

巻頭言

1 エネルギー政策決定の要諦とは

野瀬 豊

報告

12 福島第一原子力発電所の津波による非常用交流電源喪失についての追加検討

福島第一原子力発電所事故において、非常用交流電源は津波が原因で喪失したものと考えられている。非常用交流電源設備の設置位置と機能喪失時刻の関係に着目し、その妥当性について追加検討を行った。

山内大典, 伊達健次, 遠藤亮平, 溝上暢人
本多 剛, 野崎謙一郎, 溝上伸也



1号機におけるタービン建屋内への津波浸水イメージ

連載講座

材料挙動と計算機シミュレーションの接点 (第1回)

35 原子力材料挙動のカイネティクス計算と実験への期待

原子炉で使う鉄鋼材料は中性子に当たると脆くなる。原子炉材料では、この照射損傷がどう進むのか。それをどう予測するか。

森下和功

連載講座 核データ研究の最前線 (第2回)

40 共鳴領域における核データ測定と理論解析

中性子輸送計算技術の発展に伴い、中性子核データの精度向上ニーズが高まっている。高精度測定研究の現状と、測定と理論とのシナジーによるさらなる高精度化について述べる。

木村 敦, 原田秀郎, 国枝 賢, 片渕竜也

時論

2 削減か存続かで悩む原発大国フランス

フェッセンエイム原発の閉鎖が決まった。しかし、それには二つの条件があった。

山口昌子

4 「あり合わせでどう切り抜けるか」 — ONE PIECE のリクルーティングから 原子力界のレジリエンスを考える

渡辺 凜

解説シリーズ

19 地政学的リスクとエネルギー 第3回 中国のエネルギー需給と地政学的影響

中国の石油消費は旺盛だ。また、その広域経済圏構想はエネルギー地政学に大きな影響を与える可能性もある。日本はエネルギー安全保障策の強化が引き続き求められる。

小宮山涼一

解説シリーズ

「世界の原子力事情」(4)

24 世界の原子力を牽引する新興4カ国 (中露印韓)

福島事故後、世界の原子力開発は一時的に停滞したが、その後多くの国では原子力開発を再開させた。とりわけ積極的に原子力の拡大路線を進んでいるのが中国、ロシア、インド、韓国の新興4カ国だ。

小林雅治



鈹業化学コンビナートにおける使用済み燃料管理関係施設

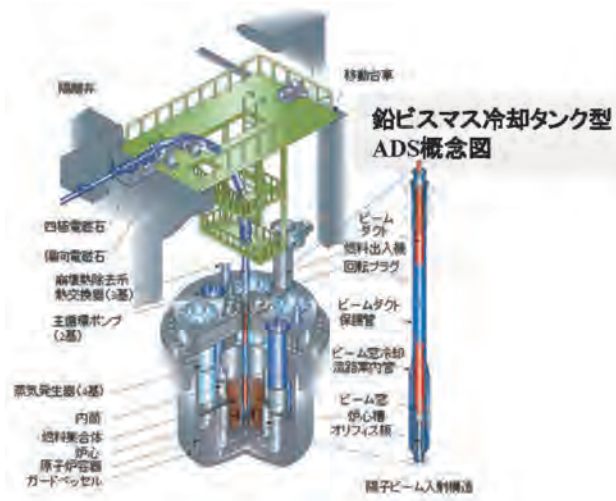
解説シリーズ

長寿命核種の分離変換技術の現状(4/最終回)

30 加速器駆動システムを用いた核変換システムと分離変換技術の成熟度

最終回となる今回は、加速器と未臨界炉を組み合わせた加速器駆動システムと核変換用窒化物燃料を用いた核変換システムと、分離変換技術の成熟度について解説する。

「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会



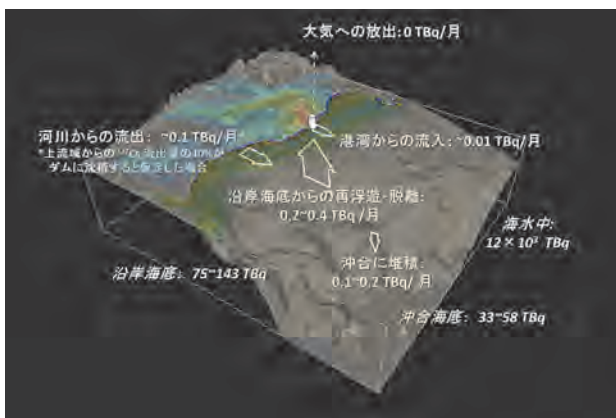
連載講座

福島的环境回復に向けた取り組み(第7回)

45 福島沿岸域における放射性セシウムの動きと存在量

1F事故によって環境に放出された放射性セシウムの約7割は海洋に運ばれたと見積られる。事故後から現在までに至るその動きを、解析した。

乙坂重嘉, 小林卓也, 町田昌彦



2016年12月における¹³⁷Csの動きと存在量

部会トピックス

50 核燃料のリサイクルに関する研究課題・技術課題の提示と若手研究者・技術者の育成に向けて

一再処理・リサイクル部会の最近の活動

当部会は2017年にはテキスト『核燃料サイクル』を発行し、2014年および2017年には核燃料サイクル施設シビアアクシデントに関する二つの報告書を公表した。

再処理・リサイクル部会

Short Report

55 FR17 国際会議の概要と高速炉開発の情勢

今年6月にロシアで、高速炉開発の最新状況が集まるFR17会議が開かれた。

上出英樹



BN800の炉室内写真 (Booklet of Beloyarsk NPP より)

会議報告

57 原子力分野のリーダー育成をめざして Japan-IAEA Joint Nuclear Energy Management School

河野裕子

理事会だより

58 CP-1 から75年; 原子力の平和利用のために

西野由高

- 6 News
- 54 From Editors
- 59 「2018年春の年会」発表・参加申込みのご案内
- 61 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 「2017年秋の大会」学生ポスターセッション受賞者一覧, 英文論文誌 (Vol.54, No.11) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

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

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

エネルギー政策決定の要諦とは

巻頭言



福井県 高浜町長

野瀬 豊 (のせ・ゆたか)

福井県立若狭高校卒。その後、都内で研鑽を積み、地元高浜町で洋菓子・イタリア料理「ラ・プラージュ」を創業。高浜町議会議員を経て、高浜町長に当選。現在三期目。

関西電力高浜発電所の4号機ならびに3号機が、盛夏を迎えるまえに営業運転を再開しました。2011年の福島第一原子力発電所の事故以降、事実上停止していた当町の原子力発電所がようやく稼動したことで地元では概ね安堵感が広がっています。しかしながら中長期の将来を見据えた時、原子力発電は多くの不確定要素を抱えています。

政府のエネルギー基本計画では今後も原子力発電を重要なベースロード電源として位置づけていますが、国民の不安が十分に解消されていないため新增設やリプレース(新旧置き換え)については謳われていません。稼動した3、4号機は昭和60年に運転を開始しており今年で32年を迎えます。新たな規制基準での運転期間は原則40年間、延長が認められた場合でも60年間です。最長でも2045年には廃炉となり、現在対策工事中の1、2号機では稼動したとしてもさらに10年早い2035年に廃炉となることが決まっています。

この8月、政府はエネルギー基本計画の見直し作業に入ります。今回は2050年までの長期を見据え、資源価格、国際情勢、再生可能エネルギーの普及見通し、パリ協定発行後の温室効果ガス削減の各国の状況等に目を配りながら原子力発電の将来像も固めていくようです。特に原子力発電の新增設・リプレースを盛り込むか否かが注目されることとなります【ちなみに関西電力の原子力発電所11機の内、2050年段階で稼動している可能性があるのは大飯発電所3、4号機の2機だけであり2053年にはすべて廃炉となります】。

私はいま、原子力発電所を立地する自治体の首長を務めています。原子力の原理主義者ではありません。原子力発電よりローコストでシビアアクシデント時のリスクも少なく、安定性があり、温室効果ガスを排出しない電源が創造されれば原子力発電は過渡期の電源としてその役割を終えればいいでしょう。つまり正当な評価の上でのフェードアウトには異論はありません。しかし現状における原子力発電の評価は、やや過剰なまでの放射線被ばくに対する不安と道半ばであるバックエンド処理の課題等をメディアが増幅させて報道することにより醸成された世論形成によるものであり、論理的評価であるとは感じられません。

加えて再生可能エネルギーに対する過大評価や、近年他国の政権が打ち出すややポピュリズム的な脱原発方針が一層ネガティブな存在に高め、いまや原子力発電を否定的に捉えることが、さも「スマート」であるような空気感となっています。

最近、二人の外交官のエピソードを思い起こすことがあります。一人は小村寿太郎もう一人は松岡洋右。日露戦争後のポーツマス講和条約を締結させた小村はもはや国力が限界となっていた日本を勝者の立場を守りながら条約の締結へと導きました。しかし帰国後に彼を待っていたものは国民からの激しい非難(戦利品が少ないため戦争継続を望む世論)でした。一方、松岡は満州事変の正当性を強気で押し切り国際連盟から脱退する行動をとり日本を窮地に追い込むこととなりましたが、帰国した彼を待っていたのは国民の熱狂と歓喜でした。小村と松岡の判断がその後の日本に与えた影響は申し上げるまでもないでしょう。

世論を無視することはできません。しかし時の世論と空気感が将来に対し正しい選択とならない場合もあることを歴史が証明しています。日本の将来像をどのように描くのか? そのためのエネルギー政策を判断する時、刹那の空気感とトレンドのみに惑わされないエネルギー基本計画の見直しにあたっていただきたいと思います。

(2017年7月31日記)



削減か存続かで悩む原発大国フランス



山口 昌子 (やまぐち・しょうこ)

元産経新聞パリ支局長

94年度ボン上田国際記念記者賞、2013年仏国家からレジオン・ドヌール章シュバリエ章。主要著書、「原発大国フランスからの警告」(ワニブックス)「フランス流テロとの戦い方」(同)「ココ・シャネルの真実」(講談社)「パリの福澤論吉」(中央公論新社)など。

2017年5月の大統領選を約1ヵ月後に控えた4月6日、パリ市内の仏電力公社(EDF)本社前で、約200人が歓声を上げた。この日、EDFグループが理事会(18人出席)を開催して、仏中東部の独ライン河近くにあるフェッセンエイムの原発の閉鎖の是非を採決。従業員代表の理事6人が閉鎖に反対し、外部者で構成する独立の理事6人が閉鎖に賛成した。国家の代表理事6人は国がEDFの株式83%を所有しているため採決には参加しない。賛否が同数の場合は議長が1票を投じる規定になっている。議長を務めたEDFグループ会長ジャン＝ベルナール・レヴィが従業員代表とは反対に、閉鎖に賛成票を投じた結果、閉鎖が決まった。オランダ政権の意向を反映したのではないかと推測されている。

但し、閉鎖は即時ではなく、次の2大条件付きだ。①仏北部フラマンビルに建設中の第三世代の原発と呼ばれる「欧州加圧水型原子炉(EPR)」が稼働開始の6ヵ月前をメドに閉鎖を国家に報告する②国家がEDFに対し、閉鎖の補償金として欧州連合(EU)も承認済みの約4億9,000万ユーロ(1ユーロ＝約120円)を支払うなどとなっている。

「閉鎖反対」を叫んで、この日、表決を待っていたフェッセンエイムの原発施設で働く従業員(全2,000人)のうち約200人が、「閉鎖」でも歓声を上げたのは、この「但し書き」があるからだ。第三世代の原発EPRは2015年から工事中止中で、予定通りに2019年に完成するかどうかは疑問の上、多額の補償金の額も決定したからだ。EPRの工事が中止になったのは、「原発の番人」と呼ばれる仏原子力安全院(ASN)がEPRの原子炉の強度がテロ攻撃などに耐えられない可能性が強いとして、ダメ押しをした結果だ。

フランスは原発58基を有し、電力の75%を原子力エ

ネルギーで発電する米国の104基に次ぐ原発大国だ。フェッセンエイムの原発(2基)は、1977年4月6日稼働開始の最古の原発だ。フランスは石油ショック後、石油産出国にエネルギーを依存しない、「エネルギーの独立」を掲げて、原発建造に邁進した。「自由、平等、博愛(連帯)」を国是とする国民にとって、「独立」は何者にも代えがたい価値観であるため、特に与野党間での争点にもならず、国民の反対もなかった。原発産業は基幹産業でもあり、EPRは英国、インドと売買契約も結んでいる。

そのエネルギー政策の基本の「原発」が目下、「閉鎖」か「存続」で揺れている。春の仏大統領選では、有力候補だった極右政党・国民戦線のマリヌ・ルベンが公約の中で、「フェッセンエイムの閉鎖反対」を明言したが、勝利したのは、右派でも左派でもない政治グループ「前進！」のリーダー、エマニュエル・マクロン前経済・再建・デジタル相だった。マクロンはフェッセンエイムの原発の「閉鎖賛成派」で、時期の明言は避けながらも原子力エネルギーへの依存率を「75%から50%へと削減」を公約。エネルギーの移行(再生可能なエネルギー＝太陽熱、水力などへの)予算として150億ユーロ(1ユーロ＝約118円)、2030年までに再生可能なエネルギーの目標率として32%を公約に挙げた。

実は、この「50%への削減」は、2012年5月の大統領選で、「福島原発事故」を受けて、フランソワ・オランド前大統領が急遽、加えた公約でもあった。結局、任期中には実現せず、2015年暮れにやっと、「フェッセンエイムの閉鎖」だけを法制化した。原発の寿命は約40年といわれ、フェッセンエイムの原発2基は寿命に達しており、「待たなし」の状態でもあったからだ。

マクロン新大統領は果たして、この「50%削減」の公約を遵守できるのかどうか。新政権の「サプライズ」と言わ

れているのは、環境運動家のニコラ・ユロの環境移行・連帯相の就任だ。シラク、サルコジ、オランダと3代の左右の大統領から就任を請われながらも拒否してきたが、内閣のナンバー3、国務相(副首相)の肩書付きで入閣したからだ。

ユロは人気環境ルポ番組「ウシュワイヤ(アルゼンチンの秘境名所)」(年に3-4回放映、2012年終了)の製作者兼主演者として、ある時は氷の割れ目から深度50mの海底に潜り、ある時は秘境に踏み入り、ある時は絶壁をよじ登ってみせ、環境保護を訴えた。2007年の大統領選では環境問題重視の世界的傾向を背景に、出馬が取り沙汰されたが断念し、その代わりに有力候補者たちと「環境協定」を結んだ。大統領に就任した暁には環境問題を重視し、環境大臣を内閣のナンバー2など重要ポストに付けることを公約する内容だ。この協定通り、サルコジ政権では、エコロジー・エネルギー・持続的開発相が内閣のナンバー2の位置を占め、オランダ政権でも継承された。ユロはフランスが議長国を務めたパリ開催の気候変動枠組条約国会議(COP21)では大統領特使として活躍した。

そのユロが、管轄相として、「大統領公約の50%削減」をどう具体的に扱うのかと注目を集める中、7月10日の記者会見で、「2025年までに(58基のうちの古い年代の稼働の原発を最大で)17基までを削減する」と具体的な数字を挙げた。(一部日本の報道では誤訳して17基まで削減すると報じたが、「58基マイナス17基」すなわち、残り数「41基」まで削減だ)ただ、「17基」は最大限の数字で、実際問題としては「削減数は数基でおわる可能性もある」(仏記者)との指摘がある。

ちなみにユロはガソリンやジーゼル自動車を2040年までに廃止し、電気自動車にすると発言し、論議を呼んでいる。ユロ自身、「非常に困難」と白状しているが、か

なり過激な環境保護者ではある。

原発産業側は身近な問題として、深刻だ。大統領選では有力候補者だった極右政党・国民戦線のルペン党首のほかに、極左グループ「服従しないフランス」のリーダー、ジャンリュック・メランションらも全廃派で、「原発反対」のエコロジストらの支持を期待したが、効力はほぼ、なかった。経済的事情から簡単には実施できないことは、「廃止反対」のフェッセンエイムの従業員が歓声を上げたことが証明している。

専門家の独立機関「グローバル・チャンス」の試算によると、20年間で58基を全廃するためには、4,530-5,040億ユーロ(1ユーロ=約120円)という天文学的数字になる。仏シンクタンク「モニターニュ研究所」が今年3月に発表した試算でも、2035年までに全廃する場合の費用は2,170億ユーロだ。さらに再生可能なエネルギー、水力、風力、太陽熱などに置き換える費用が1,790億ユーロとしている。

フランスの原発は大半が1980年代に稼働開始で、数年後には寿命に達する。補修、補強をして寿命を5、60年にする「延命策」は技術的に可能だ。EDUは「補修費用」として、500億ユーロの試算数字を挙げている。一方、会計検査院が2016年に修復費として公表した数字は、「2014-2030年までに1,000億ユーロ」だ。

フランスで原子力産業の主要関係企業は約50社、総従事者数は41万人に上る。失業率が恒常的に10%前後のフランスにとって雇用問題の面だけでも重用課題だ。ユロ自身、「各原子炉には夫々の経済的、社会的、安全性で状況が異なる」と述べ、フェッセンエイムの閉鎖は「非象徴的」で「非デマゴギー(扇動的)」と指摘し、原発全体に適応しないとしているが、「原発大国」フランスは今、「削減」か「続行」かで悩むハムレットの心境だ。

(2017年8月4日記)



「あり合わせでどう切り抜けるか」

ONE PIECE のリクルーティングから原子力界のレジリエンスを考える



渡辺 凜 (わたなべ・りん)

東京大学大学院・工学系研究科・原子力国際専攻(博士課程)

2016年6月まで原子力学会学生連絡会会長。高レベル放射性廃棄物処分のあり方や、原子力発電所の再稼働に関する分析などの調査に携わる。

私はミニマリズムがあまり好きではない。でも最近越した部屋の中は、どちらかといえば物が少ない方だと思う。引っ越す前、部屋の図面を眺めていたときは、ここに棚を、その棚には素敵なカゴを置いて収納を、とあれこれ買い揃えるつもりだったが、結局ほとんどの収納を実家から持ってきたガラクタと引越しの梱包材の組み合わせで作ってしまった。

これが思いのほか楽しい。あり合わせの材料なのに、ぴったりと寸法が合ったとき。ガラクタが思いもよらない仕方家具の役割を果たしていて、使うたびに嬉しくなる。まだ一か月と経たない新居で、お金をケチしているだけかもしれないが、今のところはこの工夫生活が入った。

そんなわけで、食卓や椅子や家電以外の家財をほぼ買わず、細々したガラクタを集め、使い道を考えては嬉々として試している。

なぜミニマリズムが気に食わないのか考えてみた。

最近流行りのミニマリズムとは、とことん無駄な物を捨て、部屋をがらんとすることで、精神的にも煩わしさから解放されることを目指す生活様式である。1年以上着ていない服、高価だが気に入らない貫利物、本来客用の備え。果ては、ガラクタの温床となる棚や、使わないときに折り畳めないような椅子や机も、捨てた方が良さらしい。

私も目障りな物を処分して清々することはあるし、もちろんゴミ屋敷には住めない。しかしこの流行の生活様式には、持ち物の数や整理整頓とは関係のない、独りよがりな思想を感じる。

ミニマリズムが推奨するのは、あらゆる身の回りのものについて、部屋に置いておくコストと天秤に、その価値を決め打ちにすることだ。その瞬間の自分に見えている範囲で、自分の「必要」を判断する。「必要」でないなら捨てる。

果たして「必要」というのはそれほどスケールの小さい問題だろうか。

*

思想家の内田樹は著書『街場のマンガ論』の中で、尾田栄一郎作『ONE PIECE』を題材として自身が他所で展開した組織論に触れ、リクルーティングについて次のように述べている。『ONE PIECE』の主人公ルフィは、海賊王を目指す冒険の途上、次々と海賊船に新しいメンバーを迎え入れる。しかし、彼は「海賊王となるために必要な何かは今この海賊船にないから、それを提供してくれる人材を求めてリクルート」しているのではない。なんとなく、偶然に出会った新しいメンバーと一緒にいたいと思い、リクルートしているだけだ。

ルフィの海賊船で「人材不足」が課題と認識されることはない。船員たちはいつでも、「海賊王となるために必要なものはこの船に揃っている」と思っている。だから難局にさしかかって新たなニーズが生まれても、そのとき手に入る「ありもの」の人や物を活用することで切り抜けてゆく。海賊船の能力やニーズは、新しい船員を迎え入れることと関係がない。

「生きのいい」組織のリクルーティングとはこういうもので、反対に、組織の不調を正当化するために「何か足りない(そのせいで、われわれの組織は満足な活動ができないのである)」という言葉づかいをしたとたん、組織はそこから崩れてゆく、という。

現代日本の若者は、ルフィの海賊船のような生きのいい組織を渴望しているにもかかわらず、就活の現場には見出し難いため、『ONE PIECE』に熱中する。累計発行部数は日本の総人口をはるかに超えるそうだ。

特定の組織ではないが、原子力へのリクルーティングは私の場合、高校1年のときに始まっていた。化学の先生が熱心で、文理入り混じる生徒に向けて懸命に原子核や電子軌道の話をした。何かの個数(電子数)で物の性質が決まる、ということに驚いた。

しかし物理の授業は理解できず、大学には文系で入った。様々な授業を齧りながら、「ある人が自らの行動と社会との関係をどう捉えているか」について時々考えていた。例えばイスラム教圏の喜捨の精神では、人の貧富も、美醜や嗜好と同じように神の思し召しとみなすという。それどころか、人が待ち合わせに遅刻するか否かも神の思し召しらしい。こんな考えを本気で信じる人から見ると、日本のテレビで日々流れるスキャンダルや責任追及のニュースはどう映るのか。格差社会、年金問題はどうか。浮かんだ疑問の一つに、廃棄物処分場の立地の問題があった。

その後、私は工学部で高レベル放射性廃棄物の処分政策について卒論を書いた。高校時代から引きずっていた核物理への強い関心と、「この国の高レベル放射性廃棄物政策は人々にどう受け止められ、どのような影響を与えているのか」をなるべく自分と違うタイプの人の視点も踏まえて考えたいという探究心と、良い出会いが重なり、工学部への進学を決意した。

振り返れば、物理や数学が不得手な文系学生にもかかわらず、工学部で原子力を学ぼうと決めたことは、興味本位で無鉄砲な選択だったと思う。

この勢いに任せた決断から、原子力との関わりが始まっている。それまでの知り合いに原子力関係者はいない。原子力発電所のPR館に行ったこともなければ、副読本を読んだこともない。何が人の興味を惹くか分からない以上、「興味を惹かれて、原子力に携わる人が増える」ことは現象としてあり得ても、有効なリクルーティング戦略になるとは思えない。

しかし、当時何を宣伝されたらネガティブキャンペーンになっていたか、は想像できる。「原子力は比較的高収入を安定して得られる」「女性は重用される」「思っているより大変じゃない」「国際的に活躍できる」。この広告で集まるのは、できるだけ楽に比較的高収入を安定して得、出世したり、国際的に活躍したりしたい人だ(しかも、そんな人がわざわざ事故後の原子力を選ぶと思えない)。原子力業界の先輩たちは、こういう文句に釣られる人を求めているのか、と幻滅したに違いない。

関わり始めてから、そんな先輩に会ったことはない。どうしたら原子力の様々な問題を改善できるか、まじめに話してくれる人ばかりだ。政策に関して硬直したマインドセットや、意見や思いを語らない習慣、交流を阻む組織間の壁といった業界全体の問題から、長い勤務時間、懲罰的な現場のマネージメントなど、たくさんの課題が挙がる。同時に、それらの課題や不満に耳を傾け、改善のために動ける人が身近にいない、とも聞く。

せっかく、それぞれにきっかけや決断を経て原子力業界に辿り着いた人材がポテンシャルを発揮できていない。その「生きのよくない」様子を見た学生が就職をためらう。

これが原子力業界の「人材不足」の正体ではないだろうか。

原子力業界のリクルーティング戦略として、「原子力への興味を惹く」ことや「原子力業界で働く魅力を喧伝する」ことは、私の経験に照らせば有効といえない。それよりも、今働いている人を、かけがえのない船員のように大切にし、彼らの潜在的な能力が状況に応じて十分発揮されるような、風通しの良い職場を整えること。そして社会における原子力の役割を再考し、「あり合わせ」の人や施設や技術を活用して、日本ならではの進み方を発見していくこと。この方が効果的なリクルーティング戦略ではないか。このような仕事ならば、私はしてみたい。

*

つましい家でも大きな業界でも、ものの「必要」というのは、外部の状況に応じて、その状況に置かれた人員が感じるものだ。外部の状況や人員の感じ方には、必ず不確実性がある。だから、そのシステムにおける何かの必要性を直ちに判断できると思うことは、思い込みだ。

そのような思い込みに基づいて、「この家にこの椅子は不要ではないか」「この組織にはもっと若者が必要だ」と論じることは有意義でない。そして『街場のマンガ論』によれば、組織の人員の士気を下げってしまう。

原子力業界はたしかに不調かもしれない。しかし不調を若手や女性などの人材不足で説明したり、即戦力採用や経費削減に尽力したりしても、「原子力業界は生きのいい組織ではない」というメッセージを内外に発信するだけで、何も生まれないだろう、ということだ。

問うべきは、「これは不要か」「何が足りないか」ではなく、「あり合わせでどう切り抜けるか」。ガラクタに思えるものも、思いがけない状況に応じて新しい役割を創出し、人員のニーズを満たす可能性を潜めている。そのために、日頃からその場に居合わせた人やものが生き生きと動ける環境を整え、目を光らせ、工夫を凝らすこと。レジリエンスというのは、こういう耕し方をした土壌で芽生えるのではないだろうか。

— 参考文献 —

- 1) 内田樹. 街場のマンガ論. 小学館 eBooks. 2014年2月28日電子書籍版発行. Kindle版.

(2017年7月24日記)



各党のエネルギー政策がまとまる

10月22日に行われる選挙を前に、各党のエネルギー政策がまとまった。

自民党は「エネルギー基本計画をふまえ、原発依存度を可能な限り低減させる」としつつも、新規規制基準に適合した原発については「立地自治体等関係者の理解と協力を得つつ、再稼働を進める」とした。希望の党は2030年までに原発ゼロをめざすとし、与野党合意のもとに、原発ゼロを憲法に明記すると公約。原発の再稼働については原子力規制委員会による確認と、確実な住民避難措置がとられることを前提に認めるとした。公明党も原発

ゼロをめざすものの、再稼働については規制基準を満たすことと立地自治体の理解を得ること、自治体の避難計画が充実したものとなることを求めた。

日本維新の会は再稼働の条件として、世界標準の安全規制の制定や避難計画策定への国の関与、地元同意の法定化を求めるとともに、原発に関わる訴訟を専門的に扱う原子力高等裁判所の設置を提案した。立憲民主党は「原発ゼロ基本法」制定の策定を明記し、共産党はすでに再稼働した原発を含め、すべての原発の停止を求めている。
(原子力学会誌編集委員会)

7年ぶりに「原子力白書」、福島発電所事故の経験を包括的に説明

原子力委員会は9月14日、2010年から2016年までの原子力利用の状況についてまとめた「平成28年版原子力白書」を公表した。同白書は、福島第一原子力発電所事故の教訓と原子力を巡る環境の変化を踏まえ、政府の取り組みについて国民および国際社会に適切に説明することを目指している。

今回の白書では「はじめに」で、7月21日に閣議決定された「原子力利用に関する基本的考え方」の全文を掲載。原子力を取り巻く環境の変化や、継続して内在する本質的な課題など重点的取り組みについて述べ、国民の原子力への不信・不安に真摯に向き合い、社会的信頼を回復することなどが必須であると喚起している。全5章から成る本編では、福島事故を踏まえての対応と復興への取り組み、原子力安全対策などの基盤的活動や国際的な知見等について、関連図表とともに紹介している。

第1章では福島第一原子力発電所事故への対応として、国会や政府の事故調査報告書の提言を示した上で、原子力規制委員会による一元的な新規規制基準適合性評価の実施や原子力事業者による自主規制組織「原子力安全推進協会」の設立など、安全確保体制を強化してきたことを説明。事故の影響が続く福島については、風評被害対策やイノベーション・コースト構想などの復興・再生の取り組みが進められていることも取り上げ、中長期ロードマップに基づいた福島第一原子力発電所の廃止措置の進捗についても記載している。

第2章では原子力利用に関する基盤的活動として、(1)原子力安全対策、(2)核セキュリティ、(3)平和利用の

担保、(4)放射性廃棄物の処理・処分、(5)原子力人材の育成・確保、(6)原子力と国民・地域社会の共生——の各分野についての取り組みを紹介。原子力人材の育成・確保については再処理、廃棄物の処理・処分、さらに福島第一原子力発電所の廃炉を確実に実施するため、様々な技術の確立が必要であり、これを担う人材の育成と確保が必要であると明記している。さらに産学官の幅広い連携による「原子力人材育成ネットワーク」では原子力人材育成ロードマップを取りまとめ、研究炉等大型教育・研究施設の維持など戦略的に取り組む事項にも触れている。

第3章では原子力のエネルギー・放射線利用の現状を示し、エネルギー資源の輸入依存度が94.4%と高く、温室効果ガス発生量低減の努力も求められる中、原子力発電所再稼働に向け、原子力への社会的信頼回復が必須であるとした。また国民の理解と協力を得つつ、安全の確保を大前提として、核燃料サイクルを確立することが国の基本方針であることを確認。さらに放射線利用に関しては、10年ぶりの調査で4兆3,700億円の経済規模に上るとした内閣府の試算を掲載している。

第4章では原子力の研究開発について、福島第一の廃炉・汚染水対策や環境回復、原子力安全研究を推進していくことなどを述べ、産業界と研究開発機関・大学をまたぐようなネットワークを構築し、厚い知識基盤の構築等を検討すべきとした。また、高速増殖原型炉「もんじゅ」は再開せずに廃止措置へ移行することにも触れている。

第5章では国際的取り組みについて(1)国際協力、(2)核軍縮・核不拡散体制の維持・強化、(3)国際的な原子力の利用と産業の動向——の各分野で、日本が世界をリードする位置付けを確立すべきことなどを述べている。

ウェブ版の白書では国民にわかりやすく内容を伝えることができるよう、記載の根拠となる情報源へのリンクが貼られる形で掲載される。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

内閣府、放射線利用の経済規模調査結果を10年ぶりに発表

内閣府(原子力委員会)は8月29日、2015年度に実施した放射線利用の経済規模に関する調査結果を発表した。それによると、工業、医療、農業などの分野で放射線を利用した製品やサービスについて算定した市場価格の総額は4兆3,698億円に上り、2005年度に実施した前回調査の4兆1,117億円の約1.06倍となった。

2015年度調査結果の内訳をみると、工業利用が最も多く2兆2,210億円(51%)、医療・医学利用が1兆9,094億円(44%)、農業利用が2,393億円(5%)だった。前回調査との比較では、工業利用のうちで9,700億円と最も多くを占める「半導体素子・集積回路」は、半導体加工の減少により約1,000億円縮小となった。アジアにおける半導

体市場が成長し、国内の市場規模が縮小したものと分析している。一方で、医療・医学利用は前回調査比で1.24倍の大幅増、農業利用はほぼ横ばいだった

また、原子力発電や原子力機器の輸出など、エネルギー利用の経済規模もまとめており、2005年度の前回調査で4兆7,410億円だったのに対し、2015年度の調査では多くの原子力発電所が停止したことにより842億円と大幅に減少している。2015年度には、関西電力高浜3号機と九州電力川内1、2号機の3基のみが稼働した。因みに、2005年度の原子力発電設備利用率は71.9%だった。原子力機器の輸出額の算定に際しては、原産協会がまとめた産業動向調査のデータが参照されている。

2050年を見据えた「エネルギー情勢懇談会」が始動

温室効果ガス削減のための新たな国際枠組み「パリ協定」を踏まえ、長期的なエネルギーの将来像について議論する経済産業大臣主催の「エネルギー情勢懇談会」の初会合が8月30日に行われた。地球温暖化対策と経済成長を両立させながら、「2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減」の目標に向け、あらゆる選択肢を追求すべく有識者から幅広く意見を求めるもの。一方、2030年を視点とするエネルギーミックスについて議論する総合資源エネルギー調査会の基本政策分科会も8月9日に始動しており、両会合ともに概ね年度内を目途に取りまとめを行う運び。

「エネルギー情勢懇談会」の初会合ではまず、資源エネルギー庁が東日本大震災以降のエネルギー情勢を巡る変化および論点を整理した上で、2050年へ向けたエネルギーを取り巻く世界の情勢を見極め、「技術革新・人材投資・海外貢献で世界をリードできる国、制度、産業としての総合戦略を構想していく」との方向性を示した。

これを受け、震災後のエネルギー政策見直しを検討した総合資源エネルギー調査会の基本問題委員会に参画していた枝廣淳子委員(東京都市大学環境学部教授)は、当時の国民的議論を振り返り、地域や市民の視点から「いろいろな人たちと議論」がなされることを求めた。

また、中西宏明委員(日立製作所会長)は、国内では電

力需要が減少傾向にあり、一方で、海外市場についても、新型原子力プラント開発におけるトラブルから投資を手控える動きがあることなど、メーカーサイドから見たエネルギーを巡る問題点をあげた上で、「バラバラではなく全体を俯瞰しながら議論する必要」を訴えた。

福島第一原子力発電所事故に関する「民間事故調」を立ち上げた船橋洋一委員(アジア・パシフィック・イニシアティブ理事長)は、原子力発電所の再稼働に対する根強い反対意見があることを指摘した上で、長期的な日本のエネルギー政策の議論に向け、「多様性」を重要な視点としてあげるなどした。

基本政策分科会長を務める坂根正弘委員(小松製作所相談役)は、「今生まれた子供が活着している間に石油は間違いなくなくなる。ガスもなくなる。石炭だけがわずかに残る」と、化石燃料の枯渇に危機感を述べたほか、現在の再生可能エネルギー技術について、2050年で実用化レベルに達するには「今芽が出ていないといけない」などと、まだ代替エネルギーにはなりえないことを強調した。

このほか白石隆委員(アジア経済研究所所長)が新興国の技術革新や中東の政情不安定化について、五神真委員(東京大学総長)が人材育成やビッグデータの活用などについてそれぞれ意見を述べた。

学術会議，RI施設の共同利用・研究拠点整備で提言

日本学術会議は9月6日、大学などにおける放射性同位元素(RI)を使用する施設の老朽化に鑑み、今後の研究・教育活動の維持に向けて、ネットワーク型の共同利用・研究拠点の整備を求める提言を発表した。提言が対象としているRIは、放射線障害防止法の規制区分で非密封RIに分類されるもので、医療分野ではがん診断に利用するモリブデン99、工業では電球の製造に利用するクリプトン85が多くを占めている。

提言では、新たな放射性医薬品の開発、各種のイメージング、トレーサー実験における研究の発展、福島第一原子力発電所廃炉や核融合エネルギーの開発に必要な人材の育成、さらに、中学・高校での放射線教育重視に伴い、大学における非密封RI使用施設が一層重要になっていると述べている。一方で、国公私立大学の放射線施設などが組織する「大学等放射線施設協議会」が2014年に281の施設を対象に実施したアンケート調査によると、10年前と比較して、RIの数量、利用件数、利用者数ともおよそ70%の施設が減少していると回答しており、また、60%の施設から設備・装置に関して老朽化の懸念が示された。設備の改修・更新には多額の経費を要する

が、直接的な成果に反映されにくいという事情から、各大学の非密封RI使用施設は廃止される傾向が続くものとみられている。

こうした施設の老朽化や、更新に多額の経費を要し利用者が減少している現状下、学術会議の専門家委員会では、すべてを維持するのではなく、「共同利用の可能な拠点を設けて、その限られた施設を効率よく維持・利用することで、全国の教育研究レベルは十分維持できる」として、ネットワーク型の共同利用・共同研究拠点の整備を提言した。これは、全国に非密封RI使用施設を持つ拠点を10~20程度整備することで、各拠点の老朽化対策として毎年実施する施設の更新を予算的にも実現可能な1~2か所程度に抑えるとともに、活動が停滞気味の施設の廃止も検討することで、日本全体での最適化を図る方策だ。また、各拠点では、多様なRIを用いた研究とともに、放射線業務従事者のための教育訓練に加え、理科教員、医師、放射線技師などに必要な放射線教育を積極的に進めるとともに、ネットワークの利点を活かし、教員の相互派遣なども含め、幅広く原子力・放射線教育におけるアウトリーチ活動を行うこととしている。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

IAEA，世界の原子力開発は2050年まで拡大すると予測

国際原子力機関(IAEA)は8月7日、国際的な原子力発電開発規模の現状と見通しを長期的に予測した報告書の2017年版を公表した。その中で、今後数年間は拡大ペースに鈍化傾向が見られるものの、長期的に見れば開発規模は現在の2倍以上に大きくなる可能性があるとの結論を明らかにした。前回の予測から数値が低下している理由として報告書は主に、いくつかの国で原子力発電所が早期閉鎖され、運転期間延長への関心が不足している点を指摘。これらは福島第一原子力発電所事故後に複数の国で取られた原子力政策や、原子力発電における短期的競争力の低下がもたらしたとしている。

報告書はまた、原子力発電の将来に影響を及ぼすファクターである建設資金の調達問題や電力市場、国民受容などを分析。低炭素電源としての原子力の可能性が一層

強く認識され、先進的な原子炉設計によって安全性と放射性廃棄物管理問題の両方が改善されれば、原子力の開発利用は飛躍的に拡大するとの見方を示した。このような分析を、IAEAはすでに7月28日の理事会で報告済みで、詳細説明についてはIAEAが毎年発行している「2050年までのエネルギー、電力、および原子力発電の予測」の第37版としてまとめ、9月の総会で公開することになっている。

同報告書でIAEAは高低両ケースの開発規模を予測。「低ケース」では、各国の原子力発電政策にほとんど変更がなく、現状傾向のまま推移することを前提とした。ただし、開発目標すべてが達成されるとしたわけではなく、「保守的だが妥当な線」で試算を行っている。それによると、世界の原子力発電設備容量は2016年末実績の3億9,200万kWが2030年までに3億4,500万kW(12%減)、2040年までに3億3,200万kW(15%減)に低下していくが、2050年までには現状レベルに回復する見通し。地域的な格差が際立っており、北米および東欧を除いた欧州全域で開発規模が大きく縮小することが予想さ

れるものの、アフリカと西アジア地域ではわずかに増加する。これとは対比的に、アジアの中部と東部地域では原子力設備容量が大きく拡大し、2050年までの成長率は43%に達することになる。現在、世界で運転可能な447基のうち、半数以上が運転開始後30年以上経過。2050年までの見通しでは設備容量に実質的な増加はないように見えるが、低ケースにおいても2050年までに3億2,000万kWが新たに設置されると予測されており、閉鎖された容量の不足分を補う形になっている。

一方の「高ケース」では、現在の経済成長率と電力需要増加率が維持され、極東地域では特に高くなることを想定。また、多くの国が、原子力をコスト効果の高い温暖化防止オプションの1つとして受け入れることを前提とした。その結果、世界の原子力設備容量は2030年までに5億5,400万kW(42%増)、2040年までに7億1,700万kW(83%増)、2050年までには8億7,400万kW(123%増)まで拡大。世界の多くの地域がこうした数値に貢献しており、成長率が最も高いアジアの中部と東部では2030年までに設備容量が倍加するほか、2040年までに現在の2.9倍、2050年には約3.5倍に増加することが予想される。北米では2050年までに設備容量が若干低下する見通しだが、東欧を除く欧州地域では、一時的に減少した容量が2050年に1億2,000万kWまで回復。これは現状レベルの1億1,300万kWをわずかに上回る数値である。

電力の効率的な利用を促進しても、世界の電力需要は新興経済国を中心に増加していく見通しで、現在28か国が原子力発電の導入に関心を示している。また、すでに原子力発電所を運転中の30か国のうち、13か国が新規の原子炉を建設中が、一時中断していた建設プロジェクトの完成に向けて積極的に活動中。16か国で新規に建設する提案やプランがあることを明らかにしている。

【米国】

エネ省の前長官が勧告、「国家安全保障上、堅固な原子力産業が必要」

米オバマ政権下でエネルギー省(DOE)長官を務めていたE. モニッツ氏の非営利団体「将来エネルギー・イニシアチブ(EFI)」は8月15日、発足後初の報告書として「米国の原子力企業は国家安全保障上の責務を満す上で果たしている重要な役割、および電力システムの供給と盤石な原子力サプライ・チェーンの維持で原子力産業界が果たしている重要な役割を検証する内容で、米国が世界規模の核不拡散政策でリーダーシップを発揮するには、これらが堅固なものでなければならない

と強調。国内で原子力企業が存続していけるよう保証するため、連邦政府に速やかなアクションを勧告している。

具体的には、連邦エネルギー規制委員会(FERC)が原子力発電とそのサプライ・チェーンにより一層の重点を置くよう指示すること、また、進展中の原子力発電所建設計画を支援し、後続の新設計画を促進する対策として、信用サポートや税制上の優遇措置、連邦政府による電力購入契約の設定など、既存のリソースや能力を出来るだけ柔軟性をもって活用するよう訴えている。

EFIはエネルギー関係の技術や政策、および事業モデルの改革促進に特化したイニシアチブ推進組織で、6月1日付けで発足したばかり。創設者のモニッツ前DOE長官は、よりクリーンで安全かつ適正価格のエネルギー技術を進展させるオプションについて、政策立案者や産業界幹部、非政府組織などを啓蒙することが目的であるとしている。

今回の報告書ではまず、米軍が防衛上の優先事項を満たし、米政府が核不拡散政策を実行するには原子力産業界の支援が必要である点に言及。具体例として、米海軍では空母や潜水艦に搭載されている原子炉約100基の設計・製造、運転・管理プログラムが民間と軍関係の両方で構成されているほか、これらの原子炉用に国産の高濃縮ウランが追加が必要になる見通しだとした。また、米国の原子力産業界が主要な原子力資機材を輸出するには、原子力法第123条に基づき相手国と原子力協力協定を締結する必要があるが、その他の輸出国による規制がそれより緩いため、中東の原子力発電市場がロシアに独占されていると指摘。米国が核不拡散目的に合致した核燃料サイクルの世界基準を設定するリーダー的役割を維持するには、長期的にも好ましくない兆候だと分析している。

報告書は次に、このような重要な役割を担う原子力サプライ・チェーンが損なわれつつあるという現状を説明した。現在、44州にある約700社が原子力製品やサービスを提供しており、これら企業が集中するトップ5州は既存商業炉の立地点に近い地域。これだけでも、強力な原子力発電部門が必要であることが裏付けられるとした。しかし、いくつかの原子力企業と議論した結果、サプライ・チェーン崩壊の可能性が暗示されており、原子炉圧力容器や蒸気発生器、加圧器、タービン発電機、復水器、特殊バルブ、静的残留熱除去系といった多くの主要機器がもはや国内では調達不能、あるいは製造能力に限界が来ていることを理由に挙げた。

また、人的資源の面でも米国の原子力部門は労働力減少の脅威にさらされているとEFIは強調。2005年エネルギー政策法にともなう「原子力カルネッサンス」により、

大学等の原子力工学課程では過去 10 年間に学生数が徐々に増加していたが、国内原子力産業の弱体化が将来的に進めば、大学の原子力教育プログラムでは国家セキュリティ上の役割を担える米国人学生の数が減り、原子力開発が拡大している国の学生が増えていく。熟練作業員の引退も大きな懸念事項であり、原子力発電部門では近い将来、25,000 人の熟練作業員が引退すると予想されている。

このような背景から EFl は、政策立案者が認識すべき事項として以下の点が重要だと勧告した。すなわち、原子力発電所の建設促進で既存のリソースや能力を最大限に活用することに加え、電源多様化などの面で原子力発電の価値が適切に評価されるような電力市場を設計するため、州政府と連邦政府が調和の取れた政策を取るべきだとした。また、サプライ・チェーン企業や電力事業者、金融機関などの包括的な連合組織を育てることを提案。これにより、国内で新しい原子力発電所を追加建設することや、海外の新設計画で競争力のある提案を行えば、リスクの分散とメリットの共有が可能になる。先進的な新世代原子炉技術の研究開発と実証に支援を行うことも重要で、2016 年に報告書が公表された DOE 長官顧問会 (SEAB) タスクフォースの例に倣い、技術開発やエンジニアリング、システム分析、概念設計などの初期段階においては、5 年間で 20 億ドル程度の援助をすべきだとした。さらに、奨学金の交付や人材を必要とする職種への訓練補助金など、原子力工学教育に対する既存の支援プログラムを維持・拡大すべきだと強調している。

【トルコ】

アックユ原子力発電所建設計画、2018 年初頭に着工の見通し

トルコの半国営アナトリア通信は 8 月 21 日、同国初の原子力発電設備となるアックユ発電所 (120 万 kW のロシア型 PWR × 4 基) 建設計画について、2018 年初頭に初号機の建設工事が開始される見通しであると伝えた。建設計画を請け負ったロシアの A. ノバク・エネルギー大臣が同通信社の独占インタビューで答えたもので、契約関係の当事者は現在、着工に必要なすべての許認可手続を年末までに終わられるよう、精力的に活動中。順調に進めば 2023 年にも 1 号機の運転を開始することができるとした。同通信社はまた、ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社が 1、2 号機用のセキュリティ・システムについて、1 日に入札手続を開始したことを明らかにした。合計 1,540 万ドル相当の契約になる予定で、1 号機用は 2018 年の春、2 号機用は 2019 年に納入されるとしている。

アックユは地中海沿岸のメルシン地区に位置しているが、4 基の原子炉 (合計 480 万 kW) がすべて完成すれば、トルコにおける総電力需要量の 6~7% が賄える計算。建設計画は原子力発電分野では世界初という「建設・所有・運転 (BOO)」方式の契約を採用しており、ロスアトム社がプロジェクト運営会社として現地に設立したアックユ原子力発電会社 (ANPP) は、同発電所の所有者として建設と運転に全責任を負う。同社はまた、原子力発電所の完成後、15 年間にわたって発電電力をトルコ電力卸売会社 (TETAS) に固定価格で販売し、建設費を回収することになるが、ロスアトム社は今年 6 月、ANPP 社株の 49% をトルコの産業・エネルギー・インフラ建設企業 3 社の連合体に分配する合意文書に調印している。

【パキスタン】

チャシュマ 4 が完成、2030 年までに原子力で 880 万 kW 追加へ

パキスタンの S. K. アバシ首相は 9 月 8 日、国内で 5 基目の商業炉となるチャシュマ原子力発電所 4 号機 (PWR, 34 万 kW) の落成式典で演説し、2030 年までに政府は原子力で 880 万 kW の設備追加という目標を達成すると約束した。同国では現在、1970 年代にカナダから導入したカラチ原子力発電所 1 号機 (カナダ型加圧重水炉, 13.7 万 kW) と、中国の協力により開発中のチャシュマ原子力発電所で 1、2 号機 (各 PWR, 32.5 万 kW) が営業運転中。続く 3 号機 (PWR, 34 万 kW) も 100 時間の信頼性実証試験を終えて昨年 12 月に落成式が開催されたほか、2011 年 12 月に着工した 4 号機は今年 6 月に初めて国内送電網に接続されていた。さらに、中国が輸出用の第 3 世代 PWR 設計と位置付ける「華龍 1 号」が、パキスタン最大の商業都市カラチから 32km の地点でカラチ 2、3 号機 (K2, K3) (各 110 万 kW) として建設中。慢性的な電力不足から脱却するため、2021 年以降の完成を目指して工事が急ピッチで進められている。

アバシ首相は演説のなかで、エネルギー危機の克服および輪番停電を終わらせることは、パキスタン政府の最優先事項であると述べ、稼働中の原子炉 3 基はクリーンで廉価な電力の供給という点で大いに役立っていると指摘した。諸外国の手を借りずにカラチ 1 号機を 40 年間、自力で運転を続けることができたことはパキスタンの誇りだとしたほか、K2 と K3 が早いペースで建設されていることにも満足の色を表明。この関連で、パキスタン原子力委員会が果たした様々な分野での貢献を称賛した。首相はまた、パキスタンの原子力発電所は信頼性が非常に高く、これらすべてが国際原子力機関 (IAEA) の保障措置を全面的に履行していると強調。将来的な建設プロ

プロジェクトにおいても、同様の指針に沿って建設されることになると保証した。

同首相はさらに、1,000万kW以上のエネルギー開発プロジェクトは輪番停電問題を克服する一助になったとし、政府としては今年11月までに終わらせると明言。特に、パキスタンと中国が2000年代から共同で進めている「中国・パキスタン経済回廊(CPEC)プロジェクト」によって、国内交通網が広範囲に整備されるだけでなく、タール石炭火力発電所の開発や、同経済回廊のパキスタン側出口であるグワダル港の発展が実現すると強調した。CPECプロジェクトは、中国西端の内陸部に位置する新疆ウイグル自治区のカシュガルから、パキスタン全土を縦断してアラビア海沿岸のグワダル港までを結ぶ経済構想。パキスタンにおける電力エネルギー・インフラ開発への資本投下を中心としたもので、同国のエネルギー不足を解消する一方、中国側も太平洋岸の商業都市から海路でマラッカ海峡等を経由することなく中東地域に到達できるため、石油資源の容易な確保が可能になると言われている。

【豪州】

鉱業評議会、原子力禁止条項の撤廃を政府に提言

ウラン埋蔵量が世界最大でありながら商業用原子力発電所が存在しないオーストラリアで、鉱物資源の探鉱や採掘、製錬等の企業を代表している鉱業評議会(MCA)は9月1日、原子力発電開発を実質的に禁じている国内法の条項を今こそ撤廃すべきだと政府に提言した。「原子力発電の禁止条項撤廃」と題する分析報告のなかで明らかにしたもので、確証済み技術である原子力が中国やインドなど、豪州の主要貿易相手国で大々的に開発が進められていることや、フランスやスウェーデン、スイスといった工業国およびカナダのオンタリオ州では、CO₂をほとんど排出しないという原子力の実績が明白に示されていると指摘した。

また、約20年前の時代錯誤な法律で原子力発電開発が禁じられた豪州は、新たな原子力技術の開発に対する国際的な協力や投資といった部分で大きな損害を被っている。感情的な誇張を排除した客観的な科学の議論に基づけば、原子力はクリーンで経済的かつ信頼性のある電源として、将来的にも世界中で重要な役割を果たし続けていくと明言。そうした技術が豪州で禁止されていることは無意味であり、エネルギー構成要素の1つとして構

築すべきだと訴えている。

MCAの分析によると、豪州では1969年にジャービス・ベイ原子力発電所の建設が提案されたものの、当時は低価格の石炭資源に恵まれていたため入札計画は最終的に頓挫した。1998年に放射線規制に関する連邦法が政党間の駆け引きによって成立したが、この頃の反原子力運動はシドニー郊外のルーカスハイツにある研究炉のリプレース問題が議論の中心だった。この法律により、豪州では原子力発電がいつのまにか禁止されていたのに加え、翌年成立した環境関係の連邦法では、「担当相は『原子力発電所』の建設と運転に関するアクションを承認してはならない」とまで明記された。しかし、近年になって状況は変化しており、豪州はエネルギー関係の課題を抱えている。このような時代遅れの禁止事項を継続する余裕はもはやなく、将来に向けて豪州はすべてのエネルギー・オプションを考慮に入れなくてはならないとした。

MCAはまた、豪州が昨年、「第4世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF)」に参加した事実にも言及。GIFは新しい原子炉技術の開発では中心的な国際協力の枠組であり、小型炉のように初期投資が非常に低く利用範囲の広い革新的な設計の開発を通じて、次世代のベンチャー投資による原子力開発が期待できるとした。このような技術革新においては、その多くが国際協力による開発の道を模索。豪州はウランの生産・供給で長い歴史があるほか、世界レベルの研究炉をシドニー近郊に持ち、核不拡散においても高い評価を得ていることから、国際的な技術革新者に専門的知見や経験の基盤を提供できると述べた。

豪州が原子力の研究開発や技術革新で新たな機会を活用し、新たな産業や主要貿易相手国との事業チャンスをリードしていくには禁止条項の撤廃が欠かせず、これはMCAの考え方では、原子力発電の恩恵を適切に認めることを意味する。具体的な方法としては、1999年の環境保護・生物多様性保全法(EPBC)、140A(1)条の(b)項目として明記された『a nuclear power plant』の4つの単語を削除することが最も早道だが、これだけで即、原子力発電所を豪州で建設できるわけではない。実際の建設プロジェクトを開始する前段階として、環境影響面や規制面で厳しい基準を満たすことや連邦政府の承認も必要になる点をMCAは強調。それでも禁止条項を撤廃することで、経済的で安全かつ環境面でも持続可能な開発への将来見通しが民間部門にもたらされ、その活動へのインセンティブになるとしている。

福島第一原子力発電所の津波による 非常用交流電源喪失についての追加検討

東京電力ホールディングス株式会社 山内 大典, 他

福島第一原子力発電所事故において、非常用交流電源は津波が発電所に到達したと考えられる時刻に集中して喪失していることから、津波が原因で喪失したものと考えている。今回、非常用交流電源設備の設置位置と機能喪失時刻の関係に着目し、津波が原因であるとするものの妥当性について追加検討を行った。検討の結果、非常用交流電源設備までの津波侵入の経路長が長いほど機能喪失時刻が遅い傾向があることが分かり、非常用交流電源は津波により機能喪失したとの従来の推定がより確からしいものとなった。

KEYWORDS: *Fukushima Daiichi NPS Accident, Tsunami, Station Blackout*

I. はじめに

1. 福島第一原子力発電所事故の原因調査に係る取り組み

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震、および津波により、福島第一原子力発電所 1 号機から 3 号機はシビアアクシデントに至った。事故の全容を解明すること、事故から得られた教訓を抽出すること、原子力発電所の安全対策に反映していくことは重要であり、当社は事故の当事者の責務としてこれらについて取り組んでいる。これまでの事故の原因調査により、地震によって外部電源を断たれた状態で、津波によって広範な安全機能を失ったことで事故が発生し、さらに事故に対する備えが不十分であったことから事故進展を止められなかったことが明らかになっている。この根本原因の詳細な調査結果については「福島原子力事故調査報告書」¹⁾と「原子力安全改革プラン」²⁾の 2 つの報告書にまとめている。前者では事故前後の状況について、事実関係を調査した結果を整理し、後者では事故の技術面での原因分析に加え、事故の背景となった組織的な原因も分析した結果をまとめた。これらを踏まえ、発電所における設備面・運用面の安全対策を強化し、当社組織内の問題を解消すべくマネジメント面の改革を進めている。

2. 事故進展メカニズムの未確認・未解明事項への取り組み

さらに、現在の安全レベルで満足することなく継続的に安全性を向上させるため、事故発生後の詳細な進展メカニズムをさらに追究することは、「燃料デブリの状態等を推定し廃炉に向けた知見を蓄積する」、「世界各国で用いられている事故シミュレーションモデルに対し、その精度向上に資する知見を提供する」、「原子力発電の安全技術を継続的に改善する」という点で重要である。当社は、「福島原子力事故調査報告書」¹⁾でまとめたデータや調査結果を基に、「事故進展メカニズムの未確認・未解明事項」として 52 件の課題を抽出し、継続的に調査・検討を進めることとしている。52 件の課題については、機器の動作・応答・特性に係るもの(3 号機原子炉隔離時冷却系の停止原因等)、炉心損傷・放射性物質放出への事故進展とそのメカニズムに係るもの(2 号機原子炉圧力挙動と燃料溶融の関係等)、地震・津波とその影響に係るもの等が挙げられる。その中でも事故進展の理解と炉心・格納容器内の状態の把握の観点で、特に重要とした優先課題 10 件(上記例示した 2 件を含む)については、現場調査や熱流動解析等を行い、第 4 回進捗報告までに調査結果を報告している³⁾。また、その他の課題についての調査結果も報告³⁾しており、本稿で取り上げる津波到達と電源喪失の関係性についても、事故時の記録を基に調査した結果を報告している。

3. 津波到達と電源喪失に関するこれまでの調査

2. で述べた「事故進展メカニズムの未確認・未解明事項の調査・検討」にて報告した津波到達と電源喪失の関係性についての調査結果の概要を述べる。

Additional examination on station blackout caused by Tsunami in Fukushima Daiichi NPS: Daisuke Yamauchi, Kenji Date, Ryohei Endo, Masato Mizokami, Takeshi Honda, Kenichiro Nozaki, Shinya Mizokami.

(2017 年 8 月 30 日 受理)

まず、本震後も各号機の非常用電源設備は正常に動作し続けていたこと、これら設備が短期間に集中して機能喪失していることから、各号機の設備は共通原因により機能喪失に至ったと考えられる。発電所内の広範なエリアにわたる共通原因としては、地震と津波が考えられる。地震については、各号機の設備が機能喪失する時刻に余震が発生していないことから、地震が機能喪失の原因であるとは考えにくい。一方、波高計、津波が発電所に到達する様子を捉えた連続写真の分析とプラントデータの分析により、津波が発電所敷地に到達したと考えられる時刻と各電源設備の機能喪失した時刻が整合していることが分かった。従って、津波によって各設備が機能喪失したものと推定した。

4. 本稿での報告内容

3. で述べたように、津波が原因で非常用電源喪失に至ったことは、事故の分析に係わる専門家の間では一般的な理解となっている。一方で、津波の浸入過程と非常用交流電源喪失の関係性が確認されていないとして、依然として地震が原因で非常用交流電源喪失に至った可能性を指摘する方もいる。このため、津波が原因であるとの推定をより確からしいものとするための追加検討として、津波の浸入過程と非常用交流電源喪失の関係性について確認を行った。本稿にて、その検討内容について報告する。

II. 検討方法および非常用交流電源設備の設置位置と機能喪失時刻について

1. 検証方法

津波浸水によって非常用交流電源喪失に至る要因としては、①母線電気事故、②非常用ディーゼル発電機(以下、D/G)ロックアウトリレー動作、③D/G制御系の不具合が想定される。

【要因①：母線電気事故】

電源系統は、電源から電源盤を経て各負荷(設備)に電気が供給される構成となっており、電源から下流の電源盤または負荷へ電気を分配する回路のことを母線と呼ぶ。また、電源、電源盤、各負荷の間にはスイッチの一種である遮断器が設置してあり、これら遮断器は回路構成を変更したり、負荷を入り切りしたり、異常状態が生じたときに回路を切り離したりする役割を担っている。電源系統内で電気事故が発生した場合、波及的影響を防止するため、事故点に一番近い上流側の遮断器を開放し事故点を隔離する設計となっている。そのため、非常用交流母線に電気事故が発生すると、D/Gと非常用高圧電源盤(メタクラッドギア、以下M/C)の間にあるD/G遮断器が開放し母線への電源供給が途絶えることとなる。

【要因②：D/Gロックアウトリレー動作】

D/Gロックアウトリレーとは、D/Gのディーゼル機

関の運転に係る異常や発電機側の電氣的な異常が発生した場合に、D/Gを停止させるためのトリップ回路のことである。D/Gロックアウトリレーが動作すると、D/G遮断器が開放し、母線への電源供給が途絶える。

【要因③：D/G制御系の不具合】

D/G制御系に不具合が生じ、D/Gが正常に運転できず電気を供給できない状態になった場合、D/G遮断器が開放しなくとも母線への電源供給ができなくなる。

従って電源設備が浸水すると、地絡や短絡、端子間の通電等の電氣的なトラブルにより、これら要因①～③の事象が発生しうる。

各電源設備の津波浸水時刻については詳細に特定することは難しいものの、津波が浸入する経路において手前側の設備は早く浸水し、奥側の設備は遅れて浸水するはずである。つまり、各電源設備の浸水時刻は設備までの津波浸入の経路長に相関があると考えられる。このことから、各電源設備の設置位置までの津波浸入の経路長と各電源設備の機能喪失時刻に相関があれば、津波が電源喪失の原因であるとの推定がより確からしくなる。従って、要因①～③の機能喪失モードを考慮し、各電源設備の設置位置までの津波浸入の経路長と各電源設備の機能喪失時刻を整理し関係性を確認した。

2. 各電源設備の配置と津波浸入の経路長の算出

(1)各電源設備の配置

図1に各号機建屋、海水ポンプの配置と津波遡上の想定、図2に各号機の電源設備の配置と津波の主な推定浸入経路を示す。非常用交流電源設備であるD/G、M/Cは各号機のタービン建屋に配置されている。D/G(A系：D/G1A, 2A, 3A, 5A, B系：D/G1B, 3B, 5B)はタービン建屋の地下1階に配置されている。M/Cについては、1号機M/C(A系：M/C1C, B系：M/C1D)はタービン建屋1階の大物搬入口付近に配置されており、その他M/C(A系：M/C2C, 3C, 5C, B系：M/C2D, 3D, 5D)はタービン建屋地下1階に配置されている。ただし、2号機のB系設備であるD/G2B, M/C2Eについては共用プール建屋の1階、地下1階に配置されている。敷地高さは1～4号機建屋および共用プール建屋がO.P.+10mで、5, 6号機建屋がO.P.+13mである(O.P.は小名浜ポイントと呼び、小名浜地方の年間平均潮位を0mとした海拔を示す)。

D/Gを冷却するための非常用ディーゼル発電機海水系(以下、DGSW)のポンプを含む海水系ポンプは、図1に示す海水系ポンプの位置に号機毎にまとめて配置されている。海水系ポンプが配置されている敷地の高さはO.P.+4mである。DGSWポンプの運転状況を示す記録はないものの、1号機格納容器冷却海水系(以下、CCSW)ポンプ、2号機残留熱除去海水系(以下、RHSW)ポンプ、5号機残留熱除去海水系(以下、RHRS)ポンプの

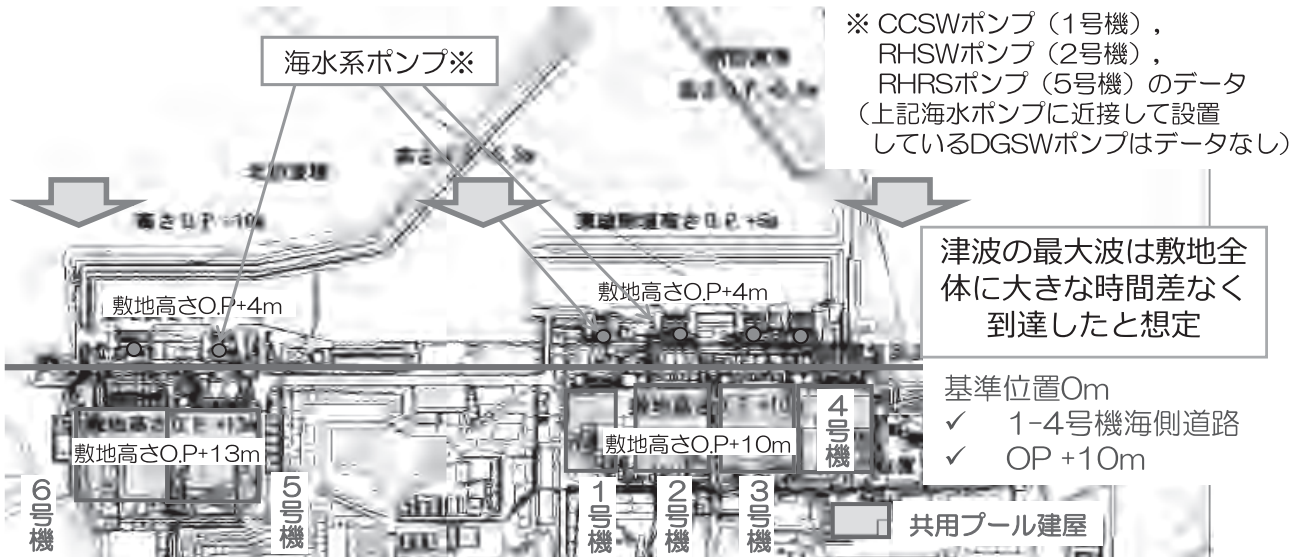


図1 各号機建屋、海水系ポンプの配置と津波遡上の想定

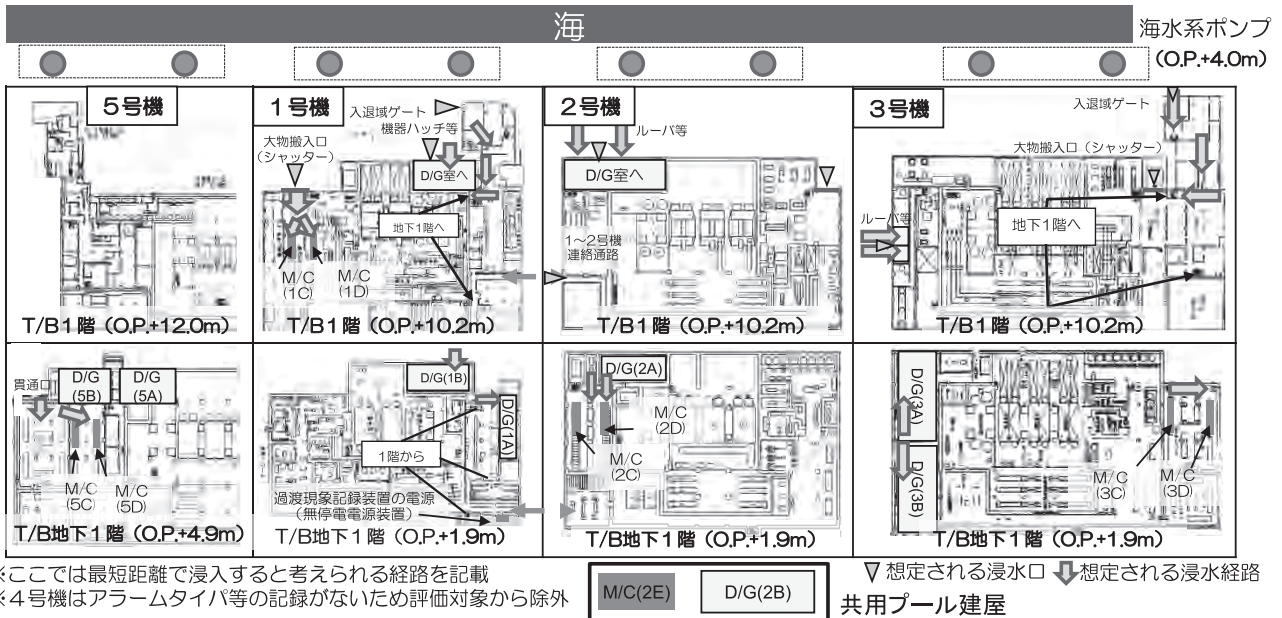


図2 各号機の電源設備の配置と津波の主な推定浸入経路

遮断器の信号が記録されている。津波によってこれらポンプが浸水しトリップしたと考えると、その他海水系ポンプもほぼ同タイミングで浸水しトリップするものと考えられる。

(2) 津波浸入の経路長の算出

I章3. で述べたこれまでの調査により、電源喪失の原因と考えられる津波の最大波は、発電所敷地海岸に対してほぼ正面から襲来したのと考えられることから、津波は敷地全体に大きな時間差なく到達したものと想定した。また図1に示すとおり、各号機の建屋は海岸から見て設置位置・高さが異なる。従って、各設備までの津波浸入の経路長の算出において、海岸に平行な1~4号機前の海側道路位置および敷地高さ O.P.+10m を基準位

置 0m とした。

図2に示す三角マークは、過去の建屋調査により津波の浸水口と思われる箇所を示し、矢印マークは主な想定浸水経路を示している。基準位置から想定浸水口までの距離と、想定浸水口から矢印マークの経路で電源設備までを最短で結んだ距離(フロア高低差含む)を図面より計測し、合算したものを各電源設備までの津波浸入の経路長とした。この経路長は、基準位置から山側をプラスの値として、海側をマイナスの値として加算し、敷地高さや建屋内フロア高さの高低差も距離として加減算するものとした。

3. 非常用電源設備の機能喪失時間

非常用電源設備の機能喪失時刻は、アラームタイプ等の記録より抽出した。また、遮断器動作と非常用電源設備の電圧電流値は、過渡現象記録装置、プロセス計算機の記録より抽出した。ただし、4号機については、地震発生時は定期検査停止中であり、プロセス計算機、過渡現象記録装置の取り替え作業中であったことから、アラームタイプ等による記録上の確認はできない。従って、4号機については評価対象から除外した。なお、アラームタイプ等は全ての号機で時報による時刻補正が行われているわけではないが、いずれも地震加速度によるスクラム信号が記録されていることから、時刻補正されている2号機および5号機のうち最も早くスクラム信号を発した2号機B系原子炉スクラム信号を基準に、各号機でより早くスクラム信号を発した系統の時刻と比較し補正を行った¹⁾。

III. 検討結果と考察

1. 経路長と機能喪失時刻の関係

図3に各電源設備までの津波侵入の経路長と機能喪失時刻の関係を示す。1号機の機能喪失時刻は、過渡現象記録装置より抽出しており、このときの記録は1分間周期のデータのみであることから、図中の時間幅の中で機能喪失したものと整理した。また、D/G1A、1B、M/C1Dは過渡現象記録装置が途絶える直前の15時36分59秒の値で電圧を維持しており、以降記録がないこ

とから機能喪失時刻の特定はできない。ただし、過渡現象記録装置のデータから、A系の非常用交流電源が先に喪失しており、その原因はM/C側のトラブルにあったことが読み取れる。(なお、1号機の非常用交流電源喪失については、原子力規制委員会「東京電力福島第一原子力発電所事故の分析 中間報告書(以下、事故の分析中間報告書)」⁴⁾の中で詳細な分析結果がまとめられている。)共用プール建屋にある2号機M/C2Eについても、アラームタイプ等に記録がないため、機能喪失時刻の特定はできない。以上、一部の設備については機能喪失時刻が不明であるものの、その他多くの設備の機能喪失時刻が特定できており、全体的な傾向を把握できることから、これらの機能喪失時刻により津波浸水の経路長との関係を評価した。

図3より、各号機ともに、海水系ポンプがまず機能喪失し、D/G、M/Cの電源設備がその後に機能喪失していることが確認できる。また、プロット全体を見ると右肩あがりの傾向、つまり、各設備までの津波侵入の経路長が長いほど、機能喪失時刻が遅くなる傾向が確認できる。従って、津波の遡上、浸水を原因として、各電源設備が機能喪失していったものと推定した。

ただし詳細に見ると、1号機の機能喪失時刻は全体的な傾向と比較して非常に早い。また、2号機の機能喪失時刻は、全体的な傾向から比較的乖離している。そこで、これらの原因について考察を行った。

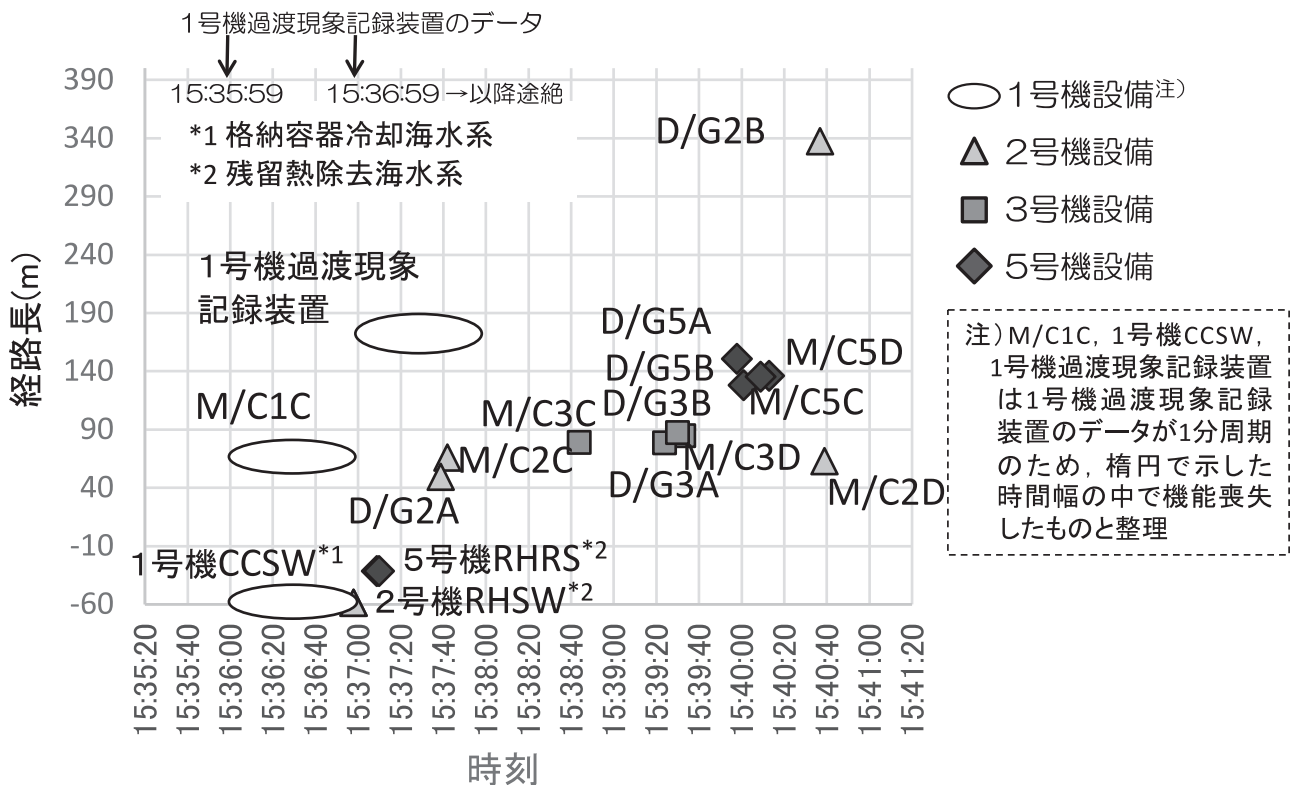


図3 各電源設備までの津波侵入の経路長と機能喪失時刻の関係

2. 1号機の機能喪失時刻についての考察

図4に1号機におけるタービン建屋内への津波浸水イメージを示す。この図は、基準位置から各電源設備までを津波の想定浸入経路に沿って展開した描画となっている。

図中上段に示すとおり、M/C配置位置のすぐ手前に大物搬入口が存在しており、この大物搬入口は、防護扉とシャッターの構成になっている。通常、防護扉およびシャッターは閉まっているが、津波襲来時は1号機のみ防護扉が開放された状態であった¹⁾。震災当日、1号機では作業のために防護扉を開放しており、巨大地震の発生後、作業員はすぐに避難することとなったため、防護扉が開放された状態で津波の襲来を迎えることとなった。防護扉が閉まっていれば津波の浸入をある程度は抑制できたと考えられるが、開放状態が維持されたために、津波および漂流物によりシャッターが大きく変形、破損し大量の海水が浸入したものと考えられる。その結果、大物搬入口の直ぐそばに配置してあるM/Cは、早々に被水することとなったと考えられる。

D/G1A, 1Bは過渡現象記録装置が途絶える直前の15時36分59秒の値で電圧を維持していることから、D/G制御系には不具合は生じていないと考えられる(要因③が不成立)。また、M/C1C, 1Dともに母線は被水していないため、母線そのものに電気事故は発生していないと考えられる(要因①が不成立)。一方、原子力規制委員会事故の分析中間報告書⁴⁾でも報告されているように、M/C1Cについては、津波の浸水痕より低い位置に存在する補助リレーが被水によって通電したため、D/Gの遮断器が開放したと推定している(要因②が成立)。従って、M/C1Cについては、早い段階で機能喪失に至ったものと推定される。

過渡現象記録装置は、コントロール建屋地下1階にある無停電電源装置から電源供給されている。この無停電電源装置が浸水し機能喪失したために、過渡現象記録装置は機能喪失したものと推定している。大物搬入口から無停電電源装置が配置されている部屋まで、大量に浸入

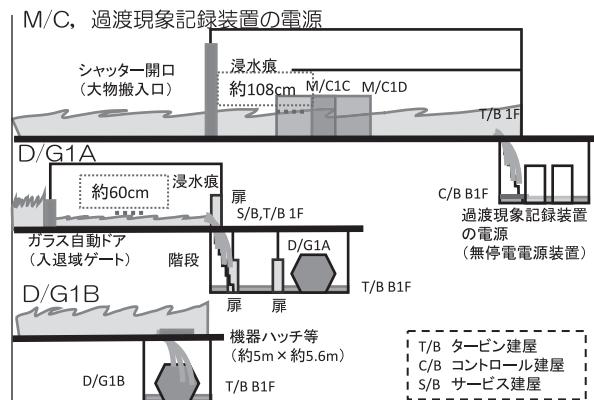


図4 1号機におけるタービン建屋内への津波浸水イメージ

する津波を妨げるものが存在しないことから、機能喪失が早い時間帯に発生したものと考える。

以上の通り、1号機の各電源設備が早い段階で機能喪失に至った原因は、大物搬入口の防護扉が開放された状態で、津波および漂流物によりシャッターが大きく変形、破損し大量の海水が浸入したことにあると考えられる。

3. 2号機の機能喪失時刻についての考察

図3に示したとおり、2号機A系の設備(D/G2A, M/C2C)については機能喪失時間が比較的早く、B系の設備(D/G2B, M/C2D)については経路長と機能喪失時刻の全体的な傾向から比較的乖離した結果となっている。この原因を考察するため、プロセス計算機のデータを詳細に分析した。ここで、図5に2号機のA系およびB系の非常用交流電源の系統概略図を示す。A系は、D/G2A, M/C2Cともにタービン建屋内に配置されており、D/G2A遮断器を介して接続している(他号機D/G1A, 1B, 3A, 3B, 5A, 5Bも同じ構成)。またM/Cは、直接負荷や、降圧して電圧の低い電源盤(図中P/Cで示し、パワーセンタと呼ぶ)へ接続している。一方B系は、D/G2B, M/C2Eが共用プール建屋に配置されており、D/G2B遮断器を介して接続している。加えてM/C2Eは、タービン建屋に配置されているM/C2Dに遮断器を介して接続している。

(1) 2号機A系の機能喪失シナリオ

図6に2号機各設備のプロセス計算機データを示す。A系では、15時37分00秒頃にRHSW遮断器が開放し、D/G2Aの電流値が急減している。15時37分40秒頃にD/G2A遮断器が開放し、D/G2A電流値とD/G2AおよびM/C2C電圧値が急減して0になっている(要因③が不成立)。D/Gが事故電流を給電した場合、スパイク状の大きな電流が流れるが、D/G2Aの電流値にはスパイク状の電流値の変動は見られない。従って、D/GおよびM/Cに電気事故は発生していない(要因①が不成立)。他方、15時36分20秒から15時37分00秒頃にD/G2Aの電流値に上昇が見られ、15時37分00秒頃にRHSW遮断器が開放している。これはRHSWポンプが津波浸水によって過負荷状態になりトリップしたことを示唆したものと考えられる。従って、同じ海水ポンプエリアに配置されているDGSWポンプも同じ頃にトリップ

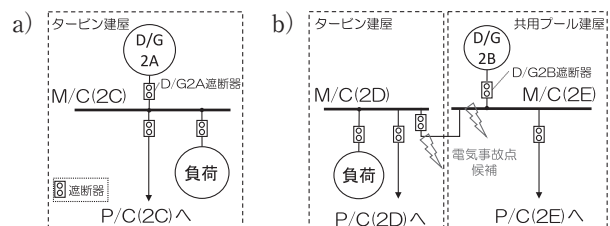


図5 2号機の非常用交流電源の系統概略図(a: A系, b: B系)

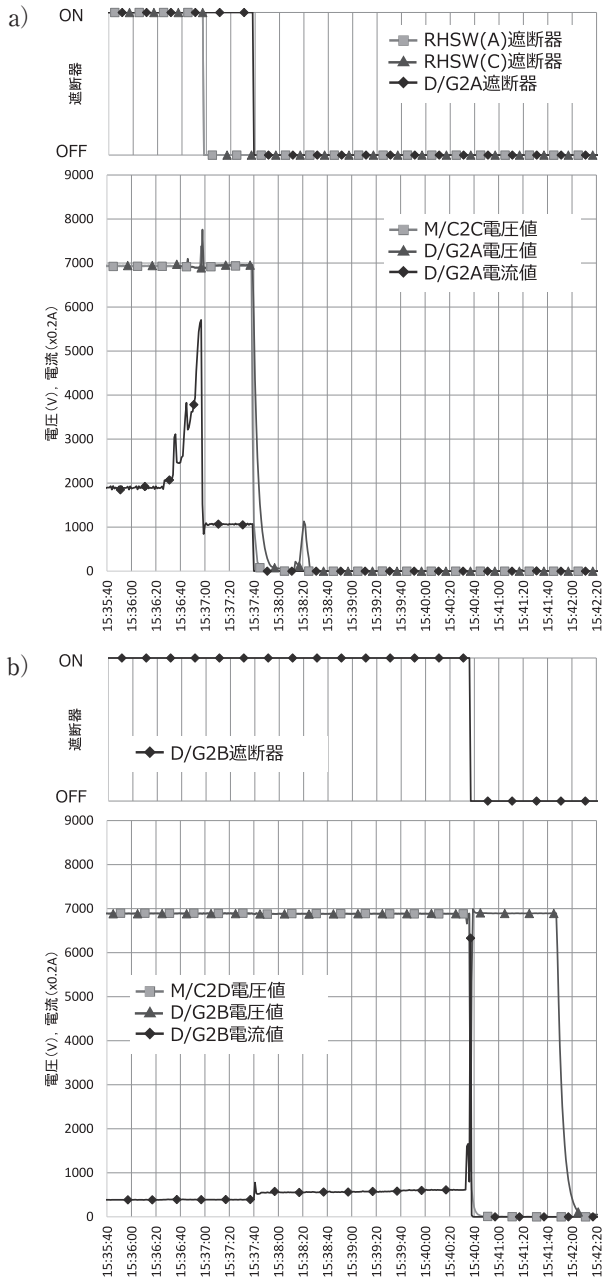


図6 2号機各設備のプロセス計算機データ
(a: A系設備の指示値, b: B系設備の指示値)

していた可能性は高い。DGSW ポンプがトリップすると、ポンプ吐出圧低信号により60秒後にD/Gロックアウトリレーが動作し、D/Gの遮断器が開放する(なお、このトリップロジックは空冷式D/GであるD/G2Bには存在しない)。D/G2A遮断器が15時37分40秒頃に開放されていることから、D/G2Aの電流値に上昇が見られる15時36分20秒から15時37分00秒頃のどこかでDGSWポンプがトリップしたと考え、おおむねトリップロジックに整合している。従って、DGSWポンプトリップによりD/Gがトリップし、A系の電源が失われた可能性が高い(要因②が成立)。この場合、経路長による想定よりも機能喪失時刻が早くなる。一方、要因②の別のシナリオとして、浸水によりD/G制御盤内

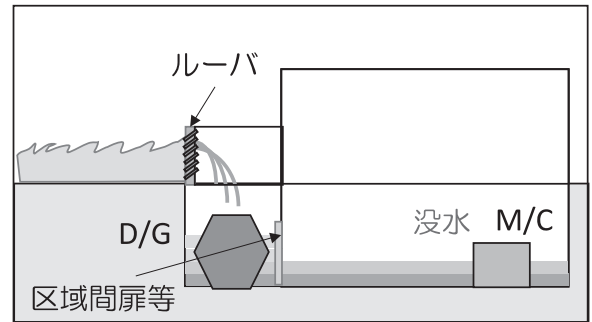


図7 2号機におけるタービン建屋内への津波浸水イメージ

の端子が通電し、D/Gロックアウトリレーが動作する可能性も存在する(要因②が成立)。この場合、経路長による想定に合った機能喪失時刻になったと考えられる。D/Gのトリップ原因を直接的に示す記録がないため、どちらのシナリオが成立したか特定はできないが、RHSWポンプがトリップしていること、機能喪失時刻が早いことを踏まえると、DGSWポンプトリップによってD/Gがトリップし、A系電源を喪失した可能性が高いと考えられる。

(2)2号機B系の機能喪失シナリオ

B系では、15時40分40秒頃にD/G2B遮断器が開放し、D/G2B電流値とM/C2D電圧値が急減して0になっている。またD/G2B電圧値は、D/G2B遮断器の開放時に一時的に低下するもののすぐに復帰し、しばらく電圧値が維持されている。従って、D/G2B遮断器が開放した後も、D/G2B自体はしばらく機能維持していた(要因②、③が不成立)。15時40分40秒頃にD/G2Bの電流値はスパイク状の変動が記録されていることから、D/Gが事故電流を給電していることが分かる。従って、B系電源の機能喪失はM/C側のトラブルによるものであり、図5に示したM/C2E側もしくはM/C2D側の事故候補で電気事故が発生し、D/G遮断器が開放したものと推定した(要因①が成立)。なお、今回評価した設備までの津波侵入の経路長の観点からは、タービン建屋にあるM/C2D側が浸水した可能性が高いと考えられる。図7(2号機におけるタービン建屋内への津波浸水イメージ)に示すとおり、D/Gのルーバ等から侵入した津波が、M/C2Dが配置されている部屋に到達するためには、区画間扉を通過する必要がある。従って、経路長による想定よりも機能喪失時刻が遅くなるものと考えられる。

以上のとおり、津波侵入の経路長と機能喪失時刻の全体的な傾向から、2号機の機能喪失時刻が比較的乖離していることについても、そのような結果に至るシナリオが存在することが分かった。

IV. まとめ

津波によって非常用交流電源が喪失したとの推定をより確からしいものとするための追加検討として、各電源

設備までの津波侵入の経路長と機能喪失時刻の関係性について確認を行った。検討の結果、各電源設備までの津波侵入の経路長が長いほど、機能喪失時刻が遅くなる傾向が確認されたことから、津波の遡上、浸水によって、各電源設備が機能喪失していったという従来の推定がより確からしいものになった。また、各電源設備までの津波侵入の経路長と機能喪失時刻の全体的な傾向から、機能喪失時刻が乖離している設備については、合理的に説明できるシナリオが存在することが分かった。

福島第一原子力発電所が津波により電源喪失に至ったことを踏まえ、当社柏崎刈羽原子力発電所では様々な安全対策を実施している。一例を挙げると、まず津波による事故の発生防止策として、敷地・建屋内への津波の流入防止、重要機器設置エリアの止水、引き波時の海水確保、可搬型設備の高台保管、津波監視カメラの設置等を実施している。また、万一の電源喪失に備え、空冷式ガスタービン発電機車、配電盤等の電源設備、電源車を高台に配備し、予備バッテリーの配備や直流電源設備を原子炉建屋の高所に増設する等の電源強化を実施している。

当社は事故の当事者として、今後も事故進展メカニズムについての調査・検討を継続的に取り組み、燃料デブリの状態等を推定し廃炉に役立てるとともに、これからの原子力発電所の安全技術の向上に資する知見の提供を行っていく。

－ 参考資料 －

- 1) 東京電力株式会社, 「福島原子力事故調査報告書」, 平成 24 年.
- 2) 東京電力株式会社, 「原子力安全改革プラン」, 平成 25 年.
- 3) 東京電力株式会社, 「福島第一原子力発電所 1~3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第 4 回進捗報告」, 平成 27 年.
- 4) 原子力規制委員会, 「東京電力福島第一原子力発電所事故の分析 中間報告書」, NREP-0001, 平成 26 年.

著者紹介

山内大典 (やまうち・だいすけ)

東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー

(専門分野/関心分野)熱流動工学, 燃料デブリ性状

伊達健次 (だて・けんじ)

東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー

(専門分野/関心分野)電気工学, 安全設備設計

遠藤亮平 (えんどう・りょうへい)

東京電力ホールディングス株式会社 原子力設備管理部

(専門分野/関心分野)電気工学, 安全設備設計

溝上暢人 (みぞかみ・まさと)

東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー

(専門分野/関心分野)原子力安全, 燃料デブリ性状

本多 剛 (ほんだ・たけし)

東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー

(専門分野/関心分野)熱流動工学, シビアアクシデント

野崎謙一郎 (のざき・けんいちろう)

東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー

(専門分野/関心分野)熱流動工学, シビアアクシデント

溝上伸也 (みぞかみ・しんや)

東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー

(専門分野/関心分野)熱水力・統計的安全評価手法, シビアアクシデント

地政学的リスクとエネルギー

第3回 中国のエネルギー需給と地政学的影響

東京大学 小宮山 涼一

中国は従来の高成長から新たな経済発展段階「新常态」に入ったとされるが、次世代車が徐々に普及する中でも、石油消費は依然として旺盛な伸びを見せている。中国は米国に匹敵する石油輸入国となり、米国の石油の自給化が進む中、主要な産油国に対してさらに影響力を高める可能性がある。中国の広域経済圏構想がエネルギー地政学に与える長期的影響をはじめ、中国の動向に十分な関心を払い、日本はエネルギー安全保障策の強化が引き続き求められる。

KEYWORDS: *China, oil demand, oil import, sea-lane, coal demand, air pollution, fuel switching, renewable energy, One Belt One Road*

I. はじめに

2001年の世界貿易機関(WTO)加盟以降、中国は高い経済成長を維持し、中国のGDP(名目)は既に先進国であるドイツ、イギリスを超え、2010年には日本を上回り、米国に次ぐ世界第二の経済規模に達した。これを反映してエネルギー消費も増加し、中国は2009年に米国を抜き、世界最大のエネルギー消費国となった。しかし近年、徐々に経済の工業部門中心からサービス産業への構造転換と成熟化を受けて、エネルギー消費の伸びもこの数年で年率1%程度¹⁾と緩やかになりつつある。中国経済は高成長時代から新たな経済発展段階「新常态(New Normal)」に入ったと言われる。しかし中国はその中でも、所得水準の上昇により、自動車の普及が拡大し、その結果、石油消費、特に石油輸入量が増加している。中国はすでに、米国に匹敵する量の石油を輸入しており、将来、世界最大の石油輸入国になる可能性も考えられる。そのため中国は国際石油市場、特に産油国への存在感がさらに高まり、影響力を増すと考えられる。

また中国は、長期的発展に向け、中国から中東、中央アジア、ロシア、欧州を結ぶ広大な経済圏を構築する「一带一路」構想を2013年に提唱した。「一带」は中国から中央アジア、欧州に至る「シルクロード経済ベルト」に相当

し、「一路」は南シナ海から海上でインド洋、欧州に至る「21世紀海上シルクロード」に相当する。沿線の約60カ国以上がこの経済圏に含まれるとされ、公共インフラ投資等により、その実効性には不確実性もあるが、中国の影響力が徐々に高まり、国際エネルギー市場にも地政学的影響を与える可能性もある。本稿では、中国のエネルギー需給動向、政策等について解説する。

II. 中国のエネルギー需給動向

中国は世界の石炭生産量の5割を消費する世界最大の石炭消費国であり、石炭は中国のエネルギー供給の6割以上(2016年62%)を占める中核的エネルギー源である(図1)。しかし近年、石炭は工場等での非効率な石炭ボイラー等に起因した大気汚染問題の深刻化を通じて、持続可能な社会の発展に悪影響を及ぼすとの懸念から、政

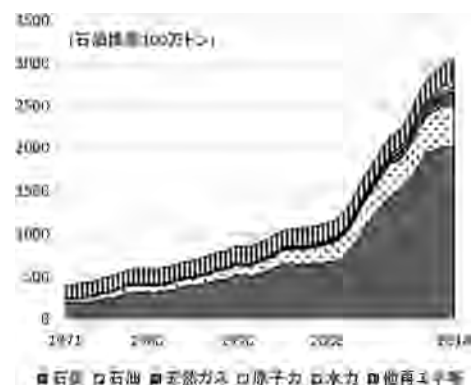


図1 中国の一次エネルギー供給
(出所)文献¹⁾を基に作成

Geopolitical risk in energy market (3) ; Chinese energy market and its geopolitics : Ryoichi Komiyama.

(2017年8月21日 受理)

■前回タイトル

第2回 米国新政権のエネルギー・環境政策

府は石炭消費削減を緊急の課題と位置付けている。その結果、石炭消費の伸びは以前より鈍化している。また中国では石炭は生産能力も過剰状態にあり、非効率な石炭企業の統廃合が重要課題となっている。石油消費は所得向上による自動車普及により拡大を続け、天然ガス消費も大気汚染問題への対応強化をうけ、石炭からの燃料転換により急増している。しかし石油・天然ガス生産量は国内消費量の増加に追従できず、海外からの輸入依存度は上昇を続けている。特に石油輸入は5割を中東に依存するため、中東情勢の不安定化や南シナ海等でのシーレーン周辺海域の領有権争いは、石油の安定供給リスクとなる。天然ガスの輸入依存度も上昇すると見られ、ガス供給確保に向けた中国の国際的な調達動向が、地政学に与える影響を今後注視する必要がある。石油・天然ガス輸入の安定供給確保は、経済構造の「新常态」への適応を進める上で、中国の重要なエネルギー安全保障問題として位置付けられると考えられる。

また、中国は、経済発展に伴うエネルギー利用の高度化や燃料転換が産業、民生部門を中心に進んでおり、電力消費が大きく増加し、発電量の規模は2016年現在、6兆kWhを超え(図2)、日本の発電量(1兆kWh)の6倍を上回る。また中国の発電量の構成を見ると、石炭火力の電源比率は7割にのぼり、太宗を占める(図2)。設備容量においても、中国の石炭火力は7億kWを上回り、総設備容量の6割を占める(図3)。しかし、石炭火力も

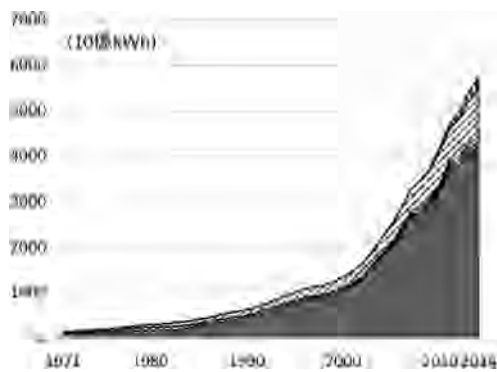


図2 中国の発電量構成
(出所)文献¹⁾を基に作成



図3 中国の発電設備容量の構成
(出所)文献²⁾を基に作成

大気汚染問題の重大な原因の1つとされ、中国政府は石炭火力の代替電源導入を積極的に進めており、2015年に水力の発電設備量は3億kW、2016年に風力の発電設備量は1.4億kWに達し、太陽光発電設備量も7,800万kWに達して³⁾、いずれも世界最大級の導入規模となっている。しかし中国では、再エネ普及拡大により送電容量の不足が顕在化しており、政府の発電計画にも起因して、風力・太陽光発電共に大幅な出力抑制が実施され、効率的な系統接続が阻害される状況にある。

III. 中国のエネルギー政策

これまで中国はエネルギー安全保障対策強化のため、国内資源の探鉱開発強化、非在来型資源(シェールガス、炭層メタンガス)開発、石炭・石油代替エネルギー開発など、エネルギー自給率向上を重要な政策目標として掲げている。近年はエネルギー消費の伸びが緩やかになる中、大気汚染深刻化や温室効果ガス排出増加に対応するため、低炭素エネルギー導入に主眼を置いたエネルギー供給構造の改革、省エネ推進等を重点目標として、水力、風力、太陽光などの再エネや高効率技術を推進し、環境保全対策を強化している。2016年12月、国家発展改革委員会は第13次5カ年再生可能エネルギー発展計画を発表し、再エネ分野への積極的な投資方針を示し、2020年までに再エネ電力比率3割実現を目指す方針を示した。2017年1月には、中国政府は13次5カ年エネルギー発展計画を発表し(表1)、2020年の一次エネルギー消費を50億トン(石炭換算)以下とし⁴⁾、2016年~2020年にGDP当たりエネルギー消費量を2015年比15%以上抑制する内容を公表した。また、2020年のエネルギー供給に占める非化石エネルギー比率を15%に、2030年には20%へ引上げ、天然ガス比率を1割まで増加し、石炭比率を6割以下(58%)に削減し⁵⁾、さらに石炭火力の発電設備量を11億kWに抑えるとして、エネルギー供給構成の低炭素化の方針を示した。石炭抑制の上でとくに天然ガス普及を目標に掲げ、2020年にガス国内生産50%増産、工場や家庭での石炭からガスへの燃料転換、天然ガス発電設備1.1億kWへの増強(現在0.7億kW)を進めるとしている。しかし、クリーンエネルギー導入を加速的に進めても、石炭火力は当面、主力電源となる

表1 第13次5カ年計画の概要

石炭	利用の高効率化、石炭火力発電効率規制(新設300g(石炭換算)/kWh以下)等
原子力	発電設備容量5,800万kW(2020年)の実現等
再エネ	風力・太陽光発電導入拡大、水力発電増強等
資源開発	炭層メタン、シェールガス開発の強化等
備蓄	原油、ガス備蓄制度の整備
インフラ整備	天然ガスパイプライン、送電線の整備、輸送能力増強等
技術開発	蓄電設備、ピーク調整電源、先進超々臨界圧石炭火力等の開発等

ため、石炭火力の発電効率の向上や大気汚染物質低減に向けた規制が強化され、2020年までに新設石炭火力の石炭消費量を300グラム(石炭換算)/kWh以下、既設石炭火力で310グラム/kWh以下とする規制が示された。また気候変動政策では2015年に国連気候変動枠組条約へ、2030年までにGDP当りCO₂排出量を2005年比60%~65%削減を目指す目標を提出し、2030年前後に排出量のピークアウトを実現するとしている。

IV. 中国のエネルギー安全保障問題

経済構造の「新常态」への移行に伴い、長期的に中国の石油需要の伸びは緩やかになると見込まれるが、所得水準向上に伴う自動車保有台数の急速な増加をうけ(図4)、中国では次世代車(電気自動車、プラグイン車、燃料電池車)の販売台数が年間50万台以上へ大きく伸びているものの、依然としてガソリンや航空燃料を中心とした輸送用燃料は継続的に増加し続け、石油需要を押し上げている。しかし、中国の原油生産量は資源的制約により、増産の取組みが強化されている中でも、消費増加のテンポよりも緩やかにしか伸びていない(図5)。その結果、中国の石油輸入量は大きく増加している。

中国の石油輸入依存度は現在6割を上回り、今後も輸入依存度は高止まりし、2020年には最大7割程度を輸入へ依存すると見られる⁶⁾。2016年、中国の石油輸入量は日量920万バレル(日本：同420万バレル)であるが³⁾、

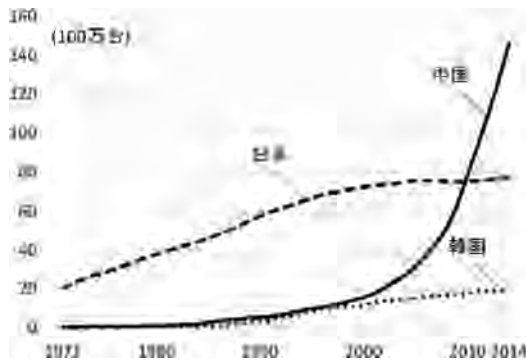


図4 中国等の自動車保有台数
(出所)文献¹⁾を基に作成

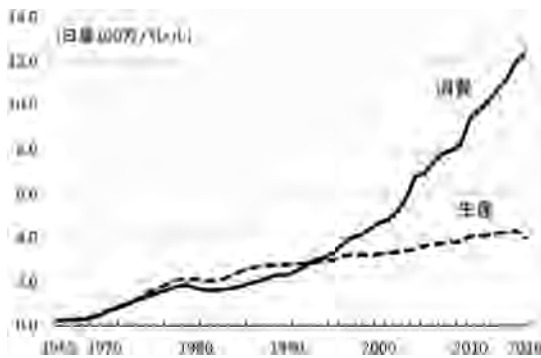


図5 中国の石油消費量、生産量
(出所)文献²⁾を基に作成

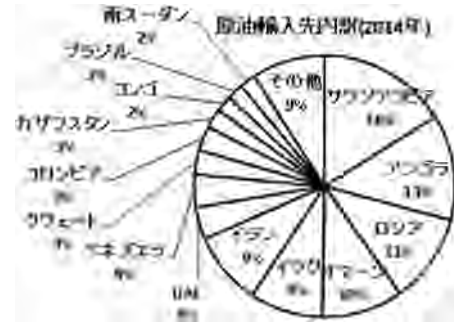


図6 中国の原油輸入先(2014年)
(出所)文献²⁾を基に作成

世界最大の石油輸入国である米国はシェール革命により次第に石油輸入量が減少した結果(輸入量：同1,000万バレル)、中国は国際原油市場での存在感を高めている。

このような中、中国は石油の対外依存度の上昇を踏まえ、国内石油資源の開発強化、石油パイプライン増強、石油価格の市場連動化、石油備蓄など緊急時対応能力の強化、輸入ルートの多角化等が重要な課題となっている。現在、中国の原油輸入は、中東が5割を占め、その中でイラクからの原油輸入量は、原油輸入量全体の1割を占めるまで拡大している(図6)。また、中国・ロシア間の原油パイプラインの整備進展により、原油輸入量の1割をロシアが占めている。近年は、中央アジアのカザフスタンとの原油パイプラインが整備され輸入量が増加し、中国の原油輸入は従来より輸入先の多様化が進んだ。そして2014年下半年からの国際的な原油価格低下は、需要の旺盛な中国の原油輸入コスト抑制の経済的効果をもたらし、また、同国が緊急時対応能力の強化策として進める戦略石油備蓄(SPR: Strategic Petroleum Reserve)増強を後押しした。2003年に中国は戦略石油備蓄基地の建設を開始し、計画を3期に分けて計約7,940万klを備蓄する予定であり、第2期のSPR基地建設が進められている。

V. 中国のエネルギー地政学

1. 中国の石油需給と国際石油市場

世界最大の石油輸入国である米国の原油輸入量が次第に減少し、将来、石油純輸出国に転じる兆しを考慮すると、すでに米国に匹敵する輸入量に達している中国の動向が国際石油市場へ与える影響度がさらに高まる可能性がある(図7)。さらに現在、原油価格が低迷基調にある国際石油市場では、原油の買い手国側に価格交渉力(バーゲニングパワー)が移転し、交渉に有利に作用すると考えられる。その結果、将来、米国を抜いて世界最大の原油輸入国となる可能性もある中国は、産油国に対して、エネルギー関連投資や協力関係の交渉も含め、国際石油市場の地政学において資源外交戦略上の優位性が一層高まると考えられる。

今後の中国の原油輸入先は引き続き、資源量の豊富な

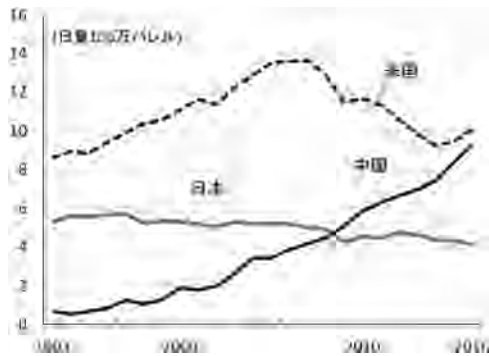


図7 中国の石油輸入量
(出所)文献³⁾を基に作成

中東、ロシア、中央アジア、南米などが主要な供給元になるものと思われる。その中で特にロシアや中央アジア等の中国の周辺諸国からの原油輸入が経済性や安全保障上の観点から安定供給上の優位性があるため、中国は近年、ロシアと石油・ガス調達案件の交渉を積極的に進め、中央アジア諸国ともエネルギー協力協定の締結を精力的に行っている。また中国の原油輸入の中東依存度が5割であることを踏まえ、2016年、中国政府団がサウジアラビアやイラン等を訪問するなど、世界最大の石油賦存地域である中東の石油資源確保にも注力している。今後もロシア、中央アジア、中東は、中国の資源確保戦略上の重要な地域となる可能性が高い。

2. 「一帯一路」構想

2015年3月、中国は欧州、中央アジア、東南アジア、ロシアや東アフリカと中国間の内陸・海域一帯をカバーする広域経済圏構想(「一帯一路」構想(図8))を発表した。中国を起点として東南アジア、南アジア、中央アジア、中東、ロシア、欧州に至る中国が影響力を持つ広域経済圏を構築する構想である。沿線国に対し社会インフラ(港湾、石油・ガス・電力インフラ、道路、鉄道等)整備支援を通じて、巨大経済圏構築を目指すとしている。「一帯一路」構想は、まだその内容は不透明で実効性にも不確実性があると考えられるが、中国のエネルギー輸入経路や輸入先の多角化にも関係すると見受けられ、エネ



図8 「一帯一路」構想
(出所)文献⁷⁾等を基に作成

ルギー安全保障への対応強化の観点から見ても、重要な役割があると考えられる。

現在、中国は日本と同様に、石油輸入はホルムズ海峡、マラッカ海峡、南シナ海・東シナ海を通じた海上輸送ルートへのエネルギー輸送上の依存度が上昇し、エネルギー安全保障上のリスクが高い。しかし中国、中央アジア、欧州を結ぶ貿易ルート整備を目指すシルクロード経済ベルト構想の実現を目指しており、近年は、ロシアとの原油輸送パイプライン、カザフスタン等中央アジアとの原油・天然ガス輸送パイプライン、エネルギーのマラッカ海峡通航への依存度低減に貢献するミャンマーとの原油パイプラインが完成し、エネルギー輸入ルートの多角化が進み、中国のエネルギー安定供給確保に大きく貢献している。

また、エネルギー政策の柱である天然ガス普及促進の面では、特に中央アジアとの輸入ルート強化を推進し、「西気東輸」天然ガスパイプラインが2014年にかけて完成し、トルクメニスタンからウズベキスタン、カザフスタンが結ばれ、現在も輸送能力増強が進められており、2020年には天然ガス供給量は年間850億 m^3 に達すると見られる。そして豊富な天然ガス資源を保有するイランと、アフガニスタン、パキスタンを中継して中国を結ぶパイプライン建設構想もある。中央アジアと中東のエネルギー資源量は依存として豊富にあるが、特に中央アジアは地政学的に見て内陸に位置するため、伝統的に他国との貿易上の制約が本格的な経済発展の障害となっている。そこで中国との資源輸送ルートの開拓が、中央アジア諸国の経済を押し上げ、シルクロード経済ベルト発展上の重要な戦略的役割を担うことが期待されている。

3. 海上輸送ルート(シーレーン)の安全保障

中国は1993年に石油純輸入国に移行後、海洋進出を資源の安定供給確保等を目指し本格的に強化した。そのため、中国と近隣諸国が南シナ海等の周辺海域の資源、海上輸送ルートや領海を巡る政治経済的影響力の強化に向け競合し、地政学上の問題となっている。

領有権争いが発生している中国周辺海域は、日本へ中東やアフリカよりエネルギーを輸送する船舶通航が集中するシーレーン(海上交通経路)の要衝である。代表的なシーレーンはマラッカ海峡(日本の原油輸入の8割、LNGの4割が通航)から南シナ海を経て日本に達するルートや、インドネシアのロンボク海峡から北上し南西諸島(九州南端から台湾北端の島しょ群)を経由するルート等がある。この日本への輸送ルートはいずれも南西諸島周辺海域を通航し、同周辺海域の安全保障確保は特に重要となる。一方、中国も、石油輸送ルートの安全保障確保や太平洋への進出確保等の上で、南西諸島周辺海域をはじめ沖縄周辺海域や台湾海峡、南シナ海は重要な海上経路となり、その他の東アジア諸国の領海上の利害も

関係する。そのため、シーレーンの安全保障確保は、引き続き東アジア諸国全体において重要な論点になると考えられる。また中国は世界最大の産炭国であるが、沿海地域で経済、エネルギー消費が伸びる一方⁸⁾、内陸からの鉄道等による石炭輸送上の制約から、沿海地域は中国で最も必要な燃料である石炭を輸入しており、シーレーンの安全保障確保は特に重要となっている。

VI. まとめ

中国は新たな経済発展段階「新常态」に入ったとされるが、同国の石油需要は依然として旺盛な伸びを見せ、米国を追い越し世界最大の石油輸入国となる可能性もある。今後を展望しても、中国の自動車の普及率は主要国に比べ依然として低水準にあり(図9)、環境対応車の普及を踏まえても、自動車普及拡大、それに伴う石油輸入量のさらなる増大の可能性は当面十分にある。シェール革命による米国の石油輸入量減少の中で、中国は世界の主要産油国に対して影響力を高めると考えられる。そして米国と中国の国際石油市場でのパワーバランスの変化という意味で、世界のエネルギー地政学に新たな変化の兆候が見られる。また、中国の石油安定供給確保に向けた積極的な動きが、日本や韓国、東南アジアなど周辺諸国のエネルギーセキュリティを損なう可能性もあり、世界の地政学へ影響を与える可能性がある。さらに中国の「一帯一路」構想は、まだ順調に進むか不透明でその実効性に不確実性も残るが、それを通じて中東、中央アジア、ロシアをはじめ、中国がその経済力を背景に世界のエネルギー地政学に関与し、その影響力を長期的に高める可

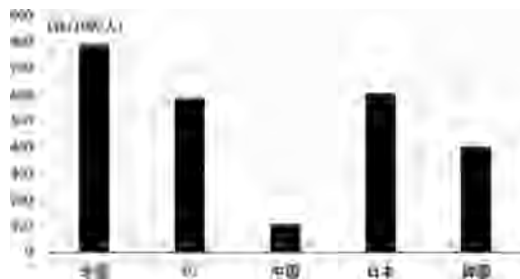


図9 自動車普及率(1,000人当り自動車保有台数)
(出所)文献¹⁾等を基に作成

能性があり、日本は中国の動向に十分な関心を払い、互いに巨大な石油輸入国としての利害を共有する国家として中国との協力関係も模索しながら⁹⁾、引き続きエネルギー安全保障策の強化が求められると考えられる。

— 参考資料 —

- 1) 日本エネルギー経済研究所, エネルギー・経済統計要覧, 2017.
- 2) EIA/DOE, China < <https://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=CHN> > (アクセス日: 2017年6月30日).
- 3) BP, Statistical review of world energy 2017, 2017 < <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> > (アクセス日: 2017年7月25日).
- 4) 日本エネルギー経済研究所, 海外エネルギー動向, 中国 < <https://eneken.ieej.or.jp/journal/trend.html> > (アクセス日: 2017年7月25日).
- 5) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 中国の第13次5ヵ年計画の石炭事業への影響等調査, 2017年 < <http://coal.jogmec.go.jp/content/300336304.pdf> > (アクセス日: 2017年8月2日).
- 6) Komiyama, R., Li, Z. and Ito, K.: "World energy outlook in 2020 focusing on China's energy impacts on the world and Northeast Asia", International Journal of Global Energy Issues, Vol. 24, Nos. 3/4, pp.183-210. (2005).
- 7) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, アジアのインフラニーズと中国の取り組み(1), 2017年 < http://mric.jogmec.go.jp/public/current/17_08.html > (アクセス日: 2017年8月2日).
- 8) 小宮山涼一, 張平, 呂正, 李志東, 伊藤浩吉, 中国31省・行政区別での2030年長期エネルギー需給予測, 日本エネルギー経済研究所, 2006 < <https://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/1265.pdf> > (アクセス日: 2017年8月2日).
- 9) 李志東, 伊藤浩吉, 小宮山涼一, 中国2030年エネルギー需給展望と北東アジアエネルギー共同体の検討, 日本エネルギー経済研究所, 2005 < <http://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/1036.pdf> > (アクセス日: 2017年8月2日).

著者紹介

小宮山涼一 (こみやま・りょういち)
本誌, 59[7], p.57 (2017) 参照.

世界の原子力を牽引する新興4カ国(中露印韓)

日本原子力産業協会 小林 雅治

東京電力・福島第一原子力発電所の事故から6年以上が経過した。さすがに事故直後は、安全対策の確認や事故の教訓の取り入れなどのため、一時的に原子力開発は停滞したが、多くの国では、原子力開発を再開させている。とりわけ積極的に原子力の拡大路線を進んでいるのが中国、ロシア、インド、韓国の新興4カ国であり、これら4カ国だけで世界の建設中原子力発電所の大半を占める。4カ国は核燃料サイクルや高速炉開発でも熱心に取り組み、さらに露中韓の3カ国は近年、原子力輸出を活発に展開している。まさに世界の原子力の牽引国である。本稿では、これら4カ国の最近の原子力動向を紹介する。

KEYWORDS: Fukushima Daiichi, Nuclear Power, Nuclear Energy Policy, Russian Federation, China, South Korea, India, Nuclear Export, FBR, HTGR, SMR

I. はじめに：福島後の原子力開発の主役

図1は、本年2月に米国原子力エネルギー協会(NEI)のコースニック理事長がウォール・ストリート(金融街)向け説明資料として、世界の原子力発電所の建設・計画状況を示したものである。現在建設中・計画中の合計基数では、中国、ロシア、インド、米国、韓国の順になっており、中露印韓の4カ国が世界の原子力発電開発の先頭にいる。福島事故後も、これら4カ国が積極的に原子力拡大路線を進んでいる。表1に過去数年間の世界の原子力発電所の着工基数の推移を示すが、これら4カ国が世界の大半を占めている。

現在、パキスタン、ベラルーシ、バングラデシュ、アラブ首長国連邦(UAE)、アルゼンチンなどで原子力発

表1 近年の世界の原子力発電所着工基数の推移

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
世界全体	16	4	7	10	3	8	3
内中露印韓	14	2	6	4	0	6	2

出典：IAEA・PRIS

電所が建設中あるいは計画中であるが、その輸出国は中露韓の3カ国である。3カ国は国内の強固な原子力計画を背景に、原子力輸出を展開している。かつて原子力輸出で世界を席卷していた米仏の勢いは、今はあまり見られない。コースニック NEI 理事長が、ウォール・ストリート向け説明で、往年のように米国が世界の原子力開発のリーダーシップを果たすべきと訴えたことは言うまでもない。日本も、残念ながら、福島事故を受けて後塵を拝している状況である。インドは、今のところ原子力輸出に至っていないが、いずれ輸出に成長する可能性がある。

これら4カ国に共通している特徴は、事業主体が国営企業であり、国家の確固とした原子力政策の下に原子力開発を進めている。さらに、核燃料サイクルの完結と高速炉開発の政策も共通している。韓国は、米韓原子力協定により一定の制約はあるが、研究レベルでは着実に実績を積み重ねている。

因みに核融合エネルギーの実現に向けて、国際熱核融合実験炉(ITER)のビッグプロジェクトが国際協力で進められているが、この参加国(極)は、米・欧・日・露・中・韓・印であり、まさに4カ国が名を連ねている。

以下に、中国、ロシア、インド、韓国の順に最近の主な原子力開発動向を紹介する。参考までに、4カ国の現



出典：米原子力エネルギー協会(NEI), 2017年2月

図1 世界の新規原子炉の建設・計画状況

Nuclear Development Status in the World (4); Four New Emerging Countries(China, Russia, India, and South Korea) Leading Global Nuclear Development: Masaharu Kobayashi. (2017年6月23日 受理)

表2 中露印韓4カ国の原子力発電の現状

	運転炉		原子力発電量	
	基	万 kW	億 kWh	%
中国	36	3,263.7	2,105	3.6
ロシア	35	2,686.5	1,797	17.1
インド	22	621.9	350	3.4
韓国	25	2,308.1	1,542	30.3

出典：世界原子力協会(WNA)。原子力発電規模は2017年5月2日現在、原子力発電量は2016年実績と全発電量に占める割合を示す。

在の運転中の原子力発電規模などを表2に示す。

II. 中国：原子力大国路線を邁進

1. 2020年に5,800万kW目標

中国最初の原子力発電所である秦山I-1号機と大亜湾1.2号機が営業運転開始したのは1994年で、30カ国目の原子力発電国であった。中国は当初から、①自主開発、②海外炉の導入・改良・国産化、の路線を推進し、最近、軽水炉については、中国が知的財産権を所有する第3世代炉の「華龍一号」設計を完成するまでになった。米WHから導入したAP1000をベースに、国産のCAP1400も開発している。

福島第一原子力発電所事故から数日後の2011年3月15日、中国政府(國務院)は、運転中原子炉の総点検、新規計画の許認可の一時凍結を決定した。但し建設中原子炉の建設は続行した。

2012年10月、國務院が原子力安全計画と原子力中長期計画などを発表し、新規建設計画の許認可手続きを再開した。安全計画では、2020年までに世界トップレベルの安全性確保を目指すと言明した。このため新規建設炉は主に第3世代炉を採用することになる。中長期発展計画では2020年に運転中5,800万kW、建設中3,000万kW以上の原子力開発を打ち出した。内陸部での原子力建設は見合わせる方針を決めた。

福島事故が起きた2011年には、さすがに原子力の新規着工はゼロだったが、それでも2016年末までに計15基が新規着工している。

2016年3月の全国人民代表大会(全人代)で決定された第13次5カ年計画(2016-20年)は、2020年の原子力発電規模として、同様に運転中5,800万kW、プラス建設中3,000万kWの目標達成を挙げた。

国産の華龍一号設計炉として、2015年に福清5.6号機、防城港3号機、2016年に防城港4号機が着工した。同じく国産のCAP1400は、榮成石島湾で初号機が2018年には着工予定である。

米WH製AP1000の三門と海陽の各1号機及び仏アレバ製の台山1号機(EPR)は、年内の完成予定である。

再処理計画については、フランスの協力を得て、中国核工業集团公司(CNNC)が年間処理能力800トンの大型再処理工場を2020年に着工し、2030年に完成させる計

画である。

中国広核集团公司(CGN)の賀禹董事長は2016年3月3日、全人代に併せて開催された全国政治協商会議の席上、2030年の原発規模として、1.2億~1.5億kWを挙げた。いずれ中国は米国を抜き世界首位の原子力大国になるのは明らかである。

共産党独裁体制の下で、中国の原子力開発は概してスムーズに進展しているが、福島事故後、中国の公衆の原子力安全に対する懸念が部分的に増加していることは確かである。2013年の大抗議運動によって、広東省南部におけるウラン精錬・燃料加工施設の建設計画が中止に追いこまれた。中国内陸部での建設が遅れている要因の一つに、安全性への懸念が言われている。

2. 原子力輸出で原子力強国めざす

中国の原発輸出は、中国最初の商業炉である秦山I-1号機の建設時に遡る。輸出1号はパキスタンのチャシュマ1号機で、1992年に受注、翌1993年に着工した。秦山I-1号機と同じ30万kW・PWRで、2000年に営業運転を開始した。さらにチャシュマに同型炉3基を輸出した(現在、2号機は運転中、3号機は建設中)。

中国政府の公式の原子力輸出戦略は、2013年10月に国家能源局が発表した。原子力輸出を政治・経済外交の影響力行使の重要手段と捉え、輸出関係組織の強化や融資支援を打ち出した。習近平国家主席が2014年に提唱した陸と海の「一帯一路」構想では、高速鉄道と原子力の輸出を2本柱と位置付けている。

2015年1月、李克強首相が、中国製原発の海外進出を加速し「原子力強国をめざす」考えを宣言した。同年5月の國務院発表の「中国製造2025」で、原子力輸出対象として、①CAP1400、②華龍一号、③高温ガス炉、④Na冷却高速炉、⑤溶融塩炉、を挙げた。

パキスタンへの輸出について、上記の4基に加えて、CNNCは、カラチ2,3号機として、華龍一号炉をそれぞれ2015年、2016年に着工した。

2014年5月、CGNは、ルーマニアのチェルナボータにCANDU炉、2基増設の可能性調査に合意した。

中国は2015年11月にアルゼンチンの4基目、5基目の原子炉建設協力で基本合意していたが、今年5月に北京で開催された「一帯一路国際フォーラム」にあわせて、一括請負契約が締結された。建設する炉は、加圧重水炉(PHWR)と華龍一号炉である。

なお、CNNCとCGNは2016年3月、華龍一号炉の輸出を効率的・戦略的に行うことを目的とした合弁企業「華龍国際核電技術公司」を設立した。

中国の国際展開の最大の成果は、2015年秋、英国のブラッドウェルB計画に華龍一号の採用が決まったことである。建設の前提となる英国の規制当局による華龍一号の包括的設計審査(GDA)が今年1月に開始された。

2014年11月、トルコの第3原発計画(4基)の優先交渉権に関する協定をトルコ電力EUAS及び米WHとの間で締結した。AP1000×4基又はAP1000×2基プラスCAP1400×2基が検討されている。

3. 高速炉・高温ガス炉・小型炉も積極開発

中国の原子力開発の基本路線は「軽水炉→高速炉→核融合」であるが、その他の原子炉も熱心に進めている。

高速実験炉CEFR(電気出力2万kW)は福島事故が起きた2011年の7月に初発電に成功した。電気出力100万kWの高速実証炉CDFRの建設も計画している。

高温ガス炉(HTR)については、清華大学と中国核工業建設集团公司(CNEC)の合弁事業体が2012年、山東省石島湾で、電気出力20万kWの実証炉HTR-PMの建設を開始した。CNECは江西省瑞金市で60万kWのHTR、2基の建設計画を進めている。サウジアラビアやインドネシアなどにも売り込みを働きかけている。

小型モジュール炉(SMR)では、CNNCがACP100、CGNがACPR100とACPR50Sを開発中で、イランへの供給について協議中である。2016年11月には海上浮揚型ACPR50Sの建造が開始された。

この他、溶融塩炉(TMSR)や超臨界圧軽水炉(SCWR)、進行波炉(TWR)の開発も進めている。

Ⅲ. ロシア：内外共に積極的に展開

1. 原子力輸出では世界首位

ロシアは1954年に世界最初のオブニンスク原子力発電所(6,000kW)を運転させるなど、原子力のパイオニアとしての歴史を持つ。

旧ソ連時代には、東欧の旧社会主義諸国にソ連製の原子炉の輸出を一手に引き受けてきた。1990年のソ連崩壊で、しばらくの間、原子力開発が低迷したが、21世紀に入ると、国営原子力企業ロスアトムを中心に目覚ましい進展を遂げた。

ロシア国内では、第3世代炉VVER1200/AES-2006の初号機となるノボボロネジII-1号機が2017年2月に営業運転を開始した。同炉は、全電源喪失時や運転員の介入なしでも機能する受動的な安全システム、水素再結合器やコアキャッチャーを装備するなど、福島事故の教訓を取り入れた設計となっている。同じ第3世代炉のノボボロネジII-2号機、レニングラードII-1,2号機は2018年にも運転予定である。

新しい原子炉としては、浮揚式の原子力発電プラント「アカデミック・ロモノソフ号」がほぼ完成し、現在バルチック造船所で係留試験中。2017年中には北極圏の係留地のチュクチ自治管区のペベク市に移送予定。碎氷船用炉のKLT-40Sを2基搭載、電気出力7万kW、熱出力50Gcal/hである。同炉は僻地や離島向けに適しており、輸出も目論んでいる。

ロシアは、旧西ドイツが途中で建設を放棄したイランのブシェール原発の完成契約を1995年に締結し、紆余曲折を経て2011年9月送電開始に漕ぎ着けた。2016年9月にはブシェール2,3号機の起工式が行われた。

中国では、田湾原発1,2号機を1997年に受注、2基とも2007年に運転開始した。福島事故が起きた2011年秋に3,4号機の建設契約を締結し目下建設中。7,8号機の建設も合意している。(注：5,6号機は中国製炉)

インドでは、クダングラム1,2号機を2001年に受注、それぞれ2014年、2016年に発電開始した。さらに3,4号機増設の起工式が2016年10月に行われた。今年6月1日には5,6号機増設の枠組み協定を締結した。

ベトナムでは、ニントゥアン第一原発(2基)を2009年に受注したが、2016年11月、ベトナム政府が建設計画を取り消した。

トルコのアックユ原発(4基)については、初のBOO(建設・所有・運転)方式として2010年5月に政府間協定に署名した。諸手続きはかなり進捗しているが、本格着工には至っていない。

福島事故が起きた2011年の7月には、ベラルーシのオストロベツ原発1号機の建設契約を締結し、2013年11月に着工した。

バングラデシュのルプール原発については、2011年11月に建設協定に署名し、今年秋にも着工の見込みである。

また、フィンランドのハンヒキビ原発について2013年12月、建設契約が締結された。

これらの原子炉受注の多くは、ロシアが、仏・米・日・韓の原子力企業と激しい競争の上で勝ち取ったものである。この他の国々についても、原子力協力協定を締結するなど、積極的に原子炉輸出を働きかけている。

2016年末のロシアの原子炉、濃縮、燃料等の原子力輸出の受注残高は1,300億ドル超、2015年の原子力輸出収入は64億ドルと言われている。ロスアトムは2030年までに全収入の6割を輸出で得る計画である。ロスアトムは、世界の2020年以降の原子炉建設基数を年間約16基と予測して、その内の4~5基を受注する算段である。ロシアの強みは、首脳外交以外に、資金提供や燃料供給、更に人材育成にある。今後開発途上国での原子力導入では、人材育成が極めて重要であるが、ロシアは国内の大学や人材育成機関に年単位で多くの研修生を受け入れている。

2. 当初から高速炉・核燃料サイクル路線堅持

ロシア(ソ連)は、原子力開発の初期から、将来のエネルギー問題解決の鍵として、核燃料サイクルの完結と高速炉の開発を積極的に進めてきた。

高速炉については、1969年に実験炉BOR-60、1973年に原型炉BN-350、1980年に原型炉BN-600が運転開始

し、多くの技術的知見・経験を蓄積している。

BN-350は、発電/海水淡水化プラントとして、カスピ海沿岸のシェフチェンコ(現在カザフスタンのアクタウ)に建設され、寿命のため1999年に閉鎖された。BN-600(於ベロヤルスク)は、電気出力60万kWのタンク型炉で、初期にはナトリウム漏洩・火災等、各種トラブルを経験したが、近年はほぼ順調に運転している(表3)。

これらの実績を背景に、1980年代にベロヤルスクと南ウラルに実証炉BN-800の建設に着手したが、チェルノブイリ事故等の影響を受けて、長らく凍結状態にあった。

しかし、21世紀に入って、ベロヤルスクで建設が再開され、BN-800(図2)は2014年6月に初臨界、2015年12月に初送電、2016年10月に営業運転を開始した。これまでロシアの高速炉燃料は濃縮ウランを使用していたが、BN-800ではウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)を使用する。同地ではさらにBN-1200の建設計画が検討されている。

これらのほか、鉛冷却や鉛・ビスマス冷却の高速炉開発も進めている。鉛冷却高速炉については、セベルスクのシベリア化学コンビナートにBREST-300(30万kW)の建設が計画されている。窒化物燃料施設と再処理施設をセットにしており、近く建設開始の見込みで2022年の運転を予定している。

高速炉開発で注目されるのは、ディミトロフグラードで2015年9月に着工した多目的高速中性子研究炉(MBIR)である。熱出力15万kWで、鉛、鉛・ビスマス、ナトリウムなどによる冷却が可能で2020年の完成予定。幅広い研究が可能で、IAEAの国際フォーラムINPROの枠内で「MBIR国際研究センター」としても活用される。高速炉開発におけるロシアの主導ぶりを如実に示している。

燃料サイクルについては、国内4ヶ所で濃縮工場を操業している。小型遠心機を採用しているのが特徴で、合

表3 高速炉BN-600の最近の設備利用率

年	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
%	74.8	80.9	80.8	78.3	86.1	86.0	87.6

出典：IAEA・PRIS



図2 ベロヤルスク4号機(BN-800)

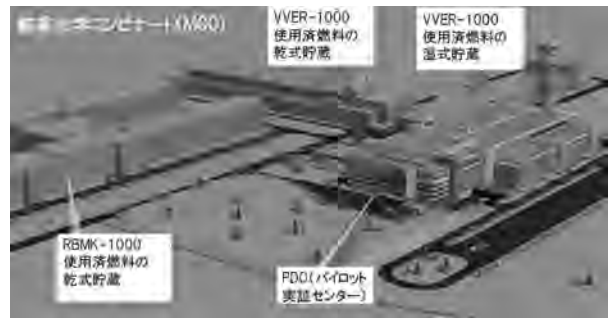


図3 鉍業化学コンビナート(MCC)における使用済み燃料管理関係施設

計能力は年間約2.4万トンSWU程度で、世界全体の3~4割を占める。再処理回収ウランの再濃縮も実施している。

使用済み燃料の再処理は、現在一部しか実施していないが、2020年代には大規模展開の予定である。即ち、VVER-440の使用済み燃料は、マヤクの再処理工場RT-1(1971年操業開始)で再処理されているが、VVER-1000とRBMKの使用済み燃料は、再処理されずに、主に原子炉サイトに保管されている。

ゼレズノゴルスクの鉍業化学コンビナート(MCC)の再処理工場RT-2は、当初VVER-1000の使用済み燃料用に1984年に建設開始されたが、1989年に建設が中断した。6,000トン容量の使用済み燃料貯蔵プール(湿式)は建設が続けられ、現在稼働中である。満杯に近づいたために、貯蔵能力の拡大と共に、新たに乾式貯蔵施設が建設されることになった。湿式貯蔵は最終的には11,000トンにまで拡大予定である。乾式貯蔵については、VVER-1000用とRBMK用の施設が建設され、現在操業中である(図3)。

MCCでは、再処理実証パイロットセンター(PDC、5トン/年)が2016年から稼働しており、2020年には250トン/年規模に拡大予定である。将来的には最新版のRT-2(700トン/年)の2025年の完成を目指している。ロシアは、これらの貯蔵施設や再処理施設を、海外の原子炉顧客向けの利用にも供する考えである

原子力開発を指導してきたロスアトムの子会社キリエンコ総裁が2016年10月、大統領府第1副長官に任命され、後任には経済発展省第1次官のリハチヨフ氏が就任した。

IV. インド：2032年、6,300万kW目標

1. 高速炉含む独自の3段階開発路線

インドの原子力開発の歴史は古く、商業炉第1号のタラプール1号機(16万kW、BWR)は米GEからの輸入で、1969年に運開した。これはアジア初の軽水炉で、47年以上運転しており、世界最古参の原子炉である。

このようにインドは初期に、米国から計2基、カナダから計2基を輸入したが、1974年の核実験を契機に国際的に孤立し、独自の原子力開発路線を歩むことになる。

カナダ炉をベースに、ウラン濃縮が不要な加圧重水炉 (PHWR) を自力開発し、建設を進めてきた。初期には小型の 22 万 kW クラスが中心だったが、20 世紀末～21 世紀初めには一部 54 万 kW クラスが開発され、2010 年頃からは 70 万 kW クラスの建設が始まった。

国内にウラン (U) 資源が少なく、トリウム (Th) 資源が豊富なことから、インドは原子力開発の初期からバーバ博士提唱の 3 段階原子力開発計画を進めている。

- ・第 1 段階：天然ウラン利用の重水炉で発電とプルトニウム (Pu) 生産を行う。
- ・第 2 段階：Pu 燃料高速増殖炉で発電と Pu 生産を行う。さらに Th を照射して U233 を生産する。
- ・第 3 段階：U233 燃料増殖炉 (先進重水炉) で発電と U233 の生産を行い、Th サイクルを完成させる。

この路線に沿って、高速炉と再処理技術の開発を進めている。その一環として、カルパッカムで、電気出力 1.3 万 kW の高速実験炉 FBTR が 1985 年初臨界、1997 年営業運転を開始した。更に同じカルパッカムで高速原型炉 PFBR (50 万 kW) の建設が 2004 年に始まった。当初計画からかなり遅れているが、今年か来年には運転開始の見込みである。

2. 電力不足解消に原子力必須、輸入炉も活用

インドは 2013 年時点で全人口の 2 割近くの約 2.4 億人が電気のない生活を送っている。電気の利用者も、頻繁に起きる停電に悩まされているのが現状である。生活水準の向上や更なる人口増加を考慮すると、今後のエネルギー・電力需要の増加は膨大である。

福島事故後も、インドの原子力推進政策は変わっていない。2011 年 4 月、当時のシン首相は「エネルギー需要は増大しており、クリーンエネルギーである原子力は重要な選択肢である」と明言した。

インドは 2032 年の総発電設備規模を 7 億 kW と想定し、その 9% を原子力発電 (即ち 6,300 万 kW) とする目標である。

インド政府は今年 5 月 17 日、70 万 kW 級の PHWR、10 基の建設計画を発表した。これは勿論「メイク・イン・インド」の国産化によるものである。しかし、国産炉だけで 2032 年の目標を達成するのは難しく、軽水炉の輸入が大前提となっている。

原子力輸出を目論む米国等の思惑とも重なって、2008 年 9 月、原子力供給国会議 (NSG) の臨時総会で、NPT 非加盟のインドへの原子力輸出の解禁が決定された。インドは、2032 年までに計 4,000 万 kW の原子炉輸入を計画し、米・仏・露などとの交渉が活発化した。

NSG による解禁前からロシアが独自に対印輸出をしてきたクダンクラム原発 1.2 号機は、2002 年に着工し、1 号機は 2014 年 12 月に営業運転開始、2 号機は 2017 年 4 月に営業運転を開始した。

2016 年 10 月には、印露首脳会談に併せて、クダンクラム 3.4 号機の起工式が行われた。5～8 号機も、ロシアが建設予定である。更にハリプールでも、ロシアが 4 基建設する見込みである。

仏企業がジャイタプール・サイト向けに原子力輸出することで交渉が続いていたが、2016 年 1 月の印仏首脳会談で同サイトへの EPR、6 基の建設促進で合意、契約の具体化を急いでいる。

米国製炉の建設については、2016 年 2 月にインドが「原子力損害賠償の補完的補償に関する条約 (CSC)」を批准したことから、ようやく本格化し、同年 6 月の米印首脳会談の共同声明で「6 基の WH 製原子炉建設に向けて、サイトの準備工事が始まった」ことが明らかになった。サイトは当初予定のミティ・ビルディからコバダに変更された。米国とタグを組む日本は 2016 年 11 月、モディ首相の来日時に併せて、日印原子力協定に署名した。しかし、2017 年 3 月の WH の破産申請により、WH 製炉の輸出動向は不透明である。

インドの 2010 年の原子力損害民事責任法 (幾つかの状況下ではサプライヤーに対する賠償請求権を認める) は、依然として海外投資家の投資意欲をある程度削いでいるようである。2015 年には原子力保険プールが設立され、多くの交渉が進行中であるが、ロシアを除いて、建設の具体化には至っていない。

中国やインドが原子力開発に熱心なのは、エネルギーセキュリティや気候変動対策の面もあるが、石炭火力等による深刻な大気汚染防止の意味合いも非常に強い。

V. 韓国：エネルギー輸入脱却へ原子力開発

1. 第 3 世代国産炉 APR1400 が営業運転

韓国はエネルギーの 96% を輸入に依存しており、日本の依存度 94% よりも高く、準国産エネルギーとしての原子力開発はまさに国家戦略の柱となっている。

福島事故を受けて、政府は運転中の全原子炉の安全点検を命じた。点検調査の結果、問題は確認されなかったが、総額 10 億ドルの安全性改善対策が策定され、5 年計画で実施中である。原子力規制機関の独立性を強化するために、2011 年 10 月、原子力安全委員会 (NSSC) は大統領直轄下の組織となった。

福島事故後も韓国の原子力推進政策は変わらず、2011 年 11 月、政府は「世界一の原子力模範国家となる」と宣言した。

2015 年 7 月発表の第 7 次電力需給基本計画では、2029 年までに原子炉 12 基が新規に運転し、1 基が閉鎖予定である。2035 年の原子力規模は 3,830 万 kW と予測している。

韓国は第 3 世代の国産炉 APR1400 を開発し、新古里 3.4 号機を 2008 年、2009 年、新ハヌル 1.2 号機を 2012 年、2013 年にそれぞれ着工した。このうち新古里 3 号機

は2016年12月に営業運転開始、同4号機は今年中に営業運転開始の予定である。なお、新古里3,4号機は途中でケーブルの品質不正問題が発覚し、ケーブルの取替のため1年以上の遅延をもたらした。

一方、韓国最初の発電炉である古里1号機(57.6万kW, PWR)はNSSCの承認のもとに、2017年6月19日、永久閉鎖された。古里1号機は1978年に営業運転を開始(運転認可期間30年)し、改修工事を行い、10年間の運転延長をしたが、閉鎖の選択をした。韓国も、原子炉の新規建設に加えて、廃炉の時代に入る。

2016年9月12日、韓国南東部でマグニチュード5.1と5.8の地震が発生、韓国水力原子力(KHNP)は慶州市に立地する月城原発1~4号機をマニュアルに基づき手動停止した。これは停止基準の0.1g(98ガル)を超えたため。KHNPによる徹底調査と安全確認を受け、NSSCが同年12月、4基の再稼働を承認した。韓国では、地震がほとんど起きないので、韓国民の不安はかなり高まったようである。

1974年発効の韓米原子力協力協定が2014年に期限切れになるため、両国間で交渉が続けられたが合意に至らず、暫定延長された。韓国は、濃縮・再処理が制限されているため、日本並みに商業利用できることを望み、一方、米国は核不拡散の観点から拒否してきた。2015年6月に協定の20年間延長で合意した。但し、濃縮や再処理は一部研究施設における研究活動に限定された。

2. UAE への輸出炉、2018 年運転へ

韓国の産業は、ある意味で日本に見習い「追いつき追い越せ」政策を追求し、その進展ぶりは目覚ましいものがある。鉄鋼、造船、半導体では凌駕するまでに成長し、原子力でも、2009年の年末、アラブ首長国連邦(UAE)から韓国国産の第3世代炉APR1400、4基の受注獲得に成功し、世界中に韓国ショックを引き起こした。

同じ2009年12月、韓国はヨルダンから研究用原子炉の受注にも成功している(2016年12月に完成)。

韓国は翌2010年1月には2030年までに80基の輸出達成目標を掲げ、世界3位の輸出国になると高言した。さすがに目標については、原子力輸出の中心的担い手である韓国電力公社(KEPCO)が2015年、UAEへの4基以外に2020年までに6基達成に修正した。

韓国は、トップ外交などを通じて、東南アジア、中東、アフリカ、南米への市場展開を活発に進めている。

2016年9月、KEPCOは、2033年までに400万kWの原子力導入を目指すケニヤへの協力を目的に、ケニヤ原子力発電委員会と協力協定を締結した。

2016年にはまたKHNPは、建設が中断したままのウクライナのフメルニツキ3,4号機を完成させる目的で、ウクライナのエネルゴアトムとの協定に署名した。

UAEへの輸出については、バラカ1号機が2012年7月、その後1年間隔で2,3,4号機の建設が始まった。バラカ原発の建設主体である首長国原子力公社(ENEC)は2016年5月、韓国と協力して、運転・管理を担当するNAWAH エナジーの設立を決定した。バラカ1号機の運転開始は、慎重を期して、当初予定の2017年から1年遅れの2018年にずれ込むようである。フィンランドや米国での新規建設では、大幅遅延が起き、原子力供給者の経営を大きく揺るがせているが、UAEの場合、建設の遅れはほんのわずかである。仏や米企業は夫々国内建設で長期間のブランクがあったのに対して、韓国企業は国内建設を継続してきた実績が奏功したと理解される。

韓国は発電だけでなく海水淡水化にも利用できる小型炉SMARTの開発にも注力しており、2012年、原子力安全委員会から、SMARTの標準設計認証を受けた。2015年1月には輸出・建設を目的としたSMARTパワー社が設立された。2015年3月にはサウジアラビアとの首脳会談で、SMART炉2基の輸出可能性の検討で合意した。中東や東南アジア市場への働き掛けを強めている。

2017年5月の韓国大統領選挙で、共に民主党の文在寅氏が大統領に当選、就任した。氏は選挙戦中、脱原子力を公言してきた。既に一部の新規建設が中止されたとも報じられており、今後の韓国の原子力拡大・原子力輸出動向への影響が注目される。

著者紹介



小林雅治(こばやし・まさはる)

日本原子力産業協会

(専門分野/関心分野)世界・各国の原子力動向

長寿命核種の分離変換技術の現状

第4回(最終回)加速器駆動システムを用いた核変換システムと分離変換技術の成熟度

「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会

日本原子力学会「放射性廃棄物の分離変換技術」研究専門委員会は、国内外における分離変換技術や関連する技術の研究開発状況について調査・分析してきた。長寿命核種の分離変換技術の現状について、4回に分けて紹介する。第4回の最終回では、加速器と未臨界炉を組み合わせた加速器駆動システムと核変換用窒化物燃料を用いた核変換システムについて解説するとともに、分離変換技術の開発がどの段階まで進んでいるのかを解説する。

KEYWORDS: *Double-strata, Accelerator-driven System (ADS), Lead-Bismuth Eutectic (LBE), Nitride, Technology Readiness Levels*

I. ADS を用いた階層型分離変換システム

核変換専用の燃料サイクルを商用発電用燃料サイクルに付加した階層型分離変換システムにおける核変換専用燃料サイクルでは、発電用燃料サイクルと比べて取り扱う燃料の規模を極めて小さくすることが可能で、核変換対象核種であるマイナーアクチノイド(MA: Np, Am, Cm)をコンパクトに効率よく核変換することが可能となる。一方で、MAを主成分とした燃料を用いるために、このような燃料を臨界炉で用いた場合には、運転制御性の観点から様々な障害があると考えられる。そこで、MAを主成分とした燃料を用いた核変換システムとして提唱されているのが、加速器駆動システム(ADS: Accelerator Driven System)である¹⁾。

1. ADS による核変換技術

(1) ADS による MA 核変換システムの特徴

ADSは、加速器と未臨界炉を組み合わせたシステムである²⁾。ADSの運転及びMA核変換の原理を図1に示す。加速器で数百 MeV から数 GeV に加速した陽子を標的である質量数の大きな核種に入射すると、核破碎

反応と呼ばれる反応で大量の中性子が放出される。標的の周りに MA を主成分とする燃料を設置しておき標的から放出された大量の中性子を照射すると、MA は中性子を吸収して核分裂反応を起こし、主に短寿命または非放射性の核分裂生成物になる。臨界状態の通常の原子炉とは異なり、ADS では MA 燃料を装荷した炉心を常に未臨界状態にしておく。これにより、加速器からのビーム入射で未臨界炉心内での核分裂連鎖反応は一定状態に保持されるが、ビームを止めれば直ちに停止するため、安全性の高いシステムとすることができる。

核破碎反応で発生する中性子数は、標的核種の質量数にほぼ比例するので、質量数の大きい核種を標的核種(核破碎ターゲット)に用いる。核破碎反応では、ターゲットに付与されるエネルギーが比較的小さいという利点があるとはいえ、ADS では核破碎ターゲットの除熱が大きな課題となる。現在は、ターゲット自体が冷却材として使える液体ターゲットを用いるのが主流の考え方であり、鉛ビスマス共晶合金(LBE: Lead-Bismuth Eutectic)が最も注目されている。鉛45%とビスマス55%の場合、融点(124°C)から沸点(1,670°C)まで幅広い



図1 加速器駆動システムの原理

Present State of Partitioning and Transmutation of Long-lived Nuclides(4); Transmutation System using Accelerator Driven System and Technology Maturity of Partitioning and Transmutation: Research Committee on Partitioning and Transmutation of Radioactive Waste.

(2017年5月30日 受理)

温度域で比較的扱いやすい。未臨界炉心の冷却には、核破砕ターゲット冷却と同じものを使用するのが設計上合理的であることから、LBEを炉心冷却材にも使用する。ただし、ビスマスの中性子捕獲反応で α 線放射核である ^{210}Po (半減期138日)が生成されることや、 500°C 以上の高温領域で鋼材の腐食が大きいという課題もある。

(2) 研究開発の現状および今後の研究計画

日本では日本原子力研究開発機構(JAEA)が中心となってADSに関する様々な研究開発課題に関する研究開発が行われている。JAEAが提案しているADS概念は、図2に示すような熱出力800MWのタンク型LBE冷却システムである。加速器には、加速エネルギー1.5GeVの超伝導陽子線形加速器を用いる。核変換対象のMAの親物質となるUを含まず、MAを主成分とする専用燃料を用いて核変換を行うために、ZrNを希釈材とするMA含有窒化物、(Pu, MA, Zr)Nを未臨界炉心燃料に用いることを想定している。アクチノイド中のMAの割合は約60%程度で、Puは燃焼反応度調整のために初期燃料にのみ混合するが、燃焼にともなってMAからも生成するために、Puの割合はほぼ一定である。現状の設計では、このシステムで年間約250kgのMAを核変換可能で、これは典型的な100万kW級軽水炉約10基で1年間に生じるMA量に相当する。

現在は基礎研究段階として、大強度陽子加速器、LBE利用技術、ADS用構造材料、MA装荷未臨界炉心特性等に関する研究開発を実施している。また、研究レベルを基礎研究段階から工学研究段階に進めるために必要な核変換実験施設(TEF: Transmutation Experimental Facility)の建設のための要素技術開発を推進している。

ADS用の陽子加速器として最も有望であると考えら

れている線形加速器については、加速空洞を超伝導化(高純度ニオブ等の超伝導体で製造)することで加速器性能を飛躍的に向上できると考えられることから、超伝導空洞に関する基礎的な研究を進めている。また、大強度陽子加速器施設J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)を活用して大強度加速器のビームトリップ原因の分析を行い、加速器の信頼性向上に関する研究を進めている。

陽子ビームを加速するための真空の加速管と核破砕ターゲットの隔壁を「ビーム窓」と呼ぶ。ビーム窓は、陽子ビームの通過による照射損傷と発熱を受けると同時に、ターゲットから放出される中性子の照射を受ける。また、LBEの流動による腐食環境下での高温強度が要求されるなど、厳しい環境での利用が想定される。これらの特性を的確に把握し、陽子ビーム窓の合理的な設計と寿命評価を行うことがADSの運転の安定性を確保する上で重要となる。JAEAでは、流動LBE中の酸素濃度制御技術の開発を進めるとともに、高温腐食試験ループを製作し、 550°C までの流動LBE中の酸素濃度制御下での鋼材腐食試験を体系的に進めている。

ADSでは、炉心を未臨界状態に維持するためがあるため、炉心の未臨界度をあらかじめ精度良く予測しておくことが重要となる。また、炉内構造物や燃料の健全性を確保するためには、炉心領域内の中性子束分布や発熱密度分布を正確に予測して機器や燃料を設計する必要がある。このため、ADSの設計には、未臨界炉心を構成する核種の核反応断面積データとともに、炉心特性を予測する解析システムの解析精度の検証と向上が重要である。JAEAでは、核破砕挙動解析を行うカスケード解析コードと高速中性子体系の核特性・燃焼特性を解析する炉心解析コードを結合したコードシステムの開発を進めるとともに、臨界実験装置等を用いた実験によりMA断面積データの検証を実施している。

ADSを実用化するためには、段階的に研究開発を進めていく必要がある。基礎実験の次の工学試験のステップとして、JAEAではTEFの建設を計画している。TEFは、J-PARC施設の一環として、既設J-PARC線形加速器からの400MeV陽子ビームを導入する予定である。TEFは、核破砕ターゲットに関する工学的技術課題の解決に取り組むADSターゲット試験施設(TEF-T: ADS Target Test Facility)およびMAを装荷した未臨界炉心特性とその予測精度を検証していく核変換物理実験施設(TEF-P: Transmutation Physics Experimental Facility)の2施設から構成される。現在、TEF建設に向けたモックアップ試験等を実施している。

2. 核変換用燃料

(1) MA含有窒化物燃料の選定

MAを高含有する燃料として、窒化物燃料を第1候補

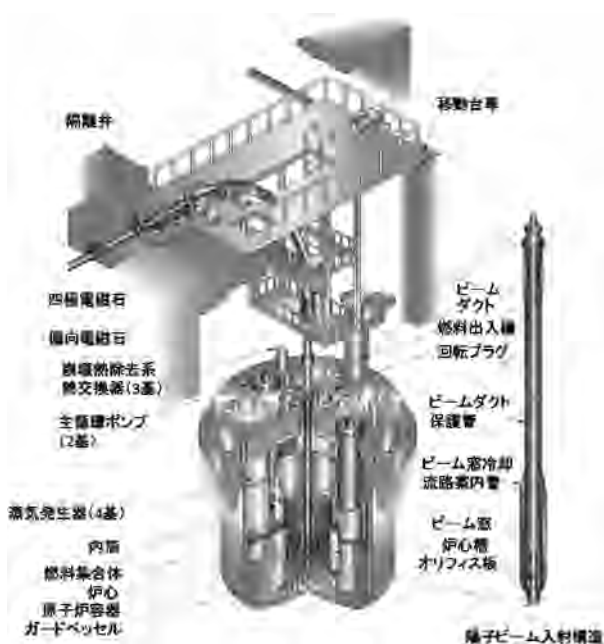


図2 鉛ビスマス冷却タンク型ADS概念図

としている。酸化物燃料の場合、Am や Cm は空気中や不活性雰囲気中でも高温では4価から3価に移行するため、これらを高含有すると化学的安定性や熱伝導率が顕著に低下する。これに対し窒化物燃料では、良好な核的性質に加えて、①高融点、高熱伝導率により Cold Fuel Concept (絶対温度で表した燃料最高温度を融点の1/2~1/3程度以下に抑えることにより物質移動を抑え、FP ガス放出およびFP ガススエリングをともに抑制する)の長所を活かすことが出来る、②アクチノイド-窒化物相互の溶解度が大きいため燃料組成の融通性が大きい、③電導性が良く、高放射性で高崩壊熱を伴う燃料に適した金属電解法を応用した乾式再処理技術が適用できる、等の利点がある。

炉心へ燃料を装荷する際には、MA 装荷量を調整するために、ZrN を希釈材とした窒化物燃料(Pu, MA, Zr)N が用いられる。希釈材のZrN は、Pu や MA と窒化物固溶体を形成することにより、MA 含有窒化物燃料の化学的安定性改善にも寄与する。

(2)MA 含有窒化物燃料の製造技術

燃料製造において出発物質となる MA は、商用サイクルの再処理後の高レベル廃液から群分離後に回収する MA と、ADS 使用済み燃料の乾式再処理工程から回収する MA とがある(図3参照)。

商用サイクルの再処理後の高レベル廃液から群分離後に回収する MA は、酸化物を経由して、炭素熱還元により MA 窒化物とする。炭素熱還元の反応式を(1)式に示す。



ここで、M はアクチノイド元素を示す。(1)式は酸化物と炭素の混合物を N₂ 気流中で加熱し、酸素を CO の形で除去することにより窒化物に還元する反応である。実際には、炭素と二酸化物の混合比(C/MO₂比)が当量の2であると酸化物の残留が避けられないため、当量より過剰に炭素を添加した混合物を N₂ 気流中で加熱して酸化物を除去した後に、加熱雰囲気を変えて N₂-H₂ 気流に変えて残留炭素を除去する方法が広く用いられている。U や Pu に比較して、Am や Cm では相対的に酸化物の熱力学安

定性が高く炭化物の安定性が低いので、C/MO₂比をより過剰にしている。また、Am は蒸気圧が高く、特に酸化物の還元時に蒸発しやすいので、Am 含有窒化物を調製する場合は、N₂ 気流中の加熱温度を UN や (U, Pu)N の調製時より約 200K 低い 1573K とし、N₂-H₂ 混合気流中の炭素除去反応を 1773K で実施している。JAEA では炭素熱還元直後の窒化物に含まれる酸素、炭素の残留量を 0.1wt% 以下に抑制することに成功している。

ADS 使用済み燃料の乾式再処理工程から回収する MA は、陰極回収物の Pu-MA-Cd 合金を N₂ 気流中 973K で加熱し、Cd の蒸留と Pu および MA の窒化を同時に行う蒸留窒化法により窒化物とする。これまでに PuN, AmN の調製を実施している。Pu を 12wt% 含む Pu-Cd 合金から PuN を調製した際のマスバランス評価では、出発物質に含まれる Pu の 99% 以上が窒化物として回収されている。一方、AmN の調製の際には、反応生成物中に少量の Cd の残留がみとめられたが、真空中、873K で加熱することにより容易に除去され、単相の AmN が得られたことが報告されている。

MA 含有窒化物燃料ペレットの製造では、焼結工程において、蒸気圧の高い Am の蒸発による損失をできる限り抑えることが重要である。燃料ペレットの密度は、照射挙動等に関するデータ不足のため、現状では最適化されていない。燃料ペレット中の不純物酸素および炭素含有量の仕様も現状では定まっていないが、燃料の物性値や照射挙動に悪影響を及ぼさないためには、高速炉用 (U, Pu)N 燃料ペレットと同様に、酸素、炭素とも 0.15wt% 以下とすることが一つの指標となる。しかし、MA 窒化物の粉碎、混合、成型等の粉末工程を不活性ガス雰囲気中で実施しても、粉末の加水分解や高温での酸化を完全に抑えることはできず、焼結ペレット中の酸素含有量が炭素熱還元直後より増加するのは避けられない。

MA 含有窒化物燃料の製造技術については、これまでに実施した Pu や MA を用いた試験により、図3に示した製造フローの実験室規模での技術的成立性が示されている。今後の課題としては、核設計や熱設計以外に製造性や照射挙動を考慮に入れた合理的な燃料仕様を定めることや、製造工程中の試料の変質を出来るだけ抑制するために粉末工程を短縮化すること等が挙げられる。一方、実用規模への展開については検討を開始した段階であるが、大きな崩壊熱(約 400W/kg-HM, 集合体1体あたり約 20kW)対策が特に重要な課題である。

(3)MA 含有窒化物燃料のふるまい評価

窒化物燃料については、(U, Pu)N 燃料が主に高速炉用新型燃料、高濃縮 UN 燃料が主に宇宙炉用燃料として古くから研究開発が行われてきた。照射試験の結果から、He ボンド型の (U, Pu)N 燃料で最も留意すべき点として、高燃焼度で厳しくなる燃料と被覆管の機械的相互作用が挙げられる。この課題を克服するためには、燃料

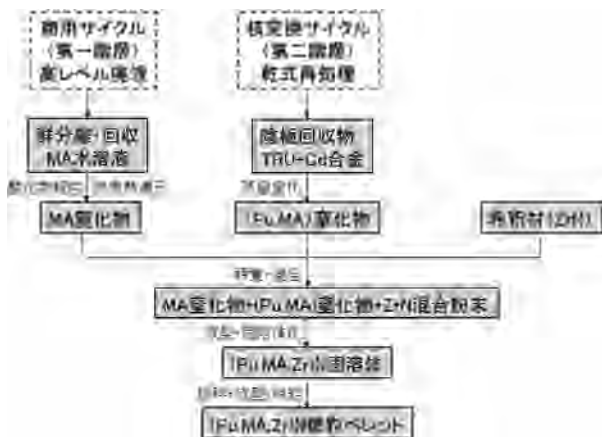


図3 ADS用MA 窒化物燃料製造フロー

最高温度をある閾値以下((U, Pu)N 燃料ではおおむね 1573~1673K 以下)とすることやスミア密度(燃料棒横断面における被覆管内側を燃料が占める面積割合)が 75%~80% TD 程度の低密度燃料の採用が有効である。また、窒化物燃料を用いた Na 冷却高速炉では、過酷事故時に急激な圧力上昇を伴う燃料と冷却材の相互作用が発生する可能性が高く、有効な再臨界回避方策を明確にできないという安全上の懸念も指摘されているが、LBE を冷却材とする ADS では緩和されると考えられる。一方、ADS 用 MA 含有窒化物燃料の独自の課題として、希釈材としての ZrN の含有や照射中および保管中に大量に生成する He の影響を評価する必要がある。

JAEA では、燃料ふるまい評価に先立ち、MA 含有窒化物燃料の熱伝導率、比熱、熱膨張率等の熱物性データの取得を進めてきた。これらの結果はデータベースとして整理され、多くは組成や温度の関数として定式化されている³⁾。これらを用いて JAEA が設計している熱出力 800MW の ADS の燃料温度分布を計算評価すると、燃料最高温度は約 1400K であった。この結果から、燃料ペレット密度 80% TD、スミア密度 76% TD という低密度燃料を用いた場合でも、Cold Fuel Concept が成立する可能性が示唆された。

MA 含有窒化物燃料を模擬した(Pu, Zr)N 燃料の照射試験は欧州、ロシア、日本で実施され、良好な照射挙動が報告されている。一方、MA 含有窒化物燃料の照射試験は、米国 ATR の AFC-1AE 照射試験とフランス Phenix の FUTURIX-FTA 照射試験に限られている。

ADS 用 MA 含有窒化物燃料のふるまい評価については、物性値の取得はある程度進んでいるのに対し、照射試験データの取得はほとんど進んでいない。しかし、ADS 用 MA 含有窒化物燃料の照射挙動評価にあたっては、高速炉用(U, Pu)N 燃料の照射試験から得られた知見を活かせる部分も多い。JAEA では軽水炉燃料用ふるまい解析コード FEMAXI-7 をベースにした、MA 含有窒化物燃料用のふるまい解析コードの整備を進めている。

II. 分離変換技術の成熟度

新技術の着想から実用化までをいくつかの段階に分け、技術開発の進展を体系的に示す指標である、技術成熟度(Technology Readiness Levels: TRL)を用いて、わ

が国における分離変換技術の成熟度を評価した。技術成熟度の厳密評価が目的ではなく、課題を客観的に把握するとともに、課題解決の方策を提案することを目指した。

1. TRL 評価の対象と範囲

分離変換技術の TRL を評価するにあたり、技術分野としては、MA 核変換システム、MA 分離・再処理、および MA 含有燃料とした。対象とした技術の範囲は、わが国で利用可能な技術情報、すなわち、わが国で開発された技術、わが国が参加した国際協力による成果、および広く公開されて共有された技術とした。他の国の技術成果であってわが国で十分に利用可能でないものは、対象外とした。

成熟度の評価には、技術分野ごとに国際原子力パートナーシップ(Global Nuclear Energy Partnership: GNEP)での評価に用いられた TRL 基準⁴⁾をほぼ踏襲する形で用いた。ここでは、表 1 に一般的定義として示すとおり、概念開発段階(TRL1~TRL3)、原理実証段階(TRL4~TRL6)、性能実証段階(TRL7~TRL9)の 3 段階に大きく分け、それぞれの段階をさらに 3 段階に分け、全体で 9 段階の TRL とした。

2. TRL 評価結果

(1) MA 核変換システム — MA 装荷 FBR 炉心—

MA 装荷 FBR 炉心の TRL 評価結果を他の技術分野の結果とともに図 4 に示す。これまでに、高速炉臨界実験装置 FCA での Np, Am, Cm の反応度値と核分裂率測定、ロシアでの Np 反応率分布測定、常陽での Np, Am のサンプル照射試験が行われた。また、もんじゅを

表 1 GNEP で用いられた TRL 基準の一般的定義

	TRL	定義の概要
性能実証段階	TRL 9	実機フラント運転
	TRL 8	実機フラント試験
	TRL 7	プロトタイプ試験運転
原理実証段階	TRL 6	技術基盤の確立
	TRL 5	要素技術の完成
	TRL 4	要素技術の開発
概念開発段階	TRL 3	技術開発の活性化
	TRL 2	技術概念の具体化
	TRL 1	システム概念の構築



図 4 分離変換技術の TRL 評価結果

MA 装荷炉心に置き換えた設計、長期原子炉停止によって Am の蓄積した炉心の設計/性能試験の一部が行われた。これらより、MA 装荷 FBR 炉心は TRL4 を達成し、TRL5 を実施中と評価した。

(2) MA 核変換システム – MA 装荷 ADS –

ADS 炉心技術については、基礎的な未臨界炉物理実験(TRL2)が完遂し、TRL3 の段階であると評価した。MA 装荷 ADS 炉心については、MA サンプル照射および核データ評価が実施され、TRL3 を達成し TRL4 の段階であると評価した。ADS プラントについては、LBE ループ実験が行われ、TRL3 達成と評価した。核破碎ターゲットについては、ターゲット照射試験(TRL3)が進行中である。陽子加速器では、陽子線型加速器が建設され、J-PARC で運用されており、TRL3 達成と評価した。

(3) MA 分離・再処理

MA 分離のために、幾種類かのプロセスが開発されているが、どのプロセス技術においても TRL に明確な差異はなかった。抽出クロマトグラフ法、SETFICS プロセス、および DIDPA プロセスでは、使用済み燃料を用いたベンチ規模のバッチ試験(TRL3)が完遂している。DGA プロセスでは、模擬使用済み燃料を用いたベンチ規模のバッチ試験(TRL2)が実施された。溶融塩電解精製プロセスでは、模擬物質を用いた工学規模の単位操作試験(TRL4)を実施中である。

(4) MA 含有燃料

MA 均質リサイクルのための MA 低含有酸化物燃料は、基礎データベースの構築などが行われ、常陽での照射試験を実施しており、TRL3 を達成し、TRL4 の段階であると評価した。MA 均質リサイクルのための MA 低含有金属燃料は、基礎物性データベースを構築し、フランスのフェニックス(Phenix)炉を利用して、スラグ形態の MA 含有金属燃料の照射試験およびその照射後試験が進捗中であり、TRL3 を達成し、TRL4 の段階であると評価した。MA 非均質リサイクルのための MA 高含有酸化物燃料および窒化物燃料は、基礎的な物性は評価されているものの、照射試験が未実施であるので、TRL2 を達成し、TRL3 が進捗中と評価した。

3. 評価結果に基づく考察と今後の課題

TRL 評価結果から、それぞれの技術は、概念開発段階をほぼ完了し、原理実証段階にあることがわかる。原理実証段階においては、相当量の MA を用いた研究開発が必要となるが、既存の施設だけでは実施が困難である。

MA 核変換システムでは、FBR と ADS の TRL を高める共通課題として核的技術の向上があり、MA、高次 Pu に関連した積分実験、核的影響評価の基礎データ蓄積、予測手法の向上を行う必要がある。特に MA 核データ積分実験(TRL5)には、炉物理実験施設と MA 試料調達

の双方の観点から施設・設備の整備が必要である。

MA 分離・再処理および MA 含有燃料では、いずれの技術も、TRL4 までは、使用済み燃料などを用いたベンチ規模試験や模擬物質を用いた工学規模の単位操作試験などによる着実な取組で達成できると考えられる。しかし、TRL5 における使用済み燃料を用いた工学規模の単位操作試験や実プロセス分離回収 MA を用いた燃料ペレットの製造の実施には、新たな施設建設も含む大幅な施設・設備の拡充、大量の MA 試料の調達、研究開発体制を含む技術力の十分な成熟が不可欠である。

分離変換技術の実用化に向けた研究開発を進展させるためには、既存施設の有効活用と新規施設の戦略的な整備を効果的に組み合わせることが重要となる。

JAEA が建設を計画している TEF は、kg 単位の MA を使用して核変換システムの核特性に関する研究開発を実施可能な施設である。高発熱、高線量の MA を取り扱うための装置のモックアップ試験を進めるとともに、MA の調達方法や MA 含有燃料の製造方法に関しても既存施設の活用や新規施設の整備計画を検討している。

人類共通の課題である放射性廃棄物の安全な処理処分を実現するために、幅広い学術・技術分野で国際協力を活用して効果的に研究開発を進めるために、若い研究者・技術者がこの技術の実現を目指した研究開発に積極的に参加することが期待されている。

本解説シリーズは、「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会が編集公刊した分離変換技術総論をもとに執筆したものです。

– 参考資料 –

- 1) 「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会、分離変換技術総論、日本原子力学会(2016)。
- 2) 大井川宏之、ADS による核種分離・転換、NSA コメントリーシリーズ、No.22(2016)。
- 3) T. Nishi, Y. Arai, M. Takano, M. Kurata, Property Database of TRU Nitride Fuel, Japan Atomic Energy Agency, JAEA-Data/Code 2014-001(2014)。
- 4) GNEP Technical Integration Office, Global Nuclear Energy Partnership Technology Development Plan, GNEP-TECH-TR-PP-2007-00020(2007)。

著者紹介

辻本和文(つじもと・かずふみ)

本誌, 59[8], p.53(2017)参照。

荒井康夫(あらい・やすお)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)核燃料, 核燃料サイクル

湊 和生(みなと・かずお)

本誌, 59[8], p.53(2017)参照。

材料挙動と計算機シミュレーションの接点

第1回 原子力材料挙動のカイネティックス計算と実験への期待

京都大学 森下 和功

照射脆化予測の必要性と照射損傷プロセスのマルチスケール性について解説する。照射脆化を支配する欠陥集合体の核生成は、照射速度に強く依存する。原子炉材料の照射劣化を材料試験炉やイオン加速器を用いた加速照射で模擬しようとする場合は、この照射速度依存性をしっかり理解する必要がある。

KEYWORDS: *Computer Simulation, Radiation Damage, Irradiation Embrittlement, Multiscale Modeling, Nucleation Process, Fluctuations, Dose-rate Dependence*

I. はじめに

原子炉で使う鉄鋼材料は中性子に当たると脆くなる。これを照射脆化という。大きな力がかかると、バリッと割れる。こんなことが、大事な閉じ込め機能を背負わされている压力容器で起こったら大変だ。そんな懸念から、予防保全の一環で、压力容器の劣化管理が行われている。原子炉の起動・停止時もしくは異常の発生時など、たとえ熱応力や熱衝撃が激しく加わっても大丈夫なようにしている。通常の起動・停止なら制御も簡単で、圧力温度制限曲線の定めに従って運転する。そもそも材料の脆性は温度依存の性質なので、低温で変な力さえかけなければ割れることなどない。気になるのは、不意打ち、すなわち異常の発生時である。冷却水が喪失し、非常用の冷却系が働いたらどうなるか。急冷による熱衝撃でバリッといくかもしれない。平時は動かない安全系の装置でも、その正常な働きによって压力容器が壊れるなんて目も当てられない。もちろん実際には、そんなことが起こらぬよう脆化の程度はいつも監視される。これがサーベイランス試験(破壊靱性試験)だ。実容器と同じ素性の鋼片(監視試験片)を予め炉内に装荷しておき、決まった時期に取り出して健全かどうかを調べる。照射を受けた材料が、実際に異常に耐えられるかどうかの確認だ。ただ、同じ素性とはいえ、応力のかかり方や照射のされ方など、鋼片の環境は現物の压力容器とは明らかに違う。また、もうひとつ気になるのは、こうした試験を行うのは、压力容器のふたを開ける定期検査の時だけだということ。今大丈夫でも、果たして次の定期検査まで

Computational modeling of the behavior of nuclear materials (1) ; kinetics of microstructural changes in nuclear materials during irradiation : Kazunori Morishita.

(2017年8月4日 受理)

確証が持てるのか、いわゆる予測の問題である。

まずは設置環境の違いをどうするか。本来なら、現物の压力容器(母集団)から試験片(標本)を切り出して、その性質から現物の性質を推定したいところだ。いわゆる統計学の標本抽出の問題だ。もちろんそんなことなどできるはずもない。そこで代わりとしての監視試験片の登場となるのだが、監視試験片はどの程度現物を代表し得るのか。監視試験片に対する照射速度は現物のそれより何倍かは高く、果たして両者の脆化の違いはどの程度か。限られた本数しかない監視試験片から、果たして現物の性質をきちんと描き得るのかなど、加速試験の解釈としても、また、統計学の対象としても、興味が尽きることはない。現実的なことを言うと、監視試験片の方が現物よりも炉心に近く、それゆえ脆化は進んでいると考えて、試験片が大丈夫なら現物も大丈夫と判断する。それでいいのか?とのご指摘もあろうことから、不確実性への対応として、現物の压力容器の非破壊検査が相互補完的に行われる。こうして、設置環境の違いの問題はクリアされる。残るは予測の問題だ。

II. マルチスケールな現象を予測する

予測の問題はちょっと難しい。方法論としては、経験論でいくか、理屈を信じるか、あるいは、両方を混ぜるかになる。経験論とは、既存の照射脆化データを使って予測することだ。国内商用原発が稼働して40年。この間、多くの監視試験が行われてきた。データをきちんと整理すれば、40年までの照射に対しては、今後、経験論で予測できるはずと考える。しかし、40年超となるとこうはいかない。予測は完全に外挿になる。60年稼働を目指す炉の脆化予測のフィロソフィーは、40年未満のそれとは分けるべきかと考える。

一般論として予測を外挿で行うのは難しい。そこで、

理屈を重ねて予測式を作り、少しでもあいまいさを解消しようと努力する。理屈とは、材料学で積み上げられた理論のこと。ただし現実には、いくつもの理屈が複雑に絡み合っていて、少なくとも私の頭ではわからない。そこで、計算機シミュレーションの登場となる。

照射によって材料の中で起こる現象はとても複雑だ。詳細は解説^{1~3)}に記述した通りで、いわゆるマルチスケールな現象と呼ぶ。と書くと、何やら特別なことのように聞こえるかもしれないが、決してそんなことはない。自然界のどんな現象も、時間的に空間的にミクロからマクロまでのあらゆる現象を含んでいる。川の流れだって、ざっくり見れば連続体としての流体の動きであるし、ぐっと近づけば水分子どうしの相互作用も見えてくる。さりとて、いちいち水分子を見ないと川の流れが予測できないということはない。そんなときは、とりたてて“マルチスケール”などと呼ぶ必要はない。一方、材料照射の場合は、残念ながら川の流れほどははっきり中身がわかっていない。そこで、原子スケールのはじき出し衝突から、格子欠陥どうしの反応、そしてマクロな材料挙動まで、あらゆるスケールを考える必要がある。数十メートル級の人工物の寿命の議論までを含める時もある。マクロスケールでは語れない部分を微視化しミクロスケールで解析を行ったり、あるいはその逆に、ミクロな情報を粗視化してマクロなモデルに繰り込んだりする。こうしたミクロ-マクロ関連の問題は、熱力学・統計力学において確固たるものがある。ただし、熱力学平衡からはみ出ると予測の精度は甘くなる。そこで、理屈の積み上げに経験論の外挿を混ぜながら、程よく現実的な予測を行うことになる。これが、今のJEAC4201-2007⁴⁾である。ボトムアップでなく、また、トップダウンでもない新たな予測のフィロソフィーがそこにある。

Ⅲ. 改めてマルチスケールとは

ここで改めてマルチスケールとは何かを問う。分子動力学、第一原理計算、モンテカルロ計算、反応速度論解析、有限要素法などなど、多くの計算手法を使えばマルチスケール?…半分くらいは正解だが、手法の多用は結果論でしかない。そもそも現象そのものがマルチスケールなので、マルチスケールに解かざるを得ないということだ。はて、どういうことか。以下に、照射欠陥の核生成現象を例に説明したい。

1. 核生成のエネルギー論

圧力容器鋼のような照射下で使われる金属材料内では、高速中性子の入射により、原子はじき出しの衝突連鎖があたかもビリヤードのように起こっている。そして、原子空孔や格子間原子などの格子欠陥が過飽和に生

成する。過飽和、すなわち、その温度では材料中に溶けきれないほどの過剰な格子欠陥は、析出し、ポイドや転位ループなどの集合体になる。こうした欠陥集合体の形成が照射脆化の原因となるのであるが、このプロセスは、まさに図1のように、過飽和な水蒸気から水滴核が生成する現象と同じである。そこで、図2のような核生成自由エネルギー ΔG を考える。横軸は水滴核の半径である。この類の図は、教科書のあちこちに現れるが、人によって書きぶりや理解が異なるので苦労する。私もいくつかの教科書を迷い歩いたが、やがて小岩らの教科書⁵⁾の付録の記述「 ΔG^* を核形成の活性化エネルギーと呼ぶのが適当でない」に辿り着いたとき、目から鱗が落ちた。詳細は他に譲るが、この話題は簡単そうで意外と混乱が多い。

さて、図2に示すように、 ΔG の核半径依存性は、最初は増加し、そして減少する。極大値に対応する核を臨界核と呼ぶ。臨界核より小さい核は、熱力学的に不安定で、エンブリオと呼ばれる。反対に、臨界核より大きい核は安定で、その多くは成長していく。 ΔG の評価にあたっては、核の体積に依存する項と表面積に依存する項の足し算を考える流儀と、エンタルピー項とエントロピー項の足し算を考える流儀がある。エネルギーの分け方に違いがあるだけであって、どちらも同じである。欠陥形成エネルギーの概念に慣れている格子欠陥屋なら、

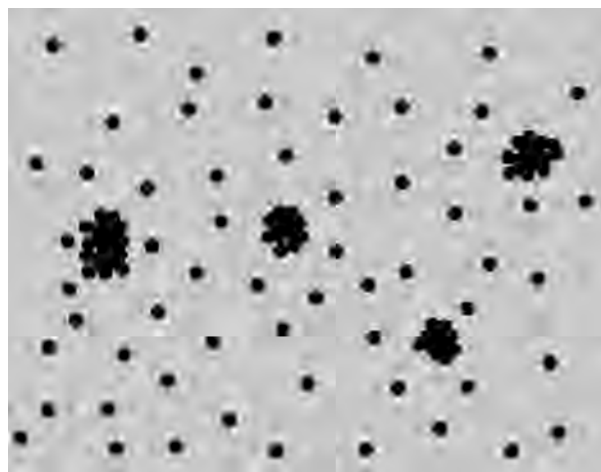


図1 過飽和からの水滴の核生成

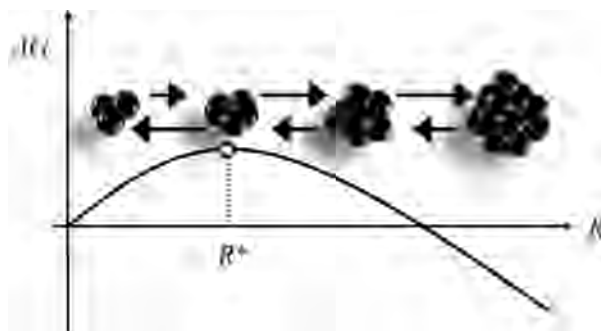


図2 核生成自由エネルギーの核半径依存性

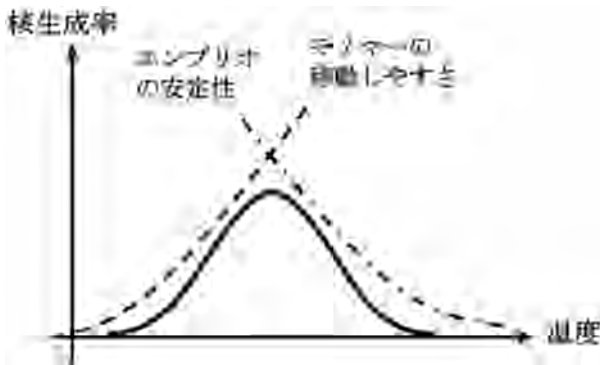


図3 核生成率の温度依存性

後者の流儀の方が理解しやすいだろう。

ΔG の性質として、過飽和度が大きくなると、 ΔG は下がり、臨界サイズは小さくなる。すなわち、核生成しやすくなる。また温度が高くなると、相対的に過飽和度は小さくなるので、臨界サイズは大きく、核生成しにくくなる。高温ほど熱力学的な不安定性が増すため核生成しにくくなると読み替えても差し支えない。またもちろん、水分子の凝集には、そもそも水分子が移動しないと始まらないことから、高温ほど凝集する機会が増える。こうして、高温ほど水分子が移動しやすいという性質と核が不安定になりやすいという性質の両者のバランスから、図3に示すように、核生成率は温度に対してピークをもつことになる。核生成する温度は、高すぎてもだめだし、低すぎてもだめということだ。

2. 核生成のカイネティックス

これまでの話はエネルギー論であり、熱力学的安定性の議論であった。この描像に従うと、何やらもやもやとして崩壊しやすい不安定核(エンブリオ)があり、その中の一部が核生成し、成長するというイメージになる。物理モデル構築の観点からすると、エンブリオの話と核生成後の成長の話は、全く別物のように見える。

では、別のものの見方をしよう。核に対して水分子の流入と流出を考える。いわゆる核生成のカイネティックスを考えるということだ。この描像はとてもシンプルで、エンブリオであろうが臨界サイズ超の核であろうがどちらにしろ、水分子の流入フラックスと流出フラックスで表現される。式で書くなら、

$$\frac{dn}{dt} = J_{IN} - J_{OUT}$$

となる。ここで、 n は水滴中の水分子の数、すなわち水滴のサイズである。したがって、左辺は水滴の成長速度を表す。先ほどの、臨界核をはさんでのもやもやと成長の描像との関係は、右辺の正負の場合分けに対応すると考えればよい。流入フラックス J_{IN} より流出フラックス J_{OUT} が大きい場合がもやもやの話であり、その逆の場合が成長の話である。すなわち、成長速度が負ならもやも

や、正なら成長である。前者は比較的サイズ n が小さい場合であり、後者は臨界サイズ以上の n に対して適用される。

ここで、「成長速度が負」とはどういうことか?との疑問がわく。もちろん、負は収縮を表すのであるが、問題は、臨界サイズ以下の小さい核はみな収縮してしまうことだ。ならば、臨界サイズにたどり着く核などないのではないか…との疑問である。今度は、頭がもやもやしてくる。尤もな疑問であるが、ここはひとつ冷静に、平均とずれを考える。言い換えるなら、時間的なマクロとミクロを考えること。マクロにはマイナスでも、ミクロではプラスになることもあり得る。…もやもや度はさらに増し、何やら核生成しそうだ。

この種の問題は、待ち行列理論(Queueing Theory)によって記述される。駅の自動券売機の前待ち行列、有名レストランに入るための待ち行列、空港の手荷物検査場での待ち行列など、待ち時間やサービス時間の最適化に応用される。客の到着頻度とサービス時間(券売機の利用時間、食事時間、検査時間)をパラメータとしてモデル化される。先ほどの式に対応させるなら、到着頻度は J_{IN} で、サービス時間の逆数が J_{OUT} になる。客の到着頻度(単位時間あたり何人来るか)やサービス時間の平均がわかっているとしても、それは厳密にいつも同じというわけではなく、必ずゆらぎがある。1日の営業時間が10時間のレストランの来客数が1日100人だからと言って、どの時間帯も10人毎時でお客さんが来るわけではない。昼時に20人がいっぺんに来て行列を作ることもあれば、待ち時間なしで入店できる時間帯もある。平均とかゆらぎとかはそういうものである。1日の全体を見ると10人毎時であっても、昼時なら20人毎時、閑散時なら1人毎時ということもある。こうした問題は、一般的には、頻度についてはポアソン分布、待ち時間については指数分布を使ってモデル化される。水滴の核生成も同様である。すなわち、成長速度の平均がいくら負でも、成長しないとは限らない。

核生成はマルチスケールな現象であり、すなわち、どのスケールで見ると同じ現象でも見え方が異なってくる。水滴の成長プロセスに焦点をあてると(マクロな見方)、エンブリオの描写はぼやけてしまう。一方、ミクロな見方をして、水分子1個1個の動きに焦点をあてると、エンブリオと成長の2つの物理モデルに違いは出ない。ここで言うマクロな見方とは反応速度論的な解き方であり、ミクロな見方とはKMC(キネティックモンテカルロ)法的な解き方である。両者の利点・欠点をよく理解し、それぞれで得られた知見をどうつなぐかを考える。

IV. 核生成の照射速度依存性

脆化予測研究の課題のひとつに、加速照射の影響というのがある。本来知りたいのは数十年照射の影響なのに、とてもそこまでの年月は待てないので、わずか1年～数か月程度の材料試験炉照射、もしくは、数日程度のイオン加速器照射で代用する。その際、照射速度の違いをどのように考え、どう予測に反映させるか。中性子照射量やはじき出し損傷量 dpa が同じならば、損傷の程度は同じなのか。入射フラックス ($n/m^2/s$) や照射速度 (dpa/s) の違いをどう補正すべきかといった問題である。

ここでは、原子炉・核融合炉材料の照射影響研究において頻出する欠陥集合体を対象に、核生成現象の特徴、特に、その照射速度依存性について言及する。欠陥集合体の核生成は、照射劣化評価のひとつの要であるが、これまできちんとした扱いがなされてこなかった。前述したように、水滴の核生成と同じと言い切ってしまうと取り組みようもあつたと思うが、なぜか析出エネルギーなぞ考えた人はいなかった。また、定常核生成の仮定は混乱を引き起こすだけだった。この数年、マルチスケール概念に基づくモデル化研究により、ようやく概要が見えてきた。以下に我々のモンテカルロ計算結果を紹介する。

1. ボイド

ボイドは原子空孔の集合体である。原子空孔の流入で成長し、流出により収縮する。自己格子間原子は、もちろんその逆の作用をする。水滴の例と同様、原子空孔の移動しやすさとエンブリオの熱力学的不安定性のバランスから、核生成率の温度依存性は図3のようになる。

ここで、照射速度 dpa/s を変化させてみよう。エンブリオへの流入フラックス J_{IN} は、シンク優勢の条件なら照射速度の1乗、再結合優勢の条件なら照射速度の1/2乗に比例して増大する。一方、流出フラックス J_{OUT} は、エンブリオそのものの熱的安定性(結合強さ)だけで決まり、照射速度とは無関係である。そのため、照射速度を大きくすると、 J_{IN} が増加した分だけエンブリオのダイナミックな不安定性が減少する。多少高温にしても核生成するようになる。こうして、図3の温度ピークは、照射速度を大きくすると高温側にシフトすることになる。このような温度依存性に対する照射速度依存性は、「成長速度」に関してなら、昔から Mansur ら⁶⁾が示してきたが、「核生成率」の方については、最近ようやく、同様のことが言えることが明らかになった⁷⁾。

2. バブル

ヘリウムバブルは、ヘリウムと空孔の複合体であり、原子炉・核融合炉の材料研究において最頻出の欠陥集合体である。ボイド中にヘリウムが入ったものを言う。一

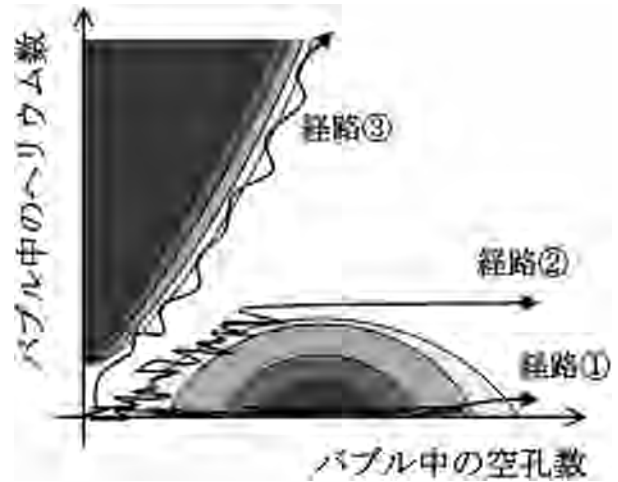


図4 鉄中のヘリウムバブルの核生成経路

度ボイドに入り込んだヘリウムは二度とそこから出られない。また、ヘリウムが入り込んだボイドから空孔は流出しづらくなり、ボイド(バブル)の熱的安定性(結合強さ)は格段に増す。

図4はヘリウムバブルの核生成経路を表している^{8,9)}。横軸がバブル内の原子空孔数で、縦軸がバブル内のヘリウム数を表す。核生成の臨界サイズに対応するように、エネルギーの山頂が見える。この山頂を越える瞬間がボイド(バブル)核生成の瞬間である。低温ではボイドとして核生成できても(経路①)、やや高温になると山が高くなりすぎて登れなくなる。そんな時、ボイド内にヘリウムが入るようなことがあれば、経路②のように、迂回することによって核生成する。さらに面白いのは、ヘリウムが高濃度になるダイバータ材料の環境である。ボイド内にヘリウムはパンパンになるまで入る。そして、ループパンチングや格子間原子放出などと呼ばれる穴掘り作業(経路③)が行われ、自発的にバブル内に空孔が作り出されて成長する。これは、原子空孔を吸収するのとは明らかに違う成長メカニズムである。

3. 銅リッチ析出物

銅リッチ析出物は、原子炉圧力容器の脆化種のひとつであり、20年以上もの間、様々な研究が行われてきた。鉄格子中に強制固溶された銅不純物が、熱時効や照射効果により析出する。銅原子の移動は空孔拡散機構であるから、銅の離合集散は、空孔の移動に支配される。そうした事情もあって、鉄格子中に単に銅の塊が析出するというよりは、銅-空孔クラスターが形成されると考える方がよい。クラスター中の銅と原子空孔の組成比は、核生成率の違いや脆化に対する寄与度の違いを生み出すので、大変重要である。

図5は銅-空孔クラスターの核生成経路を表す¹⁰⁾。横軸がクラスター中の原子空孔数、縦軸がクラスター中の銅原子の数である。臨界サイズに対応するように、エ

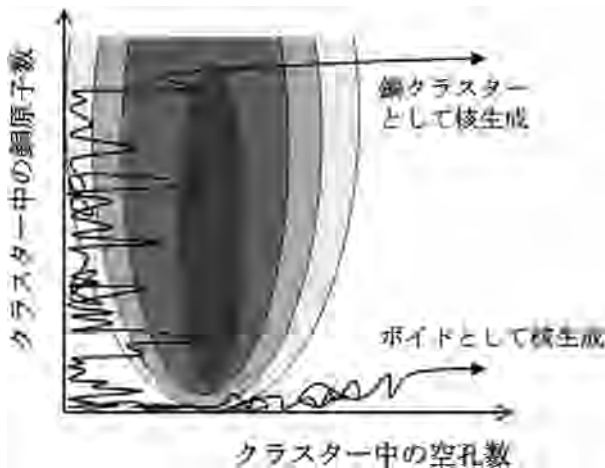


図5 鉄中の銅-空孔クラスターの核生成経路

エネルギーの山の尾根が見える。この尾根越えの瞬間がまさに核生成の瞬間である。材料中を流れる欠陥の拡散フラックスを考えると、クラスターは、図のほぼ右方向に進もうとする。尾根がさほど高くなければ(空孔過飽和度が高いとか温度が低いなどの条件)、クラスターは容易に尾根を越え、ほぼ空のボイドとして核生成する。しかし、空孔過飽和度が低かったり高温だったりすると、尾根が高すぎて簡単には越えられない。たまたま到着する銅原子を捕まえて、図の上方向にひとつ上がる。そこでもなお、右方向に進んで尾根を越えようとするが、やはり高すぎて越えられない。少し待って銅原子1個分上にシフトする。これを繰り返すことで、最終的に、ほぼ純銅クラスターとして核生成することになる。これは、バブルと同様、高い尾根を避けるように迂回する核生成経路である。

こうした経路調査の結果、最近見えてきたことがある。それは、ほぼボイドか、ほぼ純銅クラスターのどちらかでしか核生成しないということだ。照射速度が大きい時はボイドとして核生成し、照射速度が小さいときは純銅クラスターとして核生成する。となれば、照射速度の低い原子炉照射を、照射速度の高い照射場で模擬しようとするとき、核生成するクラスターの組成が違って来やしないか。高温にするなどして、尾根の高さを調整する必要がありそうだ。

4. 二元化合物中の転位ループやボイド

これまでは鉄中の欠陥集合体であったが、今度は炭化ケイ素 SiC 中のボイドもしくは転位ループの核生成である。SiC 中には、Si と C の2種類の格子間原子、同様に2種類の原子空孔がある。これらがそれぞれクラスター化したときの組成はどうなるか。結果を述べると、ボイドでも、また高温での転位ループでも、Si 型と C 型の欠陥が 1:1 の組成比を保つよう核生成・成長していく。組成比が核生成率や成長速度までも決めてしまう¹¹⁾。

V. まとめ

これまで、照射脆化予測の必要性、脆化に寄与する欠陥集合体の形成過程のマルチスケール性、そして、核生成現象の照射速度依存性について述べてきた。核生成経路は照射速度の影響を強く受け、従って、核生成時のクラスター組成は照射速度に強く依存する。理論的には、ボイドや転位ループの核生成率は dpa/s の増加関数になり、銅析出物のような溶質原子クラスターの核生成率は減少関数になる。これを知っていれば、ここで示した照射速度依存性が脆化予測に与える影響がいかに大きいかは容易にご理解いただけるだろう。ボイドで析出するか銅クラスターで析出するかは、様々な意味で違うのである。原子炉での照射損傷を材料試験炉やイオン加速器などで模擬しようとする際には、このような dpa/s 依存性を念頭に、dpa/s を上げるなら例えば温度も上げるなどの工夫が必要である。実験条件を上手に設計することが求められる。

さて、予測が当たるかどうかは、時に、社会問題になる。高照射量域ほどデータは少なく、場合によっては予測が外挿になってしまうこと、未知の脆化因子が潜んでいるかもしれないことなど考え合わせると、予測が当たらないことがあるのも当然であり、それを想定し準備しておくことは必要であろう。予測のずれを如何に素早く検知し、予測式を改良していくか。そうしたスキームをどう保全の中に取り込んでいくかが求められている。

— 参考資料 —

- 1) 森下和功, S. Sharafat, 日本原子力学会誌 50(2008)724; 50(2008)803.
- 2) 森下和功, プラズマ・核融合学会誌 84(2008)941.
- 3) 関村直人 他, プラズマ・核融合学会誌 80(2004)228, 80(2004)318; 80(2004)492.
- 4) 日本電気協会原子力規格委員会, 「原子炉構造材の監視試験方法(JEAC4201-2007)」(2014).
- 5) 小岩昌宏 他, 材料における拡散, 内田老鶴圃(2000).
- 6) L.K. Mansur, Nucl. Tech. 40(1978)5.
- 7) Y. Yamamoto, *et al.*, J. Nucl. Mater. 442(2013)S773.
- 8) 森下和功, 金属 77(2007)412.
- 9) K. Morishita, Phil. Mag. 87(2007)1139.
- 10) K. Morishita, *et al.*, Nucl. Inst. Meth. B 393(2017)101; 393(2017)110.
- 11) K. Morishita, *et al.*, J. Nucl. Mater. 386-388(2009)30; Nucl. Inst. Meth. B269(2011)1698.

著者紹介



森下和功 (もりした・かずのり)

京都大学エネルギー理工学研究所准教授
(専門分野/関心分野)原子力材料学, システム保全学

核データ研究の最前線

～たゆまざる真値の追及、そして新たなニーズへ応える為に～

第2回 共鳴領域における核データ測定と理論解析

日本原子力研究開発機構 木村 敦, 原田 秀郎, 国枝 賢,
東京工業大学 片渕 竜也

中性子輸送計算技術の発展に伴い、計算に用いられる中性子核データの精度向上へのニーズが急速に高まっている。中性子核データの高精度化を達成するには、高精度の測定実験が必須であるが、必要なデータの多様さと膨大さから基礎物理定数のような精度には及ばないのが現状である。本稿では、この困難を克服するため、現在取り組んでいる国内施設を活用した高精度測定研究の状況を紹介します。さらに、測定のみでは解決することが困難な課題を理論とのシナジーにより打破できる可能性について解説する。

KEYWORDS: Nuclear Data, JENDL, Measurement, Uncertainty, Resonance Analysis

I. 初めに

チャドウィックが中性子を発見してから僅か2年後の1934年、フェルミ等イタリアの研究チームは、中性子を照射して人工的に放射性核種を生成することに成功した。さらにフェルミ等は研究を進め、中性子を減速する方法、核反応率の中性子速度依存性、中性子捕獲反応に伴う即発ガンマ線の発見等々極めて多くの研究成果を得、今日の中性子工学の基礎を築いている。中性子捕獲反応の確率が中性子散乱の確率よりも大幅に大きくなる原子核が多数存在するという1936年の発見は、当時の理論では説明することが困難であったが、同じ年の内にボーアの核反応に関する複合核模型やブライトとウイグナーの中性子共鳴公式など新たな理論が考案され見事に説明された。サイクロトロンによる中性子源を用い、中性子飛行時間法(後述)を適用した中性子共鳴データの測定結果が論文に公開され始めるのは戦後の1946年頃からであるが、中性子共鳴の厳密な理論形式となるR-matrix理論をウイグナー等が発表したのは同時期の1947年である。このように、黎明期において、中性子核データの進展には測定と理論の大きなシナジー効果が

あったことが伺えるが、それは現代でも理工学の多くの分野で有効な手法である。

この間フェルミは米国に渡り、自ら積み上げた中性子工学の手法や中性子核反応の知見を駆使して、世界で最初に原子炉の臨界に成功したのは1942年である。OECD/NEA¹⁾によれば、今日、世界中で449基の原子炉が稼働中であり、新たに60基が建設中とのことである。今後増大が予想される電力需要を確保するためにも、安全性や核セキュリティ能力を高めた先進的原子炉開発の重要性が高まっている²⁾。原子力で発生する放射性廃棄物を安全に処理・処分する技術の開発も同様に重要である。これらの課題を、今日の技術を駆使して解決するにあたり、中性子核反応の精度を高めることの役割が次に述べる理由で高まってきている。

近年、計算機とモンテカルロ法に基づく中性子輸送計算手法の発展により、原子炉や加速器施設の設計や安全性の評価において、詳細なシミュレーションが可能となっている。今や、これら予測の最大誤差要因は、計算の入力として用いる中性子と物質との基礎的な核反応データ(核データ)の誤差となってきている。このため、核データの精度向上について、大きな関心が寄せられるようになっており、これに応えるため、欧州、米国、日本をはじめ、最近では中国において新たな大型核データ測定施設が開発されるなど、高精度化の取り組みが活性化してきている。例えば、核データの誤差については、OECD/NEA/NSCの専門家会合により詳しい研究³⁾が行われ、核種・核反応・エネルギー領域毎に必要な核データの精度が取りまとめられるとともに、現状の核データ精度とのギャップを埋めるための研究活動⁴⁾も行

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need(2) ; Nuclear data measurement and theoretical analysis in resonance region : Kimura Atsushi, Harada Hideo, Kunieda Satoshi, Katabuchi Tatsuya.

(2017年8月7日 受理)

■前回タイトル

第1回 多様化する原子核工学と核データのニーズ

われている。

測定精度の向上には、統計的不確かさと系統的誤差の両方を小さくする技術開発が必要となる。II章に記載される大強度パルス中性子が利用可能となったことにより、統計的不確かさについては飛躍的な改善の見通しが得られつつある。系統的誤差を低減させるためには条件を変化させた独立測定を複数実施する努力と、測定値間で生じる差異の要因を追求するに足る厳密な理解力が求められる。また、限られた測定施設を有効活用し、独立した測定を可能とする測定施設の維持・整備も必須である。

電子の質量やアボガドロ数などの基礎物理定数を測定する技術は、長い年月をかけて一步一步進展し、超高精度化を達成してきた歴史がある。それに比べると、同じ物理定数である核データの高精度化は遥かに遅れているのが現状だ。原子炉等の設計に必要な物理量が多様であり、また数が膨大であること、最近では放射性核種の核データ等、試料の準備自体が困難な核種に対象が移ってきたことや、1つの測定に大型研究施設を長期間占有して測定する必要があること、測定データ解析の複雑さなど、難しさの理由は多々ある。しかしながら、核データの高精度化は、原子炉や加速器施設設計における適切なマージンの設定や確かな安全性の評価に必須であり、何としても乗り越える必要があるチャレンジングな課題である。

II. 共鳴領域での中性子核データ測定

1. 中性子核データの測定手法

本稿で指す中性子核データとは、中性子と原子核の核反応の起こりやすさ(断面積)のことである。核データを中性子エネルギーで区分した場合、多くの核種で断面積が中性子の速度に反比例する $1/v$ 領域、断面積が大きな増減を繰り返す共鳴領域、共鳴ピークが混みあってきて各個に分離できない非分離共鳴領域、さらにその上は連続領域に分けることができる。今回は共鳴領域に着目し、中性子核データ測定と理論のシナジーについて紹介を行う。

共鳴領域での中性子核データ測定は、断面積の詳細な中性子エネルギー依存性、言い換えれば何百～何千点もの中性子エネルギーに対して断面積を導出し、共鳴の構造を知ることである。そのため、測定対象の現象が発生したという情報だけでなく、その反応を起こした中性子のエネルギーも現象毎に測定する必要がある。

原子炉で作られる中性子は連続的なエネルギースペクトルを持って発生するため、原子炉で中性子を照射した試料から放射化した割合を調べて断面積を求める手法(放射化法)では、中性子のエネルギースペクトルで平均化された1点の情報しか知ることができない。

そこで、共鳴領域での中性子核データ測定では、加速器で作成したパルス状のビームを中性子を発生させるためのターゲットに入射することで得られるパルス状の中性子を利用する。ここで、中性子のエネルギーとは中性子の運動エネルギー、つまり速度で決まることを思い出してほしい。共鳴領域での測定では発生した中性子が中性子源から飛び出してから試料にあたって反応が起きるまでの時間(中性子飛行時間)を計測する。中性子が試料にあたってから反応が起きるまでの時間は無視できるほど小さいため、中性子飛行時間と中性子源から試料までの距離から中性子の速度つまり中性子のエネルギーが決定できる。この手法は中性子飛行時間法と呼ばれる。中性子飛行時間法は一度の実験で幅広い中性子エネルギーに対する測定結果が得られる、大変優れた測定手法である。

しかしながら、中性子飛行時間法にも弱点がある。それはパルス状の中性子源を用いるため、原子炉のような時間的に連続な中性子源に比べて中性子強度が弱くなるという点である。このため、試料との反応数が減少し、放射性核種に対する核データの測定が困難となる。例えば、1gの試料を利用する実験体系を考えてみる。 ^{235}U では1gでも8万Bqにすぎないが、マイナーアクチノイド核種、 ^{241}Am になると1270億Bqに、 ^{244}Cm では3兆Bqにもなる。そのため、試料の崩壊 γ 線が非常に強くなり、これがバックグラウンドを押し上げ、統計的不確かさを増大させ測定を妨害することとなる。

この問題を解決するため、大強度のパルス中性子源の開発と検出器の大立体角化・高感度化が世界的に行われている。これらを行うことで、少量の試料でも測定できるようになり、バックグラウンドの影響を小さくできるからである。例えば、欧州原子核研究機構における核データ測定プロジェクト(n-TOFプロジェクトと呼ばれる)や米国のロスアラモス国立研究所(LANL)において、核破砕反応による大強度パルス中性子源が開発され、測定が行われている。日本国内においても様々な技術開発によって独自の活動が活発に進められている。統計的不確かさを減少させる努力だけでなく、試料性状に起因する誤差を低減させるなど、系統的誤差を減少させるための努力も着実に進められている。この観点からは、一つの実験施設における一つの測定結果だけでなく、複数の実験施設での独立した測定結果の相互比較が極めて大切となる。誤差の導出は断面積を導出するより困難なテーマであるが、計算結果の妥当性評価には不可欠な要素となってきている。今後はシミュレーションの超高精度化を達成するために誤差情報を詳細に記録するとともに、測定と原子核理論とのシナジー効果を発揮させた飛躍を可能とするアプローチもチャレンジすべきであろう。

2. 国内の中性子飛行時間法実験装置

日本国内では京大炉や原子力機構の JRR-3 等の原子炉をはじめ、大阪大学の RCNP や放医研の NIRS 等の加速器施設等、多くの機関・施設で中性子核データ測定が行われている。ここでは今回のテーマである共鳴領域での中性子核データに焦点を当て、J-PARC の ANNRI、京大炉ライナック、東工大ペレットロン加速器について紹介を行う。

(1) ANNRI

ANNRI は放射性核種の中性子核データの取得を目標に J-PARC の物質・生命科学実験施設にある大強度パルス核破砕中性子源に設置された実験装置である。ANNRI では、大立体角 Ge 検出器と NaI 検出器の 2 種類の γ 線検出器、そして中性子検出器(Li-Glass 検出器)が設置されており、これらを用いた中性子捕獲反応断面積や全断面積の測定研究が行われている。測定可能な中性子エネルギー領域は 10meV から 100keV 程度までである。

ANNRI の特色の一つは試料位置における中性子強度が国外の核破砕反応による大強度パルス中性子源に比べて約 7 倍以上強いことである。ANNRI の中性子強度を他施設と比較した結果を図 1 に示す。ANNRI を用いることで、バックグラウンドの影響が小さくなるため、半減期が短く比放射能の高い核種でも精度の良い測定が可能となる。

また、ANNRI は大強度パルス中性子源と γ 線のエネルギー分解能が高い Ge 検出器を組み合わせた世界的にも独創的な装置であり、共鳴毎の γ 線のエネルギー分布からその共鳴がどの核種の共鳴かを調べることが可能である。これを利用し、これまでの測定で多数の共鳴のミスアサイン(報告された共鳴の間違い)を発見・報告している。一方で、ANNRI では規制上核燃料物質や非密封放射性同位元素が使用できないという欠点もある。

実際の測定例として、MA 核種の一つである ^{244}Cm の測定結果を図 2 に示す⁶⁾。 ^{244}Cm は使用済み核燃料のア

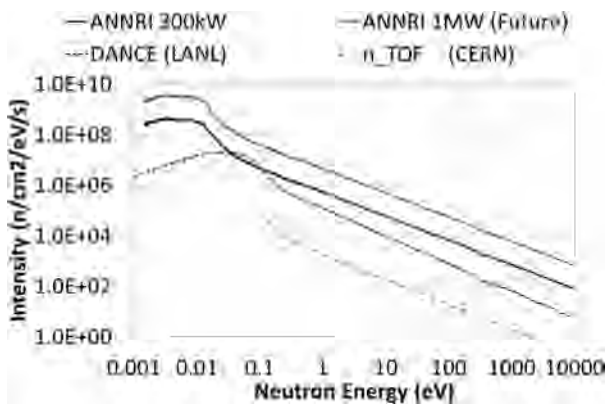


図 1 ANNRI の中性子強度(300kW 運転時及び将来の 1MW 運転時)を LANL の DANCE 及び CERN の n-TOF と比較した図。

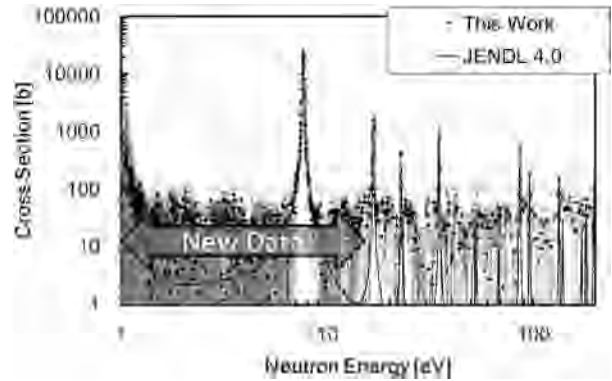


図 2 測定により得られた ^{244}Cm の中性子捕獲反応断面積を評価値(JENDL)と比較したグラフ。

クチニド崩壊熱に関して主要な発生源となるなど、重要な MA 核種であるが、過去の中性子捕獲反応断面積の測定例は 1971 年の地下核実験での測定値が 1 件あるのみであった。これは半減期が 18.1 年と短く比放射能が高い(図 2 の試料は試料重量 0.6mg で放射能は 1.8GBq)等の困難さがあるためである。しかしながら、ANNRI の大強度パルス中性子源を用いることで、このような比放射能の高い試料での測定も可能となった。特に 20eV 以下の共鳴については、世界で最初の測定値である。

(2) 京大炉ライナック

京都大学原子炉実験所中性子発生装置(京大炉ライナック)は 1965 年に建設された電子線型加速器である。京大炉ライナックでは、約 30MeV まで加速したパルス電子ビームを水冷式タンタルターゲットに照射することにより、制動 X 線を用いて光中性子を発生させ、熱 ~ MeV 領域までの白色中性子を得ることができる。京大炉ライナックには 2 本の飛行時間法用中性子ビームラインが整備されており、これらの設備を用いた測定研究が行われている。

京大炉ライナックの中性子強度は ANNRI に比べて 4 桁小さいが、中性子スペクトルの形状に大きな自由度があり、核燃料物質、非密封の放射性同位元素を使用できるという利点がある。そのため、これらの特色を生かし、ANNRI では測定できない核燃料物質の中性子核データ測定や、MeV 領域までの幅広い中性子エネルギー領域に対する中性子核データ測定研究が相補的に行われている。また、核データ測定研究だけでなく、放射光、電子線、X 線の多様な放射線に係る人材育成も進められている。

(3) 東工大ペレットロン加速器

東京工業大学先端原子力研究所のペレットロン加速器は 1976 年に設置された。 $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ 反応からの中性子を用いて中性子捕獲断面積の測定を行っている。測定は主に中性子エネルギーが 100keV 以下の領域と大きな中性子強度が得られる 550keV 近傍で行っている。特徴として繰り返し 4MHz、ビームパルス巾 1.5ns の中性子

ビームを用いており、短い飛行距離(12cm 又は 20cm)での飛行時間測定を可能としている。試料からの即発ガンマ線は、コンプトン抑止型 NaI(Tl) 検出器により測定され、波高重み法を用いることで中性子捕獲断面積を導出する。絶対値は金試料との相対測定を行い、 ^{197}Au の中性子捕獲断面積を標準とすることで決定している。測定系の長年の改良から高い S/N 比での測定を実現しており、これまでの多くの核種の中性子捕獲断面積を高精度に決定してきた。また、断面積だけでなく、中性子捕獲ガンマ線スペクトルも測定することができ、捕獲反応メカニズムの理解に役立っている。

III. 測定と共鳴理論のシナジー

(1) 共鳴解析とは何か？

共鳴領域における断面積の整備は測定データ無しには成し得ない。これは第 I 章で述べた通り、原子核理論のみでは正確に断面積を予測計算できないためである。しかし測定されたデータがそのまま核データライブラリに格納される訳ではない。以下のような理由により「共鳴解析」と呼ばれるプロセスを経る必要がある。

一つの分かり易い例として、まずは温度の影響を想像して頂きたい。物理定数とも言える核反応断面積は通常絶対零度で定義されるものである。すなわち、これは標的となる原子核が止まっている状態である。しかし実際の測定で使われる標的サンプルは有限の温度を有しており、その状況では原子核は運動している(原子や分子の振動による)ことになる。この為、有限温度における実際の共鳴ピークの高さは絶対零度の値より小さくなり、その代わり共鳴の裾野が広がることになる(積分量は保存される)。これは原子炉物理学の世界ではドップラー効果と言われるものに対応する。温度以外にも、測定系に特有のエネルギー分解能により共鳴の形状は真の値より広がったものとなる。また測定系に依存する様々な要因により系統的に真値からずれることもある。核データ自体は物理定数であるため、このような測定の分解能や系統誤差に左右されず、また絶対零度における値として与える必要がある。そのために、特に低エネルギー断面積を与えるために行われるのが共鳴解析である。これまでに種々の共鳴理論が提案されているが、ここでは絶対零度の断面積を量子力学に基づいて記述する「型」、あるいは「フィッティング関数」として考えて頂きたい。ちなみに最も簡略化された共鳴理論は、大抵の原子力や原子核の教科書でおなじみのブライト-ウィグナー公式である。なお、共鳴理論は量子力学に基づいて記述されているので、入射する中性子の角運動量や共鳴に対応するスピンに対して強い感度を示す。従って、共鳴解析においてスピンの情報を取得することが可能である。このことから、共鳴理論が単なるフィッティング関数とは異

質のものであることが想像できるだろう。やや大きさに言うならば、共鳴解析とは、測定値に量子力学(つまりは自然界を司る法則の一つ)が支配する「型」を当てはめるプロセスなのだ。その際に、実際の測定条件や環境をシミュレーションすることが鍵となることは言うまでもない。しかし、測定値へ影響を与える条件や環境の要因は上記に挙げた例だけにはとどまらない。例えば、測定に用いたサンプルに水分や不純物等が含まれていないだろうか？この問いに答えることのできるのは経験豊かな測定者のみであろう。

(2) 測定と理論のシナジーを目指して

さて、一つ問題提起をしてみたい。それは「異なる測定データ間の差異に対してどのようなアプローチをとるのか？」と言う問いである。まずは図 3 をご覧いただきたい⁸⁾。同じ $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応断面積であるが、1970 年代の測定値と 2000 年代の測定値に 30% 程度の大きな系統的差異が見られる。要は、古い測定値と新しい測定値の間には差異があるということである。これはやや極端な例ではあるが、主要な核反応断面積においても近年の異なる測定値間で 5% 程度の系統的差異は普通に見られる。どちらを共鳴解析の対象とすべきであろうか。ここで、仮に読者の方々の多数決を取るとするならば、新しい測定データが圧勝するはずである。当然である、核データの測定手法や検出器系、測定施設等々は精度を高めるために進化を続けてきたからだ。

ここで R-matrix 理論と呼ばれる共鳴理論を簡単に紹介させて頂きたい。この理論は種々の共鳴理論の中でも最も近似の少ない(ほぼ近似の無い理論と言っても良い)理論であり、すべての共鳴理論の上流に位置している。例えば、共鳴の幅に相当するパラメータは、波動関数の振幅で記述される。その特徴は量子の世界の確率保存則であるユニタリ性を満たすことである(正しくは散乱行列のユニタリ性)。そしてその中では、自動的に共鳴同士の間干渉効果が近似なしに記述される。従って、共鳴理論は、よりがっちりとした「型」(拘束力のあるフィッティング関数)として、測定の限界を補完する役割を発

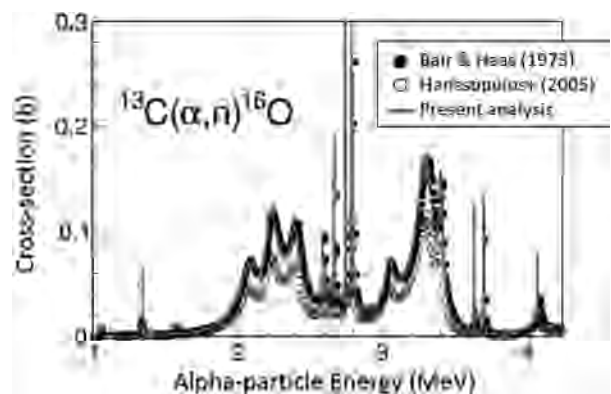


図 3 測定値間の系統的な差異と理論解析による推定結果(米ロスアラモス国立研究所との共同による)

揮することが期待される。

さて、 ^{16}O の中性子反応と $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応は共に ^{17}O の励起状態を経由することに着目してみよう。図3の実線は、 ^{16}O の中性子全断面積や弾性散乱断面積と $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応断面積の測定値を、R-matrix 理論を用いて同時にフィットした結果である。ただしこの際に、測定データ毎に絶対量を上下させるフリーパラメータを導入し、“形(=エネルギー依存性)のみ”を対象に共鳴解析を行った。常識的な予想に反して、古いデータに近い結果が得られた。これは、良く知られている ^{16}O の中性子全断面積との整合性から R 行列理論を通して導かれた(ユニタリ性に基づく)予測結果である。今後測定実験や核データベンチマーク等によりこの結果に対する検証や手法の適用範囲を検討する必要があるが、ユニタリ性のようにモデルによらない物理原理が課す拘束条件を適用することによって、不整合なデータ間の合理的解釈を行ったり、誤差の推定ができる可能性を見出したと言える⁹⁾。

測定データは大なり小なりの誤差を必ず含む。この中で系統誤差は最も解決し難い問題の一つである。しかし、測定データを物理的に合理的な理論によって解析することにより、核データの抱える不整合データの取り扱いなどの問題の解決へ大きく前進することが可能であると考えられる。今後、炉物理等の分野からの核データベンチマークによるフィードバックに加えて、一つの有効なツールになるであろう。

IV. 終わりに

中性子核データ研究における断面積測定の最終的な目標は“可能な限り真の断面積に近い値”を得ることである。そのために、測定研究においては誤差要因を可能な限り精査することとともに、測定環境や条件を明らかにし記録して詳細な相互比較を可能とすることが重要である。理論解析においては、できる限り近似の少ない理論を用いると共に、理論の持つ物理的拘束を効果的に用いることが今後の鍵の一つとなるだろう。測定と理論は互いの限界をサポートし合う夫婦のような関係にある。神ならざる身としては、“真の断面積の値”を得ることは不可能であるにしても、「測定と理論のシナジー」により真の値に近づけるよう日々研鑽したい。

— 参考資料 —

- 1) OECD/NEA, “The strategic plan of the nuclear energy agency 2017-2022”, (2016).
- 2) U.S.DOE, Report DOE/NE-0147, “VISION and STRATEGY for the Development and Deployment of Advanced Reactors”, (2017).
- 3) M. Salvatores and R. Jacqmin, “Uncertainty and target accuracy assessment for innovative system using recent covariance data evaluations”, ISBN 978- 92- 64- 99053- 1, NEA/WPEC-26(2008).
- 4) H. Harada et al., “Improving nuclear data accuracy of ^{241}Am and ^{237}Np capture cross-sections”, NEA/WPEC/SG-41, 20 May 2016 <https://www.oecd-nea.org/science/wpec/sg41/>
- 5) “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, International Organization for Standardization(1995).
- 6) A. Kimura, et al., “Neutron-capture Cross-Sections of ^{244}Cm and ^{246}Cm Measured with an Array of Large Germanium Detectors in the ANNRI at J-PARC/MLF” J. Nucl. Sci. Technol., 49,(2012)708.
- 7) S. Mizuno et al., “Measurements of keV-neutron capture cross sections and capture gamma-ray spectra of $^{161,162,163}\text{Dy}$ ”, J. Nucl. Sci. Technol. 36, 493-507(1999).
- 8) 原子力機構の研究開発成果 2016-17[in Japanese], p44.
- 9) S. Kunieda et al. Nuclear Data Sheets, Vol.123, p159-164 (2015).

著者紹介



木村 敦 (きむら・あつし)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)核データ測定, 放射線計測, 原子炉物理



原田秀郎 (はらだ・ひでお)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野) 中性子工学, 応用核分光学, 核データ

国枝 賢 (くにえだ・さとし)

本誌, 59[10], p.48(2017)参照。



片淵竜也 (かたぶち・たつや)

東京工業大学 科学技術創成研究院 先端原子力研究所 准教授
(専門分野/関心分野)核データ測定, 原子核物理, ホウ素中性子捕捉療法

福島環境回復に向けた取り組み

第7回 福島沿岸域における放射性セシウムの動きと存在量

日本原子力研究開発機構 乙坂 重嘉, 小林 卓也, 町田 昌彦

1F 事故によって環境に放出された放射性セシウムの約 7 割は海洋に運ばれたと見積もられている。政府等によるモニタリング調査に加えて、国内外の多くの機関の調査研究によって、放射性セシウムの海洋における分布や動態が浮き彫りとなってきた。時間的・空間的に連続した観測データを得ることが困難な海洋においては、数値シミュレーションが積極的に活用され、1F 事故後に新たに得られた知見を踏まえ、さらなる改良が進められている。

KEYWORDS: *marine environment, monitoring, atmospheric deposition, direct release, seawater, seabed sediment, marine biota, oceanographic dispersion model, radiocesium, recovery of fishing ground*

I. はじめに

福島の沿岸域における環境回復も着実に進んでおり、放射性セシウム(以下、放射性 Cs)濃度の基準を超える水産物は水揚げされなくなっている。福島の沿岸域における放射性 Cs の動きと存在量について俯瞰し、環境回復の現状の科学的な理解を深めるとともに、信頼における将来の見通しを得るための今後取り組むべき課題について示す。

II. 事故直後(～2011 年 12 月)の放射性 Cs の動きと存在量

2011 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所(以下、1F)の事故後の数日間は、電源喪失等によって環境モニタリング機能がほぼ利用できない状態であり、事故直後の放射性物質のオフサイトへの放出量の推定が不可能であった。このため、その後得られたモニタリング値に基づく大気・海洋拡散シミュレーションによって逆推定された放出量が、複数の研究機関から報告された。一例として、 ^{137}Cs の大気・海洋放出率推定結果^{1,2)}を図 1 に示す。

^{137}Cs の大気放出は 2011 年 3 月 12 日から始まり、放

出された ^{137}Cs の一部は大気を経由して北太平洋の広い範囲に運ばれた。海洋においては、この大気からの放射性核種の沈着に加えて、2011 年 4 月 1 日に、1F2 号機取水口付近の立杭の亀裂から、高濃度の放射性核種を含む汚染水が 1F 港湾内に流出していることが報告された。この直接流出に関しては、福島沿岸における表層海水のモニタリング値において、2つの放射性核種(^{131}I , ^{137}Cs)の濃度比の時間変化の傾向が 2011 年 3 月 26 日の前後で大きく異なっており、その相違が両核種の海洋表面への沈着特性の違いを反映しているとして、これらの核種の 1F 港湾からの直接流出が実際には 3 月 26 日頃に開始され、それ以前の濃度増加は大気からの降下によるものであると推定した³⁾。

図 1 からわかるとおり、大気および海洋への ^{137}Cs の放出率(1 時間あたりに放出される放射能)は、2011 年 4 月末までに最大値から 4 桁および 3 桁程度それぞれ低下した。このことから、1F 事故による環境中への放射性 Cs の主な放出は、事故から 1 ヶ月以内に起こったと結論づけることができる。

前述した文献^{1,2)}をまとめると、 ^{137}Cs について、大気(2011 年 3-5 月)および海洋(2011 年 3-12 月)への放出量はそれぞれ 14.5 および 3.6PBq(ペタベクレル= 10^{15}Bq)であり、大気への放出量のうちの約 7 割(10PBq)が海面

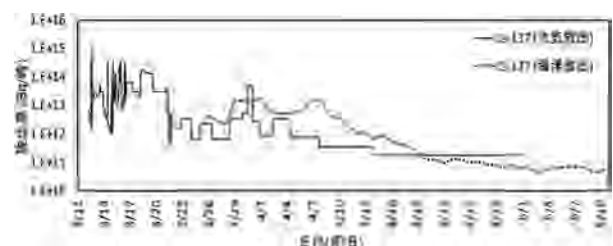


図 1 大気および海洋への ^{137}Cs の放出率推定結果^{1,2)}

Challenges for enhancing Fukushima environmental resilience (7); Behavior and abundance of radiocesium in the coastal area off Fukushima: Shigeyoshi Otsuka, Takuya Kobayashi, Masahiko Machida.

(2017 年 8 月 3 日 受理)

■前回タイトル

安全性の確保を大前提とした除去土壌等の再生利用

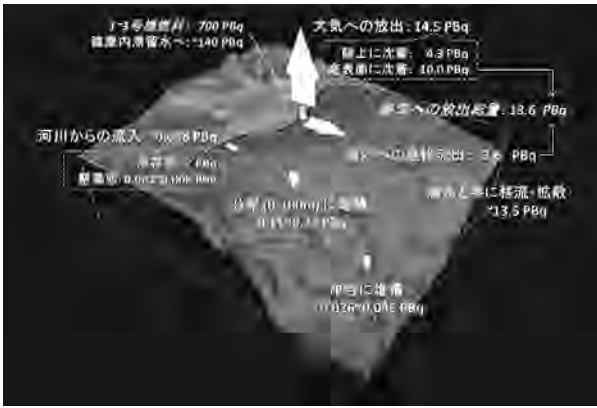


図2 2011年における ^{137}Cs の動きと存在量
文献1), 5~9)を元に作成

に沈着したと推定される。事故当時(2011年3月)の福島沿岸域は、冬季から春季にかけての海面の冷却などの影響によって、混合層(表面から水深200m程度までの海水の鉛直混合が活発になる層)が発達し、加えて、海洋表面から海底に向かう流れを伴う、直径数km程度の渦が形成されたことにより、比較的汚染度の高い表面付近の海水が、海底付近まで運ばれたことが確認されている⁴⁾。このように、事故によって海洋に放出された ^{137}Cs の一部は海底付近へと運ばれ、さらにその一部が海底堆積物に吸着することにより、堆積物の汚染を拡大させた。2011年10月までに行われた現場観測の結果から、福島周辺(宮城、福島、茨城の沖合1,500m深まで)における堆積物中への ^{137}Cs の初期沈着量は約0.2PBqで、その多くが水深100m以浅の沿岸域に沈着したと推定された⁵⁾。2011年12月までに太平洋に放出された ^{137}Cs の総量を13.6PBqとすると、その1~2%が海底に沈着した計算になる。ここまでのまとめとして、図2に、事故発生年(2011年)における福島周辺海域への ^{137}Cs の動きと存在量を示す。

Ⅲ. 中・長期的な放射性Csの動きと存在量

1. 福島第一原発(1F)港湾および近傍

2011年3月26日頃に発生したと考えられる1F港湾への汚染水の流出によって、港湾内の海水中の放射性核種濃度は50万Bq/L以上に上昇し、同4月6日に最高値を示した。2011年4月末にかけて主要な流出箇所が水ガラス等によって抑止された結果、1F港湾近傍の沿岸域における ^{137}Cs 濃度は数桁低下し、港湾内からの汚染水の流出は遮断されると見られたが、特に取水口近くにおいては、その後の濃度の低減傾向が港湾外に比べて極めて緩慢であり、僅かながらも流出が続いていることが示唆された。この港湾外への ^{137}Cs の流出量を見積もるため、Kanda¹⁰⁾は1F港湾内の「物揚場」と呼ばれる港湾岸壁の中心付近の一地点におけるモニタリング値を港

湾内の代表濃度とし、直接流出事後に観察された濃度低下傾向から港湾内外の海水交換率を推定することにより、事故直後から2012年9月までの港湾外への ^{137}Cs の流出量を算出している。その結果、2012年の時点において、 ^{137}Cs の流出量は事故直後に比べて千分の一以下に減じたものの、流出は続いていると結論づけている。この算出法については、港湾内でも比較的 ^{137}Cs 濃度が高かった観測点での濃度値を港湾内の代表値としたことから、過大評価となっている。しかし、2012年当時、港湾内の複数の観測点における ^{137}Cs 濃度が横ばいか極めてゆっくりとした低減傾向を示していたことを考慮すると、港湾内への流入と港湾外への流出が概ね釣り合い、定常状態に近い状況が続いていたという指摘は妥当と言える。そこで、本報告ではこの方法を踏襲し、1F港湾外への ^{137}Cs の流出量を2016年末まで推定することを試みた(推定方法の詳細は文献¹⁰⁾を参照のこと)。なお、直接流出の抑制後は、モニタリング値が検出限界値以下となることもあるが¹¹⁾、その際は限界値で代用する等、安全側の評価とした。

図3に、2011年4月から2016年12月までの1F港湾外への ^{137}Cs の推定流出量(月毎)の経時変化を示す。また表1には、2011年から2016年までの、1F港湾からの ^{137}Cs の総流出量の変遷を年毎にまとめる。1F港湾からの ^{137}Cs 流出量は月によってわずかに上下しながらも全体として減少傾向を示し、2011年に年間2.3PBqであった港湾からの ^{137}Cs 推定流出量は、2016年にはその約1万分の1(0.3TBq)に減少した。

特筆すべき点として、月毎の ^{137}Cs 推定流出量は2014年の始めから2016年の終わりにかけて一桁減少しており、この減少は、港湾海底の被覆(第一期:2014年7月~2015年4月,第二期:2015年6月~2016年12月),海側遮水壁による地下水の遮水(2015年10月),1F内の海水配管トレンチ内に滞留していた高濃度汚染水の除去(~2015年12月),トンネル・立抗の充填(~2015年12月)等の施策の効果が現れたものと推察される。

なお、図3及び表1の元となっている ^{137}Cs のモニタリング値¹¹⁾には、溶存態の ^{137}Cs に加えて、懸濁態の ^{137}Cs も寄与しうる点も留意すべきである。1F構内の地表

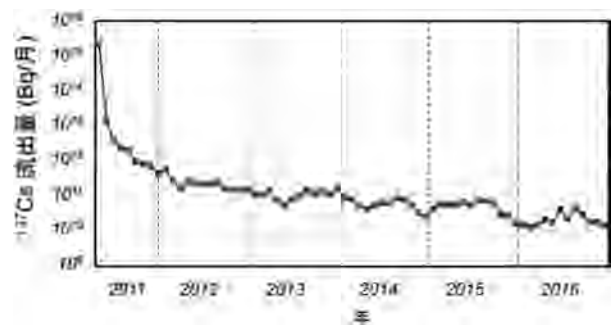


図3 2011年4月から2016年12月までの1F港湾外への ^{137}Cs の推定流出量(月毎)の経時変化

表1 1F 港湾外への¹³⁷Csの推定流出量

年(西暦)	¹³⁷ Cs 推定流出量(年間)
2011	2.3×10^{15} Bq
2012	2.9×10^{12} Bq
2013	1.4×10^{12} Bq
2014	7.4×10^{11} Bq
2015	6.4×10^{11} Bq
2016	2.8×10^{11} Bq

や排水路に沈積した泥等が、降雨により港湾に流入する過程も1F 港湾内での¹³⁷Cs濃度を変動させる可能性がある。今後、1F 港湾における放射性核種の流出推定精度を向上させ、1F 構内やごく近傍の地域から港湾への物質の流入機構を評価するとともに、その対策を講じることも、1F 港湾や近傍海域の環境回復の一助となることが期待される。

2. 沿岸および沖合の海水

図4に、東京電力、文部科学省、原子力規制庁および福島県が実施した表層海水中の¹³⁷Cs濃度のモニタリング結果について、2011年から2016年までの時間変化を示す。データは、原子力機構「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」¹²⁾に掲載されているものを用いた。

1F 近傍(5km 圏内)沿岸における表層海水中の¹³⁷Cs濃度は、2011年4月7日に最高値(6.8×10^4 Bq/L)を示した。1F 港湾における汚染水の止水作業の効果と、表層水の移流・拡散過程によって、同海域の表層海水中の¹³⁷Cs濃度は5月末までに約二桁減少した。

事故から約1年後の2012年4月には、表層海水中の¹³⁷Cs濃度は数 Bq/L にまで減少し、その後減少傾向は鈍化したものの、2016年には概ね1 Bq/L 以下にまで

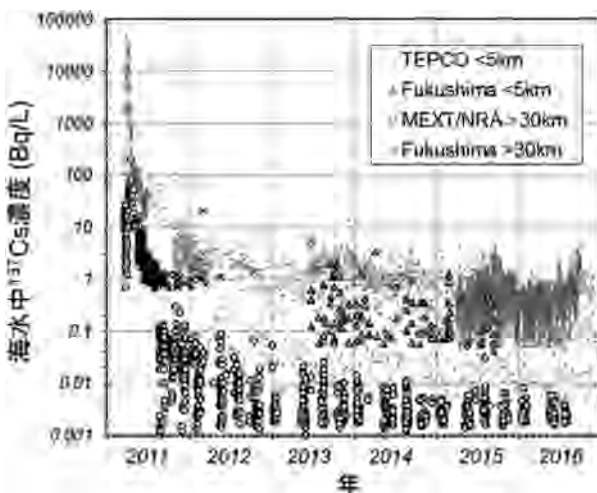


図4 1F 事故以降の周辺海域における海表面¹³⁷Cs濃度の変化。調査機関と試料採取海域を、+：東京電力による1F 周辺の沿岸、△：福島県による1F 周辺の沿岸、○：文部科学省および原子力規制庁による1F から30 km 以遠の海域、×：福島県による30 km 以遠の海域、として示す。

低下している。その間、主に荒天時に一時的な濃度増加を示した他、前述の1F 施設における汚染水の流出防止策に呼応したとみられる濃度変動も観測されている。

1F から30km 以上離れた海域では、事故直後は100 Bq/L を超える¹³⁷Cs濃度が観測されたものの、事故から3年後の2014年には、同海域における事故前の濃度(2010年： $[1.4 \sim 2.0] \times 10^{-3}$ Bq/L)と同等か数倍のレベルにまで低下している。この¹³⁷Csの濃度範囲は、世界の多くの海域での平常時に観測されている、いわゆる「環境レベル」にあると言える。施設から100km 以遠の沖合海域においては、最近では事故前に比べて有意に高い濃度の¹³⁷Csは検出されていない。ただし、事故後の早い段階で太平洋の広い範囲に分布した低濃度の放射性Csの一部が、北太平洋亜熱帯域(概ね北緯30~35度付近)で中層(水深200~500m)へと運ばれることも報告されている¹³⁾。さらに、大洋レベルの循環を経た放射性Csの一部が、ごく低濃度ながら数年かけて日本近海に再流入していることも、最近の各地でのモニタリング結果から示唆されている。

3. 沿岸海底と生物

図5に、2011年5月から2016年8月までの間に文部科学省および原子力規制庁が宮城、茨城、福島各県の沖合で実施したモニタリング調査結果のうち、堆積物表層の¹³⁷Cs濃度の分布をまとめた¹⁴⁾。

一連のモニタリング調査では、2011年9月以降はより沖合海域でのデータも得ているが、図5には当初より継続的に調査されている観測点についてのみ結果を示した。放射能濃度は乾燥試料1kgあたりの放射能(Bq/kg)として表している。

堆積物中からは、南北に広い範囲で事故由来とみられる核種が検出されており、¹³⁷Csの濃度は2~520 Bq/kgであった。図2に示すとおり、事故後の沿岸域での¹³⁷Cs沈着量は0.1~0.2 PBqと推定され、その量は河川からの流入量に比べて一桁程度多いと見積もられている

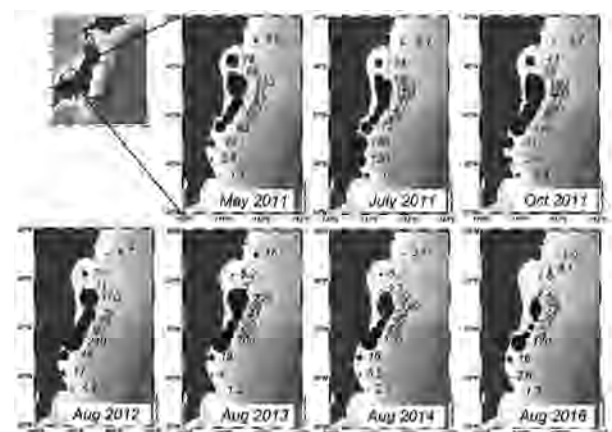


図5 文部科学省及び原子力規制庁の海域モニタリングによる、堆積物表層0-3cmの¹³⁷Cs濃度分布(Bq/kg)

る⁵⁾。図5に示す堆積物中の¹³⁷Csの初期分布が、沿岸域での汚染度の高い海水の移動履歴と概ね一致することを考慮すると、通常の数万倍高い濃度の放射性Csを含む海水が海底付近に移流・拡散し、その一部が海底に沈着したものと考えられる。事故直後における同海域は、東日本大震災の津波の影響により、海水中の懸濁物濃度が極めて高かったと考えられ、これらの懸濁物への放射性Csの吸着と海底への輸送も、沿岸海底への¹³⁷Cs濃度の沈着に作用したものと推測される。沿岸域における海底の¹³⁷Cs濃度は、事故発生約半年後までの間(～2011年10月)は、局所的な懸濁物の移動と思われる再分布が見られ、その後はその分布の特徴を維持したまま、緩やかに減少傾向を示した。

図6に、福島沿岸(水深100m以浅)における表層堆積物中の¹³⁷Cs濃度の時間変化を示す。図6のデータは表層(表面から約10cm層まで)の堆積物のモニタリング結果である。¹³⁷Cs濃度は年に約30%の割合で減少した。濃度減少は時間の経過とともにわずかに鈍化しているが、海水中での濃度(図4)に見られたほど顕著ではなく、全体として濃度減少は遅いことがわかる。その寄与は海域によって異なるものの、表層堆積物中の¹³⁷Cs濃度減少の要因として、(i)堆積物の再浮遊と移動¹⁷⁾、(ii)堆積物からの¹³⁷Csの脱離¹⁸⁾、(iii)荒天時や底生生物の活動による堆積物の鉛直混合に伴う希釈¹⁵⁾が考えられている。セシウムは海水中で一価の陽イオンとして存在し、「溶けやすい」元素である一方で、鉍物の表面への吸着は他の陽イオンに比べて強固であり、堆積物からの脱離は遅い¹⁸⁾。このことは、沿岸の堆積物が、長期的には沿岸域の海水への放射性Csの二次的な供給源として作用することも示唆しており、その機構解明が急がれる。

図6の下段に、水産庁が実施した海産物のモニタリン

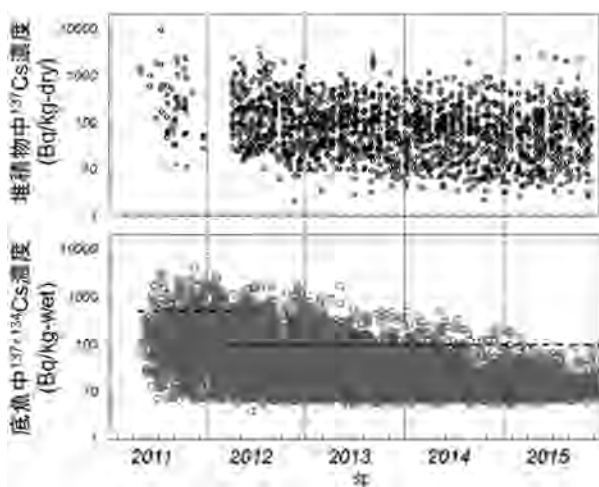


図6 福島県沿岸における、(上)海底堆積物、および(下)底層魚類中の放射性Cs濃度の時間変化。堆積物の値は文献¹⁵⁾、魚類の値は水産庁のモニタリングデータ¹⁶⁾による。図中の破線は、食品の放射性Cs濃度(¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計値)の暫定基準値(～2012年3月:500 Bq/kg湿重量)及び基準値(2012年4月～:100 Bq/kg湿重量)を示す。

グ調査の結果のうち、福島沿岸における底魚(カレイ、ヒラメ等の海底付近に生息する魚類)中の放射性Cs濃度(¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計値)の時間変化を示す。福島沿岸の表面付近に生息する魚類中の放射性Cs濃度は、事故後の早い段階で検出下限値以下に減少した一方で、底魚中の濃度減少は比較的遅く、極めて低い割合(2016年では0.04%)であるものの、厚生労働省が定める食品の放射性Cs濃度基準値を超過する例も見られる。底魚類の放射性Cs濃度の減少が遅かった要因の一つとして、海底の堆積物中の放射性Csの一部が、海底付近の海水や餌成分(底生生物等)を経由して底魚に取りこまれることが指摘されている。ただし、底魚中の放射性Cs濃度の減少率は、その放射性壊変による減衰率に比べて1割程度速く、堆積物中の濃度減少と比べてもわずかに速い。このことは、仮に堆積物由来の放射性Csが底魚類の体内に取り込まれているとしても、より放射性Cs濃度の低い海水によって希釈され、体外へと排泄されていることを示している。

IV. おわりに：最近の放射性Csの動きと存在量

本稿のまとめとして、2016年12月現在の福島周辺海域における¹³⁷Csの存在量と動きについて、図7にまとめる。

図7における¹³⁷Csの移動量は、前述の図2に比べて積算期間が約一桁小さいことを考慮しても、事故初期の放射性Csの存在量・移動量に比べて、モニタリングの対象としている濃度レベルは数桁低下していることがわかる。港湾を含む1F施設内での様々な施策と、海洋が本来持つ物質循環機構によって、福島周辺の海洋環境の回復は確実に進んでいると言える。

一方で、河川や1F近傍からの放射性Csの流入や、海底堆積物からの放射性Csの脱離といった、事故当初は放射性Cs分布への寄与が相対的に小さかった過程が、小規模ながら継続的な海洋への放射性Csの供給源とな

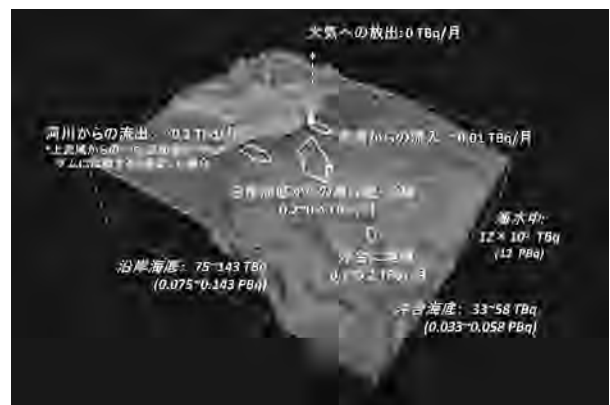


図7 2016年12月における¹³⁷Csの動きと存在量
文献^{8, 9), 15), 17)}及び本稿Ⅲ-1節の推定値を元に作成

ることが浮き彫りとなっている。海洋環境・漁場環境が十分に信頼のおけるものであることを示すためには、精度の高い手法での継続的な監視に加えて、これらの過程の機構を中・長期的な視点で明らかにすることが重要である。本稿では沿岸域に主眼を置いて解説したが、1F事故由来の放射性Csの大洋レベルでの行方を正しく理解することも、新たな風評被害をもたらさないために不可欠である。

－ 参考資料 －

- 1) T. Kobayashi, H. Nagai, M. Chino, H. Kawamura: J. Nucl. Sci. Technol., 50, 255-264 (2013).
- 2) G. Katata, M. Chino, T. Kobayashi, H. Terada, M. Ota, H. Nagai, M. Kajino, R. Draxler, M. C. Hort, A. Malo, T. Torii, Y. Sanada: Atmos. Chem. Phys., 15, 1029-1070 (2015).
- 3) D. Tsumune, T. Tsubono, M. Aoyama, K. Hirose: J. Environ. Radioact., 111, 100-108, (2012).
- 4) 上平雄基, 川村英之, 小林卓也, 内山雄介: 土木学会論文集 B2(海岸工学), 72, I_451-I_456, (2016).
- 5) S. Otsuka, Y. Kato: Environ. Sci. Processes Impacts, 16, 978-990 (2014).
- 6) 西原健司, 山岸功, 安田健一郎, 石森健一郎, 田中究, 久野剛彦, 稲田聡, 後藤雄一: 日本原子力学会和文論文誌, 11, 13-19, 2012.
- 7) T. Kawamura, T. Kobayashi, A. Furuno, T. In, Y. Ishikawa, T. Nakayama, S. Shima, T. Awaji: J. Nucl. Sci. Technol. 48, 1349-1356, 2011.
- 8) A. Kitamura, M. Yamaguchi, H. Kurikami, M. Yui, Y. Onishi: Anthropocene, 5, 22-31, 2014.
- 9) M. Yamaguchi, A. Kitamura, Y. Oda, Y. Onishi: J. Environ. Radioact., 135, 135-146 2014.
- 10) J. Kanda: Biogeosci., 10, 6107-6113, 2013.
- 11) 東京電力「福島第一原子力発電所周辺の放射性物質の分析結果」<http://www.tepco.co.jp/decommission/planaction/monitoring/index-j.html>
- 12) 原子力機構「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/>
- 13) Y. Kumamoto, M. Aoyama, Y. Hamajima, T. Aono, S. Kouketsu, A. Murata, T. Kwano: Sci. Rep., 4, 4276 (2014).
- 14) 原子力規制庁「宮城県・福島県・茨城県・千葉県沖における海域モニタリング結果(海底土)」<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/458/list-1.html>
- 15) S. Otsuka: J. Oceanogr. doi: 10.1007/s10872-017-0421-5, 2017.
- 16) 水産庁「水産物の放射性物質調査の結果について」<http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>
- 17) K.O. Buesseler, C.R. German, M.C. Honda, S. Otsuka, E.E. Black, H. Kawakami, S.J. Manganini, S.M. Pike: Environ. Sci. Technol. 49, 9807-9816, 2015.
- 18) S. Otsuka, T. Kobayashi: Environ. Monit. Assess. 185, 5419-5433, 2013.

－ 参考資料 －



乙坂重嘉 (おとさか・しげよし)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 海洋化学・環境放射能



小林卓也 (こばやし・たくや)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 海岸工学・環境放射能



町田昌彦 (まちだ・まさひこ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 理論及び計算物理学/放射線科学・生命科学・物性科学・環境科学

核燃料のリサイクルに関する研究課題・技術課題の提示と若手研究者・技術者の育成に向けて 再処理・リサイクル部会の最近の活動

日本原子力学会 再処理・リサイクル部会

再処理・リサイクル部会では、2001年の設立以来、核燃料のリサイクル路線の定着化に向け、セミナー開催、ワーキンググループ活動、国際会議開催などを行ってきた。2017年にはテキスト『核燃料サイクル』を完成させ、また、2014年および2017年には核燃料サイクル施設シビアアクシデントに関する二つの報告書を公表した。今後も、課題を提示しつつ若手研究者・技術者の育成を図るべく、活動を継続していきたい。

KEYWORDS: *Nuclear Fuel Cycle, Reprocessing, Fuel Cycle Facility, Severe Accident, Human Resource Development*

I. はじめに

「再処理・リサイクル部会」は、核燃料のリサイクルの必要性の認識、再処理路線の定着化、次の世代を形作る大学の活動の活発化を主眼として2001年3月に設立された。設立趣旨書には、「再処理」並びにリサイクル技術に関し、蓄積した工学的経験、知見の整理・評価・適用、安全で信頼性、効率性のある管理手法の研究、安全性・リスク評価に関する更なる研究、設計から廃止措置にいたる間の望ましい規制システム、新しい再処理システムに関する研究等を活発化させ、国内に留まらず世界をリードすると共に、社会に発信し、産業活動と地球環境の調和に貢献するべく活動することは、原子力学会の使命と考えると記されている。東京電力(株)福島第一原子力発電所(1F)の事故等により原子力を取り巻く環境は変化しているが、「リサイクル」の重要性、必要性は変わりがなく、今後のため、純技術的な観点から国内外に情報発信することが大事であるという認識の下、部会としての活動を継続して実施してきた。

本稿では、上記のような考え、使命感に基づき実施し

Towards Presentation of Research and Technology Subjects and Development of Young Generation's Activities on Nuclear Fuel Recycle ; Recent Activities of the Reprocessing and Recycle Technology Division : The Reprocessing and Recycle Technology Division.

(2017年8月18日 受理)

てきた再処理・リサイクル部会の最近の活動を簡単に紹介する。特に、テキスト作成とシビアアクシデントに関する二つのワーキンググループの成果を強調して紹介したい。(執筆担当：森田泰治(JAEA))

II. ワーキンググループ活動

1. テキスト『核燃料サイクル』作成ワーキンググループ

遡ること10年、2007年に当部会が設置したサイクル技術検討WG(井上正主査)において、“わが国の核燃料サイクルの実現に向けて第三者的・中立的立場と再処理技術の専門家集団としての学会の役割は何か?”を明確にするための活発な議論が展開された。当時、使用済み燃料の直接処分が話題になった時期でもあり、核燃料サイクルの意義と在り方を検討し直そうと始まった活動である。同WGが2009年にまとめた『リサイクル路線に対する論点の技術的検討(案)』では、「論点を洗い出すとともに、技術を整理して“冊子”等として外部発信することが必要」と明示された。これを受けて2010年6月には「再処理・燃料サイクルの技術データベースを作成し、パンフレットや専門教科書として情報発信すること」を決定。こうしてテキスト『核燃料サイクル』の発行が決まった。

テキスト『核燃料サイクル』発行の目的は、「わが国のエネルギー政策の幹である“核燃料サイクル”の科学的、客観的な技術情報を取り纏めて会員・非会員を問わ

ず広範な読者の利用に供すること」であり、長年かけて蓄積された知識や技術を整理し管理すること、およびそれらを継承し次世代の人材育成に資することが学会の大きな役割であるとの認識に立っている。2010年10月に発足したテキスト作成WG(故石井保主査)は、翌年3月の1Fの事故後に一旦活動を中断した。その後テキストを発行する意義は事故以前よりも増したことを再確認し、2012年1月に活動を再開して実質的な編集作業を開始した。この時点でテキスト作成WGを“テキスト編集委員会”と改称した。

テキスト編集委員会では、2012年3月中に目次と執筆者を決め、執筆者に原稿の作成を依頼。提出された原稿ごとに複数の編集委員が査読作業を分担し、執筆者との意見交換を経て掲載記事を完成させた。執筆者と査読者には相当負担のかかる編集作業となったが、全ての記事が“査読付き”であるという本テキストの優位性が確保できた。公開の方法についても色々な議論があったが、出来上がった記事から順に速やかに公開できること、必要に応じて記事の追加、改訂等が容易であることなどを理由に、本学会の公式HPで公開することを決定。こうして、2012年12月には第1回目の記事公開に漕ぎ着け、以降2017年1月までの約4年間を費やして当初予定した目次の全ての記事を完成した。

現在学会HPで公開中のテキスト『核燃料サイクル』¹⁾は全9章、約200ページで構成する。執筆者の総数はのべ44名、編集委員が19名。このように60名を超える多くの学会員が本テキストの作成に参画したことも色々な意味で有意義である。特に、核燃料サイクルを専門分野とする多くの学会員、とりわけ活発な多くの若手研究者らが、この分野の専門家として弛まぬ努力を続けていることの証が得られたことが意義深い。

今後への期待であるが、一つには、このテキスト作成の活動を是非とも継続することが重要と考える。近い将来に核燃料サイクルに係る動向が変化、技術が進歩、新知見が発見された時などには、速やかに新しい章や項を起こして、現状版にどんどん追加、改訂を加えて欲しい。また1F廃炉のための技術(現状、第9章にまとめてある)について、作業の進捗に見合った内容の充実を続けて欲しい。二つ目は冒頭に述べたサイクル技術検討WGが掲げた「リサイクル路線に対する論点の洗い出し」作業とそれに係る発信についてである。テキスト「核燃料サイクル」がここまで達成したのは「科学的・客観的な技術データベースの整理と発信」である。今後の活動が「より柔軟なサイクル路線のための論点の洗い出しとそれらを解決していくための技術論の整理と発信」へと広く進展していくことを期待して止まない。

(執筆担当：吉田善行(アトックス))

2. 核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究ワーキンググループ

1F事故の教訓を踏まえて、発電用原子炉施設を除く核燃料サイクル施設(サイクル施設)についてもシビアアクシデント(SA)のリスクを評価し、これに基づいて安全確保のあり方を見直し、深層防護の強化を図り一層の安全性向上について検討することが喫緊の課題となった。

そこで当部会では、サイクル施設において想定しうる事故を体系的に検討し、その中からSA(“設計基準事故の想定を超える条件で発生し、その判断基準を超えて大きい影響をもたらす事故”と定義)として認識し、対策の必要性を含めて検討すべき事故を科学的・技術的観点から選定する方法を明らかにすることを目的として、2013年4月に核燃料サイクル施設SA研究ワーキンググループ(SAWG)を設置した。そして、部会員以外の方々の協力も頂いて、2013年4月～2014年9月までをフェーズI、2015年5月～2017年1月までをフェーズIIとして活動してきた。

フェーズIでは、原子力規制委員会で進められていた新規制基準案に係る意見公募に対してSAWGの意見を2度提出した。また、成果報告書²⁾を当部会のHPに公表するとともに、要旨を解説記事として、日本原子力学会誌ATOMOΣに掲載した³⁾。フェーズIの主な成果は、“対応を検討すべきSA”の選定手順を提案し、「発生頻度」と「影響の大きさ」を軸とする2次元平面上の階段状の線として表現される判断基準が適切であること、並びに事故に必要とされる安全対策のレベルをそのリスクの大きさに応じて設定するグレーデッドアプローチの適用が、科学的合理性に適合していることを指摘したことである。また、「発生頻度」については、既存の評価手法を適切に組み合わせて適用することで評価しうるが、「影響」の評価については、世界的にも広く検討されておらず、評価手法を体系的に調査・検討し、整理する必要があることを課題として指摘した。

フェーズIIでは、フェーズIでの成果と課題を背景に、再処理施設で発生が想定される事故の影響評価方法に関する現状の整理、課題の把握および課題解決の方法について、客観的かつ専門的視点から検討した。具体的には、高レベル廃液の蒸発乾固事故、セル内での有機溶媒火災およびTBPなどを配位した錯体の急激な分解反応、臨界事故、放射線分解水素の爆発、使用済燃料の損傷(プール水喪失)を対象に、影響評価方法の現状と課題について、調査・検討を行った。その結果、米国のサイクル施設事故解析ハンドブック⁴⁾で用いられた五因子法の考え方や試験データなどを踏まえつつ、近年我が国を中心になされた実験および解析的研究の成果、解析コードなどの情報を多数取り入れ、上記想定事故における影響評価に必要な項目に沿って、現状で利用可能な手法や

データを提示することができた。また、適用上留意すべき事項や今後の検討課題を整理することができた。それらの成果を報告書として、当部会のHPに公表した⁵⁾。

両報告書が規制機関、事業者および学術界での核燃料サイクル施設の科学的合理性の高い安全確保対策の検討、および更なる安全性向上に役立つことを期待している。(執筆担当：池田泰久(東京工業大学))

3. 課題議論ワーキンググループ

課題議論ワーキンググループ(以下、課題WG)は、再処理・リサイクルの現状が、産業的にも科学的な基礎研究のレベルにおいてもフランス、ロシア等の核燃料サイクルの先進国と比べて遅れており、その他の国々からも追いつかれ追い抜かれようとしているのではないかと言う危惧や焦燥感を多くの部会員が持ち、また、再処理施設の相次ぐトラブル、さらには1F事故により強い閉塞感があると言う現状を打破するために、改めて我が国における再処理・リサイクルの課題を抽出し、対策を議論することをミッションとして2013年に設立された。

課題WGは、最初にメンバーが集まって、議論するための論点と議論する範囲について話し合い、個別の技術的なことや科学的なことに関しては、多くの専門委員会等で議論が成されているので、このWGの範囲外とし、より大きな枠組みで学会として政策的に提言出来ることを目指して議論することとした。

課題WGでの議論は、KJ法を用いて行った。つまり、メンバーに課題を挙げてもらい、個別の紙に書き出して、組み合わせや、グループ化、そして、それらに関連付けることにより、個々の課題の中から大きな課題を抽出する作業を行った。この議論の中で多くの個別の課題があることは再認識されたが、その中で最も重要な再処理とは何か、また再処理とは何をすべきものであるのかと言うことが明確に定義されていないのではないかと、あるいは元々の定義が時代によって変わってきたものを十分に反映しきれておらず現在の再処理あるいは将来の再処理への要望にあっておらず、その結果として再処理・リサイクルに係わる研究者・技術者のモチベーション低下の一因になっているのではないかと結論に達し、課題WGでは、改めて再処理の定義とミッションについて議論し、再定義をした。以下に課題WGでまとめた再処理の定義とミッションについて示す。

「[再処理の定義とそのミッション]

核燃料再処理は、核燃料サイクルを構成する種々の要素を繋ぐ重要な基盤であり、核燃料再処理技術とは、原子炉内から取り出された燃料に係る分離技術を主体とするものである。その役割は、エネルギーの持続的利用に供するための燃料リサイクルおよび放射性廃棄物の処理処分の負荷軽減に資するものである。」

以上であるが、上記を解説し、更なる課題解決に向け

て検討を行おうとしているところであるが、諸事情により、現在はここまででとどまっている。

(執筆担当：鈴木達也(長岡技術科学大学))

III. セミナー活動

1. 部会セミナー

再処理・リサイクル部会セミナーは、2016年12月26日の開催で、第12回を数える。その時々ホットなテーマを取り上げて、第一線で活躍している専門家に講演をお願いして、情報を共有するとともに、今後のこの分野の発展のために何をなすべきか等の議論のきっかけを提起することを主な目的としている。特にここ数年は原子力から少し離れたところにいらっしゃる先生をお招きして、外から見た原子力、核燃料サイクルについてのご意見を伺うことに重きを置いており、例えば、直近の第12回のセミナーでは、日本経済新聞社の滝 順一氏に「変容する核燃料サイクル」と題する講演をして頂いた。様々な面で厳しい状況にある今こそ、広い視野、客観的な視点、冷静な判断が求められているおり、この活動を続けていかなければならないと考えている。

2017年度も12月に第13回を開催予定であり、部会員はもとより部会以外の方々にもぜひご参加頂きたい。講演者はこれから検討していくが、もし、推薦、希望があればお寄せ頂ければありがたい。有意義なセミナーとなるよう今後も努力していく所存である。

(執筆担当：森田泰治(JAEA))

2. 夏期セミナー

本セミナーは、2002年に「ぎんぎんセミナー」の名称にて第1回が箱根にて開催され、第一線で活躍する技術者20~30名が集い、再処理技術に関する「ぎんぎん」とした議論が展開された。その後2回にわたり、同様の趣旨によりセミナーが開催された後、第4回より開催場所を青森県に移し、六ヶ所再処理工場の見学も併せて企画し、人材育成も主たる目的の一つとして開催されるようになった。ここ数年は毎年夏に本セミナーを開催し、学生の参加者が5~10名の間で推移しており、毎年恒例の人材育成のためのイベントとして定着しつつある。このように、討論を主目的としていたセミナー開始当初と比較して、セミナーの開催目的の範囲が広がりつつあることを受けて、2017年度より名称を「夏期セミナー」に変更して開催している。2018年度以降も毎年夏に開催することを予定しており、学生ならびに若手の技術者・研究者の方には一度本セミナーへの参加をぜひ検討して頂きたい。(執筆担当：大西貴士(JAEA))

IV. クリーンアップ分科会

原子力学会理事会直轄の組織として、福島特別プロジェクト(主査電中研井上顧問)の中のクリーンアップ分

科会には、当部会からの参加者が中心メンバーとなって活躍している。プロジェクト内に設置されている他の二つの分科会(放射線影響およびコミュニケーション)と協力し、福島の住民が少しでも早く現状復帰できるように、国や環境省との間でインターフェースの役割をすることを目的としてきた。主な活動は、情報提供、除染活動の促進⁷⁾、環境修復活動などへの提言である。

情報提供として、除染技術や仮置き場に関しては「除染技術カタログ」「仮置場 Q & A」等の解説書を作成、一般に公開した。また、除染・処分コストについては全体シナリオを設定したうえで、除染・処理・貯蔵処分に分類したコスト評価を実施、原子力学会誌への投稿を行っている。これらの活動に基づき、福島県民ならびにその他の地域の住民に向けて、関係機関と協力し、シンポジウムや対話集会を開催した(シンポジウム 12 回、対話フォーラム 8 回)。なお、これまでは福島県内での開催が中心であったが、福島復興のためには風評に対する活動も重要であるとの意見が持ち上がった。2016 年 3 月には消費地の一つである東京で、福島県内の農林水産物の現状の紹介を含めたシンポジウムを開催した。

除染活動促進のため、福島県・環境省の「除染情報プラザ(環境再生プラザに改称)」に専門家を毎週末派遣。放射線の健康影響、除染の方法、仮置や中間貯蔵等、住民からの質問などに対応している。講習会テーマ設定の提案や講師派遣などの支援もしている。また、除染活動の実践として、JA そうま(現 JA ふくしま未来)と協力し、南相馬市内の水田での代掻き除染やセシウムの移行抑制技術の評価。効果的なセシウム移行抑制技術や肥料中のカリウムとの移行挙動の結果を国内外の学会に報告⁸⁾した。なお現地でのセシウムの玄米への移行評価は 6 年目となる今年度も継続しており、経年変化をモニタリングしている。

環境修復／中長期対策への提言については震災直後から周辺環境ならびに事故炉の修復に関する技術課題の分析、評価を行い、情報発信を続けている。また、震災から 5 年経過した昨年には、さらに一歩踏み込んだ除染、帰還、復興に関する見解を発信した。

今後も再処理リサイクル部会として、クリーンアップ分科会での活動を支援し、福島復興に協力をしていく所存である。(執筆担当：三倉通孝(東芝))

V. その他の活動

国際会議開催とこれを通じた情報発信も重要な活動の一つである。当部会設立当初、燃料サイクルに関する国際ワークショップの第 1 回を 2002 年 3 月 25 日に、第 2 回を 2003 年 3 月 24～25 日に、第 3 回を 2006 年 12 月 8～9 日に開催している。第 4 回として、2008 年 10 月 19～22 日に International Workshop for Asian Nuclear Prospect と題して開催したが、これを契機に日本、韓

国、中国、インドのアジア 4 か国の持ち回りで開催する国際会議 ANUP(Asian Nuclear Prospects)シリーズが始まった。ANUP2010 がインドで、ANUP2012 が中国で、ANUP2014 が韓国で開催されて一巡した後、2016 年度には日本で ANUP2016 を原子力学会主催で、当部会を中心に活動し、部会員以外の方にも協力頂いて、10 月 24～27 日に仙台で開催した⁶⁾。口頭発表 70 件、ポスター発表 39 件、参加者約 150 名で、成功裏に終了した。アジア内での協力、情報共有は今後ますます重要になってくると考えられる。次回は、2018 年にインドで開催されることとなっている。

核燃料サイクルに関する国際会議として GLOBAL シリーズが、米国、欧州、日本(アジア)の三極で順に回して、隔年で開催されている。当部会は、2005 年の GLOBAL2005 と 2011 年の GLOBAL2011 の開催の中心的役割を果たしている。GLOBAL、ANUP いずれの場合も会議開催のノウハウの継承を目的に細かなことも書き留めた報告書を作成している。今後役に立つ資料であると考えている。

その他として、他の部会と同様に、春と秋の原子力学会における企画セッションの開催も大事な活動である。その時その時に着目される話題を提供し、議論する場として、他の部会との共催を含めて、今後もしっかりとした取り組みを行っていきたいと考えている。

(執筆担当：森田泰治(JAEA))

VI. おわりに

以上紹介した当部会の最近の活動を学生・若手研究者・技術者の育成という視点から総括してみたい。

テキスト作成 WG によるテキスト「核燃料サイクル」は、若手研究者も作成に関与しつつ、今後学生・若手研究者・技術者がこの分野を概観する際の貴重な基礎資料となるものであり、本年完成し、公表されたことは意義深い。

シビアアクシデント研究 WG は若手研究者が多数参加し、再処理施設で一体どのようなシビアアクシデントが発生するのか、その影響の評価方法や課題に至るまでを包括的にまとめた。我が国の原子力開発が始まり約 60 年。サイクル施設のシビアアクシデントについて、これほど深く検討されたことは初めてであり、若い研究者が今後の研究テーマを探るためにも、非常に価値のある報告が完成したと考える。

部会セミナーでは技術論だけでなく、社会的視点からの議論もなされ、また、夏期セミナー(旧称ぎんぎんセミナー)では若手を中心とした泊り込みの議論が行われている。アジア地域を中心とした ANUP、日米欧で順次開催される GLOBAL は、若手研究者に発表の場を与えるだけでなく、世界・アジアの動向を目の当たりにする場として有効に機能している。

少し視点を変えれば、六ヶ所再処理工場の新規規制基準への適合審査は大詰めを迎えており、今後、対策工事が本格化する中、原子炉等規制法に基づく設計および工事の方法の認可、使用前検査を経て本格操業が始まる。一方では、東海再処理工場を始めとする研究施設の廃止措置も今後本格化するが、本格操業・廃止措置ともに我が国の再処理・リサイクル分野のフロンティアであり、今後数十年にわたり多くの技術・研究課題の解決が求められる。

当部会は、このような視点から研究課題・技術課題を広く提示しつつ、学生・若手研究者・技術者の一層の活躍につながる活動を継続してまいりたい。

(執筆担当：中村裕行(原燃分析))

－ 参考資料 －

- 1) テキスト「核燃料サイクル」
<http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt.html>
- 2) SAWG 報告書「核燃料サイクル施設における対応を検討すべきシビアアクシデントの選定方法と課題」, 2014年9月30日, http://www.aesj.or.jp/~recycle/sawg/sawg_report_final.pdf
- 3) SAWG, 「核燃料サイクル施設における対応を検討すべきシビアアクシデントの選定方法と課題」, 日本原子力学会誌, 57 [5], 331-339(2015).
- 4) Science Applications International Corporation, Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook, NUREG/CR-6410(1998).
- 5) SAWG 報告書「再処理施設において想定される事故の影響評価手法の現状と課題」, 2017年1月31日, http://www.aesj.or.jp/~recycle/sawg/sawg2_report_final.pdf.
- 6) 会議報告「アジアの原子力展望に関する国際会議 ANUP2016」, 日本原子力学会誌, 59 [5], 295(2017).
- 7) 日本原子力学会プレスリリース「環境修復活動について」, 2011年11月21日, <http://www.aesj.or.jp/info/pressrelease/pr20111121.pdf>
- 8) 特集「福島特別プロジェクトの活動と今後の展開－福島の実境回復を目指して－」日本原子力学会誌, 56 [3], 193-205 (2014).



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 －

(10月3日第3回論文誌編集幹事会, 第4回学会誌編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・平成29年8月16日～9月15日に英文誌へ26論文, 和文誌へ6論文の投稿があった。
- ・投稿ガイドラインおよび審査・査読要領の一部追記を了承した。
- ・東電福島第一事故関連和文論文及びアトモス掲載解説記事の英訳出版WGの進捗状況が報告された。翻訳会社との契約内容により作業が変わる可能性があるので、打ち合わせをしたうえで事業計画書を改訂し、次回の幹事会で検討後に総務財務委員会に諮ることとした。
- ・学会賞論文賞への編集委員会からの推薦に関して推薦候補を再検討し、3論文を推薦することとした。

【学会誌関係】

- ・木下委員長より、2019年に発行予定の60周年記念号の企画について理事會に報告した旨の説明があった。
- ・9月号のアンケート結果の報告があり、今後の記事企画の参考にした。
- ・編集長から「2017年春の年の会理事会セッション」の原稿が完成したという報告があり、これを12月号掲載の予定で進めることとした。
- ・国際会議「GLOBAL2017」に参加した委員から記事企画の提案があり、承認された。
- ・巻頭言、時論、他の記事企画の進捗状況について検討した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

FR17 国際会議の概要と高速炉開発の情勢

日本原子力研究開発機構 上出 英樹

本年6月末にロシア、エカテリンブルクにてFR17会議(International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, 2017)がIAEAの主催で行われた。本会議では高速炉開発にかかる世界の主要な情報が集まることから、本稿では、今開発に力を入れている国々を中心にPlenary講演での報告などから開発の状況をまとめた。

I. 会議概要

FR17会議は、IAEAが主催する高速炉サイクルに関する国際会議で、2009年に京都でFR09が開催されてから、2013年にパリでFR13、そして今年2017年にロシア、エカテリンブルクで6月末に開催された。エカテリンブルクはロシアのナトリウム冷却高速炉BN600、BN800の立地するベロヤルスクから近く、見学ツアーも行われた。参加者は世界29カ国、6機関から600名を超え、発表論文数は470編を超える大規模な会議¹⁾となった。

本稿では、海外の高速炉開発の状況について、主にPlenary講演での発表から関心の高いロシア、フランス、中国、インドを中心に米国を含めて報告する。

II. ロシア

開催国ロシアでは、Proryv(Breakthrough)projectとして、シビアアクシデントに対する安全性向上とともにウラン資源の有効利用、経済的競争力をもった原子力を目的とした開発を進めていることが表明された。

炉では、プール型ナトリウム冷却高速炉であるBN600の35年を超える安定運転、BN800の昨年10月からの商用運転開始などを背景に、軽水炉に対する経済的競争力をもつ実用炉として電気出力122万kWを有するBN1200の開発が進んでいる。安全性の点でも、原子炉容器の中に1次系の全てのナトリウム系統を格納、崩壊熱除去系を原子炉容器内に装備、温度感知方式の受動的反応度制御システムの設置など向上を図っている。

燃料には、BN600ではウラン燃料が使われ、BN800では初期の、ウラン燃料に加えプルトニウムを含むMOX燃料を全体の16%程度用いたハイブリッド炉心から2019年末には全てをMOX燃料とし、様々な同位体比をもつリサイクル燃料を使うことで、核燃料サイクルの輪を閉じる技術をもつ計画としている。BN1200では窒化物燃料をレファレンスとし安全性を含む性能向上を図る計画としている。

さらに鉛冷却高速炉の開発を並行して実施しており、

電気出力30万kWのBREST-OD-300の開発を、燃料製造、再処理施設を同一サイトにもつPDEC(Pilot Demonstration Energy Complex)projectとして進め、すでに燃料製造施設の建設に着手している。

今後は、VVERなど軽水炉に加えて2030年代には徐々に高速炉を増やし、閉じた核燃料サイクルを目指すTwo-component Nuclear Powerにより、ウラン資源の節約と累積する軽水炉の使用済燃料への対応、発電コストのトータルとしての削減を図ることを目指している。

III. フランス

フランスからは、軽水炉主体のプルトニウム単一リサイクルから第4世代炉とサイクル技術によるプルトニウムとマイナーアクチニド(MA)の多重リサイクルへの移行を目指し、高速炉により核燃料サイクルの輪を閉じることで、ウラン資源の顕著な有効利用を図り、放射性廃棄物の減容と有害度の低減を図ることが表明された。

第4世代炉として、ナトリウム冷却高速炉に重点を置き、ASTRID projectにより高速炉とサイクル技術のブレークスルーを実証する。ASTRID projectは2015年末にフランス政府により2019年末までBasic Design Phaseとして進めることが承認されている。

ASTRIDは、プール型炉で60万kWの電気出力を有する。MOX燃料を用い、低いボイド反応度を指向した軸方向非均質炉心、冗長性と多様性を重視した崩壊熱除去系、窒素ガスタービンによる発電システムを有力な選択肢とする点などに特徴がある。ナトリウム-窒素ガス熱交換器に関するナトリウム試験やシビアアクシデント対策としてのコアキャッチャーに関するUO₂を用いた試験などを計画、準備を進めている。

IV. インド

高速増殖炉がインドのエネルギーセキュリティと持続可能性の基本をなすことが表明された。実験炉FBTRの32年に及ぶ運転とMOX燃料を用いた電気出力50万kWのプール型炉PFBRの設計・建設、安全評

価を経験し、核燃料サイクルの輪を閉じる高速増殖炉の導入に向けて実績を積み上げている。実用化に向けて、経済性と安全性を向上させ、PFBR とほぼ同一サイズの炉容器で電気出力 60 万 kW を達成する FBR-600 の設計を行っている。安全性では、温度感知磁性材料を用いた受動的な制御棒挿入、流体力支持方式の制御棒による流量喪失事象への対応などが検討されている。自由液面でのガス巻き込み防止、FBTR を用いた照射試験を含む燃料被覆管材料開発、超音波を用いた供用期間中検査など広範な分野で研究開発を展開している。これと並行して原子力の大幅な成長に向けて、高い増殖率が達成可能な金属燃料に関する研究開発を、燃料製造、燃料サイクル技術を含めて実施している。

PFBR の建設進捗にかかる質問回答として、規制側の承認に時間を要しており臨界まで時間がかかる状況であることが示された。

V. 中国

中国の電力開発 5 カ年計画(2016-2020)において 2016 年に約 30GW ある原子力発電設備容量を 2020 年には 58GW にすることが示され、ある研究によればと断った上で、2030 年に 200GW、2050 年には 400 から 500GW に達するとの言及があった。原子力政策として、軽水炉から高速炉、核融合へと開発を進めること、燃料サイクルについても炉と並行して開発を進めること、高速炉はウラン資源の有効利用と長半減期放射性物質の核変換の点で、原子力の持続可能な開発を支えるものであることが表明された。

高速炉開発について、ナトリウム冷却プール型の実験炉 CEFR の 2011 年の初電から 2023 年頃に実証炉 CFR600、2030 年以降に実用炉 CCFR と進めることが示された。CEFR は 2016 年に 23 日間運転したものの、主ポンプや燃料交換機の保守など多くのオーバーホールが実施された。CFR600 は MOX 燃料を用い、電気出力 60 万 kW とすることが計画されている。研究開発の例として被覆管やラッパー管など炉心燃料材料の照射試験、ODS 鋼の基盤研究などが紹介された。燃料サイクル開発では、MOX 燃料を中心に閉じた燃料サイクルの開発を進め、MOX 燃料製造設備、再処理パイロットプラントを有しており、2030 年頃に高速炉と再処理、燃料製造の商用デモを目指すこと、MA サイクルについても検討していることが示された。

VI. 米国

米国から多くの論文投稿があったが、会議参加者は限定的であった。技術セッションにて米国での高速炉開発状況について代理発表があった。DOE の 2050 年までの展望には新型炉、特に非軽水炉の成長を期待している。2015 年には新型炉試験及び実証炉研究を支援するため



図 BN800 の炉室内写真(Booklet of Beloyarsk NPP より)中央の円筒構造の下方に炉心が位置し、その周囲に曲線を描くように配置された配管が、6 基ある中間熱交換器からの 2 次系ホット、コールドレグである。
(Beloyarsk NPP から転載許諾取得済み)

の予算措置を行い、現在も GAIN イニシアチブとして種々の新型炉に対して産業界を支援していることが報告された。

VII. BN600, BN800 の見学と設備概要

会場から 50km ほど東に離れたベロヤルスクにある BN600, BN800 を見学した。BN600 は電気出力 60 万 kW、1980 年から運転を開始しこれまでに 3 度炉心燃料の変更を行い、燃焼度を徐々に上げている。また付加的な研究開発と運転実績などにより寿命延長を行っており、2010 年 4 月には 2020 年 3 月までの運転許可を得ている。2016 年までの設備利用率は平均で 70% を超え、2014 年からの 3 年では 80% を超えている。寿命延長に際して、空気冷却器を用いた付加的な緊急時崩壊熱除去システムを 2 次主冷却系に追加している。BN800 は、BN600 とほぼ同じ炉容器径(約 13m)で電気出力 88 万 kW を達成している。2014 年に臨界、2016 年 10 月から定格での商用運転に入った。安全性の点では、緊急時崩壊熱除去システムとして 2 次主冷却系に空気冷却器を設置、炉心のナトリウムボイド反応度低減、流体力で支持され受動的な挿入が可能な制御棒を備えている。見学時には BN600 は定格で運転中、BN800 は停止中で、BN800 では原子炉室に案内された。中間熱交換器から出た 2 次系主配管の特徴的な引き回しや燃料交換設備の外観、その他、中央制御室などを見ることができた。

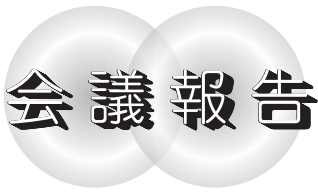
VIII. おわりに

FR17 会議からナトリウム冷却高速炉が燃料サイクル技術とともにウラン資源の有効利用によるエネルギーセキュリティの向上と放射性廃棄物の減容、有害度低減に向け、海外で積極的に開発されている現状を報告した。

— 参考資料 —

- 1) Proceedings of FR17, Yekaterinburg, Russia, 26-29 June, 2017(USB Memory).

(2017 年 8 月 30 日 記)



原子力分野のリーダー育成をめざして Japan-IAEA Joint Nuclear Energy Management School

2017年7月18日～8月3日(東京および福島・茨城, 日本)

「スクールに参加すると周りに話したときは、『日本に行くのか、うらやましい』と言われたよ。でも福島にも行くことを話した途端、『大丈夫なのか、被ばくしてしまうのではないかと心配されたんだ。帰国したら、今回自分の目で見た福島の復興への努力や、福島が『安全だ』ということ、周りに発信していこうと思っている。』海外研修生の一人が、こう話した。

このスクールは、「Japan-IAEA Joint 原子力エネルギーマネジメントスクール」。将来、原子力エネルギー計画を策定・管理するリーダーとなる人材を育成するために、IAEAと協力して日本が運営している研修コースだ。本スクールはイタリア・トリエステで2010年よりすでに7回開催され、アラブ首長国連邦やアメリカでも3回ずつ開催されている。日本ではこれまで5回開催され、今年7月には東京と福島・茨城で6回目が約3週間にわたって実施された。運営したのは原子力人材育成ネットワーク、東京大学大学院工学系研究科原子力専攻・原子力国際専攻、日本原子力研究開発機構、日本原子力産業協会、原子力国際協力センター、国立高専機構と福島工業高等専門学校。参加者は、トルコ、中国、ベトナム、アラブ首長国連邦やポーランドなど16カ国から来た計20人のほかに、日本人15人。政策や規制組織の担当者、プロジェクト企画・管理担当者、技術者、研究者など、将来その国のリーダーとなることが期待される人材が集まった。

スクール前半は原子力政策等の講義が中心。岡原子力委員会委員長をはじめとしてIAEA、電力、メーカー、大学、研究機関等の講師が、エネルギー戦略や核不拡散、国際法、経済、人材育成、環境問題など多岐にわたる講演を行った。

スクールの中盤でのテクニカルツアーでは、今年は初めての試みとして、福島県の復興状況について身をもって体感することを目的に、福島県環境創造センターやいわき市内農作物の全数検査・破壊式放射線検査を行っているJA(図1)、トマト栽培を行っているワンダーファームを見学。風評被害の大きさや、その克服に向けた事業者のひたむきな努力を目の当たりにし、感銘を受けていた。また、原子力緊急時支援・研修センター、東京電力福島第一・第二原子力発電所、楡葉遠隔技術開発センターや関連メーカーなど8カ所を見学。研修生は、見学先で日本の担当者が語る原子炉建屋上の瓦礫除去や



図1 福島県での農作物破壊式放射線検査見学の様子



図2 原子力発電導入シナリオ検討の様子

使用済燃料プールからの燃料取出しの進捗状況を見学し、着実に復興に向けた取組が進んでいることを実感していた。

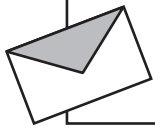
また、福島高専で行った高専生とのセッションでは、福島高専のほか2つの高専とTV会議で接続し、高専生と英語での交流会を企画し、研修生が地元の高校生と直接触れる機会を作った。高専生にとっても海外の方と交わる良い機会となった。

スクールの後半は、シナリオ・プランニングという手法を用い、学習した内容を踏まえつつ、研修生を6名程度のグループに分けて議論を行うグループプロジェクトを組み込んだ。「2040年頃の(東アジアを中心とした)原子力産業の状況を予測し、メンバーが所属組織においてどのように将来原子力発電導入シナリオに対応すれば良いか」について検討(図2)。

研修生が熱心に議論に参加し、国際的な視点をふまえたリーダーシップを身につけるための研修となった。

(原子力人材育成ネットワーク事務局 河野裕子、
2017年9月6日記)

理事会だより



CP-1 から 75 年；原子力の平和利用のために

1. はじめに

“Controlled Nuclear Chain Reaction: The first 50 years” という本が手元にあります。この本は、米国原子力学会 ANS が 1992 年 11 月にシカゴで開催したウィンターミーティングの参加者に配布したものです。ベテランの会員の方や大学の研究室などではまだ保管されているかもしれませんが。ちょうど 25 年前ですので、今年が The first 75 years, ということになります。当時、私はシカゴ郊外にあるアルゴンヌ国立研究所(米国エネルギー省)に客員研究員として滞在していました。私のポスは、70 歳を越えたドイツからの移民で、戦時中にマンハッタン計画にも参加した経験がある方でした。そのポスは、普段は寡黙で、既に原子力分野からは離れていましたが、原子力の平和利用の 50 周年記念の大会であるから是非参加するように、と珍しく声を強めて私を後押ししてくれました。50 周年というのは、CP-1(Chicago Pile No.1)での核分裂反応の制御に成功したことを指します。

2. CP-1 とその後

1942 年 12 月 2 日、Enrico Fermi が率いるチームが、シカゴ大学のスタッグフィールド・スタジアムに作った、グラファイト製ブロックを積み重ねた(Pile)設備(CP-1)で、核分裂反応の制御実験に成功しました。カドミウムの制御棒を一本ずつ抜き、中性子計数管の値が追従できないほど急増した段階で、Fermi が炉の臨界を宣言しました。2 分間この状況を維持して、制御棒を挿入して炉は静かに停止しました。核分裂反応を制御した瞬間でした。

この実験の後、CP-1 は 3 ヶ月後に解体されてしまいます。そのあとは、戦時下でのマンハッタン計画が極秘裏に進められ、原子力の平和利用は陰を潜めます。同書の序文にも書かれていますが、CP-1 はマンハッタン計画にも多大な影響を与えましたが、平和利用の最初の一歩を踏み出したものでもありました。

大戦後、原子力の平和利用が表に出てきます。最初の発電の成功は、アルゴンヌ国立研究所 ANL の高速増殖実験炉 EBR-1 (Experimental fast Breeder Reactor, 電気出力 100kW)によるものです。1951 年 12 月 20 日にアイダホ州の砂漠で一つの建屋の電燈を灯しました。その後、ANL は沸騰水型原子炉の原理を確立し、EBWR (Experimental Boiling Water Reactor, 電気出力 5MW)を、1956 年に運転開始しました。アイゼンハワー大統領

が 1953 年に国連で行った“Atoms for Peace”の演説を契機に、世界的に原子力の平和利用が加速しました。英国のガス冷却炉であるコールダーホール発電所が 1956 年に、加圧水型原子炉が米国シッピングポートで 1958 年に商業運転を開始し、それ以降、商業発電炉が急拡大しました。また、それと平行して、放射性同位体や放射線を用いた医療や農業での利用が進められてきたのは周知のとおりです。

一方で、CP-1 後の 75 年間で、スリーマイルアイランド(1979 年)、チェルノブイリ(1986 年)、福島(2011 年)と 3 回の大きな事故を経験し、原子力の平和利用は安全技術の礎のもとになれば全く意味をなさないことを、学者、技術者はじめ全ての人が思い染めたはずで

3. 学会の役割

原子力学会は、福島の事故を契機に定款を改定し、「公衆の安全をすべてに優先させて、原子力および放射線の平和利用に関する学術および技術の進歩をはかり、その成果の活用と普及を進め、もって環境の保全と社会の発展に寄与すること」を活動の目的としています。

そして行動指針として次の 3 つを掲げています。

- (1) 信頼醸成への貢献 [弛まず安全性の向上を追求/高い倫理観の醸成/公平公正な透明性の維持/国民・地域社会から信頼される技術情報源]
- (2) 社会に役立つ原子力技術の追求 [広く知見・経験に学び、学術・技術の向上を主導/成果の活用と普及を進め、地球環境保全、人類社会の持続的発展に寄与/次世代の研究者・技術者を育成・支援し技術継承]
- (3) 国際的な活動 [原子力平和利用の豊富な実績と、原子力事故の当事国となった経験から世界の原子力技術とその安全性向上に貢献/原子力平和利用と核セキュリティに対する国際的信頼の向上に努める]

理事会では、これら行動指針のもと、支部、部会、各種委員会と協力し、会員の皆様とともに本会活動の目的の成就をめざしています。

4. おわりに

CP-1 の跡地には、小さなモニュメントが建てられています。25 年前はシカゴ大学の運動場の片隅で目立たない所でしたが、最近では周りも綺麗に整備されたと聞きます。ご興味のある方は一度訪ねてはいかがでしょうか。

(理事 西野由高)