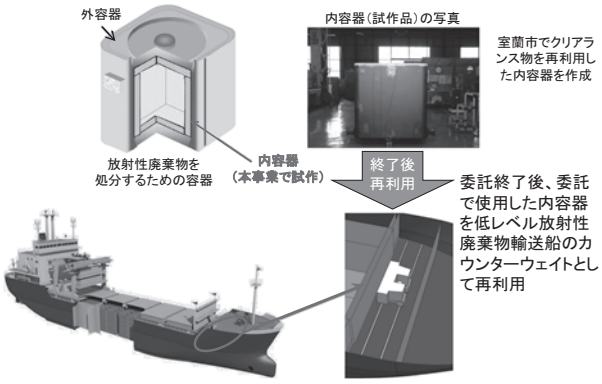


図 2　経済産業省委託「原子力発電所等金属廃棄物利用技術開発（2015 年度～2017 年度）」終了後の再利用

Ⅳ．廃炉に伴う廃棄物の発生量

2018 年 8 月末現在，運転停止した商業用原子力発電所は 12 基（福島第一原子力発電所を除く。）になり，今後もその数は増加が見込まれる。

浜岡原子力発電所 1，2 号機を解体した場合の廃棄物の発生量を図 3 に示す。1，2 号機の廃棄物のうち，約 78%が非放射性廃棄物（NR），約 18%がクリアランス物，約 4%が低レベル放射性廃棄物になる。

浜岡 1，2 号機と同様に，多量の廃棄物が，今後同じよ

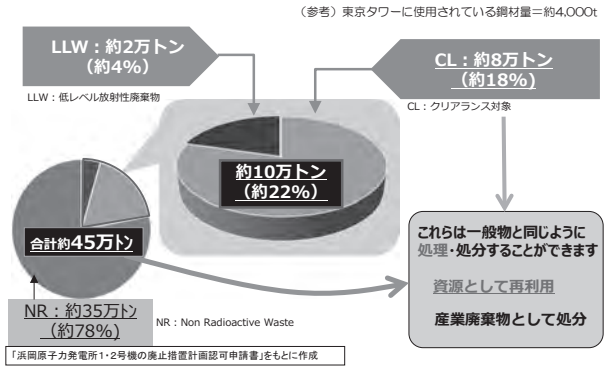


図 3　浜岡 1，2 号機を解体した場合の廃棄物の発生量

うな期間に発生してくることが考えられる。

Ⅴ．各原子力発電所におけるクリアランス物の現状

東海発電所のクリアランス検認された物（以下「クリアランス物」という。）の現状ではあるが，先述のベンチやテーブル，カウンターウェイトとして 400t 程度再利用されている。また，廃止措置終了までのクリアランス物量は約 41,100 トンを見込んでいる。東海発電所は，ガス炉のため，放射性廃棄物およびクリアランス物量が軽水炉よりもかなり多くなる。

浜岡 1，2 号機は廃止措置の第二段階（原子炉設備周辺領域（：排気筒，タービン本体，主復水器等）の解体等）期間中に約 18,000 トンのクリアランス物が発生する見込みである。

敦賀 1 号機は廃止措置終了までに約 7,800 トンのクリアランス物が発生する見込みである。

発生するクリアランス物に見合う需要がない場合，クリアランス物は搬出されずに発電所敷地内に蓄積されることになる。

Ⅵ．廃止措置に係るクリアランス物の課題

廃止措置によって生じたクリアランス物の搬出先が確保できず，発電所敷地内に蓄積されるような状況で廃止措置作業が行われると，作業の安全かつ円滑な遂行に支障をきたしかねないと考えらる。

よって，クリアランス物搬出先の確保（再利用先の拡大）は，喫緊の課題となっている。

クリアランス制度が 2005 年度に法制化されて以降，当面の再利用方針として，原子力施設由来の物であることをご理解いただいた業者や施設等で再利用することとしている。そのため，事業者内での再利用に努めるとともに積極的な広報活動により，制度定着に努力している。

また，クリアランス制度法制化以降，認可実績およびクリアランス物量も増えてきたことを踏まえ，制度（手続き）の全体的なレビューについて，検査制度の見直しにおける意味合いも考慮しつつ，効率化に向けた検討をしていく時期と考える。

Ⅶ．クリアランス物についての理解促進活動[1)]

電気事業者および電気事業連合会は，表 2 のとおり，2010 年度以降，大学生，報道関係者等の一般市民を対象にクリアランス制度についての説明会を行ってきており，今後も制度定着，再利用先の拡大に向けて活動を行っていくこととしている。

表 2　クリアランス理解活動実績

実施年月日	説明者	説明先
2010 年 8 月 19 日	日本原子力発電	一般市民
2010 年 10 月 26 日	日本原子力発電	一般市民
2015 年 11 月 27，28 日	日本製鋼所 神戸製鋼所 電気事業連合会	一般市民
2016 年 5 月 21 日	電気事業連合会	ＮＰＯ あすかエネルギーフォーラム
2016 年 6 月 28 日	日本製鋼所 神戸製鋼所 電気事業連合会	一般市民
2017 年 1 月 10 日	電気事業連合会	十文字学園女子大学
2017 年 4 月 23 日	電気事業連合会	一般市民
2017 年 5 月 29 日	電気事業連合会	報道関係者
2017 年 6 月 17 日	電気事業連合会	一般市民
2017 年 6 月 28 日	日本製鋼所 神戸製鋼所 電気事業連合会	一般市民
2018 年 1 月 9 日	電気事業連合会	十文字学園女子大学
2018 年 3 月 22 日	日本製鋼所 神戸製鋼所 電気事業連合会	一般市民
2018 年 7 月 24 日	電気事業連合会	十文字学園女子大学

－ 参 考 文 献 －

1) 電気事業連合会　HP より
http://www.fepc.or.jp/nuclear/haishisochi/clearance/index.html
2) 原子力規制庁　HP より
http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/nuclearfuel/haiki4_jisseki.html
3) 文部科学省　HP より
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/003/shiryo/__icsFiles/afieldfile/2010/12/15/1299828_03.pdf
4) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　HP より
https://www.jaea.go.jp/04/zningyo/2-43.html
https://www.jaea.go.jp/04/fugen/haishi/clearancl/junbi/
5) 日本原子力発電株式会社　HP より
http://www.japc.co.jp/haishi/clearance_results2.html

著 者 紹 介

石井公也（いしい・きみや）
電気事業連合会 原子力部兼福島支援本部
（専門分野/関心分野）
廃止措置，廃棄物処理・処分，クリアランス

特集　クリアランスの現状と課題 3

物品搬出ガイドラインとクリアランス

日本原子力研究開発機構　橋本　周

管理区域で使用した物品について，法令に基づく管理基準への適合を確認する表面汚染測定の後に一般区域へ搬出することができる。この管理基準は 1960 年代から事実上同じ数値が使われている。この手順は，規制対象について一定の条件を満足することを確認したうえで管理対象から外す手法として運用されており，クリアランスの考え方にきわめて近いと考えられる。

(一社)日本保健物理学会放射線防護標準化委員会では，「計画被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン」を 2016 年に制定し，管理区域からの物の搬出に関する放射線防護上の考え方を整理した。そこでは，現行の物品搬出管理基準については，クリアランス規準の考え方と比較しても，見劣りのしない放射線防護レベルの管理基準であることが示された。

KEYWORDS: Surface Contamination Limit, Clearance, Planned Exposure Situation, Guideline, Exemption

Ⅰ．はじめに

(一社)日本保健物理学会放射線防護標準化委員会では，放射性物質による表面汚染を伴う物の管理区域等からの搬出に関するガイドラインを 2016 年に制定した。このガイドラインでは，汚染した物の搬出の可否の判断に係る線量規準を示し，その線量規準に相当する表面汚染レベルの評価を行った。計画被ばく状況における，管理区域からの汚染した物の搬出のためのガイドラインでは，物品搬出とクリアランスの関係について検討している。本稿では，その検討結果について，ガイドラインの概要とともに紹介する。

Ⅱ．「計画被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン」について

(一社)日本保健物理学会放射線防護標準化委員会(委員長：床次眞司(弘前大)，副委員長：柚木彰(AIST)，橋本周(JAEA))では，数々の放射線防護に係る標準やガイドラインを制定してきた。「計画被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン」[1]（以下，計画搬出ガイドラインという。)もその一つで，「緊急時被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン」[2]，「現存被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン」[3]とともに，2016 年に公衆審議を経て制定した。緊急時被ばく状況および現存被ばく状況に適用するガイドラインは，それぞれ福島第一原発事故後の対応も踏まえて，原子力・放射線事故時および事故後の汚染物への対応を想定したガイドラインであるのに対し，計画搬出ガイドライン[1]は，管理下にある放射線・放射性物質の取扱いに伴う，管理区域からの汚染した物の搬出のための指針である。

放射線防護標準化委員会のガイドラインは「本文」，「解説」，「例題」で構成している。計画搬出ガイドラインの本文を引用する。

> [適用の範囲]このガイドラインは，計画被ばく状況において，汚染した物の搬出の可否の判断に適用する。
> [判断規準]汚染した物から受ける被ばく線量が以下の線量規準を満足する場合，当該物を搬出することができる。
> 「年実効線量およそ 0.01mSv オーダーまたはそれ以下」
> なお，この線量規準は，免除やクリアランスを判断する際の現実的な被ばくシナリオに対する国際的に認知された線量規準である 0.01mSv オーダーと同義であり，厳密に年実効線量が 0.01mSv 以下であることを求めるものではない。

計画搬出ガイドラインの「解説」では，ガイドラインの背景，参考となる考え方，ガイドラインの根拠，適用に当たっての課題の検討が示されている。また，「例題」では，計画搬出ガイドラインの適用のポイントとなる点を

Guideline for Taking Out Something Contaminated with Radioactive Materials and Concept of Clearance：Makoto Hashimoto.

(2018 年 10 月 31 日 受理)

いくつか，Q&A の形で示している。

Ⅲ．計画搬出ガイドラインの考え方

1．物品搬出基準

計画搬出ガイドラインの考え方は「解説」で述べられている。最初に，物品搬出をとりまく状況について整理した。

計画被ばく状況とは，放射線源が意図的に導入され運用されている状況であり，国内では「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」等による管理が行われている。線源の管理のために，管理区域の設置が義務付けられており，線源に対する作業員と公衆の安全が確保されている。管理の対象には，放射線源による表面汚染が含まれており，管理区域内における表面汚染限度（α 線放出核種について 4Bq/cm^2，α 線を放出しない核種について 40Bq/cm^2）が定められており，また，管理区域からこれらを搬出しようとする際には，表面汚染密度限度の 1/10 を超えるものはみだりに持ち出してはならないとされている。この基準が物品搬出基準とよばれる。

物品搬出基準の設定根拠については，Dunster 等の論文[4]が示されている。管理区域内の表面汚染限度については，国際放射線防護委員会（ICRP）の Publ.2[5]で示された空気中最大許容濃度（^{239}Pu：2×10^{-12}μCi/cm^{3}等）を保守的な再浮遊係数（2×10^{-8}cm^{-1}）で除することにより，α 線放出核種：1×10^{-4}μCi/cm^2，α 線を放出しない核種：1×10^{-3}μCi/cm^{2}が導出された。物品搬出基準については，当時の作業者と公衆の最大許容線量の比が 10 であったことから，管理区域の表面密度限度の 1/10 に設定された。これらの値が，Bq 値に換算され，現在でも使われている。

現在では放射線防護の考え方も変わっているが，表面汚染限度と物品搬出基準については，主に実用的な理由により維持されてきた。この状況は我が国でも同様であった。この点について，我が国の放射線審議会は，2011 年までにまとめた ICRP Publ.103（2007 年勧告）[6]の国内法令取入れに関する検討の中間報告[7, 8]において，「管理区域から持ち出す物の基準」についても検討しており，「管理区域から持ち出す物の基準については，クリアランスとの関係も含めて整理が必要」と述べている。

2．参考となる考え方

以上のような状況を踏まえて，計画搬出ガイドラインでは，物品搬出基準との関係性を念頭において，クリアランスの考え方について整理した。

クリアランスの概念には，前提として「免除」の考え方がある。ICRP は Publ.103[6]において，「制御のための努力が関連するリスクに比べて大きすぎる（規制の必要がない）と判断されるという根拠で，そのような管理が是認されないとみなされるような状況に対する，一部又は全ての放射線防護の規制要件からの“免除”」（パラグラフ 52）として「免除」の概念を示し，「法体系は，規制対策が不当であるという理由で，一部又は全ての規制要件から免除すべきものを定めるべきである」（パラグラフ 52）とした。さらに，Publ.104「放射線防護の管理方策の適用範囲」[9]では，免除の根拠として「1 つは，その線源が小さな個人線量と小さな集団線量しかもたらさないことである。もう 1 つは，どのような合理的な管理手段も，個人線量および集団線量の有意な低減を達成することができないことである。」（パラグラフ 59）とし，小さな個人線量の例としては，自然バックグラウンド被ばくおよび個人に何ら懸念を生じさせないと考えられる年死亡リスクレベルを参照し，「年に数 10μSv」（パラグラフ 66）という値を示している。また，免除が規制適用の事前判断に用いられるのに対して，「すでに規制要件の対象になっているが，規制の継続が是認されないような状況についても免除が検討できる可能性がある。」（パラグラフ 88）として，このような状況が「クリアランス」とよばれている事を指摘した。

IAEA は，これらの ICRP の考え方も踏まえて，GSR Part3「放射線防護と放射線源の安全」[10]において，「要件 8：免除とクリアランス　政府あるいは規制当局は，どの行為あるいは行為の中の線源がこれらの基準の一部あるいは全ての要件から免除されるか決めなければならない。規制当局は，届出のあった行為あるいは許可された行為の中のどの線源（物質や物体を含めて）が規制管理から解放されてもよいか認可しなければならない」とした。引用文中，前半が免除要件を示しており，後半がクリアランスの要件である。さらにクリアランスの一般的規準として「a. クリアランスされた物質から生じる放射線リスクが規制管理を是認しないほど低いこと。そして，クリアランスのための一般的な規準を満たすことの失敗につながりうる状況が発生しそうもないこと。 b. 物質の継続した規制管理が正味の便益をもたらさず，規制管理のためのいかなる合理的な手段も個人線量あるいは健康リスクの低減の観点から価値のある収益を達成しそうもないこと。」（パラグラフ I.10）とした上で，「クリアランスレベルは，単位重量あたりの放射能濃度あるいは単位面積あたりの放射能濃度によって定められるかもしれない。」（パラグラフ I.13）と示している。これらを，物品搬出基準とクリアランスの関係について検討するにあたっての拠り所とした。

3．ガイドラインの根拠となる考え方

物品搬出基準とクリアランスの関係の検討に先立ち，我が国における物品搬出の現状について確認した。原子力発電所と研究開発機関に対する調査結果から得られた，国内の物品搬出の特徴は以下のとおりであった。

搬出される物品の数は多いものの，大きさの小さいものが圧倒的に多く，搬出先となる一般区域における再使

表１　搬出物品の表面汚染による線量評価結果

評価対象核種	表面汚染線量評価モデル	クリアランス線量規準相当の表面汚染密度(Bq/cm^2)			評価対象物
		外部被ばく	吸入摂取	経口摂取	
^{60}Co	Munakata[13]	3.1	12,000	33	小型輸送物
	Ogino and Hattori[14]	4.0	2,100	33	手で扱う物，近傍で扱う物
^{137}Cs	Munakata[13]	11	1,800	8.5	小型輸送物
	Ogino and Hattori[14]	15	2,100	65	手で扱う物，近傍で扱う物

用状況は管理されていないのが一般的であることが分かった。一方，車両のような大型の搬出物については数が少なく，汚染管理の徹底した作業環境からの搬出であることを考慮すれば，小型の物品と同様に，全面汚染の可能性は限りなく低いと考えられた。この結果から，大型搬出物が全面的に汚染している状況は想定する必要がなく，小型の搬出物に対象を絞って検討を行うことが妥当と考えられた。

そこで，小型物品の搬出について，クリアランスの概念の適用性の検討を行った。具体的には，IAEA の示したクリアランスに関する２つの規準に，物品搬出が整合するかという観点で検討した。

(1) クリアランス規準との線量的比較

クリアランスに関する規準の一つ目は，クリアランスによって生じる放射線リスクが規制管理を是認しないほど低く，さらにその規準を満たせない状況が発生しそうもないかということである。この規準は，放射線リスクの程度に置き換えると，合理的に予測される被ばく線量が年間 10μSv オーダーかそれ以下とされている。一方，現行の搬出基準は 1. で述べたように，管理区域内での職業被ばくを対象とした表面密度限度を単純に十分の一倍したものであり，搬出された後の物品の取扱いによって生じる公衆被ばくとクリアランス線量規準との関係を考慮して設定されたものではない。そこで，汚染した物の搬出がもたらす実効線量を評価し，クリアランス規準との比較を行った。

表面汚染による線量の評価にあたって，以下の３つのモデルを選定した。

・原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会が報告書「主な原子炉施設におけるクリアランスレベル」[11]の付属資料４で示したモデル〔搬出物：表面が均一に汚染した円柱状金属(R 1.27m，L 2.5m)，作業形態：運搬等，核種数：20 核種〕

・IAEA TECDOC-1449[12]で示されたモデルを参考にした Munakata[13]の評価〔搬出物：使用済み燃料キャスク(R 2.3m，L 5.9m 円筒)および小型輸送物(S 0.3m 立方体)，作業形態：輸送，核種数：356 種類)〕

・Ogino and Hattori[14]が示したモデル〔搬出物：一般化した形状(手で扱う物〔表面積 0.1m^2〕，近傍で扱う物〔表面積 1m^2〕，遠隔で扱う物〔表面積 10m^2〕)，作業形態：公衆(成人，子ども)，核種数：20 核種〕

これらのモデルのうち，国内の搬出物品の状況を踏まえて，Munakata モデル[13]の「小型輸送物」，Ogino and Hattori モデル[14]の「手で扱う物」「近傍で扱う物」の３ケースに絞り，それらについてクリアランス線量規準相当の年間 10μSv の被ばくを与える表面汚染密度について検討した。評価結果を表１に示す。

^{60}Co のクリアランス線量規準相当の表面汚染密度の最小値は，いずれのモデルも外部被ばくが決定経路となり，それぞれ 3.1Bq/cm^2，4.0Bq/cm^2 で，対数丸めを行いいずれも 10Bq/cm^2 と評価された。また，^{137}Cs の場合には，Munakata モデル[13]では経口摂取が決定経路で 8.5Bq/cm^2，Ogino and Hattori モデル[14]では外部被ばくが決定経路で 15Bq/cm^{2}で，対数丸めを行い 10Bq/cm^2 と評価された。

この結果は，現行の物品持出基準(α 線を放出しない核種について 4Bq/cm^2)に相当する値である。このことから，現行の物品搬出については，クリアランス規準値と比較しても，その取扱いに矛盾するものではないとしている。

(2) クリアランス規準に基づく正当性の検討

クリアランス規準には，線量的な規準の他に，規制管理による正味の便益が期待できる観点でも設定されている。

現行の物品搬出において規制管理を維持するとするならば，例えば全ての搬出物品について再使用状況の管理を行うことが考えられる。しかしながら，国内の搬出物品の状況を調べた結果からは，搬出物品は，ほとんどが管理区域であっても汚染管理の徹底した作業環境からの搬出であると言える。また，日常的に非常に多くの量の物品が搬出されている。これらのことから，搬出物品のすべてを搬出後も継続的に規制管理を行うことが，正味の便益をもたらすとは考えられない。現行の物品搬出の法令においても搬出後の物品の取扱いについての規制はなく，それは搬出後の規制が正当化されないと判断されたためと解釈できる。

以上の考え方に基づいて，２項に示したように計画搬出ガイドラインが制定された。なお，検討に当たって特に重要なポイントについては，例題とその回答という形でガイドラインに付属して示されている。

本項に示したクリアランス規準の物品搬出との考え方の比較は，クリアランスの適用に関する議論において，参

考にしていただけるのではないかと考えている。

付記

本ガイドラインは，放射線防護標準化委員会内に設置された管理システム作業会（山本英明（JAEA，主査），服部隆利（電中研），荻野晴之（電中研），薄井利英（JAEA），二ツ川章二（JRIA），宗像雅広（JAEA），所属はいずれも当時）によって策定された。

― 参 考 文 献 ―

1) 計画被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン（2016年6月2日制定），http://www.jhps.or.jp/upimg/files/keikakuhibaku_guideline.pdf
2) 緊急時被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドラインン（2016年6月2日制定），http://www.jhps.or.jp/upimg/files/kinkyujihibaku_guideline.pdf
3) 現存被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン（2016年6月2日制定），http://www.jhps.or.jp/upimg/files/gensonhibaku_guideline.pdf
4) H. J. Dunster, Surface contamination measurements as an index of control of radioactive materials, Health Phys., 8, 353-356 (1962).
5) International Commission on Radiological Protection, Permissible dose for internal radiation, ICRP Publication 2 (1959).
6) International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP, 37 (2-4) (2007).
7) 放射線審議会基本部会，国際放射線防護委員会（ICRP）2007年勧告（Pub. 103）の国内制度等への取入れに係る審議状況について－中間報告－，平成22年1月 http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/mext/b_menu/shingi/housha/sonota/__icsFiles/afieldfile/2010/02/16/1290219_001.pdf
8) 放射線審議会基本部会，国際放射線防護委員会（ICRP）2007年勧告（Pub. 103）の国内制度等への取入れについて－第二次中間報告－，平成23年1月 http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/mext/b_menu/shingi/housha/toushin/__icsFiles/afieldfile/2011/03/07/1302851_1.pdf
9) International Commission on Radiological Protection, Scope of radiological protection control measures, ICRP Publication 104, Annals of the ICRP, 37 (5) (2007).
10) International Atomic Energy Agency, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3, Jointly sponsored by EC, FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO (2014).
11) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会，主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて，平成11年3月17日.
12) International Atomic Energy Agency, Radiological aspects of non-fixed contamination of packages and conveyances, Final report of a coordinated research project 2001-2002, IAEA-TECDOC-1449 (2005).
13) M. Munakata, Applicable limits on non-fixed surface contamination for safe transport of radioactive materials, Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 24, 191-206 (2013).
14) H. Ogino and T. Hattori, Calculation of isotope-specific exemption levels for surface contamination, Appl. Radiat. Isot., 67, 1282-1285 (2009).

著 者 紹 介

橋本　周（はしもと・まこと）
日本原子力研究開発機構

特集　クリアランスの現状と課題 4

IAEA 安全指針 RS-G-1.7 改訂の動向と主な論点

電力中央研究所　服部 隆利

IAEA（国際原子力機関）は，IAEA GSR Part3（BSS:国際基本安全基準）に新しい概念として取込まれた「緊急時，現存および計画の 3 つの被ばく状況別の放射線防護」に対応して，日本のクリアランスレベルの引用元である安全指針 RS-G-1.7「除外，規制免除およびクリアランスの概念の適用」の改訂を計画し，規制免除については DS499，クリアランスについては DS500 として，それぞれ IAEA の RASSC（放射線安全基準委員会）および WASSC（廃棄物安全基準委員会）の主管の下でドラフト作成作業を開始した。本稿では，RS-G-1.7 のポイントと 2018 年 2 月中旬および 6 月初旬の 2 回にわたって開催された DS500 の作成のための専門家会合において議論となった論点について紹介する。

KEYWORDS: Clearance, Exemption, Conditional Clearance, Surface Contamination

Ⅰ．はじめに

IAEA（国際原子力機関）の CSS（安全基準委員会）は，2017 年 11 月，日本のクリアランスレベルの引用元である安全指針 RS-G-1.7「除外，規制免除およびクリアランスの概念の適用」[1)] の改訂を開始するための 2 つの DPP（文書準備計画書）を承認した。これらの DPP では，IAEA GSR Part3（BSS:国際基本安全基準，2014）[2)] に新しい概念として取込まれた「緊急時，現存および計画の 3 つの被ばく状況別の放射線防護」に対応して RS-G-1.7 を改訂することが計画され，規制免除については DS499，クリアランスについては DS500 として，それぞれ IAEA の RASSC（放射線安全基準委員会）および WASSC（廃棄物安全基準委員会）の主管の下で，検討を進めることが規定された。また，DS500 については，従来の放射能濃度（Bq/g）の値に変更を加えず，新たに表面汚染（Bq/cm^2）の値を与えること，既存の無条件クリアランスレベル（再利用の方法，範囲等に制限を設けないクリアランスレベル）に加え，条件付クリアランスレベル（クリアランス後の再利用等に一定の制限条件を課したクリアランスレベル）を与えること，ならびに気体や液体のクリアランスを扱うこと，が定められた。

このような背景のもと，IAEA は，DS500 については，2018 年 2 月中旬および 6 月初旬の 2 回にわたって改訂ドラフト作成のための専門家会合を開催し，そのドラフトの準備を開始した。本稿では，RS-G-1.7 のポイントと専門家会合で議論となった論点について紹介する。

Current status of revision of IAEA safety guide RS-G-1.7 and its main points in discussion：Takatoshi Hattori.
（2018 年 9 月 12 日 受理）

Ⅱ．安全指針 RS-G-1.7 のポイント

RS-G-1.7 は，天然起源および人工起源の放射性核種の両方に対して，大量の物質を規制除外，規制免除またはクリアランスする際の「放射能濃度値（Bq/g）」を示すことを目的に 2004 年に策定され，2014 年に出版された IAEA GSR Part3（BSS: 国際基本安全基準）にも取り入れられた。それらの放射能濃度値は，人工起源の放射性核種の場合，全ての固体状物質を対象に，外部被ばく，ダスト吸入および経口摂取（直接および間接）を包含するように選定された典型的な被ばくシナリオの線量評価に基づき算出された。なお，基準線量が 10μSv/y の場合は現実的なパラメータ値が，基準線量が 1mSv/y の場合は低確率なパラメータ値がその算出に用いられた。また，皮膚被ばくの等価線量に対する基準線量については 50mSv/y が用いられた。

人工起源の放射性核種に対して算出された放射能濃度値については，クリアランスレベルに適用可能とされ，2005 年，我が国はクリアランスレベルとしてこの値を引用してクリアランスを制度化するに至っている。なお，RS-G-1.7 では，段階的なアプローチを採用し，その放射能濃度値を数倍（例えば 10 倍まで）超える場合であっても，IAEA 加盟国の国内の規制の枠組みによっては，規制機関は規制要件を適用しないことを決定できるとしている。

Ⅲ．改訂のための主な論点

DS500 のドラフト作成のための専門家会合は，IAEA 本部において，2018 年 2 月 19～23 日と 6 月 4～8 日に開催された。改訂にあたっての主な論点は下記のとおりで

ある。

・現存被ばく状況下でクリアランスをどのように位置づけるか？
計画被ばく状況におけるクリアランスの線量基準：10μSv/y（現実的な被ばくシナリオの時）
現存被ばく状況における参考レベル（1～20mSv/yの下方から選定）

・表面汚染に対する新しいクリアランスレベル（Bq/cm^2）はどのように規定するか？
クリアランスレベル（無条件）のように統一した値を提示するのか？
表面とは？（土壌やコンクリートがら等の扱い）
重量濃度と表面密度の２つの基準の適用方法は？
物品持ち出し基準との関係は？

・新しい条件付クリアランスレベル（Bq/g）はどのように規定するか？
クリアランスレベル（無条件）のように統一した値を提示するのか？

・どのように過剰に保守的な評価を避けるか？
TECDOC 1000[3]における平均化の10倍ルール
平均してクリアランスレベルを満足していれば，部分的に平均値より10倍高くても許容できる
クリアランス判断における測定と核種組成比の不確実性の取扱い
日本原子力学会標準「クリアランスの判断方法：2005」の考え方
IAEA Safety Report No. 67，ICRP Pub.104の考え方

Ⅳ．おわりに

次回のDS500ドラフト作成に係る専門家会合は，2019年１月末，DS499に係る専門家会合と同時に開催する方向で調整されており，その後，専門家会合のほかIAEA技術会合やWASSC会合等での審議を経て，2022年８月の発行を目指して作業が進められる見込みである。

本原稿は，ドラフトが完成する前段階で執筆している。論点に対する詳細な内容を記すのを控えた点についてはご容赦願いたい。

― 参考文献 ―

1) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series, No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).
2) EUROPEAN COMMISSION, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014).
3) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance of Materials Resulting from the Use of Radionuclides in Medicine, Industry and Research, IAEA-TECDOC-1000, IAEA, Vienna (1998).

著者紹介

服部隆利（はっとり・たかとし）
電力中央研究所
（専門分野/関心分野）放射線防護，クリアランス，廃止措置時線量評価

特集　クリアランスの現状と課題 5

福島第一原子力発電所における低線量がれきの限定的な再利用の考え方

日本原子力研究開発機構　島田 太郎，三輪 一爾，武田 聖司

福島第一原子力発電所（以下，1F という）敷地内に保管されている表面線量率 5μSv/h 未満の汚染がれき類を資源化して敷地内に限定して再利用することが検討されている。1F 敷地内のように放射線管理が実施されている現存被ばく状況において，汚染した資機材等の限定的な再利用の考え方などが示された例はない。そこで，適切な安全規制のために，1F 敷地内での線量管理下の現存被ばく状況における再利用評価の考え方，1F 敷地内での運用されている作業者および周辺公衆の安全確保策に応じためやす濃度算出の方法論を構築するとともに，1F 敷地内での道路材およびコンクリート構造材に関して用途別の資源化物のめやす濃度を試算して，とりまとめた。本報ではこの評価の方法について解説するとともに，1F 敷地内の限定的な再利用の評価の一例について紹介する。

KEYWORDS: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Restricted reuse, contaminated rubbles, Existing exposure situation

Ⅰ．はじめに

福島第一原子力発電所（以下，1F という）敷地内には，事故時，あるいは，事故後の廃炉作業において発生した汚染がれきが表面線量率で分類され，容器などに収納して固体廃棄物貯蔵庫，仮設保管設備などで保管されている。今後固体廃棄物貯蔵庫を増設するなどして，覆土式保管（表面線量率：1～30mSv/h），シート養生保管（0.1～1mSv/h）を解消する計画が示されている[1)]。表面線量率 0.1mSv/h 未満の汚染がれきは敷地内の屋外に集積されて保管されており，このうち 5μSv/h 以上のがれきは屋外集積を解消する計画となっている。一方，バックグラウンドに相当する 5μSv/h 未満の汚染がれき（低線量がれき）については，固体廃棄物貯蔵庫などへの収納は想定しておらず，2030 年 3 月時点で 24.6 万 m^3にまで到達する見込みとなっているが，この汚染がれき類は今後素材別に再利用・再使用方策を検討するとされている。適切な再利用が可能となれば，今後 1F 敷地内に持ち込まれる資材量が抑制されて，将来的な放射性廃棄物の物量低減が可能と考えられる。

著者らは，汚染がれき類の限定的な再利用の実施に対する安全規制の整備のために，1F 敷地内での限定再利用の安全性評価に関する研究を進めてきた[2,3)]。この中で限定的な再利用を可能とするめやすの放射能濃度設定と評価された放射性セシウムのめやす濃度の妥当性確認の考え方を提案した。そして 1F 敷地内での道路およびコンクリート構造物基礎への再利用を想定し，再利用可能な資源化物中の放射性セシウム濃度のめやす値を用途別に試算するとともに，そのめやす濃度の妥当性を確認した。本報ではこれらの考え方を解説するとともに，めやす濃度の試算および妥当性確認の一例を紹介する。

Ⅱ．限定再利用の考え方

1．限定再利用可能なめやす濃度評価の考え方

1F は特定原子力施設に指定され，認可された実施計画の下，廃炉作業が進められている。実施計画の中では敷地内は現存被ばく状況として，放射線被ばくを合理的に達成できる限り低減する方針であると述べられている。また，1F 敷地全体が管理対象区域に設定されており，敷地に立ち入る人員はすべて被ばく線量が管理されている。上記のような現存被ばく状況下において，限定的な再利用に対する安全性を評価した例は国際的にもない。そこで，本検討では，現存被ばく状況である 1F 敷地内の現存する放射線源に対して，限定再利用により追加される放射線源を抑制することが必要と考え，現在の敷地内の空間線量率の分布状況に影響を与えないことを必要条件として，めやす濃度を設定することした。そのうえで，設定されるめやす濃度による限定的な再利用を実施することによって廃止措置に向けた作業に影響を与えないこと，および，周辺公衆への影響を抑制すること

Concept of restricted use of contaminated rubbles in the Fukushima Daiichi NPS：Taro Shimada, Kazuji Miwa, Seiji Takeda.

（2018 年 11 月 7 日 受理）

を確認することとした。すなわち 1F の空間線量率の現状，1F 敷地内における安全管理の現状を考慮して，限定的な再利用の安全性を評価するものである。

めやす濃度の設定においては現存被ばく状況である現状の 1F 敷地内の空間線量率分布に着目し，汚染がれきから取り出された放射性物質を含む資源化物を，汚染されていない資材の代わりに使用することによって上昇する空間線量率が，敷地サーベイでの線量率の低いほうとすることを必要条件とした。具体的には平成 30 年 1 月の測定[4]では，1F 敷地内の空間線量率は原子炉建屋周辺を除き多くの測定点で 1μSv/h 程度であることから追加の線量率を 1μSv/h と設定した。

建屋外で採取されたがれきの分析結果では Cs-137, Cs-134, Sr-90, Co-60, H-3, C-14 が検出下限値を超えて検出されているが，Co-60 濃度は Cs-137 に対して 0.01％以下，H-3 濃度はクリアランスレベル 100Bq/g より 2 桁程度低い[5]。したがって，Co-60 および H-3 については評価対象核種から除外した。なお，C-14 はクリアランスレベル 1Bq/g を超えて検出されており，今後検討が必要な核種である。めやす濃度対象核種は，空間線量率上昇への寄与の大きいガンマ線放出核種である放射性セシウム（Cs-134＋Cs-137）とした。

2. 評価されためやす濃度の妥当性の確認

次に，評価されためやす濃度での再利用によって 1F 敷地内で運用されている目標などに影響を与えないことを確認する必要がある。まず，一つ目は作業者の被ばく線量の抑制であり，再利用を行うことによって受ける被ばくによって，本来の廃炉作業に制限をかけてしまうようなことがないようにすべきである。すなわち，5 年間で 100mSv かつ年間 50mSv を超えないという作業者被ばく線量限度に対して，評価されためやす濃度で再利用を行うことで受ける被ばく線量を 20mSv に対して 10％の 2mSv を超えないことを条件とした。なお，このときの対象作業者は再利用されている状況での追加被ばく線量として評価するものであるため，汚染がれきから資源化物を取り出し道路あるいは建屋を建設する作業者については，再利用を行う作業が本来作業であることから，妥当性確認の評価対象者からは除外した。

二つ目は，敷地境界における年間の線量評価値を 1mSv 以下に抑えるよう取り組みがされている。1F 敷地内での行為による線源からの直接線，スカイシャイン線，空気中放射能濃度の評価によって，敷地境界に滞在する公衆が受ける線量として敷地境界上の 100 地点について，評価上年間 1mSv 以下を 2016 年 3 月に達成した[6]。2018 年 3 月時点では最大地点の評価値は合計で 0.90mSv/y となっている[7]。そこで，めやす濃度で再利用した際の敷地境界への直接線およびスカイシャイン線による被ばく線量を加えても年間 1mSv を超えないことを条件とした。

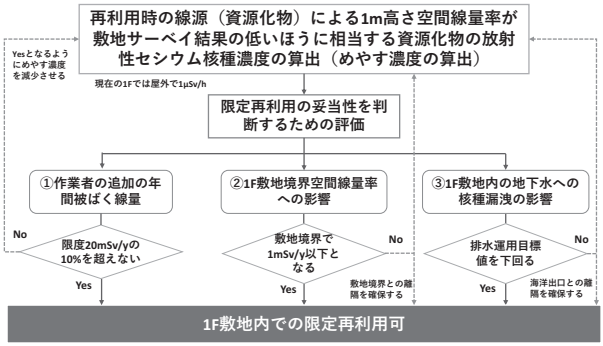


図 1　めやす濃度評価と妥当性確認の評価フロー

そして，三つ目に，また，地下水バイパスによってくみ上げた水を排水する水中放射能濃度についても，核種別などの放射能濃度の運用目標値（Cs-137 および Cs-134 各 1Bq/L，全 β5Bq/L, H-3 1,500Bq/L）を定めて，放射能測定によって目標値以下であることを確認している[8]。そこで，めやす濃度で再利用した際の地下水への核種の流入によっても，運用目標値を超えないことを条件とした。なお，資源化物中の Sr-90 濃度は，試算されためやす濃度中の Cs-137 濃度に対して 1％とした。

以上をまとめると，図 1 に示すように，めやす濃度で各用途へ適用する際に上記 3 つの観点から評価して，条件を満足する適用条件などを把握して，算出されためやす濃度の妥当性を確認することとした。

Ⅲ. 資源化物の放射性セシウムめやす濃度の試算

表面線量率 5μSv/h 未満のがれきを処理して資源化物として利用する際の用途は粗骨材の道路材への適用，金属の遮蔽材への適用などが想定されるが，ここでは汚染コンクリートがれきから取り出した資源化物を，道路およびコンクリート構造物基礎部に適用する場合について放射性セシウム濃度を試算した例を紹介する。

道路の場合，道路幅 9m，長さ 100m を想定し，舗装材あるいは路盤材として利用した場合の道路中央高さ 1m の位置における線量率が 1μSv/h となるように，遮蔽計算コード QAD-CGGP2R を用いて，資源化物中の放射性セシウムのめやす濃度を試算した。舗装厚さおよび路盤厚さなどの評価条件および試算結果を表 1 に示す。コンクリート道路の路盤材として再利用する際の資源化物の

表 1　用途別資源化物の放射性セシウムめやす濃度

再利用先	用途	舗装厚さ	路盤厚さ	めやす濃度（Cs-134+Cs-137）
アスファルト道路	路盤材	5cm	80cm	13,000Bq/kg
	舗装材	20cm	–	7,400 Bq/kg
コンクリート道路	路盤材	15cm	80cm	100,000 Bq/kg
	舗装材	30cm	–	8,100 Bq/kg
コンクリート構造物	基礎部	20cm 床スラブ厚	200cm 基礎部厚	160,000 Bq/kg

めやす濃度は 10 万 Bq/kg，コンクリート構造物基礎部に適用する場合では 16 万 Bq/kg となった。

Ⅳ．試算しためやす濃度の妥当性確認

試算した用途別の放射性セシウム濃度が 1F 敷地内での現状の管理に影響を与えないことを評価する妥当性確認の例を紹介する。図 1 に示した①～③の妥当性確認の各評価方法を以下に示す。

①作業者の追加の年間被ばく線量では，1F 敷地内の廃止措置作業の中で再利用物に最も接近する可能性のある作業者を想定し，道路上作業者および基礎直上に位置する地下 2 階での作業者を評価対象とした。外部被ばく評価では，作業空間における作業者位置における線量率を計算し，1F 敷地内での作業条件（年間作業時間 1,430 時間）を基に被ばく線量を求めた。道路表面の舗装材に再利用した際は，舗装面の摩耗により発生する粉塵の吸入による内部被ばく線量も評価した。

② 1F 敷地境界空間線量率への影響では，1F 敷地内で再利用された資源化物（道路，建造物）からの距離ごとの直接線およびスカイシャイン線による空間線量率を MCNP5 によって計算し，目標値 1mSv/y を満たすために必要な敷地境界からの離隔距離を評価した。このとき，3. で試算した単一の道路に加えて，敷地内のある領域に道路が集中して多く配置されることを想定して，20％の占有率で道路が設置されるケースについても評価した。

③ 1F 敷地内の地下水への核種漏洩の影響では，再利用物に降雨または地下水が浸透することにより核種を含んだ浸透水が帯水層へ流入し，核種が帯水層中を海洋側へ移行することを想定した。海洋出口における地下水中核種濃度が，東京電力が定める排水運用目標値 Cs-134: 1Bq/L，Cs-137: 1Bq/L，Sr-90: 5Bq/L 以下となることが必要となる。評価は 1F 敷地内に設置した再利用物（道路，建造物）からの距離ごとの地下水中核種濃度を評価し，運用目標値を満たすために必要な敷地境界（海洋出口）からの離隔距離を評価した。核種の流出および帯水層中の移行は分配平衡を仮定しており，帯水層中の核種移行は JAEA が開発したクリアランスレベル評価コード PASCLR2 を用いて評価した。

その結果，①では両用途の被ばく線量はともに 1.3 mSv/y となり条件（20mSv/y の 10％以下）を満足した。

②は単一の道路へ再利用した場合は，敷地境界まで 15m 以上の離隔を確保すれば敷地内のどこにでも設置することが可能であり，集中的に道路を設置するような場合でも，図 2 に示すように，敷地境界まで 90m 以上の離隔をとれば評価上最大の敷地境界線量（0.90mSv/y）を考慮しても 1mSv/y 以下を確保できることが確認できた。また，構造物基礎へ再利用した場合では敷地境界まで 1m 確保すれば 1mSv/y であった。なお，設置する場所により敷地境界線量評価値が異なり，今後の線量低減対策によっても評価値が変動することから，再利用先選定の際には，同様の方法で線量評価を見直す必要がある。

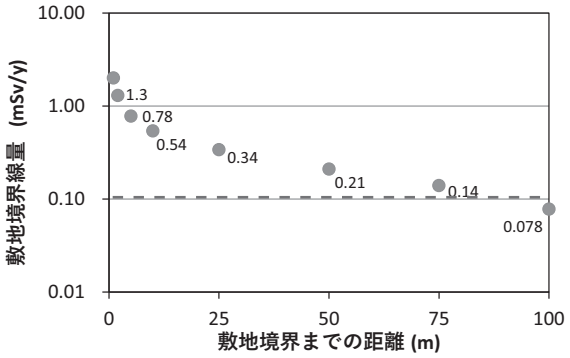


図 2　道路に再利用した際の敷地境界への空間線量率寄与

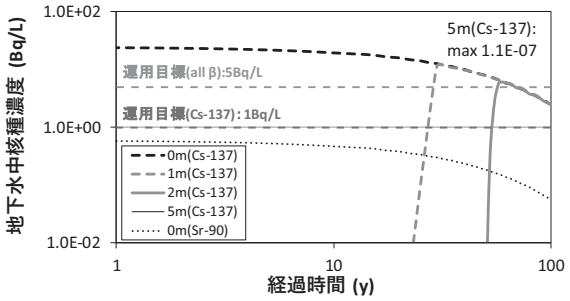


図 3　構造物基礎に再利用した際の構造物端からの距離別の地下水中核種濃度の経時変化

③は道路に使用した場合には，道路端においても地下水中濃核種濃度は運用目標値を下回った。図 3 に構造物基礎に再利用した場合の構造物端からの距離（0, 1, 2, 5m）別における地下水中核種濃度の経時変化を示す。Sr-90 濃度は離隔なしに全 β の運用目標 5Bq/L 以下となった。一方，Cs-137 については道路端から 2m までは運用目標値 1Bq/L を超える時間があるが，5m 以上離隔することにより最大で 1.1×10^{-7}Bq/L となり，運用目標値以下となった。なお，再利用による地下水濃度の上昇は運用目標値すべて許容されるわけではなく，検出下限値までの裕度分として見直される必要がある。

以上のように，①の評価からはめやす濃度を見直す必要はないものの，②および③の妥当性確認のための評価から，試算した用途別のめやす濃度での限定再利用を行うためには上述のような離隔距離の必要性が示唆される。

Ⅴ．おわりに

東京電力福島第一原子力発電所における表面線量率 5μSv/h 未満のがれきの敷地内で用途を限定した再利用を適切な安全規制の下で実施するため，作業者の被ばく線量が管理された現存被ばく状況において構築した限定再利用の考え方について解説するとともに，放射性セシ

ウムめやす濃度の試算とその妥当性確認の一例を紹介した。

本報で紹介した用途で限定的な再利用を行うためには，がれきから資源化物とするための処理施設を 1F 敷地内で建設・運用するとともに，再利用先の技術基準を満たす品質を確保する必要がある。また，資源化物の放射能濃度は，もとの汚染がれきのホットスポットなど濃度のばらつきの影響による不確かさを考慮して，放射能測定・評価し，用途別に設定されためやす濃度以下であることを確認する必要がある。核種組成比についても，今回の検討では建屋外で採取されたがれきの分析結果に基づいたが，再利用の対象となる表面線量率 5μSv/h 未満のがれきについて分析を行い，設定することが必要と考えられる。さらに，濃度確認した資源化物が指定された用途に適切に利用されていることの確認も必要となる。

今後こうした再利用の実現に向けた具体的な検討が行われ，実施計画の変更認可を受けて，がれきの限定再利用が適切に実施されることが期待される。

本検討は原子力規制委員会原子力規制庁「平成 29 年度廃棄物の限定再利用に関する検討」として実施したものである。

― 参 考 文 献 ―

1) 原子力規制委員会第 7 回特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会 資料 1，福島第一原子力発電所固体廃棄物の保管管理計画～2018 年度改訂について～
http://www.nsr.go.jp/data/000178232.pdf
2) Shimada, T. et al., Study on restricted use of contaminated rubble on Fukushima Daiichi NPS site (1) Estimation of reference radiocesium concentration for recycling materials, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 6. pp. 203-207, (2019).
3) Miwa, K. et al., Study on restricted use of contaminated rubble on Fukushima Daiichi NPS site (2) Validation confirming of reference radioactive concentration for recycling materials, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 6. pp. 166-170, (2019).
4) 東京電力ホールディングス，福島第一構内 サーベイマップ（2018 年 1 月 16，17 日測定分），
http:// www. tepco. co. jp/ decommission/ data/ surveymap/ pdf/2018/f1-sv2-20180126-j.pdf
5) 技術研究組合国際廃炉研究開発機構，原子力研究開発機構，福島第一発電所構内で採取した瓦礫，伐採木の放射能分析，
http:// www. meti. go. jp/ earthquake/ nuclear/ pdf/ 140130/ 140130_01tt.pdf
6) 東京電力，敷地境界線量（評価値）の目標達成について，2016 年 3 月 30 日，
http:// www. tepco. co. jp/ nu/ fukushima- np/ roadmap/ images1/images1/l160330_05-j.pdf
7) 東京電力，福島第一原子力発電所構内の線量状況について，2018 年 4 月 26 日，
http:// www.meti.go.jp/ earthquake/ nuclear/ decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/05/3-06-03.pdf
8) http://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watermanagement/groundwater_bypass/index-j.html

著 者 紹 介

島田太郎（しまだ・たろう）
日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門
（専門分野/関心分野）原子力施設の廃止措置，放射性廃棄物処分

三輪一爾（みわ・かずじ）
日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門
（専門分野/関心分野）放射性核種の環境動態，放射性廃棄物処分

武田聖司（たけだ・せいじ）
日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門
（専門分野/関心分野）クリアランス，放射性廃棄物処分

解説

電力系統の安定運用のために
再生可能エネルギー大量導入時の基幹系統への影響

電力中央研究所　北内 義弘

電力系統の安定運用のためには，系統セキュリティの維持が重要である。本稿では，まず交流送電と発電機および系統セキュリティを維持するために必要な三つの要素(周波数，電圧，系統安定度)について概説し，大容量発電機の系統セキュリティへの貢献について述べる。さらに大容量電源脱落時の周波数低下および再生可能エネルギー発電大量導入時の電力系統の系統安定度に与える影響について，電力系統シミュレータを用いた試験結果について紹介する。

KEYWORDS: Bulk Power System, Synchronous Generator, Frequency Stability, Voltage Stability, Rotor Angle Stability, Renewable Energy

Ⅰ．まえがき

太陽光発電(以下，PV)などの再生可能エネルギー(以下，再エネ)の大量導入は，電力系統における配電系統から基幹系統まで，その計画・運用・制御に様々な影響を与えるため，数多くの技術課題が挙げられている。現在，再エネ導入可能量は主に平常時の周波数を一定に保つための需給バランスを考慮して決定されている。しかしながら，多くの大規模停電は落雷などの自然災害による基幹系統の事故により発生している。このため，再エネ大量導入時の基幹系統の系統事故が電力系統の安定性(周波数，電圧，系統安定度など)に与える影響の評価，および安定性を保つための対策の開発が喫緊の課題となっている。

本稿では，まず交流送電と発電機および系統セキュリティを維持するために必要な三つの要素(周波数，電圧，系統安定度)について概説し，大容量発電機の系統セキュリティへの貢献について述べる。さらに，大容量電源脱落時の周波数低下および再エネ大量導入時の電力系統の系統安定度に与える影響について，電力系統シミュレータを用いた試験結果について紹介する。

Ⅱ．電力系統シミュレータの概要

電力系統シミュレータは，電力系統のミニチュア装置であり，発電機，変圧器，送電線，PV 用パワーコンディショナ，PV パネル模擬電源，負荷設備，調相設備などの小型のアナログ装置で構成されている。また，実際に回転して発電する小形の発電機を 7 台所有しており，総発電機容量は 400kVA を超える(図 1，図 2)。さらに送電線モデルで実際に地絡，つまり雷が送電線に落ちて，送電線が一時的に使用できなくなる事故を模擬することが可能である。

これまでに，本設備を用いた試験結果や知見を生かし，主に電力広域的運営推進機関(OCCTO)や一般電気事業者で日常的に使用されている当所が開発した系統解

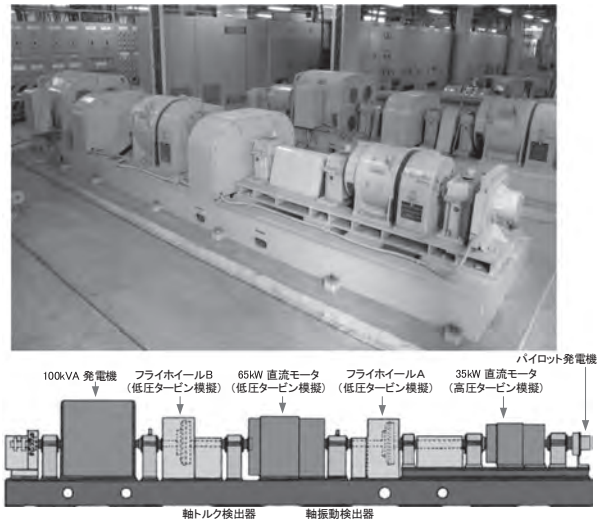


図 1　電力系統シミュレータの大容量原子力発電機模擬モデル
(100kVA×2 機)

Reliable Operation of Bulk Power System ; Impact on Bulk Power System with Large-scale Penetration of Renewable Energy：Yoshihiro Kitauchi.
(2018 年 12 月 6 日 受理)

図2　電力系統シミュレータの制御室

析ツールである電力系統解析プログラム(CPAT)用の数値計算モデルを開発・改良してきた。なお，CPAT は現在，機能制限版(CPATFree)が無料で公開されている(https://www.cpat.jp)。

Ⅲ．交流送電と発電機

直流は，図3に示す乾電池と豆球のように，電圧の高いところから低いところへ電流が流れる。一方，交流は，発電機内部の磁石を回転させて，コイルを貫く磁界を変化させることでコイルの端子に電圧が生じる現象(ファラデーの電磁誘導の法則)を利用して発電している。

商用の大容量発電機(以下，発電機)は，図4に示すように回転する磁石のまわりに120度ずつずらしたコイルが三つ設置されており，この中で磁石を1秒間に50回転させると，同図に示すように50Hz の三相交流電圧が発生する。原子力発電所の発電機は一般に磁石が2つ(N 極が二つ，S 極が二つ)ある回転子を毎秒25回転(50Hz)または毎秒30回転(60Hz)させている。送電線を介して，この電圧を工場の同期電動機(以下，モータ)に与えると，モータの中の磁石を回すことができる。

つまり，図5に示すように発電機内部の磁石と工場のモータ内部の磁石が，三相交流電圧・電流を介して結ばれることにより，「トルク」の形で電力が伝えられる(送電される)ことになる。たとえば，工場のモータのおもりが無い場合(モータが空回りしている場合)は，発電機の磁石とモータの磁石の N 極と S 極の接合部分はずれがない。モータのおもりが重くなるにつれて，両方の磁石の間の角度のずれが大きくなり，これによってトルクが伝えられることになる。このように交流では直流とは大幅に異なるメカニズムにより送電されている。

なお，発電機は蒸気タービンや水車からの機械的なトルクを電気的なトルクへ変換するエネルギー変換装置である。このため，発電機は入力される機械的なトルクと出力される電気的なトルクが同じ大きさの場合に一定の回転数，すなわち一定の周波数で運転が可能である。

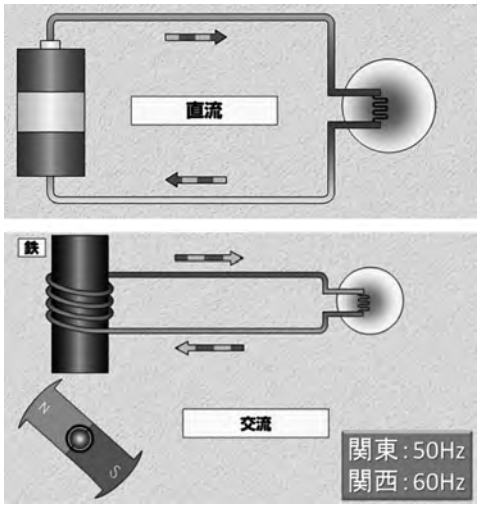


図3　直流と交流の概念図

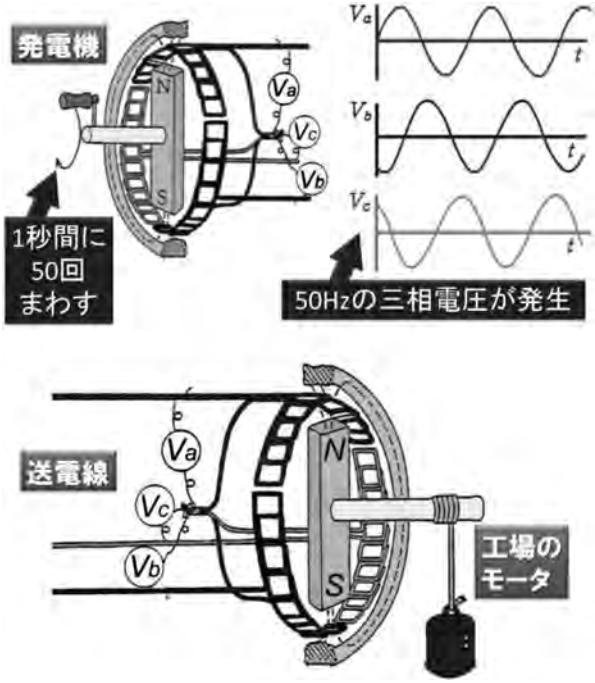


図4　送電線を介して発電機から工場のモータへ電力を送電するイメージ図

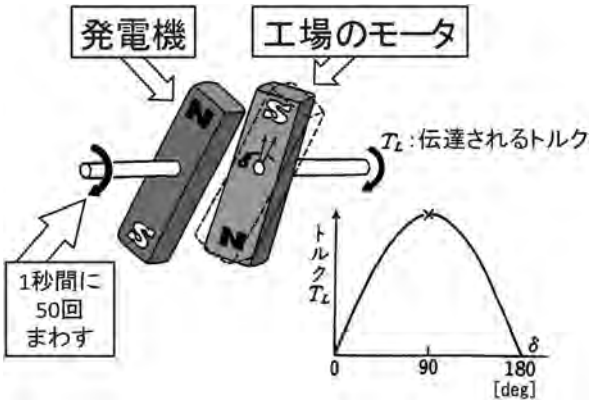


図5　向かい合った磁石と伝達されるトルク

Ⅳ．電力系統の安定運用に必要な三つの条件

電力系統を安定に運用するために必要な条件として，①周波数を一定に保つ，②電圧を一定に保つ，③系統安定度を維持する，の三つが挙げられる。

図6に示す交流送電の概念的模型を用いて，周波数，電圧，系統安定度について説明する。

図6の円盤と紐でできたカゴの左のハンドル部分が発電機で，右側のおもりが工場のモータ負荷であり，これらが長距離送電線を介して接続されているというイメージになっている。つまり，左側のハンドルを回すことで，左から右へトルクが伝わり，右側のおもりが巻き上がっていく。実際には発電機の内部にある磁石と遠方にある工場のモータの内部の磁石が，磁石の力でつながっていて，この磁石の力でできたカゴをねじって電力を伝えるイメージとなる。ここで，紐の長さが「送電距離と変圧器」を表す。また，紐が長くなると力が伝えにくくなるため，遠方には電力を送りにくくなる。

1．電圧

このカゴの半径が「電圧」の大きさを表している。直流の場合，電力は電圧が高い方から低い方へ送られるが，交流の場合，送電端と受電端の電圧の大小には関係なく，このカゴの「ねじれ」すなわち，「トルク」によって電力が送られる。このため，交流の場合，電圧の低い方から高い方へ電力を送ることが可能である。

この電力の事を正確には「有効電力（Active Power）」と呼び，単位はワット（W）である。厳密には「有効電力 ＝ トルク × 回転数」であるが，平常時の周波数は一般電気事業者により50Hzまたは60Hz ±0.2Hz以内に維持されており，カゴの回転数はほぼ一定であるとみなせるため，有効電力はほぼトルクを表していると考えてよい。

ここで，この電圧を支える力を「無効電力（Reactive Power）」と呼び，単位はバール（var）で表す。この電圧を支える無効電力は，文字通り「無効」ではなく，有効電力を送電するために必ず必要となる電力である。実際には，送電線と地面の間にコンデンサを挿入すると無効電力を発生して電圧が上がり，リアクトルすなわちコイルを挿入すると電圧が下がる。つまり，コンデンサを挿入すると無効電力が発生し，リアクトルを挿入すると無効電力を消費することにより系統電圧を変更することができる。また，（大容量）発電機は内部の電磁石の強さを調整することにより無効電力出力を調整し，系統電圧を変更することが可能である。

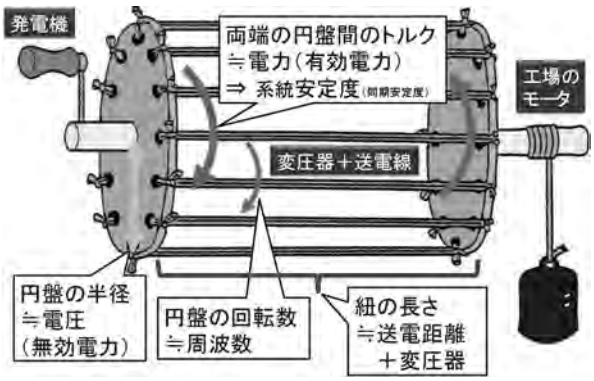


図6　交流送電の概念的模型

2．周波数

このカゴの回転数が「周波数」を表す。電力系統で消費される有効電力の大きさ（ここではおもりの重さ）は時々刻々変化するため，もし左側のハンドルを一定のトルクで回しているとカゴの回転数，すなわち周波数が変動することになる。このため，一般電気事業者は電力系統の周波数を検出し，このハンドルを回す力（実際にはタービンへの蒸気量や水車への水量），すなわち発電する有効電力を時々刻々調整して，電力の消費量の合計と発電量の合計を合わせることにより，周波数を一定に制御している。

3．系統安定度

左側のハンドルを回して，左から右へ伝えるトルクを増やしていくと，いずれこのカゴがねじ切れることになる。このため，この両端の円盤のねじれ角が90度まではトルク，すなわち有効電力を送電できるが，90度以上はこのカゴがねじ切れてしまい，有効電力を送電することができなくなる。この安定性のことを系統安定度（または単に「安定度」）という。

送電線に落雷が発生した場合，落雷した送電線は一時的に電圧が低下し，電力を送電できなくなるため，発電機が加速し，このカゴがねじ切れやすくなる。このため，落雷などにより送電線が一時的に使用できなくなる場合も想定し，落雷などの系統事故時にもこのカゴがねじ切れないように，平常時に送電できる最大の有効電力の大きさに注意を払う必要がある。

また，より多くの有効電力を送電するためには系統事故時にカゴの半径（電圧）が小さくならないように送電線の中央部に無効電力を供給する装置を設置するか，送電線を増強して紐を太くするか，両側の円盤の大きさ，つまり送電電圧を上げてこのカゴがねじれにくくする方法がある。

Ⅴ．大容量発電機の電力系統の安定運用への貢献

系統事故時の周波数，電圧，系統安定度を保つことを「系統セキュリティ」と呼ぶ。ここでは，大容量発電機の系統セキュリティへの貢献について説明する。

1. 周波数

大容量発電機は周波数に応じて，つまり発電機の軸の回転速度に応じて蒸気タービンを回すための蒸気の量(または水車を回すための水の量)を制御することにより，有効電力出力を調整することが可能である。これにより，電力系統の周波数を一定に保つことに貢献している。

一方，発電機を駆動しているタービンには共振周波数があるため，定格周波数よりおよそ-1.5Hz 以下または 0.5Hz 以上で回転数が維持されると，発電機のタービンの振れ幅が増えて亀裂が生じたり，タービンが隔壁と接触してタービンの羽根と隔壁を損傷したりする重大事故を引き起こす恐れがある。このため，共振する恐れがある回転数が継続した場合には，発電機を系統から解列し，タービンを停止させて，電力機器を保護する必要がある。

発電機は水車やタービンなど慣性の大きなものと一緒に回っているため，発電機とタービンを合わせて，大きな慣性力(等価的に 10 秒程度の時定数)を持っている。この慣性力は，大地震発生時などの自然災害時に電力系統の需給バランス(電力の発電量と消費量のバランス)が大幅に崩れた場合，周波数が変化する速度に直接的に影響するため，特に重要である。

2. 系統安定度

また，慣性力は発電機の回転子の加速・減速を緩やかにするため，系統安定度にも貢献している。さらに，電力系統に接続されているすべての発電機は同期して同じ速度で回ろうとする性質(この力を「同期化力」と呼ぶ)があり，周波数と系統安定度の維持に貢献している。

3. 電圧

落雷などの系統事故時に一時的に電力系統の電圧が低下する，いわゆる瞬時電圧低下が発生する。その場合でも発電機は停止せずに運転継続し，さらに系統事故中および事故後にも無効電力を出力し続けることにより系統の電圧低下を抑制することができる。これにより，電圧および系統安定度の維持に貢献している。

最後に，大容量発電機は大量な無効電力を瞬時に供給または吸収することにより，基幹系統の電圧調整が可能であるため，電圧および系統安定度の維持に貢献している。

以上のように大容量発電機は系統セキュリティに対して数々の貢献をしている。しかしながら，再エネ機器が大量に導入された場合，その導入量が多くなると系統全体の発電電力が余剰となり，大容量発電機を停止せざるを得なくなる。その場合，これらの電力系統への貢献が少なくなり，系統の安定運用が維持できなくなる恐れがある。表 1 に大容量発電機の系統セキュリティへの貢献についてまとめる。

表 1　大容量発電機の系統セキュリティへの貢献

■周波数に応じて出力調整が可能	周波数
■同じ速度で回ろうとする力(同期化力)がある	周波数 系統安定度
■慣性力を持っている(慣性定数が8秒程度)	周波数 系統安定度
■系統事故時の瞬時電圧低下時(瞬低時)に停止しない	電圧 系統安定度
■基幹系統の電圧調整が可能	電圧 系統安定度

Ⅵ. 電力系統シミュレータにおける基本的な試験結果

第 2 章で概説した電力系統シミュレータにおいて実施した基本的な試験およびその結果について以下に述べる。

1. 大容量電源脱落時の周波数低下試験

大規模な地震発生時などに大容量発電機が突然脱落(停止)することがありうる。総需要に対する脱落する電源の割合が系統の周波数に与える影響を把握するための試験を電力系統シミュレータにおいて実施した。図 7 に示す試験系統において，総需要(抵抗負荷)は 50kW である。また，左側の発電機と右側の「脱落させる電源」の出力の合計も 50kW であり，これにより周波数が 50Hz に維持されている。この状態から図中の遮断器を開放することにより，右側の電源を脱落させる。なお左側の発電機には，発電機の回転数(周波数)が下がった場合に発電機出力を増加させる調速機(ガバナ)が装備されており，系統の総需要の 6%が失われた時に系統の周波数が 1Hz 低下する特性(系統特性が 6%MW/Hz)になるように設定されている。

試験結果を図 8 に示す。脱落させる電源の大きさによって周波数低下後の落ち着き先が異なることがわかる。なお，周波数が低下する速度は，発電機と発電機を回している原動機の持つ慣性力(時定数は約 8 秒)により決まるものであるため，太陽光発電などの「発電機＋タービン」ではない電源の割合が増加した場合，この周

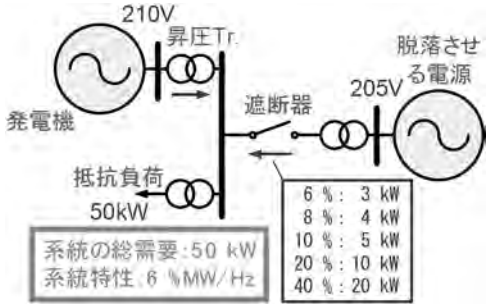


図 7　大規模電源脱落時の周波数低下試験系統図

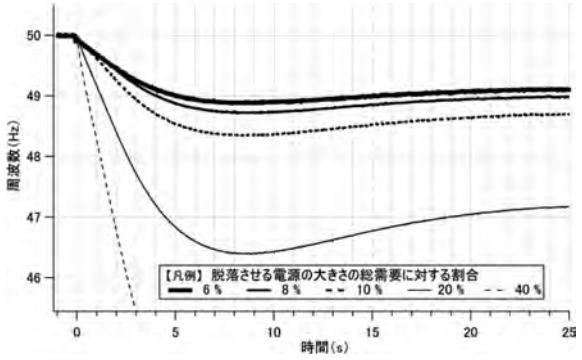


図 8　大規模電源脱落時の周波数低下試験結果

波数の低下速度はより速くなる。

今回の試験系統には設置していないが，実系統においては周波数低下が一定時間以上継続した場合，自動的に発電機や需要を系統から自動的に切り離す，周波数低下リレー(UFR)が備えられており，電力機器の保護や連鎖的な周波数低下の防止が期待できる。しかしながら，脱落する電源の容量が大きくなると，連鎖的な周波数低下を防げない恐れもある。

2. PV 大量導入時の基幹系統の系統安定度への基本的な影響の確認試験[1)]

系統事故時の挙動が従来の大容量発電機と異なる PV が大量導入された場合の基本的な影響を電力系統シミュレータにおいて試験的に確認した(図 9)。本試験系統では，左側の発電機 1 から右方向へ長距離送電線を介して電力が送電されている。系統擾乱として中間母線に隣接する遮断器 CB1 を開放して送電線を 1 回線開放する場合に，「中間母線(母線 2)に出力 20kW の発電機 2 が連系され，PV が連系されていないケース」と「下位系統に出力 20kW の PV が連系され，20kW の発電機 2 を停止させたケース」の 2 ケースについて，発電機 1 から安定に送電できる有効電力の大きさを求めた。

送電線 1 回線開放時に，発電機 2 が連系されているケースでは，AVR(自動電圧調整器)と呼ばれる発電機の端子電圧を一定に制御する機能により発電機 2 から出力される無効電力が増加し，中間母線の電圧が高めに維持される。一方，PV が連系されるケースでは発電機 2 が連系されていないために中間母線の電圧が低下し，図 6 で示したカゴのねじれ角が大きくなり，安定に送電できる有効電力が低下する。

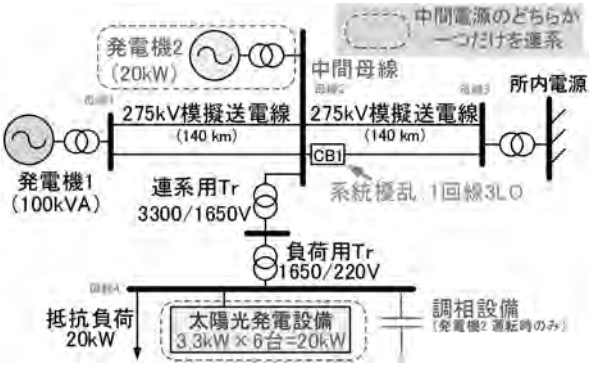


図 9　電力系統シミュレータにおける試験系統[1)]

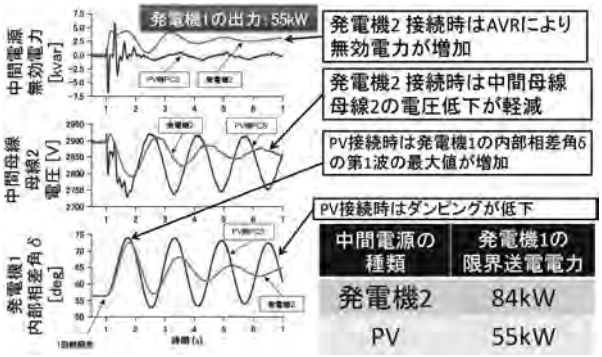


図 10　発電機 2 と太陽光発電(PV)の置き換えによる系統安定度への影響[1)]

この結果，発電機 2 を連系したケースでは，発電機 1 から安定に送電可能な電力が 84kW であったが，PV を連系し，発電機 2 を停止させたケースでは発電機 1 から 55kW までしか安定に送電できず，安定に送電できる電力が 2/3 程度に減少することがわかった。

ここで PV から積極的に無効電力を出力することも考えられるが，下位系統に接続されている PV の電圧は高めになる傾向があるため，これ以上電圧を上げることが難しいこと，また仮に PV から無効電力を出力しても途中の変圧器や送電線で消費されてしまい，275kV 模擬送電線まではそのほとんどが届かないことから，PV から無効電力を出力して基幹系統の電圧を支えることは難しいことが分かっている。

このことは，基幹系統の安定運用のためには基幹系統に大容量発電機が必要であるということを示している。ただし，実際の電力系統には多数の発電機が連系されているため，この試験条件は，発電機と PV の系統安定度への影響の違いが極端に出やすい。より一般的な再エネの系統安定度への影響については文献 2)を参照されたい。

－ 参 考 資 料 －

1) 白崎，北内：PV 大量導入が系統事故時の基幹系統に与える基本的な影響に関する実験的検証，平成 25 年電気学会全国大会，2013 年 3 月.
2) 白崎，北内：再生可能エネルギー大量導入時の各種系統条件が基幹系統の系統安定度に及ぼす基本的な影響，電力中央研究所研究報告 R14013，2015 年 8 月.

著 者 紹 介

北内義弘（きたうち・よしひろ）
電力中央研究所 システム技術研究所
(専門分野)電力系統の安定化制御(特に発電機励磁制御系)，系統安定度

パンドラの箱はとっくに開いている

フリージャーナリスト　井内 千穂

環境問題から切り込んで物議を醸した原発ドキュメンタリー『パンドラの約束』(2013年制作)の出演者の一人マイケル・シェレンバーガー氏が，4月に東京で開催された第52回原産年次大会に登壇し警鐘を鳴らした。「核武装に値するほどの状況に対してもアメリカに守ってもらえるという幻想を抱いたまま無防備な日本の現状は，『安全神話』を信じる地域住民の不安感を怖れて津波対策を講じなかった東京電力と福島第一原発の事故前の状況と同じではないか」と。

2000年代から気候変動問題に取り組み再生可能エネルギーを推進してきた彼が，世界有数の原子力支持の環境保護活動家に変貌したのはなぜか？ 「10年にわたる再エネ推進で直面した現実の中で徐々に考えが変わった」と記者会見の席で語った彼のメッセージは，「現実を見よ」ということに尽きる。

全体への講演では触れなかった放射性廃棄物の問題についても，目から鱗の逆説的現実論を展開した。曰く，放射性廃棄物こそは，原子力が最善の発電方法である理由だ。なぜなら，それは完全に封じ込められ，誰も傷つけず，量的にも非常に少ない。しかるに，メディアも一般市民も政府も産業界も，放射性廃棄物をどこに埋めるかという話に囚われ続けている。日本に限らない。放射性廃棄物は「悪霊」呼ばわりで，地層処分は「埋葬の儀式」のようだ。この悪霊をもう一度パンドラの箱に戻して押し込んでおきたいという欲求だと。放射性廃棄物の最終処分場をめぐる現状認識さえも揺さぶられた。

原子力は既にこの世に存在し強大な力を持つテクノロジーである。なくなれば世界は良くなるのか？恐怖心の克服という悪霊退治のためには核兵器を含めた「タブーなき議論」が必要であるというシェレンバーガー氏の爆弾発言はショッキングだが，それはパンドラの箱に残った希望なのかもしれない。

Column

ウラン探鉱とスロバキア

コメニウス大学
医学部英語コース　妹尾 優希

スロバキアよりこんにちは。IEAのレポート「Slovak Republic Review 2018」によると，2017年の原子力による発電の割合は約60%以上を占め，バイオ燃料が約20%を占めています。その他に資源価値のあるエネルギー源は，西カルパティア山脈周辺のバンスカー・ビストリツァ地方で採炭されている，エネルギー効率が低い褐炭があげられます。

近年では，1990年頃に，スロバキア東部に位置するコシツェ地方のヤホドナ市でウラン鉱山が確認されました。この鉱山発掘は，各国のウラン鉱山開発の注目を集め，2005年頃からカナダのEuropean Uranium Resources Ltd.との共同での探鉱が計画されました。しかし，探鉱計画地周辺の住民の反対は強く，2009年にはスロバキアの環境活動保護関連の活動で，歴代最大の署名数を集めています。これを受けて，ヤホドナ探鉱開発は国会で再検討され，一度は開発計画が続行されるも，その後の2013年に，自治体に開発進行可否の権限を与える「放射性鉱物の発掘調査の決議に関する法律」を制定しています。その翌年からは，ウラン探鉱は周辺の住民投票で承認されない限り禁止され，2018年2月にヤホドナ市の鉱山開発計画は最高裁判所によって否決されました。

この法律改定ですが，実際には住民の署名運動より，ウランの市場価格が大きく影響している事が考えられます。カナダのウラン探鉱会社との共同開発が発案された，2005年頃から上がり始めたウラン市場価格は，その後，2007年にピークを迎えた後，徐々に下がり，2013年には2007年の市場価格の約1/4となっています。住民や環境活動保護団体による訴えが，国民の意見を取り入れた法律制定に繋がったとの報道もありましたが，必ずしも事実ではない事が伺えます。

安くなるのかもしれないけれど……

児童文学作家　野間 美智子

電車に乗りながら，なんともなしに中吊り広告を，もとい，車内映像を眺めていると，人気のあるタレントがポップな振り付けで「まだエネルギー，まとめてないの？」と呼びかける姿が流れている。「うーむ」と思いながら視線を上げると，今度は網棚の上に位置する別の会社の広告が「エネルギーをオール電化にするととってもお得」と，これまたポップな色使いのポスターで目を引く。でも，やっぱり「うーむ」と思ってしまうのである。

確かに，エネルギーを一つの会社にまとめてしまえば，料金は安くなるかもしれない。しかしそれこそ，3.11の教訓が生かせていないような気がして，私は躊躇してしまう。電気やガス，水道のようなインフラは一つにまとめてしまうと，その会社が災害などで復旧不可能になった場合，なすすべなく過ごさなくてはならなくなる。「ガスは通るけど電気はまだ」という状態であれば，とりあえずガスは使える。逆もしかり。オール電化になることで火の消し忘れを防げたり，ガス料金がまとまることで払い忘れを防いだりできるのは，確かに魅力的だと思う。反面，インフラや社会サービスが利益重視になったことで，ずさんになったことも増えたのかもしれないな，とも思う。何事も一つのことに依存すると，ろくな事が無いというのは，これまでの経験上，感じることだったりするし。選択肢が増えるのはいいことだけれど……いろんなケースを考えて，賢い消費者でいられたら，と思う。

Column

過去を責めず，未来に臨む

フリーライター　服部 美咲

スギ花粉症に悩む国民は，人口の約2割に上る。かつてスギ材は，日本の戦後復興を支えるため急速に需要を増し，植林された。今やこのスギが，アレルギー源となる花粉を散らす。医療費の上昇や生産力低下を招き，毎年植替えなどの対策にも予算が割かれている。フェーズが変わればニーズも変わる。ニーズにあわせた柔軟な政策転換は，国民の健康な生活の保持に肝要である。

がんのスクリーニング検査は，利益と害とを比較し，利益が上回れば推奨される。甲状腺の超音波スクリーニング検査（以下甲状腺検査）は「利益より害が大きい」と判断され，国際的にも本邦でも一般に推奨されていない。ただ，チェルノブイリ原発事故後の周辺地域で小児の甲状腺がんが増加したことから，原子力災害後の甲状腺検査の是非には議論があった。結果，WHOの外部組織IARC（国際がん研究機関）は2018年，原子力災害後であっても甲状腺検査を推奨しないと勧告するに至った。

福島では，東京電力福島第一原発事故後，甲状腺検査が継続されている。原発事故当時，子供たちの健康と家族の不安に向き合い，開始に踏み切った検査だった。しかし，子供の初期被ばく線量が十分に低かったことなど新たな知見も積まれ，国際的にも甲状腺検査非推奨の勧告がされた。かつての選択が正しかったことと，その選択を修正することは両立する。福島の住民の健康な生活を保持するため，過去の選択を悔いるのではなく，未来に臨むしなやかさを願う。

宇宙のロマン

NPO　あいんしゅたいん　坂東 昌子

「お星さまの話はどうかね」，日本初のノーベル賞を背景に創設された基礎物理学研究所で武谷三男・早川幸男を前にしてそういったのは湯川秀樹だった。林忠四郎にとって決定的な転機となったのは，この基研の長期研究会「天体核現象」だった。地上の核融合と星の進化をつなぐ課題の戦略は，「やる時は徹底的に基礎から始める」だった。林は素粒子論専攻で，南部陽一郎と同級だった。大学院生のころ，ガモフのビッグバンにつながる論文(PRL，'41)に興味を持っていた。遡れば，宇宙の起源の探求はハッブルの法則から始まった。彼は米国で大学卒業後，英国オックスフォード大学で法学の修士号をとり法律の仕事をしていたが，天文学への思いが抑えきれずシカゴ大学で天文学の博士号を取得，ウィルソン天文台に職を得た。1929年，ヒューメイソンと「ハッブルの法則」を発見した。ハッブルの法則は，宇宙が膨張している証拠の一つだが，科学者の合意を得るには1964年のペンジアスとウィルソンによる宇宙背景輻射の確認まで待たねばならなかった。しかし，ガモフをはじめ，この段階ですでに様々な考察をしていた。こうした物理学者たちの息吹は，1946年にソルベィ会議に出かけた湯川秀樹に刺激を与えたのだ。原子核素粒子物理学と強く連携し，宇宙の謎に迫る天体核物理という新分野誕生だった。SFの世界だった宇宙の創成期がビッグバン宇宙論となり，星の形成・進化と素粒子原子核理論というミクロとマクロがしっかりつながった。まさに日本の誇る新分野創生である。ちなみにヒューメイソンは天文台の職員だったが観測技術の腕を認められハッブルの助手になった。ファラディもそうだが，庶民が得た科学者になる機会には感銘を受ける。

Column

粛々と働くだけでは，状況は変えられない

アジア太平洋エネルギー研究センター　渡辺　凜

3月号で，「これまでを振り返り，今後を展望する」と題して業界内外の先生方の論考が並んだ。「自主的にイノベーティブな技術開発に取り組む」「より社会に開かれた意思決定を行う」「透明性の向上」―どれもそのとおりだが，読み進めるに連れ，物足りなさと同時に胃もたれを感じた。こんなフレーズはもう聞き飽きている。では，どうしたら良いのか。

一つには，今までやってきたことを本気で疑うことが有用だと思う。日本で今まで安全対策として進めてきたことは，本当に原子力発電をより安全にしているのか。周辺住民を巻き込んだ大惨事を起こりにくくすることに寄与しているだろうか。

日本の原子力発電所は今，誰に益をもたらしているか。存在することを望ましく思っている人はいるのか。今後，発電以外の用途を含め，原子力にしか果たせない役割があるだろうか。その役割を経済的，社会的な合理性を備えたやり方で果たしうるか。

原子力利用に関して，どのような意思決定を行う必要がこれから生じるか。事業者，規制主体，国民，それぞれどのようにその意思決定に関わることになるか。判断するための材料はあるのか。それらの決定は，どのような疑惑を巻き起こすだろうか。その疑惑は否定できるのか，できるとすればどのような情報を用意すべきか。

偉い先生に口酸っぱく正論を言われることに辟易しているならば(していないとすれば，それこそ問題だが)，原子力利用を推進したいと思っている側から，よりラディカルな議論を発信するほかない。

解説シリーズ

最先端の研究開発　量子科学技術研究開発機構

第5回　核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発の進展（その1）

量子科学技術研究開発機構　竹永 秀信，他

量研における核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発の進展について，ITER計画および幅広いアプローチ活動を中心にシリーズ第5回および第6回にて解説する。第5回では，発電実証を行う原型炉の研究開発戦略について述べた後，大型国際研究協力プロジェクトであるITER計画について，量研が製作を担当する超伝導コイル，中性粒子入射加熱装置および高周波加熱装置の開発状況とともに，ITERを用いて試験を行うテストブランケットモジュール試験計画を紹介する。

KEYWORDS: Fusion Energy, ITER, BA, DEMO, Superconducting coil, NBI, ECH&CD, TBM

Ⅰ．原型炉研究開発戦略

太陽の輝きの源である核融合エネルギーを，地上で実現するための研究開発を進めている。この“地上の太陽”では，重水素とトリチウムが融合して，ヘリウムと中性子に変わるDT反応の際に放出されるエネルギーを利用する。燃料資源（重水素および中性子を当ててトリチウムを作るリチウム）が海水中に豊富に存在すること，安全性に優れていること，二酸化炭素や高レベル放射性廃棄物が発生しないことなどから，将来のエネルギー源の有力な候補とされている。核融合反応を起こすためには，燃料を1億度以上の超高温プラズマ状態にする必要があり，磁場の力でプラズマを閉じ込めて効率的に加熱する。これまで，日本原子力研究所（当時）のJT-60において，イオン温度5.2億度およびエネルギー増倍率1.25（DT換算値）を達成している。

我が国の核融合エネルギー研究開発の戦略は，文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会および同委員会の下に設置された原型炉開発総合戦略タスクフォースにて議論されており，平成29年12月18日には，「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」[1)]が取りまとめられている。そこでは，今世紀中葉に実用化の目処を得ることを目指し，科学的・技術的実現性を実証する実験炉の段階から，技術的実証・経済的実現性を実証する原型炉（DEMO）の段階へ移行するための戦略が示されている。原型炉に求められる基本概念として，数十万kWを超える定常かつ安定した電気出力，実用に供し得る稼働率，燃料の自己充足性を満足する総合的なトリチウム増殖を実現することとしている。原型炉段階への移行判断は，国際協力で建設を進めている実験炉ITERの核融合運転（核融合出力50万kW，エネルギー増倍率10）が見込まれる2030年代に行うことになっており，それまでに，2回の中間チェックアンドレビューを実施することになっている。1回目は，日欧による幅広いアプローチ（BA）活動で建設中のJT-60SA（JT-60後継機である先進超伝導トカマク装置）が運転を開始する2020年頃，2回目はITERのファーストプラズマが予定される2025年から数年以内となっている。さらに，核融合に対する国民の信頼が得られ，選択され得るエネルギー源とするためには，アウトリーチ活動をはじめとした社会連携活動を戦略的に推進することが必要であると述べられている。原型炉に向けた技術課題に対しては，アクションプラン[1)]が策定されており，全日本的にこのアクションプランに沿った研究開発を推進していく体制を整えつつある。平成30年

Progress on Research and Development towards realization of Fusion Energy：Hidenobu Takenaga, Yoshihiko Nunoya, Mio Nakamoto, Junichi Hiratsuka, Ryosuke Ikeda, Takumi Hayashi, Yoshinori Kawamura.

（2019年2月28日 受理）

7月24日には，原型炉に向けた戦略をわかりやすく示すために，「原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ)」[1)]がまとめられている。また，長期にわたる核融合エネルギー研究開発には，人材育成が極めて重要であり，平成30年3月28日には，「核融合エネルギー開発の推進に向けた人材の育成・確保について」[1)]がまとめられている。

量研は，文部科学大臣からITER計画における国内機関およびBA活動における実施機関の指定を受けて，大型国際研究協力プロジェクトであるITER計画および同計画を支援・補完するために日欧協力で行うBA活動を実施している。これらの活動により，我が国における核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発を，大学等や産業界の協力を得つつ，主体的に推進している。

Ⅱ．ITER計画

ITER計画は，日，欧，米，露，中，韓，印が参加し，核融合実験炉ITERの建設・運転を通じて，核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性の実証を目的とした，大型国際研究協力プロジェクトである。2007年にITER協定が発効し，現在フランスのサン・ポール・レ・デュランスの建設サイトでのITER機構の建設作業と参加極内での機器の製作活動が本格化している。量研は文部科学大臣から国内機関(JADA)としての指定を受けて，国際協定に基づき日本で分担する機器の製作を行っている。日本は，超伝導導体，超伝導コイル，中性粒子入射加熱装置，高周波加熱装置，ブランケット遠隔保守装置，ダイバータターゲット，計測装置，トリチウム除去設備の製作を担当している。

トロイダル磁場(TF)コイル用および中心ソレノイド(CS)コイル用ニオブ・スズ製の超伝導導体については，それぞれ2015年および2018年に製作を完了している。全部で9機製作担当するTFコイルの製作では，1機目の超伝導コイル巻線部の製作が完了し，コイル全体を支える巨大な構造物(コイル容器)と一体化する作業を行っている。中性粒子入射加熱装置については，実機に先駆け建設する実機試験施設用に日本が製作する高電圧電源機器の製作を終え，建設サイトへの据付後の試験検査を行っている。高周波加熱装置の製作では，全部で8機製作担当するマイクロ波を発生する真空管ジャイロトロンの1号機と2号機の製作を終え，1号機については，ITER機構の要求性能を満足することを確認する完成監査に合格し，ITERサイトに輸送できる状態となった。

その他の分担機器についても，設計と製作を進めており，それぞれ国際的に定められた期日までにITERサイトに納入を予定している。参加極で製作された機器は，ITER機構が全体を統合し，据付け組立を行う。2025年から運転を開始するが，その後も段階的に機器の組上げ・調整を重ね，2035年から重水素とトリチウムを用いた核融合エネルギーの実証を目的とした運転を予定している。

ここでは，開発製作が進んでいる，TFコイル，中性粒子入射加熱装置および高周波加熱装置についてトピックとして取り上げ，その開発状況を紹介する。

また，ITERを用いて増殖ブランケットの科学技術的成立性を実証するテストブランケットモジュール(TBM)試験計画について，設計や機器開発が進んでおり，その状況についても紹介する。

1. ITERトロイダル磁場コイルの開発

量研は，TFコイル全19機のうち9機の調達および全19機のコイル容器の調達を担当している。10機のコイル容器はTFコイル10機を担当する欧州に納入する。ひとつのTFコイルは高さ16m，幅11m，重量300トンの世界最大のニオブ・スズ超伝導コイルであり，その構造を図1に示す[2)]。

巻線部(WP)はD型の形状の7つのダブル・パンケーキ(DP)から構成される。それぞれのDPの製作は，1)導体の巻線作業，2)冷媒入口配管の取付けと導体端部の電気的接続部(ジョイント)の取付け，3)導体の熱処理作業，4)ラジアル・プレート(RP)製作，5)導体のRP溝へのトランスファ作業，6)導体絶縁作業，7)カバー・プレート(CP)溶接作業，8)DP絶縁および含浸作業の順に進められる。完成したDPを7枚積み重ねて対地絶縁を施すことでWPを成型する。さらに，ジョイント接続，冷媒配管組立および計測線の取付けを行うことでターミナル部組立を完了し，完成検査を終えたところでWPが完成する。1機目のWPの完成検査では，110トンにも及ぶWPを全体の平均温度のばらつきを50K以内に収めながら80Kまで冷却し，冷却前後でヘリウム漏洩検査を行い，漏洩がないことを確認した。冷却後の常温での電気試験をすべて完了したところで完成検査完了およびWP完成となった。

コイル容器は，ITER中心側のインボード側の容器(AU)およびその蓋(AP)，外側のアウトボード側の容器(BU)およびその蓋(BP)の4個のサブ・アッセンブリから構成される。各部品の長さは最大16.5m，4個のサブ・アッセンブリの総重量は約200トンにも及ぶ[3)]。それぞれのサブ・アッセンブリの製作は，1)メインボディ

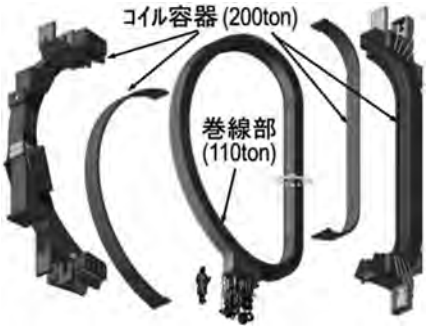


図1　TFコイルの構造

の製作，2)付属部品の製作，3)ベーシック・セグメントの製作(メインボディと付属部品の溶接作業)，4)ベーシック・セグメント同士の溶接作業，5)最終機械加工，6)冷却配管埋設作業，7)仮組検査の順に進められる。

巻線部は2機がターミナル組立までを完了しており，DPの製作は，既に量産化している。コイル容器についても欧州分3機と日本分2機を完成させた。

完成したコイル容器とWPを一体化させることでTFコイル完成となる。日本ではその一体化作業をAUの背板を下に，BUの背板を上にした縦置きで実施する。一体化作業は，1)AUの設置，2)WPのAU内への挿入，3)BUの設置およびAU-BU間の溶接，4)WPの傾き調整，5)AP，BPのはめ込みとAU，BUへの溶接(封止溶接)，6)コイル容器とWPの隙間の含浸，7)最終機械加工，8)最終検査の順に進められる。

AU-BU間の溶接ではITER機構が求める溶接品質を担保するために，コイル容器の赤道面から規定される寸法約6.6mに対して，1mmの精度で開先を合わせて組み立てる必要がある。また，封止溶接でもコイル容器のサブ・アッセンブリ同士を全長16.5mの開先にわたり，1mm程度の精度で組み合わせる必要がある。そのため，サブ・アッセンブリ製作の最終ステップに仮組検査が実施されており，完了済みの日本分コイル容器1機目の仮組検査においては，要求精度を満たして組み合わせることに成功している。また，欧州分では一体化作業を横置き(AUおよびBUの側面を下にして設置)で行うため，仮組検査も横置きで実施しており，欧州分コイル容器2機が仮組検査を完了している。

TFコイルの機能を担保するうえで必要な精度として，TFコイル内の電流中心位置に対し，インボード側でϕ2.6mm，アウトボード側ではトロイダル方向に±3mmという厳しい要求が設けられている。また，一体化含浸において，樹脂の注入可能なWPとコイル容器の隙間4mmを確保する必要がある。これまでの試作の結果から，AU-BU間の溶接や封止溶接による変形を予測し，1号機目のWP，AUおよびBUの寸法測定結果から，一体化作業後の電流中心位置および含浸隙間の事前評価を行った結果，最終的なTFコイルの電流中心位置を要求値に収めながら，全域で含浸隙間4mmを確保することが可能であることが分かっている(図2)。この結果はこれまでの試作や製作で得た知識と技術を集結させた大きな成果であると言える。この評価結果を反映し，産業界と協力のもと，一体化作業を実現していく。

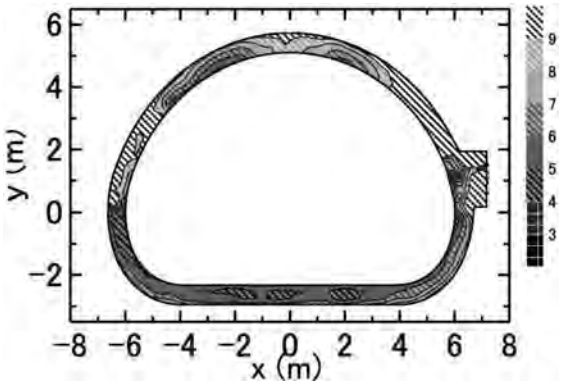


図2　日本分1号機の含浸隙間評価結果

2. ITER中性粒子入射加熱装置用高電圧機器の開発

ITERプラズマの加熱・電流駆動の主要機器である中性粒子入射加熱装置(Neutral beam injector: NBI)では，エネルギー1MeV，電流40Aの負イオンビームを3,600秒間連続出力し，中性化してITERプラズマ中に入射する。これは従来のNBI装置に比べエネルギー2倍，電流2倍，連続運転時間は360倍にもなる超高性能な要求値であるため，実機に先立ち，実機と同一性能のNB実機試験施設(NBTF)を建設し性能実証試験を行うための機器の準備が進んでいる。日本は，この超高性能負イオンビームの生成に必要な直流1MV高電圧電源機器の調達を担当し，機器製作，据付，現地試験を実施してきた[4~6]。ここでは，機器開発の要となった高電圧絶縁技術の開発および最新状況について報告する。

図3にこの高電圧電源機器の全体図を示す。直流発生

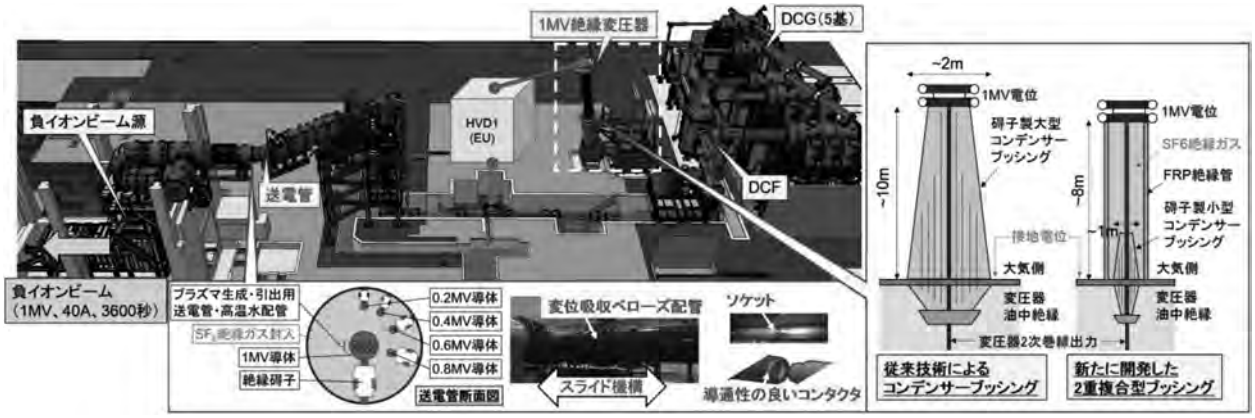


図3　直流1MV高電圧電源機器　全体図

器(DCG)は昇圧変圧器と整流器から構成され，直流 0.2 MV を出力するもので，これを 5 つ直列に繋ぐことで 0.2，0.4，0.6，0.8 および 1MV の 5 種の電圧を発生する。この 5 種の電圧は直流フィルターコンデンサ(DCF)で平滑化され，送電管を通って負イオンビーム源まで送電される。負イオンビーム源は 1MV の高電位から接地電位に向けてビームを加速する構造であるため，負イオンの生成・引出用電源は 1MV 電位上の高電位デッキ 1 (HVD1)内に設置される。この電源に 6.6kV の交流電源を供給するため 1MV の絶縁変圧器が必要となる。

従来の技術では，直径約 1m，高さ約 5m の碍子製コンデンサーブッシングを用いた JT-60U 用の絶縁変圧器が実現していたが，0.5MV，10 秒間の出力が限界であった。これと同様の構造で 1MV，3,600 秒の絶縁を行うためには直径約 2m，高さ約 10m のこれまでにない大型セラミックを用いたコンデンサーブッシングの開発が必要となり，開発期間およびコストの面で困難が予想された。そこで，小型の碍子製コンデンサーブッシングに繊維強化プラスチック(Fiber-Reinforced Plastics，FRP)絶縁円筒を被せた碍子/FRP の 2 重複合型ブッシングを考案，開発した。FRP を被せた内側には絶縁ガスである六フッ化硫黄(SF_6)ガスを充填し，コンデンサーブッシングで油-ガス絶縁，FRP 絶縁円筒でガス-大気絶縁を行う 2 段構造とすることで，必要な碍子製コンデンサーブッシングのサイズを直径 1m 以下，高さ 4m 以下に，重量を 1/10 程度に低減し，コストを大幅に抑えた。

さらに，DCG，HVD1 からの高電圧電力導体を負イオンビーム源まで送電する 1MV 送電管を開発した。この送電管は電源のある屋外から建屋を貫通し，0.2～1MV の 5 つの電位の電力導体を 100m 先の負イオンビーム源まで送電する必要がある。電位の異なる 5 つの電力導体を大気中で送電し，建屋を貫通させる場合，絶縁距離の観点から送電管の直径は 10m 程度必要となる。さらに，100m の長距離において熱伸びや地震により約 40mm の変位が見込まれ，導体破損や絶縁劣化が危惧された。そこで，SF_6絶縁ガスを封入した一つの送電管内に，5 つの電力導体を収め，各電力導体の電界が一様になるよう配置を工夫し，送電管の小型化を図った。さらに，熱伸びや地震による変位に対応するため全長 100m の導体を 2m 毎に分割して碍子で固定し，伸びや変位を吸収でき，かつ導電性の高いソケットで接続した。また，変位吸収ベローズ配管を適用し，送電管の支持脚にスライド機構を設けた。これらの技術開発により，送電管の直径を約 2m にまで縮小し，熱伸びや地震への対策を完了した。

これまでに NBTF 用高電圧電源機器の製作・据付はすべて完了し，2018 年 11 月までに日本側の機器において直流 1.2MV，1 時間の耐電圧試験に合格した。2019 年には欧州調達機器を接続して耐電圧試験を実施し，2020 年に電源出力試験を行う計画である。

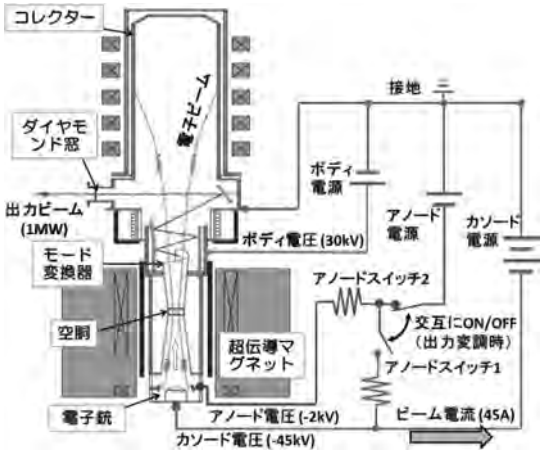


図 4　ITER ジャイロトロン及び電源回路の構成図

3. ITER 高周波加熱装置の開発

ITER では，プラズマの生成，加熱・電流駆動，性能維持を目的として，20MW の電子サイクロトロン加熱・電流駆動(Electron Cyclotron Heating and Current Drive : EC H&CD)装置を装備する。ITER 用 EC H&CD 装置は，24 機のマイクロ波源(ジャイロトロン)，同数の伝送系，5 機の入射系(ランチャー)から構成される。量研は，24 機中 8 機のジャイロトロンとランチャー 1 機を調達するため，それらの研究開発を進めてきた。

ジャイロトロンは，電子銃，空胴，モード変換器，出力窓，コレクターなどから構成され(図 4)，電子銃で生成された電子ビームは，超伝導マグネットの強磁場中で旋回運動をしながら加速され，空胴にて電子の旋回エネルギーが高周波電磁界と相互作用するサイクロトロンメーザーの原理により誘導放射する。日本では，電子の加速電圧を変化することなく，旋回速度を制御できる利点があるカソード・アノード・ボディの三つの電位を有する三極管方式を採用し，ジャイロトロン開発を進めてきた。

ITER ジャイロトロンの性能要求は，周波数 170GHz，出力 1MW，電力効率 50%，定常動作，最大 5kHz の ON/OFF 動作(出力変調)などがあり，そのジャイロトロン実現に向けて，エネルギー回収技術による電力効率の改善，大口径の空胴による高出力発振技術開発，人工ダイヤモンドの出力窓への搭載などを経て，ITER の要求を世界で初めて原理実証した[7]。一方，ITER の 10 年以上にわたる長期間運転に対して，出力 1MW の定常および繰り返し動作を安定に実現するために，空胴における熱負荷を約 30%低減する設計改良を進めた。ところが，170GHz の発振を妨害する異周波数の発振により安定性が阻害されることが確認された。この課題を克服するために三極管方式の特性を活かしたアノード電圧の時間制御を導入し，電子の旋回速度をきめ細やかに制御することで異周波数の発振を阻止し，ITER の長期運用に最適なジャイロトロンを実現した。また，5kHz での出力変調性能においても，他のジャイロトロン調達極が電

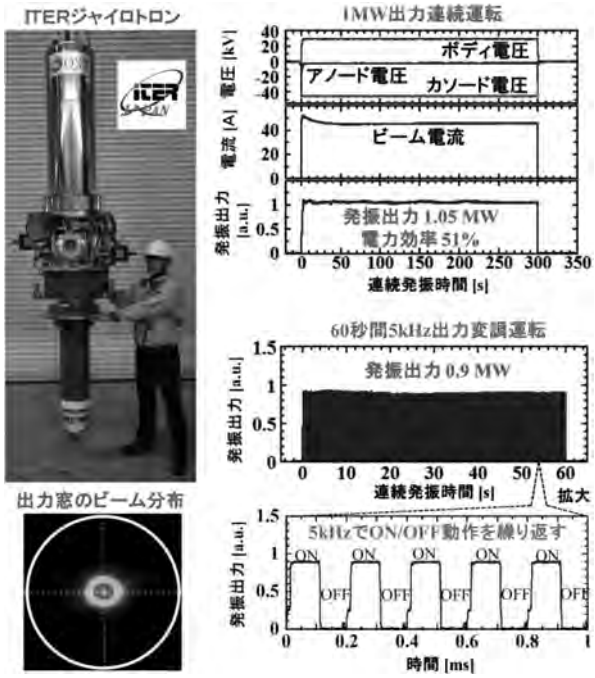


図5　ITER ジャイロトロンの代表的な試験結果[8)]

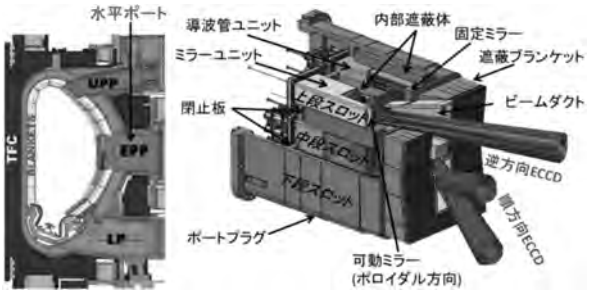


図6　水平ポートランチャーの概観図

源電圧を制御する方式で試みる中で，アノード部の半導体スイッチのみを制御する独自方式を開発して，世界に先駆けて原理実証することに成功した。2019 年 2 月現在，ITER ジャイロトロンは 2 機の製作と 1 機の完成検査を完了した(図 5)。以降，8 機目までの製作と完成検査を順次進め，2025 年のファーストプラズマ達成に向けた ITER サイトでの統合試験も実施する計画である。

量研が調達するランチャーは，ITER の水平ポートに接続され，ジャイロトロンから伝送された 24 系統のマイクロ波を 8 系統ごとに上中下段に分けて，プラズマへの入射角度を制御する(図 6)。伝送光学設計では，ランチャー内の伝送効率 99.4%と ITER 機構が要求するプラズマ電流駆動分布を同時達成することに成功し[9)]，中性子遮蔽および構造解析を最終設計に向けて進めている。

4. テストブランケットモジュール試験計画

原型炉ではトリチウム増殖ブランケットが基幹技術となる。増殖ブランケットの科学技術的成立性について ITER を用いて実証するのが，テストブランケットモジュール(TBM)試験計画である。日本は，量研を実施担当として TBM 試験計画に参画しており，水冷却固体増殖(WCCB)方式のテストブランケットシステム(TBS)の開発を主導している。

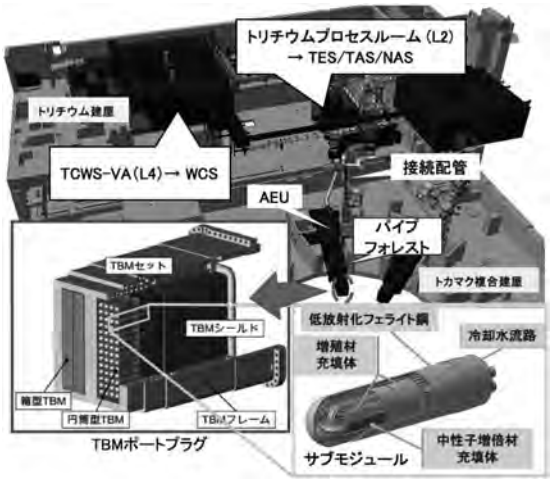


図7　テストブランケットシステムの設置場所

TBS は TBM と遮蔽体を合わせた TBM セット，TBM を冷却する水冷却システム(WCS)，TBM 内の生成トリチウムを回収するトリチウム回収システム(TES)，トリチウム生成量の推定に必要な TBM と周辺の中性子データを取得する中性子放射化箔気送管システム(NAS)，これらの運転制御，データ収集を行う計装制御システムで構成され，TBM セットは真空容器内，それ以外はトリチウム建屋等に設置される(図 7)。ITER の構成機器や持込機器は，ITER 機構による概念，詳細，最終設計の 3 段階の設計レビューと承認を経て，製作へと進む。現在は詳細設計段階にあり，2029 年中頃までに TBS を製作し ITER に持ち込む予定である。

詳細設計では，概念設計レビューで認識された ITER との取合いについて条件を決定し，産業界の協力を得て，具体化設計を進めている。未確定の取合い条件を仮定して一次設計した結果，割り当て区域に収めるには合理化を要することが判明し，主要機器(TES の低温吸着塔の廃止等)の最適化を図っている。また，最近では TBM 筐体の設計変更が大きな作業である。従来の箱型筐体では，耐圧性を維持しようとすると筐体の壁が厚肉となり，炉内機器の重量制限を守るために筐体が小さくなり，トリチウム増殖性能が著しく低下する問題があった。燃料自給に足る増殖性能を TBM で実証する必要はないが，その能力の科学的検証にはトリチウム回収と定量性の観点で生成量が多いことが有利である。そこで，耐圧性で有利な円筒形状の導入を検討した結果，重量制限を満たし，増殖性能も向上できることがわかった。議論の末，設計変更が国内で承認されたため，ITER 機構に設計変更を申請し，筐体限定の設計レビューを受けることとなった。その対応で設計詳細化を進めるなか，増殖性能をより向

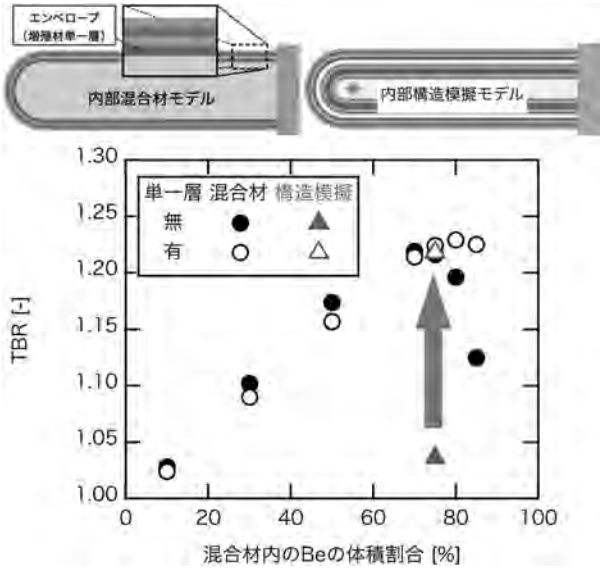


図 8　筐体内の Be の割合と TBR の関係

上する方法を考案した。具体的には，サブモジュール内部の中性子の状況を分析したところ，トリチウム生成反応に寄与せず構造材料に捕獲される中性子が多いことが判明し，筐体内側にエンベロープと称する増殖材の単一層を設けることを考案した[10)]。図 8 は筐体内部のベリリウム(Be)の割合とトリチウム増殖比(TBR)の関係で，筐体内部の領域の 90%が機能材料で占められており，横軸はそれを 100%とした時の Be の割合である。変数最適化のため機能材，構造材，冷却水の混合材で計算した。Be が多いと反応するリチウムが減るため TBR はピークを持つ。エンベロープを設けるとピーク位置がずれるのはエンベロープ分の増殖材が横軸の Be 割合評価に含まれていないからであるが，TBR の最大値が増加していることがわかる。この比率に基づき設計した内部構造を模擬したモデルでの計算結果も図に示した。内部構造を模擬すると，混合材と異なり均等に反応するわけではないので TBR は低下する。しかし，エンベロープを設けることでその低下を防ぐことができた。現在，製作性を考慮した筐体設計を進めている。

TBS は ITER の調達設備ではないため，設計は取合い条件を ITER 機構と確認しながら進めている。しかし建設が進んでいるため，既に交渉の余地が無いもの，ITER の設計変更に伴い条件の変更が強いられる場合もある。これらは，「TBM でどのような試験を行い，どのようなデータを得るか」に大きく影響する。量研では，TBM の安全実証試験を実施する施設・設備の整備も始まる。産学との一層強固な協力体制を築いて進める必要がある。

― 参 考 文 献 ―

1) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/index.htm
2) N. Koizumi *et al.*, "Progress in Procurement of ITER Toroidal Field Coil in Japan," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no.4, 4203004, 2016.
3) M. Iguchi *et al.*, "Progress of ITER TF Coil Case Fabrication in Japan," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 3, 4202105, 2018.
4) M. Kashiwagi, *et. al.*, "Recent progress in R&D for long pulse and ultra-high voltage components for the ITER HNB", Fusion Eng. Des., 2015, vol. 96-97, p. 107-112.
5) H. Tobari, *et. al.*, "Completion of DC 1MV power supply system for ITER Neutral Beam Test Facility", IAEA FEC, FIP/P1-10, 2018.
6) 渡邊和弘 他：5. ITER NBTF 電源高電圧機器の製作，J. Plasma Fusion Res., 2016, vol. 92, no. 6, p. 414-419.
7) K. Sakamoto *et al.*, "Achievement of robust high- efficiency 1 MW oscillation in the hard-self-excitation region by a 170 GHz continuous-wave gyrotron" Nat. Phys. 3, 411(2007).
8) Y. Oda *et al.*, "Completion of 1st ITER Gyrotron Manufacturing and 1 MW Test Result", IAEA FEC, FIP/1-2Ra, 2018.
9) K. Kajiwara *et al.*, "Improvement of ITER Equatorial EC Launcher Design for Poloidal Steering Compatibility", IAEA FEC, FIP/P1-11, 2018.
10) H. Gwon *et al.*, Tritium breeding capability of water cooled ceramic breeder blanket with different container designs, 30th Symposium on Fusion Technology (SOFT2018), P4. 166, 16th - 21st Sep., 2018, Sicily, Italy (under the review on Fusion Eng. Des.).

著 者 紹 介

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

竹永秀信（たけなが・ひでのぶ）
(専門分野/関心分野)プラズマ物理。原型炉開発総合戦略タスクフォース委員として，アクションプランやロードマップの策定に貢献。

布谷嘉彦（ぬのや・よしひこ）
(専門分野/関心分野)核融合用超伝導コイルの開発に携わり，現在は日本での ITER 機器開発の管理業務を担当。

中本美緒（なかもと・みお）
(専門分野/関心分野)核融合用超伝導コイルの開発

平塚淳一（ひらつか・じゅんいち）
(専門分野/関心分野)中性粒子入射加熱，負イオン加速器

池田亮介（いけだ・りょうすけ）
(専門分野/関心分野)ジャイロトロン，プラズマ高周波加熱

林　巧（はやし・たくみ）
(専門分野/関心分野)トリチウム理工学および安全取扱。日本の TBM 計画の実施機関代表として推進。

河村繕範（かわむら・よしのり）
(専門分野/関心分野)トリチウム理工学(プロセス設計)。日本の TBM リーダーとして設計活動を推進。

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11回　トリチウム管理

富山大学　原　正憲，赤丸 悟士，中山 将人

トリチウム管理・測定では，トリチウムに特化した技術が使用されている。これは，トリチウムから放出されるβ線のエネルギーが弱く測定が難しいことに起因する。これら技術がトリチウム施設内での作業環境の維持にどのように使用されているか述べる。最後に，核融合炉ではトリチウムだけでなく，様々な核反応生成物，X線が存在しておりその中でのトリチウムの管理・測定の課題についても述べる。

KEYWORDS: Working environment, Ionization chamber, Liquid scintillation counter, limits the concentration of a radionuclide in air, Smear, Internal dose

Ⅰ．トリチウムの測定

トリチウムから放出されるβ線のエネルギーは最大で18.6 keVと弱く，測定の難しい核種の一つである。トリチウム使用施設でのトリチウム管理・測定技術は数十年の間ほとんど変わっていない[1)]。

気相中のトリチウムの測定には，試料ガスを通気できる電離箱，または比例計数管が使用されている。ごく低濃度の気相中のトリチウムを測定する場合には，気相中よりトリチウム化合物を捕集し，液体シンチレーションカウンタで測定する方法が用いられている[2)]。

液体中のトリチウム測定であれば，液体シンチレーションカウンタで直接測定が行われる。表面汚染の測定では，ふき取り法(スミア法)と呼ばれる手法が広く利用されている[3, 4)]。この方法は，ろ紙等で測定対象物の表面をふき取り，ろ紙に付着したトリチウムを測定する手法である。この方法とともに，超薄膜の窓を持つ比例計数管のトリチウムサーベイメータも利用されている。

一方，トリチウムの放出するβ線のエネルギーは弱いため，固体中のトリチウムを直接測定する手法はない。固体中のトリチウムを測定するためには，試料を燃焼させてトリチウム水としたのち，液体シンチレーションカウンタで測定する[5)]。あるいは加熱により固体中よりトリチウムを抽出し測定するなどの間接的な測定が用いられている。

これら手法は，長年にわたりトリチウム使用施設で利用されてきた方法であり，多くの知見が蓄積されている。

Ⅱ．トリチウムによる被ばく

トリチウムは放射性物質であり，法令によりその使用は規制されている。トリチウムから放出されるβ線のエネルギーは小さく，トリチウムによる外部被ばくは実質上無視できる。実際，空気中でのトリチウムからのβ線の飛程は5 mm程度である。一方，体内に取り込まれた場合，体内組織がトリチウムのβ線にさらされるため，内部被ばくは無視できない。

トリチウムが体内に取り込まれる経路としては，主に3つの経路があり，吸入，経口，吸収である。吸入は呼吸による取り込みであり，空気中のトリチウムが体内に取り込まれる。経口によるトリチウムの取り込みは，トリチウムで汚染された表面に触れた手などにより，口の付近にトリチウムが運ばれ，体内に取り込まれる。吸収はトリチウム水が皮膚等に付着し，皮膚を介して体内に取り込まれるものである。これら経路を遮断することによりトリチウムの体内への取り込みを避けることができる。

トリチウムによる被ばくを考えるうえで体内に取り込まれた化学形が重要となる。表1に「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」[6)]で定められているトリチウムの空気中濃度限度，排気中または空気中の濃度限度，排液中または排水中の濃度限度の抜粋を示す。表1の第4欄にある空気中濃度限度は元素状水素で1×10^{4} Bq/cm^{3}であり，トリチウム水では8×10^{-1} Bq/cm^{3}であ

Research frontier of tritium for fusion reactor – toward the DEMO reactor (11); Safety control of tritium in work area：Masanori Hara, Satoshi Akamaru, Masato Nakayama.

（2019年2月18日 受理）

■前回タイトル
第10回　炉材料表面および内部のトリチウム分布

表1　日本国内でのトリチウムの濃度規制値

第1欄		第2欄	第3欄	第4欄	第5欄	第6欄
放射性同位元素の種類		吸入摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)	経口摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)	空気中濃度限度 (Bq/cm^3)	排気中又は空気中の濃度限度 (Bq/cm^3)	排液中又は排水中の濃度限度 (Bq/cm^3)
核種	化学形等					
^3H	元素状水素	1.8×10^{-12}	----	1×10^4	7×10^1	----
^3H	メタン	1.8×10^{-10}	----	1×10^2	7×10^{-1}	----
^3H	水	1.8×10^{-8}	1.8×10^{-8}	8×10^{-1}	5×10^{-3}	6×10^1
^3H	有機物(メタンを除く)	4.1×10^{-8}	4.2×10^{-8}	5×10^{-1}	3×10^{-3}	2×10^1
^3H	上記を除く化合物	2.8×10^{-8}	1.9×10^{-8}	7×10^{-1}	2×10^{-3}	4×10^1

る。トリチウム水の空気中濃度限度は元素状水素の1/12500である。これはトリチウム水の吸入摂取による内部被ばくの影響が元素状トリチウムの1万倍以上大きいことを反映している。人体への被ばく影響という観点からみれば，水蒸気状トリチウムを1 Bq取り込むことは12.5 kBqの元素状トリチウムを取り込むことと対応する。

Ⅲ. 作業環境の管理

1. 空気中のトリチウム

トリチウムの内部被ばくの経路に呼吸による吸入がある。通常，作業者は作業環境の空気を呼吸するため，作業環境中のトリチウム濃度管理が被ばく低減に重要となる。表1の第4欄に示す空気中濃度限度以下とするように，トリチウムを扱う作業室では作業中は常時換気が行われる。換気量は作業室の気積(作業室の大きさ)と使用するトリチウム量により設計される。さらに，作業室は大気圧に対してわずかに陰圧に保たれ，使用施設内の空気には廊下から作業室に向けての流れが作られる。これにより，トリチウム濃度が高くなるおそれのある作業室から廊下へのトリチウムの漏洩を軽減している。

大量のトリチウムを使用する施設では，異常時に室内に放出されたトリチウムを除去する設備を設置している。これは，環境へのトリチウムの放出の低減と作業者の被ばくの軽減を目的にしている。室内へ漏洩したトリチウムの除去手法は，一般的に触媒酸化－吸着法であり，トリチウムの除去法として信頼性は高い。その原理は，室内へ漏洩したトリチウム化合物を触媒により酸化しトリチウム水へ変換する。このトリチウム水をモレキュラーシーブなどの吸着材により取り除くものである。この方法の問題点として，内部被ばくの影響の小さな元素状トリチウムを影響の大きなトリチウム水へと変換してしまうことである。室内に放出されたトリチウムが元素状水素のみであることが明らかな場合，被ばくの防止の観点よりトリチウム除去装置はトリチウム濃度を1/12500以下まで除去する能力を有する必要がある。

空気中のトリチウム濃度の測定には，二つの方式がある。(Ⅰ)室内空気を電離箱に直接導入し実時間測定を行う直接方式，(Ⅱ)トリチウム化合物をコールドトラップ，あるいは水バブラーなどに捕集し，捕集後のトリチウムを液体シンチレーションカウンタなどで測定する間接方式である。(Ⅰ)の方法に比べ(Ⅱ)の方法のほうが検出下限は低い。

(Ⅰ)の電離箱を用いる方法では，室内空気をフィルターに通すことにより空気中の微細粒子を除いた後，電離箱に導入する。電離箱の電離電流を連続的に測定することにより実時間測定を行うことができる。その検出下限値は電離箱の容積，γ線補償の有無にもよるが0.4 Bq/cm^3から0.04 Bq/cm^3程度が得られる[2)]。この値は表1の第4欄に示すトリチウム水の空気中濃度限度を測定できる程度である。電離箱ではトリチウム化合物の弁別はできないが，水蒸気透過膜を利用することでトリチウム水成分のみを測定する電離箱も開発され使用されている。電離箱を利用する際の問題点として，①外部放射線の影響，②ラドンの影響，③電離箱へのトリチウム吸着によるメモリー効果があげられる。①はγ線補償型の電離箱により軽減される。あるいは電離箱を外部放射線の影響の少ない場所に設置する。②はラドン補償の機能が付いた電離箱が販売されている。③の問題を解決した電離箱は開発されていない。

(Ⅱ)の間接方式は検出下限値が低いため，労働安全衛生法にもとづく定期的なトリチウムの作業環境測定に使用されている。作業環境測定では検出下限濃度が濃度限度の1/10以下となる手法の利用を求めている。間接方式は電離箱を用いる方法のように実時間での測定はできないが低濃度トリチウムの測定が行え，捕集方法によりトリチウムの化学形を分けて測定できる利点がある。ここで利用される捕集方法として，(a)冷却凝縮捕集法，(b)固体捕集法，(c)液体捕集法がある。測定方法と解析の詳細は参考文献2に詳しい。ここでは簡単に実際の操作について述べる。(a)冷却凝縮捕集法では，室内空気をサンプリングポンプで吸引し，吸引された空気をドライアイスなどにより冷却されたコールドトラップに導入

し，空気中の水蒸気を凝縮させる。所定量のガスを流通後，コールドトラップ内に捕集されたトリチウムを液体シンチレーションカウンタで測定する。(b)固体捕集法は冷却凝縮捕集法のコールドトラップをシリカゲル等の吸着材を充てんしたカラムに置き換えたものである。サンプリング後，カラムに捕集された水は加熱により抽出され，液体シンチレーションカウンタで測定される。(c)液体捕集法では，コールドトラップに代わり液体バブラーを用いる方法である。この方法ではドライアイスの準備，あるいはカラムを加熱する装置が必要ない利点がある。また，バブラーに入れる液体はトリチウム水を対象とするのであれば，短期間の捕集では水，長期間の捕集ではエチレングリコールを利用する[7)]。いずれの捕集方法においても，酸化触媒を利用することによりトリチウムの化学形の弁別を行うことができる。例えば，元素状トリチウムとトリチウム水を弁別する際には，上流のバブラーと下流のバブラーの間に酸化触媒を設置する。酸化触媒を加熱し，試料空気を流通することにより，上流のバブラーには試料空気中のトリチウム水が捕集される。一方，元素状トリチウムは酸化触媒上でトリチウム水へと変換される。このトリチウム水は下流のバブラーにより捕集される。所定量のガスを流通後，上流，および下流のバブラー中のトリチウム濃度を液体シンチレーションカウンタで測定することにより，試料空気中の元素状トリチウム，トリチウム水を弁別して知ることができる。

冷却凝縮捕集法，固体捕集法，液体捕集法のいずれの方法でも，自動化された装置が販売されている。最近では，吸引した試料空気中に吸収液を噴霧し，トリチウム水を吸収させ，吸収液を気液分離筒で捕集する方法も利用されている。簡便に，長期の空気中トリチウム水の濃度の平均を求める際には，市販の除湿器がトリチウム水の捕集装置として使用できる。

2. 液体中のトリチウム

表1の第4欄に示すようにトリチウム水の空気中管理基準は元素状トリチウムに比べ極めて低い。このため，使用する液体状のトリチウム水の作業環境への拡散を低減することが重要である。

高濃度かつ大量のトリチウム水の取り扱いは，極力避けるべきであるが，取り扱いが必要な場合には，グローブボックス等の目的に適合した設備内で使用を行い，作業環境への漏洩を低減する。高濃度トリチウム水は自己の放出するβ線により放射線分解を起こし，元素状トリチウム(水素ガス)と酸素ガスに分解する[8)]。トリチウムの化学的性質は水素と同様であり，可燃性の気体であることを忘れてはいけない。

低濃度のトリチウム水は放射性試薬として広く利用されており，トリチウム使用施設内の作業室で使用されている。被ばく低減の観点から，トリチウム水を取り扱う容器からの蒸発を少なくする方策が必要である。トリチウム水の温度を低くするのは，簡便で効果的な方法である。273 K の水の蒸気圧は 610 Pa であり，298 K では 3,200 Pa である。つまり，273 K での取り扱いでは，298 K の場合に比べトリチウム水の飛散は 1/5 に抑えることができる。化学反応に伴う発熱はトリチウム水の温度を上昇させるため，トリチウム水の蒸気圧は上昇する。また，トリチウム水の入った容器にはふたをすることが重要である。比較的濃度の高いトリチウム水を使用する際には，トリチウム水の有機膜を透過する性質を考慮に入れる必要がある。これはゴム手袋でも同様である。ゴム手袋を透過したトリチウム水蒸気は皮膚から吸収され内部被ばくの一因となる。トリチウム水の濃度，溶液の化学的性質にもよるが，作業中の定期的な手袋の交換に心がける。

3. トリチウムの表面汚染

日本の国内法令で定められた管理区域内の表面汚染は 40 Bq/cm^{2}以下にすることが定められている。管理区域外に持ち出すものについては 1/10 の 4 Bq/cm^{2}以下にする必要がある。

表面汚染の測定方法として，トリチウム測定用のごく薄い検出窓を持つ大面積サーベイメータにより直接測定する方法，間接的な方法であるスミア法がある。

スミア法では，測定対象物の表面をろ紙でふき取り，このろ紙を液体シンチレーションカウンタで測定することにより表面汚染の有無を判定する。広い面積をろ紙でふき取ることにより，一度に広い面積の汚染の有無を知ることができ，施設のトリチウム汚染の判定に広く使用されている。しかし，ろ紙でのふき取り効率は，対象とする物質，その表面形状，測定者により異なるため定量的な評価は難しい。さらに，ふき取ったろ紙を液体シンチレーションカウンタで測定する際には，ふき取り面を上側にしてシンチレーションバイアルに入れる。このため，測定は 2π 測定の配置となり，ろ紙に付着しているトリチウムの半分が測定されることとなる。

スミア法により判定できるトリチウム汚染の有無は，ふき取りにより表面から除かれるトリチウムに対してであり，表面に強く付着したトリチウムは測定することができない。一方，トリチウムサーベイメータでは弱く付着したトリチウムと強く付着したトリチウムの両方を測定できる。弱く付着したトリチウムは表面から脱離し，室内空気の汚染，他の物質との接触により他を汚染する。一方，強く付着したトリチウムでは，そのおそれは少ない。弱く付着したトリチウムの表面汚染の管理がより重要である。

4. 固体中のトリチウム

トリチウムのβ線のエネルギーは弱く，固体内部から外部にβ線は脱出できないため，固体内部に存在するトリチウムを非破壊で直接測定することはできない。このため，(a)加熱により固体内のトリチウムを放出させる，(b)酸素気流中で試料を燃焼させる，(c)酸あるいはアルカリで試料を溶解させるなどして固体中のトリチウムを外部に取り出し測定を行う。取り出したトリチウムは通気型電離箱，比例計数管で測定するほかに，液体バブラー等で捕集したのちに液体シンチレーションカウンタで測定を行う。捕集したトリチウムの液体が有色の場合，液体シンチレーションカウンタでの測定ではカラークエンチングの影響が表れる。これを避けるためには捕集した試料を純水で薄める，あるいは蒸留する等の前処理が必要となる。また，試料を溶解させて測定する場合では，溶解液中のイオン濃度が高く，酸性・アルカリ性になっていることから，イオン濃度の高い液体用の液体シンチレータを選定し，測定試料の2相分離や白濁を避ける。

気相中のトリチウム水蒸気の吸着材として，モレキュラーシーブが広く使用されている。モレキュラーシーブに吸着したトリチウムを含む水蒸気は，乾燥した気体の流通下で加熱することにより回収することができる。しかし，モレキュラーシーブ中にトリチウムがどれだけ残留しているかの評価は難しい。このため，気相中のトリチウム水蒸気を除去するためにモレキュラーシーブを使用すると，管理が必要なトリチウムに汚染されたモレキュラーシーブが排出される。トリチウム除去にモレキュラーシーブを使用する際には，トリチウム水を取り出しモレキュラーシーブを再利用できるように方策を立て，固体の廃棄物を増加させないようにしておく必要がある。

トリチウムの表面汚染でも述べたが，固体中に強固に捕捉されたトリチウムは空気中のトリチウム汚染を引き起こすおそれは少ない。トリチウムが固体中に強固に捕捉されているのであれば，除染をせずに保管するほうが好ましいこともある。

Ⅳ. 内部被ばく管理

トリチウムの内部被ばくの算定には，体内に取り込まれたトリチウム量を知る必要がある。しかし，体内のトリチウムを外部からの測定で知ることは難しいため，空気中のトリチウム濃度からの計算，あるいは呼気や尿を用いたバイオアッセイにより行われている。

定置式のトリチウムルームモニタを用いての内部被ばくの評価では，以下の式を使用する[9]。

$$I = C \times b \times \mathrm{t} \qquad (1)$$

ここで，I は呼吸により取り込まれたトリチウム量(Bq)，C は空気中のトリチウム濃度(Bq/cm^3)，b は単位時間当たりの作業者の呼吸量(おおよそ，1.2×10^6cm^3/h)，t は作業時間(h)である。得られた値に表1の第2欄の実効線量係数をかけることにより，内部被ばく量を算定できる。ルームモニタの指示値と作業時間が電子データとして把握できるのであれば，コンピュータにより自動で作業者の内部被ばく量をリアルタイムで算定できる。先に述べた空気中のトリチウム捕集法で評価したトリチウム濃度を使用すればより小さなトリチウムの取り込み量も評価できる。

迅速性は劣るが体内のトリチウム量はバイオアッセイ法により知ることができる[9]。体内に取り込まれたトリチウムは，取り込まれて2時間程度が経過した後には，体内で均質となる。均質となる時間が経過した後に，尿あるいは呼気中の水蒸気を採取する。採取した試料中のトリチウム量は液体シンチレーションカウンタで測定する。所定量の呼気を液体バブラーに通気させ自動で測定試料を調製する装置もある。最も簡便な方法として，ドライアイスで冷却した試験管にストローで呼気を吹き込み，呼気中の水蒸気を採取する方法がある。試験管に採取された水を液体シンチレーションカウンタで測定し，体内に取り込まれたトリチウム量を評価する。おおよそ，成人の体重の60%は水分であるので，体の水分の重さと測定されたトリチウム濃度より摂取されたトリチウム量がわかる。この値にトリチウム水の実効線量係数を適用すれば内部被ばくを評価できる。

Ⅴ. 核融合炉でのトリチウム管理の問題

ここまでは，施設内の放射性物質としてトリチウムのみの場合を想定して述べてきた。しかし，核融合炉では中性子線，X線，核反応により生じた放射性同位元素より発生する様々な電離放射線も共存する。これらは，トリチウム測定用の放射線検出器で検出され，放射線発生事象中の指示値の増加，バックグラウンドの上昇を引き起こす。γ線補償型の電離箱ではトリチウム計測用の電離箱と同形のγ線補償用の電離箱を備えるものとなり，測定装置が大型化する。

核融合炉の社会受容性を高めるために，トリチウムモニタの検出下限の改善が要請されると考えられる。しかし，現在の電離箱の検出下限は，環境中に存在するラドンによる寄与とほぼ同程度となっている。これまでのように室内の空気をフィルターでこした後，電離箱に直接流通させるのではなく，ラドン等の放射性核種を除去したのち電離箱に流通させる機構，あるいはα線とβ線により作られる電離電流パルスの波形を弁別する電子回路の付加などが必要であろう。

作業者の内部被ばく低減の観点から，大量かつ高濃度のトリチウムが使用される区画では吸入によるトリチウ

ムからの被ばく防止のためにエアーラインスーツの使用も多くなると想定される。さらに環境によっては，エアーラインスーツを用いた吸入の防止のほかにも，皮膚からのトリチウム水蒸気の吸収を避けるために不透湿性の作業性に優れたスーツの開発も必要になると考えられる。

大型のトリチウムに汚染された機器の廃棄も問題になると想定される。トリチウムから放出されるβ線のエネルギーは低いため機器の材料中に保持されたトリチウムの測定を非破壊で行うことはできない。表面汚染密度の管理は当然行われると思うが，内部のトリチウム量をどのように評価し，空気中へのトリチウム放出率をいかに見積もるかが重要となる。廃棄物軽減の観点から，強固に固体中に捕捉されたトリチウムは除染せずに保管とするなどの廃棄物管理の運用指針の策定が必要と考えられる。

― 参考資料 ―

1) 佐久間　洋一，V-3　施設内モニタリング技術，トリチウムの影響と安全管理，日本原子力学会誌，39(1997)26.
2) 労働省安全衛生部環境改善室編，1-5　冷却凝縮方法，液体捕集方法および固体捕集方法によるトリチウム化水蒸気などの空気中濃度測定方法，作業環境測定ブック，(社)日本作業環境測定協会，2000年.
3) C. Passo, R. Edler, Improve results obtained from swipe assays, application note, perkinelmer.
4) 杉浦　紳之，平　純一，竹中　圭介，山中　和夫，菅井　研自，小佐古　敏荘，表面汚染密度測定におけるスミア法のふき取り効率に影響する要因分析，保健物理，42(2007)214-220.
5) M. Hara, Y. Kawamura, T. Tanabe, Tritium measurement I - tritium in gas, liquid and solid, Chapt. 7 in Tritium: fuel of fusion reactors, editor T. Tanabe, Springer, 2017.
6) 放射線を放出する同位元素の数量等を定める件，平成12年10月23日　科学技術庁告示第5号.
7) W. J. Munyon, D. W. Reilly, J. Webb, AGHCF gaseous-effluent tritium sampling system: design considerations and performance testing results, Health Phys., 94(2008)75-85.
8) T. Itoh, T. Hayashi, K. Isobe, K. Kobayashi, T. Yamanishi, Self-decomposition behavior of high concentration tritiated water, Fusion Sci. Technol., 52(2007)701-705.
9) 被ばく線量の測定・評価方法のマニュアル策定調査委員会，第3章および第4章，被ばく線量の測定・評価マニュアル，原子力安全技術センター，2000.

著者紹介

原　正憲（はら・まさのり）
富山大学
(専門分野/関心分野)
トリチウムの安全取り扱い技術

赤丸悟士（あかまる・さとし）
富山大学
(専門分野/関心分野)
水素安全取り扱い，水素機能材料

中山将人（なかやま・まさと）
富山大学
(専門分野/関心分野)放射線管理

報告

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２　原子力安全のための組織文化と倫理

倫理委員会

日本原子力学会倫理委員会（以下，「倫理委員会」）では，東京電力福島第一原子力発電所事故を契機として，年会・大会での企画セッションや倫理研究会において，「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。これらの場においては，会員や原子力関係者だけでなく，他学会や他産業等の方々の参加も得て，意見交換や交流を行っている。本稿では，近年のこれら活動の概要について紹介する。

KEYWORDS: Ethics committee, Code of Ethics, Safety Culture

Ⅰ．災害に備える安全文化

倫理委員会では，東京電力福島第一原子力発電所事故（以下，「1F 事故」）の反省や教訓等を踏まえ，倫理の実務への実装，実務を行う個人と組織の関係，安全のための組織文化等に着目して倫理規程改定の検討を行い，2014 年 5 月に，倫理規程の改定が理事会で承認され，発行された。また，前稿で記したとおり，2018 年 1 月にも倫理規程の改定を行っている。

これら改定の内容については，年会・大会の企画セッションや倫理研究会の開催，事例集の発行を通して，会員をはじめとした関係者に浸透するように努めている。

また，年会・大会の企画セッションや倫理研究会においては，継続的に「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。本稿では，2014 年の倫理規程改定以降に実施した倫理委員会の活動について概括する。

1．災害への備えと倫理

事業者や関係者から 2011 年東北地方太平洋沖地震時（以下，「震災時」）の経験を講演いただき，災害にどのように備え，どのように行動すべきかについて倫理的な側面からの検討を行った。

(1) 第 18 回倫理研究会（2015 年 1 月 8 日：北海道大）

「より高い安全性を目指して組織は何をなすべきか」をテーマに，北海道電力の小林俊広氏から 1F 事故後に実施した泊発電所の安全対策，JR 東日本の片方喜信氏から安全文化醸成への取組みを紹介いただいた。また，1F 事故時に事故対応にあたった吉澤厚文氏（事故時は東京電力，講演時の所属は原燃輸送）から，事故の教訓と海運業における安全文化について講演いただいた。

片方氏からは，被災した列車の避難誘導の経験を通して，最終的には現場の判断を最優先にするという組織風土の醸成と現場対応能力の強化の重要性が指摘された。

吉澤氏からは，事故対応の経験から，情報伝達と相互コミュニケーションの重要性が指摘された。

(2) 2015 年春の年会　企画セッション（茨大）

震災時に日本原子力発電の東海第二発電所には高さ 5.4m の津波が襲来したが，事前の津波対策が奏功し，原子炉の冷温停止がなされ，周辺環境への被害を食い止めることができた。

講演では，震災前の茨城県の想定津波の策定経緯が茨城県土木部の松浦健郎氏から，この知見を踏まえて東海第二発電所で実施された非常用海水ポンプ室の防護壁の追設等の津波対策について日本原子力発電の剱田裕史氏から説明された。

松浦氏からは事例に学ぶ謙虚さの重要性が指摘されるとともに，剱田氏からは当事者として事前に対策をする「備えの重要性」が指摘された。

これら講演を受け，倫理委員の宇奈手一之氏より「本津波対策に見る倫理的側面の考察」と題したコメントがあり，東海第二発電所のような良好事例はとかく忘れ去られてしまうので，対策に携わった人達の事前の備え，あるいは事故時の臨機応変な行動などの積極的な対応を伝承していくことの重要性が指摘された。

(3) 第 19 回倫理研究会（2016 年 2 月 22 日：東工大）

原子力技術者が技術者倫理を問われる局面においてどのように行動すべきかをテーマに，倫理規程制定時の委員でその後も倫理委員会幹事を担われ，1F 事故当時の

Ethics for individuals and organizations working for nuclear field, which is needed to prepare for disasters; (2) Safety culture and ethics for nuclear safety：The AESJ Ethics Committee.

（2019 年 4 月 1 日 受理）

原子力安全委員会委員長であった班目春樹氏を迎え，使用済燃料輸送容器データ改ざん事例をテーマとしたパネルディスカッションと，1F 事故の経験をもとにした原子力技術者の倫理に関わる講演を通じて，参加者による意見交換を行った。

班目氏からは，データ改ざん事例の要因として，個人の倫理観，技術力，管理の仕組みに着目した議論がなされた。個人の倫理観はチェックしづらく，PDCA を回すことが難しいこと，並びに個人の倫理観が組織文化に反映され，それがまた個人の倫理観に影響するため負のスパイラルに陥るリスクがある点が指摘された。また，1F 事故対応時の経験を踏まえ，各組織の倫理面での反省点について講演いただいた。この中で，規制側が過酷事故対策には詳しくなかったこと，東電社員が消防車（原子炉注水）や重機（瓦礫除去）の操作ができなかった等の例を挙げ，①専門以外の知識についても可能な限り幅広に習得すべきこと，②決められた責務だけでなく，何が起こり得るかを考えその対処ができるように対応すべきこと，そしてその実現のためには自己研鑽だけでなく，周囲にも気を配り所属組織の改革に努める必要のあることが指摘された。また，個人の倫理観育成と健全な組織文化醸成に地道に取り組むことが最善策であるとの指摘もなされた。

(4) 2016 年春の年会　企画セッション（東北大）

震災時の貴重な経験を風化・形骸化させないため，「東日本大震災における技術者としての矜持とリーダーシップ」をテーマに，東北電力配電部門の工藤英明氏と女川原子力発電所の菅原勳氏から，東北電力における経験を伺った。

同社では創業以来，「東北の繁栄なくして当社の発展なし」を旗印に，地域社会への貢献が受け継がれている。

配電の供給域は国土の 20%，総延長は地球 14.5 周分と長大な上，台風や暴風雨雪，巨大な地震や津波に幾度も襲われ，自然災害への備えと停電復旧体制が整えられてきた。事態の重篤度に応じて社内体制が，警戒，第一非常，第二非常に三区分され，被災後の自主的復旧に向けた支店内対応，支店間応援など全社対応が図られ，自衛隊や自治体等，外部との連絡・連携の協定が結ばれている。これは原子力防災の組立てと類似であり，自然災害の度にその対応力が試されて向上し，災害復旧支援システム，地震被害推定システムなど，ロバストなハードとソフト（人）との連携ネットワークが構築されてきた。年 2 回の訓練や競技大会により対応力とモチベーションの向上が図られ，震災直後には 7 割に及んだ停電域を 3 日で 70%，7 日で 94% まで復旧。日頃の鍛錬が存分に活かされた。

女川原子力発電所では敷地全体が地震によって 1m 沈下し，海抜 13.8 m となったが，襲来した津波は高さ 13 m であり，被害は一部建屋への浸水に止まった。これは，4 m 弱の津波評価に対して，貞観津波など歴史的津波災害の教訓を重く見る意見を尊重して敷地高さを 14.8m に設定した立地時の判断が確実な安全確保をもたらした結果といえる。また，地震により 1 号機タービン建屋の常用電気盤で火災が生じたが，即座に非常用へ切替えられ，電源は確保されて全 3 機を地震後約 10 時間以内に冷温停止できた。菅原氏は，「災害対応が社の危機管理の一丁目一番地，最優先」であるとし，震災前の約 6,600 ケ所の耐震補強をはじめ，電源の重要性の認識と対策等，備えを尽くす重要性・有効性を強調された。

さらに，近隣の被災住民の方々が自主的に発電所に避難され，最大 364 名が 3ヶ月間女川原子力発電所の体育館で過ごされた。発電所ではその間，集落毎のまとまりへの配慮，社員用の備蓄食料 4,500 食の 2/3 の提供等が行われた。これは，地域住民の方々との日頃の緊密な関係作りやそれによる信頼感・親密感が，自然に行動として現れた結果といえる。原子力発電所は自然災害時に逃げ出す対象なのか，安全と安心を求めて逃げ込める施設なのか，日頃の十分な備えと住民の方々からの信頼がそれを決めるのではないかと印象付けられた。

(5) 2016 年秋の大会　企画セッション
（久留米シティプラザ）

長崎大学副学長の山下俊一氏から，「原子力の専門家としての使命と社会との係わり方」をテーマに講演いただいた。ご自身も被爆二世であり，チェルノブイリ発電所の事故後に何度も現地に足を運ばれ，小児甲状腺癌の調査および治療に当たられた経験を有している。1F 事故後，国民の関心は放出された放射能や放射線がどの程度，健康に影響を及ぼすかということであったが，山下氏は豊富な経験と研究者としての信念に基づき，一部の国民からの反発にも怯むことなく，福島での活動を続けられた。講演では，1F 事故の非常事態とその後の対応について，原子力災害専門家としての反省を交えたお話をいただいた。

ディスカッションでは，①研究者の責任感，②強い使命感を支えたもの，③今後への教訓と期待などについて質疑応答が行われ，説明責任は全て自分にあるとの覚悟，見返りがないことへの価値観，人類の安全と幸せに対する責任感，弛まぬ教育実践と指導者育成の必要性，現場で汗をかき続けることでの人間関係構築など，倫理観や矜持に関して，多くのご示唆をいただいた。

(6) 第 20 回倫理研究会（2017 年 2 月 21 日：東大）

会員以外の方々も含めて，事例集によるグループ討議を通して倫理規程の理解を深めた。討議の中で，安全を向上させる様々な施策は各事業者で取り組まれているものの，それが本当に機能し得るのか，課題はないのかという問題提起があった。これを受けて，倫理委員会では事業者の取組みと各組織で抱える課題について検討を深めていくこととした。

2. 事業者の取組みと課題

(1) 2017 年春の年会　企画セッション(東海大)

1F 事故によって失われた社会からの信頼を取り戻せるのか，即ち原子力の社会的受容性向上のために技術者倫理の視点では何が課題かという問題意識に基づき，日本学術振興会先導的研究開発委員会「原子力は未来技術たりえるか」の芹澤昭示委員長と斎藤泰司氏(京都大学)をお迎えして講演いただき，意見交換を行った。

講演では，原子力が社会からの受容性を下げている要因として①原子力事故に対する不安，②原子力技術者への不信，③エネルギー(環境)問題に対する情報の錯綜，④放射性廃棄物に対する不安が挙げられた。特に，社会からの受容性の観点では，深層防護の第 1 層の異常発生の防止から第 4 層の過酷事故の進展防止までを理解してもらうことは難しく，第 5 層の放射性物質の影響から人と環境を守ること，並びに深層防護ではないが環境を復旧すること(除染，補償など)が受容性確保に寄与するとして，以下の提言があった。

1)一般市民の技術に対する知識不足よりも，原子力技術者への不信の方が受容性を妨げていると考えられることから，技術者と市民とを仲介する専門のコミュニケータを育成するべき

2)万一の事故時に放射線の影響を受けないこと，事故後も速やかに元の生活に戻れることが重要。このため，安全な小型炉の検討や自衛隊と連携した原子炉事故時即応部隊の設置検討を行うべき

3)低放射線の生物への影響に関して，細分化された研究の体系化，物理モデル化により研究を推進し，社会への理解を深めるべき

4)人類の根本問題(資源，食料問題)に原子力技術を応用させ，技術者の育成・確保を図るべき

このような課題への倫理からの向き合い方に関して考える機会となった。

(2)2017 年秋の大会　企画セッション(北海道大)

北海道大学の奈良林直氏より 1F 事故の教訓と日米の原子力規制の比較を，北海道電力の山田篤氏より新規制基準に基づく泊発電所の安全性向上への取組みについて講演いただいた。

山田氏からは経営層とのコミュニケーションが重要なのはもちろん，普段の業務でコミュニケーションが円滑に図れる風通しの良い職場作りの重要性が指摘された。

会場からは，「倫理を語る場合，金のことを言ってはダメという人がいるが，対策費が少なければ実現性は高まるので，次善策であっても少しずつでも対策を重ねていくことが大切ではないか」との指摘があった。

災害に備えるために原子力関係者がもつべき倫理感として，すでに多くの対策を行っていることに安住せず，更なる原子力安全の実現に向けて個々のモチベーションを高めていく必要があることが認識された。

(3) 第 21 回倫理研究会(2018 年 2 月 19 日：東大)

1F 事故の前にも安全文化の醸成は行われていたものの，なぜ事故を防げなかったのか，倫理の視点でさらに議論を深めることを目的に開催した。

東京電力 HD(川村慎一氏)，東北電力(阿部正信氏)，中部電力(石田卓久氏)，北陸電力(上野晋介氏)，九州電力(永倉太一郎氏)の各事業者から安全文化への現状の取組み状況を報告いただき，また，安全文化醸成を推進している JR 東日本の片方喜信氏をお招きし，以下のテーマを議論した。

・1F 事故前後での会社の変化を実感しているか
・会社の意思決定の方法は変わったか
・個人が自主的に改善しているか，阻害要因はないか
・関係者のモチベーションについて
・海外や他産業との人材交流の取組み
・安全文化や倫理活動のマニュアル化による形骸化
・安全文化の劣化兆候に気付けるか
・規制や経営が安全文化を阻害する場合の対応

JR 東日本では「挑戦する安全文化」という概念があり，顧客を安全に輸送するサービスを提供することが事業そのものであり，設備維持等の安全の維持のために多額の資金が投じられていることが紹介された。

安全文化を広くとらえて挑戦し，日常業務に落とし込むことの重要性を再認識するとともに，徐々に劣化していく文化や不適合をどう検知し対処していくかがリスク低減の課題であることを共有した。

(4) 2018 年春の年会　企画セッション(阪大)

再稼働を果たした事業者や大学研究炉の現場の経験を，倫理や安全文化，地域のステークホルダーとのコミュニケーションの切り口も含めて共有し，講演と総合討論を行った。

関西電力高浜発電所の原子力安全統括である古田泰氏からは，美浜発電所 3 号機二次系配管破断事故などを踏まえた安全文化再構築の取組みとして，組織内の安全文化劣化の兆候や組織・人の気がかり事項を早期に把握し，経営層に意見具申する仕組み，「問題」，「気がかり」を敢えて抽出してそこに手を打つ対応など，現場での継続的な実践について報告があった。また，現場のモチベーション維持には，トップから原子力の価値や安全について明確なメッセージがあること，協力会社も含めた組織内部で不安を聞き取るためのコミュニケーションなどの重要性が指摘された。

京都大学複合原子力科学研究所の中島健氏からは，京大炉(KUR，KUCA)における 1F 事故後の安全対策，新規制基準に基づく審査対応の労苦(発電炉と同様な対応を求められた例など)，所内での自主的な検査体制による施設チェックへの取組みなどについて報告があった。また，地元自治体との信頼関係の構築や学校への出前授業などの活動への取組みや，KUR の医療照射の早期再

開を求める声も励みにつながったと紹介があった。

近畿大学原子力研究所の伊藤哲夫氏からは，近大炉の新規制基準対応に際し，産業界 OB の協力を得て対応したこと，所員が真摯に審査対応したこと，大学本部の強い後押しがあったことなどについて報告があった。また，メディアによる原子力人材育成の観点からのこまめな近大炉に関わる報道が，所員のモチベーションや地域の理解にもつながったと紹介された。また，規制当局には，グレーデッド・アプローチに基づく審査や規制要求の丁寧な説明が欲しいとの要望が述べられた。

これら再稼働を実現した現場の報告を踏まえて，倫理や安全文化の観点から，トップの明確なコミットメント，リソースをフルに活用した組織的な取組み，さらには，地域やメディアとの良好なコミュニケーションや連携が現場のモチベーションの維持・向上につながり，安全向上の良い循環を生み出している等の議論がなされた。

(5) 2018 年秋の大会　企画セッション(岡山大)

研究開発機関における安全文化について取り上げることとし，話題提供と意見交換を行った。

多くの学会員を擁する日本原子力研究開発機構(以下，「JAEA」)の伊藤公雄氏と野村紀男氏から，JAEA の施設の多様性などとともに安全文化醸成に係る取組みや，大洗研究所燃料研究棟における汚染・被ばく事故に関する再発防止対策等について説明をいただいた。JAEA では，役員による巡視・意見交換による課題の共有や安全担当課長とのトラブル情報の共有，職員の意識調査といった活動により継続的改善に努めていることが紹介された。

続いて，原子力安全推進協会の久郷明秀氏から，「組織文化について」と題して，組織文化を特徴づける要因や国際比較から見た日本の組織の特徴などが紹介され，自らの評価軸を探し，自己評価をすることが組織文化の向上に重要であるとの意見が示された。

東京大学の飯本武志氏からは，「放射線安全文化について，他」と題し，東京大学における放射線安全推進体制の改革，放射線施設における安全文化への取組みとして施設管理者アンケートに基づく考察について紹介があった。安全文化の醸成には，問題の解決により業務が合理化されることを理解してもらう必要があるなどのポイントが示された。

総合討論では，一体感を持った取組みが必要とのコメントがなされ，組織の縦横の連携が必要といった議論がなされた。また，研究機関の業務は多種多様であり，現場に寄り添った取組みが必要との指摘があった。

Ⅱ．原子力安全のための組織文化と倫理

1F 事故を踏まえた規制の見直しや安全対策強化，継続的安全性向上の指向，安全文化醸成などが取り組まれ，再稼働を果たした施設もある。今後，原子力技術の担い手はどのような倫理観を持つべきかについて，「災害に備えるために必要となる原子力関係者の倫理」等をテーマとして，さまざまな角度から議論を重ねてきた。

一方で，企業の品質問題や不祥事が後を絶たず，改めて倫理的側面から，文化，組織，個人の関係を考える必要がある。

(1) 第 22 回倫理研究会(2018 年 9 月 21 日：東大)

原子力従事者が安全の追究や災害に備える際に求められる倫理観に関し，個人および組織の文化の視点をテーマとした議論を深めた。

原子力安全推進協会の久郷明秀氏からは「安全に向けた組織文化構築」と題し，安全文化という西洋文化を我々がどのように取り扱うかという視点で講演をいただいた。各国の文化的特徴を図る評価軸として，コミュニケーション，リーダーシップ，意思決定等，個人や組織の文化を考える視点について，我が国と諸外国との類似点や相違点が示された。

電力中央研究所の長谷川尚子氏からは「安全文化再考」というテーマで，安全文化は「守る」ものではなく，学習のプロセスであり産物である等の講演をいただいた。変化する環境に合わせて，旧来のやり方や価値観を変えるにはアンラーニング(学習棄却)が必要であり，それを新しい行動への試行と繋げ，良い結果を生むという因果関係を認識させることの重要性が指摘された。

パネル討議では，「日本ではプロセスよりも結果が重視されるので，安全文化醸成を規制の中に取り入れて浸透を促進させる」ことへの是非について議論があり，ルールを作って守ることで安心し，考えないようになることを危惧するなどのコメントがあった。

Ⅲ．さいごに

倫理委員会では，これまでも倫理規程の浸透とともに，倫理について考える機会を継続的に提供してきた。「倫理」に完璧な解はないが，「より良い解が何なのか」を考えることはできる。倫理規程は，日本原子力学会が，そしてその会員がより良い解を導くための規範として策定しているものだが，どんなに倫理規程を作りこんでも，それで全てが解決できるわけではなく，常に各自が考え，行動に繋げることが重要だと考えている。

引き続き，倫理委員会の役割と責務を果たしていく。会員各位のご支援，ご協力をお願いする。

なお，文中の所属・肩書きは企画セッションや研究会が開催された当時のものである。

執筆担当：

福家　賢(倫理委員会)，中野 智仁(倫理委員会)

Focus 国内外の原子力教育事情（5）

日米大学・大学院比較（北海道大学　vs.　Purdue 大学）

北海道大学　三輪 修一郎

KEYWORDS: Engineering Education, Engineering Curriculum, Knowledge Transfer

Ⅰ．はじめに

札幌市を縦断する地下鉄南北線北 12 条駅を下車し，5 分ほど西へ歩くと 13 条門が姿を現す。この門をくぐり抜けると観光スポットとしても知られる銀杏並木が工学部建物まで続き，四季の色が人々を迎える。ここはフロンティア精神が基本理念として掲げられ，クラーク博士の名言「Boys be ambitious」が生まれた北海道大学である。感慨深いものを感じながら北海道大学の地を踏んだのが，23 年ぶりに本帰国した 2013 年春ごろ。「はじめまして」の挨拶で握手の手を躊躇なく差し出し失笑されたことにはじまり，様々な「逆カルチャーショック」を体験してきた。本稿執筆にあたっては，日本の大学（＝北海道大学）について筆者が感じた客観的感想を綴りたいと思う。筆者の願いは日本の大学を少しでも良くしたい，という想いからである。世界における日本の相対的地位低下が騒がれる昨今，本稿が少しでもポジティブな刺激となれば幸いである。

Ⅱ．「釣り方」を教える教育とは？

Give a man a fish and you feed him for a day, teach him how to fish and you feed him for a lifetime

「魚を一匹やれば一日食いつなぐが，魚の取り方を教えてやれば一生食いはぐれることはない。」 教育のあるべき理念が簡潔に表された言葉であるかと考える。暗記ベースによる答え（魚）重視の日本の教育と，答えを得るまでの論理（釣り方）を重要視する米国との根本的な違いがこの言葉に集約されていると考える。ただ，日米大学が置かれている文化や社会システムが違う点についても留意する必要がある。即戦力を育成する米国大学とは異なり，学力によるフィルタが既にかかった日本の大学の実質は就職予備校に近く，教育機関としての体をなしていると自信を持って言える大学教員は少ないのではないだろうか。日本の大学と米国の大学を比べること自体が，英語で言う Apple（リンゴ）と Orange（オレンジ）なのである。従って，米国の教育方針をそのまま国内大学に当てはめる考えはナンセンスだ。日本の大学の場合，（新卒一括採用等に見られる）凝り固まった古き良き時代の制度が改まらない限り，抜本的改革は困難であると感じる。

米国大学では所属学科以外の講義を受講することはごく当たり前のことである。筆者は Purdue 大学学部時代に環境工学を専攻していたが，土木工学系の必修科目に加え，物理学科で量子力学（単純に興味があった），理学部で生化学（研究インターン先で浄水に興味を持ったため），原子力工学科で燃料電池特論（修士課程の指導教官と出会うこととなる）を受講した。文学部で近代文学にも挑戦したが，ネイティブの文系 4 年生に混じっての読書量があまりに厳しく途中で泣く泣く履修を断念した経験もある。さっさと単位を取り終わるというよりは知のピラミッドの底辺部を広く構築し，挑戦したいという思いからであった。これは，筆者に特別な知的好奇心があった訳ではなく，Purdue 大学全体がそのような空気で包まれていた。大学とは純粋にそのような場所だと思っていた。それは原子力工学科における修士・博士課程でも同様で，筆者の専門科目である熱流動の知識を深めるため，原子力工学科のみならず機械工学科，化学工学科，数学科，等幅広い学科における受講が許されていた。米国大学の成績評価は厳しく，C 評価に到達しない学生は容赦無く落第させられる。比較的難関な流体力学の授業になると，普段見慣れない学生が再受講のため突然現れたりもする。日本式に言う，「単位を取る」「落とす」とはアメリカでは合格（Pass）・落第（Fail）と同等であるが，そのようなレベルの話は Purdue 大学工学部の学生間では殆ど無い（1, 2 年目でフィルタされる）。むしろ，就職活動，大学院進学，奨学金申請時に重要となる GPA（学生の成績評価値）が頻繁に話題となり，少しでも数値をあげるために勉学に励むのである。これだけを見ても，学業に対する日米学生の温度差は大きいかと考え

Comparison of Japanese and American Universities (Hokudai vs. Purdue)：Shuichiro Miwa.
（2018 年 12 月 17 日 受理）

るが，如何にしてそれを縮めるべきなのか？ Apple と Orange であるため縮める必要は無いという意見もあるが，技術者としての基礎を養う上で重要となる学部・大学院のカリキュラムに関しては，米国方式を有効に活用することで，国内大学の質的向上を図ることが可能と筆者は考える。

Ⅲ．一通のメール

年度末の慌ただしいある日に，一通のメールが熱力学担当の教員より届く（以下，三輪以外の名前は全て仮名）。

件名：不合格：熱力学１（山田君）

山田君，こんにちは。田中です。
中間テスト１，２，定期試験を採点し，集計したところ，60点に到達せず，不合格になりました。
このままでは，熱力学１の単位を出すことはできません。対応を相談したいので，私の研究室まで来て下さい。
＞三輪先生
こんにちは。田中です。
私の力不足で，山田君を合格にすることができませんでした。申し訳ありません。山田君にこの件を，お伝えいただけるととても助かります。

山田君とは当研究室所属の学部４年生で，卒論研究で沸騰伝熱に取り組んでいる学生である。大学院入試にも合格しており，春からは修士１年生になることが決まっている。この短いメールに国内大学の多くの問題点が集約されている。

① ２年次の必修科目であるはずの熱力学Ⅰを何故４年生が受講しており，卒論研究（しかも熱力学を基礎とする沸騰伝熱）を行っているのか？
② 力不足で不合格，対応を相談するとは具体的にどういうことか？
③ 本メールが何故研究室教員にも送信されたのか？

という３点である。本稿においてはこれらの疑問点を日米大学・大学院比較と絡め，米国 Purdue 大学と北海道大学の事例を基に考えてみることにする。

Ⅳ．カリキュラムの違い

Purdue 大学においても機械工学科の熱力学Ⅰ（全ての工学部学生が機械工学科の熱力学を受講）は難関授業の一つであり，多くの学生が落第することで知られる。この授業を落とすと，熱力学が事前必須科目（Prerequisite）となっている伝熱工学や流体力学の受講は認められず，自動的に卒業が遅れることになる。米国大学の卒業が厳しい理由の一つかと思われるが，エンジニアとしての基礎力を確実に育む上では重要な過程であり，熱力学を落としても流体力学や伝熱工学の受講が許され，沸騰伝熱の研究が行えてしまう国内大学が不思議でならない。

Purdue 大学原子力工学科のカリキュラムマップを図１に示す。１年次は初年度の工学カリキュラム（Freshman Engineering と呼ばれる）から開始し，２年次に専門分野（航空宇宙，機械，電気，土木等）を選択するため，原子力工学者として必要な授業履修が日本よりも早い段階で始まることになる。２年，３年次では基礎科目に重点を置き，３年次後半からは個人の選択で幅広く（breadth）或は，奥深く（in-depth）カリキュラムを設定することが可能な選択科目（Technical Elective）の受講が可能となる。大学院進学を考えている学生は自身の専門知見を深めるために他学科の授業を履修することも可能だ。筆者の経験から，他学科の学生と学び合える横断的な授業編成が可能な米国カリキュラムは「総合大学（University）」の象徴であり，理想とすべき大学の姿であるかと考える。

これに対して，北海道大学では機械知能工学科のカリキュラム内に原子力工学が含まれている。学生の専門分野は４年次の研究室配属で決まるが，成績順位や定員数の調整によって配属が決定するため，早い段階で自身の専門を絞ることができない。従って，制御から材料，内燃機関，原子力，プラズマ物理等，幅広い分野の単位を研究室配属に備えるため詰め込むことになる。表面的には広範囲の科目が網羅されているカリキュラムのように見えるが，理念が無い。結果，消化不良に陥る学生が多く，方向性の見えない授業の山を同期の学生同士でレールに沿うように受講する流れとなる。

授業の課題として課せられるレポートの違いについても述べたい。米国の課題は結論を得るまでのプロセスに重点を置く傾向にある。実世界においては正しい答えが存在するとは限らず，科学的な仮定や論拠を基に最適な解を求める論理と思考力が重要視される。従って，演習問題では講義で指定された方眼紙用紙に（この紙が意外と高価なため，情報量を削らず如何にシンプルに纏めるか工夫が必要となる。）Given－Find－Assumption－Schematic-Calculation-Solution という構成で，答えを得るまでの流れを分かりやすく説明しなければ満点とならない。実験レポートも同様であり，Introduction－Assumption－Procedure－Discussion and Results－Conclusion のフォーマットでワープロ入力し，第三者が実験を再現できるレベルでなければ受理されない。このやり方を１年次の実験レポートから大学院レベルの演習に至るまで徹底的に叩き込まれるため，研究を遂行するための考え方や科学論文を執筆する基礎が自然と身についていくのである。エンジニアや研究者ほど国語力とスピーチ力，論理的思考能力が重要となる職業は無いと筆

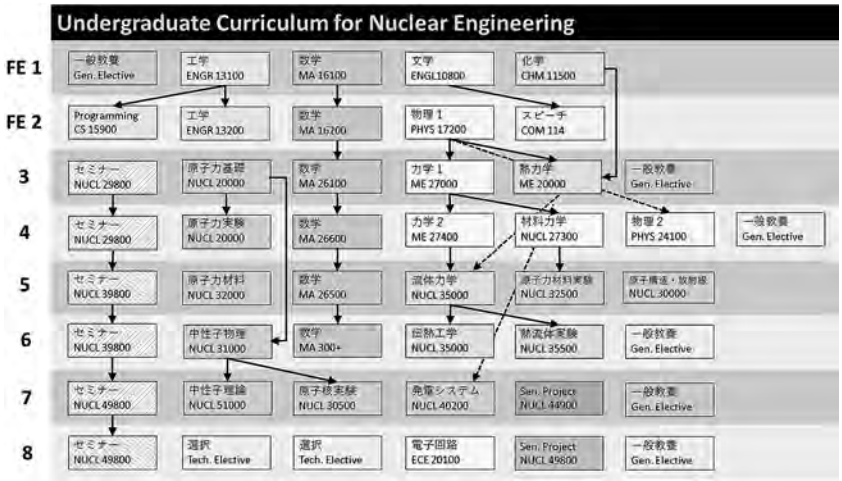


図1　Purdue 大学原子力工学科カリキュラムマップ

者は考える。国内大学においても1年次の早い段階で，日本語によるレポート執筆や，(文系・理系学生を交えた)スピーチの授業に力を入れるべきかと考える。

Ⅴ.「就職予備校」

第二に挙げた「対応を相談」はおそらく追試等により点数を上げてやる救済措置のことと示唆される。このような措置は米国大学では皆無であり，授業初日に説明される採点基準(Grading Policy)が全てである。ここまで甘やかして大丈夫かと心配になるが，「就活予備校」であるためともかく単位を与え，さっさと卒業させてやる必要があるようだ。学生も当然そのことは理解しており，「あの先生，土下座したら単位くれた。」と平然と語る姿も目にする。「教員の力不足」で学生が不合格とは論じることも馬鹿馬鹿しい。結局のところ，就職予備校の日本では，雇用主目線で全てが決まる。終身雇用で採用する新卒時には専門知識を特に求めず，研修時にじっくり叩き込めれば良い。従って，就職活動中の学部生，大学院生にはある程度の常識と忍耐力，敷かれたレールを言われた通りに歩む従順さが備わっていれば良いのである。そのような素質は学歴とほぼ比例関係にあるため，就活面接では人格やコミュニケーション能力のみを見れば良い。企業の視点からすると学歴フィルタは意外と理に適っているものなのかもしれない。

それに対し，Purdue 大学で修士号を取得するには修士論文をもとに口頭試問を行う必要があり，博士論文とほぼ同等の手続きが必要となる。論文の出来が修士獲得を左右するため，2年以内で卒業できる保証等どこにもない。修士論文は通ったが，授業を落としてしまったために留年，もしくは，サマースクールを受講する等の例も目にしたことがある。日本の場合，事前の論文提出も無く，配布されるアブストラクトと修士論文発表会という一日がかりのイベントで部門の全学生がそれぞれ15分程度の発表を行う言わばセレモニーのようなフォーマットで合否が下される。合否といっても，就職が決まっている学生が「否」となるケースはゼロに近く，発表会はセレモニーのようなものだ。修士号や学位が品質保証になっていたいのが日本の現状である。及第点に到達するために必死に勉学に励み，専門家により構成されるコミッティメンバーから研究内容を評価されるために日夜研究に励む米国の大学院生との差が生じるのは当然のように思える。

Ⅵ. 研究室配属

メールの第三の点についても論じたい。教員へのメール送信からもわかるように，学生が研究室へ配属されることにより，教員も連帯責任を一部負わされる。米国において卒業要件を満たすことは完全に学生個人の問題である。また，定員の定めのある研究室配属というシステムが存在することで，原子力分野に一切興味が無く，希望する研究室への配属が適わなかったモチベーションの低い学生の面倒を見る羽目になる。ここ最近の北海道大学では，不登校の学生に対するメンタルケアも教員の役割となっているが，研究室配属制度も一因となっているのではないか。言わば，誰も得をしないシステムなのである。勿論，教員の立場からすれば，研究費の有無に関係なく学生が配属されるのはプラスの側面もある。ただ，米国の場合は学生が研究室に配属されるのは大学院生からであり，RA(Research Assistant)の形で雇用されるのが一般である。教授・大学院生は雇用者・被雇用者の関係なのだ。従って，研究を進めるスピード感がまるで違う。国内大学においても，まずは研究のスタンダードを上げ，それを維持する仕組み作りが必要であるかと考える。学生に主体性を持たせた上で研究課題を与え，在学年数では無く卒論・修論のクオリティで評価され，学生自身で卒業要件を勝ち取る仕組みに変革されるべきでは無いだろうか。

Ⅶ. 最後に

以上，乱雑ながら筆者が感じた日米比較を簡単に述べさせて頂いた。残念ながら早急なマクロ的変化をこの国に期待するのは困難だ。これから原子力技術者を目指す国内の若手(学部生・大学院生)はどうするべきか？　日本は世界的に見ても安全で暮らしやすい快適な(Comfort な)国であるが，学生時代にこの領域(Comfort Zone)から踏み出し，成長する機会を自らの手で掴まなければならない。多国籍の留学生からなる米国大学工学部には将来のライバルとなる技術者・研究者が今もこの時に昼夜勉学に励んでいる。まずはライバルと同じ土俵に立つことから始めてみてはどうか。海外インターンでも交換留学でも何でも良い。トップレベルの留学生が集まる欧米大学への留学を勧める。留学のタイミングとしては肩書きが無く，身軽に動ける学生時代がベストだ。何かしらのカルチャーショックを受けるはずだ。そして，海の向こうから映る日本を見て欲しい。国内学生が部活やサークル活動，バイトに明け暮れている間，将来のライバル達は切磋琢磨し勉学・研究に励んでいる。母国語でない英語で必死にやりあっている留学生も沢山いる。果たして次世代の日本人技術者はグローバル市場で彼らと競い合っていけるのだろうか？　手遅れになる前にオールジャパンで国内大学改革に取り組むべきではないだろうか。

著者紹介

三輪修一郎（みわ・しゅういちろう）
北海道大学
(専門分野)原子炉熱流動，気液二相流

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－

(6 月 7 日第 11 回論文誌編集幹事会)

・4 月 16 日から 5 月 15 日までに英文論文誌に 25 報，和文論文誌に 3 報の新規投稿が有った。
・第 7 分野を主とした論文審査分野の見直し案に対するコメントを反映して，最終案を仮決定した。再度意見聴取する。
・英文誌投稿論文の Pre-Screening の手順書の内容を確認した。
・英文化 WG の進捗が報告された。Vol.2 と 3 の見積もりを依頼中。
・各グループの H30 年度活動報告と 2019 年度活動予定が報告された。
・廃炉関係特集号の入稿状況が報告された。英文誌は 9/10 月号，和文誌は 9 月号印刷の予定。
・英文誌特集号刊行に関する手順書改定案を検討した。
・今年度で退任する委員長，委員から挨拶があった。

(6 月 7 日第 12 回学会誌編集幹事会)

・委員長から学会誌アンケート結果のうち，学会の今後の方針など理事会で検討することが望ましい事項について理事会に紹介したと報告があった。
今後も引き続き，年 1～2 回のペースで同様の報告を行うことになった。
・現在，学会誌 HP に掲載している記事 PDF はモノクロ版を掲載しているが，9 月号からカラー版が掲載される予定と事務局から報告があった。
・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。

編集委員会連絡先≪hensyu@aesj.or.jp≫

談話室

教えて！専門家の皆さん　統計分析のイロハ
～ビュフォンの針～

福島県立安達高等学校１年　服部 杏菜，
福島県立安達高等学校　石井 伸弥

Ⅰ．動機および目的

テレビを見ていたり資料を読んでいたりする中で，「誤差」という言葉を目にする。意識をしないと流してしまいそうな言葉だ。しかし一度立ち止まって考えてみると，「なぜ誤差が生じるのか」「誤差をなくすことはできないのか」「そもそも誤差とは何者なのか」などさまざまな疑問が浮かぶ。そんな「誤差」に魅力を感じた私は，より多くの疑問を解決すべくビュフォンの針の実験を通して，試行の方法と誤差の関係の考察を行った。

確率的影響が主となった現在の東京電力福島第一原子力発電所事故による健康被害や風評被害を議論する時に，我々は統計の考え方を理解する必要があると考えている。この実験をきっかけとし，誤差や確率の概念を人々にどのように伝えていけば良いか考えていきたい。

前回の実験では爪楊枝を，20 本を 80 回，80 本を 20 回，160 本を 10 回，320 本を 5 回それぞれまとめて投げたときの，平行線と交わる確率を求めた。まとめる本数と平行線の間隔を変えそれぞれ試行を行ったところ，確率は平行線の間隔が広いほど低くなり，1 度に投げる本数が少ないほど高くなった(表 1)。1 度に投げた本数によって確率が変わってしまった原因は，爪楊枝がまとまったまま落下しているところにあると考えた(図 1)。そのため今回は爪楊枝を 1 本ずつ投げ，解析時に前回まとめた本数分でくくり，確率がどのように変わるのか調べた。

Ⅱ．ビュフォンの針とは

18 世紀の数学者ジョルジュ＝ルイ・ルクレール，コント・ド・ビュフォンが提起した確率論に関する問題である。床に平行線を引き，そこに針を落とした場合，線と針が交差する確率は理論上 π を含むある一定の値に定まるというものである。

図 1　1 度に 150 本の爪楊枝を投げたときの様子(右)
1 度に 20 本の爪楊枝を投げたときの様子(左)

図 2 のように幅 d の平行線に長さ L の針を落としたとき，針が落ちる範囲を定義する。

平行線に垂直な y 座標を設定し，針の中心座標 y を考える。針がランダムに落ちると仮定し，針の中心が落ちる y 座標の範囲を $-d/2 \leqq y \leqq d/2$ と定義する(図 2 のように，$y=d/4$ と $y=-3d/4$ は，平行線に対して $+d/4$ に位置するということで，2 点は同じ位置と見なす)。また，図 3 のように，針は角度 θ を持ち，その範囲を $0 \leqq \theta \leqq \pi/2$ とする。

また，平行線と針が交わる場合は，図 4 のように針の中心座標 y が，

$$y \leqq L/2\sin\theta$$

のときとなる。

理論上平行線と針が交わる確率は

$$\frac{\textit{針と平行線が交わる範囲}}{\textit{針が落ちる全範囲}}$$

となるのだが，針が落ちる全範囲，針と平行線が交わる

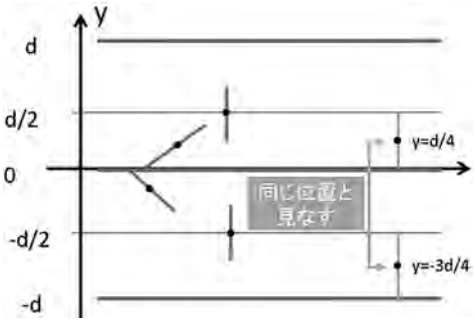


図 2　幅 d の平行線に長さ L の針を落としたときの針の中心点の y 座標の様子

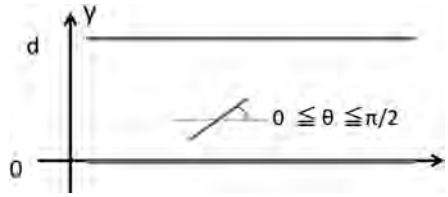


図 3　幅 d の平行線に長さ L の針を落としたときの針の角度

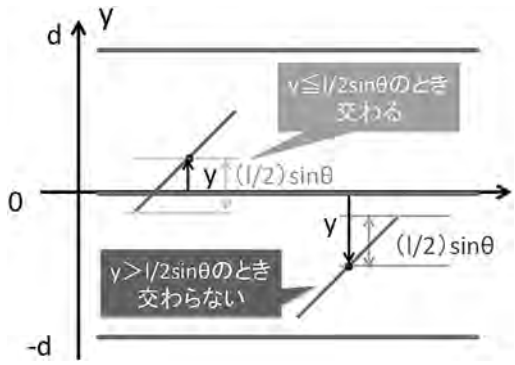


図4　針と平行線が交わるときと交わらないときの条件

範囲の場合の数は，針の中心の y 座標と針の角度 θ の組み合わせとなり，その値は無限に現れる。このような際は場合の数を面積で表現する。

針が落ちる全範囲の面積は，$-d/2 \leqq y \leqq d/2$，つまり幅 d と，$0 \leqq \theta \leqq \pi/2$，つまり面積は $d\pi/2$ となる。また，針が平行線と交わる領域（$y \leqq L/2\sin\theta$）の面積は

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{L}{2} \sin\theta d\theta \times 2 = l$$

上記の式で 2 をかけているのは負の領域を考慮する必要があるためである。以上より平行線と針が交わる確率は

$$\frac{L}{d\frac{\pi}{2}} = \frac{2L}{d\pi}$$

となる。平行線の幅が針の 1 倍（$L=d$），2 倍（$L=2d$），3 倍（$L=3d$）のとき，平行線と針が交差する確率はそれぞれ，$2/\pi$（0.637），$1/\pi$（0.318），$2/3\pi$（0.212）となる。

Ⅲ．実験

模造紙に幅が爪楊枝の 1 倍，2 倍，3 倍となるような平行線を引き，それぞれの幅に 1 本ずつ計 1,600 本の爪楊枝を投げた。1,600 本分のデータを解析するにあたり，20 本を 80 回，80 本を 20 回，160 本を 10 回，320 本を 5 回投げた時と比較できるよう同じ数でくくり，それぞれの確率と標準偏差を求めた。

Ⅳ．結果

以前の実験の結果を表 1 に示し，今回の実験結果を表 2 に示す。前回の実験では，1 回あたりの投擲本数を増やし，投擲回数を減らした場合平均値 ± 標準偏差の範囲内に理論値が含まれていなかった。一方で今回の実験では，いずれの結果でも平均値 ± 標準偏差において小数点第三位単位のずれ内に理論値が含まれていた。

表 1　まとめて投げたときの確率（前回の実験）

	$L=d$	$L=2d$	$L=3d$
20-80	0.638 ±0.112	0.348 ±0.103	0.206 ±0.094
80-20	0.627 ±0.073	0.315 ±0.048	0.18 ±0.058
160-10	0.596 ±0.072	0.286 ±0.033	0.162 ±0.026
320-5	0.549 ±0.038	0.298 ±0.024	0.156 ±0.034
理論値	0.637	0.318	0.212

表 2　1 本ずつ爪楊枝を投げたときの確率

	$L=d$	$L=2d$	$L=3d$
20-80	0.659 ±0.110	0.347 ±0.112	0.234 ±0.091
80-20	0.659 ±0.058	0.347 ±0.052	0.234 ±0.042
160-10	0.659 ±0.049	0.347 ±0.030	0.234 ±0.026
320-5	0.659 ±0.047	0.347 ±0.020	0.234 ±0.022
理論値	0.637	0.318	0.212

Ⅴ．考察

今回の実験結果より，まとめて投げた場合，お互いの爪楊枝が干渉し合い，ばらつきがおさえられてまとまって線の間に落ちたことにより，理論値より低い確率となっていた可能性が示唆された。1 試行あたりの投擲回数が多いほど標準偏差が小さくなっていることからサンプル数は多いに越したことはないのだが，前回の実験であるとおり，平均値と標準偏差から本当の値（理論値）が導けているかどうかの判断はつかないということを実感した。この問題を見抜く手法は存在するのだろうか。

この実験を行う前，ある確率を見た際，それに対して「高い」「低い」という観点でしか見ていなかった。しかし，この実験を通し，データをどのような方法で集め，解析し，どの部分を公開するのかによって，値やそこから読み取れることが変化することを知った。さらに，この実験における「確率」とは爪楊枝 1,600 本の集団が集まったときにそのような傾向がある，というものであり，投げる時点で爪楊枝 1 本が持っているのは 0 か 1 である。これは，例えば病気にかかる確率を考えることに通じるものがあるのではないだろうか。これからなんらかの確率を見た時，その数値だけで判断するのではなく，それが導かれる過程を踏まえて判断したい。

本実験において得られた値を表にまとめ，全体の傾向をおおまかにまとめるまでにとどまっている。今後，得られた値をさらに解析したいと考えている。そのための有効な手立てを探る必要がある。

― 参 考 文 献 ―

1) 数学のおもしろいこと，役に立つことをまとめたサイト
https://analytics-notty.tech/buffon-needle-experiment/
2)「数学Ⅲ」数研出版.
3) 平成 30 年度福島県生徒理科研究発表大会.

（2019 年 2 月 13 日 記）

談話室

リケジョの思い(5)
もうひとりの自分

夏の夜です。部屋は少し蒸し暑く，落ち着かなげに首を振る扇風機の音。夜風にあたれば少しは涼しかろうと，アイスを片手に窓を少し開ける。月が見えます。すこしぼやけていますが，明るくて，近くにたなびく雲を照らしています。

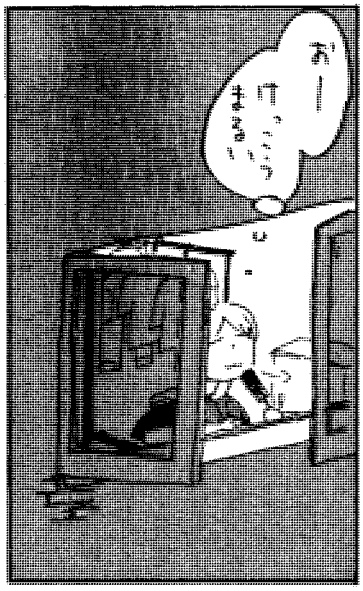
窓に体を預けて月を眺めながら，心の中ではふたりの自分が話し始めます。ひとりは「ああ，きれいだ。夏はこういうところも好きだ。」と，月を五感で味わう私。もう一人は，「月のあの部分が明るいのか。太陽はあっち側だな。」と科学の知識を使って考える私です。

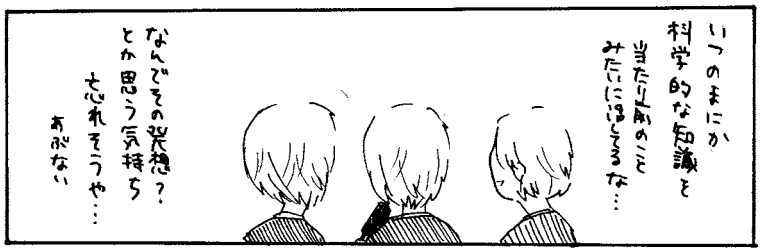
こんな，科学のことを考える自分は前にはいなかったのです。ただ感じたことを感じたまま，きれいだと思う自分だけがいて，それをごく親しいひとにだけわかってもらえたらいいと思っていました。そのうち理科で天体のことを習ったり，高校で力学にふれたり，大学で学んだりして，いわゆる科学的な知識を知り，価値観の異なる人と論理を通じて議論をするようになりました。それから月というものの科学的な側面に思いをはせる，もう一人の自分ができてきました。

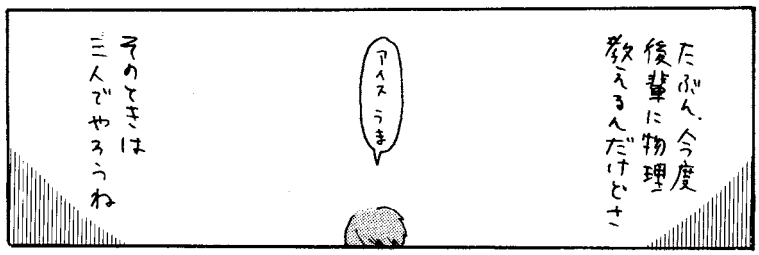
その間，15年ほど。ふりかえると長い時間をかけて科学の視点，科学の自分ができてきたのだと思います。

ところが最近，科学の自分が科学的知識を「当たり前」と捉えるようになっているのを感じます。科学と縁遠い人，自分のもっている知識をもたない人，「ああ，きれいだ。」という自分は，その当たり前に疑問をもつかもしれない。月は地球の周りを公転している。なぜそれが正しいといえるのか。どうやって確かめたのか。どのようにしてその発想が出てくるのか…。実際に，科学的な知識を学ぶとき私はいつも疑問だらけになってきました。その感覚を忘れかけている気がするのです。

なぜこんなことが気になっているかというと，学部2〜3年生の演習授業を担当することになりそうだからです。2〜3年生に「この考え方は当たり前」と思って，力学や熱力学のことを話してしまいそうな気がします。しかし，私がわずかでも科学のことを学んでこれたのは，私の目線に立ってくれて，その人自身が問い続けながら，教えてくれた人がいたからだと思うのです。私もそんな風に後輩に接したい。科学の自分よ，わかった気にはなっていないか。演習者の目線で，伴走できているだろうか。自問自答しつつ，やっていこうと思います。







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。

日々是好日

～福島浜通りだより～(2)

おすそ分けの連鎖

一般社団法人 AFW 浩　吉川 彰浩

土曜日の昼，「吉川さん，今日は家にいますか」携帯にこのメッセージが届くと，きたぞ！と思う習慣がついてきた。

私が住んでいる場所は福島県いわき市，自宅の庭先から太平洋までは 10m もない。犬の散歩でぷらっと行ける場所には漁港がある。土日ともなれば遊漁船と呼ばれる釣り舟が沖合に出ていることは良く知っている。

「家にいますか」は魚要りませんか？の隠語だ。今日も大漁に違いない，持って帰れぬほど釣りの楽しさに興じてしまった釣り人達の笑顔と困り顔が浮かんでくる。「ええ！行きますね！」とメッセージを返した。

漁港に着き見渡すと船はまだ沖合にいるようだ。見知らぬ釣り人達がめいめいに釣りをしている。とても長閑だ。この時期はメバルやアイナメだろう，近寄り耳をすませば「ヒュっ」と竿を振る音が聞こえる。

しばらくすると白波を上げながら漁船が帰ってきた。船上へ向かって手を振る。船長や乗船員の人達は見知った関係，挨拶を交わし，早速今日釣り上げたばかりの魚たちを見せてもらう。常磐沖と呼ばれる眼前の海は，海の幸に毎度溢れている。色とりどりの魚たちでクーラーボックスが溢れていた。

この日は友人が経営する古民家に 10 人ほどお客さんが泊まることを知っていたこともあり，メバル・アジ・ソイを 30 匹ほど貰って帰ることにした。この日はメバルが大漁であった。メバルは煮つけにし，他は刺にしよう。皆の喜ぶ顔が浮かんだ。

おすそ分けで頂いたものをまたおすそ分けに行く。海が目の前にあるとは言え，普段はスーパーで刺身・切り身になったものを買う。つい先ほどまで泳いでいた魚をおすそ分けに行くのは，海の豊かさだけでなく，普段触れない感動を伝えに行くような誇らしさと楽しさがある。

古民家の友人にクーラーボックスの中を見せると，「常磐ものはやっぱり凄いですね！今日のお客さんに振る舞いましょう！」と嬉しそうに返ってきた。

早速，二人で捌きにかかる。このおすそ分けの連鎖は土曜日の恒例にもなっている。二人とも大分慣れたもので，手際良く鱗をとり，頭を落とし，内蔵を綺麗にとっていく。メバルからは黄色い袋が出てきた。魚卵だ。今時期，メバルは赤ちゃんを抱えていると知る。卵が見つかるたびにこれは当たりだ！と友人とはしゃいだ。

宿に早めについたお客さんが台所に顔を出した。「えっどうしたんですか！これ！」と近づいてきた。「これが常磐ものと呼ばれる，海の幸ですよ！」と誇らしげに応える。自分が釣ったわけではなく，もらったと言うとさらに驚きの声が返ってくる。

「今日の夕飯楽しみにしててね，煮つけと刺身を作るから」と伝えると「ちょっと見ててもいいですか，捌き方を知りたいので」と，2 時間ほどであろうか，ずっとそのお客さんは傍らで海のことについて尋ねてきた。そのたびに，友人と釣りの楽しさや，あの魚はこうしたら美味いなどと，会話を交わした。

ひととおりの支度を終えて，私も数匹家で食べる分を持ち帰った。妻に今日は頂きもので夕飯をしようと持ち掛ける。妻も手慣れたもので，ちゃちゃっと煮つけと素揚げを作ってくれた。

TV を眺めながら，団らんを過ごしていると携帯に写真が送られてきた。「お客さんと一緒に頂いていまーす，煮つけが大好評です」写真の向こうでは日本酒とビールを飲みながら，楽しそうに過ごしている姿がある。ピコン！と鳴る。「メバルの卵，めちゃうまいです！」ピコン！とまた鳴る「こんなにおいしいアジの刺身食べたことないです！」その後も，ピコン！ピコン！と騒がしいことこの上ない。

おすそ分けの連鎖は，なんとも贅沢な時間へと繋がっていった。土曜日の昼が近づくとソワソワと携帯を眺める自分がこれからもいる。

(2019 年 3 月 14 日 記)

視点

〈社会〉を語る

第3回　〈社会〉がさきか，〈個人〉がさきか

岡山大学　齋藤 圭介

社会を論じることが得意な学問領域だと思われている社会学ですが，じつはそれほど単純な話ではないことを第1回と第2回で紹介してきました。私たちが目でみたり手で触れたりすることができない社会は本当に存在しているのか，あるいは，存在しているのは個人のみであって社会なんて存在していないのか。前者の考え方が方法論的集合主義――フランスの社会学者であるE. デュルケム(1858～1917)に代表される立場――，後者の考え方が方法論的個人主義――ドイツの社会学者であるM. ヴェーバー(1864～1920)に代表される立場――につながります。この2人は，社会学が大学制度のなかで一つの学問領域として確立した時期である1900年前後に活躍をした，社会学史上もっとも重要な社会学者です。現代の社会学は，なんらかのかたちでデュルケムかヴェーバーの流れを継いでいるのは間違いありません。

この二つのアプローチを駆使して，捉えどころがない社会をなんとかして科学的に記述・解釈しようと，社会学者はこれまで悪戦苦闘してきました。ただ，現在の社会学は，社会が存在するか否かで議論を続けているわけではありません。社会が存在するか否かといった議論には，いくつかの説得的な解がすでに提出されています。有名なところでは，イギリスの社会学者であるアンソニー・ギデンズ(1938～)が提唱した構造の二重性という考え方があります。

構造の二重性という考え方では，社会と個人を切り反して考えることはしません。次のように考えてみましょう。私たちは日々の生活で何かを決めるさい，完全に自由に物事を決めることは難しく，社会的な規範やルールを参照して決めることが多くあります。たとえば，車を運転するさい自分勝手な運転は許されず，交通規則を守ることが求められます。事実，私たちの多くが交通規則に従っております。個人の行動は，必ずなんらかの形で社会(的ルール)の影響下にあります。同時に，そうしたルールを守るという個人の行動の積み重ねが，社会(的ルール)を形成・維持・強化しているともいえます。ポイントは，個人は社会を作ると同時に，社会は個人を作っている，ということです。換言すると，社会(＝構造)が，個人の行動の前提条件となっており，同時にそうした個人の行動の結果として社会が存在している，ということです。この円環構造を構造の二重性と呼びます。

ある社会を考察するさい，この構造の二重性の視点は大事です。日本社会は，私たちの外部にあるわけではありません。私たちは，日本社会という固有の文脈から自由ではなく，ある種の社会的制約のなかで行動をしています(＝前提としての社会)。同時に，いまの社会のかなりの部分は，私たちの過去の行動の蓄積によって形成されてきたものです(＝結果としての社会)。この視点から，私たちは，社会を変えられるとポジティブに考えることも，あるいは同じような社会が繰り返されるとペシミスティックに考えることもできます。

また，方法論という側面でも，質的アプローチと量的アプローチとは異なるアプローチで社会に迫ろうとする立場があります。たとえば混合研究法(MMR)，質的比較分析(QCA)，テキストマイニングなどです。いずれも，コンピュータ技術の進歩とは無縁ではありません。とくにビックデータから社会を捉えようとする考え方も主流になりつつあり，社会学者のあいだでも色々な方法が試行錯誤されています。こうした質的と量的を橋渡しする第三の社会調査のアプローチは，社会学者のあいだでさいきん非常に人気があります。この第三の道が，新しい社会への捉え方を目指しているのか，ただの中庸な案なのかは，社会学者が現在抱えている方法論的にもっともホットな話題の一つだといえるでしょう。

さて，以上のような社会にたいするまなざしや，社会に迫る方法論の多様さをふまえると，社会学者も一枚岩ではなく，むしろ多種多様な問題関心をもつ集団であることが分かります。しかし，いかなる方法論を使えども，目に見えないし手で触れることができない社会をいかにしたら捉えることができるのか，という問題意識は社会学者のなかで共有しています。いかなる対象であろうと，またいかなる方法論であろうと，対象を通して〈社会〉を語るという問題関心を持っていることが，社会学者には求められているといえるでしょう。

(2019年4月8日 記)

理事会だより

会員サービスの向上への取り組み

会員サービス委員会に理事任期中二期にわたって関わらせて頂いたが，そのほとんどがホームページの改修と次期システムに向けた検討であった。確かに学会のホームページは学会の顔であり，会員との間の情報交換における重要なツールであることは言うまでも無いが，「会員サービス」はホームページを通じて行うものだけではなく，多角的に多様なチャンネルを通じて行うべきものである。本稿ではホームページだけにとどまらない会員サービスの本質的な部分について考えを述べさせて頂きたい。

「サービス」は一般的には「一連の行為やパフォーマンス，経験などを個人あるいは組織が提供し，他者への利益をもたらすもの」と定義される。この定義で重要なポイントは「他者への利益」という部分である。第一に考える必要があるのは「他者」，つまりサービス提供対象者は誰かという点である。対象者は表面的には「学会会員」ということになるが，学会は他の商業的にサービスを提供する組織とは異なり，構成員である学会員自身がサービス提供側にもなり得るという構造を持っている点に注意する必要がある。この点でサービス科学によって提唱されている「サービス提供者」と「サービス顧客」の両方が一体となり，価値を創り上げる（共創）という考え方を積極的に取り入れていく必要があると考える。もう一つのポイントは「利益」という部分である。サービスを提供するということは他者にとって利益のあるものを提供することを意味しているが，これはサービス提供対象者にとって「価値：value」を提供するということである。このサービス提供対象者にとっての「価値」は，その人が学会に何を望むかという点に深く関連している。何らかの「資格制度」の運営に関わっているような学会では，資格獲得に関する有用な情報を提供することが会員にとっての「利益」になる。ジャーナル論文の投稿先としては迅速で公正な査読プロセスを提供することが評価されることになる。このような意味で「原子力学会」が会員に提供することができる「利益」とは何なのかを考える必要があるが，原子力学会の会員構成が他の学会と比べて特殊である点を考慮する必要がある。原子力学会の会員の比率は「大学」「研究所」「メーカー・事業者」がほぼ1：1：1で三分されており，それぞれの立場で学会に対して求める「利益」の内容が異なっている。大学や研究関連の会員は学会をジャーナルの投稿先，そして研究関連の情報交換の場としての価値が大きいと考えられるが，メーカー・事業者が学会に求めるのは情報や人材の面が大きいのではないだろうか。

このように考えると今の学会が提供すべきサービスは単なるホームページによる情報提供ではないことは明確になってくる。ホームページの改修にあたっての議論で常に出てくるのは会員ページによる会員限定の情報の提供というサービスの提供であった。会員獲得という視点から会員になれば会員に限定された情報を得ることができるということは一つのセールスポイントになるということは理解できる。しかしながら実際にどのような情報が会員限定の情報として提供できるのかということになると，古い報告書等が案としてあがってくるのみで，この情報が欲しいから学会に入るという動機付けになるように資料を明確にすることができなかった。更に学術の世界はオープンアクセス化が進展しており，オープン化に乗り遅れたコミュニティーは閉鎖的であると見られる風潮がある。社会に開かれた学会を目指すのであれば，情報の公開を基本的な理念にする必要があるのではないだろうか。

最後に会員サービスという観点で見ると他の学会と比べて，産業界と大学を結ぶ機能に改善の余地がまだまだあると考える。原子力産業界にとっても優秀な人材を確保することは重要であるし，学生にとっても就職先としての原子力産業界に関する情報を得ることは重要である。原子力分野が優秀な人材を確保するためには，メディアが作っているネガティブなイメージを払拭して，原子力に前向きな興味を持ってもらうことが必要である。産業界と学生を繋ぐ場を作ることは，産業界である会員にとっても学生にとっても高い価値を提供するサービスになりうるのではないだろうか。

（東北大学　高橋　信）

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