

巻頭言

- 1 福島からの教訓
—安全文化はボードルームでこそ生きて
いなくてはならない

レディー・バーバラ・ジャッジ

時論

- 3 東京電力は原発を大政奉還せよ!

とはいえ、原子力は安全保障、国防上の理由からも必要である。

田中伸男

Column

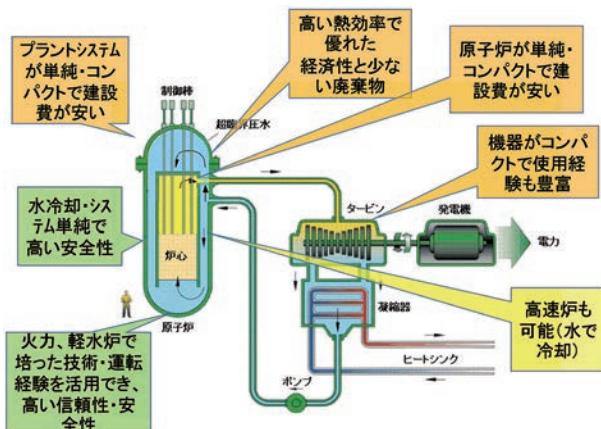
- 5 レッテル貼りの不毛 井内千穂
トランプ大統領の晩餐会 川口マーン恵美
もし、生まれ変わるなら… 北岡哲子
スロバキアと国際送電 妹尾優希
「仮置き」の安全目標を考える 竹内純子
現代の野蛮な国 渡辺 凜

連載講座 第4世代原子炉の開発動向 (第3回)

- 28 超臨界圧軽水冷却炉

超臨界圧軽水冷却炉は、プラントシステムの大幅な簡素化・小型化と発電効率を向上させることができる第四世代の軽水炉である。

山路哲史



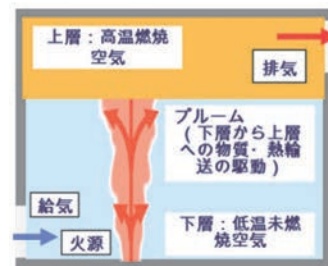
超臨界圧軽水冷却炉の特徴

解説

- 14 原子力区画火災における火災評価モデルの現状

原子力施設の火災 PRA において詳細な火災シナリオを設定する際には、施設特有の区画火災性状を対象とした合理的な火災評価モデルを適用することが重要である。

白井孝治, 田坂光司

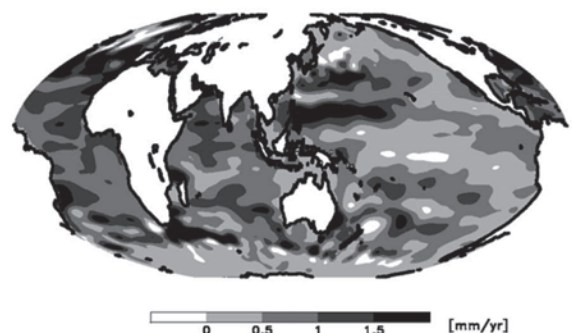


火災時の建物内空間内での熱的挙動

- 19 長期気候変動の再現と予測
—歴史的観測データと地球システムモデル

地球の気候はこの150年間で、どのように変動してきたか。これを再現する試みを紹介する。これにより気候変動メカニズムや気候予測可能性の理解を深め、数年から100年先の長期の気候予測精度を向上することができる。

石井正好



海水の熱膨張による水位トレンド

理事会だより

- 51 理事としての活動を通して

布目礼子

23 地政学的リスクとエネルギー 第6回（最終回） 世界秩序の行方と 原子力の役割

中国などの新興国の影響力拡大により、世界秩序は大きな変化に直面している。将来の地政学的緊張の高まりとそれに伴うエネルギー調達リスク上昇の可能性を長期的かつ大局的に認識した上で、エネルギーセキュリティ上での原子力の価値を冷静に理解することが重要である。

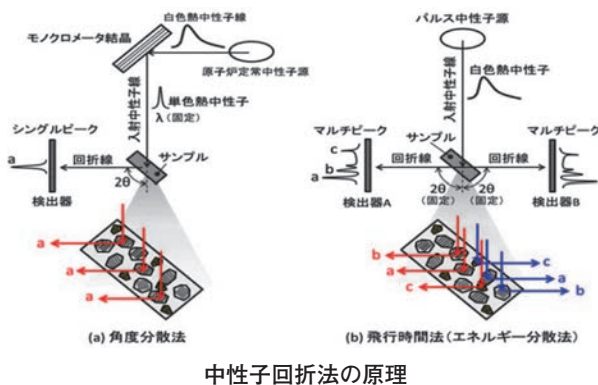
小宮山涼一

連載講座 原子力材料評価のための 最新ナノマイクロ分析技術の新展開（第2回）

33 中性子回折法による材料強度研究

中性子回折法は、数センチメートルオーダーの材料深部の応力・ひずみを非破壊で測定できる唯一の測定技術である。ここではひずみ測定原理などの基礎とそれを利用した最近の研究例について紹介する。

諸岡 聡, 鈴木裕士



報告

43 GLOBAL2017 国際会議の概要報告

高木直行, 山田基幸, 松村達郎,
飯塚政利, 藤田玲子, 川島正俊

47 ダイバーシティってなに？ ダイバーシティ推進委員会が行った アンケート調査結果から

吉田浩子, 吉橋幸子

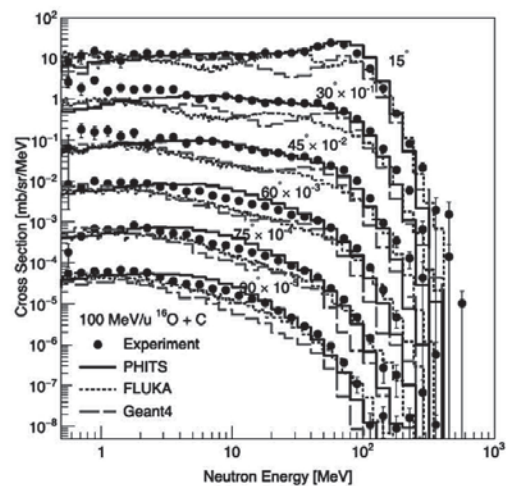
8 NEWS

- 学会, 司法判断や風評被害をテーマに
- 大飯3号機・玄海3号機が再稼働
- 原子力産業界が今夏に新組織
- 遮水壁完成し流入地下水は4分の1に
- 海外ニュース

連載講座 核データ研究の最前線（第7回）

38 高エネルギー領域への挑戦

高エネルギー領域の中中性子や照射損傷に関する核データの測定例と、国内で開発されている粒子・重イオン輸送計算コードPHITSの進展について概観する。
執行信寛, 岩瀬 広, 岩元洋介, 佐藤達彦



100 MeV/u 酸素を炭素標的に照射した時の
中性子 エネルギースペクトル

- 52 From Editors
- 53 会告 平成30年度新役員候補者投票のお願い
- 55 日本原子力学会「2018年秋の大会」発表および参加申込受付のご案内
- 57 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 主催行事, 共催行事, 新入会一覧, 2018年度会費請求お知らせ, メール配信サービスご案内, 英文論文誌 (Vol.55, No.5) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧
- 後付 第50回 (平成29年度) 日本原子力学会賞受賞概要

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/>

福島からの教訓

—安全文化はボードルームでこそ生きていなくてはならない



英国原子力公社元会長

Lady Barbara Judge (レディー・バーバラ・ジャッジ)

大英勳章第3位(CBE)受勲者で、英国原子力公社元会長。この他に東京電力原子力改革監視委員会の副委員長、ユニバーシティカレッジロンドン・エネルギー研究所理事長、英国ビジネス大使を歴任。

この5年間、私は東京電力の原子力改革監視委員会で副委員長を務める榮譽にあずかっています。この委員会は、福島事故の2年後に東京電力が採用した原子力安全改革プランの一環として設立されたもので、福島における復旧作業と東京電力が持つ他の2つの原子力発電所の活動に関して、東京電力の将来を正しい方向に導くことを目的としています。

改革プランの中心となる目標は、事故の一因となったと思われる問題のあった東京電力の安全文化を強化することです。そのため、委員会の監視は、東京電力が組織全体に新たな安全文化を築きあげる過程に大きく重点を置いてきました。

おそらく、最も広く使われている原子力安全文化の定義は、INPOが定めた3つのカテゴリー(安全に対する各人のコミットメント、安全に対する管理職のコミットメント、マネージメントシステム)の10の特性でしょう。ⁱしかし、どのような定義が使われようと、私は英国原子力公社の元会長および東京電力の原子力改革監視委員会の現職として、安全文化の「文化」の部分が非常に重要であるということ学びました。

例えば、福島第一原子力発電所は、設計時に安全への配慮が不足していた訳ではありません。立地、津波の歴史や、自然災害に対して十分な防御力があると思われる様々な方法など、広範囲にわたる分析が行われていました。足りなかったのは安全への配慮ではなく、むしろ、歴史的に前例のない津波や発電所内の全電源喪失などの、予期せぬ出来事が起こる可能性をもっと効果的に考慮する「問いかける姿勢」でした。この「問いかける姿勢」こそが、私たちが意味する「文化」、すなわち、クリエイティブ・シンキングの奨励、歴史データを越えた先を見る意欲、各人の言い出す仕組みなど、集団としての考え方、行動などの一連のふるまいです。

私たちが学んだ最も重要な教訓は、安全文化は第一線の作業員だけの問題ではないということです。安全に関する最も重要な判断は、現場ではなく経営幹部レベルのボードルームで行われます。経営幹部が積極的に安全文化を醸成しなければ、組織のどこにも安全文化を確立させることはできません。しかし、しばしば、

ⁱ「健全な原子力安全文化の特性」Rev. 1, INPO, April 2013年4月の7項。9項から詳細な特性と関連特性について具体的に書かれている。

経営幹部は自らの役割を財務と企業戦略に限定し、手遅れになってしまうまで、安全の問題は自らがとりあげるには低いレベルの問題だと考えてしまうのです。

経営幹部が陥りやすいこのような傾向を考慮して、原子力安全改革プランは、東京電力内に原子力安全監視室を設置し、取締役会に直接報告するようになりました。それにより、取締役会が安全を考慮して意思決定するために必要な安全情報を確実に手にすることができるようになりました。このように、取締役会レベルで安全にフォーカスすることは、東京電力の安全文化と、燃料取り出しや周辺の放射線レベルの低減などの福島第一原子力発電所における各種タスクの計画、実施、柏崎刈羽の再稼働に向けた取り組みに大きな影響を与えています。

この経験から、私たちは皆、いくつかの教訓を得ることができます。一つは、取締役会が強固な安全文化を構築し、継続的に再確認することの重要性であり、安全を単に現場の安全ポスターに委ねるだけでなく、全ての意思決定に必要な不可欠な存在にすることです。

二つめの教訓は、現状に満足しないよう警戒することです。強固な安全文化を苦労して構築した後は、新しい文化が自動的に継続するものだと思込みがちですが、実際には、保護膜は少しずつ剥がれ落ちていき、ある時、何か失敗が起こるのです。安全文化に耐久性を持たせるためには、シミュレーションや訓練で繰り返しストレステストを実施するとともに、従業員に権限を与え、彼らが批判的に考えるようなチャレンジを続けていかなければなりません。

三つめは、全ての文化がコミュニケーションを通じて構築され、伝達され、維持されるということ覚えておく必要があるということです。社内的には、全てのレベルのスタッフが、安全上の懸念を自由に伝えることができなくてはならず、そのためのスキルやルートが必要になります。経営幹部が安全に優先付けをしているということは、発言や書面で、また視覚的に、象徴的に、そして最も重要なのは実例をあげて、継続的に伝えていかなければなりません。対外的には、会社の安全文化を、タイムリーで、正確で、理解しやすく、魅力的なコンテンツを使って、懐疑的な大衆や規制機関に伝えていかなければなりません。

英国原子力公社の元会長として、私は、これらの教訓が原子力コミュニティー内外の取締役会にとっても有効であると、ある程度、自信をもって言うことができます。東京電力の取り組みは、自社の将来だけでなく、他の多数の組織の将来についても意味のある経験を与え続けてくれることでしょう。



東京電力は原発を大政奉還せよ！



田中 伸男 (たなか・のぶお)

笹川平和財団会長

1973 通商産業省入省, OECD 科学技術産業局長, 在米日本国大使館公使, 経済産業省通商機構部長などを経て 2007 年国際エネルギー機関 (IEA) 事務局長。東京大学公共政策大学院客員教授, 帝人社外監査役, 千代田化工建設社外取締役などを兼任。

国際エネルギー機関 (IEA) が去年発表した「世界エネルギー見通し 2017」は四つの革命的な変化がエネルギー分野で起こりつつあるという。第一が北米のシェール革命。これで米国はダントツの石油ガス大国になる。第二がソーラー革命。これには驚いたが太陽光発電のコストが毎年急速に下がっており、まもなく電源中で最も安くなるという。第三が中国の緑色革命。習近平の号令で北京の空は真っ青になりマスクをしている人もいなくなった。石炭から天然ガスへの転換を進めたためだ。第四が電化革命。低炭素の電源を使って電気自動車, デジタル化, AI, バッテリーが中心の社会が生まれる。これらの四つの革命の内三つは中国で起こりつつある。2000 年代前半に中国が産業化を進める中で大量に石炭や石油を使う一方で供給が間に合わず石油価格が 100 ドルを超えて上昇する時代が来たが, 今回はエネルギー消費大国とは質の違うグリーンな中国が引き起こすエネルギー革命である。すでに中国での石炭消費はピークを打ったと言われる。これに変わってよりクリーンなガスを大量に使う経済になる。今は日本が最大の液化天然ガス (LNG) 輸入国だがまもなく中国に取って代わられる。今から 2040 年までの中国の電力消費増分は現在のアメリカの消費量に匹敵する。その電気の八割が太陽光や風力などの自然エネルギーによる。太陽光のコストは急速に下げており kWh あたり 2 セントを切るものが始まっている。バッテリーのコストを加えても 3 円代のものまでである。この傾向は世界中でますます強まるだろう。中国が大量の電気自動車を作り, ライドシェアしてそのバッテリーを AI 利用で電力の貯蔵システムにするのは

間違いない。今やスマホ利用サービスやフィンテックなど AI を使うデジタル化のリーダーになりつつある中国だ。安い自然エネルギーが中国の持続可能性と経済成長の鍵となる。RE100 という再生エネルギー (RE) 100% を標榜する世界企業集団 122 社にはアップル, グーグル, フェイスブック, マイクロソフトだけでなく GM, BMW や名だたる銀行が名を連ねる。これらが自らのサプライチェーンにも RE100 を要求をし始めれば中国企業も動く。世界的企業が競い合っ安自然エネルギーを使うときに石炭の電気を使う企業が生き残れるだろうか? また電力コストが高い国はデジタル化で電力を大量に消費するサービス競争にも負けてしまう。

ではもう一つの低炭素エネルギーである原子力はどうか。中国における電源の建設コスト比較を見れば大型軽水炉による原子力発電は競争力を無くしており将来は暗いと言わざるを得ない。1970 年代にベースロードとして登場した大型軽水炉は安全で安くクリーンな電源であることを売りにして来たが東京電力福島第一原子力発電所の事故によって安全性とクリーンさに疑義が付き, 安

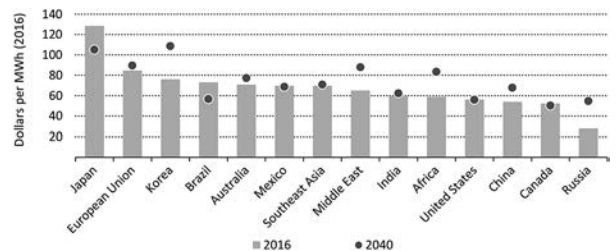


図2 各国の発電コスト見通し (国際エネルギー機関の WEO2017 から)

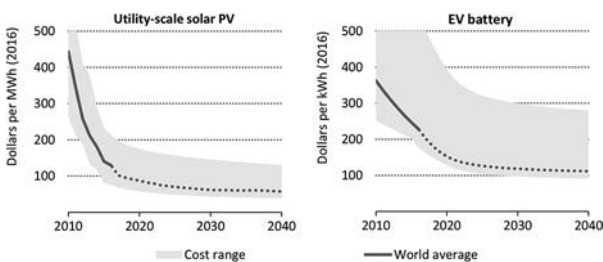


図1 太陽光発電とバッテリーのコスト低減見通し (国際エネルギー機関の WEO2017 から)

表1 中国の電源建設単価比較 (円/W)

	2013	2014	2015	2016
石炭 (USC)	53	55	61	52
水力	154	198	219	179
原子力	241	209	351	313
風力	123	128	147	126
太陽光	145	148	166	137

JEPIC 海外電力調査会 / China Federation of Power Company

いガスや太陽光の出現でコスト競争にも負けてしまいそう。これは世界中で起こっている。東芝の子会社であった原発の老舗ウェスチングハウス社が倒産したのも安全コストが上がる中でシェールガスとの競争に敗れたことにある。英国が建設中の原発ヒンクリーポイントCは中国とフランスが建設を請け負うが92.5ポンド/MWh(14円/kWh)という高い買取価格が付いている。この高負担はBREXITで悩む英国は続けられそうもない。中国は2020年までに20GWの原発を建設中である。これらは完成させるだろうがそれ以上建てるかはわからない。むしろ安い風力太陽光を北西部から直流高圧送電網で運んで来た方が安いと考えているようだ。安くしてクリーンな電源を求める大企業を支援するのに無理に高コストな大型軽水炉建設を継続する必要はないように思える。中国国家電網が主導するグローバルエネルギーインターコネクション構想も国内送電網を周辺国と連携してより広い範囲の市場を作り、変動と価格の乱高下を抑えようと言う電力版一帯一路の企てと考えれば合点が行く。モンゴルから風力で発電された電気を日本に運ぶソフトバンクの構想があるが中国韓国を経由しても日本着6円/kWhと言う。シベリアの水力なら5円/kWhである。日本国内の新設軽水炉の発電コストである約10円/kWhよりはるかに安い。海外から安い電力を輸入する時代がもうそこまで来ている。国内での発電にこだわると高い発電コストが工業品やサービスの高コストを招き国際競争力の低下を招く。今でも日本は世界一発電コストが高いのである。どうしたら安い太陽光や風力をもっと使えるか？使う意欲のある送電会社を作ればよい。現在の地域独占型電力体制は電気の安定供給を実現したが結果として大型軽水炉や石炭、ガス発電などの大型施設を活用した集中型システムを作った。再生エネルギーは分散型である。その変動を吸収するため現在東西で50ヘルツと60ヘルツに周波数が分断されたシステムを改め日本全国を一つの卸電力市場にすることが望ましい。東京電力は福島原発事故を起こし国民の信頼を失った。7年経ってもその状態は変わらない。もはや軽水炉は政府にお返しして全国唯一の送電会社になるべきだろう。私はこれを原発の大政奉還と呼ぶ。政治も役所も東電に責任を押し付けて原子力の未来を考えようとしなかった。完全な発電分離を実現し関電、原電を中心とした原子力発電会社、東電と中電が作ったJERAが火力会社、などと様々な発電会社が風力や太陽光会社と競争する市場ができる。また韓国やロシアと送電線を結べば送電会社東電は安い電力を自由に輸入できるだろう。また余った電力を売る道も開かれる。欧州の電力会社はEUの電力市場が連係する中で隣国へ出て競争し強くなった。日本の電力にも地方の殿様はやめてアジアの広

い市場で競争してもらいたい。グリッドの連係こそ日中韓の首脳会議や日露首脳会議で議論するのにふさわしいテーマだろう。また廃炉処理を分離し送電会社東電が発電会社に平等にフィーをかけて福島の除染廃炉の費用を調達することができる。発電電分離後の新東電の株価は上がり政府に借金を返せるだろう。

原子力に生き残る道はあるのか。Yes。大型軽水炉をベースロードとして使うのとは違う道がある。原子力は安全保障、国防上の理由からも必要である。広島長崎を経験した日本は核兵器を持つつもりは毛頭ないが北朝鮮の核ミサイルが頭上を飛ぶ時代に核能力を放棄することは彼の国からなめられることになる。また軽水炉からすでに生まれた使用済み燃料や福島の溶けた燃料デブリを処理し毒性を落とすため燃やす原子力のゴミ処理炉は必要である。この技術は米国が開発した小型の統合型高速炉(IFR)と乾式再処理施設である。受動的安全性が証明され、核不拡散性が高く、最終的なゴミは六ヶ所の高レベル廃棄物が地層処分して10万年置かねば天然ウラン並みに毒性が落ちないのに対し300年ですむ。福島のデブリ処理のためにこの施設を建てるFSをやったが2,000億円で施設はできる。福島県のある学校でこの話をしたところそんな技術があるならぜひやってほしいと言われた。福島県民は7年を経て現実的に何ができるのか前向きに考えている。政府や政治家は勇気を持って原子力の将来を説明すべきときだろう。この炉の実験が成功すれば軽水炉のある地方にも建てて使用済燃料を燃やし300年のゴミに変えれば良い。捨てる場所も原発の側に見つけやすくなるはずだ。これこそ地産地消型の原子力だ。この小型炉は出力調整が頻繁にできるという特徴を持つ、まさに変動する風力太陽光と共存できる夢の原子力だ。原子炉建設コストを下げるためには同じデザインの炉を包括的ライセンスを前提にたくさん建てる必要があるが、工場生産型小型炉(SMR)の狙いはそこだ。それが実証されれば新しい原子力のパラダイムが生まれる。大型軽水炉を卒業し次世代の小型炉を日米で協力して開発すれば世界のエネルギーと核平和利用に貢献できる。日米原子力協定は今年の7月に自動延長されそうだが、日米協力で福島のデブリ処理を実現し、新しい原子力パラダイムを作れば今後原子力を使いたい途上国のモデルにもなる。韓国が統合型高速炉(IFR)を米国と共同開発している。日米韓三ヶ国の協力を原子力平和利用の世界でやってみせるのが北朝鮮に対する我々の回答にもなる。このようなグローバルかつ包括的エネルギー戦略を政府は考えるべきだが、まずは東京電力による原発の大政奉還が日本のエネルギー維新への道を開くだろう。

(2018年3月3日記)

レッテル貼りの不毛

フリージャーナリスト 井内 千穂

「推進派」「反対派」というレッテル貼りのメリットは何だろう？話す相手を間違えずに徒党を組めることだろうか？

もとより徒党を組むのが苦手でもこの「派」にも属している気がしないし、専門知識を欠いた素人に過ぎないことも重々承知の上だが、「原子力」をめぐる問題がどうなっているのかを知りたい一心であちこちに出かけては話を聞いている。

推進派が集結した大会では「原子力なくしてこの国は立ち行かぬ」と氣勢を上げていた。福島第一原発の事故などなかったかのような雰囲気だ。一方、地層処分に対する集会では、そもそもこのような放射性廃棄物をもたらす原子力発電を始めたこと自体が誤りだったと言っていた。戦後から今日までの日本の歩みは政府と原子力ムラによる陰謀であったようだ。

「え？そうなの？」と思いながら、とりあえず口を挟まずに耳を傾ける中で、いつも感じるのは、その場がその「派」の論調で固められる異様さである。その場を支配する意見に反対する陣営は不在であるか、「個人の立場」でひっそり参加して沈黙している。発言者はその場にはいない反対陣営を非難しながら持論を展開し、集まった同志たちがしきりにうなづく。

真っ向から対立する考え方を持つ人々が意見を交わすのは、そもそも無理なのか、時間の無駄なのだろうか？そのような場があれば参加してみたいものだ。たとえ喧嘩のような激論になろうとも、互いの遠吠えよりはましだろう。そして、個々のレッテルを剥しながら話してみたい。

Column

トランプ大統領の晩餐会

作家 川口マーン 恵美

1月25日、トランプ米大統領がスイスのダボス会議にやってきた。到着した夜、さっそくヨーロッパの選り抜きトップマネージャー15人を招いて晩餐会。大統領の右隣にはドイツ最大(世界4位)のソフトウェア企業SAP社、そして左隣はシーメンス社。背景には星条旗がたくさん並んでいる。

このときのシーメンスのCEO、ケーザー氏の発言がドイツで大響響を買った。「税制改革おめでとう」でやめておけばよかったのに、「だから我々は次世代のガスタービンの開発はアメリカであることを決定しました」。トランプ大統領は That's very big, fantastic! と大満足。二人は熱い握手。

(<https://www.youtube.com/watch?v=7k6SEJvnGk4&t=183s> 上記の場面は1分30秒より)。

実は、ドイツ各地のシーメンスの工場では、去年よりリストラの嵐が吹き荒れている。とくにガスタービンの工場閉鎖が宣告されたゲルリッツ市では、連日、悲痛な表情の従業員が抗議デモを繰り広げていた。

ドイツでは produce & forget の再エネが増えすぎて、ガス発電の採算が取れない。だからバイエルン州のハイテクガス火力(イルシング4,5号機)もほぼ新品のまま止まっており、シーメンスがこれから国内で大型ガスタービンを製造するモチベーションは極めて低い。

そこで需要のあるアメリカで、Duke Energy社と合併でHL-Classの新技术を開発するという。経営方針としてはまことに正しいが、それをカメラの前で、しかも抜群に悪いタイミングでしゃべってしまったことは大失敗だった。「トランプにおもねるシーメンス」のイメージダウンは取り返しがつかない。

とはいえ本来なら、シーメンスを攻め立て、大企業の社会的責任を問う前に、無謀な再エネ促進でこういう矛盾した状況を作ってしまったドイツ政府の責任が、まず問われるべきだと思うのだが…。

もし、生まれ変わるなら…

日本文理大学 工学部 北岡 哲子
特任教授

八岐大蛇(ヤマタノオロチ)は、8つの頭と8本の尾をもつ伝説の巨大生物で、誰も制御できない。しかし、須佐之男命(スサノヲノミコト)は生贄に選ばれた美しい櫛名田比売(クシナダヒメ)を救うため、オロチ退治を買って出る。古事記・日本書紀に描かれ誰もが知る神話である。

約20年前、ある有名な占い師に、「あなたは、クシナダヒメの生まれ変わりだ、即、出雲の八重垣神社にいきなさい!」と力説され、信じたわけではないが好奇心から、早速出雲を訪れた。

日本最古の和歌に詠まれている「八重垣神社」は、クシナダヒメと、ヒメを櫛に変え髪の毛に隠し闘ったスサノヲの2人を祭っており、その際立つ愛情と神秘性に相応しく縁結びの神であった。境内奥にはクシナダが身を隠していた「鏡の池」がある。現在はなんと、恋占いのスポットと化し、占い方法は専用の半紙にコインを乗せて池に浮かべ、沈む速度が速いと縁が早いと解釈する。

先日、思うところがあり「キュリー夫人」を再読した。もしも、この女性初ノーベル賞受賞研究者とラインが繋がるなら、きいてみたい。ポロニウム、ラジウムなどの放射性物質の発見をもとに、後世の研究者たちが生み出した大きな技術は想定内か。人体への影響を認めなかった理由は?等々。

そういえば、スサノヲは強い酒で満たした8個の甕を準備し、オロチを酔わせてから退治した。とてつもなく巨大な力を制御するには、多角的な分析と、視点をかえる知恵と、制御の先にみえる大切な存在への強い思いが必須になるようだ。

それにしてもあの時、もしマリ・キュリーの生まれ変わりだといわれていたら、私は出雲ではなく、東海村へ急いだに違いない。

Column

スロバキアと国際送電

コメニウス大学 妹尾 優希
医学部英語コース

スロバキアよりこんにちは。今回は、エネルギーの輸入依存度が高いスロバキアのエネルギー政策が、「脱ロシア」を目指し、その対策の一つとして国境を超えた送電網が注目を集めている、というところまでお話ししました。

日本では、昨年12月から大手の電力会社4社が連携して、電力融通に向けて地域を超えた市場設置を計画し、話題となっています。欧州では、地続きで繋がる国間での送電網が古くから存在し、2002年頃からさらに広げる動きが見られます。また2011年には、潮の流れを用いて発電をする「ブルーエネルギー」を取り入れ、高圧の海底直流送電線で英国、ノルウェー、デンマークなど10カ国を結ぶ「スーパーグリッド」の建設を目指す事が発表されました。

スロバキアの国際送電の歴史も古く、チェコと共同でノヴェ・ザームキ市とキシュグマンド市を繋ぐ送電網のオペレーションが1952年に運用されたのが始まりです。現在、スロバキアでは8本の超高電圧送電網と、2本の高電圧送電網が、チェコ、ポーランド、ウクライナとハンガリーに繋がれています。主な輸入先の国はチェコで、年間の国際送電網による輸入量のうち6割から7割をソコロニツェ市から受取っています。反対に、主な送電輸出先はハンガリーで、モホフチェ原子力発電所の所在地であるレヴィス市から送電をしています。送電網ネットワークは、一度稼働してしまうと調整が難しい原子力発電を上手くカバーできるという利点があります。それと同時に、建設費が高額である事や、経済レベルが異なる地域を巻き込む事で、収益格差が生まれやすいという欠点も持ち合わせており、国家間の交渉力や良好な関係の構築が求められるという側面も見逃せません。

「仮置き」の安全目標を考える

国際環境経済研究所
理事・主席研究員 竹内 純子

昨年上梓した「原発は“安全”か—たった一人の福島事故報告書」の執筆にあたり、全国の原子力施設の安全対策を見て回った。実際に拝見すると、「ここまでやっているのか」と驚嘆せざるを得なかったことも多い。しかし、原子力安全の全体を見ると、残念ながら「まだこんな段階なのか」と思うこともある。

素人ながら不思議なのは、福島第一原子力発電所事故から既に7年が経過しようとしているのに、未だに安全目標は「仮置き」の存在であることだ。本来事故後関係者から“How safe is safe enough?”の問いかけが沸き起こるはずではなかったのか。規制組織の体系や具体的な規制基準を改正する前に、行われるべき議論だったのではないか。

原子力発電の利用に伴うメリットとリスクの程度とを比較衡量し、社会は技術の利用を継続するかどうかを判断しなくてはならない。福島第一原子力発電所事故を経験した今、社会が「引き受けてもよい」と考えるリスクの程度を議論するならば、安全目標の議論は避けて通れないはずだ。また、原子力関係者が国民に対して、自分たちの目指すところはリスクゼロではなく、リスクをうまくやりくりしながらその便益を提供することであると伝えるには、やはり安全目標の策定が必要であろう。その議論が仮置きのみである現状は、距離を決めないマラソンを走っているようにも見える。それでは現場が疲弊してしまい、自主的な安全性向上の取り組みを活発化させることもできないのではないか。

安全目標に関する議論が難物であることは私のような素人でもわかる。しかしここから逃げないことが、福島第一原子力発電所事故を経験した原子力関係者の責任ではないだろうか。

Column

現代の野蛮な国

東京大学大学院工学系
研究科原子力国際専攻 渡辺 凜

目覚めたときに「未開の地」で人間に囲まれていたら、何が怖いのか。

本当に怖いのは、その人々にルールや合理性が欠けていること、ではない。彼らが疑いもなく彼らのルールに基づいて自分のことを判断してくること、である。悪魔の化身、あるいは神の賜物と断定して行くことが怖いのだ。

「野蛮である」というのは、ルールがないことではなく、自分たちのルールの適用限界を知らないことだ。もし冒頭の未開人たちが「村人なら処刑だが、この人はよそ者だから例外かな」と相談していたら、話が通じるかもしれない、とほっとするだろう。

そもそも「野蛮か否か」という問題は、「自分たち」と「自分たち以外の何か/誰か」が出会ったときに生じる。そのような場で、自分たちの見方の限界を認識することは、「自分たち以外の何か」の存在を認めることである。自分たちと異なる存在とその場を共有していることを認識できる、ということ。これが「野蛮でない」ということだと思ふ。

翻って現代はどうか。貧困や病気、家庭の問題を自己責任で片づける論調は「野蛮」の一例として挙げたい。あるいは、科学的、合理的な意思決定を目指すあまり、科学や論理の限界、異なる問題の捉え方の並存を許容できないとすれば、それも「野蛮」だろう。

ルールや秩序は結構だが、適用範囲に限りのある物で、神や大自然に由来する自然で普遍的な秩序は存在しない。むしろ、自然で普遍的なのは、一人ひとりの自由に生きる権利の方である、というのが自然権の発想だ。自然権を基調とする近代政治の出発点は、自ら作ったルールに呑み込まれないよう、

その限界を認識することにある。



学会、春の年会で司法判断や風評被害をテーマに議論

原子力学会は3月26～28日に大阪大学で春の年会を開催した。

広島高裁による伊方仮処分をテーマにした特別セッションでは、四国電力の瀧川重理登氏が仮処分決定の根拠となった火山の影響について、「9万年前に起こった阿蘇の噴火は過去260万年間で最大規模の噴火であり、発電所の運用期間中に同様の規模の噴火が起こる可能性は十分小さい」と述べた。中央大学の安念潤司氏は、「大規模な火山の噴火が起こる可能性の予見については不確実性が高い。その中で、『その可能性が十分小さいという根拠を示せ』というのが今回の広島高裁の考えで、それによって運転停止を求める決定となっている。逆に運転停止を求めている松山地裁や福岡高裁宮崎支部の判断の根底には、『その可能性が十分小さいとは言えない根拠を示せ』という考えがある。また、規制における火山噴火の影響評価については設置許可基準規則ではなく内規である火山ガイドで初めて具体的な規制数値ができており、そこには明確性が求められる」として、現状の火山ガイドの曖昧さを指摘した。神戸大学の鈴木圭子氏は、「3万年前に鹿児島湾北部で発生したカルデラを形成するほどの大噴火では、火山灰が日本中を覆った。この

ような噴火現象はこの日本で、100年に1%の確率で発生する」と述べた。

「福島復興に向けた風評被害への対応」をテーマにしたセッションでは、関西大学の土田昭司氏が「放射線被ばくによる健康被害には不確実性が残るため、知識による効果には限界がある。風評被害を止めるには、風評の加害者が被害に苦しむ被害者の視点をもって被害の深刻さを理解すること。福島への助けになりたいとする福島に対する肯定的共感をもつことが、福島の風評被害に対する解決につながる」と述べた。藤田保健衛生大学の下道國氏は、情報を受け取る側が理性的に行動することと、メディアが専門知と市民とのつなぐために、事態の正確な伝達と知識の理解促進を図る役割を果たすことを訴えた。千葉大学の神里達博氏は、「通常の風評被害は発生源の処理への対応が終了することで沈静化することが多い。しかし今回の場合はいまだに廃炉が収束せず、避難が続いていることが、解決を難しくさせている。また、この問題の根底には、供給力の豊さという今の日本のありようが関わっている」と分析した。

(原子力学会誌編集委員会、以下同じ)

大飯3号機と玄海3号機が再稼働、伊方2号機は廃炉へ

関西電力の大飯発電所3号機が3月16日に、九州電力の玄海3号機が3月25日に発電を開始した。これにより新規基準下での再稼働は九州電力の川内1、2号

機、四国電力の伊方3号機(仮処分で停止中)、関西電力の高浜3、4号機に続く6、7基目となった。また、四国電力は3月27日、伊方発電所2号機の廃止を決めた。

原子力産業界が夏に新組織、規制当局との対話めざす

電気事業連合会と日本電機工業会は3月16日、原子力の安全性に関して原子力産業界として取り組むべき課題を整理し、総括する新組織を設置するための準備室を4月に設置すると発表した。新組織自体は夏に設立する。

新組織には電力会社やメーカー、JANSI、原産協会、電中研などが参加。原子力産業界全体の知見・リソースを効果的に活用し、規制当局とも対話を行いながら効果ある対策を立案し、原子力事業者の現場への導入を促す。

陸側遮水壁完成で流入する地下水は4分の1に減少

廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議の下に設置された廃炉・汚染水対策チームは3月1日、福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた中長期ロードマップについて、直

近の進捗状況をまとめた。3号機では使用済燃料プールからの燃料取り出しの準備のための全ドーム屋根の設置が完了し、2018年度中ごろに取り出しを開始する予定。

1, 2号機は2023年度目処で、4号機はすでに完了している。燃料デブリ取り出し方法は2019年度に確定する。

また、建屋内に流れ込む地下水の量を減らすために陸側の遮水壁を設けたことにより、雨水と地下水に起因す

る汚染水の発生量は一日当たり490立方メートルから110立方メートルまで低減した。1~4号機の処理水などを収めたタンクは計850基。2018年3月時点での一日あたりの作業員は平均で4,560人と推定している。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

昨年秋の欧州各地でのルテニウム検出について調査開始

昨年秋、人工放射性核種であるルテニウム106(Ru-106)が欧州広域の大気中から検出された案件について、独立した立場の専門家で構成される国際科学委員会は2月1日、発生地点の特定には至っていないものの医学利用分野によるものが原因ではないこと、および住民への健康影響はないなどとする暫定結果を公表した。

同委はこの件に関する詳細調査を行うため、ロシア科学アカデミー原子力安全研究所(IBRAE)のイニシアチブに基づき、昨年12月に設置されていた。1月31日にモスクワのIBRAEで開催された第1回会合の結論を明らかにしたもので、今後はデータをさらに収集・検証し、統一データベースを構築する必要があると指摘。4月に再びモスクワで、第2回会合を開催予定であるとしている。

欧州東部や南東部の国々でRu-106が検出されたのは2017年9月下旬~10月初旬のことで、フランス放射線防護原子力安全研究所(IRSN)は10月4日、欧州域内の放射能汚染モニタリング・ネットワークからの情報として、オーストリア、ノルウェー、スイスで少量・極低レベルのRu-106が検出されたと発表。仏国内2地点の計測結果も同様だったが、いずれにおいても環境や住民に対する影響はないとの認識を表明した。

また、11月21日になると、ロシアの水文気象環境監視局(ROSHYDROMET)が9月~10月にロシア国内で実施したRu-106の計測結果を公表。マヤク再処理施設などが立地するウラル地方南部のチェリャビンスク州が発生地点である可能性を示唆していた。

IBRAEの国際科学委員会は、原子力安全や緊急時対応関係の科学者や専門家で構成されており、フランス、ロシア、フィンランド、スウェーデン、ドイツ、ノルウェー、英国から参加。第1回会合では、これまでに各国で得られた情報や調査結果について議論した結果、以下のような結論を導き出した。

(1) 欧州各国とロシアにおける計測結果に基づき、9

月末~10月初旬に大気中に含まれていたRu-106の総量は最大で100TBqと見積もった。

(2) 入手可能なデータで見ると、住民の健康に影響がおよぶ可能性はない。

(3) 現時点では不確定要素が多すぎるため、発生地点について結論を出すことは出来ないが、各国で実施したモデリング計算の結果は一致している。

(4) いくつかの国ではルテニウム103が検出されており、106と103の比率は使用済燃料のものと同じである。

(5) 当委としては、統一データベースの構築とデータの評価を行うため、入手可能なデータすべてを収集・検証する必要がある。また、ROSHYDROMETには、現地の気象条件データと降水量に関する追加データの提出を要請する必要がある。

(6) Ru-106が検出されたチェリャビンスク州の複数地点において、上昇風が吹いた方向を追加で計測する必要がある。また、最も高い値が検出されたというルーマニアの計測結果が得られれば、さらに有益と考える。

(7) 医療用Ru-106が起源であるとの仮説は除外できる。

(8) ROSHYDROMETによると、チェリャビンスク州では9月末頃に下降気流独特の大気現象が観測されており、こうしたデータをさらに考慮すべきである。

(9) 当委としては、2017年8月から11月にかけて、ロシア連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)がマヤク施設、および隣接するウリヤノフスク州の国立原子炉科学研究所(NIIAR)で査察を実施し、通常の技術プロセスからの逸脱は見られなかったとしている点に注目している。

(10) 当委としては調査状況に関する透明性に配慮し、調査結果と結論を公開することで合意している。

【米国】

30年ぶりの新設計画、現行日程より7か月前倒しに

米国で約30年ぶりの新設原子炉としてA. W. ボーグル3, 4号機(各110万kWのPWR)を建設中の

ジョージア・パワー社(GPC)は2月28日、「ボーグル建設監督(VCM)報告書」の最新版をジョージア州公益事業委員会(GPSC)に提出した。

同プロジェクトでは昨年3月、エンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約を請け負っていたウェスチングハウス(WH)社が連邦倒産法の適用を申請。一時は継続が危ぶまれる事態となったが、VCM報告書の中でGPCは、過去半年間に同プロジェクトでは明るい動きが複数見られ、顧客に対して様々な利益や経費節減をもたらせる状況になったとした。また、現場で敷いた新しい管理体制により生産性が改善されたと報告。建設工事が円滑に進展しているため、両炉の完成も現行日程からそれぞれ7か月前倒しとなる可能性を提示している。

VCM報告書はプロジェクトの主要オーナーである同社が半年毎に提出しており、今回の第18版は、昨年12月にGPSCが同プロジェクトの継続提案を全会一致で承認して以降、最初のものとなる。それによると、同社はプロジェクトの開始当初から、電気料金への影響を最小限に留めることを含め、顧客に提供可能と思われる利益をあらゆる側面で追求してきた。当初予測では同社は、この増設計画が顧客の電気料金に及ぼす影響を最大約12%としていたが、最新のVCM報告書ではこれが9.8%と大幅に削減されたとした。

GPCはまた、現場の作業に関する報告の中で、2017年後半はサザン・ニュークリア社が全体的なプロジェクト管理をWH社から引き継ぐ一方、日々の作業管理はベクトル社が担当していると説明した。3、4号機の現行の完成日程はそれぞれ、2021年11月と2022年11月に変わらないものの、建設サイトの生産性向上により、それぞれ2021年4月と2022年4月に早まる可能性があるとしている。

具体的な実施作業としては、3号機で蒸気発生器や加圧器といった大型機器、4号機ではCA02やCA03などの大型モジュールの据付が完了。後続の作業用に、4号機の静的余熱除去熱交換器や炉内構造物もサイトに搬入した。GPCはさらに、建設中止が決定したV. C. サマー2、3号機のために訓練されていた運転員14名を、新たに雇い入れた事実に言及。すでに免許取得済みの運転員であるため、訓練に要する約2年の時間とコストが軽減されたと強調している。

エネ省、10年間で中東の原子力容量は4倍に拡大と予測

米エネルギー省(DOE)の独立統計分析機関であるエネルギー情報局(EIA)は3月5日、中東地域における原子力設備容量について将来予測の分析結果を公表し、

2018年現在の容量360万kWが2028年までに約4倍の1,410万kWまで拡大するとの見通しを示した。

当該地域で新規の原子力発電所建設工事が始まったことや、原子炉メーカーとの間で新たな建設契約が結ばれつつあることを根拠として指摘。アラブ首長国連邦(UAE)では2020年までに540万kWが設置予定であることから、同地域の短期的な原子力成長を牽引すると分析している。

EIAによると、中東地域の原子力発電が拡大傾向にある主な原因は、化石燃料への依存削減によりエネルギー供給保証の強化を目指す国々の存在。2017年に同地域では発電電力量の97%を化石燃料に依存しており、内訳は天然ガスの約66%と石油の約31%だった。残りの3%は原子力や水力、およびその他の再生可能エネルギーによる発電電力となっている。

中東諸国はまた、人口の増加と経済成長にともない拡大する電力需要量を満たすために原子力発電の導入を選択。同地域における2017年の総発電量は1兆kWhを超えていたが、EIAは「国際エネルギー予測」の最新版で、電力需要が2028年までに30%増加すると予測した。この成長率は、同じ時期の世界平均増加率である18%を上回るとともに、非OECD諸国の増加率24%よりも高くなっている点を強調した。

中東で進展中の主な原子力発電所建設計画について、EIAは国別に分析している。

イラン：ブシェール原子力発電所で、II期工事の2基(2、3号機)に関する準備工事を実施中。2026年に両機が完成すれば、約180万kWの設備容量が追加される。2011年に営業運転を開始した出力100万kWの1号機は、中東地域初の商業用原子力発電所となり、年間590万kWhの電力を供給している。

UAE：バラカ原子力発電所として4基の原子炉を並行して建設中で、2020年末までにすべて完成する予定。2012年に本格着工した1号機は2017年後半にほぼ完成し、2018年半ばまでに送電を開始することになっている。

トルコ：地中海沿岸のアククユで、2017年末から部分的建設許可に基づく建設工事を開始した。4基・480万kWの原子炉建設を予定しており、2025年までに1号機が完成する計画である。

サウジアラビア：2018年末までに最初の2基・280万kW分に関して、エンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約の発注先を決定する計画。このため、担当機関は2017年11月、米国、韓国、仏国、ロシア、中国の大手原子炉メーカー5社と入札条件等に関する協議を実施した。カタールやバーレーンとの国境に近いウム・フワイドカコワ・デュワイインのいずれかで、2021年頃に着工する見通しである。

ヨルダン：2基・200万kWの原子炉を導入するため、ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社と2016年からフィージビリティ調査を行っている。2017年初頭には、タービン・電気系統について入札を実施しており、2019年の着工と2024年の完成を目指している。

【カナダ】

政府、SMR 開発で戦略ロードマップに着手

カナダ天然資源省は2月22日、次世代原子炉技術である小型モジュール炉(SMR)をカナダ国内で開発利用するのみならず、将来的には世界のSMR市場でリーダーの立場を獲得することを目標に、戦略ロードマップの作成を開始すると発表した。

送電網につながずに利用する場合も含めてSMRの適用可能性を探り、開発と建設にともなう優先事項や課題について、関心を持つ州政府や準州政府、エネルギー事業者といった関係者の理解を深めるのが目的。同省のエネルギー革新技術プログラムの下、カナダ原子力協会が中心となって作業を進め、今年の秋にはロードマップを完成させる計画だ。

天然資源省の発表によると、過去60年以上にわたってカナダの原子力開発利用を支えてきた原子力産業は、技術革新や雇用創出、低炭素エネルギーの重要な供給源。次世代の原子炉技術は、カナダ国民が低炭素経済におけるエネルギー需要を満たしつつ、一層クリーンかつ安全な社会を構築する一助になるとした。

同省はまた、カナダが将来的に低炭素な経済・社会に移行するにあたり、温室効果ガスの排出抑制目標をどのように達成し、エネルギーの適正価格を維持していきたいか、全国各地のカナダ国民38万人以上を対象とする対話を昨年4月から実施していた事実にも言及した。結果として、SMRのような新技術に関する重要判断を下す際、指針となるようなカナダ全体のアプローチを国民が原子力について望んでいることが判明したと指摘。カナダが今後も低炭素経済に向けて、クリーン・エネルギー開発や技術革新、エネルギー供給保証を推進していく方針であることを明らかにした。

ロードマップの作成においては、最終的に重要パートナーすべての参加を可能にする計画で、製造業者や研究者、放射性廃棄物管理事業者のほか、カナダ原子力安全委員会(CNSC)が加わるとした。それぞれのこれまでの知見に基づいたロードマップにより、技術改革を促進し、産業界の長期的ビジョンを構築。様々なSMR技術の特性のみならず、カナダ独自の優先事項やユーザー要件に対する適合性も評価するとしている。

カナダではカナダ原子力研究所(CNL)が昨年4月、今後10年間の「長期戦略」の中で、2026年までにオンタリオ州にあるCNLのチョークリバー・サイトでSMRを建設するとの意欲的な目標を提示。同年8月には、カナダ国内のSMR開発と商業化にCNLが果たす役割について、70以上の企業・組織から関心表明があり、このうち15件以上がCNLサイト内におけるSMR原型炉、あるいは実証炉建設に関するものであったことを明らかにした。

【英国】

政府、民生用原子力部門に対するBrexitの影響について見解

英国議会下院のビジネス・エネルギー・産業戦略委員会は3月8日、欧州連合(EU)からの離脱(Brexit)が国内の民生用原子力部門に及ぼす影響について、英国政府の見解と方向性をとりまとめた報告書を公表した。

同委は、省別、政策案件毎に下院が招集する特別委員会の1つ。昨年12月に作成した報告書で同委は、保障措置体制など規制面も含めて原子力部門がBrexit後も確実に活動を続けられるよう、政府が欧州委員会(EC)と実施中の交渉において、欧州原子力共同体(ユーラトム)との将来的な関係に関する見解を出来るだけ早急にまとめることを政府に勧告。今回の報告書は、各勧告項目に対する政府の回答を示した形になっている。

その中で政府は、英国がユーラトムおよび国際原子力機関(IAEA)と結んでいた3者間の保障措置協定に代わるものとして、この夏にもIAEAと新たな2者間「自発的協定(VOA)」および「追加議定書(AP)」について合意することを目指しているとした。また、原子力規制庁(ONR)がすでに、英国独自の保障措置体制を構築する準備作業を開始しており、昨年秋には新しい査察官の募集を実施。2019年3月まで募集を継続するとともに訓練も実施中であることを明らかにした。ONRはさらに、「保障措置情報管理システム」を設置するため、この春にも入札を行う。同システムにより、ユーラトムがIAEAに提出していたデータ報告書と同形式のものを作成する考えで、年内はシステムの構築と試験を実施し、2019年3月までに運用可能にするとしている。

【フィンランド】

大幅に遅延のオルキルオト3号機計画で関係者が和解契約

フィンランドで13年前に着工したものの完成が遅れているオルキルオト原子力発電所3号機(PWR, 172万kW)の建設計画について、事業者のティオリスーデン・

ボイマ社(TVO)は3月11日、工事を請け負った仏アレバ社と独シーメンス社の企業連合と包括的な和解契約を締結したと発表した。

TVOは工事の遅延にともなう超過コストおよび損害賠償金として、同企業連合から分割払いで合計4億5,000万ユーロ(約591億7,000万円)を受け取るようになったほか、OL3の完成に必要な人的および技術的資源も、アレバ社がフランス電力(EDF)に売却した原子炉部門であるフラマトム社の追加資源から提供されることになった。一方、OL3の送電開始が最新の日程通り、2019年5月から可能になった場合は、TVOが同企業連合に最大1億5,000万ユーロ(約197億2,000万円)の奨励金を支払うことも明記されている。

OL3の建設工事は、世界で初めてアレバ社製・欧州加圧水型炉(EPR)を採用して2005年に始まった。しかし、規制当局による関係書類の認証作業や下請業者による土木工事に想定外の時間がかかり、当初予定されていた2009年の完成という日程は大幅に遅延。コストもターンキー契約による固定価格の30億ユーロ(約3,948億1,000万円)を大きく超過したことから、両者は互いに追加経費の支払いを請求する仲裁手続を国際商工会議所(ICC)に要請していた。

TVOの発表によると、ICCの仲裁裁判所は2016年11月、追加経費の支払いに関して同社を支持する中間判断を下しており、今回の和解契約に示された損害賠償額もICC裁定に基づいている。同和解契約の発効には一定の条件が設けられているが、TVOは3月中にもこれらが満たされると予測。発効すれば両者はICCの仲裁手続も含め、OL3関係の現行訴訟をすべて取り下げることになる。

【ロシア】

最新設計を採用したクルスクⅡ期工場の機器製造開始

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は2月19日、同国最新の第3世代+(プラス)設計「VVER-TOI」を初めて採用したクルスク原子力発電所Ⅱ期工事1号機の建設計画で、同社のエンジニアリング部門であるAEMテクノロジー社が機器製造を開始したと発表した。

「VVER-TOI」は、120万kW級ロシア型PWR(VVER)の最新シリーズだった「AES-2006」をベースに、技術や経済性のパラメーターで最適化を図った設計。連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)が昨年6月にⅡ-1号機の建設許可を発給したことから、AEMテクノロジー社は今回、蒸気発生器の製造や主要な循環管路関係の作業を開始した。サイトでは同年

12月末から、原子炉建屋底部の基礎版で鉄筋を設置する作業が進められており、この作業が完了し次第、今年前半にも最初のコンクリート打設を実施するとしている。

ロスアトム社によると、「VVER-TOI」では「AES-2006」と同様、運転期間が60年に設定されているのに加え、重要な安全機能については全面的に受動的システムを採用。二重構造の格納容器、2次系を介した緊急時の熱除去といった特長も同じである。一方、全電源喪失時に運転員の介入なしで炉心溶融の回避が可能な時間は、「AES-2006」の24時間から72時間に拡大されたほか、本格着工から機器の設置完了までの期間を11か月短縮することが可能だという。クルスクⅡ-1号機は今後、ロシア内外で建設する「VVER-TOI」のレファレンス原子炉となるため、同社のA.リハチョフ総裁は、同炉と後続の2号機は高度かつ先進的な原子力技術となるだけでなく、同社にとっても重要な価値を持つものだと説明している。

クルスク原子力発電所では現在、チェルノブイリ発電所と同じ軽水冷却黒鉛減速炉(RBMK)が4基(各100万kW)稼働中。これらのリプレースという位置付けになるⅡ期工事では、最終的に125.5万kWの「VVER-TOI」を4基建設することが計画されている。このため、Ⅰ期工事1、2号機の閉鎖時期に合わせて、Ⅱ期工事1、2号機を2021年以降、順次完成させていく計画である。「VVER-TOI」設計は同発電所以降の建設計画にも採用が決定しており、具体的にはニジェゴロド1、2号機やセベルスク1、2号機、スモレンスクⅡ期工事1~4号機などの名が挙がっている。

【ウクライナ】

米ホルテック社製SMRの建設と国産化で協力覚書

ウクライナの原子力発電公社であるエネルギーアトム社は3月2日、米ホルテック・インターナショナル社が開発した電気出力16万kWの小型モジュール炉(SMR)の国内建設、および同技術の国産化を目指し、協力覚書を2月28日にホルテック社と締結したと発表した。

受動的安全性を有すると言われる同社製「SMR-160」について、国内の許認可手続と既存原子力発電所内での建設を進めるのみならず、国内サプライヤーの能力を活用して機器製造の一部を国産化する計画。いずれはSMRのシステムや機器、構造物の輸出でウクライナが世界でも主導的立場を獲得するとともに、欧州やアジア、アフリカ地域に「SMR-160」技術をプロモーションするための製造拠点をウクライナに築きたいとしている。

ウクライナでは1986年のチェルノブイリ事故を受け

て、ウクライナ最高会議が1990年8月に原子力発電所の建設凍結を決議したが、国内のエネルギー不足を解消するには原子力が不可欠との政府認識を反映し、1993年10月に同決議は撤廃された。事故後約30年を経て、同国では国内の商業炉15基が総発電量の50%以上を発電。エネルギー社は経年化が進んだ11基について運転期間の延長手続を進める一方、昨年7月にホルテック社とSMRの導入可能性に関する協議を実施しており、ウクライナが近代的なエネルギー技術の開発国として仲間入りを果たし、将来的に機器製造で主要国となるための道を模索していた。

エネルギー社によると、SMR技術は原子力発電所の新設で最も有望な分野の1つと認識されており、世界市場は2025年以降、約1兆ドルの規模に成長する見通し。外部電力に依存する機器の不使用や固有の安全性など、従来型原子力発電所と比べてはるかに高いレベルの安全性を有しているほか、ホルテック社製「SMR-160」であれば負荷追従運転が可能であり、高圧送電網も必要ないとした。

このため、同社は今回の協力覚書を通じて、ホルテック社と共同調整委員会を設置する方針である。同委は「SMR-160」の規制審査について準備することを最優先の目的としており、国際原子力機関(IAEA)が革新的原子炉の導入環境整備を支援するために設置した国際フォーラム「INPRO」の方式に基づいて包括的な設計評価を行うほか、西欧原子力規制者協会(WENRA)の安全要件や欧州電気事業者要件(EUR)に対する適合性を評価。その際は、カナダの規制要件に対する同設計の適合性について、カナダ原子力安全委員会が実施する「許認可申請前審査」の結果も考慮される。

また、これらに続くステップとして、同委はウクライナ国内の原子力産業インフラを評価するとともに、国内で「SMR-160」の一部機器製造を国産化するための共同提案を策定するとしている。

ウクライナを「SMR-160」機器の製造拠点とするための具体策としては、ニュージャージー州カムデンにあるホルテック社の「先進的製造プラント」と同等の能力を備えたプラントをウクライナに設置する計画。同プラントは、ホルテック社が2020年代半ばまでに世界の4地点で設置するプラントの1つになる予定で、ホルテック社では現在、タービン発電機など「SMR-160」に組み込む機械を専門的に製造しているウクライナの主要サプライヤーと協議を行っているところである。

ホルテック社によると、エネルギー社はすでに2016年末からホルテック SMR 諮問委員会の一員であり、半年毎の同委の席でエネルギー社の Y. ネダシ

コフスキー総裁は、試験プロジェクトとして、ロプノ原子力発電所で稼働する40万kW級のロシア型 PWR を2基、「SMR-160」と取り替える考えを表明したという。ウクライナの老朽化した石炭火力発電所が、今後数年間で閉鎖される予定であるため、不足分を「SMR-160」のクリーン・エネルギーで賄う方針。さらに、「SMR-160」で国内の産業施設に熱電併給を行う可能性があることも明らかにしたとしている。

【インド】

ジャイタプール発電所建設計画で 仏電力と産業枠組協定

インド南西部のジャイタプールで合計6基の欧州加圧水型炉(EPR)を建設する計画の実施に向けて、フランス電力(EDF)は3月10日、機器の調達活動など産業界関連の枠組や仏印双方の役割と責任分担、次の段階の日程等を特定するための協定を、インド原子力発電公社(NPCIL)と締結したと発表した。

仏印両国は2010年、同計画の最初の2基建設に関して枠組合意に達したものの、サプライヤーに一定の賠償責任を盛り込んだインドの原子力損害賠償法や建設予定地で激化した住民の抗議行動などにより、実質的な作業は棚上げとなった。さらに近年では、フランス原子力産業界の再編やプロジェクト・コストの問題等により、交渉が停滞していた。今回の協定により、EDFは同計画を実行に移すための決定的なステップが刻まれたと評価。総設備容量が約1,000万kWという世界最大級の原子力発電所建設で、かつて無いほど多くの地元企業が参加することになると強調している。

EDFとNPCILの協定は、フランスのE. マクロン大統領がインドでN. モディ首相と会談したのを機に、両首脳立ち会いの下で調印された。会談後の共同声明で両首脳は、今年末頃にジャイタプールで建設工事の開始を目指すことを改めて確認。同プロジェクトを通じて、コスト面に優れた電力やフランスからの財政支援がインドにもたらされるほか、同発電所の全運転期間に必要な燃料供給が保証されていること、機器製造技術のインドへの移転で協力することなどを明らかにした。

今回の協定に基づいてEDFは、EPR技術のサプライヤーとしてEPR建設に関するこれまでの経験をNPCILに提供する予定。最初の2基に関するエンジニアリング調査と機器調達活動をすべて引き受けるが、残りの4基については、調査と調達活動の一部をインド企業に割り当てることを検討しており、最後の2基にインド企業が参加する割合は60%に達する可能性があるという。

原子力区画火災における火災評価モデルの現状

電力中央研究所 白井 孝治, 田坂 光司

原子力施設の火災 PRA において詳細な火災シナリオを設定する際には、施設特有の区画火災性状を対象とした合理的な火災評価モデルを適用することが重要である。本解説では、代表的な火災評価モデルの現状を紹介すると共に、補機油を火源とする機械換気制限下における区画火災を対象とした火災評価モデルの検証に関する実験研究の一例を示す。

KEYWORDS: Fire modelling, Compartment fire, Lubricant oil, Zone code, Fire PRA

I. 原子力発電所における火災防護に関する取り組み

わが国では、1975年の米国ブラウンズフェリー原子力発電所ケーブル火災を契機として火災防護の議論が始まり¹⁾、1982～1984年の電気事業者とプラントメーカーが実施した大規模火災実証試験の知見に基づき、民間規格の改定が行われてきた¹⁾。さらに、2007年の中越沖地震における東京電力・柏崎刈羽原子力発電所の変圧器火災²⁾、2011年の東日本大震災における東北電力・女川原子力発電所の電気盤火災等の被害³⁾に基づき、2013年に原子力規制委員会は火災防護に関する審査基準⁴⁾を改正し、火災防護に関する規制や対策の強化を図っている。

さらに、これら新規基準への適合に加え、国内外の最新知見を取り入れながら、安全性向上活動を充実させることも要求されており、確率論的リスク評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment)の実施が位置づけられた⁵⁾。2014年6月に日本原子力学会は、「原子力発電所の内部火災を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準⁶⁾」(以下、火災 PRA 標準)を制定し、内部火災 PRA の実施手順を規定している。特に、火災シナリオを詳細に設定する際には、図1に示すような原子力発電所に特有な機械換気制限下の区画火災における燃焼挙動を対象とした合理的な火災評価モデルの適用が重要である。

本解説では、これら燃焼挙動を評価するための火災評価モデルの概要を紹介すると共に、火災評価モデルの検証を目的とした国際的な取り組みと補機油火災に対する評価の一例を示す。



図1 機械換気制限下の区画火災性状の遷移

II. 火災評価モデルの概要

表1に、代表的な火災評価モデルを示す。火災評価モデルでは、火災源によるプルームや高温ガス層の発達を追跡し、火災区画内のケーブルや機器等への影響を評価する。火災 PRA 標準の附属書Lでは、米国 NRC が発行した NUREG-1824⁷⁾を参照し、既存の火災評価モデルの適用範囲と解析能力(表2参照)を例示している。これらの分析結果より、現状の火災評価モデルが抱える課題として、図2に示されるように、以下の3点が上げられる。

- ①火災源の発熱特性が与条件として取り扱われており、火災源の発熱特性を直接予測する手法が必要
- ②多室複雑形状を対象とした検証事例が不足しており、実プラントを対象とした解析の有効性の確認が困難
- ③雰囲気温度の概算のみであり、物体温度評価への精度が不十分

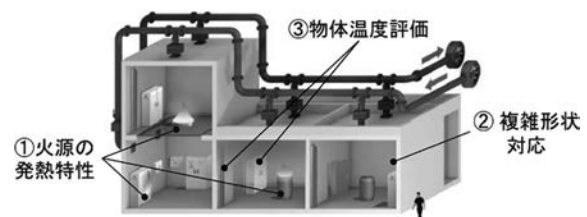


図2 現状の火災評価モデルが抱える課題⁸⁾

Current Status of the Fire Modelling of the Compartment Fire for Nuclear Power Plant: Koji Shirai, Koji Tasaka.

(2017年10月30日受理)

表1 代表的な火災評価モデル

手法	代表的なモデル	支配方程式	所要計算時間	時空間分布評価
数式モデル	FDTs	代数方程式系	◎(手計算)	△(一様定常)
ゾーンモデル	BRI2002, MAGIC, CFAST 等	常微分方程式系	○(PC 数分)	○(一様非定常)
フィールドモデル (数値流体解析)	FDS, ISIS 等	偏微分方程式系	△(PC 数時間)	◎(局所非定常)

表2 火災評価モデルの適用範囲と解析能力⁷⁾

パラメータ		火災評価モデル				
		FDTs ¹⁾	FIVE-Rev1 ²⁾	CFAST ³⁾	MAGIC ⁴⁾	FDS ⁵⁾
高温ガス層の温度 (上部層の温度)	対象区画	△	△ _{OP}	○	○	○
	隣接区画	N/A	N/A	△	△	○
高温ガス層の高さ(層の境界高さ)		N/A	N/A	○	○	○
天井ジェット温度		N/A	△ _{OP}	△	○	○
ブルーム温度		△ _{UP}	△ _{OP}	N/A	○	△
火炎温度		○	○	○	○	△
酸素濃度		N/A	N/A	○	△	○
煙の濃度		N/A	N/A	△	△	△
部屋(区画)の圧力		N/A	N/A	○	○	○
ターゲットの温度		N/A	N/A	△	△	△
放射熱流束		△	△	△	△	△
トータルの熱流束		N/A	N/A	△	△	△
壁の温度		N/A	N/A	△	△	△

備考：N/A：適用範囲外，○：予測精度を保証，△_{OP}：保守的な予測結果(Over-Prediction)

△_{UP}：非保守的な予測結果(Under-Prediction)，△：解析結果が保守的か非保守的かを判断できない

*1 FDTs(Fire Dynamics Tools)：米国 NRC が開発した手計算ベースの火災力学ツール

*2 FIVE(Fire-Induced Vulnerability Evaluation)-Rev1：米国 EPRI が開発した火災脆弱性評価ツール

*3 CFAST(Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport)：米国国立標準技術研究所(NIST)が開発したゾーンモデルを用いた解析ツール

*4 MAGIC：仏国 EdF が開発したゾーンモデルを用いた解析ツール

*5 FDS(Fire Dynamics Simulator)：NIST が開発したフィールド(数値流体解析)モデルを用いた解析ツール

III. 国際共同研究プロジェクト

近年の国際的な取り組みとして、OECD/NEA(経済協力開発機構・原子力機関)における国際共同火災研究プロジェクト“Fire Propagation in Elementary Multi-room Scenarios”(複数火災区画火災試験、以下 PRISME)が展開されている⁸⁾。このプロジェクトでは、機械換気制限下の複数区画火災における熱や煤煙の伝播挙動の解明を目的とした実規模スケールの火災試験が実施されており、第1フェーズ PRISME(2006～2010年：図3参照)、および第2フェーズ PRISME2(2011～2016年)が終了し、2017年から5か年の計画で第3フェーズ PRISME3が開始されている。PRISME/PRISME2の成果として、各種火災源(補機油・ケーブル・電気盤等)の燃焼特性データ(発熱速度等)や、これら火災源を対象として、火災源の規模や区画配列、換気回数をパラメータとした換気支配条件下の火災現象に関する試験データが

蓄積されつつあり、PRISME3においても更なる知見の蓄積を図る計画となっている。

図4に、PRISMEで用いられた試験装置の概要を示す。PRISMEで用いられた区画容積は $6 \times 5 \times 4 \text{ m}^3$ 、火皿面積は 0.4 m^2 、換気回数は1.5～8.3回/h、可燃物は液体燃料($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$)、壁・天井および床の主要材料は厚さ30cmの普通コンクリート(天井には破損防止のため厚さ5cmの断熱材を設置)である。図5に、換気量が燃料の質量減少に及ぼす影響を示す。換気制限下における燃焼状態については、着火直後は区画内の酸素が潤沢であるため燃料支配条件となり自由空間と同様の発熱特性(燃料の質量減少が大きい)を示すが、次第に区画内に流入する酸素が制限されるため換気支配条件となり、発熱速度が低下し燃料の質量減少が小さくなる傾向にある。その他、PRISMEでは、火源室から隣接室へ輸送される煤煙や熱量の形態(図6参照)、複数区画における質量流

量の分布等，換気制限下における区画火災の特性が明らかにされている。PRISME プロジェクトにおける複数区画火災の燃焼特性や火災評価モデルの検証例について

は，Fire Safety Journal の特集号 Fire Safety Journal 62 (2013)にとりまとめられており，興味ある読者は参考にされたい。

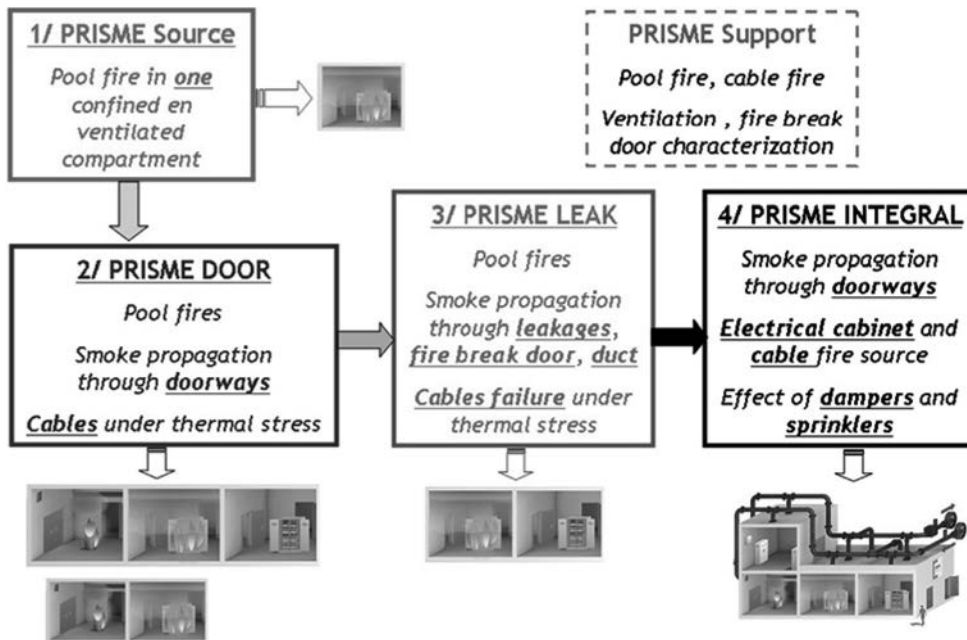


図3 第1フェーズ PRISME(2006～2010年)の実施概要⁸⁾

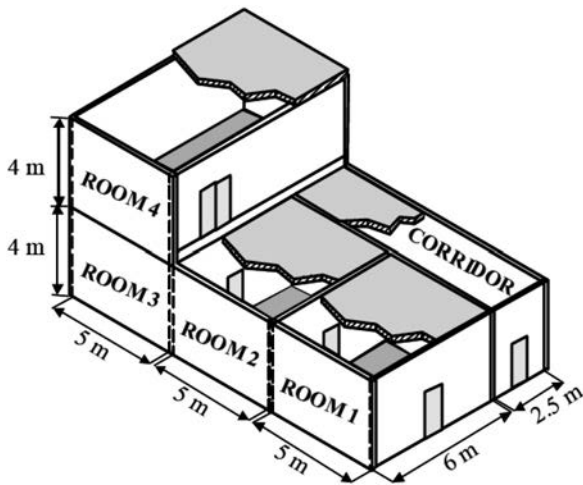


図4 PRISME で用いられた試験装置の概要⁸⁾

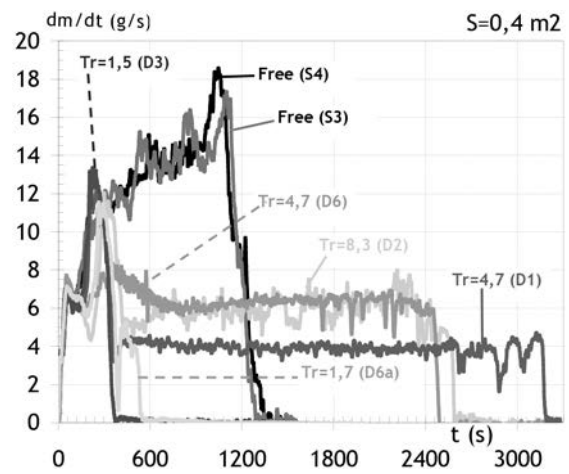


図5 換気量が燃料の質量減少に及ぼす影響⁸⁾

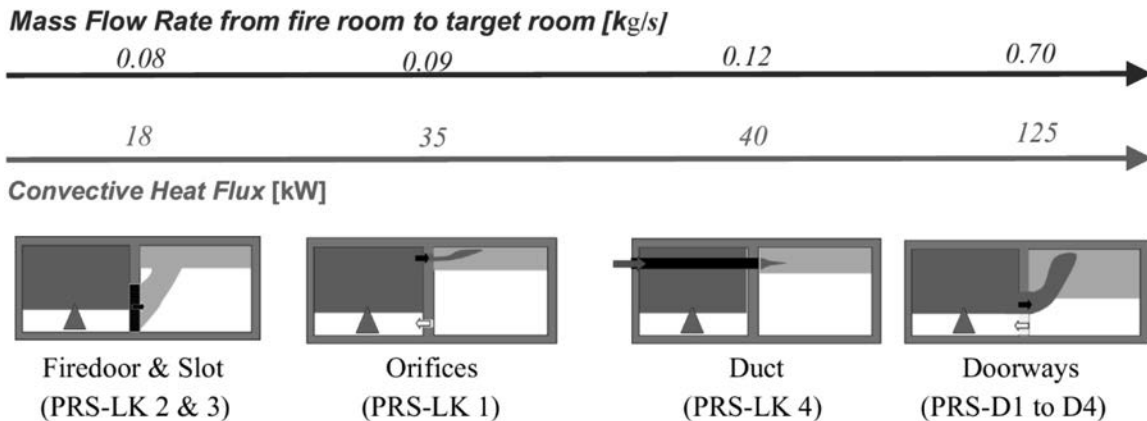


図6 火源室から隣接室へ輸送される熱量の形態⁸⁾

IV. 火災評価モデルの適用例

火災評価モデルの一例として、建築分野で使用されている既存のゾーンコード BRI2002 を紹介し、原子力発電所への区画火災へ適用した事例を紹介する。

BRI2002 は、二層ゾーンの概念に基づいて作成された煙流動予測計算プログラムであり、一般建築物の防火設計を対象として、初期火災の煙流動性状予測を目的として建築研究所⁹⁾で開発された。本プログラムの特徴は、図7に示すように火災時の建物内空間の上層に高温層(煙層)、下層に低温層(空気層)が存在すると仮定し、上下それぞれの層を検査空間として、火災に伴う物理性状を予測するものであり、主な仮定は以下のとおりである。

- ①建物内の任意の空間は上層と下層の2つの層で構成される。
- ②上層と下層は水平な境界面(不連続面)で区分される。
- ③各層内部は、温度や化学種濃度等の物理量を一様と仮定する。
- ④各層の境界面を通しての質量の移動は、火災プルーム、開口流およびそれを源とする開口噴流プルームのみによって生じる。
- ⑤各層の境界面を通しての熱エネルギーの移動は、④の質量移動に伴う他、周壁との輻射・対流熱伝達、同一空間内の他層との輻射熱伝達による。
- ⑥火源上火災からの直接の輻射は無視する。
- ⑦窓、扉開口等を通しての輻射等、空間が異なるゾーン間の輻射熱伝達は無視する。
- ⑧建物内各空間の体積は空間内の圧力の変化、その他の理由により伸縮しない。

この計算プログラムは、2003年に初版が頒布され、一般建築物の防火設計技術者の間で広く利用されており、現在においても大学や研究所等の研究機関を中心として、モデルの改良が鋭意行われている¹⁰⁾。

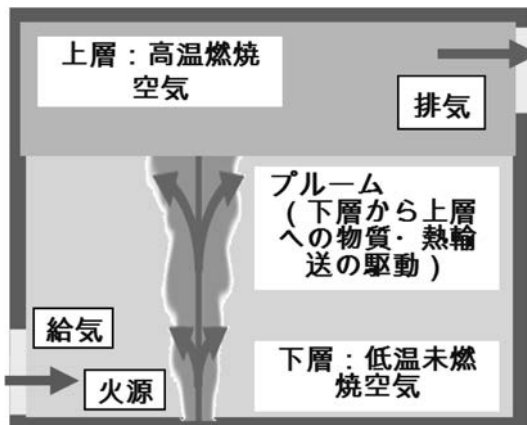


図7 火災時の建物内空間内での熱的挙動

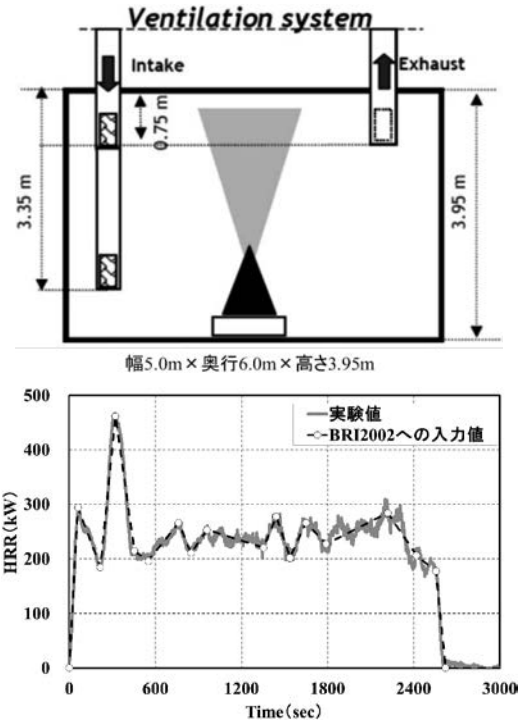


図8 解析の対象とした試験体系と発熱速度

本節では、BRI2002を対象として、Ⅲ章で紹介したPRISMEで実施された区画火災への適用例を紹介する。

図8に、解析の対象とした試験体系と火災源の発熱速度(HRR: Heat Release Rate)を示す。試験条件は、火災源を $C_{12}H_{26}$ (Tetra Propylene Hydrogene) の液体可燃物、試験区画を $120m^3$ とし、火皿サイズは $0.4m^2$ 、換気流量 $1020m^3/h$ 、給気口位置は床から $3.2m$ 、給排気口面積 $0.18m^2$ である。HRRについては、試験結果の時刻歴と総発熱量が等しくなるように入力値を折れ線で設定した。なお、HRRは、CDG (Carbon Dioxide Generation) 法で評価した。これは、燃焼で生成される CO_2 の単位質量あたりの発熱量は概ね $13.3kJ/g$ (炭化水素を想定した場合) になることを利用した方法であり、区画内で発生した CO_2 や排気ダクトにおける CO_2 の質量流量から算定される。

図9に、区画内で測定された空間温度やガス濃度の試験値と解析結果の比較を示す。高さ $3.05m$ の試験値と解析より得られた上層温度の時刻歴はおおむね一致する結果となっており、機械換気条件下の単一区画火災時における火災源のHRRが既知であれば、既存モデルによる解析結果は、火災試験時の区画上部の平均温度を良好に再現できることが分かる。ただし、図10に示す換気流量の感度解析結果より、換気流量が少ない換気支配条件 ($128m^3/h$) ではHRRの再現に数値的な振動が生じる等の課題がある。原子力発電所の火災影響評価においては、換気支配条件下の燃焼モデルの改良¹⁰⁾に加え、機械式空調や防火ダンパ、区画内消火設備の機能追加、複数区画・複数火源への対応等も想定され、火災評価モデル

に関する今後の研究の進展が期待されている。

— 参考資料 —

- 1) 牛島厚二, 奈良間雄, 角谷核二郎, 正木嘉一, 加賀谷弘幸, “原子力発電所の火災防護指針(JEAG-4607)の改訂動向について”, 日本原子力学会, 2009年春の年会 L13, 2009.3.
- 2) 東京電力株式会社, 柏崎刈羽原子力発電所3号機所内変圧器3Bの火災について(中間報告), 平成19年08月23日.
- 3) 東北電力株式会社, 東北地方太平洋沖地震およびその後に発生した津波に関する女川原子力発電所の状況について, 平成23年05月.
- 4) 原子力規制委員会, 実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準, 2013年06月.
- 5) 電気事業連合会, 原子力の自主的安全性向上に向けたこれまでの取り組みと今後の対応について(概要), 2016年03月18日.
- 6) 日本原子力学会, 原子力発電所の内部火災を起因とした確率的リスク評価に関する実施基準, 2014年, 日本原子力学会標準.
- 7) US. NRC, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications”, Supplement 1, Final Report, Nov. 2016, NUREG- 1824 and EPRI 3002002182.
- 8) L. Audoin et al, “OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments -Overview and main experimental results”, Fire Safety Journal 62 (2013), pp.80-101.
- 9) 建築研究振興協会, 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム, 2003年02月.
- 10) 例えば, 原田和典, 谷道雄太, 二層ゾーンの安定化に関する研究, A-23, 平成27年度日本火災学会研究発表会梗概集, pp.202-203.

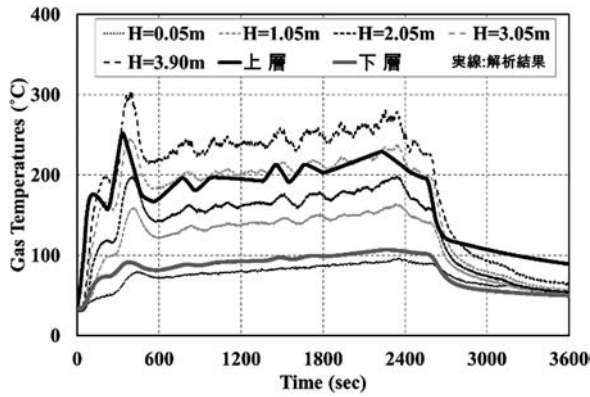
著者紹介



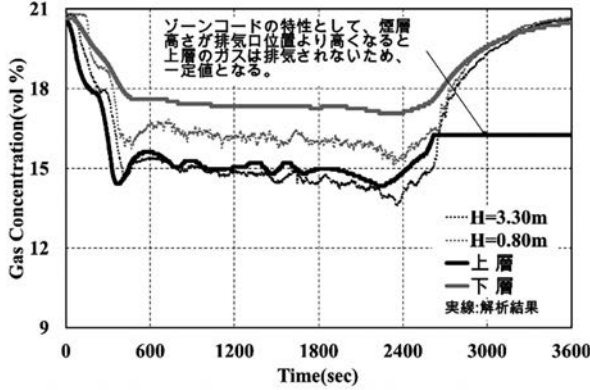
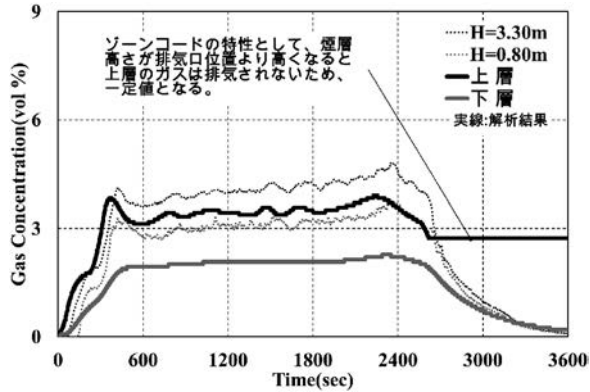
白井孝治 (しらいし こうじ)
 電力中央研究所 原子力リスク研究センター
 (専門分野/関心分野)
 衝撃工学/竜巻防護, 火災防護,
 火災 PRA, リスク評価, リスク情報活用



田坂光司 (たさか こうじ)
 電力中央研究所 原子力リスク研究センター
 (専門分野/関心分野)
 火災工学/火災防護, 火災 PRA,
 リスク評価



(ガス温度)



(ガス濃度: 上図CO₂, 下図O₂)

図9 試験値と解析結果の比較

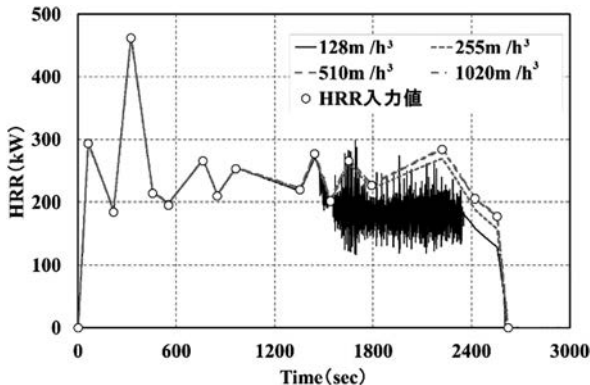


図10 換気流量の感度解析結果

長期気候変動の再現と予測

歴史的観測データと地球システムモデル

気象庁気象研究所 石井 正好

地球温暖化に関連して近年取り組まれている研究課題について紹介する。現在、気候研究を支える気候モデル開発に加えて歴史的観測データの整備が求められ、過去と将来の気候変動をそれぞれ再現・予測する技術開発が行われている。これらの技術を有効活用することで気候変動メカニズムや気候予測可能性の理解を深め、数年から100年先の長期の気候予測精度を向上することができる。本稿では、データレスキューや気候再解析により過去150年間の気候変動を再現する試みを紹介する。これにより過去の気候変動を理解し、気候予測のスキルを高めながら、温暖化研究の進展とともに具現化してきた気候学的課題に取り組む。

KEYWORDS: *Climate, Atmosphere, Ocean, Global warming, Observations, Data rescue, coupled model, Earth system model, Data assimilation*

I. 長期気候変動の監視

1. 長期観測データの必要性

気象や海洋の長期的な変動を物理観測機器で捉えた観測データは地表面付近のものに限られる。陸上の地表面気温と海洋上の海面水温観測を組み合わせ、1850年以降の地球全体で平均した地表面温度の長期変化を理解している(図1)。海洋側で海面水温が代用されているのは、海面水温データが気温データよりも数多く整備されていること等の理由による。図には気象研究所(COBE)と英国気象局(HadCRUT)の二つの機関が行った結果で、産業革命以降の地球規模の温暖化の進行が検出されているのが分かる。

地球温暖化対策のために100年以上先の気候予測が力学モデルを用いて行なわれてきたが、その一方で、過去の100年以上前からの気候変動の理解は十分ではない。地表面の温度についての指標のみから、過去における大気や海洋の変動の全容を知ることは困難である。気候は長期的時間スケールでゆらいでおり、そのゆらぎの理解をしたうえで、将来気候変動を解釈したい。気象庁の1951年以降の台風を対象とした統計によれば、上陸時の気圧が950hPa以下まで発達した台風は、1990年代までは見られたが、2000年代以降は、そこまで発達した台風

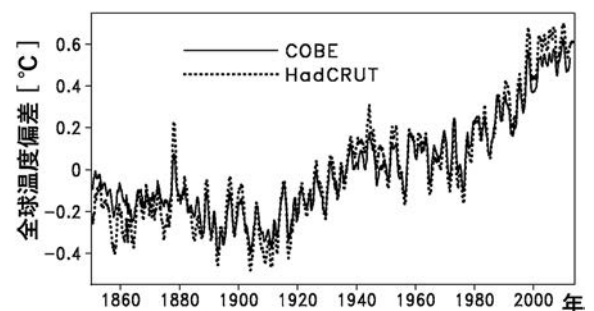


図1 全球地表面温度(°C)の時系列

の上陸は無い。1934年の室戸台風では911.6hPa, 1945年の枕崎台風では916.1hPaで、国内最大級となっている。地球温暖化で台風が巨大化することを示唆する研究はあるものの、地球温暖化だけが台風の規模を決めているわけではない。史実にある台風、旱魃、豪雨の発生要因を究明し、我々の気候学の知見を深めていくにはどうしたらよいのだろうか。後述するように、過去気候についての知見を積み上げていくことで、物理モデルの性能を向上させ、これを用いた気候予測の精度向上にも寄与する。

2. 長期気候再解析

地表面温度観測に加えて、歴史的に比較的充実している地上観測要素の一つに地上気圧がある。気象観測の専門スタッフが配置されていた観測所や、安全航行上その必要があった船舶で気圧観測が行なわれてきた。

Reproduction and Prediction of long-term climate variations; observations and earth system model: Masayoshi Ishii.

(2017年12月31日受理)

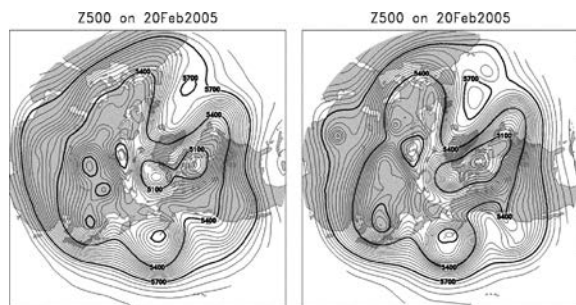


図2 500hPa 高度場(m)

地上気圧観測データのみから再現された高度場(右)は、利用可能な全ての観測データを使用した場合(左)と良く対応する。

地上気圧は大気の重量を鉛直に積算したものであるから、その観測データには上部の大気状態を反映した情報が含まれている。力学モデルが表現する大気状態と観測データから最適化問題として現在の大気状態を統計的に推定するデータ同化の手法を用いれば、十分な空間被覆をもつ地上気圧データの組から、対流圏の大気循環を高精度で推定することができる。図2の左図は気象庁の現業作業でゾンデ観測や衛星観測データなど可能な限りのデータを活用して求めた500hPa高度場である。これに対応する右図は地上気圧のみから推定されたものである。現業では60kmの空間解像度の気象モデルを使用し、右図の実験では250kmの低解像度のものを使用していることによる空間構造に再現性の違いが見られるものの、両者の大局的特徴は良く一致している。

図2左図で示したような、データ同化により三次元の気象状態の時間発展を記述した高精度の大気再解析データは1958年からのものがJRA-55として整備・配布されている。これに比べて若干精度は落ちるが、海面気圧データを活用した新しいアプローチにより、過去150年に亘って再解析整備できる道筋ができてきた。このような気候再解析データベースは、1950年代以前の気候変動の理解を深めるとともに、後述する気候予測の基盤を磐石にするために不可欠なものである。

3. データレスキュー

地上気圧観測データによる気候再解析出力の品質は、それぞれの時代に利用可能な観測データの多寡に左右される。観測データは過去に遡るほどに乏しくなるが、無いわけではない。むしろ、数多くの観測データが活用されていない状態となっている。こうしたデータを発掘・整備し、品質管理を施し気候変動シグナルを抽出できるように品質を高めることを目的とするデータレスキューが、近年、世界的に展開されてきている。

データレスキューでは、地味で煩雑な作業を延々と繰り返すことにはなるが、過去の気象変動が観測データから垣間見えたときの新鮮味は科学的な好奇心を十分に満足させてくれる。データレスキュー研究の課題は、データ

量が膨大なため、人的・経済的資源確保の目処が立ちにくいことである。観測データは科学的資産の最たるものであることを鑑みれば、この地道な作業の意義は大きい。また、データを収めた紙やマイクロフィルムの媒体の劣化、当時の観測周辺の事情を知る当事者の高齢化、観測の自動化にともなう技能伝承機会の減少という喫緊の問題も、データレスキューにおいては考慮しなければならない。

日本国内にも1820年代からの気象観測データがあることが分かっているが、1960年以前のデータの整備状況は芳しくない。データレスキューの対象となるものには、地上観測に加えて、灯台、海上気象観測、高層気象観測データがある。明治時代以降は日本各地で気温・降水量等の地上観測が行われ、これらは後に、世界に誇る高密度気象観測網であるところのアメダスの前身となっている。

大気観測データとは対照的に、海洋内部の水温や塩分の観測データについては、観測データの大半の整備が完了している。海洋観測には専門的技術が必要であるために観測データ数が大気に比べて大幅に少なく、また、早くから国際的なデータ交換が進められてきたという背景により、現在におけるデータ整備状況が大気の場合とは異なったものと考えられる。

世界的な観測網が整備された1950年代の終りごろからであれば、十分小さなサンプリングエラーでもって全球平均的な海洋状態を理解できると考えられる¹⁾。日本は海洋立国で、1930年代から、世界的にも稀有なネットワーク観測を行ってきている。ただ、残念なことに観測精度を決めるために必要な第二次世界大戦以前の観測方法に関わる情報が不十分であるためにデータの活用は滞っている。ゆっくりと変動する海洋の実態を捉えるためには、相応に高い観測精度が必要である。概して、国内外問わずデータの品質を高めることが大きな課題であり、現在、この解決に向けた国際研究プロジェクトが進行している²⁾。

II. 長期気候予測

将来の気候状態が予測可能なかどうかは科学的重大テーマで、現在は、社会からの高いニーズに支えられて研究が進められている。

1. 地球温暖化予測

大気海洋結合モデルに観測された二酸化炭素濃度や自然起源と人為起源のエアロゾル等の気候外力を与えて、地球温暖化の再現と予測の数値実験が行われる。上記したように、産業革命以降の気候変動の全てを理解している訳ではないから、観測データと同等の変動をモデル実験から抽出し、その変動の要因を、追加のモデル実験を行いながら、温暖化の要因分析が進められている。将来

予測は複数の社会・経済発展シナリオで決めた外力を与えて行われるが、同じシナリオでも使用した大気海洋結合モデルが異なれば21世紀末の全球平均気温が1.5～4.5℃と違った予測結果となってしまいます。現時点の我々の知見の不足はこのような予測の不確実性として現れ、不確実性の低減に向けた問題解決が求められる。不確実性の要因は、社会発展シナリオやモデルの中での雲の取り扱いの難しさに加えて、エアロゾルの取り扱いや生態系の変化にもなる気候変化のモデル内での表現にも生起していると考えられる。このことから、大気海洋結合モデルにそれらの諸プロセスを含めた地球システムモデルの開発・高度化が、現在、精力的に進められている。

気候変動に関わる政府間パネルの第五次評価報告書では、過去の地球温暖化はゆるぎない事実と結論された。また気候変動枠組条約第21回締約国会議では、いわゆるパリ協定が採択され、今後の温暖化による全球平均気温の上昇を、産業革命以降から1.5℃程度に収めるための努力が求められている。こうした背景の下で、地球システムモデルを活用して、どのような社会・経済発展を計画していけば良いのかを判断する材料の提供が求められる。また、1.5℃上昇した気候状態で発現しうる平均的な気候状態および台風や豪雨などの顕著現象の特性が、現在と比べてどのように変化するのかを検証した研究も進めていかなければならない。これらの予測情報は、将来の気候変動に対する適応策や緩和策を検討する際の基礎的な物理情報となる。日本のような変化に富んだ気候についての対策を検討するには、地域的に緻密に進める必要がある。このため、モデル計算領域を日本とその周辺域に限定した領域気候モデルを導入し、全球域モデルと併用した力学的ダウンスケーリング実験を行い、高解像度のモデル実験により地形に補足された降水の表現などの再現性を高めるようにしている。

気象研究所が開発した高解像度の全球域・領域大気モデルを用いて、産業革命以降の全球平均気温が4℃上昇した気候状態での気候変化を記述した³⁾、世界で類例の無い、過去6,000年、将来5,400年分の高解像度大規模アンサンブル実験データベースが、文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラムで開発された。このデータベースはd4PDF(database for Policy Decision making for Future climate change)と呼ばれる。地球温暖化対策への実効的活用を企図して、高い統計的確度を持って顕著現象の将来変化を検出することができるように、多アンサンブルの予測実験として構成されている。土木、農業、環境等の分野では、このデータベースを用いて気候変動に対する影響評価の調査を精力的に進めている。

図3は、d4PDFの出力データを元に、猛烈な台風の存在頻度の将来変化の分布を計算したものである⁵⁾。観測データの90倍に相当する過去と将来の多数のアンサンブル計算から、最大地表風速59m/s以上の猛烈な台風

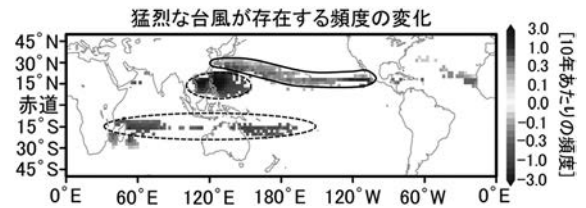


図3 猛烈な台風の存在頻度の将来変化
実線と破線の枠で囲んだ領域は、それぞれ、頻度が上昇、低下する海域を示す。文献5のFig.2の抜粋。

を抽出して各格子での変化量を求めた。図中の破線で囲まれた領域では頻度は減少する一方、日本の南方海上からハワイ付近を經由しメキシコ西岸に至る実線で囲まれた領域では増加する。温暖化の進行にともない台風発生数は減少するものの、猛烈な台風が増加する傾向があることはこれまでの研究で指摘されているが、その空間分布を世界で初めて示すことができたのは、大規模アンサンブルデータで構成されるd4PDFがもたらした成果である。

2. 十年規模気候変動予測

地球温暖化は着実に進行しており、このままのペースで行けば1.5℃上昇の世界も数十年以内には到達する。近未来的な温暖化対策のために、高精度の詳細な予測情報を求める社会からの強い要請が出てきている。

5, 6年前から、大気海洋結合モデルを用いて、天気予報のように、現在の各地の気候状態をモデルに再現した上で数年から10年先の気候状態を予測する方法の有効性を探る研究を進めてきた⁴⁾。ここでは、実際の気候システムの中で卓越する十年規模変動を主な予測対象としている。既に実施した研究によれば、日本の気候に影響を与える5年先の太平洋十年規模振動の状態を予測することは可能で、ゆっくり変化する海洋の再現性を高めた上で予測を実施することが大切であることが分かっている。

全球地表面温度の過去の時系列を見ても分かるように、温暖化により一定の速さで温度は上昇してはならず、温暖化が停滞しているように見える期間が確認できる(図1)。2000年代にも同様の状態になり温暖化停滞を意味する「ハイエイタス」として世間の注目を浴びた。ハイエイタスのような状態が何故起こるのかについては未だ良く分かっておらず、気候システムから自動的に発生する内部変動であるとか人為起源エアロゾルの影響を受けた結果であるとか諸説提起されている。十年規模予測研究では、こうした気候変動を的確に予測できるようにしていきたい。

予報を成功させるために、現在の取り組むべきテーマは十年規模変動メカニズムの理解、地球システムの開発、そして気候再解析の実施である。予測は過去の事例について検証を進めながら精度向上が図られる。たくさ

んの事例を用いて検証を行った方が、予測モデルの性能向上には有利である。まず、十年規模の気候変動の理解を深めるためにも100年を超える事例解析の蓄積が必要で、改めてI節で紹介した長期的気候再解析データの重要性が強調される。

III. 世界が取り組む7つの気候学的課題

地球温暖化研究の進展により、多くの課題が生まれた。米国クレイ数学研究所が2000年に発表した数学の7つのミレニアム懸賞問題よろしく、世界気候研究プログラム(WCRP)は、現在、以下の7つの課題(グランドチャレンジ)を掲げて、それぞれ今後5年から10年の間に解決することを目標としている。

- 1) 雪氷融解とその世界的影響
- 2) 雲、循環、気候感度
- 3) 気候システムにおける炭素循環
- 4) 気象と気候における顕著現象
- 5) 世界の食料生産のための水資源
- 6) 地域海面水位変化と沿岸影響
- 7) 十年規模気候変動予測

7つの課題の重要性はいずれも高く、将来の気候変動に対応できる社会基盤整備を考える上では高い緊急性も孕んでいる。各課題の困難度を鑑みれば、一国の研究者だけでは全ての課題解決は無理であり、密な国際協力連携が求められる。また、雪氷、水位、水資源についての課題解決には、気象・気候の分野の研究者だけでなく学際的な取り組みが必要となっている。

課題1)と6)は温暖化による水位上昇に関連したものである。観測によれば1960年以降、全世界の海洋の殆どの地域で水位が上昇している。図4に示しているのは海面から1,500m深までの海水温が上昇して海水が熱膨張したことによる海面水位の変化である。ほとんどの海域で水位は上昇しているが、空間一様ではなく、日本の南方海域や北大西洋では毎年2mmずつの上昇で相対的に大きい。これに氷床、氷河が融解して海洋に流入した量が加わり温暖化による水位上昇の大半が説明される。近年は後者の水位上昇への寄与率が大きくなってきている。加えて、100年スケールの水位変化では、海水の入れ物である海底地形が変化する影響も受けることになる。上で水位研究が学際的であると評したのはこうした理由による。日本沿岸では、水位上昇に加えて、黒潮の流路変化、海洋の渦活動、一週間から数ヶ月の気候の長期変動に起因する異常潮位などさまざまな影響を考慮して防災対策を立てる必要がある。

地球システムモデルの開発では、課題2)と3)に関連した課題を解決して予測の不確実性の低減と地球温暖化メカニズムの理解を進めていく必要がある。課題4)と

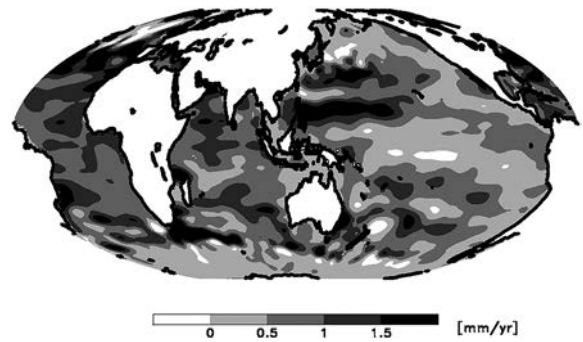


図4 海水の熱膨張による水位トレンド

7)は、すでになんらかの点について既述したとおり、社会的要請が強まっている気候情報の提供を反映したものである。課題5)の重要性は言うまでもない。現在降水量が多い地域は今後も多く、反対に少ない地域はもっと少なくなると、これまでの温暖化研究では指摘している。耕作期の降水量は主要な穀倉地帯において将来どう変化するのか、信頼性の高い詳細な気候予測情報が求められている。

I章、II章で紹介した歴史的観測データと地球システムモデルは、7つの課題にアプローチするために必須であり、我々も、これらを適切に活用して課題解決に取り組んでいく。

— 参考資料 —

- 1) Ishii, M., Y. Fukuda, H. Hirahara, S. Yasui, T. Suzuki, and K. Sato, 2017: Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. SOLA, Vol. 13, 163-167.
- 2) 石井正好, 2016: 国内・国際海洋データベース再構築プロジェクト. 海洋学会ニュースレター, 7-8, 第6巻, 第3号.
- 3) Mizuta and colleagues, 2016: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. Bull. Amer. Meteor. Soc. doi:10.1175/BAMS-D-16-0099.1.
- 4) 木本昌秀, 石井正好, 2010: 近未来気候予測実験一十年規模気候変動の予測に向けて一. 月刊海洋「気候変動予測の最先端」, Vol. 42, No. 5, 271-282, 海洋出版株式会社.
- 5) Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta¹, H. Murakami, and M. Ishii, 2017: Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations, Geophys. Res. Lett., 44, doi:10.1002/2017GL075058.

著者紹介



石井正好 (いしい・まさよし)

気象庁気象研究所 気候研究部
気象庁入庁後、潮汐観測・海洋観測・海洋監視予測・エルニーニョ予測モデル開発・研究業務に従事。現在は気候研究部第四研究室長、筑波大学生命環境系連携大学院教授を兼務。モデルと観測データによる長期気候再現・予測研究に取り組む。

地政学的リスクとエネルギー

第6回(最終回)世界秩序の行方と原子力の役割

東京大学 小宮山 涼一

経済面、軍事面で台頭する中国などの新興国の影響力拡大により、世界秩序は大きな変化に直面している。国際秩序の再編は、エネルギー資源の調達困難化や供給途絶など、構造的にも突発的にも日本のエネルギー安定供給へ影響が波及することが考えられる。将来の地政学的緊張の高まりとそれに伴うエネルギー調達リスク上昇の可能性を長期的かつ大局的に認識した上で、エネルギーセキュリティ上での原子力の価値を冷静に理解することが重要である。

KEYWORDS: *Geopolitics, International security, Global governance, USA, China, Russia, Middle East, Nuclear, Energy security*

I. はじめに

今世紀に入り、世界秩序の変化は、圧倒的な国力を持つ米国による制御能力を超えつつあり、国際情勢は新たな展開を迎えている。経済面、軍事面で台頭する中国や、資源力で経済発展を遂げ、強力な軍事力を有するロシアなどの新興国と、旧来より世界のガバナンスの中心的役割を果たしている米国や西欧との間で、パワーバランスの変化の兆しが現れている。

これまで、圧倒的な経済・軍事力を背景として、米国は民主的理念を社会秩序の基盤として、国際情勢の安定化に対する主導的役割を担い、世界の安全保障、経済秩序、通商秩序などの構築に影響を保持してきた。しかし、現代の国際秩序は、新興国の台頭による力の均衡の変化に直面している。経済秩序の面では、中国など新興国が世界の投資を吸い込んで経済発展を遂げ、世界経済の成長センターとなり、本格的な世界経済の多極化が進んでいる。中国のGDPは将来、北米と同水準まで拡大するとの見方もある(図1)。一方、世界のガバナンスを統治する米国政治はトランプ政権の下、国内政治の分断と内向的な政治・外交姿勢の下で混迷している。このまま国際的な勢力均衡の変化が進めば、有力各国が国力最大化を目指すゼロ・サム秩序へ世界が移行し、米国、

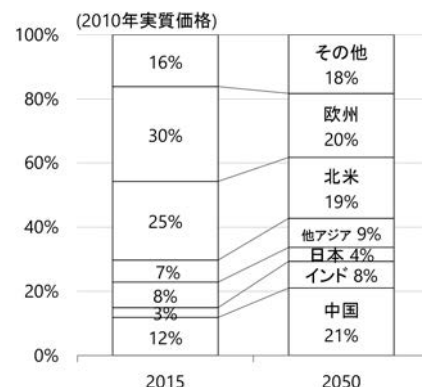


図1 GDPの2050年の展望

(出所)文献¹⁾等を基に筆者作成

西欧と中国やロシアなど有力国間での国際的な主導権を巡る緊張関係がさらに顕在化することも考えられる。

本稿では、国際的な地政学の変化の動向、ならびに、国際秩序の長期的な変化がエネルギー情勢に与える影響や原子力の役割について展望する。

II. 世界秩序の現状と展望

米国や西欧など先進諸国が先導する形で、第二次大戦以降、世界の安全保障、公正で競争的な通商環境、透明性のある金融取引ルールなど、持続的な世界経済発展の基盤を整備し、効率的な付加価値の生産、蓄積と自由化された市場取引が国際的に進展した。民主的な資本主義の下で世界は安定的な経済成長を遂げ、基本的人権や人道的な価値観の尊重、法の遵守、倫理の堅持、公平性の確保、社会福祉などの民主的理念も、社会の安定化や貧

Geopolitical risk in energy market (6); International security and nuclear : Ryoichi Komiyama.

(2018年2月9日 受理)

■前回のタイトル

第5回 ロシアのエネルギー資源開発情勢

困問題の緩和にも寄与し、さらに教育・知識レベルの向上、市民社会の成熟化、都市化の進展、科学技術の進展などに大きく貢献してきた。

そして現在、新興国の台頭と勢力均衡のリバランスにより、旧来からの世界秩序は新たな変化に直面しており、ゼロ・サム的秩序への移行の兆しや、有力各国が国益優先主義的な政策を重視する傾向が現れつつある。経済力をつけた中国は、独自の広域的経済圏構想である「一帯一路」構想の実現を掲げ、アジアインフラ投資銀行(AIIB)を設立し、中国から欧州への沿線地域に対して、ライフライン等のインフラ投資・整備、通商圏の拡大など、政治的、経済的影響力の拡大を目指している。また中国は軍事費を急速に伸ばしており、2006年度から10年間で約3倍以上に増加し(平成28年版防衛白書)、軍事力増強を続け、徐々にアジア周辺国や世界の軍事的勢力バランスの中で台頭しつつある。尖閣諸島海域での中国船等による活動の活発化など、東シナ海地域等での軍事的緊張が高まりつつあり、中国の急伸する軍事力を背景とした威圧的行動は、アジア地域の安全保障の課題となっている。旧来より、アジアの安全保障における米国の軍事力の役割は不可欠となっているが、このまま中国がさらに軍事費を伸ばし続けて台頭すれば、米国の軍事的優位性が相対化され、縮小する可能性もあり、米国のアジアにおける軍事面での影響力保持が将来困難になることも想定されうる。

欧州でも、ロシアの軍事的台頭が続いており、クリミア半島の併合、ウクライナへの影響力拡大など、安全保障上の緊張が高まり、米国が中心となり通商や投資面での経済制裁を課すなど、国際的な安全保障問題となっている。そして一部の中東諸国では、アラブの春以降、統治機能が低下し、ガバナンスを喪失した空白地帯でテロ活動が活発化して不安定化し、また、中東の地政学の中心的要因であるあるイランとサウジアラビアの覇権を巡る緊張が高まり、シリアやイエメンでそれぞれ対抗勢力を支援する代理戦争の解決の糸口が見えないなど、依然として地政学的リスクを抱えている。

このように、アジア、欧州、中東情勢の安全保障を取巻く環境は変化を迎えている。地域や世界の安全保障の主導権を巡る競争や緊張が国際的に高まりつつあり、世界の地政学的な勢力均衡は変化する可能性がある。将来の国際秩序の展望を見通すことは極めて困難であると考えられるが、中国、ロシアなど新興国の軍事力が、米国の管理能力を上回り、周辺地域の安全保障の主導権を握り、当該国やその同盟国を中心とする広域圏での軍事や経済上の新たな秩序が形成される可能性や、米国や西欧など先進諸国と、経済力、軍事力で台頭する中国、ロシアなど新興国との主導権を巡る緊張関係の高まりの中で、安定的な均衡状態の下で世界秩序がかろうじて維持される可能性など、様々なシナリオが考えられる。

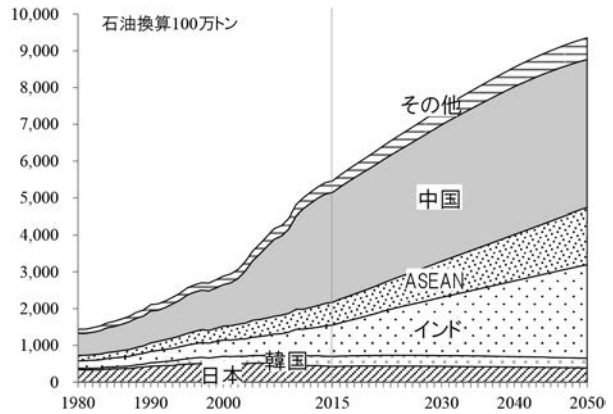


図2 アジアの2050年までの一次エネルギー供給

(出所)文献¹⁾等を基に筆者作成

将来の世界の安全保障のあり方によっては、海洋シーレーンの安全確保やエネルギー資源の調達などにおいて、エネルギー安定供給へも直接的、間接的に影響が波及する可能性もある。また、中国など新興国のアジアにおけるエネルギー需給上のプレゼンスがさらに拡大し(図2)、エネルギーの安定調達を巡り、逆に安全保障上の緊張関係をもたらす可能性もあると考えられる。

Ⅲ. 中東の地政学的リスク

中東は潤沢な石油資源を有し、エネルギー情勢での影響力を保持し、中でもサウジアラビアは米国産シェールオイルの影響の中でも、依然として、世界の石油供給を調整するスイングプレーヤーとして、世界屈指の影響力を持つ。一方で、中東は紛争、テロ、民族・宗派対立など様々な地政学的リスクや、石油収入に強く依存する経済・財政構造、人口増加や若年層の失業問題などの社会的な課題を抱えている。

近年はイランの核問題が、国際的な緊張を高めた。2015年の核合意でイラン制裁解除が順調に進むと見込まれたが、2017年の米国トランプ政権の誕生で、イランの国際協調に向けた流れに不確実性が加わった。また、現代の中東の盟主であるサウジアラビアなどアラブ諸国は、イランの制裁解除で、イランが中東での影響力の拡大を狙い攻勢を強める可能性を不安視しており、今後の制裁の展開如何では、中東の外交的、軍事的緊張を高めるとの懸念もある。加えて、もし内向的な姿勢を強める米国が中東への軍事的関与を低減するなど、中東の安全保障政策に変化が現れた場合は、世界の安全保障への深刻なリスクとなる可能性が高い。

現代の中東の盟主であるサウジアラビアの王位継承問題も中東の地政学の展望に不確実性を与えている。近年副皇太子から昇格したムハンマド皇太子に権力が集中化するとともに、王族や政府閣僚の逮捕、拘束や資産没収が行われた。これにより、世界有数の産油国であるサウジの政治情勢の不安定化に対する緊張が高まり、原油価

格にも一時、上昇圧力を与えた。今後も、王位継承を巡るサウジ王族内の対立、混乱を通じて、政治が不安定化し、中東の地政学的リスクを高める可能性もある。

中東の地政学的リスクは、極めて不確実性が高く、もし石油生産、輸出にも影響が現れれば、シェールオイル増産の中でも、原油価格高騰をもたらす可能性が高い。他方、現在、電気自動車など次世代車の普及が世論の関心を集める中、原油価格高騰はそのような石油代替技術の普及を世界的に加速化させ、石油需要ピークが早期に現実化し、中東の石油収入低下、経済の動揺、政情の不安定化の悪循環に陥ることも考えられる。中東産油国は、地政学的リスクに直面すると共に、原油価格高騰、低迷を予防して持続的な経済発展を遂げるための慎重な石油政策の舵取りが求められている。

IV. 米国情勢の行方

経済・軍事大国である米国トランプ政権は、米国第一主義の基本的姿勢の下、移民流入制限、減税、公共投資など保護主義的で自国利益優先主義的な政策を指向し、経済、外交ともに内向的な傾向がうかがえ、世界の安全保障を主導する姿勢にも不確実性が見られる。また外交政策では、特に米国の中東政策の行方に注目が集まっている。中東は国内情勢の流動化とともに、米国の関与が影響を与える要因も大きい。エルサレムのイスラエル首都認定や核合意問題におけるイランへの強硬姿勢は、中東情勢を不安定化させる要因になったと思われる。今後も米国の中東をはじめとする外交政策が国際エネルギー市場に与える影響を十分注視することが必要である。

米国のエネルギー・環境政策では、鉦区開放拡大の促進等を通じた国内資源の最大活用、エネルギー自給自足化、パイプライン等エネルギーインフラ整備支援、環境規制の見直しなどを行い、シェール資源など石油・ガス部門での生産・輸出拡大が進み、世界最大の産油・産ガス国となった。石油、ガス輸出も増加を続け、LNG輸出プロジェクトも軌道に乗りつつある。

米国はシェール革命により、将来エネルギー純輸入国から純輸出国に転じることが予測されているが、米国のエネルギー需給が自立化すれば、原油の輸入先である中東など海外の政策上の優先度は相対的に低下する可能性もあり、これは日本にとってはエネルギー安定供給上のリスクとなる。現在順調に進んでいる米国産シェールガス由来のLNG輸出は日本のエネルギー安全保障に貢献する一方、米国のエネルギー自給化はさらに内向的姿勢を強め、日本の主要な原油・LNG輸入先である中東の安全保障に対する関心が低下する可能性があるためである。米国の中東への関与が低下すれば、中東の軍事的緊張を高め、また、中東からのエネルギー輸入を強化している中国の中東でのプレゼンスを高め、エネルギーの安定的調達に支障をきたす懸念もある。中東の軍事的緊張

と流動化は、国際エネルギー価格の上昇をもたらすため、日本は米国の中東政策を潜在的なリスクとして注視し、エネルギー安定供給確保策を講じる必要がある。

V. 中国の地政学的影響の拡大

中国の経済成長は経済構造の変化(新常态)を受けて以前よりも緩やかになったが、持続的に伸びており、2017年の経済成長率(実質)は6.9%となり、7年ぶりに前年度水準の成長率を上回った。中国は世界第二位の経済大国であると同時に世界最大のエネルギー消費国であり、同国の経済成長は国際エネルギー情勢に大きな影響を与える。まず、2017年の中国の石油需要が順調に増加し、日量1,240万バレルに拡大したと見られる。一方、中国国産原油は資源制約により日量390万バレルへ減産し、2017年の原油輸入量は前年比1割増の同840万バレルへ増加し、ついに米国の原油輸入量を上回り、世界第一位の原油輸入国となった(図3)。2017年以降の国際原油価格は、緩やかに上昇しているが、その背景要因として、中東の地政学的リスク等に加え、中国の継続的な石油需要増加、石油輸入量拡大も作用していると考えられる。

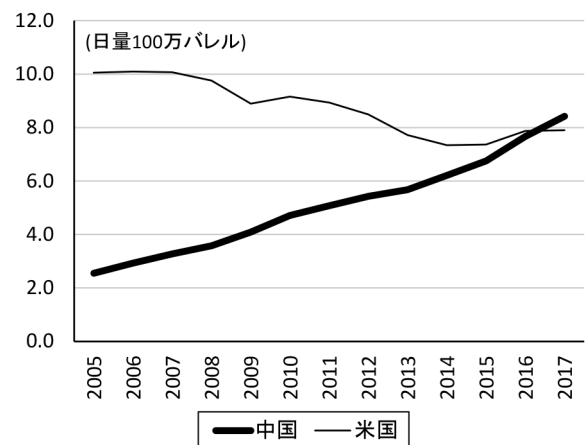


図3 中国、米国の原油輸入量の推移
(出所)文献²⁾等を基に筆者作成

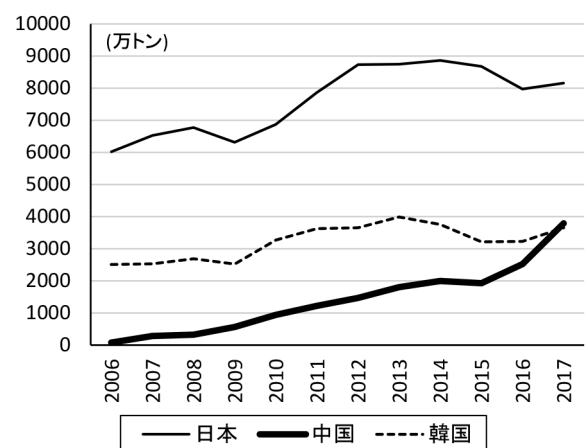


図4 日本、中国、韓国のLNG輸入量の推移
(出所)文献²⁾等を基に筆者作成

また、2017年の中国のLNG輸入量も急速に伸びており、前年比5割増の約3,800万トンに急増し(図4)、日本に次いで世界第二位のLNG輸入国となり、世界の天然ガス市場にも大きな影響を与えることになった。近年の中国政府による徹底した大気汚染対策により、石炭からの燃料転換需要が、LNG輸入量を急増させ、中国を2017年に韓国を上回る世界第二位のLNG輸入国に一気に押し上げた。国際的なLNG供給量は当面、供給余力が確保されている状態であるといわれているが、中国のLNG輸入量の急増で、世界のLNG需給の環境が変化する可能性もある。現に、LNGスポット価格も上昇基調にあり、中国の環境汚染対策やLNG調達動向への関心が高まりつつある。

そしてこのような中国のエネルギー消費量および輸入量の増大は、日本やアジア諸国にとっての地政学的リスクとなる。2050年までに、アジアの石油輸入やLNG輸入に占める中国のプレゼンスは大きく拡大するとの予測もあり(図5, 図6)、日本の安定したエネルギー調達にも影響する可能性もある。東アジアにおける原油・LNG輸入大国だった日本の産油・産ガス国から見た地位低下が懸念される。中国が米国の原油輸入量を上回り、世界

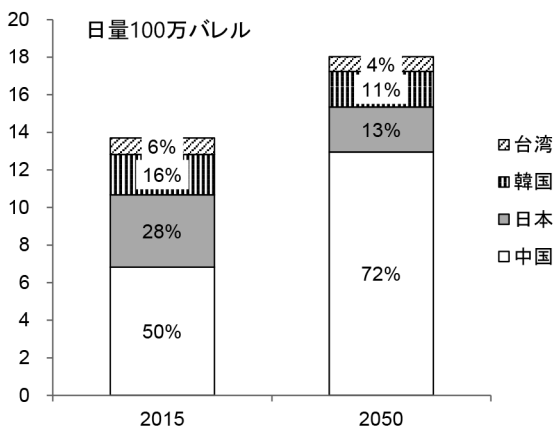


図5 東アジア諸国の石油輸入量の展望
(出所)文献¹⁾等を基に筆者作成

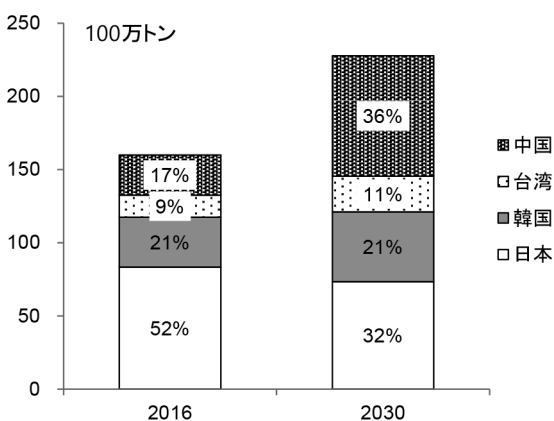


図6 東アジア諸国のLNG輸入量の展望
(出所)文献¹⁾等を基に筆者作成

の石油市場における存在感が一層高まっているように、中国のエネルギー輸入量の増加は、国際エネルギー市場でのエネルギー生産国への影響力を高め、特に日本のようにエネルギー需要が減少する国のプレゼンスは大きく縮小する。中東など産油国、産ガス国にとって、中国のように確実な需要量を見込める国への輸出確保は日本以上に魅力となる。また、中国は一带一路という広域圏構想の下で、産油国・産ガス国との協力関係強化と共に、輸入経路上の沿線国との関係強化も図っており、南アジア諸国に対して、港湾設備や発電所建設等でインフラ整備支援を進めている。中国とエネルギー生産国、輸入経路沿線国とのこうした経済関係の強化は、中国の広域圏での地政学的影響を浸透させる要因となる。

また中国は、エネルギー輸入の増加に伴い、海洋シーレーンの安全保障も重要な課題と認識していることから、海洋進出を積極的に進めており、潜在的に日本のエネルギー安全保障上のリスクとなる。現時点で中国の影響によるエネルギー輸入障害リスクが顕在化しているわけではないが、中国の東シナ海や南シナ海での軍事的な威嚇的行動は日本のシーレーン安全保障やアジア諸国にとっての深刻なリスクとなる。

中国はエネルギー安定供給に関しても、自国に有利に作用する国際秩序を主体的に形成すると見られ、周辺諸国のエネルギー安全保障にも潜在的なリスクとなる。日本は新たな局面を迎えた中国の経済、外交の動向と、エネルギー消費量、輸入量の動向が国際エネルギー市場に与える影響に対して引き続き注目する必要がある。

VI. 地政学的リスクと原子力の役割

米国、中国、中東等に起因する世界秩序の今後の行方は不確実性が大きく展望が困難な状況にある。中国など新興国の経済発展に伴う世界経済の多極化、中国のアジア海洋域での軍事的台頭、サウジアラビアとイランの中東地域での覇権を巡る緊張の高まり、シェール革命を受けた米国の中東政策の行方、ロシアの欧州地域での軍事的影響力の拡大、米国の政治・外交の今後の行方、英国の離脱等による欧州共同体による欧州統治の将来、石油収入に依存するエネルギー資源国の社会経済構造の問題や、現在想像もしえない政治経済的事象などが、単独もしくは複合的に国際秩序のあり方に大きな変化をもたらす可能性がある。

こうした地政学的な世界秩序の再構築は、燃料の供給の途絶や調達の困難化など、突発的にも構造的にもエネルギー安定供給へ影響が波及することが考えられる。日本はこれまで米国が主導する国際的な安全保障環境下において、日米同盟を機軸としてアジア秩序の安定化に貢献しているが、経済秩序、外交秩序など、今後の安全保障環境の変化といった大局的な視点にてエネルギーミックスを考えることが重要となる。

不確実性の大きな世界秩序の行方を踏まえれば、原子力エネルギーは、どのような環境下でも安定的な出力が得られること、燃料備蓄効果により燃料供給途絶にも強いこと、エネルギー価格高騰を抑制すること、核燃料サイクルにより原子力エネルギーの有効利用が可能であること等から、エネルギーセキュリティの強化に貢献する重要なオプションとなる。またエネルギー消費の低下が予想される日本は、中国のエネルギー消費の増大により、原油・LNG調達の交渉力の大幅な低下が予想され、安定したエネルギー調達が困難になる可能性もあり、原子力は必須のエネルギー供給源になると考えられる。また、気候変動問題からみても、ライフサイクルで見た原子力エネルギーの温室効果ガス排出量は大変小さく、メリットがある。

図7は、ホルムズ海峡封鎖等による原油・LNG供給停止リスクや原発稼働停止リスクを一定の確率で考慮した日本のエネルギーモデルによる試算結果であり(モデルの詳細内容は文献³⁾を参照)、縦軸に日本のエネルギー総コスト期待値、横軸に原子力発電設備量を示している。縦軸のコスト期待値は、リスク発生によるコスト上昇を、リスク発生確率で重み付けして考慮している。基準ケース(「基準」)と、基準よりも原発停止期間が長期化したケース(「原子力停止長期化」)で試算している。

結果より、原発設備量(横軸)の増加に伴い、日本のエネルギー総コスト期待値(縦軸)は低下し、特に原発設備量が減少するにつれて、コスト期待値は加速的に増加する。これは原発依存度の低下に伴い、LNG火力等への依存度が増加し、LNG輸送に伴うホルムズ海峡封鎖リスク、LNG供給途絶リスクがエネルギー調達コスト期待値に与える影響が相対的に上昇するためである。このため原子力はLNG海上輸送のリスクを低減する上でも重要な役割を担う電源であることが示唆される。すなわち、LNG等の燃料供給停止リスクを考慮した上での、原子力のエネルギー安全保障上の価値を示していると言える。また、原子力停止が長期化したシナリオ(「原子力停止長期化」)でも、原発設備量増加に従いコストは低減することから、現在日本では原発再稼働が問題となっているが、原子力発電所の稼働停止リスクを考慮したとして

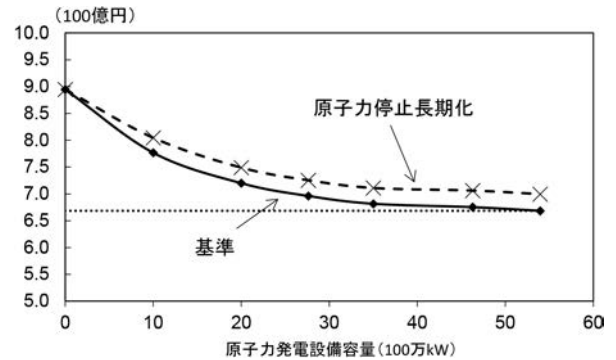


図7 日本でのエネルギーシステム総コスト期待値と原発設備量の関係
(出所) 文献³⁾のモデル試算

も、原子力は経済合理的なエネルギー安全保障策として貢献することが示唆されている。

このようにエネルギーセキュリティを考えた場合、原子力は、大量の化石燃料の海洋チョークポイント通航リスクの回避やエネルギー調達リスク上昇の抑制などに貢献するため、重要な技術オプションである。世界情勢の大きな再編と地政学的緊張の高まり、それに伴うエネルギー調達リスク上昇の可能性を長期的かつ大局的に認識した上で、エネルギーセキュリティ上での原子力の価値を冷静に理解することが重要である。

— 参考資料 —

- 1) 日本エネルギー経済研究所, IEEJ アウトルック 2018, 2017. < https://eneken.ieej.or.jp/whatsnew_op/171012teireiken.html > (アクセス日: 2017年12月10日).
- 2) 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).
- 3) 川上恭章, 小宮山涼一, 藤井康正「数理計画法によるエネルギー安全保障評価手法の開発と燃料備蓄の最適運用戦略に関する分析」エネルギー・資源, Vol.34, No.5, pp.21-30, 2013.

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.

第4世代原子炉の開発動向

第3回 超臨界圧軽水冷却炉

早稲田大学 山路 哲史

超臨界圧軽水冷却炉はプラントシステムの大幅な簡素化・小型化と発電効率の向上により、現行軽水炉の改良では到達できない高い経済性を達成する第四世代の軽水炉である。同一のプラントシステムで熱中性子炉から高速炉まで柔軟な設計対応が可能であり、小型炉の設計も可能である。これまでの国内外の研究開発により、プラント概念、炉心伝熱流動基礎データ、燃料被覆管や断熱材の高温腐食データ、水化学と腐食生成物移行データ等が整備されており、熱流動設計の妥当性と材料面での成立性も見通せるようになった。これらにより研究開発上の不確かさが低減し、今後の開発に伴うリスクが大幅に低減した。

KEYWORDS: *SuperCritical-Water-cooled Reactor (SCWR), once-through direct cycle, thermal reactor, fast reactor, core design, plant safety and control, thermal-hydraulics, material development, water chemistry, Generation IV reactor*

I. はじめに

現代の原子力発電には経済自由化環境への適合性向上が求められている。特に初期投資(建設費)の大幅な低減をもたらすようなプラントシステムの簡素化・コンパクト化、発電効率の向上等が課題と考えられる。国の核燃料サイクル政策に変更が生じた場合にも速やかに対応できる柔軟な運用が可能な原子炉システムが望ましい。新型炉の開発に伴う投資リスクの低減や開発期間の短縮も必要である。超臨界圧軽水冷却炉は既存の軽水炉および経験豊富な超臨界圧火力発電技術を活用し、これらの課題解決を目指す第4世代原子炉概念である。プラントシステムの大幅な簡素化・小型化と発電効率の向上により、現行軽水炉の改良では到達できない高い経済性を達成する。これまでの火力ボイラーの発展と同様な軽水炉の理論的な発展形でもある。同一のプラントシステムで熱中性子炉から高速炉まで柔軟な設計対応が可能である。ここでは、筆者の専門の炉心や燃料の研究開発を中心に、他の研究開発状況についても筆者の知りえる範囲で紹介する。

II. 超臨界圧軽水冷却炉の特徴

現在稼働している軽水炉の多くは1960年代以降に当時の火力発電技術を活用して開発された「第二世代」と、その改良型の「第三世代」(1990年代以降)であるが、蒸気系の技術は基本的に変わっておらず、炉内で発生する蒸気は水と蒸気が共存する「飽和蒸気」である。このため、発電用タービンが適切に動作するために必要な乾いた蒸気を得るには、水と蒸気を分ける機器と、蒸気から分離された凝縮水を循環させる系統が必要となる。また、タービンに送られる蒸気は、温度(約280℃)や、圧力(6~7MPa)が低く、発電効率(33~35%)が低い。

一方、火力発電は1960年代以降に、臨界点(水の場合は374℃、22.1MPa)以上の高温高压で、液体と気体の区別が無くなった状態の「超臨界水」(又は超臨界圧水)を用いた発電が実用化され、現在の日本では100基以上の超臨界圧火力発電プラントが稼働中である。これらのプラントのボイラーでは、超臨界水は通常の「亜臨界水」(又は亜臨界圧水)の沸点に相当する「擬臨界温度」の近傍で、水のような高密度から蒸気のような低密度に連続的に変化するが、相変化による沸騰現象を伴わない。ボイラーで発生した「蒸気」は566℃以上・22.1MPa以上の高温・高压で気水分離をせずにタービンに送ることができ、発電効率は40%を超える。このようなボイラーの発展に対応する軽水炉の理論的な発展形が、超臨界水で原子炉を冷却してタービンを回す「超臨界圧軽水冷却炉」であり、「第四世代」の軽水炉と位置付けられている。

図1に、沸騰水型軽水炉(BWR)、加圧水型軽水炉

The Development status of Generation IV reactor systems(3); SuperCritical-Water-cooled Reactor (SCWR): Akifumi Yamaji.
(2017年10月30日受理)

■前回タイトル

第2回 高温ガス炉

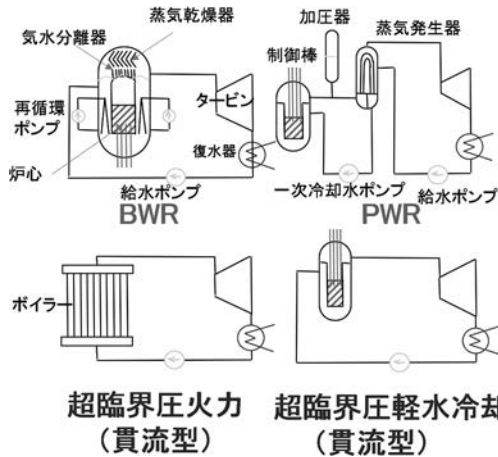


図1：プラントシステムの比較¹⁾

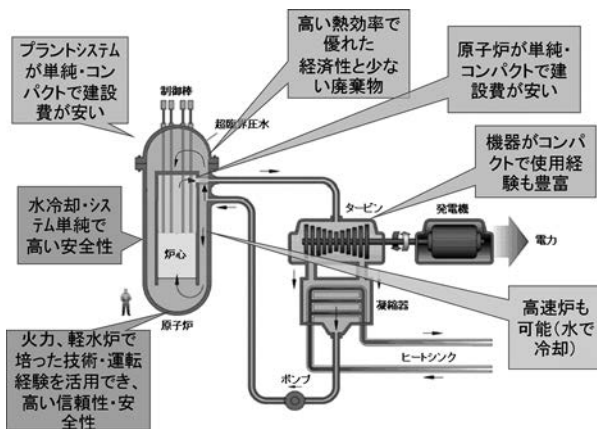


図2：超臨界圧軽水冷却炉の特徴

(PWR), 超臨界圧火力, 超臨界圧軽水冷却炉のプラントシステムを示す¹⁾。超臨界圧軽水冷却炉は, 超臨界圧火力と同様に原子炉冷却材の全量がタービンへと送られ, 復水となった後, 原子炉に戻る「貫流サイクル」である。BWRと比べると気水分離系と再循環系が無く, PWRと比べると蒸気発生器が無く, 加圧器も無い。そのため現行軽水炉に比べてプラントシステムが簡素化, 小型化する^{1~3)}。

タービン系は超臨界圧火力プラントと同様な構成となる。主蒸気の比エンタルピーが高いため, 軽水炉に比べ低圧タービン車室数が減り, 高回転数の小型タービンの採用によりタービン系が簡素化・小型化する。主蒸気流量は軽水炉のおよそ1/8~1/10と小さいため, 主蒸気配管の系統数も削減できる。

これらの超臨界圧軽水冷却炉の特徴を図2にまとめる。これまでにプラント概念, 炉心伝熱流動, 材料・冷却材相互作用に関する研究開発等が行われている。主要な設計概念は概ね運転圧力25MPa, 炉心冷却材の給水温度280℃, 主蒸気温度500℃以上を目標にしており, プラントの熱効率は約44%に達する。炉心部を除き, 主要な機器の使用温度や圧力を現行軽水炉および火力発電プラントの経験範囲内とすることで, 開発要素を最小化する。

Ⅲ. 国内外の研究開発状況

国内では1989年頃から東京大学を中心に世界に先駆けて研究が始まり, 代表的な熱中性子炉の概念はスーパー軽水炉, 高速炉の概念はスーパー高速炉としてまとめられている^{2, 3)}。スーパー軽水炉については, エネルギー総合研究所公募事業で「超臨界水冷却炉の実用化に関する技術開発」が東芝, 東京大学, 九州大学, 日立製作所, 北海道大学の研究グループにより実施された(H12~15年度)⁴⁾。スーパー高速炉については, 文部科学省の原子力システム研究開発事業で, 「軽水冷却スーパー高速炉に関する研究開発」が東京大学, 日本原子力研究開発機構(JAEA), 東京電力, 九州大学の研究グループ(H17~21年度)⁵⁾および東京大学, テブコシステムズ, 九州大学, 東北大学, JAEA, 産業技術総合研究所の研究グループ(H22~25年度)⁶⁾により実施された。また, 文部科学省の革新的原子力システム技術開発公募事業では「放射線環境下での超臨界圧水化学に関する技術開発」が東京大学, JAEA, 電力中央研究所, 日立製作所, 東芝の研究グループ(H14~18年度)で実施され, 文部科学省の原子力システム研究開発事業では「放射線誘起表面活性効果を用いた超臨界圧軽水冷却炉の基盤技術研究」が東京海洋大学, 東京大学, 早稲田大学の研究グループにより実施されている(H27~30年度)⁷⁾。

1. プラント概念の研究開発

(1) 熱中性子炉の燃料・炉心設計

熱中性子炉の燃料には軽水炉と同様な低濃縮ウランが用いられるが, 高温強度に優れる改良ステンレス鋼等が被覆管候補材料として検討されている。また, 超臨界水冷却では亜臨界水冷却のような沸騰遷移に伴う燃料被覆管のバーンアウトやドライアウトは生じないため, 限界熱流束の設計基準がない。そこで, 異常な過渡変化に伴う温度上昇を考慮した定常運転時の被覆管表面最高温度の基準により(多くは650℃を目安に)設計されている。

炉内流動はこれまでに定常時・異常な過渡変化時・事故時の燃料冷却性, 炉物理特性, 安定性, 高温構造設計の簡素化等の観点から検討されてきた。炉内の冷却材温度と密度はそれぞれ約280℃~500℃以上, 1g/cc~0.1g/cc以下まで大きく変化する。そこで, 燃料集合体は多数の水減速棒(又は大型のウォーターチャンネル)を有し, 密度の高い(温度の低い)減速材で中性子を減速する設計となっている。スーパー軽水炉の炉内流動の検討例を図3に示す。主蒸気温度の向上と炉心軸方向の水密度変化に起因する反応度差の低減の観点から, 水減速棒中の減速材は冷却材とは逆向きの下降流とする設計(図3a)や炉心上部で折り返す設計(図3b)等が検討された。また, 炉内構造の簡素化の観点から全ての冷却材/減速

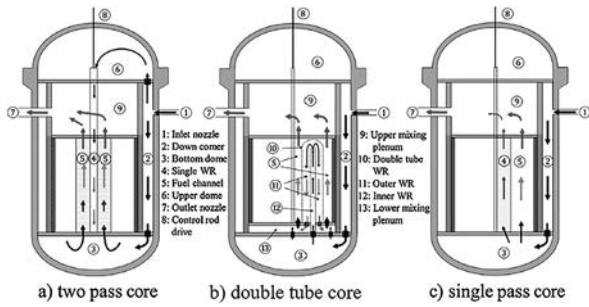


図3：スーパー軽水炉の炉内流動の検討例³⁾

材を上昇流とする設計(図3c)が検討されている³⁾。

いずれの設計でも、圧力バウンダリと温度バウンダリを分離し、機械的負荷の大きな構造材は給水により冷却し、材料強度が問題とならないようにしている。原子炉压力容器はPWR並みの寸法で設計可能になると見込まれている。高温にさらされる原子炉压力容器の冷却材出口配管接続部はスリーブ構造により熱応力の低減を図る。制御棒は主に図3に示したように、炉心上部から燃料集合体内に挿入するPWRと同様のクラスタ型が検討されているが、BWRのように炉心下部から燃料集合体間に十字型制御棒を挿入する設計も検討されている。

(2) 起動・制御・安全性

原子炉系の主要系統の設計例を図4に示す¹⁾。原子炉压力容器と制御棒駆動系はPWRに、原子炉格納容器と安全系(高压補助給水系, 低压注入系, 逃し安全弁/自動減圧系)はBWRに類似となる。

プラントの起動には、炉停止状態から徐々に炉の出力、圧力、温度を上げる変圧起動方式と、超臨界圧まで昇圧してから出力を上げる定圧起動方式が起動系の簡素化・小型化の観点等から検討されている。プラント制御は原子炉出力を制御棒で、主蒸気圧力を主蒸気加減弁で、主蒸気温度を給水流量で制御する。超臨界水は亜臨界水に比べて「水」と「蒸気」の密度差が小さく、その変化も穏やかなため安定に起動・運転できる⁵⁾。

システム内に水面が存在しない、貫流サイクルの安全性確保の基本的な考え方は炉心流量の維持であり、給水流量の低下レベルに応じて安全系が起動する。また、安全系が直ちに起動せずとも燃料が破損に至るような急激な冷却性能の低下や出力上昇がないことが示されている⁶⁾。さらに、自動減圧弁を開放すれば压力容器上部ドームにある冷却材も炉心に向かって流れ、受動的に炉心を冷却する。これらの優れた安全特性により、仮に異常過渡事象中にスクラム失敗事象(ATWS)が発生しても、代替操作なしで安全基準を満たすことが示されている⁷⁾。

受動的な安全系は、図5に示すように、非常用復水器(IC)、自動減圧系(ADS)、炉心補給水タンク(CMT)、重力駆動冷却系(GDCS)、静的格納容器冷却系(PCCS)か

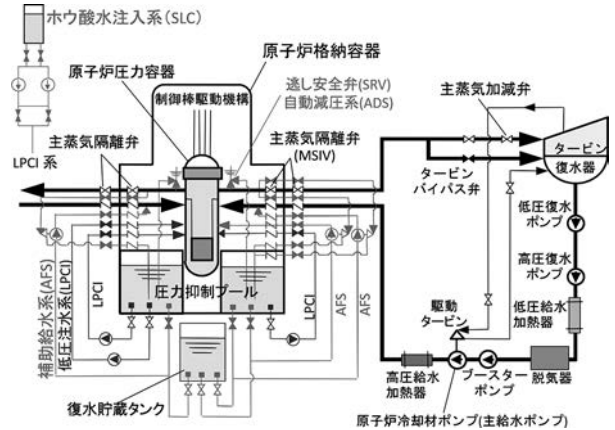


図4：原子炉系の主要系統の設計例¹⁾

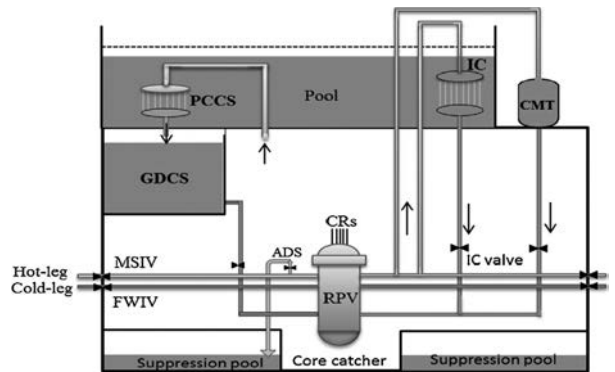


図5：受動的な安全系の設計例⁸⁾

ら構成される設計が検討されている⁸⁾。

(3) 高速炉

超臨界水は相変化しないが、擬臨界温度以上では密度が小さくなるため、同一のプラントシステムで燃料バンドルを熱中性子炉の四角格子から三角格子に稠密化し、冷却材による中性子の減速を低減し、燃料に混合酸化物(MOX)燃料を用いることで高速炉の設計が可能となる。炉心流量が小さく、強力な高压給水ポンプを備えるため、稠密バンドル化に伴う炉心圧力損失の増加は設計上の制約にはならず、高速炉との適合性にも優れている。

国内では、貫流型システムの簡素化とコンパクト化を目標に、軽水冷却スーパー高速炉が研究されている^{5, 6)}。これらの研究では、MOX燃料を用いたシード燃料集合体と主に劣化ウランを用いたブランケット燃料集合体から構成する非均質炉心が研究されている。スーパー軽水炉を例に図3cに示した単一流動パス炉心に相当する簡素な炉内流動、PWRと同等の炉内構造と燃料交換で、PWRを上回る出力密度と主蒸気温度(約500°C)を達成する電気出力1,000MWクラスの大型炉概念が示されている。ナトリウム冷却炉並みに短期間にプルトニウムを増殖する高速増殖炉概念や、マイナーアクチノイド(MA)燃料炉も研究されている。

(4) 炉物理基礎実験

従来の軽水冷却高速炉概念の多くは冷却材中にボイドが発生した際の中性子漏洩率を高めて負のボイド反応度を得るために、炉心径に対して炉心長が短い、扁平炉心を採用していた。しかし、扁平炉心は原子炉压力容器の大型化を伴うため、スーパー高速炉で扁平炉心を採用すると、高压に耐える厚肉の原子炉压力容器の製造が課題となる。

このため、スーパー高速炉では、ブランケット燃料集合体に水素化ジルコニウムを設置している。この炉心概念は、冷却材のボイド時に、シード燃料で発生した核分裂高速中性子を水素化物により減速し、ブランケット燃料の²³⁸Uの共鳴吸収率を高め、冷却材ボイド反応度の悪化を緩和する概念である。本概念の設計と安全解析に資するために、これまでにJAEAの高速炉臨界実験装置(FCA)を用いた実験により、水素化物に関する炉物理基盤データが得られている。

2. 炉心伝熱流動に関する研究開発

超臨界圧軽水冷却炉の主蒸気温度を高温度化し、安全性を評価するには、定常運転時や過渡条件下の燃料被覆管温度を精度良く求める必要がある。このとき、燃料集合体内のサブチャンネル間の冷却材クロスフローや、燃料棒を支持するスペーサーにより生じる乱流が圧力損失や伝熱に及ぼす影響を評価する必要がある。また、冷却材喪失事故時を想定した超臨界流体のサブプレッションプールへの放出時における凝縮挙動や気中放出特性(臨界流特性)を評価する必要があり、超臨界圧での伝熱劣化や、亜臨界圧に減圧する際の限界熱流束の評価も必要である。このため、実験により、設計や解析に利用できるデータベースを整備し、相関式を作成/改良する必要がある。

実機の高圧高温の通常運転時から事故時までに想定される様々な条件をカバーする系統的な実験を行うことは容易でない。そこで、これまでに、模擬流体に超臨界水よりも臨界圧力と擬臨界温度が低く、実験が容易なフロンガス的一种である HCFC22 や HCFC123 を用いた基礎伝熱特性試験、燃料棒群特性試験、亜臨界圧限界熱流束試験および放出・凝縮特性試験が九州大学で実施されている。さらに、これらの試験結果の検証用基盤データがJAEAの超臨界水ループを用いた試験により得られている。これらと並行してJAEAの開発したACE-3D数値流体力学解析コードを超臨界圧条件で使用するための改良が行われ、これらの実験データと解析結果の比較から、燃料集合体内のクロスフローを含めた熱流動現象を精度よく予測できることが示されている。

一方、放射線誘起表面活性(RISA)効果により、放射線照射下で基盤材料および酸化被膜熱伝達表面の電氣的相互作用により熱伝達率の向上や防食効果が生じることが

ら、RISAを用いた基盤研究が実施されている⁷⁾。

3. 材料・冷却材相互作用に関する研究開発

炉心材料には優れた高温クリープ強度、超臨界水および亜臨界水環境化での耐食性、耐応力腐食割れ性(低いSCC感受性)が求められ、これまでに改良ステンレス鋼やニッケル基合金等の候補材料が検討されている。これらのうち、スーパー高速炉の被覆管候補材料に、ナトリウム冷却炉用に開発されたオーステナイト鋼(PNC1520)に微量のジルコニウムを添加し、耐食性を向上させた15Cr-20Ni改良オーステナイト鋼が開発されている。

この管材・板材の超臨界水中の腐食試験が東北大学で実施された。酸化皮膜成長予測の基盤データが取得され、5万時間の酸化被膜の成長を予測し、酸化速度の観点から、適切な冷間加工と組み合わせた15Cr-20Ni改良オーステナイト鋼が被覆管材として性能を有する見込みが得られている。今後の課題に、被覆管製造方法の最適化、高温強度および腐食挙動の長時間データの拡充、照射環境下の超臨界水中での材料腐食試験、照射環境下燃料棒健全性試験等が挙げられている。

超臨界圧軽水冷却の熱中性子炉は断熱した水減速棒を用い、水密度が炉心上部で低下するのを防ぐ。そこで、薄肉の断熱材で管内の水の密度低下を防ぐために熱伝導率がジルコニアの20分の1程度の優れた断熱性能をもつイットリア安定化ジルコニアが開発され、その強度や超臨界水中の腐食挙動等の性能がまとめられている。

放射線照射下の水化学研究は、構造材料の長期健全性確保(SCC低減等)や作業従事者の被ばく量低減の観点から重要である。そこで東京大学で、炉内の腐食環境評価に必要な、超臨界水の放射線分解反応や材料-水界面腐食への放射線効果等の基盤的知見の蓄積と共に、腐食環境モニタリングの技術開発も実施された。また従来は、超臨界水環境下では炉内材料の酸化物が燃料棒表面に析出することが懸念されていたため、流水環境での模擬試験体(複数のステンレス鋼やニッケル基合金)の質量移行試験が実施された。その結果、昇温過程での擬臨界温度近傍における酸化物の析出は認められないことが示されている。

産業技術総合研究所では、超臨界圧下で常温から高温に至るまでの広範な密度条件における各種主要金属酸化物の純水中への溶解度の推算システムが開発され、必要な溶解度データが得られている。

4. 国外の研究開発状況

経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)が事務局としてとりまとめる第4世代原子力システム国際フォーラムの6つの炉概念のうちの一つに熱中性子炉と高速炉がいずれもSuperCritical-Water-cooled Reactor

(SCWR)として選ばれており、カナダ、欧州原子力共同体、日本、ロシア、中国が参加している。これらの活動は年次報告書(Annual Report)にまとめられている。

国際原子力機関(IAEA)のCoordinated Research Project(2008~2012, 2014~)では伝熱流動の実験・解析データの共有および解析ツールのベンチマーク等をテーマに、10カ国(カナダ、中国、ドイツ、ハンガリー、インド、イタリア、ロシア、英国、ウクライナ、米国)から12の機関が参加している。また、伝熱流動および材料・水化学をテーマとするTechnical Meetingがこれまでに5回開催されている。

各国で研究開発されているSCWRの多くは熱中性子炉だが、ロシアは高速/共鳴スペクトル炉を研究開発している。日本は唯一、熱中性子炉と高速炉の両方を研究開発している。カナダは重水減速超臨界圧軽水冷却圧力管型貫流直接サイクル炉を研究開発している。SCWRの国際シンポジウム(ISSCWR)は2000年の第1回開催(東京大学)以来、日本、中国、ドイツ、カナダ、フィンランドでこれまでに8回開催され、情報交換が行われている。

IV. 今後の展望

これまでの国内外の研究開発により、超臨界圧軽水冷却炉のプラント概念、炉心伝熱流動基礎データ、燃料被覆管や断熱材の高温腐食データ、水化学と腐食生成物移行データ等が整備されており、熱流動設計の妥当性と材料面での成立性も見通せるようになった。これらにより研究開発上の不確定性が低減し、今後の開発に伴うリスクが大幅に低減した。軽水炉の資本費の低減は原子力発電の他電源との競争力向上、地球温暖化問題対策としての原子力発電の規模拡大に必須である。この他に、増殖性能の向上、熱から高速スペクトルまでの柔軟な炉心運用、MA燃焼、小型炉の設計も可能である。

今後は、過酷事故対策も含めたさらなる安全性の検討、伝熱流動予測精度の向上、応力腐食割れを含む中性

子照射環境下での材料挙動の把握が重要と考えられる。尚、貫流直接サイクルシステムの安全確保の原理は流量の確保であり、軽水炉の水位の確保より単純である。流量の計測方法も簡単で、過酷事故時にも誤表示の恐れが小さい。過酷事故対策は軽水炉のそれを参考に行うことができる。また、原子炉系統が単純であるので、アクシデントマネジメントも単純化する。これらにより優れた安全性が見込まれている。

— 参考資料 —

- 1) 岡芳明, 越塚誠一 “高温高性能軽水冷却原子力発電プラント 貫流型超臨界圧軽水冷却炉の概念” 日本原子力学会誌, Vol. 44, No. 8, 600-605(2002).
- 2) Y. Oka, S. Koshizuka, Y. Ishiwatari, A. Yamaji, “Super Light Water Reactors and Super Fast Reactors,” ISBN 978-1-4419-6035-1, Springer (2010).
- 3) Y. Oka, H. Mori et al., “Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors,” ISBN 978-4-431-55025-9, Springer (2014).
- 4) 超臨界圧水冷却炉の実用化に関する技術開発 <https://www.iae.or.jp/KOUBO/innovation/theme/h12/H12-3.html>
- 5) 「軽水冷却スーパー高速炉に関する研究開発」平成17-21年度文部科学省原子力システム研究開発事業成果報告書(平成22年).
- 6) 「軽水冷却スーパー高速炉に関する研究開発」平成25年度文部科学省原子力システム研究開発事業成果報告書(平成26年).
- 7) 波津久達也, 王雨辰, 井原智則, 賞雅寛而, 阿部弘亨「放射線誘起表面活性効果を用いた超臨界圧軽水冷却炉の基盤技術研究」日本原子力学会2017年春の年会口頭発表予稿集2G22(2017).
- 8) Sutanto and Y. Oka, “Passive safety system of a super fast reactor,” Nuclear Engineering and Design, 286, 117-125 (2015).

著者紹介

山路哲史 (やまじ・あきふみ)

早稲田大学共同原子力専攻
(専門分野/関心分野)超臨界圧軽水冷却炉, 粒子法, 原子炉過酷事故解析, 燃料ふるまい解析



第2回 中性子回折法による材料強度研究

日本原子力研究開発機構 諸岡 聡, 鈴木 裕士

中性子回折法は、中性子線の優れた透過能を活かすことで、数センチメートルオーダーの材料深部の応力・ひずみを非破壊で測定できる唯一の測定技術であり、種々の機械構造物の製品開発や機械設計、材料開発や既存材料の信頼性評価に大きく貢献できる。本講座では、中性子回折法による応力・ひずみ測定技術の原理および工学回折装置の特徴について述べるとともに、その応用例として、溶接部の残留応力測定、およびステンレス鋼の変形挙動その場観察について紹介する。

KEYWORDS: *neutron diffraction, stress, strain, deformation, non-destructive evaluation*

I. はじめに

中性子回折法は、中性子線の優れた透過能を生かすことで、数センチメートルオーダーの材料深部の応力・ひずみを非破壊で測定できる唯一の測定技術として知られており、種々の機械構造物の残留応力測定を通して、高性能、高信頼性、長寿命化を目指した製品開発や構造設計に大きく貢献している¹⁾。一方、材料強度や破壊メカニズムを議論するうえでは、単に残留応力を測定するだけでなく、マイクロひずみや集合組織、転位密度等のマイクロ組織因子を定量的に評価することが重要である。これらの情報を得るうえで、中性子回折法は有効な手段であり、その優れた透過能から、マイクロ組織因子のバルク平均と力学特性との関係を求めて、材料の変形機構や強度発現機構を議論するのに適している。このように、中性子回折法は、残留応力に基づく機械部品等の健全性評価だけでなく、材料の機械的特性や機能性向上を目指した材料工学研究などへの応用が期待されている²⁾。

本稿では、中性子回折法によるひずみ測定原理などの基礎を説明するとともに、それを利用した最近の研究例について紹介する。

II. 中性子回折法による応力測定技術

1. 中性子回折法によるひずみ測定

結晶粒内には原子が規則正しく整列しており、これら原子は多数の平行な面(格子面)に属していると考えられることができる。波の性質を持つ中性子は、個々の原子核に当たるとあらゆる方向に散乱されるが、式(1)に示すBraggの回折条件式を満足する場合に、それらの散乱中性子線が同一位相になって相互に干渉し回折線を生じる。

$$2d_{hkl}\sin\theta_{hkl}=n\lambda \quad (1)$$

ここで、 d_{hkl} はある回折面(hkl)の格子面間隔、 λ は入射中性子線の波長、 n は回折次数を表わす。また、 θ_{hkl} はブラッグ角を表わし、 $2\theta_{hkl}$ を回折角と称する。この回折線を測定する方法には、角度分散法とエネルギー分散法(飛行時間法)がある。角度分散法は、図1(a)に示すように、Braggの回折条件式(1)により決定される回折角 $2\theta_{hkl}$ を測定するための装置である。すなわち、研究用原子炉炉心における核分裂連鎖反応により連続して発生する白色の熱中性子(定常中性子)から、モノクロメータ結晶を介して単一波長 λ の中性子のみを抽出し、測定試料の hkl 面によって回折される中性子の個数と回折角 $2\theta_{hkl}$ を検出器によって観測する装置である。一方、エネルギー分散法は、Braggの回折条件式(1)により決定される波長(エネルギー) λ を測定するための装置である。図1(b)に示すように、広範のエネルギーを有する中性子線を試料に照射し、中性子線のエネルギー毎に、中性子線の発生から試料での回折および計測までの時間を測定する飛行時間法(Time-of-Flight method: TOF法)を測定原理としている。

Recent development of nano/micro-scale analytical techniques for nuclear materials (2); Mechanical Strength Research using Neutron Diffraction: Satoshi Morooka, and Hiroshi Suzuki.

(2018年1月13日 受理)

■前回タイトル

第1回 3D-AP/ウィーク・ビームSTEMによるナノ組織解析

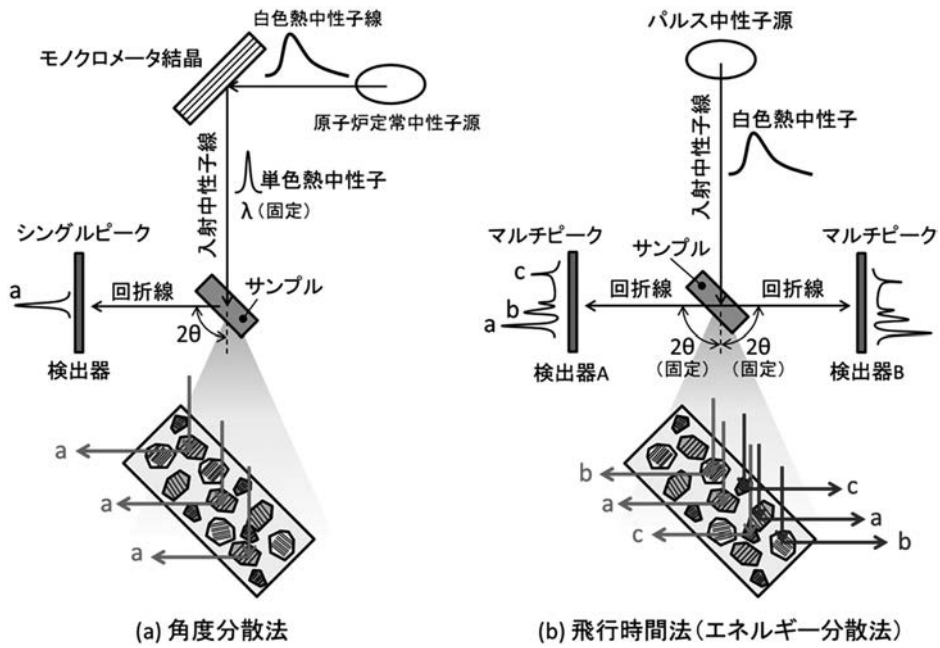


図1 中性子回折法の原理

中性子回折法による応力・ひずみ測定技術は、上述した方法により得られる回折線のピークシフトからひずみを導出する。角度分散法においては得られた回折角の変化、エネルギー分散法においては得られたエネルギー(波長)の変化からひずみが求められる。簡単には、測定した回折角や波長を用いて式(1)より d_{hkl} を求め、次式によりひずみを求める。

$$\epsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl} - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d_{hkl}}{d_0} \quad (2)$$

ここで、 d_0 は基準となる格子面間隔を表わしている。すなわち、 d_0 を無ひずみ状態の格子面間隔とすれば、残留ひずみが求められ、また、材料の変形中の格子面間隔の変化を測定すれば、材料の変形挙動をミクロな視点で評価することができる。

一般的には、試料の直交三方向に格子ひずみ ϵ_{ii} ($i=1, 2, 3$) を測定することで、式(3)に示す一般化されたフックの式により、直交三方向の応力成分 σ_{ii} を求めることができる。

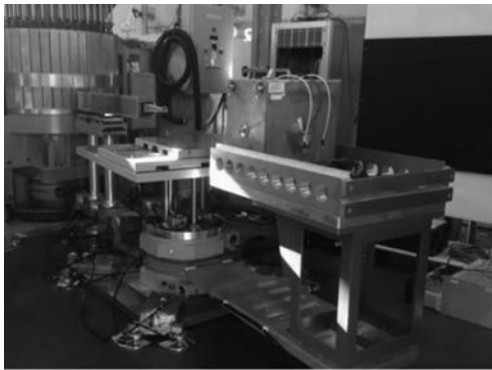
$$\sigma_{ii} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})} \left\{ \epsilon_{ii} + \frac{\nu_{hkl}}{(1 - 2\nu_{hkl})} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \right\} \quad (3)$$

ここで、 E_{hkl} は回折弾性係数、 ν_{hkl} は回折ポアソン比である。この E_{hkl} や ν_{hkl} は結晶方位依存性を示すため、機械的弾性定数とは異なる点に注意が必要である。一方、TOF法においてリートベルト法による全回折面の平均的なひずみ解析を用いた場合には、機械的弾性定数を用いることもできる。

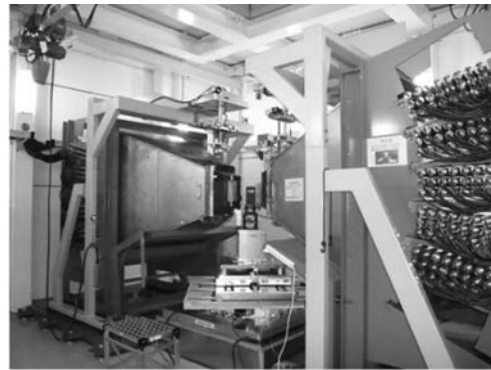
2. 中性子回折法により得られるミクロ組織因子
 中性子回折法により得られる回折パターンには、上述した応力やひずみ以外に、材料組織に関する多くの情報が含まれている。例えば、回折パターンから材料中どのような相がどれだけ含まれ、それらがどのような結晶構造をしているかが分かる。また、外場(応力・熱)を加えた際の回折パターンの変化を評価すれば、結晶構造の変化や相変態の様子を「その場観察」することが可能になる³⁾。さらに、材料の方位に対する回折強度分布を測定すれば、その集合組織を定量的に評価することができる⁴⁾。

集合組織測定では、オイラークレードルと呼ばれる2軸ゴニオメータ上に試験片を設置し、試験片を回転させながら試料方位に対する回折強度分布を測定する。一般的には3つ以上の回折面の集合組織を測定し、そこから得られる結晶方位密度関数(ODF: Orientation Distribution Function)から集合組織状態を定量的に評価する。角度分散法では、一つ一つの回折線について細かく $\chi\phi$ スキャンを行うことで、測定に長時間を要するものの厳密な集合組織を得ることができる。TOF法では、面積の広い検出器を活かすことで、集合組織の迅速測定が可能である⁵⁾。

一方、回折線の幅には、材料に含まれる転位、積層欠陥、ドメインサイズなどの情報が含まれている。X線回折法においては、プロファイル解析として古くから普及している測定技術であるが、最近では中性子回折法への応用も行われている。特に、Ungárらが提案したCMWP(Convolutional Multi Whole Profile Fitting)法を用いることで、TOF法による転位密度の定量評価に関する研究が進められている⁶⁾。



(a)RESA-1



(b) TAKUMI

図2 RESA-1(JRR-3)とTAKUMI(J-PARC MLF)の外観

3. 工学回折装置

現在、日本国内には、JRR-3 ガイドホールに角度分散型の中性子応力測定装置 (RESA-1) が 1 台、J-PARC MLF に TOF 型の工学材料回折装置 (TAKUMI) が 1 台設置されている。以下に、それぞれの装置の特徴を簡単に紹介する。

RESA-1 は JRR-3 ガイドホールの T2-1 ポートに設置されている⁷⁾。図 2 (a) に RESA-1 の外観を示す。RESA-1 では、Si(311) の非対称湾曲モノクロメータから得られる単一波長 (おおよそ 0.15nm~0.20nm の範囲で選択可能) の中性子線を試料に照射し、そこから回折する中性子線の回折角を一次元検出器により測定する角度分散型回折装置である。回折計には、試料台面積 550mm×550mm の XY ステージ、耐荷重約 700kgf の Z ステージが設置されており、水平面内 (XY 方向) に ±250mm、垂直方向 (Z 方向) に約 300mm 移動できる。また、環境装置として最大荷重 10kN の低温引張試験機 (5K~300K) や集合組織測定用にオイラークレードルなどを利用できる。

J-PARC MLF には、ビームライン No.19 に TOF 型の工学材料回折装置「匠」が設置されている²⁾。図 2 (b) に匠の外観写真を示す。加速器周期 25Hz で発せられた白色のパルス中性子は、スーパーミラーガイド管を通じて実験ハッチ内に導入される。4 象限スリットによって成形された中性子線は、回折計に設置された試料に照射され、 $2\theta = \pm 90^\circ$ に設置された $\pm 15^\circ$ の見込み角を有する検出器によって回折パターンが測定される。回折計には、試料台面積 800mm×800mm、耐荷重 1,000kgf の XYZ の 4 軸ゴニオメータが設置されている。水平方向 (XY 方向) には ±300mm、垂直方向 (Z 方向) には 800mm 移動できる。匠の装置分解能は最高で 0.2% 以下であり、RESA-1 よりも高いひずみ分解能を有する。また、環境装置として、高温引張圧縮試験機、低温引張圧縮試験機、熱膨張計、疲労試験機などが整備されている。

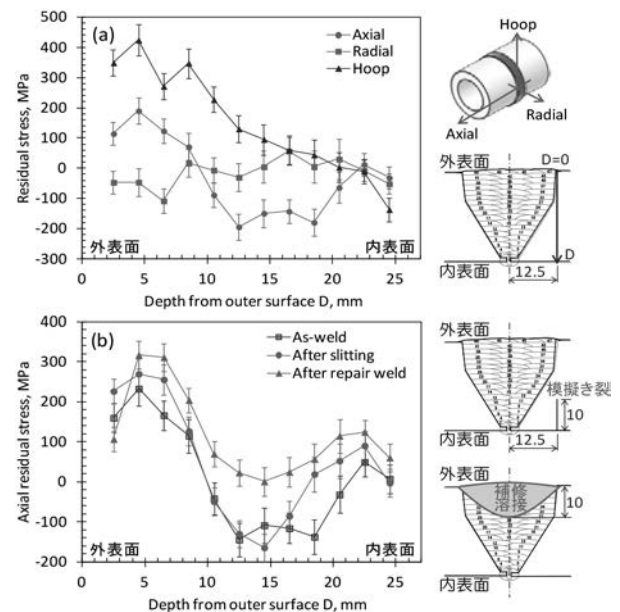


図3 (a) 中性子回折法により測定した大口徑配管溶接部の残留応力分布、および、(b) 模擬き裂導入前後、および模擬補修溶接施工前後の軸方向残留応力分布の変化⁷⁾

III. 応用例

1. 溶接部の残留応力測定

溶接は古くから利用されている接合技術の一つであり、未だに多くの構造物に利用されている。溶接熱影響による溶融・凝固過程に発生する残留応力は、応力腐食割れや疲労強度低下の原因になるなど、溶接構造物の強度信頼性に影響を及ぼす。そのため、その信頼性や健全性を確保するうえで、溶接残留応力を正確に把握することが重要である。また、最近では熱弾塑性理論に基づく非線形有限要素解析技術の高度化により、溶接熱影響部における相変態なども含めた溶接残留応力解析も可能になっているが、この解析技術に用いる仮定の妥当性を検討するうえでも、残留応力実測値との比較が必要とされている。このような背景から、溶接構造物の残留応力測

定は、中性子応力測定における最も多いニーズの一つである。

図3は、原子炉配管を模擬した直径500mm、長さ760mm、肉厚28mmの大型溶接配管溶接部の残留応力分布測定結果である⁷⁾。ここでは、配管溶接部近傍の内表面側に模擬き裂を導入する前後の残留応力変化や、配管溶接部の外周部に補修溶接を施工する前後の残留応力変化を実測した。図3(a)は、中性子回折法により測定した溶接までの残留応力分布を示している。配管軸方向には外表面側に強い引張残留応力、板厚内部に圧縮残留応力、内表面側に弱い引張残留応力を示すなど、これまでに有限要素解析などにより求められてきた典型的な残留応力分布傾向を示した。一方、配管溶接部近傍の内表面側に長さ30mm、深さ10mm、幅0.5mmの模擬き裂を導入すると、図3(b)に示すように、模擬き裂導入による軸方向応力の緩和(D>16の範囲)が測定された。また、原子炉配管の補修溶接を模擬するため、外表面溶接部の一部を削り取り、そこに肉盛溶接したあとに発生する残留応力分布を測定した結果、軸方向残留応力分布が全体的に引張方向にシフトする様子が観察された。

以上のように、中性子回折法を用いれば、大型構造物の残留応力測定が可能であり、また、非破壊測定技術であるゆえ、き裂導入や補修溶接などによる応力変化も実測できる。最近では、ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation)の研究炉OPALにある中性子応力測定装置KOWARIにおいて、重さ630kgの大口径溶接配管の残留応力測定に成功しており⁸⁾、さらに、Wooらによれば、適切な波長の選択により、板厚80mmの溶接構造物の応力測定も可能であることが報告されている⁹⁾。また、最近では、温度変化に伴う残留応力変化の実測だけでなく、例えば、外力負荷に伴う内部応力変化の実測など、部材の使用環境を模擬した応力評価なども行われている。ここで得られた結果は、シミュレーション技術の高度化や構造設計のための支援データとして活用が期待されている。

2. ステンレス鋼の変形挙動その場観察

構造材料の用途に応じた力学特性を得るためには、化学組成の適切な選択に加えて、最適なマイクロ組織を作り込むなど、冶金学的な制御が重要である。そこで、このマイクロ組織の変化を定量評価するとともに、その力学特性との関係を明確にすることが、強度特性に優れた材料の創製に必要である。中性子回折法によるその場測定は、中性子線の高い透過能を活かすことで、直接観察が困難な、変形中の鉄鋼材料における弾性ひずみ、転位密度、集合組織のバルク平均を定量評価できる測定技術として知られている¹⁰⁾。

図4(a)は、J-PARCの中性子回折計の大型試料ステージ上に万能試験機を設置した様子である。例えば、

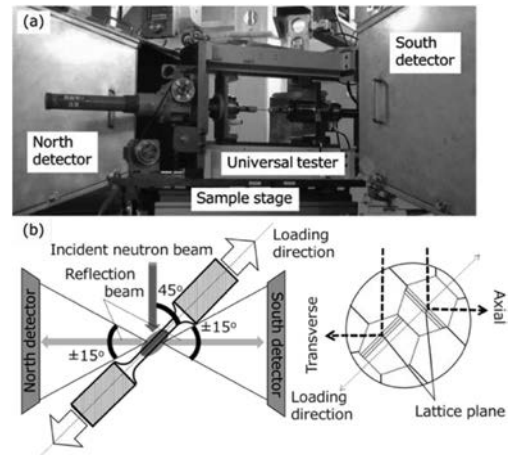


図4 (a)引張試験の外観図、(b)中性子回折法によるその場測定の概略図¹⁰⁾。

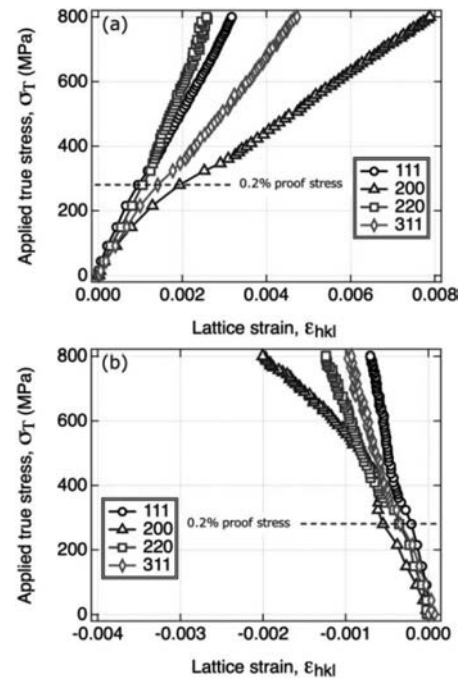


図5 中性子回折法によるその場測定で得られた外力と格子(弾性)ひずみの関係：(a)Axial方向、(b)Transverse方向。

引張試験を考えた場合、図4(b)に示すように、入射ビームに対して $\pm 90^\circ$ 方向に設置された検出器により、引張軸方向(Axial)及びその直交方向(Transverse)の回折パターンを同時に測定することができ、その結果から、材料のマイクロ組織と力学特性の変化を定量評価することができる¹⁰⁾。図5は、111回折から311回折の格子ひずみの変化と外力との関係を整理した結果であり、 $\{hkl\}$ 結晶粒群により異なった傾向を示した。ここで、 $\{hkl\}$ 結晶粒群とは、Axial方向に散乱ベクトルの向く結晶粒の集合体を示す。多結晶体では、 $\{hkl\}$ 結晶粒群の回折弾性係数がそれぞれ異なるため、弾性域のひずみ変化量に差が現れる。これが弾性異方性であり、この傾向は、マイクロメカニクスによって説明できる。外力が0.2%耐力に達

すると、それぞれの回折面のひずみ変化の差はより大きくなる。これは、 $\{hkl\}$ 結晶粒群ごとに異なる不均一な塑性変形を生じた結果であり、その結果、例えば $\{220\}$ 結晶粒群は、 $\{200\}$ 結晶粒群より大きな引張応力を担うことになる。このように、マクロには単純な弾塑性変形を示す単相多結晶材料であっても、ミクロな視点で見れば、結晶粒群ごとに異なる変形挙動を示すことが分かる。一方、塑性変形により生じる結晶粒単位のミクロな変位不整合は、材料内部の不均一な内部応力を発生させる。この内部応力は、転位の動きに対して抵抗になるため、ステンレス鋼の初期の大きな加工硬化を生み出す要因になると考えられている。

以上のように、中性子回折法によるその場測定は、バルク平均のミクロ組織変化の定量評価に有効な手段であり、本測定技術を用いることで、鋼の変形機構や強度発現機構の理解につながる重要な知見を得ることができると考えられている。

IV. まとめ

本稿では、中性子線による応力・ひずみ測定技術および工学回折装置の特徴について、応用例を含めて紹介した。中性子線の優れた透過能から、溶接構造物や自動車エンジン部品など、大型かつ複雑形状部品の内部の残留応力測定だけでなく、転位密度、集合組織などのミクロ組織因子に基づく材料強度研究などに利用されてきた。日本国内では、JRR-3およびJ-PARC MLFに設置されている2台の工学回折装置を利用できる。今後、これら2台を相補的に利用することにより、角度分散法とTOF法のそれぞれの特徴を活かした材料工学研究が行われると期待される。さらに、最近では小型中性子源を利用した集合組織測定や相分率測定の開発も進められており、これらの応用も期待される。

このように中性子回折法は、残留応力測定はもちろんのこと、材料の変形挙動評価などの目的に応じて使い分け、それぞれで得られた結果を製品設計や品質保証さらに、学術研究に役立てていくことが重要である。

— 参考資料 —

- 鈴木裕士, 秋田貢一, 回折法による材料評価の新しい展開-3. 中性子応力測定の新展開-, 材料, 58, 1051-1057, (2009).
- S. Harjo, T. Ito, K. Aizawa, H. Arima, J. Abe, A. Moriai, T. Iwahashi and T. Kamiyama, Current Status of Engineering Materials Diffractometer at J- PARC, Materials Science Forum, 681, 443-448, (2011).
- M. R. Daymond and H. G. Priesmeyer, Elastoplastic deformation of ferritic steel and cementite studied by neutron diffraction and self-consistent modelling, Acta Materialia, 50, 1613-1626, (2002).
- P. G. Xu, K. Akita, H. Suzuki, N. Metoki and A. Moriai, Establishment and Optimization of Angle Dispersive Neutron Diffraction Bulk Texture Measurement Environments, Materials Transactions, 53, 1831-1836, (2012).
- Y. Onuki, A. Hoshikawa, S. Sato, P. G. Xu, T. Ishigaki, Y. Saito, H. Todoroki, M. Hayashi, Rapid measurement scheme for texture in cubic metallic materials using time-of-flight neutron diffraction at iMATERIA, Journal of Applied Crystallography, 49, 1579-1584, 2016.
- 友田 陽, 佐藤 成男, ステファヌス ハルヨ, 中性子・X線回折ライブラリ解析の最近の進歩, 鉄と鋼, 103, 73-85, (2017).
- 鈴木 裕士, 勝山 仁哉, 飛田 徹, 森井 幸生, 中性子回折法による大口径配管溶接部の残留応力測定—残留応力分布に及ぼす SCC き裂進展および補修溶接の影響—, 29, 294-304, (2011).
- Bragg Peaks Newsletters, Issue 23, Bragg Institute, ANSTO (2012).
- W. Woo, G.B. An, V.T. Em, A.T. DeWald, M.R. Hill, Through-thickness distributions of residual stresses in an 80mm thick weld using neutron diffraction and contour method, Journal of Materials Science, 50, 784-793, 2015.
- しなやかで強い鉄鋼材料—革新的構造用金属材料の開発最前線, 一第2節 量子線回折による弾塑性変形挙動の解析—, 友田 陽, エヌ・ティー・エス, 東京, 2016.

著者紹介



諸岡 聡 (もろおか・さとし)

日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター
(専門分野/関心分野) 中性子回折法による変形・相変態挙動解析/中性子小角散乱法



鈴木裕士 (すずき・ひろし)

日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター
(専門分野/関心分野) 中性子ビーム技術を利用した材料工学研究/量子ビーム科学と建築・土木工学の学際連携

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7回 高エネルギー領域への挑戦

九州大学 執行 信寛

高エネルギー加速器研究機構 岩瀬 広

日本原子力研究開発機構 岩元 洋介, 佐藤 達彦

数十 MeV 以上の高エネルギー粒子加速器施設の核設計における放射線輸送計算の高精度化に向けて、実測データを用いた計算コードの精度検証及び核反応モデルの改良、評価済み高エネルギー核データライブラリの利用等が重要となる。本稿では高エネルギー領域の中性子や照射損傷に関する核データの測定例と国内で開発されている粒子・重イオン輸送計算コード PHITS の進展について概観する。

KEYWORDS: *High Energy, Accelerator, Proton, Heavy Ion, Neutron, Simulation, PHITS*

I. はじめに

核反応断面積等の推奨値を纏めた JENDL (日本), ENDF (米国), JEFF (欧州) 等の評価済核データライブラリは、原子力工学の基礎を支えるデータベースの一つである。しかし、これらのライブラリの開発は、主に核分裂炉や核融合炉の設計に用いられることを念頭に実施されてきたため、反応粒子の種類やエネルギー範囲に制限が設けられている。例えば、我が国の汎用ライブラリである JENDL-4.0 のエネルギー上限値は 20MeV である。また、整備の対象は中性子反応のデータである。しかし、以下に述べる通り、加速器を用いた種々のアプリケーションの開発には更に高いエネルギーの核反応に対するデータが必要となる。また中性子のみならず、陽子をはじめとする荷電粒子反応のデータが必要である。

例えば、原子炉で発生する長寿命核廃棄物の処理方法の一つとして、大強度陽子加速器と未臨界炉を組み合わせた加速器駆動未臨界システム (Accelerator Driven System: ADS) が提案されている。このシステムは、GeV 程度の高エネルギー陽子反応により中性子を効率よく発生させ、その中性子による核変換により、高レベル放射性廃棄物の減容化を図るものである。このシステ

ムの設計や検証を行うためには、高エネルギー陽子等による中性子生成量、エネルギースペクトル等のデータが不可欠である。そのため世界で実験やシミュレーション研究が行われてきた。日本においても九州大学の研究グループが中心となり、3GeV までの陽子入射中性子生成断面積の測定が世界に先駆けて実施された¹⁾。さらに、3GeV までの陽子・中性子に対する核反応データを収録した特殊目的ファイル JENDL/HE-2007²⁾ が作成された。

また、国際協力で進められている核融合炉(材料)研究の一環として、40MeV 重陽子加速器中性子源施設 (IFMIF) の建設が計画されている。この施設設計に必要とされる 150MeV までの陽子、中性子、重陽子の核データライブラリが IAEA 主導で各国の協力の下に FENDL-3³⁾ として整備された。

高エネルギー粒子のデータは医療や宇宙線に関わる分野においても必要である。例えば粒子線がん治療では、体の深い部分にあるがんに対して、核子あたり数 100MeV 以上陽子や炭素等を照射する方法が用いられる。今後なるべく低線量での効果的な治療のために、陽子や重イオンと物質中の原子核との反応で発生する二次粒子生成量等の情報が求められている。さらに、宇宙ステーション、人工衛星や航空機は、宇宙線や大気上層で生成される高エネルギー粒子に晒されるため、搭乗員への影響のみならず搭載電子機器のメモリの情報が反転するソフトエラーという現象が発生することが知られている。この現象を解明のため高エネルギー粒子が半導体と起こす反応の知見が重要である。

また、高エネルギー加速器の構造材等の寿命を評価す

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need (7); Challenge to High Energy Area: Nobuhiro Shigyo, Yosuke Iwamoto, Hiroshi Iwase, Tatsuhiko Sato.

(2018年2月5日 受理)

■前回タイトル

第6回 核データの利用のために

るために、放射線による照射損傷の見積りで、弾き出し損傷量というデータの整備が期待される。

高エネルギー核反応は複雑で、生成される二次粒子は多種多様である。そのため核反応モデルに基づくシミュレーションの役割は非常に大きい。施設の遮蔽設計や照射対象への線量予測には、原子核反応以外に人体や建物等の複雑な体系を模擬し中性子フルエンスや線量を算出できるようにした PHITS, MCNP, GEANT4, FLUKA, MARS, EGS, SuperMC などのシミュレーションコードが利用されている。しかし、精度検証が進んだ部分とまだ不十分な部分があるのが現状である。また、高エネルギー核反応を記述できる単一モデルが望まれるがまだ存在しないため、複数の核反応モデルを適切に組み合わせて使用する必要がある。

モデルの検証を行うためには、実際にデータを測定することが不可欠である。本連載の第2回⁴⁾で数 MeV 以下の共鳴領域の中性子核データの重要性が述べられているが、高エネルギー領域でも中性子のデータは核反応モデルの高度化に重要な役割を果たす。このため日本では高エネルギー領域の中性子測定が積極的に行われている。

この回では、高エネルギー領域での核データ測定例とシミュレーションの進展について述べる。

II. 核データ測定

1. 国内の主な実験施設

高エネルギー領域の核データ測定には加速器が不可欠のツールである。現在国内の核データ測定に利用可能な主な加速器施設を表1に示す。

この他にも若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン、京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器やビームエネルギーが低いものの九州大学加速器・応用ビーム加速器センタータンデム加速器などでも核データ測定が可能である。ここではシミュレーションと関連のある測定例として、HIMAC と RCNP での中性子測定、京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器でののはじき出し断面積測定に

表1 国内の主な高エネルギー核データ測定可能な施設

施設	加速粒子	最大エネルギー
量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所 TIARA	陽子	90MeV
理化学研究所・仁科加速器研究センター RIBF	重イオン	25MeV/u
量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所 HIMAC	陽子	200MeV
量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所サイクロトロン	重イオン	800MeV/u
大阪大学核物理研究センター (RCNP)リングサイクロトロン	陽子	80MeV
	重イオン	15MeV/u
	陽子	400MeV
	重イオン	100MeV/u

ついて述べる。

2. HIMAC での中性子測定

医療用重イオン加速器である HIMAC では、昼は治療、夜は様々な用途の実験に利用されている。粒子線がん治療では、長期的に二次中性子による二次被ばくのリスクを検討することが望ましいとされる。1MeV 付近の中性子は放射線荷重係数が高く、線量への寄与が大きい。そこで、重イオンビームを人体や構造物中の元素に照射して生成される中性子エネルギースペクトルが測定されている。

中性子のエネルギーは飛行時間(TOF)法で測定し、中性子検出器には有機液体シンチレータが使用される。数 100keV から数 100MeV の広いエネルギー範囲の中性子を測定するため2種類の大きさのシンチレータを準備し、15° から 90° まで6方向に設置する。個体標的の作成が困難な窒素や酸素をビームにし、固体炭素標的に照射する場合もある。さらに標的と検出器の間に長さ約 1m の鉄のブロックを置き標的から直接検出器に入る中性子を遮断し、床等から散乱するバックグラウンド中性子の測定を行う。

測定例として、100MeV/u 酸素ビームを炭素標的に照射した時の中性子エネルギースペクトルの測定結果と PHITS, FLUKA, Geant4 による計算結果を図1に示す⁵⁾。この例では、PHITS はエネルギースペクトルをおおそ再現するが、FLUKA や Geant4 は測定値の再現性が中性子のエネルギーによっては低い。これはコードが採用している核反応モデルが異なるためであり、現状ではコードの精度評価と予測精度を吟味した上でコードを利用することになる。

HIMAC や隣接のサイクロトロンでは、中性子の他に荷電粒子エネルギー分布や軽粒子生成断面積等シミュレーション検証に必要な核データの測定も行われている。

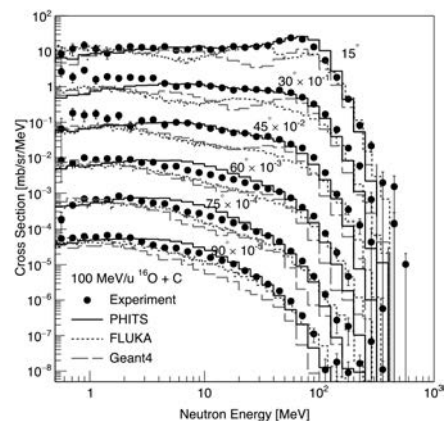


図1 100MeV/u 酸素を炭素標的に照射した時の中性子エネルギースペクトル

3. RCNP での中性子測定

次世代加速器や将来期待される人類の宇宙進出で遭遇する高エネルギー放射線に対する防護では、二次中性子の遮へいが最も重要である。JENDL-HE の整備は、高エネルギー領域での精度を大きく向上させ J-PARC などの加速器設計に多大な貢献を果たしたが、モデル計算を基本としているため、測定による検証が重要となる。核データといった微分量ではなく、厚い遮へい体透過後のエネルギー分布などの総合的な量を実測することとそのメカニズムについて理解することが実験の目的である。

大阪大学核物理研究センター RCNP では、陽子ビームから ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応により得られる約 400MeV までの高エネルギー準単色中性子を用いて TOF 実験ができる。準単色中性子を直接遮へい体へ打ち込み、その遮へい体背後での中性子エネルギースペクトルが遮へい体の厚みを変えて測定される。20MeV 以上では NE213 シンチレータによる TOF を主体とした高エネルギー分解能測定で行い⁶⁾、 ${}^3\text{He}$ 中性子検出器にポリエチレン減速体等を組み合わせるボナーボール測定器のアンフォールディング解析で高エネルギーから熱中性子の広範囲のエネルギースペクトルが取得できる⁷⁾。前者は主に原子核反応モデルや核データの検証、後者は主に線量評価のためである。

陽子ビームをリチウムターゲットに照射して生成させた準単色中性子はコリメータを通して TOF トンネル内で利用できる。TOF トンネルは約 100m で、ターゲットから見てコリメータで投影される領域内に測定器が設置されるよう約 18m の距離を取る。遮へい体として一辺約 100cm の鉄及びコンクリートブロックでそれぞれ最大 100cm、300cm のものが使われる。

結果の例を図 2 に示す。250MeV 陽子で生成させた 246MeV 準単色中性子を入射粒子とした鉄遮へい体背後(10cm から 100cm)で、NE213 で測定した中性子エネルギースペクトルで注目したいのは、ピーク中性子数の遮

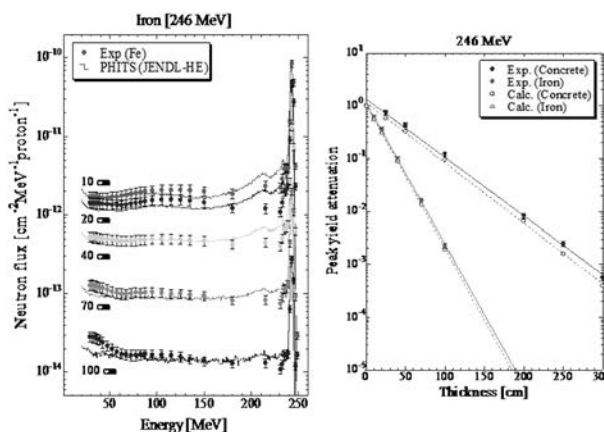


図 2 RCNP246MeV 準単色中性子の鉄遮へいによる減衰(左)とピーク中性子の減衰(右)

へい体厚の関数としての減衰である。物質による放射線の減衰計算で最も単純なモデルは、放射線数が全断面積の逆数である平均自由行程に依存して減衰するが、この実験ではピーク中性子は遮へい深部にわたって多数の小角散乱を含んでおり、従ってその減衰の傾きは全断面積にならない。測定値と PHITS 計算(JENDL-HE)のピーク中性子数の減衰は傾きでほぼ一致が得られ、JENDL-HE は小角散乱も含めて中性子の深層透過においても現象をよく再現できることが推測される。

4. はじき出し断面積測定

高エネルギー加速器の構造材等の放射線による照射損傷の評価の指標として、はじき出し損傷量 Displacement Per Atom (DPA) 値がある。それは、照射領域に存在する全原子数に対するはじき出された原子数の比で定義され、はじき出しの確率を表すはじき出し断面積に比例する。従って、DPA 値を精度良く予測できれば、機器の交換頻度等の運転計画の立案に役立つ。

はじき出し断面積は、核データや核反応モデルを用いて導出されるはじき出し原子のエネルギーとキンチン・ピースモデルと呼ばれる、はじき出し数導出モデル等で計算される。これまでに数 10MeV 以上の予測精度向上を目指し、PHITS にはじき出し損傷計算コードとして普及している SRIM コードにはない核反応を取り入れた照射損傷モデルが開発されている。

はじき出し断面積は実験で検証することが重要であるが、原子のはじき出し数を直接観測できない。そのため、放射線照射でサンプルに生じた欠陥(はじき出された原子と残った空孔の生成)に伴う金属の電気抵抗増加を測定して、間接的にはじき出し断面積を導出する。はじき出し損傷の初期過程をあらわすために、欠陥が修復しないよう試料を 10K 以下である極低温下の環境に置く必要がある。高エネルギー領域で唯一の米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)の実験では、試料を液体ヘリウムで冷却していたが、多くの施設では安全面から使用できない。

その後、様々な加速器施設ではじき出し断面積の検証実験を行うため、京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器において、可搬型ギフォード・マクマホン(GM)冷凍機を活用し無冷媒で試料を冷却する極低温照射装置が開発された。この装置は、温度 4K 程度まで冷却可能な全長約 50cm の GM 冷凍機に、銅・アルミニウム板からなる高熱伝導度のターゲットアセンブリを通し、試料を熱伝導で冷却する。そして、125MeV、1nA の陽子を照射した銅試料中の欠陥に伴う微小な電気抵抗増加(1.53 $\mu\Omega$)の測定値から銅のはじき出し断面積が導出されている(図 3)⁸⁾。FFAG 加速器の実験値と BNL の実験値を用いると、PHITS の照射損傷モデルの予測精度が、SRIM に比べて格段に優れていることがわかる。

この装置を改良して、RCNP や J-PARC で、アルミニ

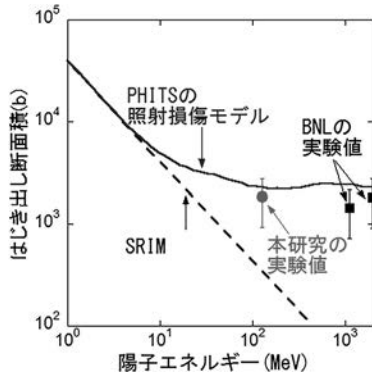


図3 陽子エネルギーに対する銅のはじき出し断面積

ウム、鉄、銅、タングステン等の材料に対して、数100MeV から数10GeV 領域の極低温陽子照射実験が継続・計画中である。今後は、核データ測定領域を超えて、照射損傷の専門家と協力して異なる手法(例えば陽電子消滅法による欠陥測定など)とミックスさせることで、高エネルギー放射線損傷の初期過程の解明が進むと期待される。

III. シミュレーションの進展

前述の通り、全ての核データを実験で得ることはできないため、様々な高エネルギー用シミュレーションコードの開発が続けられている。ここでは国内で開発が進められている PHITS について紹介する。

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System^{9,10)})は、NMTC/JAM を基に開発された、任意形状の3次元体系内における放射線挙動を解析可能な汎用モンテカルロ計算コードである。その適応放射線は、原子力分野で重要となる20MeV以下の中性子や光子の他に、加速器工学や医療・宇宙分野で重要な高エネルギー陽子や重イオンなど、現実的に挙動解析が必要となるほぼ全ての放射線である。その解析の舞台となる3次元幾何学形状は、MCNP と同じく General Geometry (面を組み合わせて1つの形状を定義する形式)で記述する。PHITS には、タリーと呼ばれる放射線挙動解析結果からユーザーが必要な物理量を引き出す機能があり、特定の領域や任意の3次元メッシュ空間内での放射線フラックス、発熱量、生成核種分布などを簡単に出力できる。さらに、ANGEL と呼ばれる独自の描画ツールを内蔵しており、作成した幾何学形状や計算結果を可視化することが可能である。

PHITS は、ユーザー登録制の公開コードであり、高度情報科学技術研究機構(RIST, 日本)、経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA, 欧州)データバンク、放射線安全情報計算センター(RSICC, 米国)からパッケージを入手できる。また、国内であれば年約10回開催される講習会に参加することでも入手可能である。パッケージ

		核反応モデル(またはライブラリ)				原子反応モデル	
		中性子	陽子他	原子核	μ粒子	電子	光子
		1 TeV	1 TeV/u	1 TeV/u	1 TeV		1 TeV
種 ↑ エネルギー ↓	高	JAM + GEM 3.0 GeV	JAMQMD + GEM	JAM/JQMD + GEM	JAM/JQMD + GEM	EGS5	EPDL97 もしくは EGS5
	中	INCL4.6 + GEM	d t α 10 MeV/u	JQMD + GEM	200 MeV ATIMA + Original		JAM/JQMD + GEM + JENDL + NRF
	低	JENDL -4.0	1 MeV ATIMA	1 keV	1 keV *JQMD + GEM	1 keV **飛跡解析 1 meV	1 keV *負μ粒子のみ **水中のみ
	低						
	低						

図4 最新版 PHITS (version 3.02) で標準的に使われるモデル(またはライブラリ)とその適用放射線の種類及びエネルギー

には、Fortran で書かれたソースプログラムの他、バイナリ形式や核データライブラリなど PHITS を実行するために必要なファイルが全て含まれる。PHITS は、Windows, Mac, Linux を OS とするほぼ全てのコンピュータで動作し、Windows 及び Mac に対しては、専用のインストーラから簡単に動作環境を構築できる。また、メモリ分散型(MPI)及びメモリ共有型(OpenMP)並列計算に対応しているため、スーパーコンピュータによる大規模計算にも適している。

最新版 PHITS (version 3.02) で標準的に使われるモデル(またはライブラリ)とその適用放射線の種類及びエネルギーを図4にまとめる。各モデルは、核反応と原子反応のモデルに分類できるが、ここでは前者のみ紹介する。核反応は、核子と核子が直接相互作用する動的過程と、その後平衡状態に達した原子核が崩壊する静的過程に分けて模擬する。核子が引き起こす核反応の動的過程には、初期設定では核内カスケードモデル JAM 及び INCL4.6 が用いられるが、INC-ELF や修正した Bertini モデルも利用可能である。一方、原子核が引き起こす核反応の動的過程には、通常、量子分子動力学モデル JQMD が用いられる。これは、原子核同士の衝突シミュレーションには、各核子間の核力を全て考慮した計算が必要になるためである。静的過程のシミュレーションには蒸発・核分裂モデル GEM が使われる。最新版では、光子やμ粒子による核反応も JAM や JQMD と GEM を組み合わせて再現できる。

しかし、これら核反応モデルは核種によって複雑に異なる核構造を考慮できないため、その影響が大きくなる20MeV以下の中性子が引き起こす核反応に適用できない。従って、そのような低エネルギー中性子による核反応は、JENDL-4.0 に基づいて整備した ACE 形式の核データライブラリで模擬する。その際、イベントジェネレータモードにより二次中性子のみならず二次陽子や反跳核などの情報も引き出せる。今後は、低エネルギー中性子以外の粒子に対して整備された核データライブラリ

(JENDL-4.0/HE や JENDL-PD など)も扱えるよう改良していく予定である。

IV. 終わりに

高エネルギー放射線が関係する分野は多岐に亘る。しかし必要なデータを全て実測できないため、核反応モデルに基づくシミュレーションが活用される。その予測精度検証には実験データが必要になるという、実験とシミュレーションが一体となったアプローチが必要である。

最後に最近の進展として、理化学研究所では放射性廃棄物の低減化を目指し、RI ビームを水素及び重水素標的に照射し逆運動学による核種生成断面積測定が行われている。このデータは放射性廃棄物中の長寿命核種の核変換に役立つことが期待される。また日本のグループが中心となり、米国フェルミ国立加速器研究所での120GeV陽子からの中性子生成量測定が行われるなど、国内では不可能なエネルギー領域の測定が行われている。核データライブラリでは、PHITSの項でも述べた最新の核反応モデルを使い200MeVまでの陽子、中性子核データを収録したJENDL-HE/4.0¹¹⁾が整備されている。今後も様々な分野からのニーズに応えるべく、新たな実験手法の開発や、核データ、計算コード、核反応モデル等の検証や改良が続くであろう。

— 参考資料 —

- 1) K. Ishibashi, et al., "Measurement of Neutron-Production Double-Differential Cross Sections for Nuclear Spallation Reaction Induced by 0.8, 1.5 and 3.0 GeV Protons," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **34**, 529-537 (1997).
- 2) Y. Watanabe, et al., "Status of JENDL High Energy File," *J. Kor. Phys. Soc.*, **59**, 1040-1045 (2011).
- 3) R.A. Forrest, et al., "FENDL-3 Library, Final Report of the Coordinated Research Project on Nuclear Data Libraries for Advanced Systems: Fusion Devices", INDC (NDS)-0645 (2013).
- 4) 木村敦等, 「核データ研究の最前線 第2回」, 日本原子力学会誌, **59**, 40-44 (2017).
- 5) Y. Imahayashi, et al., "Measurement of Cross Sections and Yields of Neutron Produced by 100 MeV/u C (C, xn) Reaction," JAEA-Conf 2014-002, 133-138 (2014).
- 6) M. Hagiwara, et al., "Shielding benchmark experiment using hundreds of MeV quasi-monoenergetic neutron source by a large organic scintillator," *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, **4**, 327-331 (2014).
- 7) T. Matsumoto, et al., "Measurement of neutron energy spectra behind shields for quasi-monoenergetic neutrons generated by 246-MeV and 389-MeV protons using a Bonner sphere spectrometer," *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, **4**, 332-336 (2014).
- 8) Y. Iwamoto, et al., "Measurement of the displacement cross-section of copper irradiated with 125 MeV protons at 12 K," *J. Nucl. Mat.*, **458**, 369-375 (2015).
- 9) T. Sato, et al., "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02," *J. Nucl. Sci. Technol.*, (2018) <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>; <http://phits.jaea.go.jp>
- 10) Y. Iwamoto, et al., "Benchmark study of the recent version of the PHITS code," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, 617-635 (2017).
- 11) S. Kunieda, et al., "Overview of JENDL-4.0/HE and benchmark calculation," JAEA-Conf 2016-004, 41-46 (2016).

著者紹介



執行信寛 (しぎょう・のぶひろ)

九州大学 大学院工学研究院
(専門分野/関心分野)核データ, 中性子計測, 原子核工学



岩元洋介 (いわもと・ようすけ)

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)放射線工学, はじき出し損傷, 核データ応用



岩瀬 広 (いわせ・ひろし)

高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター
(専門分野/関心分野)放射線物理学, 保健物理, 震災復興



佐藤達彦 (さとう・たつひこ)

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)放射線物理, 放射線生物, 宇宙線被ばく

GLOBAL2017 国際会議の概要報告

東京都市大 高木 直行 他

International Nuclear Fuel Cycle Conference GLOBAL2017 が 2017 年 9 月 23 日～29 日に韓国ソウルで開催された(参加者数は約 450 名(16 개국)). 今回は韓国廃棄物学会が主催した。最終日には、特別セッションとして、“Opening session of the 4th International Symposium on Safety Improvement & Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management (SaRaM)” も含まれていた。本報告では、会議全体概要、トピックスを紹介する。

KEYWORDS: GLOBAL2017, Advanced Reactor, Fuel Cycle System, HLW, URL, Partitioning, Transmutation, Actinides, LLFP, ImPACT

I. 全体概要

GLOBAL は新型炉サイクル、分離核変換やバックエンドを主題とする国際会議である。1993 年にスタートし、これまで二年おきに米、仏、日の三国が順繰りにホスト国を努めてきていたが、韓国の熱心な誘致もあり、この度初めて韓国での開催となった。

今回の GLOBAL のテーマは「低炭素社会実現に向けた原子力の革新」である。初日のプレナリーセッションでは、韓国科学技術学会(KOFST)、OECD/NEA そして IAEA よりほぼ共通して、二酸化炭素排出削減のための原子力の重要性が述べられた。

具体的には、地球平均気温の上昇を 2℃ 以下に抑制するには 2050 年時点の温室効果ガスの排出量を 2010 年排出量の 40～70% 程度にまで減らす必要があるため、再生可能エネルギーの導入を最大限図ったとしても、原子力発電の比率は 20% 程度に拡大・維持していかなければならないこと、またこの実現には安全を前提としながら廃棄物問題の解決のための革新技術が必要であることが訴えられた。ソウル大の Song 教授は使用済み燃料への対策として、1) 直接処分、2) 発生量の抑制、3) 分離・変換技術があるが、この内廃棄物負荷最小化に最も有効な 3) 分離・変換技術の実現を目指して各国が協力していく重要性を述べた。

米 DOE は近年「革新的原子力システムの燃料サイクル特性評価」を実施し、種々提案されている原子炉概念やサイクル概念について資源、廃棄物、核拡散、安全、

Briefings and Impressions of the GLOBAL2017 conference :
Naoyuki Takaki, Masatoshi Iizuka, Motoyuki Yamada, Tatsuo Matsumura, Reiko Fujita, Masatoshi Kawashima.

(2018 年 2 月 2 日 受理)

投資リスクといった広範な観点から、それらの利点と課題を定量評価した。全ての面で最も beneficialなのは、HLW 発生量を 1/10 に、減損ウランを 1/1,000 に、U 利用率を 100 倍にできる「高速炉リサイクルシステム」であるとの結論と高速炉開発の重要性が再確認された。

高速炉や分離変換の技術開発で世界を先導してきた仏は、高速実証炉 ASTRID の建設を 2030 年代後半、1 基目の商業炉導入は 2060 年と、やや後退した計画を示した。この場合、2090 年時点の仏国だけの累積天然ウラン資源消費量は 76 万 t と、130 ドル/kgU 未満のコストで生産可能な確認可採埋蔵量の 10% を超える。

韓国では新大統領の原子力政策方針転換等により、特に原子力先進国の原子力政策は難局を迎えている。CO₂ 対策としての原発導入、ウラン資源有効利用のための高速炉開発、そして廃棄物対策のための革新技術開発の時間軸をどのように考えるべきかが各国共通の課題であることが確認された。

折から、北朝鮮情勢への不安もあってか参加者数は約 450 名と過去の GLOBAL に比べ 2 割程度少なかった。テクニカルセッションでは発表のロシア・米国からのキャンセルもいくつかあった。筆者は第一回の GLOBAL'93 から今回本会議に参加しているが、'90 年代、2000 年代の GLOBAL^{1~6)} と比べ会議の雰囲気は変化している。

レセプションディナーの際には、韓国的高速炉研究者から、福島第一原発事故が韓国の原子力政策に影響を与えていることを遠慮がちに伝えられた。先進燃料サイクル以前に、ワンスルー軽水炉自体の導入・維持に影響を与えた日本の責任を再認識した。日本が世界の原子力に果たす役割を改めて考える端緒としたい。(高木直行)

II. トピックス紹介

バックエンド側の視点から多くのプレナリーとパネル討論のセッションが2日目から行われた。

プレナリー I では、各国・機関のバックエンドサイクルと放射性廃棄物管理の取り組みの状況が講演された。

プレナリー II では、放射性廃棄物負荷の最小化に向けた新たな技術選択ニーズなどが取り上げられた。

下記に示すパネル討論では、各機関からのパネリストの論点の紹介に続き、意見交換が行われた。

パネル I：使用済み核燃料の多国間管理アプローチ

パネル II：再処理技術(開発から工業段階に向けて)

パネル III：高レベル廃棄物管理施設のサイト選定に向けた技術・社会的責任

パネル IV：地下研究施設(URL)の展開と運用の効率的進め方

これらのパネルでは、いずれの話題でも、各機関の経験事例の共有・討論の機会が増えることが有効で、要点であるという認識が強調された。(川島正俊)

1. 分離・核変換技術

GLOBAL の一つの主題である分離・核変換技術に関しては、廃棄物の潜在的毒性存続期間の短縮に最も有効なマイナーアクチニド(MA)の核変換について各国から多くの報告が行われた。長寿命核分裂生成物(LLFP)については、加速器や高速炉を用いた研究が日本から複数報告された。Myrrha プログラムを進めるベルギー原子力研究センター(SCK-CEN)はプレナリーで、臨界高速炉を用いた MA 変換は安全性の問題で変換量が2~4kg/TWh に制限されるため35kg/TWh を変換できる加速器駆動システム ADS が有利であることを主張した。分離変換研究が各国で活性化することは望ましいが、変換対象核種を潜在的毒性の観点のみで選定することや、エネルギー収支や経済性、さらにはシステム安全性といった総合的視点を欠いた分離変換研究は、商業原子力が発生する廃棄物対策として実効性を持たない。13 回目を迎えた GLOBAL の今後は、分離変換の科学研究フェーズを抜け、工学実証さらには原子力政策への実践的な反映を図るフェーズに発展していく必要があろう。(高木直行)

2. 再処理・廃棄物処分

(1) 廃棄物処分関連のトピックス

プレナリーセッション：韓国からの発表はバックエンド(廃棄物、韓国原子力環境公団 KORAD、地下研究施設関係)、燃料サイクル関係の重要性を述べる講演・発表が多かった。同時に、現大統領の原子力に対する方針に、将来への不安も滲んでいた。

フランスからは、放射性廃棄物管理機関 ANDRA から、HLW 最終処分場“Cigéo”サイトの実現に向けた状況の報告が多かった。2019 年の申請、3 年間の審査を経

て2022年着工を目指している。20年前から、HLW 処分は2040~2050年開始、その後60年は政策が変化することにも考慮にいれていることが強調されていた。2122年までの運用では「急がず」、ダウンストリームの安全性を最優先して進めることを強調した。企業250社が関わっている。必要な革新技術はトンネル技術、自動検査技術と述べていた。

使用済み燃料管理に関する多国間アプローチの討論では、韓国、米国から発表があった。社会・政治を含め多くの懸念があるが、このような意見交換をする機会を持つことに意義があると締めくくられた。

プレナリー II のセッション：韓国からは2050年に向け“Game Changing Technology”が必要という言葉が多くでていた。フランスからは、現在の再処理方向が重要で、柔軟性のある持続可能な廃棄物管理ができること、乾式中間貯蔵は解決策にはならないと報告された。

再処理技術(研究開発、実用化)セッション：中国からは、PWR を2020年代に58GWe建設終了し、30GWe規模が建設段階となり、2030年代には120~150GWe規模にする。2040年代には200GWe規模で、そのうち10GWeを高速炉とする計画であること、国の基本方針は2025年までに600MWe級高速炉(酸化燃料)建設、その後2030~2035年に商用炉。燃料サイクルが酸化燃料から金属燃料サイクルとしていることが紹介された。原子力安全法が2018年から発効する。国の関与を明確にして、財政支援により地方政府とサイクル・処分サイトの確保を進める。PWR燃料再処理商用施設は国の承認が得られたので、AREVAと価格交渉をしていること、建設サイトは現在模索中である。急速にPWR数が増加し、中低レベル廃棄物処分施設を3か所で建設中。さらに2050年までの追加施設建設目指しているなど意欲的な方針の紹介であった。一方、再処理施設・処分施設サイト確保は、発電プラント建設サイト確保に比べて進んでいないという。(川島正俊)

3. SaRaM 特別セッションの概要

9月28日には第4回SaRaM(International Symposium on Safety Improvement & Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management:放射性廃棄物管理における安全性向上とステークホルダーの信頼性に関する国際シンポジウム)が開催された。SaRaMは、韓国の実施主体KORADの主催で毎年開催しており、4回目となる今回のSaRaMはGLOBALの一部として開催され、GLOBALのパネルセッションのうち2つとスペシャルセッションはSaRaMとして実施された。スペシャルセッションの中から、韓国とフランスの状況についての概要を報告する。

韓国では、2013年10月から2015年5月の間、PECOS(Public Engagement Commission On SNF、使用済み燃料公論化委員会)がタウンミーティング等の様々な

機会を設けて市民や関係者等からの意見(参加者の合計は約 37 万人)を幅広く収集し、その結果を 2015 年 6 月に政府に勧告した。この勧告を踏まえ、2016 年 7 月に高レベル放射性廃棄物管理基本計画が策定された。この基本計画では同じサイトに設ける使用済燃料の中間貯蔵施設、地下研究所、処分施設のサイト選定の決定までにかかる期間として 12 年、その後中間貯蔵と地下研究所の建設を同時に進め、サイト決定から 7 年後に中間貯蔵施設を完成させ、サイト決定から 24 年後に最終処分施設を完成させると計画されている。また、サイト選定は、不適格な場所を除いた上で地方自治体からの応募、概要調査、4 年の詳細調査を含むとしている。現在、合意を基本としたサイト選定手続きの立法と第 2PECOS の組織準備が進められている。今後の第 2PECOS による議論により現在の政策がレビューされるとの紹介があった。

フランスでは、実施主体であるフランス放射性廃棄物管理機関 ANDRA が Cigéo プロジェクト(高レベル放射性廃棄物や中レベル長寿命放射性廃棄物の地層処分プロジェクト)の許可申請を 2019 年中頃に行う計画を進めている。2016 年に ANDRA は安全オプション意見書を規制機関である ASN(原子力安全機関)に提出したが、ASN は全体的には技術的に満足できるものに到達しているとする一方で、ビチューメン(アスファルト)固化体について化学的中和(the neutralization of the chemical reactivity)の調査が行われるべきと考えているとのことであった。(山田基幸)

4. 湿式再処理技術開発

Wet Reprocessing I, II, III とタイトル付けされたテクニカルセッションで 23 件、他の先進再処理、保障措置、廃棄物処理などのセッションで口頭発表されたもの 11 件で合計 34 件(日本 10 件、フランス 8 件、米国 5 件、中国 5 件、ロシア 4 件、英国、パキスタン 1 件)、ポスター発表 12 件(日本 3 件、韓国 3 件、米国 2 件、中国 2 件、ロシア、英国 1 件)であった。

保障措置関連とは言え、米国の湿式再処理の発表件数が増加したこと、今回フランスからマイナーアクチニド(MA)に関する発表がほとんどなかったこと、およびパキスタンから発表があったことが特筆される。

米国での湿式再処理の発表件数が増えたことは保障措置とは言え、明るい話題である。今後の展開が期待される。

フランスからは MA に関する発表がなく、プルトニウム(Pu)の回収に関する発表が多かった。この理由について、CEA の研究者からは MA の溶媒抽出など基礎研究の予算がほとんど配分されなくなったとの情報もあり、今後の湿式再処理の研究開発のグローバルな進展が懸念される。一方、Pu 自身の多重リサイクル研究を優先する意味もあると推測させる。

日本からは日本原子力研究開発機構(JAEA)や東工大を中心に MA 回収などに新しい研究成果が発表され、

日本の基礎研究の底堅さが示された。

今回は中国の発表件数が少なく、昨年、東北大で開催された Asian Nuclear Prospects(ANUP2016)で 2 桁台の発表件数と学生の優秀なポスター発表の傾向とは様変わりであった。

パキスタンからはテクネチウム(Tc)廃棄物に関するもので模擬物質として用いたレニウム(Re)酸化物クラスターに関する発表があった。(松村達雄、藤田玲子)

5. 乾式再処理技術開発

Pyro-processing I, II とタイトル付けされた技術セッションで 15 件、先進再処理、保障措置、廃棄物処理、溶融塩炉といった他のセッションに割り振られた関連発表 23 件の合計 38 件(韓国 17 件、米国 8 件、日本 6 件、中国 3 件、EU・英国・フランス、ロシアが各 1 件)の口頭発表、15 件(韓国 13 件、ロシア 2 件)のポスター発表があった。

韓国からは、パネルセッションの中で実規模ウラン試験設備における試験実績の一部が紹介されたが、照射後酸化物燃料を用いた研究開発や米国との共同研究におけるホット試験の進捗状況については報告がなかった。一方、KAERI や大学の若手研究者による基礎化学から施設設計や安全性検討に至る幅広い分野に関する多数の発表があり、将来的な研究者層の厚さを予期させた。

日本からは、溶融塩化物から希土類 FP と分離してアクチニドを回収する方法として不活性固体電極に U-Pu を共析出させる方法を試みた例(電中研)、加速器駆動システムで用いられる窒化物ターゲットの乾式再処理で回収されるアクチニドの再窒化試験の進捗(JAEA)などが発表された。

金属燃料高速実験炉 EBR-II 使用済み燃料の乾式再処理を着実に進めている米国(INL および大学)からは、回収アクチニド金属を約 1,200°C の高温で溶融しつつ塩化物溶媒を揮発除去する工程で用いられるるつば材料の使用実績と開発状況などの実用性評価に直結する報告に加えて、高温融体液面/密度や溶融塩中アクチニド濃度あるいは U-TRU 合金中 Pu 含有量のオンラインモニタリング技術開発や FP 塩化物由来の廃棄物発生量を大幅に低減するゼオライト吸着剤の検討などの新規性の高い発表があった。

欧州については、仏 CEA の視点からの湿式/乾式再処理技術の比較評価、JRC-Karlsruhe からアルミニウム陰極を用いた溶融塩電解精製による照射金属燃料からのアクチニド回収に関する発表があった他、英国 NNL からは乾式再処理工学技術開発上の重要な課題である溶融塩化物輸送に関する試験結果が報告された。

基礎研究からアクチニドを用いたプロセス試験、ホット実証までの広いフェーズにわたり、さらに効率化や廃棄物発生量低減を目指したオプション技術開発を含む、充実した成果の把握と情報交換を行うことができた。

(飯塚政利)

6. ImPACT セッションの概要

2014年6月に採択された内閣府のImPACTプログラム「核変換による高レベル放射性廃棄物(HLW)の大幅な低減・資源化」に関連する発表は本プログラムセッション T02-04 “Reduction and Recycling of High-level Radioactive Waste through Nuclear Transmutation” で7件のシリーズ発表と“Pyro-processing”などのセッションで分離回収に関して4件の口頭発表とクリアランスレベルに関するポスター発表1件があった。長寿命核分裂生成物(LLFP)をHLWから分離回収し、核変換により安定核種もしくは短寿命核種にするプロセスを検討するものであり、核変換された放射能が問題ないものは再利用して資源化する概念である。T02-04では特にEA-050の核変換を効率的に行うために行う“LLFPの偶奇分離技術”に注目が高かった。

また、展示ブースにも出展されており、海外で日本がHLWの低減とリサイクルの研究開発を本格的に開始したと受け取られた。原子力発電を推進する人口密度の高い、アジアの中国、韓国、日本ではHLWの処分に対する1つの選択肢として捉えられた。その中でもプレナリー II “Innovative Options for Waste Burden Minimization”ではImPACTプログラムはその1つのオプションとして紹介された。世界的、特にアジアの原子力を積極的に推進する中国、韓国の研究者は非常に興味を持って展示を訪問した。中国の研究者からは中国も加速器を使ったLLFP核変換の研究を開始したとの複数の情報があった。中国でHLWの処分場に対する反対が極めて強いこともプレナリーセッションで紹介されており、HLWに関する新しい研究分野の推進という意味ではグローバルに認知されたと言える。今後、この分野の研究がアジアを中心に発展することを期待したい。(藤田玲子)

III. まとめに代えて

OECD/NEAのマグウッド氏が、3つのプレナリートークを行うなかで、世界規模で見たエネルギー状況の現状、長期視点からの講演内容で、世界共通の関心事としての内容・課題提起を行った。

世界の人口は7.5Billion、2050年には10Billionと予測されている。このなかで電気のない生活をしている人の数は1.2Billion、2.7Billionの人々はClean-cookingが確保されない環境にいる。エネルギーニーズは大きい。

一方、国によってはベースロード不要、CO₂ガス放出効果の不確かさにより、この問題を無視している例もある。福島第一NPP事故の影響で世界の原子力の動きがスローダウンした影響もでている。原子力界は創造性を維持して、活動を継続していく必要がある。

政策の安定性は重要である。政治・行政への技術筋

道、新基礎技術の実用化など“Path finding”を提示することが求められる。NEA・IAEAは2015年に‘Technology Roadmap’を発行した。2050年のためには今から研究開発が必要。原子力にhesitateする国においても原子力関係者は努力を続ける必要があることを強調した。

各国の機関からは、自国または各機関の重点課題や成果が紹介された。それらの横軸としてパネル討論の場が多く設けられていた。そこでは、実際のサイクルプラント技術について各国・各機関の課題対応・成果から、オープンに経験共有のための情報交換の機会をもてるのが重要であるとの指摘があった。

地球上のエネルギー・原子力の将来は、地域・国・世界レベルの小さなサイクルから大きなサイクルまでのうねりの中にあり、思考停止は許されないことを再認識させられたGLOBALであった。

次のGLOBAL2019は、米国シアトルで2019年9月22～27日に行われる(Top Fuel2019と同時開催)。(川島正俊)

－ 参考資料 －

- 1) GLOBAL 2005 プログラム委員会, 日本原子力学会誌, Vol. 48 (2006) No.4, p46.
- 2) 尾形孝成, 日本原子力学会誌, Vol.50 (2008), No.2, p54.
- 3) 井上正, 深澤哲生, GLOBAL 2009, 日本原子力学会誌, Vol. 52 (2010), No.1, p56.
- 4) 深澤哲生, GLOBAL 2011, 日本原子力学会誌, Vol.54 (2012) No.5, p56-58.
- 5) 太田宏一, GLOBAL 2013, 日本原子力学会誌, Vol.56 (2014) No.2, p57.
- 6) 菅原隆徳, 飯塚政利, GLOBAL2015, 日本原子力学会誌, Vol.58 (2016) No.3, p58-60.

著者紹介

高木直行 (たかき・なおゆき)

東京都市大学 大学院共同原子力専攻
(専門分野/関心分野) 炉物理・核設計, 核変換, Th
飯塚政利 (いづか・まさとし)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野) 金属燃料乾式再処理・高速炉
山田基幸 (やまだ・もとゆき)

原子力発電環境整備機構

(専門分野/関心分野) 放射性廃棄物処分, 放射線管理
松村達雄 (まつむら・たつお)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野) 燃料再処理・燃料サイクル技術
藤田玲子 (ふじた・れいこ)

科学技術振興機構

(専門分野/関心分野) 燃料再処理・分離核変換技術開発
川島正俊 (かわしま・まさとし)

科学技術振興機構

(専門分野/関心分野) 高速炉核設計, 分離核変換技術

報 告

ダイバーシティってなに？ ダイバーシティ推進委員会が行ったアンケート調査結果から

東北大学 吉田 浩子
名古屋大学 吉橋 幸子

ダイバーシティ(多様性)推進委員会は、男女のジェンダーのみならず、より多角的な視野から働きやすい社会(学会)、職場を目指す活動を進めていくため2017年に男女共同参画委員会から名称を変更した。日本原子力学会会員がダイバーシティについてどのくらい認識しており、何が問題となっているかを再確認し、より良い活動のための基礎情報とするため、2017年秋の大会においてダイバーシティ推進におけるアンケート調査を実施した。本稿では、そのアンケート結果の報告と今後、本委員会で行ってみたい事項について報告する。

KEYWORDS: *diversity, gender, society, questionnaire investigation, role model, network, information, promotion support*

I. はじめに

ダイバーシティ推進委員会は、日本原子力学会(以下、本学会という)における男女共同参画を目標に掲げ男女共同参画ワーキンググループ(WG)として2003年に発足し、2007年に常設委員会(男女共同参画委員会)に昇格した。男女共同参画委員会の活動としては、原子力分野への女性の進出や活躍を目指し、年会における企画セッション開催や男女共同参画学協会連絡会への参画、女子中高生夏の学校への参加を行ってきた。また、原子力や放射線分野について具体的な仕事を中高生に知ってもらうことを目的として、ロールモデル集を2014年の初版を皮切りに2017年までに3部製作し、夏の学校やオープンキャンパスなどで配布してきた。これまでの活動の成果の表れか原子力学会の総正会員数における女性の比率は、2003年のWG発足時は2.3%であったのに対して、現在(2017年10月20日の時点)は4.2%と15年で約2倍に増加した。とはいえ、この女性比率は、他学会と比較してもはるかに少なく、2015年に男女共同参画学協会連絡会により実施された57学会における女性比率調査では下から7番目(このとき本学会の女性比率は4%)というありさまである。

もともと男女共同参画とは、「男女が、社会の対等な構成員として、自らの意思によって社会のあらゆる分野における活動に参画する機会が確保され、もって男女が均等に政治的、経済的、社会的及び文化的利益を享受することができ、かつ、共に責任を担うべき社会」(男女共同

参画社会基本法第2条)と定義されており、我々の活動もこれを基本としてきたが、国を始めとする様々な機関での従来型の戦略は「男女共同参画=女性活用」で、とにかく女性を活用しさえすれば男女共同参画は達成されるという図式で考えてきたような印象がある。もちろん、女性を活用することは重要で、従来型戦略はそれなりに効果をあげてきたことは確かであるが、しかし、この戦略で上記にうたわれるような男女共同参画の理想が達成されたか、男女が共に均等に楽しく働き生活をエンジョイできるように改善されたか、社会(学会)自体も変わってきているか、ということ残念ながら現実には(まったく)そうではない。

このような流れの中、男女共同参画委員会では、原点に立ち戻って男女共同参画の意味を考えるべきではないか、そもそも問題は男女のジェンダーの差だけにとどまらないのではないかという議論を重ねてきた。例えば、本学会では外国人会員の比率は2%でありここにも歴然とした「差」がある。春と秋の年会での案内における英文説明は限られており日本語の読み書きが自由でない外国人会員にとっては開かれた学会とはなっていない。さらには、本学会が科学者だけの学術集団に留まらず技術者も受け入れ社会に開かれたものとなっていけるかどうか一つの課題である。性別や人種の違いに限らず、年齢、学歴、専門分野、アカデミックか実務か、価値観、ライフスタイルなどより多角的な視野から議論を進め、多様な人材が多様な視点でより良い社会(学会)を作り上げるための活動を目指していくべきと考え、男女共同参画委員会は2017年にダイバーシティ(多様性)推進委員会へと名称を変更し、新たなスタートを切った。

時を同じくして、平成30年1月22日に安倍首相は施

What's diversity for? ; Opinion from questionnaire investigation :
Hiroko Yoshida, Sachiko Yoshihashi.

(2018年2月1日 受理)

政方針演説で、働き方改革を断行する、として「ワーク・ライフ・バランスを確保することで、誰もが生きがいを感じて、その能力を思う存分発揮すれば、少子高齢化も克服できるはずです。」と述べた。少子高齢化の波は本学会にも押し寄せており、会員の高齢化、若い会員の減少、学会員総数自体の減少という傾向が続いている。ディーセント・ワーク -Decent Work- 「働きがいのある人間らしい仕事」(国際労働機関, ILO)の実現のためには、ワーク・ライフ・バランスを確保することは必須であり、そのためには多様性の確保が必須となる。ダイバーシティ推進委員会では、多様な視点をもつことにより、働きやすい社会(学会)、職場に変えていく活動を最終目標としていきたいと考える。そこで、まず手始めに、これまでの本委員会の役割(活動)を見直しつつ、原子力学会会員のダイバーシティに関する意識を再調査し、委員会としての方向性を考えていくため、2017年秋の大会(於 北海道大学)において、本委員会の活動を紹介すると共に「ダイバーシティ推進に関するアンケート調査」を実施した。ここでは、その結果について報告するとともに本委員会が今後取り組んでいく事項について紹介する。なお、以下に述べる意見はダイバーシティ推進委員会を代表するものではなくアンケート調査から著者らが感じた個人的な意見を述べたものであることをご理解いただきたい。

II. アンケート調査結果

現在、原子力学会員がダイバーシティについてどのくらい認識しており、どのような考えを持っているかについて調査するため、以下のアンケート項目を用意した。

- ・所属機関の働きやすさについて
- ・所属機関のダイバーシティ(男女共同参画)活動について
- ・原子力学会におけるダイバーシティ推進について
- ・今後、原子力学会ダイバーシティ推進委員会の活動について期待することについて

準備したアンケート枚数は100枚で、回収率は92%であった。女性学会員の回答者は全体の13%で、外国人研究者も数名回答していただく事ができ、現在の総会員数に対する女性および外国人会員比率に近い数字となったと言える。回答者の年代(括弧内女性の回答者数)は、20代18(2)名、30代21(4)名、40代17(3)名、50代19(1)名、60代以上17(2)名で、ほぼすべての年代の意見を聞くことが出来た。図1は回答者の所属機関を全体および年代別に分類した結果を示す。特徴的なのは40代の所属は大学が多い(20代も大学所属が多いが、これは20代の回答者は大学院生が多かったことを意味する)のに対し、30代は研究機関に所属する方が多い。

まず、実際に現在の職場について感じているかについて調査した。図2は、「所属機関の働きやすさについて」

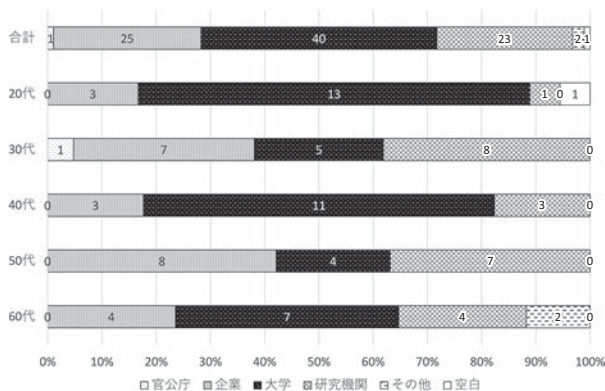


図1 回答者の所属機関

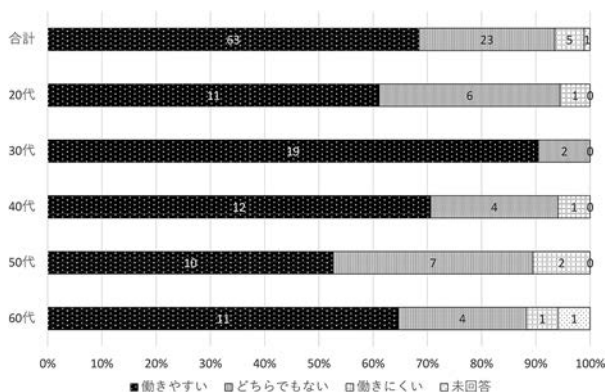


図2 所属機関の働きやすさについて

の回答結果を示す。回答は、1. 働きやすい、2. どちらでもない、3. 働きにくいから選択し、働きにくいという回答をした方にはどのような点が働きにくいと思っているか自由に記述いただいた。

全体的に働きやすいと回答した方が多く、男性も女性も関係なく現在の職場の環境には特に問題がないことが伺える。一方で、少数であるが働きにくいという回答もあり、その意見を紹介すると、

- ・職場が遠い(男性)
- ・女性が少ない(女性)
- ・事務仕事が多い(女性)
- ・有休が取りにくい(男性)

といった意見に加え、人間関係だけで評価・昇進が決まる、という以前より問題とされていることを指摘する意見もあった。

図3は、所属機関におけるダイバーシティ(男女共同参画)活動について、どの程度参加しているか、また理解しているかについて調査した結果を示す。

全体的に取り組みについて理解はしているが参画していないと回答した人が多い。一方で、60代以上とこのグラフからは読み取れないが女性回答者の多くは、取り組みに積極的に参加していると回答した。実際にどのような取り組みに参画しているか自由に記述していただいたところ、機関の男女共同参画に関連した委員会や部会に参加しているとの回答が一番多かった。さらにその委員

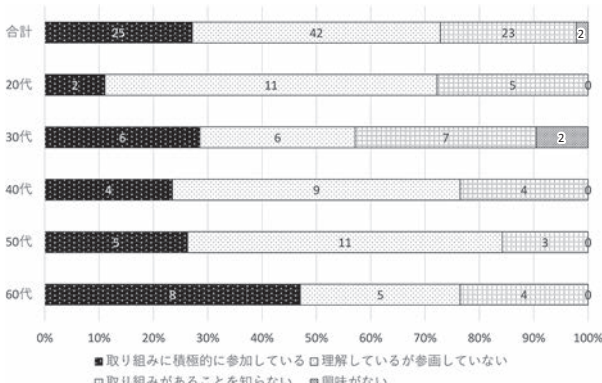


図3 所属機関におけるダイバーシティの取り組みについて

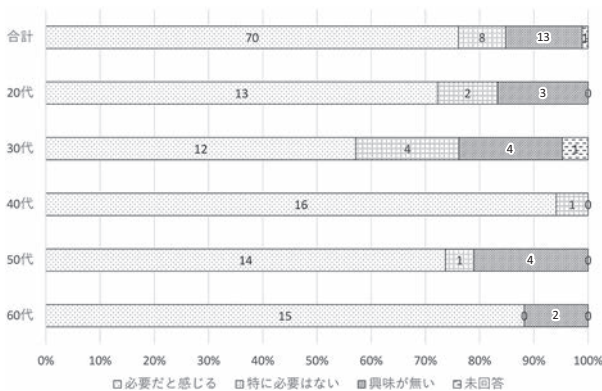


図4 原子力学会におけるダイバーシティ推進について

会や部会で行っている活動としては

- ・若手女性職員の集まり
- ・メンティ制度
- ・ベビーシッター派遣制度の利用
- ・講演会

などが挙げられた。

次に、原子力学会におけるダイバーシティ促進について学会委員がどのように考えているかについて調査した結果を図4に示す。

図3とは異なり、約80%近くの方が、必要だと感じる」と回答しているのは大変興味深い結果である。一方で20代と30代の若い世代から特に必要はないとの回答があり、その理由として

- ・もっと先にすることがある
- ・十分活躍されている

などが挙げられている。このことから、1999年に男女共同参画社会基本法が成立されて20年かけて多くの機関で女性活用が進み始めたのではないかと感じた。また、何故必要と感じるかの理由については、大変多くのご意見が得られた。すべてを紹介することはできないが、一部の意見を紹介しますと

- ・女性や日本人以外の視点も増やすことが、原子力の社会的受容性の向上に必要
- ・女性の観点や視点が学会として取り込めていない
- ・男女に関係ない人材育成、職場環境、整備は必要

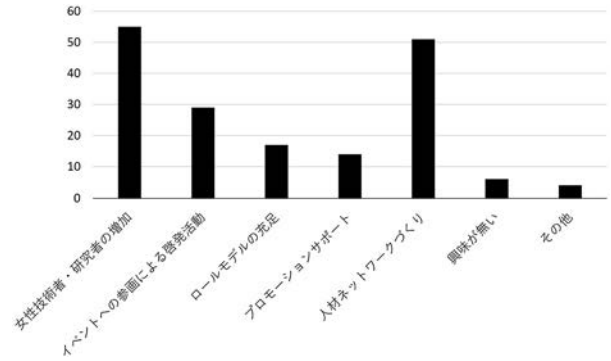


図5 今後ダイバーシティ推進委員会に期待すること

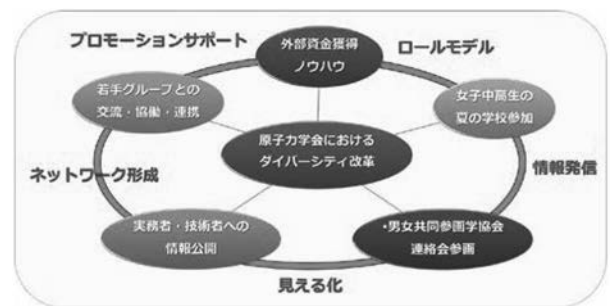


図6 ダイバーシティ改革

などがあり、従来の女性進出がメインとされた男女共同参画ではなく、原子力分野の閉じた分野における懸念や(一般)社会への理解のために多様な人材が必要と考える人が多いことがわかった。

最後に、今後の原子力学会ダイバーシティ推進委員会の活動について図5に示す。同図よりやはり女性技術者・研究者の増加に向けての活動を推進して欲しいという意見が最も多く、その次に人材ネットワークづくり、イベントへの参画による啓発活動と続く。

III. ダイバーシティ推進委員会の活動

II.で紹介した意見の他、大変多くのダイバーシティ推進に関する意見があり、その一部を紹介する。

- ・時間はかかるが、小学生の理科教育から中学生への啓蒙活動が重要
- ・日本文化を変える必要がある
- ・結局は意識改革等地味な啓蒙活動が重要
- ・支部を中心としたイベントの実施
- ・女性教員が増えるようなプロモーション
- ・外国からの参加者の増加も重要
- ・ロールモデル集のフィードバック
- ・他組織のダイバーシティに関する事例の活用
- ・他学会との連携

ダイバーシティ推進委員会に期待する意見を参考に、今後の本委員会の活動について図6のような図式を考え、これらの取り組みを実施していくことを考えている。なお、図6は本委員会のホームページにも掲載している¹⁾。

コンセプトとしては、推進していく活動が他の活動に繋げていけるようにという事である。例えば、これまで行ってきた夏の学校や男女共同産学協会連絡会への参画は原子力や放射線分野を多くの人に知ってもらうための情報発信の一つであり、この情報発信のためには、研究者だけでなく実務者や技術者との情報交換が重要と考える。また、中高生への情報発信においては、若手グループの協力は必須であり、これまでは実施はしていなかったが、学生連絡会との交流や連携を図っていきたいと考えている。その取り組みの一つとして、年会における企画セッションとして学生連絡会とコラボレーションしたポスター発表などを検討している。また若手との交流において、外部資金獲得のノウハウ等を伝授できるような取り組みも行い、win-winの関係を築いていくことも本委員会の活動の一つと考えている。

先に紹介したホームページで出来る限り活動を発信していきたいと考えており、今後、「何か面白そうなことやっているな」と思ってもらえる活動を目指していきたい。

IV. おわりに

今回のアンケート調査では大変多くの方にご協力いただき事が出来た。また質問に対してのみ回答するのではなく、自由記述にはたくさんコメントやご意見を頂くことが出来たことは、アンケートを実施した意味があったと感じている。

今回のアンケート調査で明らかになったこととしては、原子力学会(もしくは原子力分野)においてダイバーシティを推進する必要があると感じている一方で、実際の取り組みについては、ほとんどの人は関与しておらず、ある特定の人達(おそらく女性と60代以上の方)だけで実施されているという事である。これは、従来の

「男女共同参画=女性活用」のための活動が未だ残ったままであることを示している。しかし、多くの人はダイバーシティ推進とは女性活用のためだけではなく、原子力業界の発展のために必要であると認識していることが本アンケートから明らかとなっている。

その他の意見にもあったように、ダイバーシティ推進が進まない理由として日本の文化や制度の見直しは必要かもしれない。しかし、それはダイバーシティ推進委員会だけで解決できることではない。今回、この報告を読んでいただいた方に、少しでもダイバーシティとは何かについて考えて頂き、何かの形で本委員会にご協力頂けたら大変うれしく思う。

最後に、アンケートにご協力いただいた会員の皆様に感謝いたします。本当に多くのご意見を頂き、誠にありがとうございました。

— 参考資料 —

1) <http://www.aesj.or.jp/~gender/index.html>

著者紹介

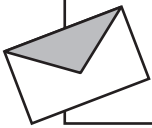


吉田浩子 (よしだ・ひろこ)
東北大学大学院薬学研究科
(専門分野/関心分野)放射線防護, 線量評価, 放射線リスクコミュニケーション



吉橋幸子 (よしはし・さちこ)
名古屋大学核燃料管理施設
(専門分野/関心分野)放射線医療, 加速器, 中性子源

理事会だより



理事としての活動を通して

理事の担務として、学会の委員会等の委員などを務めますが、私もいくつかの委員会等に携わっています。そのひとつにダイバーシティ推進委員会があります。ダイバーシティとは、人事労務用語辞典によると、「市場の要求の多様化に応じ、企業側も人種、性別、年齢、信仰などにこだわらずに多様な人材を生かし、最大限の能力を発揮させようという考え方。」とあります。一般的にダイバーシティというと、人材の多様化、特に女性の活躍を進めることと考える企業が多いと思います。それも取り組みの一つではあると思いますが、もっと幅広く、さまざまな人々がさまざまな場で活躍できる社会を目指すものと考えます。

本会のダイバーシティ推進委員会は、昨年、男女共同参画委員会を改名したのですが、春の年会や秋の大会の企画セッションにおいて、女性が働きやすい環境などをテーマにした講演やディスカッションを行ったり、ロールモデル集を作成し、オープンスクールなどで配布するなど男女共同参画を進める活動を行ってきました。これらの活動は、ともすると女性会員の獲得をどうすれば良かに目が向いているように感じます。男女共同参画社会基本法第2条によると、「男女が、社会の対等な構成員として、自らの意思によって社会のあらゆる分野における活動に参画する機会が確保され、もって男女が均等に政治的、経済的、社会的及び文化的利益を享受することができ、かつ、共に責任を担うべき社会」とされており、女性も男性も働きやすい環境、生活しやすい環境を目指すものではないかと考えます。

本会は、他学会と比較しても、女性会員が非常に少ないのが現状で、これを改善していくことも重要と考えます。しかし、学会員の減少が続いている状況を見ると、女性や次世代層だけではなく、これまで入会されていない方々や外国籍の方々からも是非入会したいと思っただけのような学会にしていく必要があるのではないかと思います。そのためには、原子力村といわれるような単色の社会ではなく、多様な知識や経験を組み合わせた社会を形成していくことが大切ではないかと思います。ダイバーシティ推進委員会が出発した今こそ、ダイバーシティを獲得して魅力ある学会を目指していかなければなりません。ダイバーシティ推進委員会だけではなく、会員皆さまも、日々ダイバーシティを意識していただけると願います。

福島特別プロジェクトの幹事も務めています。このプロジェクトは、福島の住民の方々が少しでも早く現状復帰できるよう、住民の方々と国や環境省などとのインターフェースの役割を務めることを目的として、2012年6月に、理事会直結の組織として設立されました。地元にとって喫緊の課題であった周辺環境の除染作業のサポートをはじめとして、放射線影響に関する分析や住民の方々への情報提供などを中心に活動しています。また、除染についての住民の疑問や不安に応えるために環境省と福島県が設置した「除染・除法プラザ」へ、開館当初から毎週末と祝日に専門家を派遣してきました。避難しておられた住民の方々の帰還に向け自治体を実施している相談員制度への支援や、南相馬市の水田をお借りした稲作試験も継続して行っています。私も実際に「除染・情報プラザ」での来館者への説明対応や、南相馬市の相談員に対する研修支援などを行っています。直接住民の方々と接しお話をうかがうと、胸が詰まるような気持ちになります。また、ほっと暖かい気持ちにさせていただけるときもあります。東京から出向いてその時だけのお付き合いでは何もわからないと言われるかもしれませんが。

震災から7年が経過し、福島を取り巻く環境も変化しています。「除染・除法プラザ」も、福島の実地回復の歩みや中間貯蔵などの環境再生に関する情報をお伝えする拠点「環境再生プラザ」に衣替えしました。また、帰還困難区域を除いて避難指示も解除され、除染もほぼ終了しています。一方、福島県の農産物に対する風評等については、いまだに漠然とした不安を感じている方々もおられます。また、水産物については、試験操業が続けられている現状をご理解いただく必要があると考えます。これからは、中間貯蔵施設の整備、運営が本格化します。また、住民の皆さまの帰還がなかなか進まない中、自治体の相談員制度も引き続き運用されています。

福島特別プロジェクトは設立当初、一定期間をもって終了するとしていましたが、学会として、福島の方々に寄り添う活動を続けていくことは重要と考え継続することとし、現在は、期限を明記していません。

福島において私たちにできることは、まだまだ多く残されていると思っています。原子力に携わる者として、できる限り福島に関わり続けていきたいと思っています。
(理事 布目 礼子)