

### 巻頭言

#### 1 離陸した QST：量子科学技術の研究開発拠点として

平野俊夫

### 時論

#### 2 原子力政策の最低防御ライン

原子力に国として取り組む覚悟を、政治がこれから2～3年以内に打ち出せるかどうか、わが国の原子力の未来を決すると思う。

山地憲治

#### 4 福島第一原子力発電所事故後の半年間における、放射線に関するツイッター解析からみえてきたもの

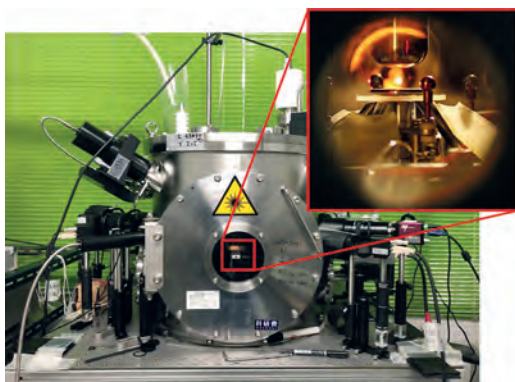
宇野賀津子

### サイエンス

#### 25 航空宇宙分野で開発された浮遊法を用いて溶融物の物性を測定するー静電浮遊法とガス浮遊法

炉心溶融物のような高温かつ反応性の高い液体の物性を測定する際に、試料と容器との反応が問題になる。この問題は、試料を浮遊させることができれば解決できる。

大石佑治



大阪大学の静電浮遊装置の外観図

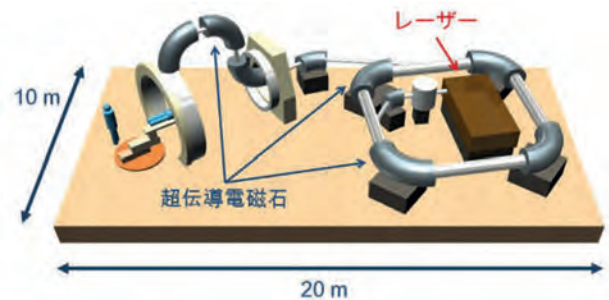
### 解説シリーズ

#### 最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構(1)

#### 15 量子メスの研究開発

量研では小型で、日帰りがん治療を一般化する次世代の重粒子線治療装置である「量子メス」の開発に着手した。

白井敏之



次世代重粒子線治療装置(量子メス)の模式図

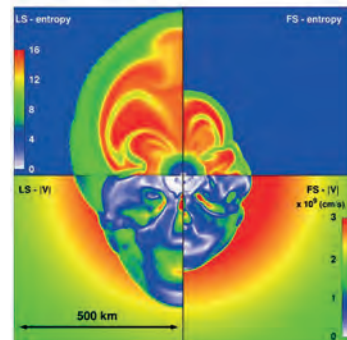
### サイエンス

#### 30 宇宙の大イベント超新星爆発とその鍵を握るニュートリノーニュートリノ輸送計算が明かす物質創生の筋道

重い星による超新星爆発では、ニュートリノの反応が頻繁に起こり、それが爆発のメカニズムの鍵を握っている。

その記述で用いられるボルツマン方程式は、原子力における中性子輸送計算とも多くを共有している。

住吉光介, 千葉 敏



ボルツマン方程式による超新星爆発の結果

(出典) H.Nagakura et al., Astrophys.J.854 (2018) 136, Fig-3 より転載

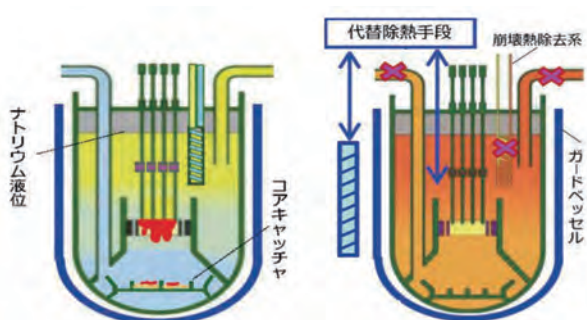
### 12 Column

- 「ブラックアウト」 井内千穂
- 「汝、驕ることなかれ」 北岡哲子
- 「モロッコの原子力発電事情(下)」 妹尾優希
- 「安全目標再考」 竹内純子
- 「アインシュタイン」 渡辺真由
- 「英語の作文」 渡辺 凜

## 40 第4世代ナトリウム冷却高速炉の系統別安全設計ガイドラインの構築

研究専門委員会では、炉心系、冷却材系、格納系に関する設計上の推奨事項と設計事例を「系統別安全設計ガイドライン (SDG)」にまとめた。

「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計ガイドライン」研究専門委員会



ATWS系DECの事故影響のIVR(左)とLOHRS系DEC時の炉心損傷防止(右)

## 報告

## 46 断層リスクに向き合う原子力安全のアプローチ 日本原子力学会 特別国際シンポジウムの報告

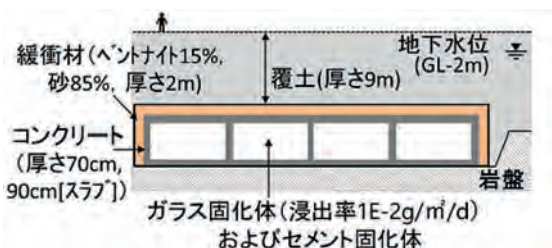
断層変位に関わる原子力発電所のリスクをどのように評価し、対処するのかをテーマとしたシンポジウムにおける国内外の専門家による議論の概要を報告する。

高田毅士, 糸井達哉

## 52 1F汚染水処理二次廃棄物ガラス固化体の浅地中処分の安全性評価

1Fの汚染水処理から発生する放射性廃棄物をどう管理するか。ガラス固化技術を適用し、核種閉じ込め性能が期待できるガラス固化体をピット処分した場合の安全性について検討した。

原 啓二, 雨宮 清, 安部田貞昭



## 理事会だより

## 62 企画委員会：2018年秋の大会 理事会セッションから

西野由高

## 6 NEWS

### 解説シリーズ

## 20 WEO2017と内外エネルギー情勢への示唆 第5回 世界をリードする中国のエネルギー市場

中国は2040年には石油や石炭の消費、原子力設備量、太陽光・風力発電設備量で世界第一位となる。日本はエネルギー資源調達リスク上昇へ備え、エネルギーセキュリティ強化のために原子力発電の維持が不可欠である。

小宮山涼一

### 連載講座 核融合トリチウム研究最前線 —原型炉実現に向けて(第6回)

## 35 トリチウム透過研究と透過低減技術開発

トリチウムを含む水素同位体は構造材料中を高速で透過するため、燃料効率の低下や炉外への放射性物質の漏洩が懸念されている。本稿ではトリチウム透過機構の解明に向けた基礎研究と、トリチウム透過を低減する技術について述べる。

近田拓未

### 談話室

## 57 福島第一原発を視察して

野間美智子

## 60 リケジヨの思い(2)

口町和香

### 科学コミュニケーション 第6回

## 61 未来の選択

岸田一隆

- 29 From Editors
- 45 J-STAGE 電子アーカイブ化に伴う過去記事の登載・無料公開について
- 63 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 新入会一覧, 共催行事, 2019・2020年代議員候補者推薦, 2019年フェロー候補推薦募集, 書籍販売のご案内, 英文論文誌 (Vol.55, No.12) 目次, 和文論文誌 (vol.17, No.3/4) 目次 暫定版主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧
- 後付 総目次・著者索引 (Vol.60, Nos.1~12)

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/>

# 離陸した QST：量子科学技術の研究開発拠点として

## 巻頭言



量子科学技術研究開発機構 理事長

平野 俊夫 (ひらの・としお)

1972年大阪大学医学部卒業。大阪大学教授、大阪大学総長を経て、2016年4月から現職。サンド免疫学賞、藤原賞、クラフォード賞、日本国際賞などを受賞、2006年紫綬褒章を受章。専門は免疫学。

量子科学技術研究開発機構(QST)が2016年4月に発足して2年半が経ちました。これまで滑走路を整備して離陸を開始したQSTは、いよいよ大空高く舞い上がる時期にきています。放射線医学研究開発、量子ビーム科学研究、核融合エネルギー研究開発の三つを柱として、それぞれの強みを活かした事業を進めるとともに、部門の垣根を超えた融合研究や産学官連携を進めるための仕組みを整備して重点的な研究開発を開始しています。このうち「次世代放射光施設」、「量子生命科学」及び「がん死ゼロ健康長寿社会プロジェクト」は、QSTが自らの将来の柱にするとともに、国内外の産学官連携の中心的役割を果たすべき事業と位置づけています。

現在、国は、物質の構造だけでなくその機能解明に直結する電子状態の詳細まで明らかにできる「次世代の高輝度軟X線放射光施設」の建設に着手しようとしています。その応用は極めて広範囲に及び、特に触媒化学、磁性・スピントロニクス材料、高分子材料などの分野で、最先端の学術研究のみならず、産業利用においても社会的・経済的に高いインパクトを与える成果の創出が期待されます。この事業の整備・運用は官民地域パートナーシップによって進めることとなっており、QSTは、2018年1月に施設の整備・運用の検討を進める国の主体として文部科学省から指名されました。これまでの実績に加えて、何より、新しい組織であるQSTがさらに大きく飛躍することへの強い期待が込められていると理解しています。また、パートナーとしては、一般財団法人光科学イノベーションセンターを代表機関とする、同財団、宮城県、仙台市、国立大学法人東北大学、及び一般社団法人東北経済連合会が2018年7月3日に正式に選定されました。新たな量子科学技術の推進を念頭に、建設実現を目指して活動を開始しているところです。

一方、QSTでは、設立当初より「量子生命科学」を新たな学問分野として確立するための取組を進めています。これは、計測・センシング等の最新の量子科学技術や量子論を生命科学に応用することで、未知の生命現象の発見や生命現象を量子レベルで理解する等、生命科学の革新を目指すとともに、得られた技術と知見の両方を、医学・医療等の幅広い分野に活かすことにより、新たなイノベーションの創出を目指すものです。これまでに、量子生命科学研究会の設立、国際シンポジウムの開催などを進めるとともに、複数の研究機関と連携して、ナノ量子センサを用いた細胞中の局所的な電位・磁場・圧力・pH等の計測など、実際の研究開発も開始しています。2019年4月には新たな組織の立ち上げも予定しており、これを核として量子生命科学の研究領域に国内外の研究者を結集させたいと考えています。

QST放医研では、1993年に世界で初めて重粒子線がん治療装置の開発に成功し、その有効性を明らかにしてまいりました。QST発足を受けて、核融合の超伝導技術、レーザー粒子加速技術やマルチイオン照射などを組み合わせた小型・高性能な次世代重粒子線がん治療装置である「量子メス」と $\alpha$ 核種を使用した標的アイソトープ治療の開発を推進し、免疫制御治療などと組み合わせ、手術不要で働きながらのがん治療が可能となる「がん死ゼロ健康長寿社会」実現を目指します。

このように、QSTは、放射線医学、量子ビームや核融合分野で培った研究開発能力を活かし、世界トップクラスの量子科学技術研究開発プラットフォーム構築を目指して研究開発や新たな学問分野の確立に向けた取組をこれからも進めてまいります。

(2018年9月28日記)



## 原子力政策の最低防御ライン



山地 憲治 (やまじ・けんじ)

(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)理事・研究所長

東京大学工学部原子力工学科卒, 1977年同大学院修了, 工学博士。電力中央研究所経済研究所エネルギー研究室長, 東京大学工学系研究科電気工学専攻教授等を経て, 2010年より現職, 東京大学名誉教授。香川県出身。

私は原子力はわが国のエネルギーにとって大変重要だと考えている。今般, 第五次エネルギー基本計画が定まり, 「エネルギー安全保障, 経済性, 環境適合性」, いわゆる3Eをバランスよく満たさねばならないことが確認された。これは長年にわたるエネルギー政策の基本であり, 今後も不変だと思う。3つのEだけを考えると原子力は, 少なくとも今存在する再稼働待ちの原子力発電所はどれも満足している。

原子力は, 一旦燃料を装荷すると技術的には2年くらい, 制度運用でも13カ月は動かせるというように技術内在的に備蓄性があり, エネルギー安全保障に役立つ。

ただし昨今は, 「原子力は経済的に競争力があるのか」という疑問が呈されるようになった。例えば現在, 欧州の新設原子炉の建設費は100万kW級1基が1兆円超というように, ついこの間まで3,000~4,000億円と言われていたところからすると, 倍増以上になっていて, 驚くほど高い。どうしてそこまで高騰したのか, しっかりと分析する必要がある。しかし, 今, 日本国内で問題になっているのは, 震災後に止まっている原子炉の再稼働である。これは追加投資もほとんど終わっているのに, 経済性を有していることは明白だ。動かさずに止めて置くというのは非合理極まりない。

原子力の環境適合性も明らかである。再生可能エネルギーと原子力はCO<sub>2</sub>を出さず, 温暖化対策の切り札になる。にも関わらず, 原子力政策が展開していかないのは, 安全確保に対する信頼が失われているからである。

この状況を突破するには政治の力が必要だが, 人々が不安に思っている原子力を「大事だ」と訴えて選挙を戦うのは辛いだろうと, 私には想像するほかないが, よく理解はできる。原子力などのリスク選択の問題は政治 이슈化すると泥沼に入る。国民が意識せずともリスクがきちんと管理されているという状態が本来望ましいのだが, 福島事故後は, 原発を進めるべきか, 止めるべきかという, 選択の問題になってしまった。

安全とリスクの問題を政治 이슈化すると, 結局, 民意を問うことになる。民意はゼロリスクを求める傾向があるが, 原子力はゼロリスクでなくてもやらなくてはならない。絶対安全ではないけれど必要なものなんだと政治家が言えるかどうかである。不安が燃え盛っている中で安全問題を取り上げても合理的な議論にはならない。通常時から, 原子力が抱えるリスクを隠さず, その対応を分かり易く説明しておくことが大事だったのだと思う。民意に沿うだけが政治ではない。国の安定的な発展のために民意をリードしていく, プロアクティブな行動が期待される。

エネルギー基本計画には, 原子力は可能な限り依存度低減を目指すとして書いてあるけれど, 同時に, 「現在実用化している脱炭素化の選択肢」という記述もある。選択肢として維持し続けていこうという姿勢は長期的にも見えているし, 2030年の20~22%目標を確実に実現することも書いてある。ここをポジティブに受け止めるべきではないか。その上で, いま原子力を取り巻く状況がものすごく悪いので, 政策の中でも最低防御ラインを持つべきではないか。それは何かと言えば, 私は再稼働だと思っている。再稼働が進んで, 安定的基盤ができて, 20~22%の達成が見込めるようになれば, そこからまた次の展開を考えれば良いのではないか。

エネルギー基本計画は3年毎に改定するので, それほど先でなく次のステージに移る。そのステージに行った時に, 具体的にどうするかが問題である。特に大きいのはプレイヤーの問題だ。かつての電力会社であれば総括原価主義の下, 電気料金で費用回収できたので, 原子力のような長期投資も可能だったが, いまは自由化の時代で, 地域独占も無い中で原子力に投資する環境はできていない。

現実に原子力発電所を新設するとなった時, 果して融資が受けられるのか, 経営リスクに耐えられるのか, そこが一番の問題だ。長期的に原子力を維持して伸ばして

いくのであれば、そうした事業経営の環境を整えなくてはいけない。電力システム改革で電力会社の経営の基盤構造を変えたのだから、原子力を支える国の役割がより一層明確になってきているのだと思う。そこから先は、防御すべき最低ラインの中だから今は言わないが、この次のエネルギー基本計画では、国として原子力に取り組む覚悟を示す必要があると思っている。

研究開発も、ある意味で最低防御ラインのようなものを持っていなければならない。今までと同じように取り組めるわけではない。今回「もんじゅ」の廃炉が決まった。原子力の実用利用の柱は軽水炉だが、研究開発の柱は高速増殖炉だった。確かに中国、インド、ロシアはまだ高速増殖炉を開発を続けているが、欧米は高速炉から撤退している。日本の原子力関係者のシニア層は、まだ高速増殖炉は大事だと思っているようだ。軽水炉ではウラン資源の利用率が悪く、その論理は間違いではなく、100～200年のオーダーで考えたら、確かに今も正しいだろう。

しかし、最低防御ラインを守るという観点から見て、研究開発において今大事なことは何か、ポジティブに取り組むべき対象は何かと言えば、それは増殖炉でもプルトニウム利用でもないと思う。

高速増殖炉実用化に向けて我が国が研究開発体制を整備したのは50年以上も前である。私が記憶する1970年前半当時の原子力開発規模想定は、2000年に、わが国では1億kW以上、米国は10億kW以上、世界全体では30億kWを超えていた。現実には2000年を20年近く超えた今でも、世界の原子力規模は4億kW足らず。2050年以降を見通しても10億kWを超えるかどうかというところである。この状態で天然ウラン不足を想定して増殖炉開発を目指すのは到底合理的とは思えない。

一方では、(ウラン鉱石や濃縮など核燃料サイクルのフロントエンドのコストはほとんど変化していないのと対照的に、)再処理やMOX燃料加工費は当時の想定10倍以上に高騰しており、プルトニウム利用の経済性は極めて厳しい。プルトニウムがタダで入手できたとしても、MOXのプルスーマル利用は経済的損失になる。今では、軽水炉の使用済燃料は、安全確保にほとんど問題がない乾式貯蔵で長期保管するのが基本であろう。すでに投資した費用は戻って来ない。これからの最適な六ヶ所再処理工場の運用は、原子炉再稼働に伴う使用済燃料管理の必要性に応じて運用し、不必要な分離プルトニウムの蓄積は避けるべきだろう。今回のエネルギー基本計画もこのような方向でまとめられていると思う。

エネルギー基本計画には、研究開発について「人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉を追求」と記されている。明記はされていないが新型炉として注目されているのはSMR

である。SMRは、昔はスモール・ミディアム・リアクターの略だったが、今はスモール・モジュール・リアクターになった。この方向は一考に値すると思う。中小型であれば、固有安全性を高めることが容易で、初期投資も少なく投資リスクが低減する。モジュールとして工場生産比率が高まれば経済性や安全性確保にも有利になるだろう。炉型については、トリウム溶融塩炉や日本でも研究開発している高温ガス炉などが取り上げられているが、世界でSMRと言われているものの中には、軽水炉がかなりの割合を占めている。

現在、世界に発電用原子炉が400基超があるが、実は世界の船用炉(原子力潜水艦と航空母艦、一部に砕氷船)も累積で200基くらいある。これらは全て軽水炉(PWR)である。サイズは数万kWから、数十万kWだからモジュール・リアクターに向いている。SMRの中でも軽水炉のオプションが有望だということに注目する必要がある。

人材育成という面では、大学だけではなくて、社会の中での人材育成も併せて考えないといけないと思う。大学レベルの人は、共通基盤の電気、機械、化学といったところが分かっているれば、原子力のマーケットさえあれば応用展開していけると思う。

社会で人を育てるという意味では、現場を維持する必要がある。新增設・リプレースを先送りすることによる一番の問題は、メーカーの人が現場を経験できないということである。これは非常に問題であり、私が震災直後に思ったのは、海外プラントに技術継承や人材育成の機会を期待するということだった。しかし、前述のように建設費が高騰しており、事業者が資金手当てに苦労してなかなか進んでいない。

したがって、新增設・リプレースは人材育成にとっても非常に重要であると思う。何年もつくっていないということになると、会社の中で担当するチームが段々と縮小し、ノウハウも無くなっていく。新增設・リプレースが無いことが、人材育成の上でも禍根をつくっているという意識を強く持つ必要がある。

安倍政権で6年経っても、まだ原子力に関しては、腫れ物に触るような状態が続いている。しかし、こういう安定政権の時代でなければ、原子力はキチンと取り上げられないのではないと思う。政争になって、民意が判断するようになったら、原子力に思い切った対応はできない情勢だ。残された時間はそんなにないと思う。原子力に国として取り組む覚悟を、政治がこれから2～3年以内に打ち出せるかどうか、わが国の原子力の未来を決すると思う。

(2018年9月18日記)



## 福島第一原子力発電所事故後の半年間における、放射線に関するツイッター解析からみえてきたもの



宇野 賀津子 (うの・かずこ)

(公財)ルイ・パストゥール医学研究センター基礎研究部, インターフェロン・生体防御研究室室長, 理学博士

1981年京都大学理学研究科単位取得退学, 1986年から京都パストゥール研究所主任研究員, 1990年同基礎研究部, インターフェロン・生体防御研究室室長(現ルイ・パストゥール医学研究センター), 現在に至る。

2018年9月に、2011年3月のはじめからの半年間、ツイッター上で飛び交った内容を、放射線関係のキーワードで検索、2500万件を入手し解析した論文を発表した。「Twitter use in scientific communication revealed by visualization of information spreading by influencers within half a year after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident」という論文で、福島第一原子力発電所事故後の半年間における、放射線に関するツイッター利用とインフルエンサーネットワークの可視化についての分析調査報告書といえよう<sup>1)</sup>。PlosOneというオープンアクセスの査読付のジャーナルは、境界分野も含め幅広い内容が掲載されていて、対応が早いし情報の話なども掲載されていたので、この雑誌を選んだ。情報の専門誌ではなくもう少し幅広い人に読んで欲しいとの考えもあった。ところが、2番目のレビューワーカーが見つからない!とか、返事をしてこないとか色々あって、リバイスも含め、8ヶ月もかかってしまった。

私自身は以前にも原子力学会誌に書いたことがあるが<sup>2,3)</sup>、免疫学が専門で、2011年以降リスクコミュニケーションに首を突っ込んでいる。どうして、ツイッター解析にまで関わったのか、見えない糸に引き寄せられてとしか答えられない。3.11以降の放射線影響についての出版物は可能な限り読んで、書籍動向も調べてきた。何故、今から思えばデマに近い内容が信じられたのか。何故、福島第一原発がある程度落ち着いた2011年夏頃から県外避難者が大きく増加したのか、放射線影響の分野で実績のある研究者が、御用学者と言われ攻撃されたのか、気になっていた。

今回発表した論文への取り組みは、2016年の年末にはじまるが、さかのぼると、2011年3月11日からはじまっていると言ってもよい。私自身は福島第一原発事故以降、福島の高放射線量がチェルノブイリ事故を超えないと確認した時、影響があるとすればがんリスクの上昇と老化促進への影響かと考え、2011年3月から5月

は、友人の素粒子学が専門のNPO あいんしゅたいん理事長の坂東昌子氏をはじめとした特に物理系の人と、それぞれのネットワークから入ってくる情報をつきあわせ、連日夜遅くまで議論していた。この頃の私自身の情報源は、関係するメールのネットワークからの情報や、友人の放射線や癌の研究者からであった。そして、2011年3月末からNPO あいんしゅたいんのホームページに低線量放射線の生体影響と、免疫の話について書いたスライドをあげたり講演会を開いたりしていた。

その後、日本学術振興会の産学協力研究事業に係る説明会チームの一員として、2011年秋に白河市で「放射線から健康を守る学習会」の講師を務めたり、2012年には日赤の講演会でお話したりした。更に「放射線の影響とクライシスコミュニケーション」に関する先導的開発委員会(委員長山下俊一, 副委員長 坂東昌子)第2分科会主査というわけでどんどん、クライシスコミュニケーションに首を突っ込んでいくこととなる。特にこの委員会で、ツイッター解析のきっかけを作ってもらったのは大きい。500万件の放射線関連のキーワードに関連したツイッターデータを買って、情報の専門家に解析をお願いしたりした。何故、ツイッターということになるが、それまでに書籍を中心に間違った情報の整理などしていたことから、ネット上、特にツイッター上で情報がどう伝わったか、どの時期にどのような言葉に多くの人が反応したのか、御用学者という言葉がでてきて、それがどう影響したのか知りたかったこともある。また学振の研究班でも、これからの時代、ツイッターも大事だよねという雰囲気もあった。そこで、日本産科婦人科学会や日本保健物理学会が発信した内容への反響やその後を解析したりした。また、時間の経過と共に、関心が移り変わる様子もキーワード検索から明らかになってきた。

その後このままで終わるのは残念と環境省の助成金を得て、学振の委員でこの問題に関心を持つメンバーと、南相馬市でリスク活動をしていた坪倉正治氏(現福島

県立医大)等当時南相馬市立病院の方々を巻き込んで、研究班を立ち上げた。

更に2016年12月に京大の情報のネットワークの可視化を専門としている尾上洋介氏(現日本大学)に出会い、年末に入手したばかりのデータをわたすと、1ヶ月も立たないうちに、彼は解析結果を持ってきた。データを見て、愕然まさに追い求めていた、結果があった。私達が何故こんなデマに近い内容が信じられているの?と置いていた背景が、見えてきた。その後、坪倉、鳥居(東大)、尾上を中心にワーキンググループを立ち上げ、毎月集まって論文の内容を固めて行った。

事故後特徴的だったのは、リツイートが事故前はせいぜい20~30%であったのが、後は50%前後と大きく増えていた。また上位100件のアカウントが約1,200万件のリツイートの内の380万件(31.1%)を、上位200件だと480万件(40.0%)を占めていた。つまり比較的限られた数のインフルエンサーの影響が、ツイッターの世界では大きいことが明らかとなった。そこで、事故後の情報拡散にはリツイートに注目して解析しようとなった。また、明らかに感情的なツイートも多く、どうも頻繁にやりとりしているグループがあるとのネットワークがみてとれたので、使っている言葉で、グループ化することを試みた。その言葉表現からまず5つのグループに分け、その後似たものを統合して最終的に、A: 科学的事実に基づいた発信群、B: 感情的な表現の多い群、C: メディアに群分けした(図1)。この群分けは、ツイッターの文章から、仲間の一人が分類したのとはほとんど一致していた。

各群の動向をみると、3月は各群が拮抗していたが、3月末からはB群の割合が過半数を占めるようになり、その状態はその後半年間変わらなかった。また初期は別として、各群間を超えたリツイートはほとんどない事も明らかとなった。この結果は、放射線が少しでも危ないと思う人は、より危ないという情報を求め、途中から科学的には正しい情報が発信されても、受け入れる余地が無いのではと思った。

この研究の課程で、「ツイッターなんて一部の人がマニアックにやっているだけではないの!」との言葉が、特に大御所の方から言われたりした。「お言葉ながら、トランプ大統領もツイッターで発信していて、そのフォロワーは5,000万人以上とされています。ということはその内容は即、5,000万人に届くのですよ。それに日本の20代の若者では、過半数がツイッターをしていますよ。これからの時代、発信法として無視することはできないでしょう」と言っている。実際、3.11以降、ツイッターをはじめとしたSNSを使いこなす、科学的情報の発信ができたのは、ほんの一握りの研究者である。うまく使えば、即時的に情報を届けられるが、一方でデマ情



図1 インフルエンサーを中心としたリツイートによる放射線に関する情報拡散ネットワーク

(出典) Tsubokura M, et al., Twitter use in scientific communication revealed by visualization of information spreading by influencers within half a year after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, PlosOne 2018 Fig4 より転載

報も容易に拡散する。

事故後の早い段階での情報発信の重要性、ことツイッターに関しては、科学的事実にもとづいて情報発信する群の強化が必須である。よく言われるしかるべき所からの情報の一本化では、ツイッター上のデマ情報も含めた感情的な発信をする群の台頭に、太刀打ちできないことは明白である。今こそ、異分野研究者は連携してSNS時代に即した、大規模災害時に科学的事実に基づいた情報をリアルタイムに発信していく方法の研究及びその方策の確立に真剣に取り組まねばならないと考えている。

付記: この研究は「平成28年度原子力災害影響調査等事業」及び「平成29年度放射線健康管理・不安対策事業(放射線の健康影響に係る研究調査事業)」の助成を得て実施したものです。

(2018年10月9日記)

#### — 参考文献 —

- 1) Tsubokura M, et al., Twitter use in scientific communication revealed by visualization of information spreading by influencers within half a year after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. PlosOne, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203594>
- 2) 宇野賀津子 「低線量放射線を越えて」に込めたる想い 福島は第二のチェルノブイリにはならない 日本原子力学会誌, Vol.56, No.1, 15-18, 2014.
- 3) 宇野賀津子 低線量放射線の生体への影響と食の重要性 日本原子力学会誌, Vol.57, No.4, 46-49, 2015.



## 伊方3号機が再稼働，女川1号機は廃炉へ

四国電力の伊方原子力発電所3号機が10月27日に臨界に達し、30日に送電を開始した。同機は新しい規制基準に基づいて2016年8月に再稼働。その後の定検中に広島高裁が運転を差し止める決定を下したため再稼働できなくなっていたが、同高裁の異議審が今年9月末に決定を取り消したことをうけて、四電が再稼働の準備を進めていた。

一方、東北電力は10月25日、女川原子力発電所1号機の廃止を決めた。新規規制基準に対応するための新たな安全対策設備を設置するためのスペースの不足などの技術的制約や、出力が大きくないこと、運転開始からすでに35年目を迎えていることなどが、その理由。

これにより国内で再稼働している原発は計9基(定検で停止中のものを含む)となった。

また、原子力規制委員会は11月7日、日本原子力発電の東海第二発電所の運転期間延長を認可した。東電福島原発事故後に原発の運転期間は原則40年とされたが、規制委が認可すれば20年間、延長できる。延長認可は関西電力の高浜1、2号機、美浜3号機に次ぐ4基目だが、BWRとしては初めて。

なお原発は同機の稼働や延長運転に際して周辺自治体と、安全協定を結んでいる

(原子力学会誌編集委員会)

## エネ庁小委，トリチウム水に関する公聴会の意見を整理

資源エネルギー庁は10月1日に開いた小委員会では、福島第一原子力発電所に貯蔵されるトリチウム水の取扱いについて8月末に行った公聴会の意見を整理し議論した。

小委ではまず資源エネルギー庁が、福島県富岡町と郡山市、東京都内で行われた公聴会での意見を(1)処分方法、(2)貯蔵方法、(3)トリチウムの生物影響、(4)トリチウム以外の核種の取扱い、(5)モニタリング等のあり方、(6)風評被害対策、(7)合意形成のあり方、(8)その他——に分類。処理水の安全性や風評被害への懸念、これに伴い海洋放出に反対する声などがあったことを紹介した。

合意形成のあり方については富岡会場で、トリチウム水の海洋放出が「福島県の漁業に壊滅的打撃を与える」とする漁業関係者からの強い懸念があったことから、市民対話活動に取り組む崎田裕子氏(ジャーナリスト)は、「地域の方々にきちんと情報提供する機会を持って欲しい」と訴えた。

また、公聴会における意見整理の中で、トリチウム以外の放射性物質残存の可能性を指摘し、「小委員会での議論の前提が覆っている」といった批判があり、小委で

は汚染水処理の全般について、東京電力福島第一廃炉推進カンパニーの松本純一氏が改めて説明。同氏は「建屋内滞留水に含まれるトリチウムを除く62核種の放射能濃度を、告示濃度限度未満まで低減できる」と、多核種除去設備(ALPS)の機能を示し、2013年度以降の3つのフェーズで、リスク低減目標を踏まえてALPSを運用してきた実績を述べた。その上で、告示濃度を超過した核種があったことについて、(1)処理前の水の放射能濃度の分布、(2)吸着材の性能低下、(3)設備不具合・除去性能不足——などと要因を説明した。吸着材の性能低下についてはヨウ素129が、複数の吸着材を要することや化学的性質などから、処理後の放射能濃度に大きな変動幅が生じているとしている。現状では、吸着材の交換頻度を上げることで、告示濃度限度未満まで除去可能だとしており、処理水を貯蔵したタンク群については、満水となるエリアから順次放射能濃度の測定を実施するとした。

小委員会では次回以降、他の論点についても議論していく。

(資料提供：日本原子力産業協会)



## 海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

### 【中国】

## 世界初の AP1000, 中国の三門 1 号機が営業運転

中国核工業集团公司(CNNC)は9月21日、浙江省の三門原子力発電所で1号機(PWR, 125万kW)が午前4時頃、フル出力による168時間の連続運転という営業運転開始条件をクリアしたと発表した。同機はウェスチングハウス(WH)社製 AP1000を採用。これにより中国の商業炉は40基、3,905万kWに達し、民生用の原子力発電規模は基数、容量ともに日本を抜いて世界第3位に躍進した。

2009年4月に着工した三門1号機は、今年6月21日に臨界条件を達成した後、6月30日に送電網に初併入。8月14日には、出力を徐々に上げていく試験の中で初めて定格出力に到達していた。

第3世代の原子炉設計である AP1000 の技術的特徴として、CNNC は受動的安全系を採用している点を指摘している。WH 社の説明によると、AC 電源に依存せずに重力注水や沸騰・凝縮などの静的プロセスのみで事故を収束し、安全停止の維持が可能であるほか、最終ヒートシンクが大気であるため、海水など冷却水の循環なしに原子炉の冷却維持が可能。建屋内の物量を大幅に削減して経済性を高めたほか、大型蒸気発生器の採用により、1次系を大容量化し2ループと伝えている。

また、国家電力投資集团公司(SPIC)は10月13日、AP1000設計を採用した海陽原子力発電所2号機を、同日の午前10時頃に初めて国内送電網に接続したと発表した。なお海陽1号機については8月8日に初臨界を達成し、8月17日付けで送電を開始している。

これにより、中国で建設中だった4基の AP1000(各 PWR, 125万 kW)は、すべて送電を開始したことになる。

## 華龍 1 号の運転員訓練用シミュレータを福清に設置

中国核工業集团公司(CNNC)は9月14日、中国が独自に開発した華龍1号のフルスコープシミュレータが予定より115日早く、福清原子力発電所に設置されたと発表した。

CNNC の子会社である中核武漢核電運行技術公司(CNPO)が開発したこのシミュレータにより、運転員の訓練が可能となり、運転員の業務実施開始および継続的

なトレーニングの両面で、重要な役割を果たす。フルスコープシミュレータは一般的には「デジタルバーチャルコマンド」とも呼ばれ、さまざまな国際的に高度なシミュレーション技術を使用し、原子力発電所の運転を平常時と緊急時の両方の状態でシミュレートすることができる。CNPO は、シミュレータについて独立した知的財産権を所有、最新のプラットフォームとソフトウェアを使用し、福清5号機の中央制御室を正確に再現している。5号機自体の中央制御室は8月に完成、最終ディスプレイパネルは8月4日午前に設置されたと8月7日に中国核工業23建設有限公司(CNI23)によって発表されている。

CNNC は福清発電所において、すでに4基の第2世代改良型100万kW級PWR設計「CP1000」を採用して、合計436万6,000kWの営業運転を2017年9月までに開始済み。これに続く第2期工事として5、6号機には、中国が輸出用の第3世代設計と位置付ける「華龍1号」を採用、2015年5月と12月に着工し、2019年と20年の運転開始を目指している。

「華龍1号」は、CNNC と中国広核集团有限公司(CGN)が双方の第3世代PWR設計を融合して開発。中国では福清発電所のほかにCGNが広西省で建設中の防城港3、4号機(各115万kWのPWR)で同設計が採用され、福清5、6号機と同じ2019年と20年運転を目途に建設が進んでいる。

これら4基は本格的な海外輸出に先立ち、国内での実証を行うことを目的としている。

CNNC と CGN 両社は2016年3月、華龍1号の設計を海外展開することを目的として合弁事業体「華龍国際核電技術有限公司」を発足。現在までにCNNC が国外で建設する最初の取り組みとして、パキスタンのカラチ原子力発電所2、3号機(各110万kW)が建設中、さらにアルゼンチンで建設される5基目の原子炉に華龍1号を採用することで、国営原子力発電会社と協力枠組み協定を締結している。一方のCGNは、英国のブラッドウェルB原子力発電所建設計画で華龍1号採用のための包括的設計審査(GDA)が進展中となっている。

### 【米国】

## DOE 長官、サウジとの民生用原子力協力について協議

米国エネルギー省(DOE)のR. ペリー長官は9月10日、ワシントンのDOE本部でサウジアラビアのエネルギー・産業・鉱物資源大臣のK. アル・ファリハ大臣と

会談。世界の石油市場の現状、クリーンな化石燃料の技術開発の共有への取り組みといった議題について話し合った。また、両国間の民生用原子力協力や小型モジュール原子炉(SMR)といった新たな原子力技術についても話題に上った。

ペリー長官は昨年、サウジアラビアの首都リヤドを訪問し、クリーン化石燃料分野と炭素管理に関する覚書(MOU)に調印した。米国政府は中東地域における米国の影響力を維持するためにサウジアラビアとのパートナーシップを強固なものにしたいという意図がある。また、DOEとしてもエネルギー安全保障と安定供給を強化するため、サウジアラビアのエネルギー多様化を支援する姿勢を示している。

## オイスタークリーク原子力発電所が永久閉鎖

米国のエクセロン・ジェネレーション社は9月16日、ニュージャージー(NJ)州で過去49年にわたり運転を続けていたオイスタークリーク原子力発電所(BWR, 64.1万kW)を同日に永久閉鎖したと発表した。

当初計画では2019年12月まで同発電所の運転を継続するとしていたが、9月で現行の運転サイクルが終了することから同社は今年2月、閉鎖日程を前倒しする方針を表明していた。今後数週間以内に原子炉からは使用済燃料が抜き取られ、貯蔵プールに安全に保管されることになる。米国内で最も古い同発電所の永久閉鎖により、米国の商業炉の基数は98基となった。

1969年12月に営業運転を開始した同発電所では2009年に運転期間の延長申請が承認され、2029年まで合計60年間稼働することが可能だった。しかし、NJ州の環境保護局(DEP)は2010年1月、冷却水が取放水されていたバーニガット湾の生態系を保護するため、取放水関係の認可を更新する条件として冷却塔の設置を義務付けると明言。その建設等に7億~8億ドルの経費がかかることから、エクセロン社は同年12月、州政府との合意事項として、冷却塔を建設しない代わりに同発電所を2019年12月までに閉鎖させるとしていた。

今年7月になると、米国籍のエネルギー総合ソリューション企業であるホルテック・インターナショナル社が、同発電所など数年以内に早期閉鎖が予定されている商業炉3基について、廃止措置作業を行うために事業者からサイトごと発電所を購入することになったと発表。オイスタークリーク原子力発電所についてはすでに、発電所と土地および使用済燃料の所有権も同社が購入することでエクセロン社と合意済みであり、廃止措置用にエクセロン社が設置していた信用基金もホルテック社に移

転されることになった。

売買手続は米原子力規制委員会(NRC)による認可の移転承認などを待って、2019年にも完了させる計画で、それ以降はホルテック社がサイト全体の廃止措置作業と開放作業をすべて管理。同社が今年7月にカナダのSNC ーラバリン社と合併で設立した廃止措置専門企業「コンプリヘンシブ・デコミッションング・インターナショナル(CDI)社」は、60年かかるとされていた同発電所の廃止措置を50年以上前倒しし、8年以内にすべて終えるだけの装備があると強調している。

エクセロン社の発表によると、同発電所は商業運転を開始して以来、約2,000億kWhの電力を発電。約半世紀近くにわたって約60万戸の世帯に十分な電力を供給した。また、同発電所が賃金や税金その他で地元コミュニティに及ぼした経済効果は約30億ドルに相当するとしたほか、1億4,000万トン以上のCO<sub>2</sub>排出量削減にも貢献したと指摘。これは、約3,100万台の車両が排出するCO<sub>2</sub>と同等の量だと指摘している。

## ニュースケール社、米国初のSMRをBWXテク社で製造

オレゴン州にあるニュースケール社は9月25日、米国初となる同社製小型モジュール炉(SMR)の製造で設計等の作業を開始するため、バージニア州のBWXテクノロジーズ(BWXT)社を選定したと発表した。

ニュースケール社のSMRは、米原子力規制委員会(NRC)がSMR設計としては初の設計認証(DC)審査を2017年から進めており、2020年9月にも承認される見通し。同社製SMRの最初の顧客となるユタ州公営共同電力事業体(UAMPS)もすでに2016年2月、米エネルギー省(DOE)からアイダホ国立研究所の敷地をSMR建設用地として使用する許可を得た。2020年代半ばまでに米国初のSMRを建設するというニュースケール社の計画は、着実に製造段階に移行しており、先進的な同技術の市場化に向けて大きく前進している。

同社製のSMR「ニュースケール・パワー・モジュール」は、電気出力6万kWのモジュール統合型PWRで、モジュールを12基連結することにより、出力を最大72万kWまで拡大できる。固有の安全性を有しているため、異常な状況下でも原子炉を自動停止し、人的介入や追加の注水、外部からの電力供給なしに無期限に冷却することが可能だとしている。

BWXT社の選定にあたりニュースケール社は、関心表明していた10か国の83社を18か月にわたって厳密に審査。同社の先駆的SMRを実現化する第1段階において、製造可能性や組立、輸送可能性といった側面で設

計に磨きをかけるため、最良の企業を選定したと説明した。世界の SMR 市場については、経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)が「2035 年までに 1,000 億ドル以上の規模に成長する」と試算。ニュースケール社は、DC 審査中 SMR としては同社製 SMR が唯一のものであり、世界の SMR 開発競争においても米国の最有力候補であるとの認識を示した。

同社は世界レベルの SMR 商業化でロシアや中国などの国々と競合状態にあるが、米商務省によると米国企業が 10 億ドルの輸出を行う毎に、少なくとも 5,000 名分の雇用が確保されるという。その意味で、ニュースケール社製 SMR の販売は、米国経済のみならず製造業の雇用に対しても、多大な経済効果が期待できるとしている。

BWXT 社は今後、ニュースケール社製 SMR の製造第 1 段階における作業を直ちに開始し、2020 年 6 月までこれを継続。その後の「製造準備段階」と「製造段階」においてもニュースケール社は、BWXT 社と後日、契約を結ぶことになるとの見通しを述べた。同社は BWXT 社について、米国政府や商業用原子力産業界の双方に原子力機器や燃料を供給しているリーディング・カンパニーだと認識。BWXT 社としても今回のプロジェクトでは、高品質の特注機器製造企業であるプレジジョン・カスタム・コンポーネント社を機器製造に活用するとみられている。

## 【英国】

### ヒンクリーポイント C 計画で、企業 4 社が合併

英国南西部のサマセット州では現在、EDF エナジー社が同国で約 20 年ぶりの新設計画となるヒンクリーポイント C(HPC)原子力発電所(165 万 kW の欧州加圧水型炉×2 基)建設計画を進めている。これに参加中のエンジニアリング企業 4 社は 9 月 27 日、主要な電気・機械設備やケーブル、配管等の据え付け作業を 4 社間で統合した上で、プロジェクトにおける安全面や品質、時間とコストの優先順位に即して調整するため、合併事業体を正式に発足させると発表した。

同建設計画の実施については、2016 年 9 月に英政府とフランス電力(EDF)、および同計画に 33.5%出資する中国広核集団有限公司(CGN)が最終的な契約・合意文書に調印。英原子力規制庁(ONR)が 2017 年 3 月、最初の部分的建設許可を発給したのを皮切りに作業が進められており、2025 年末の送電開始を目指す 1 号機については、2019 年半ばに原子炉建屋部分で最初のコンクリート打設が行われることになっている。

今回、仏国系のアルトラッド社、英国のバルフォア・

ピーティ・ベイリー社とキャベンディッシュ・ニュークリア社、および韓国系の斗山パブコック社の 4 社は、HPC 発電所建設における主要な MEH 設備(機械設備、電気設備および冷暖房空調設備)の納入契約業者として、複雑な据え付け作業のすべてを 1 つの合併事業体「MEH ジョイント・ベンチャー」として実施するとした。このような革新的アプローチにより、同事業体は建設計画全体の「プロジェクト管理オフィス」として機能することになる。現場における機械設備と電気設備すべての据え付け作業について日程を管理するほか、作業のさらなる合理化に資するシステムやプロセス、手続き、データ等で改善と調和を図ることにより、発電所全体の据え付け作業が統合・調整されるとした。

同事業体はまた、最先端の配管製造技術を英国国内で模索していくとともに、他の原子力プロジェクトでも利益を生むとしたほか、世界中の原子力およびハイテク・エンジニアリング部門で、英国が事業機会を得ることにもつながるとしている。

### エネ相、Brexit に備え対策を整えろと約束

英国では、欧州連合(EU)と欧州原子力共同体(ユーラトム)からの正式離脱(Brexit)が 2020 年末に迫っている。その移行期間が来年 3 月末から始まるのを控え、英国政府は 10 月 10 日、離脱協定に最終合意しないまま離脱する可能性も含め、民生用原子力部門があらゆる潜在的シナリオに対応できるよう、必要な法整備などの準備を進めている点を強調した。

ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)の G. クラーク大臣が同日、議会に対して文書で声明書を提出したもので、ユーラトム離脱後も英国が独立の立場で責任ある原子力国家として統治されるよう、あらゆる対策を整えることを約束している。

移行期間の開始まで半年を切ったが、英国国内ではこの「合意なき離脱」へのリスクが高まっているとの指摘がある。英国政府は 8 月下旬、国民に不測の事態や混乱に備えることを促す最初のプランを「技術的告知」として公表。クラーク大臣は、移行期間に入っても民生用原子力部門の貿易や協力が途絶しないことを保証するため、必要となる国際協定関係の交渉はすべて順調に進めていると明言した。具体的には、5 月 4 日に米国と新しい二国間原子力協力協定(NCA)に調印したの続き、8 月 21 日にはオーストラリアとの NCA に調印したとしている。

英国政府はまた、国内の新しい民生用原子力保障措置体制となる原子力保障措置規制案の詳細を公開協議に付

しており、現在は得られた見解の分析を実施中。この秋にも正式な対応を公表する方針で、年末までには規制案を議会に提出できるとの見通しを示した。同規制案は2013年エネルギー法と2018年原子力保障措置法の下に置かれる内容で、移行期間に入る前に英国の新たな原子力保障措置体制として公表されることになる。

クラーク大臣はまた、ユーラトムと英国間で緊密なつながりを模索するため、英国が考えている前向きな提案の詳細を7月に提示したと指摘。ここでは特に、ユーラトムと第三国間の既存の協定よりも、一層包括的かつ幅広いものを、ユーラトムと英国間のNCA交渉で追求していくとしている。

### 【フランス】

## フラマトム社、事故耐性燃料棒を米発電所に装荷

仏国のフラマトム社は9月19日、開発中の事故耐性燃料(ATF)の先行燃料棒を2019年秋にも、米国のアーカンソー・ニュークリア・ワン原子力発電所1号機(PWR, 88.8万kW)に試験装荷することで、事業者のエンタジー社と契約を結んだと発表した。

既存の合金製燃料被覆材にクロムをコーティングするという同社の技術により、高温時の燃料の酸化耐性を改善するとともに、事故の状況下における水素発生量を削減、通常運転時の摩耗耐性なども向上させることができると説明。この開発は、米エネルギー省(DOE)が2012年に開始した「改良型 ATF 開発プログラム(EATF)」の下で行われていることから、同社はDOEの支援により、同技術を2023年にも実展開していくという当初目標の達成も可能になったと述べた。原子力発電所の安全性をさらに高めるとともに、原子力技術の一層の進展も図られるとしている。

DOEのATF開発支援は、2011年の福島第一原子力発電所事故を契機に始まった。炉内で冷却機能が失われた場合でも長時間持ちこたえ、発電所の安全裕度を拡大させる高性能の燃料開発を目指している。目標としては、2022年までにATFの先行燃料集合体を商業炉に装荷、2025年までに市場に供給を掲げており、産業界からはフラマトム社のほかに、GE社と日立の合弁企業であるグローバル・ニュークリア・フュエル(GNF)社、ウェスチングハウス(WH)社の3グループが協力。技術的な設計目標としては、事故時の水素発生量削減、核分裂生成物の保持、高温蒸気と被覆材の反応改善などを挙げている。

フラマトム社によると、同社のATF開発はDOEの支援プログラムに加えて、仏原子力・代替エネルギー庁

(CEA)やフランス電力(EDF)、スイスのゲスゲン原子力発電所といった欧州のパートナーとも協力して進めてきた。開発チームは原子燃料技術の研究開発と進展で数十年にわたる経験を有しており、同社が設計するATFは通常運転時の燃料性能を向上させるだけでなく、緊急時においても十分な対応時間を運転員に与えることとした。また、2014年以降はフラマトム社の経験豊富な専門家が、電気事業者や米仏の国立研究所、大学、世界中の産業機関から集積した情報や能力、専門的知見を元に、同社独自のプログラムを着々と進めていると説明した。

エンタジー社でエンジニアリングと技術サービスを担当する上級副社長は、「低コストでCO<sub>2</sub>を出さない発電を安全に行いつつ、良好な運転実績を維持することは当社の中心的目標」と指摘。その上で、クロムをコーティングした燃料棒は燃料に対する顧客の信頼性を向上させるだけでなく、産業界にとっても重要な技術の進展を促すものだと強調している。

### 【ロシア】

## ロシアで32基目のロストフ4号機が営業運転

ロシアで民生用原子力発電所の運転を担当するロスエネルギーアトム社は9月28日、南西部の黒海北部に位置するロストフ原子力発電所で、4号機(PWR, 107万kW)が当初のスケジュールよりも3か月前倒して営業運転を開始したと発表した。

国内で建設されていた100万kW級のロシア型PWR(VVER)としては最後の1基で、出力10万kWを超えるロシアの商業炉としては32基目となる。同国ではすでに、第3世代+(プラス)の革新的技術を採用した「AES-2006」のノボボロネジ6号機(PWR, 120万kW)が昨年2月に営業運転を開始したほか、同型設計のレニングラード2期工事1号機(PWR, 120万kW)も今年3月に送電を開始。ロシア国営の原子力総合企業、ロスアトム社のA.リハチョフ総裁は、ロストフ4号機においても第3世代+の革新的技術が安全面で一部採用されたほか、建設工事では資材や財源の効率的な活用により、経費を15億ルーブル(約26億円)以上、抑えることが出来たと強調している。

ロストフ4号機は2010年6月に本格着工し、昨年12月に燃料の初装荷や炉内構造物等の据え付け作業が完了。今年1月に連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)が起動許可を発給しており、2月2日に送電網に接続された。同月21日から始まった試験運転段階では、4月14日付けで定格出力に到達。そ

の後、ROSTECHNADZORは7月24日から8月3日まで、同炉で営業運転の開始準備ができていないか包括的な点検を実施しており、9月25日には「建設工事が完全に完了し、技術規制や規範的な法律を遵守するなど、営業運転の開始が可能」との最終判断を明らかにしていた。

ロスエネルゴアトム社によると、最後の1基である4号機が起動したことにより、ロストフ発電所は全面的に稼働。4号機はすでに、試運転段階で37億5,000万kWhの電力を発電しており、ロシア南部地域の送電網における同発電所のシェアは、これまでの26%から約30%に拡大する。ボルゴグラード州やクラスノダール地方などの電力供給地域に対しては、46%だった供給シェアが、約54%に増大すると説明している。

## 海上浮揚式原子力発電所で燃料を初装荷

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社によると、世界で唯一の海上浮揚式原子力発電所(FNPP)として建設中の「アカデミック・ロモノソフ号」で、10月2日に燃料の初装荷作業が完了した。

同FNPPは燃料を装荷前の今年4月、サンクトペテルブルクのバルチック造船所(BZ)から曳船で出港し、現在、ノルウェーとの国境に近い北極圏のムルマンスクで、ロスアトム社の子会社であるアトムフロート社の敷地に係留されている。搭載している2つの小型原子炉「KLT-40S(PWR, 出力3.5万kW)」で燃料の装荷を終え、同FNPPでは臨界条件の達成に向けた準備作業の第2段階が完了。2019年にも最終立地点である極東地域北東部、チュクチ自治管内のペベク市に北極海経由で曳航され、営業運転を開始することになる。

製造にあたっているBZでFNPPの建設と操業を担当する局長は、今年中に同FNPPの最終的な技術プロセスをすべて完了すると説明した。燃料装荷は主要な作業の1つだったが、今後は連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)の許可を得た上で、11月までにこれらの原子炉で臨界条件を達成。定格出力に達する前の段階では、総合的な初期検査も実施する計画である。

今のところペベク市では、港湾施設や陸上設備などのインフラ構造物を建設中だが、これらはアカデミック・

ロモノソフ号を安全に係留するとともに、エネルギー供給を確実に受ける際に必要となる。チュクチ自治管区では、1970年代から電力需要の約80%を賄ってきたピリビン原子力発電所(1.2万kWのRBMK×4基)が2019年から順次、閉鎖される予定。FNPPは同発電所やチャウンスカヤ熱電併給発電所に代わり、同地区の主要発電設備として電力と熱エネルギーをもたらすとしている。

## ロスアトムが、ロシア輸出センターと協力協定に調印

ロシア国営原子力総合企業ロスアトム社は9月11日、ウラジオストクで開催中の「東方経済フォーラム」期間中にロシア輸出センター(REC)との協力協定に調印したとウェブサイト上で声明を発表した。RECは、原子力ビジネスにおけるロスアトム社の国際展開を支援することになる。調印は、RECのA.スレブネフ長官とロスアトム社のA.リハチョフ総裁との間で行われた。

RECは、2015年にロシアの輸出支援体制の中核組織の一つとして設立された政府機関で、海外市場情報の提供や取引・商談のアレンジから輸出制度に関する相談を受けるなど輸出に関する様々な活動支援のワンストップセンターの役割を担う。

今年3月に4期目の再選を決めたプーチン大統領は、5月に任期となる2024年までの大統領令「2024年までのロシア連邦発展戦略の課題と国家目標」を発表した。その中で、エネルギー分野での輸出産業の強化に関連して、輸出促進に向けた行政手続き削減や機構改革にも触れている。今回の両者の連携は、ロシアの原子力輸出に拍車をかけることを目的とされるとみられる。

調印にあたってRECのスレブネフ長官は、「ロスアトム社は、世界数十もの国々に最新技術とサービスを提供してきた。我々の連携により、新たな海外市場を開拓することが可能になると期待している」と述べている。また、RECとの連携を発展させることに関心あるとして、ロスアトム社のリハチョフ総裁は、「5月の大統領令の中でも、輸出拡大は国家優先事項の一つとされている。ロスアトム社はロシアの最新技術輸出の主要プレイヤーであり、我々のプロジェクトへのRECの支援は、金融分野、非金融分野双方に寄与するものと期待する」と述べている。

## ブラックアウト

フリージャーナリスト 井内 千穂

災害が相次いだこの夏。地震、豪雨、台風に襲われた被災地の方々の大変な状況に心を痛めながら、明日は我が身と恐怖する。誰しも、いつ、どこで、どんな災害に遭うかわからない。

9月6日の北海道地震直後、ブラックアウト(管内全域の停電)が日本で初めて起こった。道内の電力需要の約半分を担う苫東厚真発電所が、震源に近く緊急停止したため一気に需給バランスが崩れ、他の発電所も損傷を防ぐため次々に自動停止したという。電力需要と発電量の「同時同量」を常に維持して電力を安定供給する電力会社の精妙な調整機能に今さら感服しつつ、その均衡の危うさに眩暈を覚えた。

そして、どこかで災害が起こるたび、「近くにある〇〇原発は大丈夫だろうか?」と気になるのは、福島第一原発の事故以来の咄嗟の反応である。今回の北海道の場合、泊原発が稼働していたらこんなブラックアウトは起こらなかったという意見もあれば、泊原発が停止してまだよかったという声もある。いつもながら、同じ事象を前にしても受け止め方は人それぞれだ。確かに、もしも稼働している原発の直下に震源があったり津波が発生したりすれば、原発事故が再発したかもしれない。一方、ブラックアウトが真冬のことだったら、凍死者も出るなど被害がさらに大きくなったかもしれない。結果論と「たれば」がせめぎ合う。

それにしても、停止した火力発電所は自力では回復できず、再稼働には他からの電力が要るとは知らなかった。道内に多数ある風力発電施設も停電時は機能せず、再起動には電源が必要。原発の使用済み燃料プールを冷却し続けるのも電力。電気を作るシステムに電気が不可欠だとは…再び眩暈を覚えつつ、電気が使える有り難さをしみじみ噛みしめる。

## Column

### 汝、驕ることなかれ

日本文理大学 工学部 北岡 哲子  
特任教授

「完璧な物理学者」エンリコ・フェルミにより世界初の原子炉「シカゴパイル1号」が生まれた。エンリコ・フェルミ炉とも呼ばれるCP-1は、人類が初めて核分裂の連鎖反応に成功し作りあげた原子炉であり、手作業で制御棒や減速材を操作するが、コントロールにはフェルミの完璧な計算が必須であった。1942年、この実験が成功した日を、CP-1の概念の創出を担った物理学者レオ・シラードは、「暗黒の日として人類の歴史に刻まれる」と呟いたという。3年後の1945年にアメリカは原子爆弾を広島、長崎に実戦投下し、1951年には世界初の原子力発電を成功させ、それがやがて3.11福島へとつながっていく。

先日、知人の医師の不条理な思いを聴いた。約30年前に手術をして命を救った70歳の女性から、あの時死んだ方が幸せだったと告げられたという。女性は家に侵入した強盗に襲われ、眼をナイフで突き刺された。刃先が脳にまで達して、一命は取り留めたものの重度の障害が残り、話すこともままならず生き長らえている。

勿論ナイフは有意義な道具であり罪はないが、道具という物は優秀であればあるほど、扱う人間の意志一つで、多くの人生を生かすも殺すも自在である。

原子エネルギーも、正しい知識と品性を備えた人間が、危険性を熟知した上で制御し、初めて平和利用の王道を闊歩し人類の豊さへの貢献に感謝されよう。そもそも脅威となりうる物を作りだす者は、知的好奇心のみで突き進み、己を過信し安全を軽視してはならない。謙虚な姿勢を怠り方向性を見誤れば、光を放つ有能な道具も闇に落ち、悲惨な結果を招く危険物になり下がるかもしれない。「実るほど頭を垂れる稲穂かな」、肝に銘じたい。

## モロッコの原子力発電事情(下)

コメニウス大学  
医学部英語コース 妹尾 優希

モロッコよりこんにちは。今回の投稿では、前回に引き続き、産業の発展に伴い電力需要が高まりつつあるモロッコの原子力発電事情についてお話ししたいと思います。近年モロッコでは、米国、ロシア、ドイツを中心に世界の主要国の支援を受けて、原子力関連施設の建設や人材の養成に力を入れています。加えて、2016年3月には、IAEAによるインフラ整備のための査定が行われ、本格的に原子力発電所の設置に向け物事が進んでいるようです。しかし、本体である原発の建設の様子は、混迷しています。今年1月には AMSSNUR(モロッコ核・放射線安全保障庁)とスペイン原子力安全委員会の間で、「米国」の支援を受けて設立された CNESTEN(原子力技術電力科学センター)で行われる、原子力実験の情報を共有する覚書に署名をしています。一方で別の報道では、モロッコのエネルギー大臣 Aziz Rebbah 氏は、「ロシア」の国営原子力企業ロスアトムとの共同開発による、シディ・ボウルボラ市の原子力発電所の建設に力を入れており、先述の CNESTEN での研究結果をもとに原発の開発を目指しているそうです。そこで、モロッコ人の友人に現地の様子について聞くと「モロッコ政府に原発が作れるはずがない。共同開発で建設ができたとしても、原子力発電所を安全に運転する力があるはずがない」と、まるで冗談を言ったかのように笑いながら話していました。その後、友人は少し考え込み「でも、もし本当だったとしたら怖い」と先ほどとは一転して真顔になり続けていました。友人と話した後、モロッコ政府の原子力発電に向けた一方的な活動が進んでいる中、国民への原発の正しい情報共有はきちんと行われるのか、不安に感じました。

## Column

### 安全目標再考

国際環境経済研究所  
理事・主席研究員 竹内 純子

8月26日、東京大学において「『安全目標』再考－なぜ安全目標を必要とするのか?」と題するシンポジウムが開催され、8月最後の日曜日でありながら、120人を超える参加を得た。本年3月に東京大学弥生研究会から発行された同じタイトルの論文を題材としたもので、論文や当日の発表資料はリスク部会のHPに掲載されている。ぜひ一読と言わず、繰り返し目を通していただければと思う。

筆者自身は原子力学会員でもない、全くのよそ者である。「原子力安全」と向き合うようになったのは、2016年1月に逝去された故・澤昭裕先生(国際環境経済研究所)から、「リスクというものの考え方を、一般の方にもわかるようにまとめてほしい」という宿題を遺されたことがきっかけだ。私こそがその「一般の方」であり、余りに大きな宿題の前に足がすくんだが、多くの方のご協力やご指導のおかげで「原発は安全か たった一人の福島事故報告書」の発刊にこぎつけた。

同書執筆の過程で、福島原発事故を防げなかった原因の大きな一つとして、PRAに正面から取り組まなかったことを指摘したが、PRAも手段の一つでしかない。根本からやり直すのであればまず安全目標の議論が必要だ。本来は安全目標に正面から向き合うべき関係者が、いつまでもたっても横から眺めているだけの現状は、ゴールのわからないマラソンを走っているようにも見える。すぐに答えが出るものでないことはもちろん認識しているが、関係者が悩んでいること、もがき苦しんでいる姿を見せることも重要ではないだろうか。安全目標の議論は、原子力技術の利用を考える最初の一步だ。ぜひ本誌をお読みの皆さまにも、一緒に悩み、もがき苦しんでいただきたいと思います。

## アインシュタイン

東洋大学社会学部 渡辺 真由

アインシュタインは悲しんでいるだろうか。

原子力に精通している皆さんの前ではお恥ずかしいが、アインシュタインといったら「ラッセル＝アインシュタイン宣言」しか知らない。「科学者たちが、水爆実験などの核兵器廃絶・科学技術の平和利用を訴えた宣言」という受験用知識でしか知らない。そんなアインシュタインが、原子力を用いて平和的に利用していた発電所によって、多くの人から日常を奪われたと知ったら、科学の発展を悔やむのだろうか。とふと考えた。

教育学部に通っている地元の友達に「エネルギーとか、原子力についてどう思う？」と曖昧に聞いてみた。すると彼女は、教育学部という立場から、彼女の考えと意見を話してくれた。

小学校中学年の頃に社会科見学がある。そこでは工場や浄水場、発電所など、社会に根差した施設の仕組みやシステムを学ぶ。しかしそれだけで、その施設のメリットや弊害などの実用的なことまでは教えてもらえない。原発の怖さや危険性は知っている。しかし、事実を知っているだけで「なぜ」を学ぶ機会は少ない。なぜ原発に頼らざるを得ない状況になっているのか。もし自分が総理大臣だったらどうするか。その時上手く言葉にできなくても、考える機会をもっと増やしてもいいのではないかと彼女と話し合った。

アインシュタインが遺した中にこんな言葉がある。「教育とは学校で学んだ事を一切忘れてしまった後にも尚、残っているもの。そしてその力を社会が直面する問題の解決に役立たせるべく、考えて行動できる人を育てること、それが教育の目的と言えるだろう」。その目的をあらゆる場面で達成しなくてはならないし、教員になるであろう彼女にもそれを期待したい。また同じ過ちを繰り返す前に。

## Column

### 英語の作文

東京大学大学院  
工学系研究科 原子力国際専攻 渡辺 凜

自動翻訳が発達すると翻訳家は要らなくなるという予言は、予測変換(の化け物)ができたからもう小説家は要らない、という見立てと同程度にあり得ないと思っているが、それでも、工学の論文なら人間でなくても訳せるようになるだろう、と思っていた。

しかし最近、英語で書かれた論文のアブストラクトをまとめて読む機会があり、考えを改めさせられている。「ん？」と思うと、必ず日本人の論文なのだ。名前を見ずとも日本人と分かってしまうくらい、日本人の書く英語が根本的に違う。どういうことか、不正確さを承知の上で一般化してみる。

お手本となる英文が、フラゴナールの「ブランコ」だとする。細かく描きこまれた絵画だが、どこを見るべきか迷うことはない。ぶらんこに乗った女性の足先へ、自然と注意が向くように作られている。

一方、多くの日本人が書く英文は、ヒエロニムス・ボスの「悦楽の園」だ。数あるモチーフをじっくり眺めれば全体像は見えてくるが、特別に注目してほしい箇所があるようには見えない。(和文の場合、この特徴はなぜかあまり気にならない。)

両者の違いは、「創作者が創作物の意味をどう捉え、伝えようとしているか」に関わる根本的なものである。だから、「悦楽の園」を「ブランコ」に自動変換することはできない。英語の作文の場合も、単語や文を日本語から変換するだけでなく、「読者が何を読み取るべきなのか」という意味を与え、表現する必要がある。これは自動翻訳(あるいは現状の英語教育)を頑張るだけではできない。

自動化を目指すならば、研究背景や条件や結果を単語ベースで入力し、英文要旨を出力するプログラムを作る方が近道かもしれない。



## 最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構

## 第1回 量子メスの研究開発

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 白井 敏之

量研では、「がん死ゼロの健康長寿社会」の実現のために、放医研が中心となって開発してきた重粒子線治療装置を、大幅に小型化・低価格化すると共に、日帰りがん治療を一般化できるように重粒子線治療を高度化する、次世代の重粒子線治療装置である「量子メス」の開発に着手した。本稿では、その量子メスの概要を紹介する。

**KEYWORDS:** 1.Heavy Ion Radiotherapy, 2.Quantum scalpel, 3.Ion Accelerator, 4.Superconducting Magnet Technology, 5.Laser Driven Ion Acceleration, 6.Multi-ion Irradiation, 7.No Cancer Death, 8.Healthy Longevity Society

## I. 背景と目的

国内では高齢化の進展により毎年約100万人の方が新たにがんを発症しており<sup>1)</sup>、海外では、今後20年間で毎年2,200万人まで増加すると報告されている<sup>2)</sup>。このように、近年の医療技術の進歩にもかかわらず、依然としてがんの治療法の研究開発は重要な課題である。2016年4月に日本原子力研究開発機構の一部と放射線医学総合研究所(以下、放医研)が一緒になって誕生した量子科学技術研究開発機構(以下、量研)は、重粒子線治療や標的アイソトープ治療など臨床研究分野における研究・臨床実績と、粒子加速器、超伝導技術、レーザー技術、先端材料研究など多様で先端的な量子科学技術の研究開発能力を併せ持った組織であることから、これを活かして、「がん死ゼロの健康長寿社会」実現のための研究プロジェクトに着手した。

「がん死ゼロの健康長寿社会」の、「がん死ゼロ」を実現するためには、「原発腫瘍制御」、「転移巣制御」、「免疫機能温存・活性化」を実現する必要がある。従来から重視されてきた最初の2項目に加え、近年の研究により、がん免疫の重要性が認識されるようになってきた。一方、平均年齢の延長により、がん治療においても、仕事を継続できることや治療後の生活レベルを保てることは、近年の重要な社会的要請である。また、治療費の高騰をさ

けるためにも、様々な腫瘍に対する治療効果の普遍性も重要な項目である。つまり、「健康長寿社会」を実現するためには、「Quality of Life(QOL)」と、「治療普遍性」といった項目も重要となる。

量研放医研がこれまで取り組んできた重粒子線治療は、図1に示すように11,000件を超える世界最大の実績を有しており、ブラッグピークと体内散乱の少なさに起因する腫瘍への高い線量集中性により、正常組織の損傷が少ないことから、高いQOLを維持できることが臨床データによっても示されている<sup>3)</sup>。さらに重粒子線の持つ高い生物効果は、放射線抵抗性の腫瘍に対しても高い制御効果を実現している。また、重粒子線治療は照射範囲が限定されていることから、これまでも免疫機能を温存すると考えられてきたが、最近の研究によると、免疫

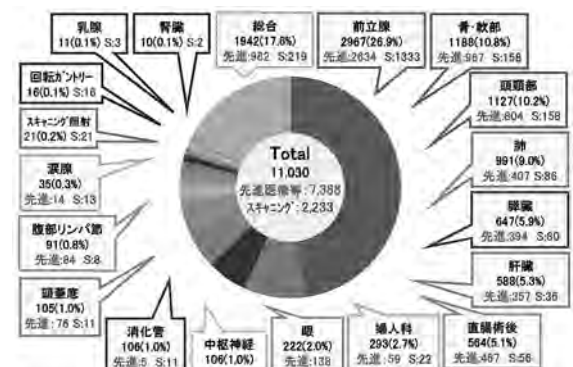


図1 量研放医研における重粒子線治療の登録患者数(1994年6月~2018年3月6日)<sup>3)</sup>。

Research and development of Quantum Scalpel : Toshiyuki Shirai.

(2018年9月27日 受理)

機能を活性化する可能性もあることが基礎研究でも<sup>4)</sup>臨床でも示されている<sup>5)</sup>。

図2は「がん死ゼロの健康長寿社会」に向けた、量研のがんに対する治療戦略である。基本は原発腫瘍(固形がん)をQOLと腫瘍制御のよい次世代の重粒子線治療で治療する。重粒子線治療の大きな特徴は、副作用が軽微であることから他治療との併用も容易であることであり、転移がんにも有効な分子標的薬や標的アイソトープ治療、および免疫制御療法との併用が可能となる。これらの作用機序が異なる3つの治療方法の組み合わせにより、あらゆるがんを克服できる可能性が大きくなる。

しかしながら、重粒子線治療施設は世界的にも10施設しかなく(国内には5施設)、建設中の施設を含めても15施設程度にとどまっている。この主な理由は、治療施設サイズが65m×45m程度になるなど、依然として巨大な装置サイズと、高額な装置費、専用建屋の建設費、多額な運用費用にある。また、この費用が高額の治療費の原因であり、国内での保険適用の障害にもなっている。この問題の克服のために、次世代の重粒子線治療では、病院施設内に設置可能な低コストの超小型治療装置が必須であり、それによって治療費をはじめとする各種費用の低減をはかる必要がある。また、重粒子線治療は一部疾患においては、日帰り1日治療が実現されており、腫瘍の制御も手術に匹敵する成績を取っているが、腫瘍によっては、制御が完全ではなく、図2のスキームにおいて固形がんの除去を手術に代わっておこなうためには、さらなる高度化が必要である。

ここで挙げたような課題を克服し、高度化・超小型化された次世代の重粒子線治療装置は、より多くの症例で日帰り1日治療が可能になることが期待され、部位によっては外科手術に置き換わるポテンシャルを有していることから、量子ビームによる腫瘍切除手術になぞらえて、「量子メス」と呼ぶにふさわしいものである。この「量子メス」を国内企業と協力して日本の技術で実現し、普及させることによって、量研が描くがん治療戦略を実

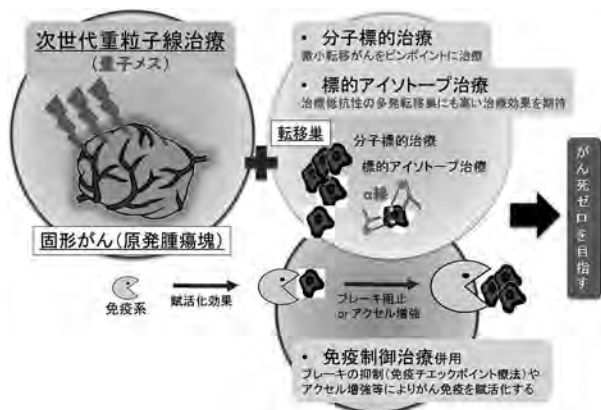


図2 量研が進める「がん死ゼロの健康長寿社会」実現に向けた治療戦略

現することが、本プロジェクトの目的である。また、放射線治療装置はほとんどが輸入品であるが、国内企業が国際競争力をもっている重粒子線治療装置を、量子メスに進化させて国際展開することも重要な目的の一つである。

## II. 治療装置小型化： レーザー駆動イオン加速器

本研究プロジェクトでは、装置小型化(低価格化)と治療高度化の実現を2本柱として取り組んでいる。装置小型化に向けては、量研がもつ超伝導電磁石技術とレーザー駆動イオン加速技術を用いて、それぞれ現行のシンクロトロン(直径20m程度)と入射器(長さ15m程度)を小型化する研究を実施している。

レーザー駆動イオン加速技術は、図3に示すようにピーク出力がPW級のレーザーパルスが薄膜上でマイクロンサイズに集光された時に、そこで発生する相対論的な光電磁場が高密度、高エネルギーの電子線を発生し、これを使って固体薄膜ターゲットの裏面に強力な電荷分離状態を誘起する。この電場により、薄膜裏面に存在する原子を一気に多価に電離すると同時に、核子あたり10MeVに達するイオンが発生する。この場合、イオンの発生と加速は厚さがマイクロン、あるいはサブマイクロンの固体薄膜プラズマ裏面で、ほとんど同時に引き起こされるため、入射器に必要なエネルギーまでの加速に要する長さはほとんど無視できる。むしろ装置の大きさを決めるのは、その現象を引き起こすために必要なレーザー装置や集光チャンバーなど周辺装置の大きさである。現在の重粒子線治療機で使用されている入射器は、イオン源・RFQ・IH線形加速器と、それぞれをつなぐビーム輸送ラインから成っているため、全長15m程度になっているが、レーザーの周辺装置を十分小さく最適化することで、これを5m程度のレーザー加速入射器で置き換えることを目指している。

このような技術の実現のためには、シンクロトロン入射に必要とされる十分なエネルギーと粒子数のイオンを発生させる現実的なスキームの確立が重要である。しか

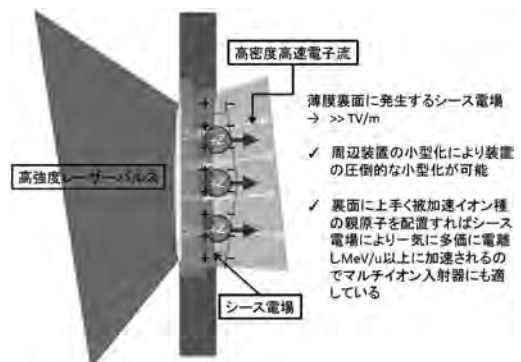


図3 レーザー駆動イオン加速の模式図と利点

し、それ以外にも高繰り返しPW級レーザー技術、そのレーザーを照射するための高繰り返しターゲット技術、さらにはレーザー加速で発生したイオンを収束・輸送するビームライン技術といった多くの技術開発を実施する必要がある。量研関西光科学研究所(以下、量研関西研)は、高強度極短パルスレーザー J-KAREN を保有しており、これまでもレーザーによる電子・イオン加速の研究をおこなってきた。陽子線なら43MeV、鉄イオン線は核子あたり16MeVまで加速した実績があり<sup>6)</sup>、量子メスに向けて、「未来社会創造事業大規模プロジェクト型：レーザープラズマ加速」の支援のもと、開発に取り組んでいる。

当面の目標は4MeV/uのエネルギーの炭素を $10^8$ 個/shot加速し、10Hzで運転することであるが、すでに量研関西研では、 $10^{21}$ W/cm<sup>2</sup>以上の集光強度において、核子あたり10MeVに達する炭素イオンの加速に成功しており、ターゲットの最適化<sup>7)</sup>などにより、この目標は十分達成可能であると考えている。また、レーザーで加速されたイオンは、短パルスでエネルギー・角度広がり大きいという特徴をもっている。そのため、空間電荷効果を考慮したビーム輸送系やシンクロトロン入射スキームの最適化が不可欠である。そこで、Debuncherによるエネルギー圧縮と、四重極電磁石による空間的収束を組み合わせたビームラインを検討している<sup>8)</sup>。

### III. 治療装置小型化： 超伝導シンクロトロン

既存のすべての重粒子線治療装置は、主加速器として直径20m程度のシンクロトロンを採用していることから、このサイズとコストの低減は、重要な課題である。そのため、磁場が1.5T程度にとどまっているシンクロトロンの電磁石を超伝導化することにより、4Tまで増加させ、加速器のサイズを大幅に小型化する研究を実施している。

既に放医研では、2.9Tの超伝導電磁石を使用した回転ガントリーを東芝と共に開発し、2017年より実際の治療で使用している<sup>9)</sup>。この超伝導電磁石は、回転体の上に設置されているため、液体ヘリウムを使用することができず、小型冷凍機だけで冷却している。低AC損失のNbTiケーブルを使用したことで、回転や磁場変化(1分で0→100%励磁)のある条件下で使用しても、クエンチ現象(超伝導状態の消失)は半年に1回程度であり、それも1~2時間で復旧するなど、臨床運用の許容範囲に収まっている。

超伝導電磁石を用いたシンクロトロンは、この超伝導回転ガントリーの実績に基づき、液体ヘリウムを使用しない冷却方式で、より低AC損失のNbTi線材を使用することで、さらに励磁速度を速める設計である<sup>10)</sup>。この超伝導電磁石の主要設計諸元を表1に示す。液体ヘリウ

表1 超伝導電磁石の主要諸元

炭素線エネルギー [MeV/u]	430
電磁石偏向角 [deg]	45×2 台
偏向半径 [m]	1.66
偏向磁場 [T]	4.0
電流 [A]	437.5
電圧(10sec) [V]	137.8

ムを用いない超伝導電磁石では、冷却能力が限られているため、超伝導電磁石のAC損失をどこまで低減できるか、また治療運用面から、シンクロトロンの加速時間をどこまで長くできるかがカギとなる。磁石開発では、Super-GM超伝導発電機で開発された超伝導線材をベースに研究を進めており、10秒の加速時間であれば、現状でも小型冷凍機で設計が成り立つことが確かめられている。一方、放医研で開発された3次元スキニング照射法では、シンクロトロン内に蓄積された粒子を、少しずつエネルギーを変化させながら取り出していくため<sup>11)</sup>、蓄積粒子がなくなるまで入射をする必要がなく、従来のような1秒程度の早い加速時間は不要である。これらの検討を踏まえ、今後磁石設計の最適化と治療運用の両面から、加速時間の最適化をおこなっていく必要がある。

図4にこの超伝導電磁石を使用したシンクロトロンのレイアウトを示している。平均直径は7mになっており、従来の約1/3(面積では約1/10)まで小型化している。ビームシミュレーションにより、遅い取出しなど治療に必要な機能設計をおこなっており<sup>12)</sup>、今後はビーム入射回数を減らすために、高次共鳴の影響の低減やダイナミックアパーチャーの拡大など、蓄積電流値を向上させる研究が必要である。

このように、シンクロトロンの小型化には、超伝導電磁石の開発が重要な課題となっている。また、このような超伝導電磁石が実現すれば、回転ガントリーのさらなる小型化、低コスト化にも貢献すると考えられる。本プロジェクトで要求される超伝導電磁石技術は、小型回転

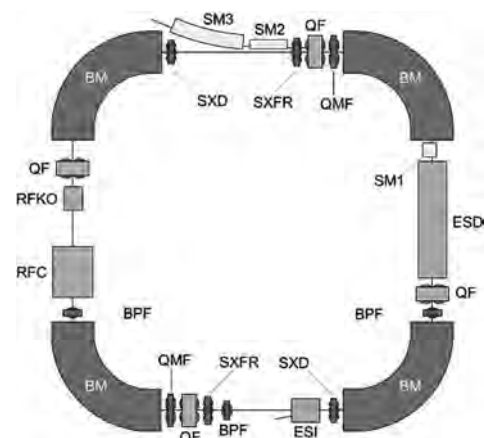


図4 超伝導シンクロトロンのレイアウト

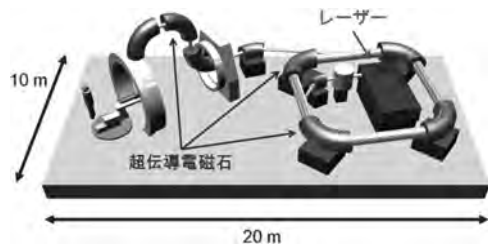


図5 次世代重粒子線治療装置(量子メソ)の模式図

ガントリーよりも一段と高いものであるが、量研核融合研究部門では、高度な超伝導技術を使用したJT-60SAならびにイータープロジェクトを推進するとともに、関連メーカーとも共同研究をおこなっていることが量研の強みとなっている。

レーザー加速入射器と超伝導シンクロトロンを合わせ、最終的な目標は、図5にあるように、治療装置全体を、病院内に設置可能な治療室2室分のサイズ、つまり20m×10m以下にすることであり、これにより建屋コストを含めて全体のコストの大幅な低減をはかることを計画している。

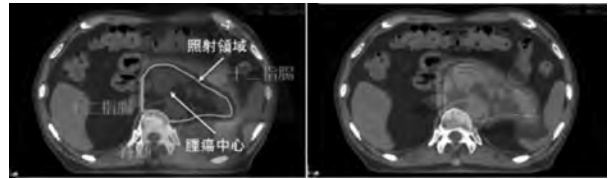
#### IV. 治療高度化

治療高度化に向けては、重粒子線治療の最大の強みである高い生物効果をさらに活用する方法を模索している。近年、がんの薬物・放射線療法において、低酸素環境下のがん細胞に対する治療戦略が重要視されている。こうした細胞は薬物にも放射線にも耐性をもつためである。放射線生物分野においては、この低酸素細胞に対する放射線の生物効果が、線エネルギー付与(LET:放射線が物質中を通過する際、単位長さ当りに失うエネルギー)に強く依存することが知られており、例えば、同じ生物線量であってもLET 45keV/μmの放射線と、LET 100keV/μmの放射線では、低酸素細胞に対する致死効果が約2倍異なっている<sup>13)</sup>。

従来の重粒子線(炭素線)治療では、照射領域全体のがん細胞の生存率が一定になるように照射してきたため、LETは照射領域内で一様ではなく、一般的には腫瘍中心部のLETが最大値にはなっていない(図6上参照)。量子メソでは、分子イメージング技術によって検出した低酸素など腫瘍の状態に合わせて、線量だけでなくLETを最適化することを目標としている。

LETを制御する1つの手段が、マルチオン照射と呼ばれるものである<sup>14)</sup>。この技術では、悪性度の高い腫瘍の中心をLETの高いイオン(例えば酸素)で照射することで、その部分のLETを100keV/μmまで上昇させる一方、それ以外の領域をこれまで通り炭素で照射し、正常組織に近い周辺領域をLETの小さいヘリウムで照射することを提案している(図6下参照)。このように、腫瘍の状態に合わせて、線量だけでなく、LETも積極的に最適化することにより、単純に線量を増加させるより

#### 炭素線治療



#### マルチオン治療

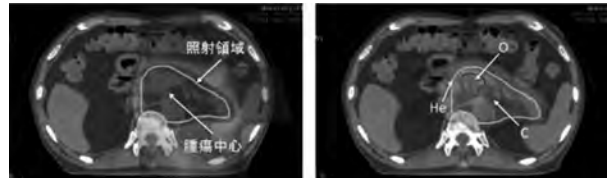


図6 炭素線治療において、膵臓がんに対して与えられた生物線量分布(上左図)とLET分布(上右図)。下図はマルチオン(ヘリウム、炭素、酸素)を照射した場合の生物線量分布とLET分布。

も効果的に、低酸素状態などの放射線抵抗性のがん領域に対する治療効果の向上が期待できるとともに、周辺正常組織への障害を緩和でき、超短期治療(日帰り1日治療)の実現性が高まると考えられる。

マルチオン照射を実現するためには、低酸素状態などの分子イメージング技術、LETを最適化できる治療計画装置の開発、マルチオンの生成・加速・照射技術の確立、マルチオンに関する臨床・生物研究が必要であるが、量研放医研にはHIMACを中心に、治療・診断・物理・生物の研究グループが存在することから、世界的にもこの研究を推進する能力を有している唯一の研究機関といえる。既に、治療計画装置の開発をおこなうと共に、He, C, O, Neのビームをパルス毎に切り替える技術開発や、細胞・動物照射を開始しており、臨床試験に向けた準備を進めている<sup>15,16)</sup>。

#### V. 今後について

これまでの重粒子線治療装置には、研究の段階に合わせて、いくつかの世代が存在する。第1世代は、LBNL(米国)、HIMAC(量研放医研)、GSI(ドイツ)であり、臨床試験、基礎研究中心の大型装置であることが特徴であった。第2世代は、群馬大学やハイデルベルグ大学がこれにあたり、第1世代の成果を受けて、臨床研究中心の重粒子線治療の実証装置に位置づけられる。第3世代は、九州国際重粒子がん治療センターや神奈川県立がんセンターなど最近稼働を始めた施設であり、臨床中心の重粒子線治療施設である。

量子メソプロジェクトでは、今後第4世代、第5世代と段階を踏んで治療装置を開発していく予定である。第4世代は、5年後を目途に実用化を目指すもので、装置全体に対し超伝導技術を適用するとともに、マルチオン照射技術を備えた装置と位置付けられる。このときのイオン種は、炭素だけでなくヘリウム、炭素、酸素などを

使用する。シンクロトロンは超伝導技術を用いることで、直径10m以下の大きさになり、照射装置は小型陽子線治療装置と同様に固定ポート水平もしくは回転ガントリーとなる。さらに、第5世代は10年後を目途に実用化を目指すもので、レーザー加速入射器の実用化と超伝導技術のさらなる高度化に加え、臨床技術を含めた治療効率の向上により、1治療室で十分な患者数を治療することも目標としている。設置エリアのサイズはシングルガントリーで10m×20mとなり、X線治療室2つのスペースがあれば、設置が可能となる。この装置を第5世代重粒子線治療装置、もしくは量子メスと呼んでいる。

量子メスを実現するための研究開発は、要素技術開発とその統合、医療機器承認、臨床試験までを含むものであるため、量研だけ、または1企業だけでは困難である。そこで、重粒子線治療において豊富な経験を持ち、超伝導技術やレーザー加速技術を有する量研と、重粒子線治療装置および関連装置の医療機器としての製造販売実績をもつ企業が、共同で研究開発を行う必要がある。そのため、量研と住友重機械、東芝、日立製作所、三菱電機の4社は、平成28年12月13日付けで、第5世代重粒子線がん治療装置(量子メス)の開発協力に関する包括的協定を締結し、共同研究を進めている<sup>17)</sup>。

#### 付記

本発表の内容は、量研の放医研病院、放医研重粒子線治療研究部・加速器工学部、関西研光量子科学研究部のメンバーを中心とするQST未来ラボ・量子メス研究グループの成果である。また、レーザー駆動イオン加速研究については、JST未来社会創造事業JPMJMI17A1の支援を受けて実施している。

#### — 参考文献 —

- 1) 公益財団法人 がん研究振興財団 がんの統計 2017, [https://ganjoho.jp/reg\\_stat/statistics/brochure/backnumber/2017\\_jp.html](https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/brochure/backnumber/2017_jp.html)
- 2) 国際がん研究機関 IARC 世界がんレポート 2014, <http://publications.iarc.fr/Non-Series-Publications/World-Cancer-Reports/World-Cancer-Report-2014>
- 3) 放医研病院 HP, <http://www.nirs.qst.go.jp/hospital/index.shtml>
- 4) K. Ando et al., "Abscopal effect in recurrent colorectal cancer treated with carbon-ion radiation therapy: 2 case reports", *Adv Radiat Oncol*, 2(3), 333, 2017.
- 5) K. Daniel et al., "Intravenous dendritic cell administration enhances suppression of lung metastasis induced by carbon-ion irradiation", *J Radiat Res*, 58, 446, 2017.
- 6) M. Nishiuchi et al., "Acceleration of highly charged GeV Fe ions from a low-Z substrate by intense femtosecond laser", *Phys. Plasmas* 22, 033107, 2015.
- 7) K. Kondo et al., "レーザー駆動重イオン加速に向けたCWレーザーを用いた薄膜標的の表面洗浄・改質", *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 8-10, 2018.
- 8) E. Noda et al., "レーザー加速イオンの超伝導シンクロトロンへの直接入射の検討", *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 8-10, 2018.
- 9) Y. Iwata et al., "Development of curved combined-function superconducting-magnets for a heavy-ion rotating-gantry", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24, 440505, 2014.
- 10) S. Takayama et al., "重粒子線治療装置のためのシンクロトロン用超伝導電磁石の開発", *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 8-10, 2018.
- 11) Y. Iwata et al., "Multiple-energy operation with extended flattops at HIMAC", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A624, 33, 2010.
- 12) K. Mizushima et al., "重粒子線治療用超伝導シンクロトロンの設計", *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, pp.1243-1245, 2017.
- 13) Y. Furusawa et al., "Inactivation of aerobic and hypoxic cells from three different cell lines by accelerated (3)He-, (12)C- and (20)Ne-ion beams", *Radiat Res.*, 154 (5), 485, 2000.
- 14) T. Inaniwa et al., "Treatment planning of intensity modulated composite particle therapy with dose and linear energy transfer optimization", *Phys. Med. Biol.* 62 5180, 2017.
- 15) K. Takahashi et al., "マルチイオン照射のためのガスパルシング法を用いたイオン種の切替", *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 8-10, 2018.
- 16) K. Mizushima et al., "強度変調マルチイオン照射のためのシンクロトロン運転の検討", *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 8-10, 2018.
- 17) 量研プレスリリース (2016/12/13) <http://www.qst.go.jp/information/itemid034-001357.html>

#### 著者紹介



白井敏之 (しらい・としゆき)

量子科学研究開発機構 放射線医学総合研究所  
専門分野・関心分野 加速器物理学・医学物理学

# WEO2017 と内外エネルギー情勢への示唆

## 第5回 世界をリードする中国のエネルギー市場

東京大学 小宮山 涼一

中国はエネルギー資源、技術などエネルギー分野のあらゆる局面において国際市場をリードしつつある。WEO2017の見通しでも、2040年には石油消費、石炭生産・消費、原子力設備量、太陽光・風力発電設備量において世界第一位となる見込みであり、中国のエネルギー市場の動向が、国際エネルギー市場に与える影響が長期的に強まると見込まれる。日本は、中国の国際エネルギー市場での影響拡大に伴うエネルギー資源調達リスク上昇へ備え、エネルギーセキュリティ強化の上で、原子力発電の維持が不可欠であると考えられる。

**KEYWORDS:** China, service industry, energy demand, oil and gas import, nuclear, renewable energy, energy security

### I. はじめに

中国の実質 GDP は 2000 年時点では、日本の半分以下であったが、急速に工業化が進展した結果、2009 年に日本を抜き、2015 年時点で日本の GDP を 5 割も上回る水準まで成長した。それに伴いエネルギー需要も拡大し、米国を抜いて世界最大のエネルギー消費国となった。急速な経済成長、技術革新により、現在は「新常态」と呼ばれる新たな経済構造にシフトしつつあると言われ、経済の重心は重工業からサービス産業、投資から消費に移りつつある。一方で中国は、従来より石炭を中心としたエネルギー供給構造にあり、石炭燃焼に伴う大気汚染問題が深刻化している。中国政府は大気汚染問題解決のため、石炭消費を大幅に抑制し、天然ガス、再生可能エネルギー、原子力発電の導入、省エネを積極的に進めている。その結果、国際 LNG 市場では、日本に次ぐ世界第 2 位の LNG 輸入国となり影響力を高めると同時に、太陽光・風力発電や電気自動車において、世界最大の導入国となった。中国はエネルギー資源、技術などあらゆる局面で国際市場を主導しつつあり、中国のエネルギー市場の動向が、国際エネルギー市場に与える影響が強まりつつある。こうした背景を踏まえ、WEO2017<sup>1)</sup>では中国に

焦点を当て分析が行われており、本稿では WEO2017 での中国のエネルギー市場の長期展望を紹介する。

### II. 中国の経済・エネルギー動向

中国の近年の経済構造の推移を見ると、経済発展と共に農業部門の比重が低下し、産業部門の比重が飽和する中、サービス産業の比率が拡大している(図1)。中国政府は、サービス産業中心の経済構造へのシフトを目標としており、実際に、従来の農業生産、重工業部門から、サービス産業や高付加価値製品を製造する電気機械産業へ産業活動がシフトしている。サービス産業は、重工業に比べてエネルギー消費原単位が低いいため、経済構造のサービス化の傾向を反映して、中国のエネルギー総消費の伸びは、2000年から2008年の年率8%から2010年以降は3%程度へ低下し、政府による省エネ政策の推進とも相まって、緩やかになっている。

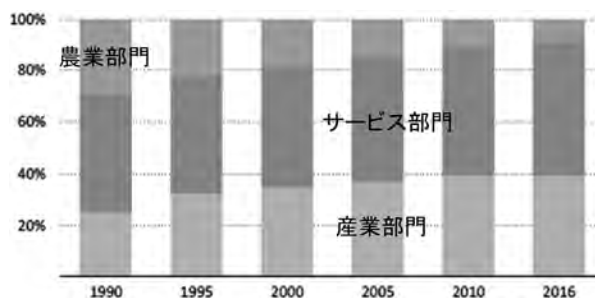


図1 中国の付加価値(GDP)の部門別比率  
(出典)IEA,World Energy Outlook 2017<sup>1)</sup>, Figure12.16(P.495)を翻訳し転載

Implication from WEO 2017 for energy system(5) ; Chinese energy outlook : Ryoichi Komiyama.

(2018年8月8日 受理)

■前回のタイトル

第4回 低炭素化に向う世界の電力需給

また、エネルギー供給部門では、中国は石炭消費の抑制と、新エネルギーへの投資を積極化している。2013年に石炭の一次エネルギー消費量は頭打ちになり(図2)、石炭火力発電量の伸びも以前より緩やかになっている(図3)。また、中国は既に世界最大の再エネ発電投資国になり、太陽光、風力発電技術の導入で世界市場を主導し、世界最大の電気自動車導入国にもなっている。再エネ、電気自動車を含め、中国は全てのエネルギー分野で影響力を高めている。中国は、経済、人口、エネルギー需要での世界比率は2割、石炭は5割、再エネ設備容量は3割、電気自動車は4割に達する(図4)。中国では、抑制されているとは言え、世界の石炭生産、消費の半分

を占め、依然として世界最大の石炭利用国である。また、世界最大の石油輸入国、世界最大の太陽光発電輸出国となり、近年は天然ガス市場、原子力発電でも存在感を高め、エネルギー資源と技術の両面で影響力を高めつつある。

一方、中国の過去約40年間にわたり続いてきた旺盛な経済活動は、大気汚染、水質汚染といった環境問題を深刻化させた。中国は大気・水問題の解決と共に、世界最大の温室効果ガス排出国として(世界の排出量の約3割)、地球環境問題への取組みが重要課題となっている。中国政府は2017年に「エネルギー生産・消費革命戦略」を公表し、安定性、持続可能性、多様で効率的なエネルギー需給の実現に向けた政策の推進を発表している。

### III. 中国のエネルギー需給の展望

#### 1. 一次エネルギー消費

中国のエネルギー消費量は長期的に増加し、2040年までに中国の一人当たりのエネルギー消費量は欧州平均を上回る。エネルギー供給構成では、天然ガス、再エネ、原子力といった低炭素エネルギーの比率が拡大する一方、これまで主要エネルギー源であった石炭への依存度が低下する見込みである。WEO2017において蓋然性が高いと考えられる新政策シナリオでは、石炭消費はまず産業部門、次いで2030年以降に電力部門で減少し、一次エネルギー消費に占める石炭比率は、現状の約7割から2040年には5割弱まで低下する(図5)。石油消費は自動車保有台数の増加を受けて2030年まで順調に増加するが、それ以降は車両効率改善、電気自動車(EV)の普及により伸びが緩やかになり、EVへの投資は世界全体の4割を占める。その結果、2040年の石油消費は現状比3割程度の増加に抑制される。天然ガス消費は、産業部門、電力部門、家庭部門を中心に増加し、2040年には現状比3倍まで拡大する。また原子力、再エネといった非化石エネルギーも拡大し、2040年には一次エネルギー消費の2割強を占める(図5)。再エネは電力部門のほか、熱供給等でも増加が見込まれる。

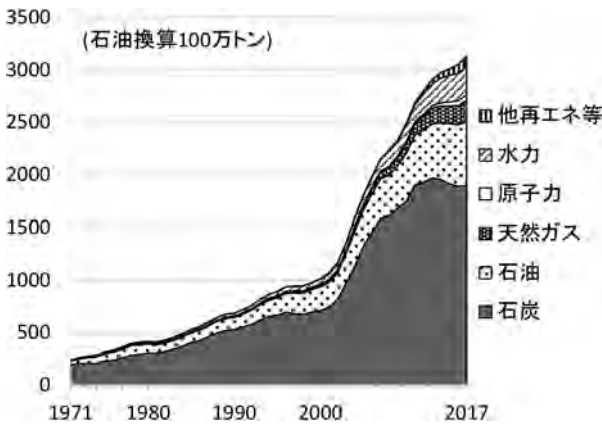


図2 中国の一次エネルギー需要の推移  
(出典)BP Statistical review of world energy 2018<sup>2)</sup>をもとに著者作成

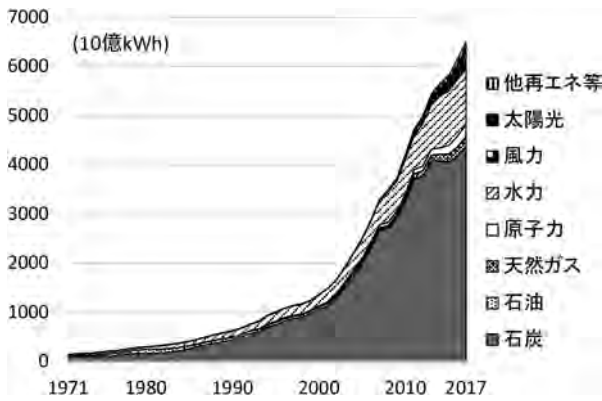


図3 中国の発電量構成の推移  
(出典)BP Statistical review of world energy 2018<sup>2)</sup>をもとに著者作成

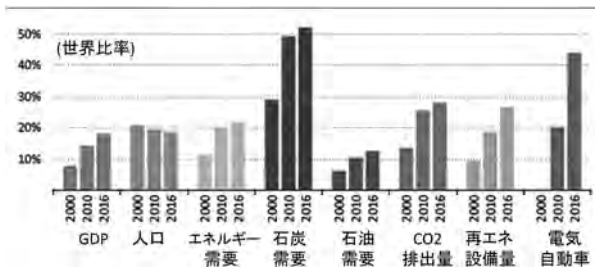


図4 中国の各種指標の世界比率  
(出典)IEA, World Energy Outlook 2017<sup>1)</sup>, Figure12.2(P.473)を翻訳し転載

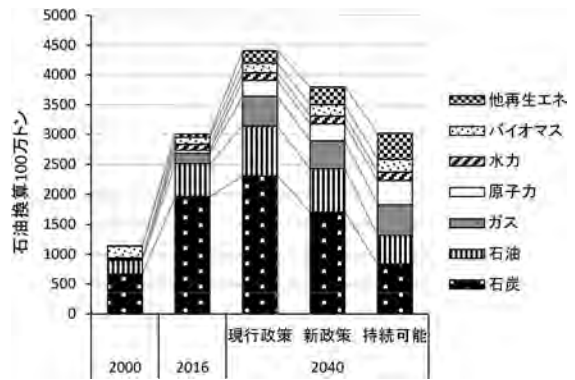


図5 中国の一次エネルギー消費の展望  
(出典) IEA, World Energy Outlook 2017<sup>1)</sup>, Annex A. Tables for scenario projections(p.641~)をもとに著者作成

中国が石炭市場で世界最大の存在であることは長期的に不変であるが、WEO2017の分析では石炭消費は2013年にピークを既に迎え、2040年までに2016年比15%減少すると見込まれている。しかし、中国での石炭比率の削減は課題も大きい。石炭産業は労働集約型産業であるため、石炭生産の減少は雇用の減少をもたらす、社会的影響が大きい。WEO2017の予測では、中国の石炭産業の労働者数は2016年の400万人から2040年には75万人まで大幅に減少すると見込まれている。中国政府は、社会の安定性を維持しながら、将来の石炭消費の動向にあわせて、炭鉱閉鎖や石炭の価格政策等を通じて、適切な石炭産業の合理化が求められている。

石油に関しては、中国は2030年以降に米国を抜いて、世界最大の石油消費国となる。石油下流部門においても、2040年には米国を抜いて世界最大の石油精製能力を保有する。しかし、乗用車や貨物トラックへの燃費規制強化、2040年までに自動車の4台に1台が電気自動車になることを踏まえ、中国は現状のような世界の石油消費を牽引するポジションにはなくなり、2025年以降はインドの石油需要の伸びが中国を上回る。一方、中国の国内の産油量は2015年以降減少基調にあり、投資や技術の改善が進めば増産の可能性もあるが、2040年には日量310万バレルまで低下すると見られている。石油需要は2040年には現状比35%増の日量1,550万バレルまで増加する結果、2040年の中国の石油輸入依存度は80%まで上昇し、石油純輸入量も世界最大の日量1,300万バレルに到達する。そのため中国では、石油の安定供給が極めて重要な課題になると考えられる。

石油の伸びが弱まり、石炭消費が減少する中、クリーンな燃料である天然ガスの役割が相対的に拡大し、中国のガス需給動向が国際的にも影響を与える。天然ガスは、相対的に少ない大気汚染物質とCO<sub>2</sub>排出量で電気や熱を供給できるため、環境問題への対応強化の上で有効な燃料となる。また、中国をはじめ石炭依存度の高いエネルギーシステムや、再エネ拡大が困難な場合や、自然変動電源の導入比率が高く柔軟性のあるバックアップ電源が必要な地域では、天然ガスが重要な役割を担う。

中国では天然ガス消費の急増に対して、国内のガス生産の今後の見通しに注目が集まっている。WEO2017の予測ではシェールガス1,000億m<sup>3</sup>の国内生産も含め、ガス生産全体は2040年に3,350億m<sup>3</sup>まで増加するが、ガス需要は国内生産の約2倍まで増加するため、中国のガス輸入量は2,800億m<sup>3</sup>(LNG換算約2億トン)に達し、中国は欧州に次ぐ巨大なガス輸入国となる。中国は世界のガス市場に大きな影響を与える存在になり、2040年には国際的に中国のガスの安定供給問題が顕在化すると考えられる。また、中国の天然ガス需要の大部分が輸入に依存するため、インフラの整備や輸入コストの抑制が重要な課題になると見られる。

## 2. 電力供給

中国では電力需要が拡大し、2030年以降には石油需要を上回り、2040年までに中国の冷房用電力需要は、現在の日本の総電力需要を上回る。電力化は特に産業部門と民生部門で進み、両部門あわせて、2040年までの電力需要の伸びの9割を占める。運輸部門においても、電気自動車の普及を反映して電力需要が増加し、これにより旅客輸送での石油需要は2030年頃にピークを迎える。このように電力は益々、中国の社会経済の維持のために重要な役割を担うことになる。

中国の旺盛な電力需要に応じるために、中国では電源が大きく増強され、新政策シナリオでは、電力設備容量は現状の15億kWから2040年には2倍以上の35億kWまで増強される(図6)。この増強量は、米国の電力システムに匹敵する。その中で、新設される電源の大部分を再エネ等が占める。再エネ、原子力といった非化石電源の設備量が2025年付近で火力電源を上回り、2040年には総設備容量の6割を占める。2040年にかけて、特に中国では、太陽光発電の設備量が急速に拡大し、太陽光の発電コストは2020年には天然ガス火力、2030年には石炭火力を下回り、中国で最も経済性の高い電源となる。発電量で見ると(図7)、再エネの中では水力が最大

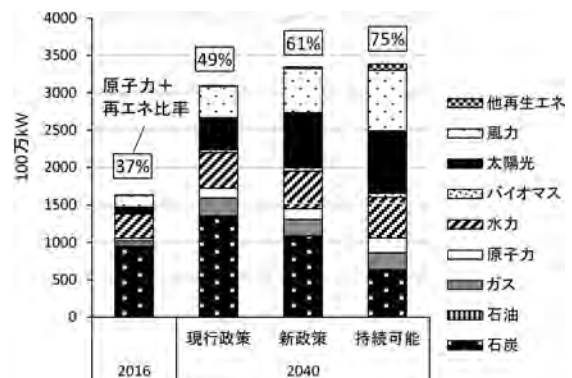


図6 中国の発電設備容量構成の展望  
(出典) IEA, World Energy Outlook 2017<sup>1)</sup>, Annex A. Tables for scenario projections (p.641~) をもとに著者作成

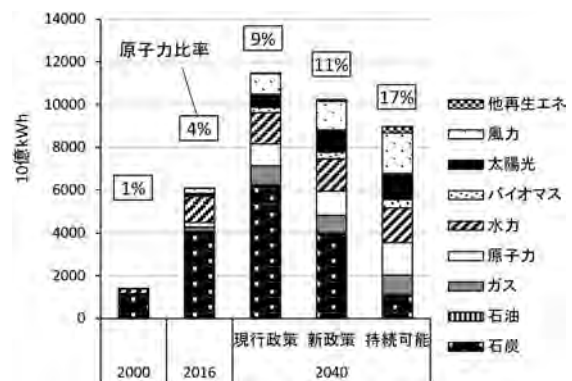


図7 中国の発電量構成の展望  
(出典) IEA, World Energy Outlook 2017<sup>1)</sup>, Annex A. Tables for scenario projections (p.641~) をもとに著者作成



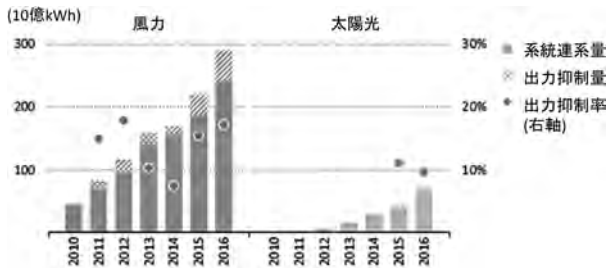


図8 中国の風力・太陽光発電量の推移

(出典)IEA,World Energy Outlook 2017<sup>1)</sup>, Figure13.22(P.548)を翻訳し転載

の供給源となるが、2040年には風力発電が水力に迫る勢いで増加する。新政策シナリオでは、世界の新規風力発電、太陽光発電設備の3分の1が中国で導入される。

また中国では効率性を重視した電力市場改革が計画されている。競争活性化、需給運用の高度化とコスト抑制を主要な原則に掲げ、長期的な電力市場の発展を目標としている。また低炭素電源の拡大、大気汚染物質排出削減、電力供給コスト抑制の実現のため、送電網への投資が重要な課題として位置づけられている。送電網を拡張できれば、効率的な電力輸送が容易になり、安定供給と共にコスト抑制に貢献する。既述のとおり、中国は世界最大の風力発電、太陽光発電導入国であるが、こうした自然変動電源の導入量に比べ、送電網の容量増強が追い付かず、風力や太陽光の出力抑制が大量に発生している(図8)。再エネ電源の効率的な導入拡大のためにも、送電網への投資がきわめて重要になっている。

そして、電力部門での低炭素電源導入や送配電網の増強には巨額の投資が必要になるが、中国のエネルギー全体で2040年までに、総額6.4兆ドル、年平均2,700億ドルの投資が必要となる。そのうち、電力部門が3分の2を占めるため、電力需給構造の転換を図るための巨額の投資資金の確保が重要な課題となる。

### 3. 温室効果ガス排出量の見通し

中国は新常态と呼ばれる経済発展段階を迎え、エネルギー政策の重点を電力、天然ガス、クリーン技術、省エネ、デジタル技術に置いている。従来は重工業、インフラ整備、工業製品の輸出を重点化したことで、経済発展を遂げてきたが、コストを重視した石炭中心のエネルギーシステムは深刻な環境問題を引き起こし、大気汚染は深刻な健康問題を発生させている。蓋然性の高い新政策シナリオでは、エネルギー供給面で天然ガス、再エネ、原子力といったクリーンなエネルギーの普及拡大により、中国の温室効果ガスや大気汚染物質は、長期的に減少する見込みである。中国のCO<sub>2</sub>排出量は2028年に92億トンでピークを迎え、減少し始めると予測されている(図9)。産業部門は2014年、民生部門は2019年、電力部門は2030年にCO<sub>2</sub>排出量は頭打ちとなり、CO<sub>2</sub>の大

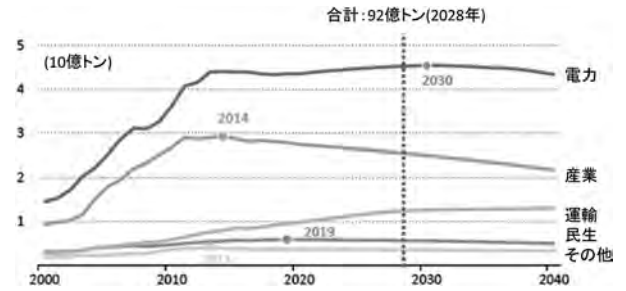


図9 中国の部門別CO<sub>2</sub>排出量の展望

(出典)IEA,World Energy Outlook 2017<sup>1)</sup>, Figure13.26(P.555)を翻訳し転載

幅増加は抑制される。2040年には、全人口の半分が中国政府の大気保全基準を満たすクリーンな大気を楽しむが、WHOの定める国際基準ではわずか3%しかクリーンな大気を楽しむことができず、大気汚染問題は中国にとって克服すべき長期的課題になると位置づけられる。

また、中国の経済構造改革のテンポが、CO<sub>2</sub>排出量の見通しに与える影響が大きく、不確実性が高い。重工業への経済の依存度低減が進まなければ、エネルギー消費、CO<sub>2</sub>排出量を削減できない可能性もある。この場合、新政策シナリオに比べ、2040年で石炭消費が35%増加、石油需要は18%増加し、CO<sub>2</sub>排出量が増加する。また、大気汚染問題の解決も遅れ、環境問題や健康問題も深刻化すると考えられる。

## IV. 結語

中国のエネルギー消費は巨大であるため、中国のエネルギー分野の技術選択は、長期的に世界の市場、貿易、投資フロー、技術のコストや、温室効果ガス削減といった世界目標の実現に大きく影響する。エネルギー・環境問題においては、「中国が変わると世界が変わる」と見ることができる。例えば中国で自動車への燃費規制が強化されれば、石油需要を日量250万バレルも抑制し、2030年までに世界全体の石油需要がピークを迎える可能性もある。中国のエネルギー技術の選択は、世界のエネルギー市場の方向性を定めるほど、大きな影響を及ぼす。

一方、中国では深刻な大気汚染問題により、これまで中心的な役割を果たした石炭消費の伸びが抑制され、クリーンな天然ガス消費の伸びが急増すると予測されているが、国産ガスの大幅増産は期待できないため、天然ガス輸入の増大が予測され、2040年には欧州に次ぐ天然ガス輸入国になると見られている。日本のLNG輸入量はこれまで長らく世界第一位にあるが、中国が2040年までに日本を上回り、LNG貿易に大きな影響力を持つことも考えられる。長らく築き上げられてきた世界のLNG輸出国から見た日本の地位が低下し、価格交渉力の弱体化などLNG輸入リスクが高まることも考えられる。福島事故以降、日本の原子力発電所の大部分が停止した結果、その代替電源として、天然ガス火力が電源構

成の4~5割を占める状況が続いているが、もし天然ガスへの依存度の高い状況が長期的に続けば、中国のLNG市場への影響力拡大が、日本のエネルギー安定供給の潜在的リスクになりうる。日本は、中国の国際エネルギー市場での影響拡大に伴うエネルギー資源調達リスク上昇へ備え、エネルギーセキュリティ強化の上で、原子力発電の維持が不可欠であると考えられる。

— 参考資料 —

- 1) International Energy Agency (IEA)/OECD : World Energy Outlook 2017(WEO2017), OECD/IEA, 2017.
- 2) BP, Statistical review of world energy 2018, 2018.

著者紹介

小宮山涼一 (こみやま・りょういち)  
本誌, 60[8], P29(2018)参照.

日本原子力学会「教育会員」の新設と募集のご案内  
～小・中・高等学校の先生方にご紹介ください～

一般社団法人 日本原子力学会

日本原子力学会では、2019年2月に創立60周年を迎えるにあたり、小・中・高等学校の先生方を対象に、広く原子力や放射線の理解を深めていただくことを目的に新たな会員区分として「教育会員」を設けました(2018年6月発足)。

学会員の皆様におかれましては、お知り合いの先生にぜひご紹介をお願いします。

なお、教育会員の会費等は学生会員と同じで、以下のとおりです。

<ご紹介にあたって>

①「日本原子力学会」とは？

- ・原子力の平和利用に関する学術と技術の進歩、開発・発展に寄与することを目的とする日本で唯一の原子力に関する総合的な学会です。昭和34年に設立され、来年には創立60周年を迎える歴史ある学会です。
- ・活動内容：学会誌(月1回)や論文誌の発行、年会(3月)や大会(9月)、シンポジウムや講演会などの開催、専門分野別の部会や連絡会の活動、支部(全国で8支部(北海道、東北、北関東、関東甲越、中部、関西、中国・四国、九州)の活動等
- ・個人会員：この分野に関心のある大学教員、研究者、民間企業人など正会員が約6,500名と学生会員が約500名。
- ・賛助会員(法人)：電力会社、重電メーカー、燃料メーカー、建設会社、原子力研究機関など約250社
- ・年間予算規模：約2.5億円

②「教育会員」になるとどんなメリットが期待できますか？

- ・当学会HPの全ての閲覧、毎月の学会誌の郵送、学会が発信する情報メールサービスの受信、大会・講演会・シンポジウムなどに優待価格で参加することができます。
- ・全国にある支部主催のオープンスクールなどが盛んであり、また専門分野ごとの部会の中には、理工学の専門領域から放射性廃物を扱うバックエンド部会や文系の社会環境部会まであり、選択参加も不参加も自由です。
- ・これら活動への参加やネットワークの活用によって、放射線の医学・農学・産業利用の現状と将来、放射線の健康影響の有無、原子力発電の長所・短所、地層処分場の立地問題などの数々の疑問に答えることができると思います。また、これらの課題を一緒に学び議論をすることが可能です。

③「教育会員」になるには、どうすればいいのですか？

- ・ご関心のある方は、申込用紙に記入して、学会事務局会員係までお申込みください。折り返し、会員番号と会費お支払方法を電子メールにてご連絡させていただきます。

入会金 無料

年会費 5,000円(会計年度は4月～3月)、下半期入会(10月～3月にご入会)の初年度は、半額の2,500円になります。

部会/連絡会費 無料

詳細・申込用紙 教育会員の詳細のご案内、入会申込書は以下よりダウンロード可能です。

[http://www.aesj.net/join\\_membership/kyoikukaiin](http://www.aesj.net/join_membership/kyoikukaiin)(本会HPからも入れます)

問合せ先 一般社団法人 日本原子力学会 会員係、

〒105-0004 東京都港区新橋2-3-7 新橋第二中ビル3階、TEL：03-3508-1267、FAX：03-3581-6128、

E-Mail：kaiin@aesj.or.jp

## サイエンスよみもの

# 航空宇宙分野で開発された浮遊法を用いて 溶融物の物性を測定する 静電浮遊法とガス浮遊法

大阪大学 大石 佑治

炉心溶融物のような高温かつ反応性の高い物質の物性を測定する際に、試料と容器との反応が問題になる。この問題は、試料を浮遊させることができれば解決できる。浮遊法は航空宇宙分野で主に研究されてきた技術であり、様々な浮遊技術が存在している。その中でも炉心溶融物の物性測定に適していると思われる、静電浮遊法とガス浮遊法について紹介する。

**KEYWORDS:** *Levitation technique, electrostatic levitation, aerodynamic levitation, drop oscillation technique, viscosity, surface tension, molten core materials*

## I. はじめに

液体がどのような物性(粘性や表面張力、密度等)を有しているかを調べようとする際、通常は何らかの容器によって液体を保持した上で各種の測定を行う。しかし、融点が高い物質については液体の温度も高くなるため、容器が溶けてしまったり、液体と容器が反応してしまったりする可能性を考慮しなくてはならなくなり、容器の選定が難しくなる。原子炉内に用いられている物質、例えば  $\text{UO}_2$  や  $\text{Zr}$  は高い融点を有しており、これらの溶融物の物性を正確に測定するのは極めて困難である。

容器の問題は、液体を浮遊させることができれば解決できる。地上で物質を浮遊させるためには重力と釣り合う浮力を何らかの方法で与える必要があるが、スペースシャトルや国際宇宙ステーション内のような微小重力下ではその必要がないために、液体が動き回らないように空間上のある位置に固定するだけで良い。そのため、浮遊法は主に航空宇宙分野で研究されてきた。

液体を空間上のある位置に留める技術として、これまでに音波や電磁場、静電場を利用する技術が開発され、スペースシャトル等で実験されてきた。近年では技術の進歩に伴い、これらの技術を用いて地上での試料の浮遊

も可能となっている。例えば、静電場を利用する静電浮遊法では 10mm 程度の間隔となるように設置した電極間に電圧をかけることで直径 2mm 程度の試料を浮遊させるが、1 万 V 以上の電圧をかけることで地上でも試料を浮遊させることができる。

本稿では、このような地上での浮遊技術の中でも高温の液体の物性測定に適していると考えられている静電浮遊法とガス浮遊法について、浮遊の原理や物性測定方法を概説する。また、浮遊技術を原子力分野へ応用する意義と課題についても述べる。

## II. 物性測定技術

浮遊法を用いて測定できる物性として、粘性、表面張力、密度が代表的である。これらは液体の流動挙動に大きな影響を与える重要な物性である。これらの物性の測定方法の原理は浮遊法に依らずに同じであるため、まず物性測定技術について説明する。

### 1. 密度

浮遊した微小な液体(液滴)は、表面張力によって球状になる。そのため、図 1 に示すように液滴の明瞭な画像を取得できれば、その輪郭を抽出して何らかの関数でフィッティングすることにより、体積  $V$  を計算することができる。浮遊実験後に試料を取り出して質量  $w$  を測定すれば、密度  $\rho$  が算出できる。

密度測定において重要となるのが、液滴の明瞭な輪郭

*Measurement of physical properties of molten materials by levitation techniques developed in aerospace field ; electrostatic levitation and aerodynamic levitation : Yuji Ohishi.*

(2018 年 8 月 28 日 受理)



図1 密度の測定方法の概要

を得ることである。高温の物体は自己発光するため、適切な濃度のフィルターを用いれば液滴の輪郭を得ることができる(遮光板を使って太陽を観察するイメージ)。しかし、自己発光を利用した観察では輪郭を正確に評価できず、液滴のサイズを過大評価してしまうことが明らかになっている。これを防ぐためには、バックライトを用いて液滴試料の投影画像を観察する必要がある。図1に示しているのも溶融試料の投影画像であり、試料が暗い領域として観察されている。バックライトとしては、200mW 程度の強力な可視光レーザーや、自己発光によって放射されにくい紫外光が適している。

## 2. 粘性及び表面張力

粘性と表面張力は、液滴振動法と呼ばれる方法によって測定する。液滴を変形させると、表面張力によって復元力が働く。外力によって液滴を変形させてから外力を取り除くと、表面張力に起因する復元力によってばねと同様に液滴は振動する。これを液滴振動と呼ぶ。ばねの場合は、ばね定数と質量によって振動数が決まる。液滴振動も同様に、その振動数は表面張力と液滴の質量によって決まる。液滴の質量は浮遊実験後に測定すれば良いので、液滴振動の振動数を測定すれば表面張力を求めることができる。

抵抗がなければ液滴は振動し続けるが、抵抗があると振動は減衰していく。通常の液体は粘性を有するので、粘性によって液体の運動に対する内部摩擦が生じる。これが抵抗となり、液滴振動は減衰する。すなわち、振動がどのように減衰していくかを測定できれば、粘性を評価することができる。

液滴について上記の関係を式として表したものは、Rayleigh の式と呼ばれる。図2の中に、その式を示す。共振周波数から表面張力が、減衰係数から粘性が導き

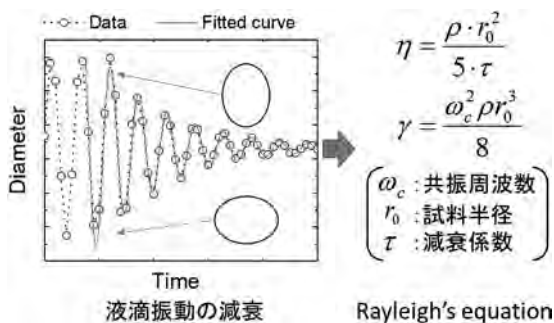


図2 液滴振動法による粘性及び表面張力の評価方法

れる。共振周波数と減衰係数を得るためには、図2の左に示したようなデータを得れば良い。これは、振動と一致した方向の液滴の直径の時間変化を示している。このようなデータを、周期的振動を表す正弦関数と減衰を表す指数関数の積で表される以下のような関数でフィッティングすることで、共振周波数と減衰係数を求めることができる。

$$r_{h/v}(t) = A \exp(-(t-t_1)/\tau) \sin(2\pi\omega_c(t-t_0)) + R_{av}$$

ここで、 $A$  は初期の振幅、 $t$  は時間、 $t_1$  は減衰の開始時間、 $\tau$  は減衰係数、 $\omega_c$  は共振周波数、 $t_0$  はオフセット時間、 $R_{av}$  は試料半径である。また、共振周波数だけであればフーリエ変換によっても求めることができる。

## III. 浮遊法

### 1. 静電浮遊法

静電浮遊法は、僅かに帯電した試料を2つの電極間に発生させた静電場を利用して浮遊させる浮遊法であり、基礎的な技術はアメリカ航空宇宙局(NASA)で開発された<sup>1)</sup>。日本では主に宇宙航空研究開発機構(JAXA)のグループが研究を進めている。図3に、大阪大学で作製した静電浮遊装置の外観図を示す。真空チャンバー外部に、試料加熱用のレーザーやカメラ等を設置している。試料浮遊用の電極は真空チャンバー内に収められているため、その拡大図を挿入図として示している。白い球状に見えるのが溶融した試料であり、上下に設置された電極間に浮遊しているのが分かる。試料のサイズは直径2mm程度である。

静電浮遊法における浮遊の原理を図4に示す。試料の垂直方向に上下電極を、水平方向に横電極を設置する。試料にレーザーを照射し、位置センサーによって試料の座標を得る。図中にはレーザーと位置センサーが1式しか記載されていないが、実際はx, y, zの3次元座標の情報を得るために2式設置する。試料の位置情報をPCに取り込み、試料の位置が一定となるように調整した電

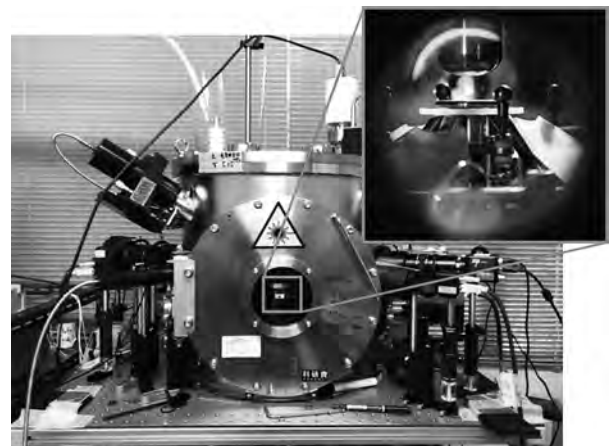


図3 大阪大学の静電浮遊装置の外観図

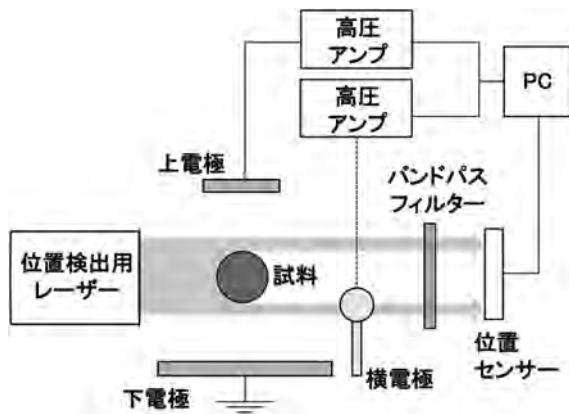


図4 静電浮遊法の原理

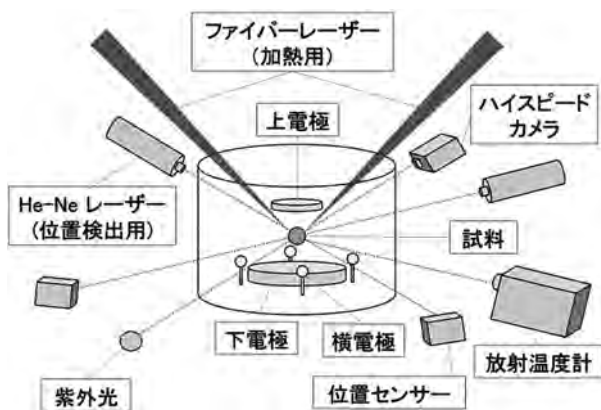


図5 大阪大学の静電浮遊装置の構成

圧を、高圧アンプを介して上下電極及び横電極へ印加する。これにより、試料の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向の位置を制御する。

図5に、大阪大学に設置してある静電浮遊装置の装置構成を示す。本装置は、JAXAで開発されたものを参考に作製した。試料は出力100W、波長976nmのファイバーレーザーで加熱する。試料の温度は放射温度計によって計測する。試料の体積を観察するためにフレームレート120fps、画像サイズ1280×1024ドットのカメラを設置し、バックライトには紫外光を用いている。液滴振動は上部電極に正弦波電圧を一瞬印加することで励起し、スリットを通したレーザーの光量の変化を光ディテクタで検出することで液滴振動を観察する。

静電浮遊法は、チャージアップできるものであれば金属・半導体・絶縁体のいずれも浮遊できるという優れた特徴がある。しかし、地上での実験では現在のところ真空雰囲気ではしか浮遊させることができない。そのため、真空中で還元してしまう酸化物の実験は困難であり、これまで主に金属の物性が研究されてきた。浮遊した試料は熱が輻射でしか逃げないので加熱が容易であり、Wを含む高融点金属の物性がJAXAの研究グループによって報告されている<sup>2)</sup>。

雰囲気が真空に限られてしまうのは、上下電極間の放電を防ぐためである。地上で試料を浮遊させるためには

10mm程度しか離れていない上下電極へ1万Vを超える電圧を印加する必要があるため、大気圧では放電してしまう。放電は真空もしくは高圧雰囲気で行うことができるため、高圧雰囲気での静電浮遊技術の開発が進められているが、技術的にかなり困難なようである。

## 2. ガス浮遊法

ガス浮遊法は、コニカルノズルから噴出させたガスを用いて試料を浮遊させる方法であり、非常に簡単に試料を浮遊させることができる。ガス浮遊法は古くから知られていたが、液滴振動の励起が困難であるために物性測定には用いられていなかった。近年ドイツ航空宇宙センター(DLR)でスピーカーを用いて液滴振動を励起する方法が開発され、物性の測定に用いられるようになった<sup>3)</sup>。

図6に、大阪大学に設置してあるガス浮遊装置の外観図を示す。コニカルノズルとガス導入系、加熱用レーザー、試料観察用カメラ等が設置されている。ノズルの拡大図を挿入図として図6に示してある。白い球状に見えるものが試料であり、直径は2mm程度である。

図7に、大阪大学に設置してあるガス浮遊装置の装置構成を示す。本装置は、DLRで開発された装置を参考にしている。コニカルノズルへArやAr+O<sub>2</sub>混合ガスを導入し、試料を浮遊させる。出力100WのCO<sub>2</sub>レーザー(波長10.6μm)を上下から照射し、試料を均等に加熱する。試料の温度は放射温度計で計測する。バックライトには紫外光を用い、試料の形状の観察のためにフレームレート2000fps、画像サイズ1280×1024ドットで撮影可能なハイスピードカメラを設置している。液滴振動はスピーカーを用いて励起し、ハイスピードカメラで観察する。

ガス浮遊法はガス雰囲気であるために試料の蒸発が抑えられ、また酸化雰囲気での実験が可能なので還元が抑えられるという特徴がある。そのため、酸化物の浮遊に適している。DLRでも、ガス浮遊法を用いてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の物性を測定し報告している<sup>3)</sup>。

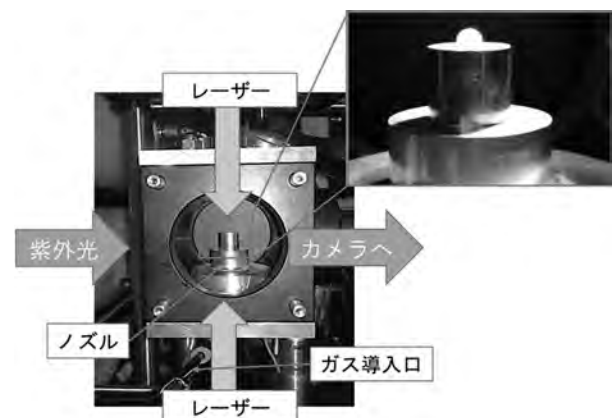


図6 大阪大学のガス浮遊装置の外観図

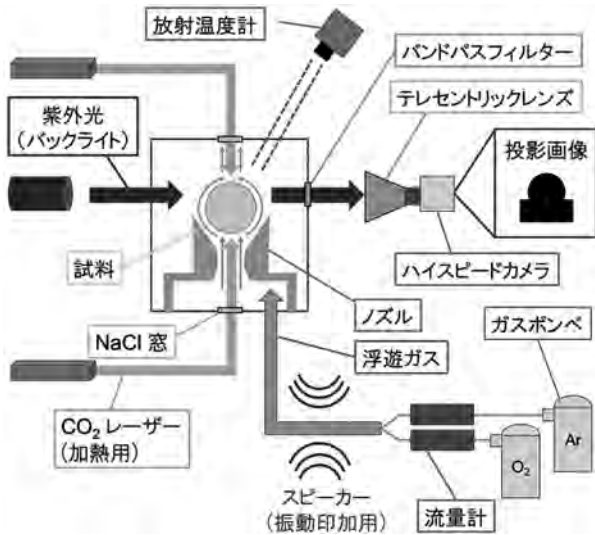


図7 大阪大学のガス浮遊装置の構成

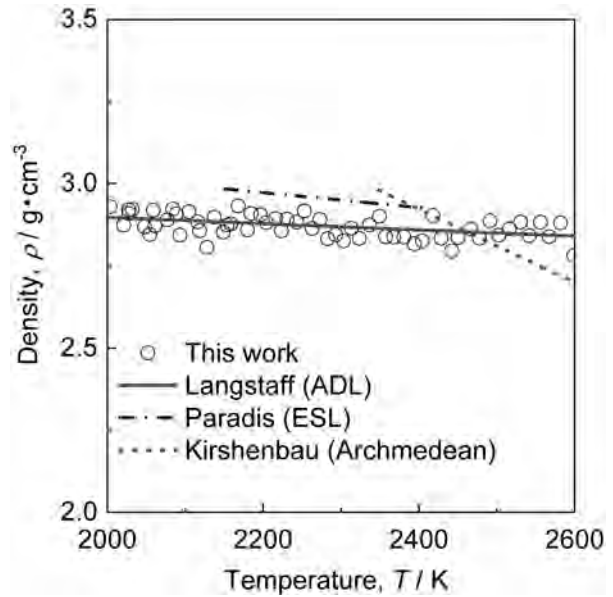


図8 熔融  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の密度の温度依存性

#### IV. 炉心溶融物への浮遊法の適用

炉心溶融事故が起きた際に生じる炉心溶融物の流動挙動を正確に予測するためには、その物性の把握が必要不可欠であると考えられる。炉心溶融物は、炉内の様々な物質を含んでいる。炉内の重要な物質として、 $\text{UO}_2$  や Zr, Fe, さらには福島第一原子力発電所のような BWR で減速材として用いられている  $\text{B}_4\text{C}$  が挙げられる。これらは融点が高く、容器を用いた方法では測定が難しいため、浮遊法が適している。

炉心溶融物は金属系と酸化物系へ分けることができるので、金属系へは静電浮遊法を、酸化物系へはガス浮遊法を適用することで、炉心溶融物の物性評価が可能となると考えられる。大阪大学ではこの点に注目し、JAXA 及び DLR の研究グループの協力の下、静電浮遊法とガス浮遊法を用いた物性測定装置を作製した。測定例として、作製したガス浮遊装置を用いて測定した  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の密度と粘性を図8と図9に示す。密度と粘性の両方とも、我々の測定値は DLR のグループが同手法によって測定した値と極めて近い値となっていることが分かる。粘性については容器を用いた測定手法 (Oscillation cup, Rotating cup) によって得られた文献値も併せて示しているが、これらの値は大きくばらついており、融点が  $2,000^\circ\text{C}$  程度の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ですら容器を用いた測定が困難であることを示唆している。

以上で述べた通り、炉心溶融物の物性評価のためには浮遊法が有望である。大阪大学では航空宇宙分野で開発された浮遊法を用いた物性測定装置を作製し、炉心溶融物の物性評価に取り組んでいる。これまでに Zr や Fe,  $\text{ZrO}_2$  を含む溶融物の物性を報告してきた<sup>4,5)</sup>が、炉心溶融物の中でも特に重要な  $\text{UO}_2$  は融点が  $2,800^\circ\text{C}$  以上と極めて高いのみならず、融点付近での蒸気圧がかなり高いという特徴がある。そのため、測定中の試料の蒸発が顕

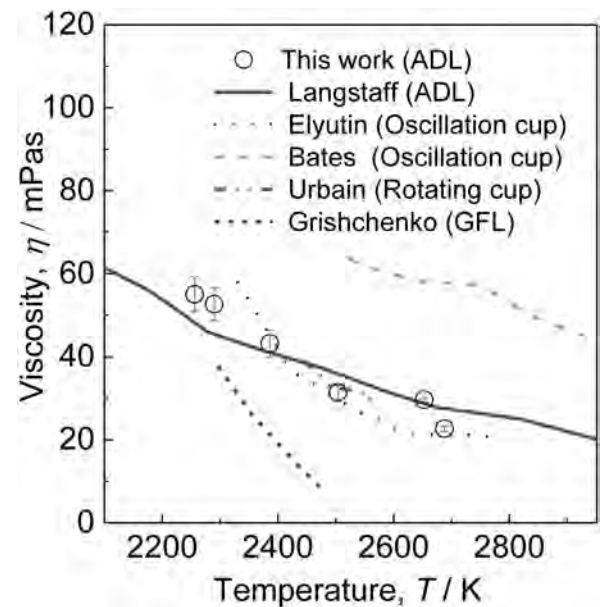


図9 熔融  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の粘性の温度依存性

著であると予想される。試料が蒸発すると試料の大きさが変わってしまうため、液滴振動法での物性評価が極めて難しくなる。 $\text{UO}_2$  を含む炉心溶融物の物性を明らかにするためには、既存の浮遊法を適用するだけでは不十分であり、さらなる技術開発が必要であると言える。

#### V. おわりに

残念ながら全ての物質へ適用できる万能の浮遊法というものは存在しないが、熔融金属の物性評価が可能である静電浮遊法や、酸化物の物性評価が可能であるガス浮遊法が航空宇宙分野で開発されている。これらの手法を用いることで、炉心溶融物の物性を評価できると考えられる。しかし、最も重要な  $\text{UO}_2$  については、その融点の

高さや蒸気圧の高さから既存の浮遊法では測定が困難であると予想される。すなわち、 $\text{UO}_2$ を含む炉心溶融物の物性を評価するためには、航空宇宙分野で開発された浮遊法を適用するだけでは不十分であり、新しい技術の開発が必要であると言える。大阪大学では現在、浮遊法をベースに $\text{UO}_2$ のような高融点かつ蒸気圧の高い物質の物性を測定するための技術の開発に取り組んでいる。この技術を確立し、 $\text{UO}_2$ を含む炉心溶融物の物性の解明に貢献したいと考えている。

大阪大学の浮遊装置は、JAXA及びDLRで開発された装置を参考に作製した。装置作製に際し、それぞれの研究グループから多大な支援をいただいた。また、浮遊法を用いた実験は、著者が所属する環境エネルギー材料

工学領域の教員及び学生の協力の下に行った。

#### － 参考資料 －

- 1) W.K. Rhim et al., Rev. Sci. Instrum. 64, 2961 (1993).
- 2) T. Ishikawa et al., J. Chem. Thermodynamics 67,1 (2013).
- 3) D. Langstaff et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 124901 (2013).
- 4) Y. Ohishi et al., J. Nucl. Sci. Technol. 53, 1943 (2016).
- 5) Y. Ohishi et al., J. Nucl. Mater. 487, 121 (2017).

#### 著者紹介



大石 佑治 (おおishi・ゆうじ)

大阪大学大学院工学研究科

(専門分野/関心分野) 浮遊法を用いた炉心溶融物の物性評価, 燃料デブリの物性評価

## From Editors 編集委員会からのお知らせ

－ 最近の編集委員会の話題より －

(11月6日第4回論文誌編集幹事会)

- ・平成30年9月16日～10月15日に英文誌へ20論文, 和文誌へ4論文の投稿があった。
- ・JNST Most Cited Article Award 2018 受賞論文を決定した。
- ・福島事故関連記事の英文化作業の進捗状況が報告された。
- ・二重投稿の疑いのある論文の取り扱いについて検討した。
- ・福島廃炉関係特集号の投稿状況が報告された。
- ・英文誌のテンプレートは出版社提供の物に一本化することとした。
- ・和文論文誌の日本語引用論文の表記方法の改訂案を承認した。

(11月6日第5回学会誌編集幹事会)

- ・60周年記念企画のうち、有識者、主要学会への執筆打診について確認し、了承された。そのほかの企画についても状況確認し、対応方法について確認し、了承された。
- ・60周年記念企画のうち、各部会、連絡会、一部委員会へ依頼している記事で、原稿未提出のものについては、最終締切を設け、それまでに寄稿も連絡もない記事については、掲載なしとすることを確認した。
- ・秋の大会の企画セッションの記事進捗状況と掲載予定号について確認した。
- ・10月号のアンケート結果の報告があった。
- ・巻頭言、時論、その他の記事企画の進捗状況を確認し、掲載予定について検討した。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

## サイエンスよみもの

# 宇宙の大イベント超新星爆発と その鍵を握るニュートリノ

## — ニュートリノ輸送計算が明かす物質創生の筋道 —

沼津工業高等専門学校 住吉 光介  
東京工業大学 千葉 敏

天空にとつぜん現れ他の星々を圧倒して急激に輝きやがて消えて行く超新星。その名に反し超新星は新しい星の誕生ではなく星の終焉をかざる大爆発である。宇宙に存在する重い元素の多くはこの時合成される。われわれの世界は超新星爆発の残滓からできている。鍵を握るのは素粒子ニュートリノであり、星が進化し超新星爆発に至る道筋は原子核や核力の性質から理解できる。高度な計算機シミュレーションによりこの道筋の理解が進んでいる。中核を担うのはニュートリノ輸送計算であり、この計算は原子力における中性子輸送計算と多くを共有する。

**KEYWORDS:** *Supernova, Neutrino, Neutron, Transport, Nuclear data*

### I. はじめに

超新星は、新たに星が生まれたかのようにとつぜん現れて急激にその輝きを増し、しばらく他の星々を圧倒したのち消えて行く、壮大な天体現象である。古くは2世紀の中国の文書に現れ、日本では藤原定家が「明月記」のなかで1054年に出現した超新星に言及している。定家の記事は伝聞ではあるものの科学史的にもきわめて貴重な資料である。超新星はSN(Supernovaの略)の後に年号、さらに必要ならA, B, C順を附して命名される。超新星は新しい星の誕生ではない。その正体は星の終焉をかざる大爆発である。リチウムより重い元素の多くはこの時合成されて図1に見られるように宇宙にばら撒かれる。地球も、その上の岩石や動植物も、全てこのような爆発でばら撒かれた重い元素を素材に作られている。

超新星爆発のような劇的な天文現象は原子力とは遠くかけ離れた話のように思われるかも知れないが、じつは両者の間には深いかわりがある。星の輝きは原子核のエネルギーによるものだし、星が進化し超新星爆発へと向かう道筋は原子核や核力の性質から理解可能である。

*Supernova, a gigantic space show, and neutrinos-Neutrino transport calculation teaches much about the event* : Kohsuke Sumiyoshi, Satoshi Chiba.

(2018年8月24日 受理)



図1 千年前に現れた超新星SN1054の残骸「かに星雲」(NASA)

現在、高度な計算機シミュレーションによりこの道筋の精密な理解が進んでおり、そのためには原子力に関わる計算の時と同じく大量の核データも必須である。

### II. 超新星爆発と元素の創成

原子炉内で核分裂生成物はベータ崩壊を起こし(崩壊熱の起源)、ベータ線とともにニュートリノという素粒子を放出する。そしてこの同じニュートリノが超新星爆発の鍵を握っている。ニュートリノの役割についてはのちに詳しく記すが、超新星爆発のあとには中性子のかたまりである中性子星や、ときにはブラックホールが残さ



れる。

超新星爆発は大きく二つの型に分類される。二つの星の連星系で一方から他方への(重力による)物質移行に起因する熱核反応型と、重い星が自らの重みに耐えられなくなっておきる重力崩壊型の二つである<sup>1)</sup>。本稿では後者の重力崩壊型超新星爆発に話を限る。1987年に観測された超新星 SN1987A では、爆発に伴って放出されたニュートリノが岐阜県神岡町にある検出器によって初めて検出され、2002年のノーベル物理学賞を日本にもたらした。ニュートリノは電子の仲間レプトンに分類される素粒子で、すでに述べたように原子核のベータ崩壊など弱い相互作用による反応に伴って放出される一方、宇宙線の一成分としてたえず我々の周辺に降り注いでいる。物質との反応確率(あるいは反応断面積)が極めて小さいため日常生活で意識されることは全くない。

重力崩壊型超新星はその残骸の中に中性子星を残すことが特徴的である。中性子星はその組成のほとんどが中性子であり、質量は太陽の1-2倍程度で半径がたった10kmほどという超高密度天体である。その中心密度は1cm<sup>3</sup>あたり10億トン(10<sup>15</sup>g/cm<sup>3</sup>)にも達する。これは原子核内部の密度(核物質密度3×10<sup>14</sup>g/cm<sup>3</sup>)の3倍にも達する。中性子星は中性子過剰な巨大な高密度原子核ともいえる。このような高密度では中性子同士の反発力が効いており、この反発力による圧力が中性子星を支えている。

図1に示した「かに星雲」は、定家が記録した1054年の超新星爆発の残骸である。光を受けて輝きを放ち、現在も刻々拡大しつつある姿が明瞭に観察されているのも驚異であるが、さらにこの星雲の中にパルサーと呼ばれる規則正しい電波信号を出す天体が発見された。そこから放出される電磁波の周波数とそのパルス周期の途方もない正確さから、これが回転する中性子星であることが判っている。また、前述した超新星 SN1987A からのニュートリノ観測データも高密度天体(おそらく中性子星)の誕生を強く示唆している。

超新星は宇宙における元素の起源として決定的に重要である。超新星爆発により周期律表上の多くの元素が創り出されたことがわかっている。爆発の際には物質が非常に高温(10<sup>9</sup>K以上)に達するため、核反応が急激に起こり新たな元素が合成される。鉄付近の中重元素が爆発的な速さで生成された後、生成原子核のベータ崩壊に伴って放出されるエネルギーがしばらくのあいだ超新星を輝かせるが、やがて、創られた不安定原子核の崩壊の半減期に応じて暗くなっていく。SN1987Aではコバルト56の半減期(約77日)に応じて光が減衰する様子が明瞭に観測された。

鉄(原子番号26)以降の元素は核融合反応では生成できず、中性子捕獲反応の繰り返しで合成される。金・白金・ウランなどを含む重元素を作るr-プロセス(急速に

進行するため rapid-process と呼ばれる)には大量の中性子が必要なため、このプロセスの起こる現場がどこであるかは謎であった。超新星はほぼその唯一の候補であったが、中性子星連星が合体するときに生じた重力波の検出(2017年ノーベル賞)と、それにつづく世界一丸となった広汎な電磁波観測により、中性子星合体こそr-プロセスの現場であることが強く示唆されている。今まさに最前線の研究が進みつつあるのである。

### Ⅲ. 重力崩壊型超新星のダイナミクス

#### 1. 超新星爆発の道筋

超新星爆発に至るメカニズムを概観しておこう。スタートは、太陽質量の10倍以上の重い星の進化の最終段階で星の中心部にできる鉄コアである。鉄コアがその成長と共に、増大する重力に耐えられなくなり重力崩壊を起こしてつぶれていく。だが中心密度がある限界を超えると、内圧が急増して圧縮が止まる。この時、さらに外側から落下してくる物質が内圧によって外側に向かって弾き返される事態が生じる(バウンスという)。この中心部でのバウンスにより衝撃波が発生する。衝撃波が外向きに伝搬して行き星の外層に達すれば超新星爆発となる。衝撃波の伝搬に伴って元素合成が一挙に進む一方、中心部には中性子星の原型(原始中性子星)が誕生する。つぶれてバウンスするだけなら話は単純だが、実はここでニュートリノがきわめて重要な役割を演じ、爆発は複雑な経過をたどるのである。その経過を詳しく見てみよう。

#### 2. 鍵を握るニュートリノ

いま述べた鉄コアの質量は太陽質量の1~2倍程度であり、半径は6,000kmほどである。鉄コアが形成されるのは原子核の束縛エネルギーが鉄付近で最大となるという原子核の基本的な性質のためである。この鉄の安定性のため核融合反応はそれ以上進まなくなり、途方もない大きさの重力は鉄原子を構成していた電子(電子ガスの縮退圧)を支える。しかし電子ガスが支え切れる限界(質

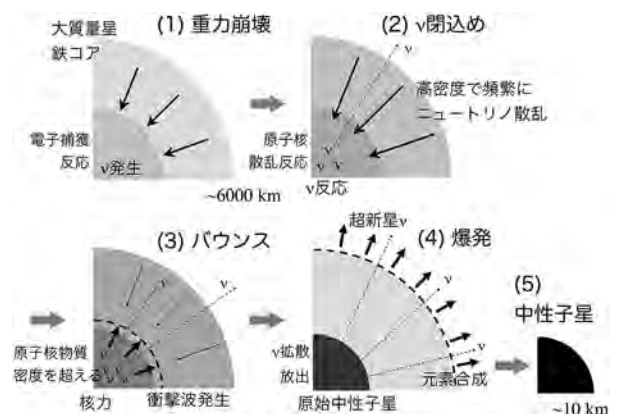


図2 重い星から爆発-中性子星創成までのダイナミクス

量限界)を超えると上述した重力崩壊が始まる(図2(1); 図中の $\nu$ はニュートリノの意)。重力崩壊が起きるあいだ、鉄原子核中にいた陽子が周りにいる電子を捕獲してニュートリノと中性子を生み出す反応(電子捕獲反応)が起り、大量のニュートリノが発生する。中心密度が高くなるとニュートリノは周りの物質により頻繁に散乱され、星の内部に閉じ込められた状態になる。これをニュートリノ閉じ込めという(2)。閉じ込められたニュートリノは徐々に放出されるが、これが日本に2002年のノーベル賞をもたらした超新星ニュートリノにはほかならない(図の点線)。

重力崩壊は中心密度が核物質密度を超えると急停止しバウンスする(3)。これは原子核のエネルギーが一定の密度で極小値をとり安定となる性質(核物質密度の飽和性)による。さらに密度を上げると反発力が強くなりエネルギーが急増する性質が衝撃波発生に繋がる。エネルギー増加率は爆発の強さを決める要因の一つであり、これは原子核をつくりあげている核子に働く力(核力)の性質に支配されている。専門的になるが、原子核の非圧縮率や対称エネルギーといった量がここでのキーパラメータとなる。原子力分野で広く使われる PHITS コード<sup>2)</sup>に内包されている JQMD モデル<sup>3)</sup>でも、これらの情報が核力のパラメータとして用いられている。

コアバウンスで衝撃波が発生する場所は鉄コアの内層部であり外層部では重力崩壊が続いている。従って衝撃波が、外部から落ち込んできて降り積もる物質(降着物質)中を突き抜けて鉄コア表面まで辿りつくのは容易ではない。鉄原子核は高温で分解され、衝撃波はそのエネルギーを浪費して前進するエネルギーを失い、途中で停滞してしまう。この衝撃波の前進を復活させるのが次節で述べるニュートリノ加熱メカニズムである。

ここで一休みして、エネルギーの観点から全体像を鳥瞰しておこう。超新星観測から求められた典型的な爆発エネルギーは約  $10^{44}$ J である。太陽の光度は  $4 \times 10^{26}$ W なので、これは太陽が100億年輝き続けて放出するエネルギーに相当する。ちなみに原子力発電所1基で100万kWとすると100基で  $10^{11}$ W である。この巨大な爆発エネルギーの源は重力崩壊により天体が潰れて半径が小さくなることにより解放される重力のエネルギーである。例えば、鉄コアが圧縮されて中性子星の大きさ(半径たった10km程度)にまで達すると約  $10^{46}$ J のエネルギーが得られる。これは爆発をおこすのに十分なエネルギーである。しかし実際はニュートリノが外部へ大量に放出されるとき、このエネルギーのほとんどを持ち出してしまふ。超新星 SN1987A からのニュートリノ検出データから得られた放出ニュートリノの全エネルギーは  $10^{46}$ J であった。上記の重力エネルギーの値にほぼ等しい。では超新星爆発に至らないのか？



図3 ニュートリノ加熱による停滞衝撃波の復活

### 3. ニュートリノ加熱とニュートリノ輸送

ここで問題となるのがニュートリノと物質の相互作用である。発生したニュートリノが外部へ向かう際に若干の反応を起こす。このときニュートリノがエネルギーの1%程度を物質に引き渡せば、爆発に必要なエネルギーをまかなえるのである。このニュートリノから物質へのエネルギー移行過程(ニュートリノ加熱という)を扱って、爆発に利用可能なエネルギーを求めるのがニュートリノ輸送計算の役割である。

図3はニュートリノ輸送の典型的な状況を示している。コアバウンス後100msecほどで鉄コアを進む衝撃波が降着物質に阻まれて半径100kmほどで停滞してしまっている。中心には原始中性子星が誕生しており、発生したニュートリノが大量に閉じ込められている。ここから漏れ出したニュートリノは外部に向け飛んでいくが、一部は途中で物質に吸収されて、エネルギーを物質に与えて加熱に寄与する。このエネルギー移行(ニュートリノ加熱)が停滞衝撃波の背面で効率よく起こり衝撃波を後押しして外向きに伝播させることができれば爆発成功である。

ニュートリノ加熱により得られるエネルギーは爆発エネルギー程度(約  $10^{44}$ J)であるが、この過程はニュートリノの放出/吸収量、加熱時間などに依存する。放出/吸収量はニュートリノの生成・消滅・伝播による変動を緻密に計算して求めなければならない。

全体の問題を扱うためには、ニュートリノ輸送と流体力学を重力ポテンシャル(厳密には一般相対論)のもとで同時に解くシミュレーション計算が必要である。シミュレーション計算による研究の歴史は既に約50年あるが、計算は大規模でたいへん難しく、爆発メカニズムの問題はいまだ十分な解明には至っていない。

### 4. 原子核データの役割

超新星爆発の解明が難しい理由はニュートリノ/原子核物理にもある。シミュレーション計算には極限環境における核データを組み込む必要がある。流体力学方程式

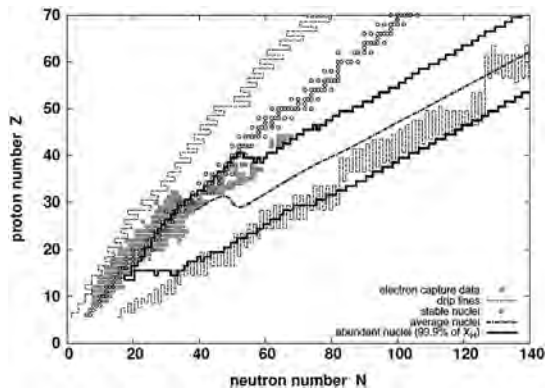


図4 超新星内部の平均的な核種と電子捕獲反応率のデータ<sup>5)</sup>

を解くためには物質の状態方程式が必要である。核物質密度の3倍以上の高密度や $10^{11}$ K以上の高温にも達する環境領域をカバーする物質の情報(原子核質量, 圧力, 内部エネルギーなど)が必要となる。

図4には超新星の重力崩壊時において関与する原子核を核図表上に示した。鉄付近から伸びる線は超新星の中心部に現れる原子核の平均的な核種を表している。安定曲線(安定核はその上に位置する)から中性子ドリップ線(それより中性子数が多いと原子核として存在できない限界線)まで広い範囲の多様な原子核が混在している<sup>5)</sup>。こうした原子核と電子・ニュートリノが反応する過程の反応率も必須の入力データである。図4には理論計算による電子捕獲反応率が入手可能な核種も示されている。広範囲な原子核データが重要で、未知の領域まで予測が必要である。

#### IV. ニュートリノ輸送計算の発展

##### 1. ボルツマン方程式

ニュートリノ輸送過程を記述するための基礎方程式はニュートリノ分布関数に対するボルツマン方程式である。反応時間スケールが長い場合があり統計平衡(フェルミ分布)を仮定することはできない。ニュートリノ反応率のエネルギー依存性が大きいので、エネルギーごとにニュートリノ分布の変化を扱わなければならない。さらに、扱う密度範囲が10桁近く( $10^5$ g/cm<sup>3</sup>- $10^{15}$ g/cm<sup>3</sup>)あるため、空間領域によって輸送の状況が大きく異なっており、取り扱いが非常に難しい問題になっている。一方、ニュートリノ以外の物質については状態方程式として計算に組込むことが可能である。

ボルツマン方程式は、ニュートリノが進行するあいだの、反応による個数の変化を記述する6次元空間における時間発展方程式である。左辺には移流項、右辺には衝突項がある。6次元の内訳は位置( $r, \theta, \phi$ ), 方向( $\theta_v, \phi_v$ ), エネルギーであり、計算は膨大なものになる。

##### 2. 近似手法

ニュートリノ輸送の近似的扱いの一つとして拡散近似

法が用いられている。これは原子力分野でも馴染みのものであろう。超新星中心において、ニュートリノは頻繁に反応しつつ、拡散により徐々に移動している。ニュートリノ流束は密度の傾き方向に沿って生じ(フィックの法則)、拡散係数は平均自由行程により与えられる。この時、エネルギー依存性からエネルギー群ごとにニュートリノ流束を扱う必要がある(多群エネルギー拡散近似法)。

拡散近似は密度が高いところでは良い近似になっているが、密度が低くなると近似が悪くなる。超新星では衝撃波付近でニュートリノ加熱を精密に扱いたいのだが、この領域は拡散でも自由伝播でもない中間領域であり、扱いが難しい。このため近似方法によって異なる結果を与える可能性がある。

対称性のない空間3次元においては、ニュートリノ流束の非対称性が問題になってくる。つまり球対称の場合のように動径方向( $r$ 方向)について流束を記述するだけでなく、非動径方向(球座標での $\theta, \phi$ 方向)を記述することも必要になる。拡散近似で3次元計算を行うことも可能ではあるが、大規模計算における並列化のため、非動径方向の流束は無視できるとして、動径方向の計算を中心から様々な方向について解く、Ray-by-ray法が多用される。また、ボルツマン方程式を角度積分したモーメント量を解く方法も普及し始めている。

##### 3. 計算科学による発展

ニュートリノ輸送を扱う数値シミュレーションは、スーパーコンピュータによる大規模計算を必要とする。計算機の性能向上に伴い、球対称から2次元、3次元計算へ、近似計算から厳密計算へと発展している。最終的には、ボルツマン方程式と流体力学を組み合わせた輻射流体力学に対応する計算を一般相対論のもとで行いたいのだが、現段階では全てを解くことはできていない。2000年代になって初めて球対称における第一原理計算が行われ、2010年代からは2, 3次元の緻密な近似計算が多く行われている。現在でも何らかの近似手法を用いて計算負荷を軽くして多次元計算を行う場合が多い。

ニュートリノ輸送において近似を用いたままではニュートリノ加熱量などに不定性が生じるため、爆発メカニズムを確定するのが難しくなってしまう。球対称として問題をあつかう限り、第一原理計算では爆発が起きないという結果になることが確定した。一方、現実に超新星爆発はおきている。つまり、球対称ではなく多次元的形状変化を経て爆発に至ることは明らかなのである<sup>4)</sup>。従って、次元を増やして実際の状況をより正確に第一原理計算に取り込み、それをもとに爆発メカニズムを評価する必要がある。

この課題を解決するため、3次元空間におけるボルツマン方程式を扱う計算コードが開発された<sup>6)</sup>。この計算

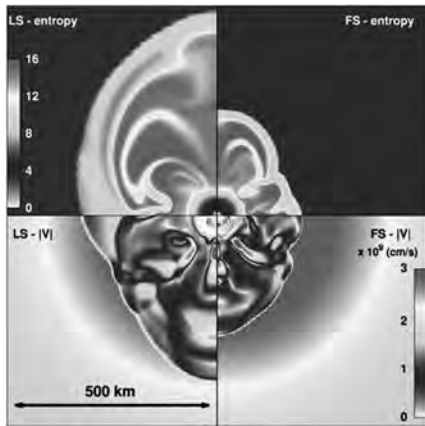


図5 ボルツマン方程式による超新星爆発の結果<sup>8)</sup>

コードはボルツマン方程式を直接解いて7次元空間におけるニュートリノ分布関数を求めるものである。

さらに、ボルツマン方程式と流体方程式を組み合わせることで計算コードが開発されて、第一原理的な多次元ニュートリノ輸送流体計算が可能となった<sup>8)</sup>。軸対称における超新星のシミュレーション計算が行われて、近似を取り除いたもとの爆発ダイナミクスが解明されはじめた。図5はボルツマン方程式を用いた多次元爆発計算結果の例である。太陽質量の11倍の星が重力崩壊し、コアバウンスして200msec後のエントロピー(上)と流体の速さ(下)を示している。ここでは高温高密度物質の状態方程式として2種類(FSとLS; 詳細は省略)を用いて比較を行っている。このときFS(右)では爆発しないが、LS(左)では爆発に向かうことが明らかとなった。著者ら(日本の研究グループ)はこのような違いが普遍的かどうかを探る計算を実施している。

こうした第一原理的なシミュレーション計算は、日本の最先端である京コンピュータを用いても半年以上かかる大規模なものである。本格的な3次元爆発計算には次世代のスーパーコンピュータが必要であり、ポスト「京」プロジェクトの一環として研究が進行中である。

## V. 原子力との関係

表1で超新星と原子力での輸送現象にかかわる典型的な量を比較する。量によっては10の20~30乗に達する極端な違いがある。概観すれば、中性子反応断面積の典型値が1バーン( $10^{-24}\text{cm}^2$ )程度であるのに対しニュート

表1 超新星と原子力における粒子輸送現象の比較

	超新星	原子力
輸送する粒子	ニュートリノ	中性子
粒子密度[ $\text{cm}^{-3}$ ]	$10^{30}\text{-}10^{37}$	$10^8\text{-}10^9$
フラックス[ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	$10^{40}\text{-}10^{47}$	$10^{14}\text{-}10^{15}$
平均エネルギー[eV]	$10^6\text{-}10^8$	$0.025\text{-}10^6$
環境密度[ $\text{gcm}^{-3}$ ]	$10^5\text{-}10^{15}$	1-10
環境温度[K]	$10^9\text{-}10^{12}$	600
時間スケール[s]	$10^{-3}\text{-}10$	$10^7\text{-}10^8$

リノ・核子反応断面積は $10^{-41}\text{cm}^2$ 程度である。この断面積比 $10^{-17}$ を補ってあまりある粒子密度とニュートリノフラックスが超新星をつかの間( $10^{-3}\sim 10$ 秒)輝かせる一方、原子炉内の中性子反応は年単位で安定的かつ緩慢( $10^7\sim 10^8$ 秒)に進むのである。なお、原子炉計算の場合は媒質の複雑な形状や性質を精密に設定して中性子束を求めるのに対して、超新星の場合は流体中でニュートリノ流束を求めるという大きな違いもある。また、運転中の原子炉からもニュートリノが発生するので、高感度の可搬型検出器を開発し核不拡散のための検認手法として利用しようとする研究がIAEAを中心に進められている<sup>9)</sup>。

## VI. まとめ

天空にとつぜん現れ他の星々を圧倒して急激に輝きやがて消えて行く超新星。それは新しい星の誕生ではなく星の終焉をかざる大爆発であった。宇宙に存在する重い元素の多くはこの時合成される。ニュートリノ輸送現象は超新星爆発におけるエネルギー移行を通じてプロセス全体の鍵を握っている。近年の計算技術の発展により爆発メカニズムの解明に必要な第一原理的な計算が可能になった。プロセス理解の中核にあるのはニュートリノ輸送計算であり、この計算は原子力における中性子輸送計算とも多くを共有している。分野間の相互協力が期待される場であるともいえる。

### — 参考資料 —

- 1) 山田章一, 超新星, 2016(日本評論社), 住吉光介, 原子核から読み解く超新星爆発の世界, 2018(共立出版).
- 2) T.Sato et al., J.Nucl.Sci.Technol.55(2018) 684.
- 3) K.Niita et al., JAERI-Data-Code-99-042(1999).
- 4) 滝脇知也, 天文月報, 11(2017) 710.
- 5) S.Furusawa et al., Phys.Rev.C95(2017) 025809.
- 6) 住吉光介, プラズマ・核融合学会誌, 10(2012) 610.
- 7) K.Sumiyoshi et al., Astrophys.J.S.216(2015) 5.
- 8) H.Nagakura et al., Astrophys.J.854(2018) 136.
- 9) A.Porta et al., IEEE Trans. On Nucl. Sci. 57(2010) 2732.

### 著者紹介



住吉光介 (すみよし・こうすけ)

沼津工業高等専門学校教養科  
(専門分野/関心分野)宇宙核物理学, 状態方程式, 核データ, ニュートリノ観測, 計算科学



千葉 敏 (ちば・さとし)

東京工業大学科学技術創成研究院  
(専門分野/関心分野)核データ, 核分裂, 宇宙核物理, 原子炉物理, 核変換, 核兵器廃絶, 原子力教育

核融合トリチウム研究最前線  
—原型炉実現に向けて—

## 第6回 トリチウム透過研究と透過低減技術開発

静岡大学 近田 拓末

トリチウムを含む水素同位体は、鋼材などの構造材料中を高速で透過する性質があり、燃料効率の低下や炉外への放射性物質の漏洩が懸念されている。本稿では、材料中のトリチウム透過機構の解明に向けた基礎研究と、材料表面を被覆することでトリチウム透過を低減する技術について、最近の進展と今後の展望について解説する。

**KEYWORDS:** tritium permeation barrier, ceramic coating, irradiation, lithium lead, corrosion

## I. 緒言

水素同位体が高温で鋼材等の金属材料中を透過する性質は古くから知られているが、とりわけ核融合炉ではこの性質がさまざまな課題をもたらしている。中性子のエネルギーを熱に変換すると同時にトリチウムの生産を行うブランケットでは、核熱による高温ゆえにトリチウムの透過が最も深刻になる。また、エネルギーの受け渡しを行う熱交換器では、ブランケットと比較して低温である一方、面積が大きいため透過量は無視できず、さらに炉外へのトリチウムの漏洩に直接関わるため厳密な評価が必要である。言うまでもなく、燃料システムにおけるトリチウム透過の正確な予測とその低減技術開発は、核融合炉が発電炉として成立するかどうかを左右する重大な研究課題である。なお、透過以外にも、鋼材の機械強度を劣化させる水素脆化が構造材料の短寿命化の原因になることが懸念されており、透過低減技術は脆化抑制に貢献する可能性も秘めている。

本稿では、核融合材料中のトリチウム透過機構の解明に向けた基礎研究と、被覆によるトリチウム透過低減技術について概説する。金属中の水素同位体透過は過去に詳細に調べられているが、被覆材料には酸化物などのセラミックスが用いられることが多く、金属とセラミックスでトリチウム透過機構がどのように異なるのか解明す

*Research frontier of tritium for fusion reactor-toward the DEMO reactor(6) ; Tritium permeation study and technology development for mitigation of tritium permeation : Takumi Chikada.*

(2018年6月13日 受理)

■前回タイトル

第5回 液体増殖材開発の最前線

ることが当該分野の当初の命題であった。近年では、特定のセラミックス被覆に関しては水素同位体透過機構が明らかになり、トリチウム透過低減の他に、腐食耐性や放射線耐性を考慮した機能性被覆の検討が進められている。このような最近の進展についても紹介する。

## II. トリチウム透過の基礎

## 1. 透過理論

水素が材料中を移動する現象は、白金試料を用いたガス透過実験の結果を踏まえて1900年代初頭に理論化された<sup>1)</sup>。これは、白金表面で水素分子が解離し、原子状態で白金中に固溶、拡散し、裏面で再結合、脱離するというモデルに基づいている。本節では、透過という現象を理解する上で基礎となる理論について概説する。

金属が気体の水素と接している時、金属への水素固溶量  $S$  はガス分圧  $p$  の平方根に比例するというジーベルツの法則より、

$$S = K_S p^{0.5} \quad (1)$$

と書き表せられる。ここで、 $K_S$  は材料固有の比例定数であるジーベルツ定数である。(1)式では、圧力の平方根に比例するところが重要であり、これは水素分子が材料内に固溶するとき、原子状態に解離することを意味している。比較として、分子状態で溶解するときは、液相への溶解で成り立つヘンリーの法則が知られている。

固溶した水素は、濃度勾配を駆動力として濃度の低い方向へ拡散する。ここで、図1のような均一な厚さ  $d$  の金属平板の片側から水素が固溶し、拡散した水素が反対側で再結合、脱離する系を考える。この場合、水素のふるまいは1次元で記述することができ、吸着、解離や再

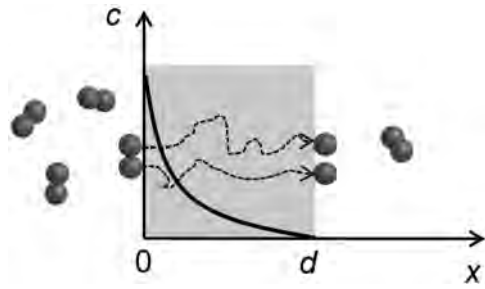


図1 金属中の水素拡散の概念図と過渡状態における水素濃度分布

結合、脱離が金属内の拡散に比べて無視できるほど速い場合(拡散律速)を仮定すると、座標  $x$  における平板を通過する単位時間、単位面積あたりの水素移動量(フラックス)  $J$  は、フィックの第1法則を用いて(2)式のように表される。

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (2)$$

ここで、 $c$  は水素濃度、 $D$  は拡散係数(diffusivity)である。(1)式より、 $c$  を分圧  $p$ 、また  $x$  を金属の厚さ  $d$  を用いることで、(2)式は(3)式のように書き換えることができる。

$$J = -D \frac{(0 - K_S p^{0.5})}{d} = K_S D \frac{p^{0.5}}{d} \quad (3)$$

ここで、温度に依存する係数  $K_S D$  を特に透過係数(permeability)と呼び、透過しやすさを示す材料固有の値として取り扱われる。多くの純金属や合金について、各温度で水素同位体透過係数および拡散係数がこれまで測定され、文献としてまとめられている<sup>2)</sup>。

核融合炉におけるトリチウム透過についても、(3)式を基本として評価していくことになる。一方で、実環境では、冷却材やパージガスなどに含まれる不純物による構造材料表面の酸化や、増殖材と接する箇所では生成した腐食層による透過挙動の変化、中性子やガンマ線の照射影響など、単純な金属中の透過だけを考えることができない場合が多く存在し、透過挙動を複雑にしている。これらの諸課題を解決し、ブランケットや熱交換器といった各機器での正確なトリチウム透過を予測できるようになること、および透過低減技術の確立が、核融合炉におけるトリチウム透過研究の中核である。

## 2. 測定手法

材料中の水素同位体の透過を測定するためには、前節の(3)式が適用できる体系を作る必要がある。具体的には、厚さの均一な材料を用いること、吸着、解離、再結合などの表面反応を十分速くするために試料表面を平滑にしておくこと、水素導入側(上流)と透過側(下流)の濃度差を大きくすること、などがある。これらの条件を整

えた環境で、下流に透過してきた水素を測定することになる。気相中の透過を測定するガス透過法では、四重極型質量分析計(QMS)やガスクロマトグラフを用いる。一方、液相中、特に水溶液中で水素の金属中の移行挙動を電気化学的に測定する手法も開発されている<sup>3)</sup>。いずれにしても、測定で得られるデータはイオン電流値やピーク面積、電流密度であり、透過フラックス( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ など)に変換するための較正が必要である。較正には、水素を充填した容器から、キャピラリー(毛細管)を通して一定流量で水素が放出される標準リーク、もしくは標準試料を用いるのが一般的である。

測定で得られる直接的なデータは、透過が定常状態に達したときの透過フラックス  $J$  であり、(3)式より透過係数を計算することができる。一方、(3)式の経時変化を数式で表現すると、(4)式となる<sup>4)</sup>。

$$J(t) = K_S D \frac{p^{0.5}}{d} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-D \frac{n^2 \pi^2}{d^2} t\right) \right) \quad (4)$$

これを、 $t=0$  で  $Q=0$  を初期条件として時間について0から  $t$  まで積分すると、透過量  $Q$  の時間変化を示す(5)式が得られる。

$$\begin{aligned} Q(t) &= \int_0^t J(t) dt \\ &= K_S D \frac{p^{0.5}}{d} \left( t - \frac{d^2}{6D} \right) \\ &\quad - 2K_S D \frac{p^{0.5}}{\pi^2 D} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-D \frac{n^2 \pi^2}{d^2} t\right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、右辺第2項の無限級数は定常に達する前の過渡状態を示す項であり、 $t$  が大きくなるにつれ0に近づく。したがって、定常状態では右辺第1項で示される  $t$  の一次関数になる。この一次関数の  $x$  切片 ( $y=0$ ) を遅れ時間  $\tau$  と定義すると、(6)式の関係が得られる。

$$\tau = \frac{d^2}{6D} \quad (6)$$

これより、遅れ時間と試料厚さから拡散係数が求められる。過渡状態から拡散係数を求めることは透過挙動の理解にはきわめて有用であるが、理想的な形状の曲線が常に得られるとは限らない。また、拡散の速い金属試料では、数秒以下で定常に達するものもあるため、四重極型質量分析計等の応答時間を考慮すると、数十秒以上の遅れ時間となるように試料温度を設定する必要がある。その点、トリチウム透過低減被覆を施した試料では一般に拡散が遅いため、高温でも拡散係数の測定が可能である場合が多い。

### Ⅲ. トリチウム透過研究の進展

#### 1. $\gamma$ 線照射影響

ブランケットなどの炉心近傍では、構造材料は高線量の $\gamma$ 線と中性子に曝される。 $\gamma$ 線の線量率は、ITERでは $0.89\text{Gy s}^{-1}$ 、原型炉では $2.4\text{kGy s}^{-1}$ と推定されている<sup>5,6)</sup>。 $\gamma$ 線は材料との相互作用で光電効果、コンプトン効果、電子対生成を引き起こすが、鉄鋼材料との相互作用のみを考慮すると、5MeV程度までの $\gamma$ 線エネルギーで主として起こるのはコンプトン効果である。いずれの相互作用においても電子が生成されることとなり、励起された電子やそれに伴う材料へのエネルギーの伝達がトリチウムの透過にどのような影響を与えるかが関心事となる。トリチウム透過挙動に対する $\gamma$ 線照射効果を明らかにするためには、励起中の透過挙動の変化を調べる必要がある、したがって照射環境下で透過試験を実施することが求められる。そこで筆者らは、静岡大学理学部の $^{60}\text{Co}$ 線照射装置を用いて、図2に示すように線源近くにガス透過装置の試料部を配置し、QMSなどの精密機器の照射による損傷を避けるために上下流の配管を伸ばした装置体系( $\gamma$ 線照射下水素透過システム, HYdrogen PERmeation system under  $\gamma$ -ray Irradiation: HYPE $\gamma$ ION)を構築した。本装置による $\gamma$ 線照射効果について、近年様々な結果が出つつあるが、本稿では金属材料について紹介する<sup>7)</sup>。

白金およびオーステナイト系ステンレス鋼 SS316 を用いて非照射における透過係数の確認および線源-試料間の距離と線量率評価を行った後、本体系での最大線量率である約 $0.15\text{Gy s}^{-1}$ における $\gamma$ 線照射効果を調べた。照射効果の検出の障害となるのは、主にQMSのノイズであった。図3に、上流に重水素を導入していない状態および80kPa導入した状態での照射前後における重水素透過フラックスの経時変化を示す。重水素未導入時はバックグラウンドを測定していることになるため、導入時と比べて透過フラックスが2桁程度低い値になっていることに注意されたい。重水素未導入時においては、照射開始後直ちにフラックス(QMSの信号)の上昇および

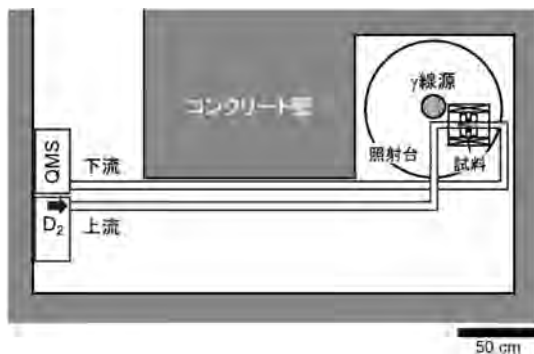


図2 HYPE $\gamma$ ION 見取り図

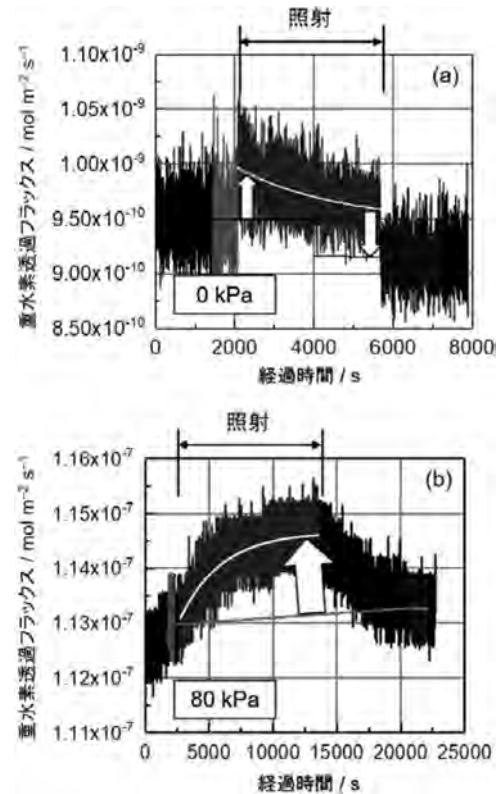


図3  $\gamma$ 線照射中におけるSS316の重水素透過フラックスの経時変化(300°C)(a)上流重水素未導入時、(b)80kPa導入時

照射終了後の減少が確認された。なお、照射前後でバックグラウンドが減少しているが、これは真空排気下で避けられない減少分であると考えられる。一方、重水素導入時の透過フラックスの増加は緩やかであり、2時間程度かけて増加した後、定常に達する傾向が見られた。この時定数は、照射後に元の透過フラックスに戻る時も同様であった。また、照射開始後直ちに増加する透過フラックスの絶対値はバックグラウンドに関わらずほぼ一定であったが、徐々に上昇する場合は増加率が元の透過フラックスに依存した。電子回路に与える $\gamma$ 線のノイズは照射中のみであり、また一定値であると考えられるため、重水素未導入時に検出した応答の早い増加はノイズによるものであり、重水素導入時に検出した応答の遅い増加は照射効果によるものと結論づけた。応答の遅い増加の場合もノイズは含まれているが、元の透過フラックスが大きいため寄与が小さかったと考えられる。実際に、低温など透過フラックスが小さい状態で照射試験を行うと、ノイズの割合が大きくなることが確認された。

ノイズの寄与を除いた照射による透過フラックスの増加率は、元の透過フラックスに対して0.3~1.6%であった。試験温度は低いほど増加率が高く、温度と負の相関があることが明らかになった。線量率と透過フラックスの増加率については、正の相関が認められた。本実験の線量率はITERの1/4程度、また原型炉で想定されるものより4桁小さい値であるため、原型炉では $\gamma$ 線による

透過の増加が大きくなるおそれがある。照射効果の要因として、照射直後に試料温度が最大0.5℃程度上昇しており、2時間程度かけて照射前に戻ったことから、ガンマヒーティングによる試料の温度上昇が透過フラックスの増加を引き起こしたと考えられる。さらに、試料の表面状態の変化に応じた $\gamma$ 線照射効果の変化についても知見が得られた。SS316を用いた一連の試験では、500℃での透過試験時に酸化と見られる透過係数の減少が見られた。そこで、酸化前後の $\gamma$ 線照射効果の同じ試験温度(300℃)で調べると、酸化前は透過フラックスの増加率が約1.2%であったのに対し、酸化後は約0.5%に減少した。これは、SS316表面に生成した酸化層が、透過係数の低減に加えて、 $\gamma$ 線照射効果も低減した可能性を示している。今後、トリチウム透過低減被覆の $\gamma$ 線照射実験を進めていくことで、金属とセラミックスの $\gamma$ 線照射効果の違いが解明されることが期待される。また、原型炉級の線量率へ現在の結果を外挿していくためにも、より高線量率の $\gamma$ 線源を用いての透過実験が必要と考えられる。

## 2. イオン照射影響

核融合炉環境で考慮すべき照射効果をもたらしもう一方は中性子であるが、核融合炉で想定される30dpa (displacement per atom)程度の損傷量を現行の中性子照射施設によって得る機会はきわめて限られている。また、膜厚が最大でも数 $\mu\text{m}$ であるトリチウム透過低減被覆の照射効果を調べるには、基板を含めた試料全体に損傷を導入する必要はなく、表面から数 $\mu\text{m}$ に導入できれば一定の模擬が可能と考えられる。以上の条件を踏まえて、重イオン照射による評価が有効であるとの仮定のもとに、被覆のイオン照射研究は開始された。なお、損傷の分布の相違や入射イオンが残存することによる影響について考慮し、かつ中性子照射で想定されるそれらと近くなるようなパラメータ設定をすることが、より妥当な模擬として重要である。本節では、これまで詳細な水素同位体透過挙動の理解が蓄積されてきた真空アーク蒸着法で作製した $\text{Er}_2\text{O}_3$ 被覆について紹介する。なお、基板には低放射化フェライト鋼F82Hを用いている。

図4に試料温度600℃で6.4MeVの $\text{Fe}^{3+}$ を被覆内の平均損傷密度が0.01~1dpaとなるように照射した $\text{Er}_2\text{O}_3$ 被覆試料の重水素透過係数の温度依存性を示す。損傷密度に応じて500℃以下の低温領域の透過係数に違いが見られたが、550℃以上では同等の透過係数を示した。過去の研究で、水素同位体は主にこの被覆中の結晶粒界を通して移動すること(粒界拡散)が明らかになっている<sup>8)</sup>。したがって、低温領域での透過係数の違いは、照射による損傷の導入と照射時の試料加熱による欠陥回復および粒成長のバランスによるものと考えられ、両者が定常に達する550℃以上ではいずれの試料も同等の微細

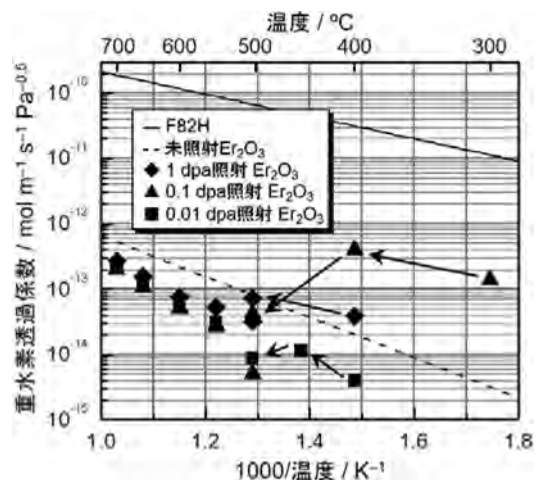


図4 6.4MeV  $\text{Fe}^{3+}$ を600℃で照射し各損傷量を与えた $\text{Er}_2\text{O}_3$ 被覆試料の重水素透過係数の温度依存性

構造になったと考えられる。また、0.01dpaの低損傷密度の被覆試料が最も低い透過係数を示したことから、照射損傷の導入による低温での核形成の促進が示唆された。さらに、550℃以上の高温領域において透過係数がいずれの試料も未照射試料より低かったことから、照射損傷の導入によって重水素がより通りにくい粒界構造に変化したと考えられる。透過型電子顕微鏡を用いた微細構造分析では、照射によって被覆中の基板近くの領域に欠陥集合体とみられる組織が生成していたが、1dpaの損傷量を与えた被覆試料では試料加熱の寄与が大きく、欠陥集合体の生成は限定的だった。また、重水素透過試験後においても一部の欠陥集合体は残存していたため、高温でも安定な欠陥集合体が透過挙動に影響を与えた可能性がある。

以上のように、照射損傷の導入は被覆の結晶構造を乱し、トリチウム透過を増加させる要因となる一方で、核生成の促進や粒界構造の改善など、透過を減少させるはたらきがあることが明らかになった。今後は、より損傷密度を増加させた被覆試料の微細構造と水素同位体透過挙動を調べていくことで、原型炉により近い条件におけるトリチウム透過低減被覆の挙動を明らかにする必要がある。

## 3. 層構造の制御と多機能化

トリチウム透過低減被覆をブランケットに適用する場合、透過低減性能だけでなく、放射線耐性や増殖材との共存性も確保されなくてはならない。このような多くの要求を一層の被覆で確保することは困難を極める。加えて、被覆の信頼性を高めるためには、万一被覆に劣化等が生じたときの補償が必要である。被覆に自己修復性を付与することは劣化対策として理想的であり、その一例として、アルミニウムを被覆後、熱処理で基板の鉄と合金化し、アルミニウム層の最表面を酸化することでトリチウム透過を低減するアルミナイズ処理がある<sup>9)</sup>。一



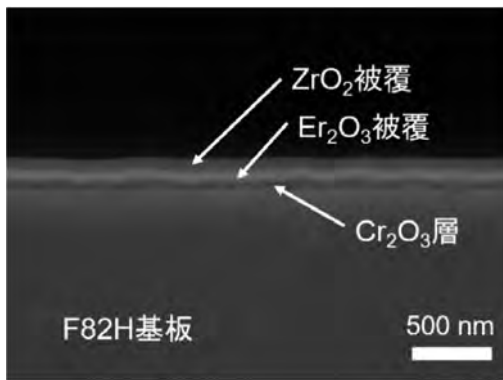


図5 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>生成させた F82H 基板に成膜した Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 複層膜の断面 SEM 像

方、酸化アルミニウムの生成には高温での熱処理が必要であり、熱処理時に基板となる低放射化フェライト鋼等の力学特性が変化しないよう留意する必要がある。本節では、別の劣化対策として被覆の多層化について紹介する。

多層化は、トリチウム透過低減や耐食性等、ブランケットで要求される機能を各層に割り当てることで実現するものであり、材料の組み合わせと特性評価が筆者らにより近年取り組まれている<sup>10)</sup>。図5に、熱処理を施した F82H 基板上に液相法の一つである有機金属分解法を用いて Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と酸化ジルコニウム (ZrO<sub>2</sub>) を成膜した多層被覆試料の断面顕微鏡像を示す。この試料は、従来の課題であった低温領域での水素同位体透過低減性能を向上させるだけでなく、増殖材候補である液体リチウム鉛との高い共存性を示した。高く安定した水素同位体透過低減性能は、成膜を複数回実施していることにより、各成膜時に生成した剥離や亀裂が相互に補償されたためと考えられる。このような被覆率の補償は層を重ねることによりさらなる改良の余地があるが、膜厚の増加による密着性や機械的安定性の低下を考慮する必要がある。今後、被覆材料や層構造の最適化を通して、ブランケット環境で高い性能と信頼性を発揮する多層被覆が見出されることが期待される。

#### IV. 結言

トリチウムの透過研究は、その基礎となる理論が古く

から構築されているのに対し、実際は複数の現象の組み合わせの結果として発現することから、実験結果の解釈の困難さが当該研究の進展のスピードを鈍化する要因になっている節があった。しかし、複雑さを極力排除し着実に積み上げてきたこの10年で、セラミックス被覆試料中の水素同位体透過挙動が詳細に明らかになり、照射や腐食といった原型炉への適用を視野に入れた検討に展開されるまでになった。被覆に要求される項目は多岐にわたるため、洗練された既存技術の応用で解決を図りがちだが、トリチウムという少しの穴も許されないものを厳密に制御するためには、ノイズを丁寧に除去して得る実験結果と理論の改良の積み重ねが結局解決の近道となる。今後の核融合炉におけるトリチウム透過研究では、照射や腐食のそれぞれの効果に加えて、照射-腐食-トリチウムが織りなす重畳効果に対峙することになる。新しい現象が発見される可能性すらある状況でも、地道な理論の構築と改良を重ね、原型炉でのトリチウム挙動の正確な予測と透過低減技術の確立に向けて研究が進展していくことが望まれる。

#### — 参考資料 —

- 1) O.W. Richardson et al., Phil. Mag. 8, 1, 1904.
- 2) S.A. Steward, "Review of Hydrogen Isotope Permeability Through Metals," Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL53441, 1983.
- 3) M. A. V. Devanathan and Z. Stachurski, Proc. Roy. Soc. A270, 90, 1962.
- 4) J. Crank, "The Mathematics of Diffusion", second ed., Clarendon Press, 1975.
- 5) Z. Ghani et al., Fusion Eng. Des. 96-97, 261, 2015.
- 6) T. Tanaka et al., Fusion Eng. Des. 47, 933, 2005.
- 7) H. Fujita et al., Fusion Eng. Des. 133, 95, 2018.
- 8) T. Chikada et al., J. Nucl. Mater. 417, 1241, 2011.
- 9) K.S. Forcey et al., J. Nucl. Mater. 161, 108, 1989.
- 10) J. Mochizuki et al., Fusion Eng. Des. in press. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.01.059

#### 著者紹介



近田拓未 (ちかだ・たくみ)

静岡大学大学院理学領域

(専門分野/関心分野) 核融合炉工学, 水素同位体科学, 放射化学, 薄膜工学, セラミックス材料学

## 第4世代ナトリウム冷却高速炉の系統別安全設計ガイドラインの構築

「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計ガイドライン」研究専門委員会

日本原子力学会では2011～2012年度に特別専門委員会を設置し、第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリア(SDC)について精力的に議論し、その成果は第4世代原子炉国際フォーラムのSDCレポートに反映されるとともに、国際機関と各国規制機関によるレビューの反映を経て、次世代SFRの安全設計に関する国際的なハーモナイゼーションが進みつつある。さらに2013～2017年度に学会に設置された研究専門委員会では、基本性能要求であるSDCを具体化した安全設計ガイドライン(SDG)の構築を進めた。委員会では、国際社会に向けてSFRの安全設計の考え方とSDGの技術的根拠を提案することを目的に、SDGの構築に関連した安全関連技術開発の最新動向及び国内外の安全基準の最新動向を調査するとともに、SDGの具体的な内容を検討した。研究専門委員会では、その前半約2年間の活動成果として「安全アプローチ及び設計条件に関するSDG」(安全アプローチSDG)をまとめた。本稿では、研究専門委員会の後半約2年間の活動成果であり、SDC及び安全アプローチSDGを元に、炉心系、冷却材系、格納系における具体的な設計上の推奨事項及び設計事例をまとめた「系統別SDG」について概説するとともに、SDC及び安全アプローチSDGに関する国際レビューの概況、SDGに対応する各国の次世代SFR設計概念の検討状況について解説する。

### I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故後、世界各国で原子力プラントに対する様々な安全性の向上活動が行われている。ナトリウム冷却型高速炉(SFR: Sodium-cooled Fast Reactor)の開発は、仏国・露国・中国・インドで着々と推進されており、SFRの安全要件の世界標準を構築するニーズは高い。また、国際標準に準じた要件の適用が重要となってくることに呼応して、高速炉の炉型の特徴を反映した国内要件の整備が進められるべきである。日本原子力学会は2011～2012年度に特別専門委員会を設置し、第4世代SFRの安全設計クライテリア(SDC: Safety Design Criteria)に関する議論を行い<sup>1)</sup>、その成果は第4世代原子炉国際フォーラム(GIF: Generation-IV International Forum)のSDCレポート<sup>2)</sup>に反映された。ここで、SDCは基本性能要求であり安全指針の階層上

はIAEA SSR2/1に相当するが、より実効性を持つ具体的な形で国際標準として展開することが重要となる。そのため、GIFではSDCの技術的要件を詳細に展開して定めることを目的に、安全設計ガイドライン(SDG: Safety Design Guideline)の構築が進められてきた。

このようなGIFでの活動と呼応して、本研究専門委員会は2013年より国際的なSDGの構築に向けて、国内外の関連安全基準及び安全関連技術開発の最新動向を調査するとともに、第4世代SFRの設計を特徴づける主要な安全機能を具体化するための考え方や安全設備が備えるべき要件について検討を行った。SDG構築に関わる本委員会の位置づけと関連する会議体を図1に示す。本委員会での検討結果は、GIFでの議論に日本案として反映され、SFRの安全確保の基本的な考え方とSDGの技術的根拠整備に貢献した。本稿では、本委員会の最終総合報告として、第4世代SFRのSDGの構築方法、関連する国際レビューでの論点、安全アプローチSDG及び系統別SDGの構築に際し本委員会の中間報告<sup>3)</sup>以降に論点となった事項の概要、さらには各国でのSDC/SDGに対応した次世代SFRの検討状況について解説する。

*Development of Safety Design Guideline on Structures, Systems and Components for Generation-IV Sodium-Cooled Fast Reactors* : Research Committee on Safety Design Guidelines for Generation-IV Sodium-cooled Fast Reactor.

(2018年7月5日 受理)

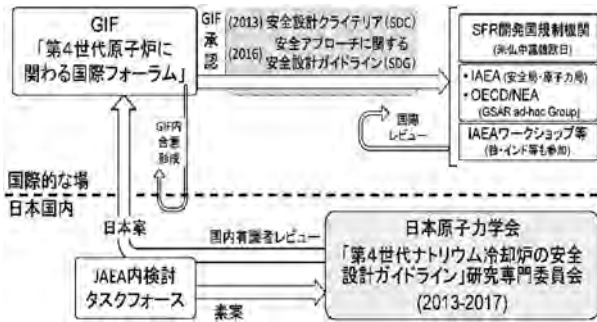


図1 安全設計ガイドライン (SDG)構築に関わる委員会の位置づけと関連会議体

## II. 安全設計ガイドラインの位置づけと構築の進め方

SDGは、基本性能要求であるSDCを基に、SFRの主要システムを構成する設備を設計する際に考慮すべき安全設計要求のレベルにまで展開するものである。この展開を行うにあたり、第4世代原子炉SFRとして目指すべき共通の安全設計方針とその対応方策を示すものが「安全アプローチSDG」である。SDCを元に、SDGの構築を進めた基本的な手順を図2に示す。

SDGを構築するに当り、実際の設計に適用する際に実効的なものとするために、各国の設計概念や開発状況を把握して念頭に置いた上で、各国の設計概念に共通して適用すべきガイドラインとして安全設計要求を定めた。国により具体的な設計は異なる(崩壊熱除去系の容量や数など)ものの、SFRの設計技術は共通点が多く、設計基準事故(DBA: Design Basis Accident)に対する安全設計対策には大きな違いは見られない。一方、DBAを超える設計拡張状態(DEC: Design Extension Condition)については、想定事象とそれに対する対策が広範囲に及ぶことからプラント設計に与える影響は大きく、安全設計の標準化に対するニーズが特に高い。このため「安全アプローチSDG」では、DECのうち、SFR炉

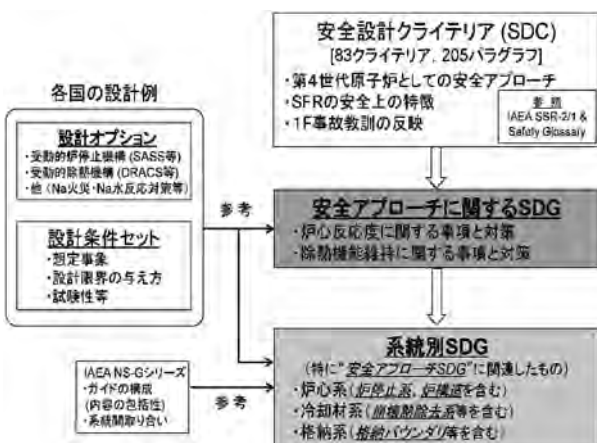


図2 安全アプローチに関する安全設計ガイドライン (SDG) 及び系統別 SDG の構築手順

心の反応度特性に関連した炉心損傷の防止と炉心損傷後の影響緩和に関する事項、並びに、ナトリウム冷却材の自然循環能力を活用した崩壊熱除去機能の維持に関する事項に着目した検討を実施した。更に「系統別SDG」では、SDC及び「安全アプローチSDG」の考え方を基本的な安全機能(止める、冷やす、閉じ込める)に対応した主要な系統である炉心系、冷却材系、格納系に展開する。

## III. 国際レビューの状況

SDC及び安全アプローチSDGは、GIFによる承認後、規制側を含む国際的なレビューを促進する観点から国際機関や各国規制機関へ送付された。その後、各々数年をかけた規制側を含む議論を経て、レビューを反映した改訂版が構築された。これら国際レビューでの重要論点を系統別SDGとの関連を含めて概説する。

### 1. 安全設計クライテリアの国際レビュー

SDCフェーズIレポートは2013年5月にGIFにより発行されたが、その構築段階から仏IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire)及びIAEA (International Atomic Energy Agency)からのコメントが反映された。SDCレポート発行後の国際レビューでは、米NRC (Nuclear Regulatory Commission)コメント<sup>4)</sup>に対し22項目に集約して反映、IAEAコメントに対し4件を反映、仏IRSNコメントに対し15件が反映された。中国NNSA (National Nuclear Safety Administration)コメントを含め反映外とされた事項には、下位要件となる安全設計ガイドラインに記載すべき事項が多く、他にSDC及びIAEAでの定義に対する意見やSDCスコープ外の事項などがあった。IAEA-GIF SFR安全性ワークショップ<sup>5)</sup>では米NRC及び仏IRSNに対し反映事項が説明され、SDC改訂1版(Rev.1)<sup>6)</sup>が発行された。またSDC初版ではIAEA SSR2/1初版(2012)が参照されたが、その後のSSR2/1改訂1版(2016)<sup>7)</sup>発行を受け、第4世代SFRの特徴を踏まえて取り入れるべき事項が判断され、IAEA Glossary改定版(2016)<sup>8)</sup>も踏まえ、SDC改訂1版(Rev.1)<sup>6)</sup>へ反映された。多くのSSR2/1改訂1版がSDC改訂1版へ反映されたが、軽水炉特有の要件であってもSFRのシステム上の長を考慮して反映した事項があった。例えば、軽水炉での格納容器内スプレーに対しSFRでは格納容器は炉心冷却と関連しないこと、軽水炉では事故時注水のためポンプ動力用電源が必要だが、SFRではDEC時でも自然循環で冷却されるためポンプ動力規模の電力は不要だが状態監視(例:ナトリウム冷却材温度)に必要な電源維持は重要、などである。

## 2. 安全アプローチに関する安全設計ガイドラインの国際レビュー

GIF から 2016 年に発行された「安全アプローチ SDG レポート<sup>9)</sup>」は OECD/NEA/GSAR(米仏日露韓独伊加の規制関係機関を含むメンバーで構成されるワーキンググループ, Joint CNRA and CSNI Ad hoc Group on the Safety of Advanced Reactors) 及び IAEA へ送付され、2018 年 3 月にかけて GSAR 及び IAEA から最終レビューが出された<sup>10)</sup>。全般的コメントとしては、原子炉容器内事象終息 (IVR: In-Vessel Retention) に関するもの、格納容器健全性の確保に関するもの、高速炉の炉心反応度特性を述べた記載の解釈に関するもの、集合体内流路閉塞の位置づけなどがあった。詳細コメントとしては、SFR 特有の設計対策に関する事項の他、定義の明確化・記述の正確性に関する指摘が多く、他に崩壊熱除去系の多様性や深層防護との関連などがあった。これら GSAR 及び IAEA からの公式コメントの反映は完了し、まもなく GIF から安全アプローチ SDG 改訂 1 版 (Rev.1) が発行される予定である。また OECD/NEA の GSAR では、次世代炉の安全性に関して特に、①シビアアクシデントの発生防止と影響緩和、②燃料プール(臨界安全等)、③シビアアクシデントに関するコードの検証、④燃料が着目されており、2018 年中の技術レポート発行が予定されているが、その取りまとめにあたり 2016~2017 年の GSAR 会合では SDC 及び安全アプローチ SDG に関連する上述の技術的議論がなされた。

## IV. 系統別安全設計ガイドラインの構築

### 1. 系統別安全設計ガイドラインの概要と構成

系統別 SDG では、安全アプローチ SDG<sup>10)</sup>で求められる要件を系統別に展開した内容、及び、安全アプローチ SDG では範疇外としたが SDC で求められている要件を詳細化した内容を記載している。前者の例としては、DEC における多様な反応度制御手段が、後者の例としては、ナトリウム化学反応対策(ナトリウム火災、ナトリウム-水反応)などがある。系統別 SDG では、設計プロセスで SDC と安全アプローチ SDG を活用する SFR 開発者のためのガイドとなる推奨事項及び手引きを提示しており、第 4 世代 SFR システムに一般的に適用されるべきものである。系統別 SDG では、「~すべき (should)」という表記で推奨事項が提示され、記載された対策を導入するか、或いは同等の代替策を講じることが推奨されている。

系統別 SDG では、基本的安全機能である「止める・冷やす・閉じ込める」ための系統機器を構成する炉心系・冷却材系・格納系に対して、第 4 世代 SFR で考慮すべき要件をまとめている。表 1 に系統別 SDG の目次を示す。

系統別 SDG は第 1 章「はじめに」、第 2 章「炉心系ガイドライン」、第 3 章「冷却材系ガイドライン」、第 4 章「格

表 1 系統別安全設計ガイドラインの目次

1. はじめに 1.1. 背景と目的 1.2. 対象と構成	4. 格納系ガイドライン 4.1. 格納系とそれらの安全機能 ・放射性情質の格納 ・外部事故防護 ・生体遮蔽 4.2. 格納系の一般的設計基準 ・設計基準の導出 ・内部事故 ・外部事故 ・設計基準事故と設計拡張状態 ・負荷要因 4.3. 事故状態に対する格納系の設計 ・圧力と温度の制御 ・放射性核種の制御 ・可燃性ガスの制御 ・格納構造物の機械的特性 4.4. 試験及び検査
2. 炉心系ガイドライン 2.1. 炉心燃料の健全性確保 ・燃料要素及び燃焼集合体 ・炉心 2.2. 反応度制御 ・能動的炉停止系 ・設計拡張状態での炉停止	1. 付録 1.1. 燃料特性(酸化物、金属、窒化物) 1.2. 燃料集合体の機械設計 1.3. 反応度係数 1.4. ナトリウム水反応 1.5. 崩壊熱除去系 1.6. 隔離弁の構成例
3. 冷却材系ガイドライン 3.1. 設計における一般的考慮事項 3.2. 1次冷却材系 ・機器設計 ・原子炉カバーガスとそのバウンダリ ・冷却材液位確保 3.3. 崩壊熱除去系 ・基本的機能 ・設計基準事象における崩壊熱除去 ・設計拡張状態における崩壊熱除去 ・自然循環の適用 ・試験や検査の安全上の考慮事項 3.4. ナトリウム化学反応対策 ・ナトリウム漏えい燃焼対策 ・蒸気発生器におけるナトリウム水反応対策	11. 添付 11.1. 能動的炉停止系 11.2. 受動的な反応度機構 11.3. ナトリウム漏えい燃焼対策 11.4. ナトリウム水反応対策 11.5. 格納構造 111. 用語集

納系ガイドライン」から構成され、各国の設計対策を踏まえた共通項を各ガイドライン本文において扱っている。一方、各国で異なる設計を取りうる事項は「付録 (Appendix)」として本文の一部とし、概念図を含む個別事例は「添付 (Annex)」に参考資料としてまとめている。

### 2. 系統別安全設計ガイドラインの内容

系統別 SDG の具体的な内容の例を以下に紹介する。

#### (1) DEC での炉停止(炉心系ガイドライン)

安全アプローチ SDG では、能動的炉停止系が機能喪失した場合でも、受動的な反応度抑制機構又は固有の反応度フィードバック、或いはそれらの組合せによる炉心損傷防止を推奨している。信号、作動機構又は電源が無くても、冷却材温度上昇又は冷却材圧力減少などの物理現象に直接応じて起動、動作する受動的な反応度抑制機構に対するガイドラインとして、これまでの原子炉停止系の設計や運転の経験、受動的機構に関する研究開発と設計研究の成果に基づいて以下を記載している。

- ・通常運転を阻害しないようにすべき(誤作動防止)
- ・環境効果を踏まえて機能維持すべき(照射効果, 温度効果, 運転状態及び事故状態, 地震等)
- ・能動的炉停止系との共通要因故障を防止すべき
- ・必要な反応度を確保すべき(例: 制御棒の本数・位置)
- ・炉心損傷防止を達成できる応答時間を確保すべき(熱流体力学的な遅れ時間, 作動機構の応答時間, 制御棒の挿入時間等の考慮)
- ・受動的炉停止作動後の安全停止状態への移行手段を考慮すべき(例えば制御棒の強制挿入等)
- ・試験や検査について考慮すべき(停止時の機能確認, 反応度価値の測定等)

#### (2) ナトリウム水反応対策(冷却材系ガイドライン)

SDC では、ナトリウムと水・蒸気(或いは他の作動流体)との化学反応の発生防止及び影響緩和の設計対策を

求め、DEC ではより激しい化学反応を想定しても基本的な安全機能を維持することを求めている。これまでの蒸気発生器とナトリウム水反応対策設備の設計や運転の経験、関連する研究開発と設計研究の成果に基づいて、ガイドラインとして以下を記載している。

(ナトリウム水反応の発生防止)

- ・外部事象(地震等)及び内部事象(流力振動等)に対して健全性を確保すべき
- ・蒸気発生器伝熱管の腐食等による破損防止のため、ナトリウム及び水・蒸気系の純度管理を行うべき
- ・ナトリウム/水バウンダリの連続漏えい監視及び体積検査による健全性の確認を行うべき

(ナトリウム水反応の影響緩和)

- ・水・蒸気漏えい検出設備を設けるべき(水素濃度や圧力の上昇検知)
- ・2次冷却材系内の圧力上昇を抑制するため、圧力開放系を設けるべき
- ・伝熱管破損時の反応量抑制のため、蒸気発生器の隔離及び内部の水・蒸気の放出設備を設けるべき
- ・発生する水素の蓄積と爆発を防止するため、系統外への移送及び燃焼等の処理を行う設備を設けるべき
- ・ナトリウム水反応生成物及びナトリウムエアロゾル等の環境中への放出抑制設備を備えるべき

(ナトリウム水反応の想定)

- ・DBAとして、伝熱管1本の破損を想定し(初期伝熱管破損は微小破損～瞬時破断相当)、炉心への影響回避のため、1次冷却材系と2次冷却材系のバウンダリ(中間熱交換器の伝熱管等)の破損を防止すべき
  - ・DECとして、DBAの想定に影響緩和機能の多重故障を重ね合わせるなどのより厳しい条件を考慮すべき
- (3)格納系への負荷要因(格納系ガイドライン)

SDCでは、事故状態でも格納容器の健全性を確保するため、ナトリウム炉特有の現象(ナトリウム燃焼、ナトリウム・コンクリート反応等)を含めた状態の管理を求めている。格納系への負荷要因の想定に関し、ガイドラインでは以下の推奨事項を記載している。

- ・IVRを達成することで、炉心溶融及び再臨界による過大な機械的エネルギーの発生を防止するとともに、デブリ・コンクリート相互作用の発生を防止して、格納系への潜在的負荷要因を低減すべき
- ・冷却材バウンダリの多重破損で生じるナトリウム漏えい燃焼は、DECでの格納系への負荷として想定すべき。さらに、漏えいナトリウムがコンクリートと反応し、水素の発生や蓄積に繋がり得る場合には、水素燃焼も負荷の1つとして見なされるべき
- ・炉心損傷過程でFPガス(ガス状核分裂生成物)が放出される場合、FPガスによる発熱が考慮されるべき

## V. 安全設計ガイドラインに適合した設計概念

第4世代SFRの開発が各国において進展している。委員会では、主要なSFR開発国での開発状況、それらの国で開発が進められている次期SFRの安全設計概念を公開文献により調査し、それらのSDGへの適合性を検討した。

### 1. 各国における次世代SFR概念

フランスとアメリカは過去の開発経験から、増殖技術は習得済みとしており、放射性廃棄物減容が主な目的となっている。フランスは実証炉ASTRIDの開発を進めており、その後、商用炉を導入する計画である。一方、ロシア、インド、中国では、エネルギーセキュリティの観点から高増殖を指向しており、早期の本格導入を目指して開発が進められている。ロシアでは、原型炉BN-600の運転が順調に続けられ、実証炉BN-800の運転も開始された。2025年頃には商用炉BN-1200を導入予定である。インドは、原型炉PFBRがまもなく運転開始予定であり、それに続くCFBRも2025年頃から導入する計画である。中国は、実証炉CFR600を2025年頃に建設し、2030年頃には商用炉を導入する計画である<sup>5)</sup>。いずれも将来の基幹電源として高速炉サイクルを活用する計画である。

次期SFRとして検討されている炉(フランス:ASTRID, ロシア:BN-1200, インド:CFBR等)の安全設計概念を調査した<sup>11),12)</sup>。これらはいずれも、第4世代原子炉、或いはそれに向けた実証炉として設計されるものと推測され、SDC/SDGへの適合性が意識されている。

### 2. 各国次世代SFR概念の安全設計

各国SFRの安全設計上の特徴を表2にまとめる。特に重要な運転時の異常な過渡変化時のスクラム失敗事象(ATWS: Anticipated Transient Without Scram)系のDECと除熱喪失事象(LOHRS: Loss of Heat Removal System)系のDEC関連要件への適合性について説明する。

ATWS系DECは能動的な手段による原子炉停止に失敗する状況であり、短時間で炉心損傷に至り、炉心の再臨界ポテンシャルが顕在化する恐れがある。そのためSDC/SDGでは、ATWS系DECに対し、炉心損傷防止と格納機能確保の2つの対策を要求している。具体的には、炉心損傷防止について、受動的な反応度低抑制機構又は固有の反応度フィードバック特性を活用した出力抑制機能を備え、炉心損傷を回避して原子炉停止できることを要求している。また、格納機能確保について、炉心損傷を想定しても原子炉冷却材バウンダリの機械的破損

表2 各国のナトリウム冷却高速炉の安全設計上の特徴

項目	次世代SFR (日)	ASTRID (仏)	BN-1200 (露)	CFBR (印)
出力	750~1500MWe	600MWe	1220MWe	600MWe
1次冷却材形式/ループ数	ループ型/2	タンク型/4	タンク型/4	タンク型/4
燃料の種類	酸化物燃料	酸化物燃料	酸化物燃料、窒化物燃料	酸化物燃料、金属燃料
炉心形式	均質	軸方向非均質、非均等高さ 上部ナトリウムプレナム付き	上部ナトリウムプレナム付き	軸又は径非均質(検討中) 上部ナトリウムプレナム付き
反応度制御と受動的機構の活用	温度作動型制御棒 (キュリー点電磁石適用)	温度作動型制御棒 (キュリー点電磁石適用) +流体圧浮遊式制御棒	温度作動型制御棒 +流体圧浮遊式制御棒	温度感知式(詳細不明) +流体圧浮遊式
崩壊熱除去系統と受動的機構の活用	DRACS(NC) + PRACS(NC)×2	DRACS(NC)×3 + DRACS(FC)×2	DRACS×4 (NC可能な系統含む)	DRACS(NC)×3 + DRACS(FC)×3
代替除熱系の設置	独立ループ型	ガードベッセル外面冷却	(不明)	追加的除熱系の設置を検討中
1次系ナトリウム漏洩対策	ガードベッセル設置	ガードベッセル設置	ガードベッセル設置	ガードベッセル設置
炉心損傷時の著しい機械的エネルギーの発生防止	ボイド反応度制限 集合体からの溶融燃料排出機構	ボイド反応度低減(ゼロボイド) 炉心領域からの溶融燃料排出機構	(不明)	(不明)
炉心損傷時の原子炉容器内での保持と冷却	溶融燃料移行経路の確保 原子炉容器内コアキャッチャ設置	溶融燃料移行経路の確保 原子炉容器内コアキャッチャ設置	原子炉容器内コアキャッチャ設置	原子炉容器内コアキャッチャ設置

DRACS: 直接炉心冷却型の崩壊熱除去系、PRACS: 1次冷却材系共用型の崩壊熱除去系、FC: 強制循環方式、NC: 自然循環方式

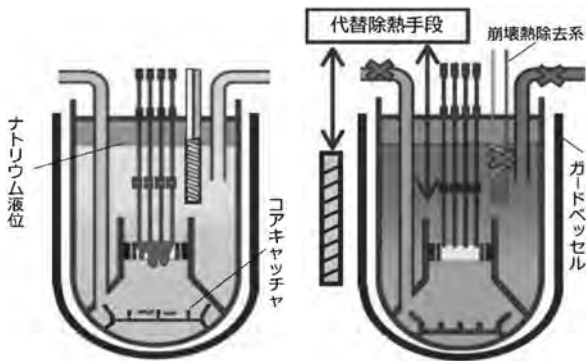


図3 ATWS系DECの事故影響のIVR

図4 LOHRS系DEC時の炉心損傷防止

を防止すること、すなわち図3に示すようなIVRの達成を要求している。各国の次期SFRでは、幾つかの設計選択があるものの、受動的方策の導入或いは強化が検討されている。例えばASTRIDでは、流量喪失型ATWSに対処するための流体圧浮遊式制御棒及び除熱喪失型ATWSに対処するためのキュリー点温度作動型制御棒が検討されており、BN-1200やCFBRでも類似の概念が検討されている。また各国の次期SFRでは、炉内コアキャッチャの設置等が検討されており、炉心損傷時の事故影響のIVR達成を目指しているものと考えられる。

LOHRS系DECは原子炉停止後の崩壊熱除去に失敗する事象であるが、SFRは高沸点のナトリウムを冷却材として用いることから、冷却材沸騰までの温度上昇余裕及び炉心損傷に至るまでの時間余裕が大きい、自然循環能力が高い、静的機器による液位維持が可能、等の特長を有している。これらを踏まえて、SDC/SDGでは、LOHRS系DECに対して次の対策を講じることで炉心損傷を防止することを要求している。1つは、原子炉容器とガードベッセルの信頼性を確保して原子炉容器内ナトリウム液位を維持し、液位喪失(LORL: Loss of Reactor Level)を防止することであり、もう1つは、崩壊熱除去系の機能強化や独立性の高い代替手段により冷却性を維持し、除熱源喪失(PLOHS: Protected Loss of

Heat Sink)を防止することである。これらの対策により炉心損傷状態が実質的に回避されるようにすることで、図4に示すようなIVRを達成することを要求している。各国の次期SFRでは、設計選択に差はあるものの、1次冷却材系全域をカバーするガードベッセルの設置、多様性に配慮した崩壊熱除去系構成、自然循環能力の取り込み等を検討し、防止対策の信頼性向上を図ることでLORL、PLOHSに起因する炉心損傷の防止を目指しているものと考えられる。

このように、DECに対する安全対策を強化する方向で各国の次期SFRの検討が行われ、総じて、SDC/SDGの要件を満足させる方向で安全設計が進められている。

## VI. おわりに

これまで高速炉開発を先導してきた我が国は、高速炉の研究開発、特に安全分野において国際貢献を果たしていく責務がある。第4世代原子炉として高い安全性を具現化するためのデファクトスタンダードたるSDCがGIFで整備され、国際機関及びSFR開発国の規制機関によるレビューを反映した改定版が発行された。SDCの要件をより具体化・詳細化し、今後の次世代SFRの安全設計に実効性を持たせるためのSDGは、世界に先駆けて日本原子力学会の場で議論され国際的な場に発信された。このような4年間にわたる活動成果は本委員会の最終報告書<sup>13)</sup>としてまとめられており、その中で、安全アプローチSDGと系統別SDGに関連する技術的背景と反映事項がまとめられている。また安全関連技術開発の最新動向及び国内外の安全基準の最新動向の調査結果、SDGを具現化する設計事例と技術的根拠もまとめられている。これら委員会の成果は、日本国内のみならず、世界的な高速炉の開発においても有用なものとなることが期待される。

本解説は、経済産業省からの受託事業である「高速炉等技術開発」の成果を含む。

執筆担当: 岡野 靖(日本原子力研究開発機構)

－ 参考資料 －

- 1) 日本原子力学会, 第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計  
クライテリアに関する調査研究(2013年1月).
- 2) GIF SDC-TF/2013/01(2013).
- 3) 日本原子力学会, 第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計  
ガイドラインに関する検討(中間報告)(2015年9月).
- 4) USNRC, ML13183A294(2014)他.
- 5) Joint IAEA-GIF Technical Meetings/Workshops on the  
Safety of SFRs(June/2014, June/2015, Nov./2016).
- 6) GIF SDC-TF/2017/02(2017).
- 7) IAEA SSR 2/1(2016).
- 8) IAEA Safety Glossary(2016).
- 9) GIF SDC-TF/2016/01(2016).
- 10) 7<sup>th</sup> Joint IAEA-GIF Technical Meetings/Workshops on the  
Safety of LMFRs(March/2018).
- 11) IGCAR, FR17, IAEA-CN-245-300(2017).
- 12) OKBM & IPPE, FR17, IAEA-CN-245-399(2017).
- 13) 日本原子力学会, 第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設  
計ガイドラインに関する検討(最終報告)(2017年9月).

■お知らせ■

日本原子力学会誌, 日本原子力学会誌「ATOMOS」  
J-STAGE 電子アーカイブ化に伴う過去記事の登載・無料公開について

2016年に登載が採択されました, 日本原子力学会誌(以下, 原子力学会誌)ならびに, 日本原子力学会誌「ATOMOS」(以下, 学会誌アトモス)は, 今年度より電子アーカイブ作成の作業に入ります。

1959～2001年に学会誌に掲載された論文(一般記事を除く)は, すでにJ-STAGEにて電子アーカイブ化され, 無料公開しておりますが, この度, 2002年から現在(発行から半年経過した記事)までの記事をJ-STAGEにおいて無料公開することとなりました。

すでに2008年1月号から現在までの記事は, 当会HP「立ち読みのページ」で無料公開しておりますが, 2002年から2007年12月号までに掲載された記事に関しては, インターネット上での公開はしていません。

つきましては, 2002年から2007年12月号に掲載された著者の方で, J-STAGEに記事を登載・無料公開することに問題がありましたら, 2018年12月24日(月)までに当学会まで, ご連絡くださいますようお願い申し上げます。なお, 期限までに異議がない場合は, 順次電子アーカイブ化の作業に入らせていただきますので, ご了承ください。

本件連絡先

一般社団法人日本原子力学会事務局 学会誌編集担当宛て  
TEL 03-3508-1261, FAX 03-3581-6128  
E-mail: hensyu@aesj.or.jp

## 断層リスクに向き合う原子力安全のアプローチ 日本原子力学会 特別国際シンポジウムの報告

東京大学 高田 毅士, 糸井 達哉

断層変位に関わる原子力発電所のリスクをどのように評価し、対処するのかを主な技術テーマとして、本会主催の特別国際シンポジウムが開催された。国内外の多分野の専門家による講演とパネルディスカッションを通じて、PRAを含めたリスク評価の重要性や原子力安全に向き合う姿勢等について様々な観点から建設的な議論が交わされた。本稿ではシンポジウムの概要と議論の内容を報告する。

**KEYWORDS:** *fault displacement, risk assessment, PRA, PFDHA, nuclear safety, defense in depth*

### I. はじめに

2018年5月31日、日本原子力学会主催(共催:日本地震工学会、土木学会原子力土木委員会)の特別国際シンポジウム「断層リスクに向き合う原子力安全のアプローチ」が、上坂充前会長や駒野康男現会長(当時、副会長)らのリーダーシップにより実現し開催された。シンポジウムでは、約180名の参加者のもと、講演とパネルディス

カッションにより活発な議論が交わされた。表1に開催概要を示す。本稿ではシンポジウム実行委員会や総司会として携わった立場から、その概要について報告する。

### II. シンポジウムの趣旨

シンポジウムでは、まず、開会挨拶として、上坂前会長から以下の開催趣旨が表明された。

- ・日本は地震国であり、地震とそれに伴う断層の動きの脅威は重大である。1995年兵庫県南部地震や2016年熊本地震の甚大な被害は記憶に新しい。
- ・原子力施設は活断層の直上には設置しないこととし、活断層による地震に対しても安全性を確保しているとされている。一方、わが国では、活断層ではなくても、多くの断層(古い断層や破砕部)が存在し、地震の発生により少なからず地盤が動く。その動きがどの程度なのか、それに対して施設側がどう対処していくのが問題となる。
- ・特に、継続的な安全性向上に取り組む際に、このような断層リスクに正面から向き合うことが求められる。自然現象ゆえに不確かさが大きく、学術的にも知見が確定していない技術事項もある中で、如何にリスクを低減し、社会と合意形成を図るかの重要な命題として、議論を進めていく必要がある。
- ・このような問題認識から、断層変位に対するリスク評価を対象に、海外の専門家とともに、国内外の取組みや近年の地震から得られた知見などを共有した上で、断層リスクに向き合う原子力安全のアプローチに関わる議論を国際的かつ分野横断で深化させることが目的である。

また、共催団体の一つである日本地震工学会の塩原等副会長からは、本シンポジウムのように、地震と活断層

表1 シンポジウム開催概要

日時	2018年5月31日(木)13:30~18:00
会場	東京大学弥生講堂 一条ホール
内容	<p>基調講演</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ Nilesh C. Chokshi (NCCChokshi Consulting, US) "Risk Perspective on Nuclear Safety against External Hazards and US experience on Seismic Fault Issues"</li> <li>・ Kevin J. Coppersmith (Coppersmith Consulting, US) "Recent Advances in Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis for Use in Engineering Design for Non-nuclear Critical Facilities"</li> </ul> <p>講演</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 遠田晋次(東北大学) 「リモセン技術の進展で見えてきた複雑な地表地震断層」</li> <li>・ 久田嘉章(工学院大学) 「地表地震断層ごく近傍の建物被害」</li> <li>・ 酒井俊朗(電力中央研究所原子力リスク研究センター) 「断層変位に対するリスク評価の取組み」</li> <li>・ 関村直人(東京大学) 「原子力安全に向き合う姿勢」</li> </ul> <p>パネルディスカッション 座長 高田毅士(東京大学)、パネリスト 講演者6名</p>

*Approaches to Ensure Nuclear Safety to Face Risks of Seismic Faults-Reports on the AESJ 2018 Special International Symposium* : Tsuyoshi Takada, Tatsuya Itoi.

(2018年7月25日 受理)



を扱っている理学と工学の専門家が連携して知見を集約させていくことの重要性について指摘があり、また、原子力施設のみならず、建築、土木その他の一般構造物にも水平展開できる点で大変有意義なものになるとの期待が寄せられた。

### Ⅲ. 講演内容の概要

#### 1. 基調講演

Chokshi氏は構造工学の専門家であり、米国原子力規制委員会(NRC)においてリスク情報の活用や地震をはじめとした外的事象に関する規制・研究に長年携わってきた経験を有する。近年はNRC、国際原子力機関(IAEA)等に対するコンサルタント業務、また、日本の電力中央研究所原子力リスク研究センター(電中研 NRRC)の技術諮問委員会委員としても活躍している。

Chokshi氏からは、確率論的なリスク評価に基づく、リスク情報を活用した意思決定の重要性に立脚した上で、米国での地震や断層に対する規制経験等を中心に、以下を骨子とする講演がなされた。

- ・1960年代初頭、San Andreas断層帯近傍のBodega Bay原子力発電所の基礎掘削工事において小断層が見つかり、プロジェクトの主体であるPG&E社と専門家チームによる設計条件の見直し(地震動、断層変位)がなされたが、当時の規制当局はサイトとして不適と判断し、プロジェクトが中止となった。
- ・このような初期の重要な経験を踏まえながら、確率論的な技術評価手法の進展とあわせて、地震関連の規制基準の整備が進化してきた。そして、1997年のNRC Reg.Guide1.165の発行により、不確かさを考慮することと確率論的地震動ハザード評価(PSHA)の活用が明確に位置付けられた。
- ・米国では、かつては決定論的な評価により活断層の認定をしていたが、現在は不確かさを踏まえて確率論的なハザード評価を行うため、第四紀のいつ動いたのかどうかという決定論的な議論はあまり意味を持たない。
- ・現在の米国の規則では、立地評価の要素として、すべての地表の変位・変形を考慮しなければならない。ガイドでは、断層による変位が想定される場合、新設プラントは回避することが推奨されており、事業者としても回避することが一般的な対応となる。しかし、立地が禁止されているわけではない。稼働中のプラントに対しても禁止されているわけではない。
- ・自然現象に大きな不確かさがあり知見は不十分である一方で、知見は蓄積するもので、ゆえに定期的に再評価が必要で、それがPRAやリスク論が必要となる一つの理由である。また、設計基準を超える事象が発生すること、深層防護の複数の層が同時に影響を受ける共通原因故障の可能性があることもリスク論が必要な理由である。
- ・プラントの安全性やリスクは、ハザードの大きさとプラントのレジリエンスの両面から決まるものであり、ハザードの大きさのみで決まるものではない。
- ・自然現象に対するハザード評価の課題としては、最良推定値と不確かさの両方の評価が必要であること、超過頻度の低いハザード評価に対するデータが限られていること、複雑なデータの解釈に専門家判断を活用すること、偶発的不確かさと認識論的不確かさを区別することなどがあり、このような課題を解決しようとすると確率論的評価の重要性が増すことになる。
- ・断層変位に対する確率論的評価に関連して、米国では2008年にDiablo Canyon原子力発電所の主要施設から600mおよび取水構造物から300mの位置のShoreline断層に対して、確率論的断層変位ハザード解析(PFDHA)を用いた評価がPG&E社およびNRCによって実施された事例がある。ハザード評価の結果(断層変位の大きさと頻度)から重大な問題はないという結論に至った。
- ・断層変位PRAは、ハザード評価、フラジリティ評価、発電所における事故時対応も含めたシステムの応答を統合した評価を行う。自然現象に対するプラントの応答は、プラント固有でかつ毎回異なるものである。
- ・基本的には地震動などと同じ枠組みで考えていくことはできるし、断層変位PRAを活用して各プラント固有のリスクを評価していくことの障害はない。

Coppersmith氏は、地質学でキャリアをスタートし、その後、地震ハザード評価に関する多方面の実績を積み重ねている。特に地震に関するスケールリング則の提案式(地震の規模と断層の長さ、変位量との関係式)は学術的に引用多数で、原子力施設の評価においても取り上げられている。また、多くのSSHAC\*プロジェクトを主導し、米国でも有数のSSHAC専門家である。

断層変位に関しては、パイプラインや高速鉄道計画等の設計にPFDHAを活用し、その中心的役割を果たしている。これらの経験に基づく米国の取組みについて、以下を骨子とする講演がなされた。

- ・PFDHAには地震アプローチと変位アプローチの二つの手法がある。
- ・地震アプローチは現在の一般的な手法で、評価地点固有のデータがない場合に、周辺の地震(活断層)の特徴に基づき評価を行う。この点、PSHAと類似している。したがって、均質的なデータに基づくので(エルゴード的)、不確かさの取扱いが重要となる。評価要素としては、断層のタイプ、3次元的な幾何学形状、地表変位が生じる確率、主断層による地震のマグニチュードや変位量、副断層の主断層からの距離などである。
- ・変位アプローチは、評価地点固有の断層位置、断層タ

イブ、活動履歴、変位量などのデータに基づく手法である。このため、地震アプローチよりも不確かさを小さくできる可能性がある。評価要素としては、評価対象の断層の位置、最新の変位、1回当たりの変位量、活動履歴などである。

- ・カリフォルニアの高速鉄道計画においてはPFDHAを設計に活用している。断層通過地点近傍のみならず、ある程度の幅の中での変位を総合的に考慮して、それに基づき線路設備の敷設位置等の設計をしている。
- ・原子力施設ではないが、PFDHAの活用実績は増加している。PFDHAは、設計とリスク評価の双方に矛盾なく適用することができる。
- ・近年、信頼性のある調査データに基づく地表変位のデータベースを充実させるため、国際的な取組みも進められている。

※SSHAC(Senior Seismic Hazard Analysis Committee)：米国NUREG-2117で定められている、PSHAを行う際に、評価項目に係る知見や不確かさに関する解釈の分布や幅などを専門家による議論によって合理的、客観的に考慮していくための具体的方法のこと。

## 2. 講演

遠田晋次氏からは、リモートセンシング技術の発展により地震後の複雑な地表地震断層の分布を詳細に把握することが可能であること等を中心とした講演があった。

- ・衛星画像等を活用したリモセン技術によって見えてきた地表地震断層の分布は、従来のイメージより複雑な状況として把握されている。具体的に、2011年福島県浜通り地震や、2016年熊本地震での事例を紹介。
- ・熊本地震では、主断層(帯)やその近傍の分岐断層・副断層に加えて、やや離れた副断層や、遠方の遠地誘発変位と呼称できるものが出現した。変位センスの異なる二つの主断層(横ずれ断層と正断層)が現われ、地下深部で収れんするモデルを提案している。
- ・事前に引かれていた活断層(主断層)の近傍だけでなく、数百m～数km遠方までの範囲で変位が生じている。これらの中には、受動的な小さな変位を繰り返している非地震性のものであると考えられる。
- ・原子力施設の場合は、このような小さな変位に対しても注意深くリスクを評価していくことが必要ではないか。原子力発電所で実施している詳細な地形・地質調査に基づけば、過去の小さな変位の痕跡や活動性も相当程度把握できる。上載地層法以外に、断層面の性状から活動性を把握していく手法の開発が必要である。

久田嘉章氏からは、地表地震断層が出現した近傍での建物被害について、現地調査により得られている知見を中心に講演があった。

- ・1999年の台湾・集集地震では、断層の直上では大きな

建物や構造物の被害が生じた。近傍では、逆断層の上盤側に被害が集中し、建物の傾斜による被害が多数生じた。なお、近傍でも無被害の建物も多く見られた。

- ・2016年熊本地震でも直後に現地調査を実施。建物のスケールで見ると、事前に活断層が引かれていた位置とは異なる位置に地表地震断層が出現し、直上の建物に被害が生じた。建築時期が古い伝統的な木造家屋は大破している例がある。比較的新しい建物は倒壊を免れているが、基礎の損傷は避けられない。耐震性の優れた建物は、直上でも大きな被害が出ていない。
- ・地表地震断層の極近傍では強い地震動が出ない場合があり、断層変位による被害が断層近傍に集中する。
- ・一般建築物について、地表地震断層直上でも布基礎に比べて剛なべた基礎としたり、耐震壁を配置して剛な上部構造としたりすることにより、大被害は防ぐことができる。大規模な断層であることが明らか場合は、その近傍では断層帯の周知と重要施設の規制は有効だろう。しかし、断層の出現位置の正確な特定は困難なので、建物の耐震対策と室内の家具等の転倒・落下防止による被害低減対策が有効である。

酒井俊朗氏からは、電中研NRRCにおける断層変位PRA手法の開発に係る取組みについて講演があった。

- ・電中研NRRCでは、電力共通研究等の成果の活用も含めて、断層変位ハザード評価の高度化、断層変位に対するフラジリティ評価手法の確立(建屋、構造物、機器)により、事故シーケンス評価を含む断層変位PRA手法の開発に取り組んでいる。2016年度以降は資源エネルギー庁の公募研究を受託しており、その成果の一部を報告する。
- ・世界的に見ても断層変位PRAの経験はないので、シナリオを不用意にスクリーニングアウトしない前提で、まずは第一近似として高影響・高頻度のシナリオに着目して手法開発を進めている。
- ・2017年度までの開発に基づき、試評価として、既往文献にある断層変位ハザード評価を与条件として、仮想プラントに断層変位を生じさせる副断層を仮定して、事故シーケンス評価まで含めた一通りの評価により、炉心損傷頻度(CDF)を算定している。
- ・構造物のフラジリティ評価が保守的になっている可能性など改善すべき点が残されており、今後も断層変位に対する構造物の実験成果なども取り込んで、より現実的な評価を目指していく。

関村直人氏からは、「原子力安全に向き合う姿勢」と題して、福島事故を起こしたわが国の取組みとして、大局的な観点からの講演があった。

- ・福島事故後、IAEA等の国際的な議論は、事故調査や事故の教訓反映の段階から、次のステップに進んでい

る。

- 原子力安全の確保のため、深層防護の概念は有効である。つまり、事故影響の緩和・軽減策は、事故の防止策と同等に重要である。
- 規制要求の強化、設計基準事故に関する考え方の変化、付加的に設置した設備・機器の重要度、安全性向上に係るコストや達成時期の考え方に関する課題について、「運転経験の評価と研究の中で学ぶにつれて発展するプロセス」のことが安全であるという認識に基づき検討を進めていかねばならない。
- 自然現象に係るリスク評価では、理学的な知見、ハザード評価、フラジリティ評価、意思決定という四つのフェーズ間の流れを、不確かさの取扱いも含めて如何に繋げていくか、評価者と利用者の観点から検討することが重要なポイントである。
- 我々の知らない不確かさもある。前提条件や検討過程をより明確にしていくことの必要性が問われている。
- 優先度をつけた意思決定を行うとすると、リーダーシップとマネジメントの議論が必要となる。リーダーシップは変化への対応に必要となる。
- これらの取組みを継続していくための枠組みをどう考えるか。大切なことは原子力安全の目的を考え、共有し、継続的に改善していくということ。そして、社会に対して、説明だけでなく、共感を呼び、顔の見える関係づくりを、事業者も、規制側も、学会も取り組んで、役割を果たしていくことが必要である。

#### IV. パネルディスカッション「リスク評価への期待と課題」

パネルディスカッションは「リスク評価への期待と課題」と題して、断層変位問題にリスク論を導入する利点、リスク評価を行う際の課題の特定、リスク論的アプローチの実装の三つの論点を設定して議論を行った(図1)。各論ごとの主な議論を以下に記す。

なお、パネルディスカッションをより建設的なものにするため、表2を共通認識として確認した後、議論を進めた。



図1 パネルディスカッションの様子

表2 パネルディスカッションにおける共通認識

リスク	事象の発生確率と、事象が発生した時の影響(被害量など)の組合せ
リスク評価	上記を評価すること。 リスク評価により、以下が明らかになる。 ①どのような望ましくないことが起こり得るか?(現象把握) ②その発生可能性はどれほどか?(発生頻度) ③その影響はどのぐらいか?(事故シナシス、炉心損傷、プラント外への放射性物質の放出など)
上記を踏まえ、本パネルディスカッションでは、リスク評価とは確率的リスク評価(PRA)を指す。	

#### 1. 断層変位問題にリスク論を導入する利点

- 「導入する利点」という問い掛けに対して、むしろ「必須」であると考え。例えば、決定論的判断による活断層の認定で、約12万～13万年前以降の活動がないから活断層ではないとすると、ゼロリスクになる。認定基準をどこにおいても同じこと。決定論でやる限りゼロリスク問題は避け難いので、それは想定外を生む。
- 断層変位に限らず、あらゆる事象に対して事業者が意思決定をするときに使えるリソースには限りがあるので、客観的、定量的な評価により優先順位をつけて速やかに実施していくためには、定量的なリスク評価は必須である。
- PRAによって、プラントシステムの統合された挙動というものを理解できる。安全へのインパクトは、ハザードとプラントの能力の組合せによる。これに対して、PRAにより多くの洞察が得られる。
- 過去においては決定論のみを使ってきて、よい結果は得られていた。しかし、米国でもTMI事故を経験し、リスク評価の重要性を考えた。例えば、大規模LOCAに焦点を当てていたが、PRAによって、他の事象を考慮する必要性が理解された。追加の洞察がたくさん得られ、リスク管理もより良い形でできる。
- 原子力発電所は様々な場所に立地されているので、それぞれのリスクが異なることを前提に考えないといけない。地震や津波など自然現象に係るリスクは場所によって異なる。また、設計も異なるし、更に事業者の文化によって、例えば、ヒューマンエラーが起こる確率は変わってくる。したがって、同じ判断基準ではなく、状況に応じた評価手法を開発し、リスク情報を活用した対応を進めていくことは必須である。
- Chokshi氏のスライドに耐震設計と地震PRAの比較が分かり易く整理されていて(表3)、地震PRAの利点として、プラントシステムトータルで考えること、ハザードは非常に小さな地震動から大きな地震動まで全領域を扱うこと、自然現象に係るばらつきなど最新の知見を絶えず入れること、設計基準を超えた地震動

表3 決定論的耐震設計と地震 PRA の比較

決定論的耐震設計	地震 PRA
個々の構造物、系統、設備に適切な余裕を確保	設計、運転そして実機の条件を考慮した統合システムとしてプラント性能を評価
固定した唯一のレベルの設計用地震外力を使用	地震ハザードの全領域にわたって統合化したプラント性能を評価
不確かさは保守的な取扱いや安全率を用いて暗に考慮される	知り得る不確かさは明示的に考慮され、結果に表現される
地震発生事象の発生頻度は、設計基準設定には考慮されない	様々な大きさの地震の発生事象の発生頻度は、方法論の主要な部分である
事故発生を防止することが焦点	事故発生防止と事故発生の軽減策の有効性を評価することが焦点

(Chokshi 氏講演スライドを和訳)

に対して事故防止だけでなく影響緩和策までを評価できることなどが挙げられる。

- ・リスク評価によって、どこにどれだけ投資すればどれだけリスクを減らせるのか、不確かさはあるにしても数値で出せることは重要。また、被害が出るというリスクを許容して、そのための対策も考えなければいけないというところまでの発想になることは重要。
- ・福島事故前に PSA (Probabilistic Safety Assessment) という言い方をしていたが、PSA では例えば CDF を算定してある数値以下であればもうよいというような捉え方があり、一方 PRA は、リスク要素を見つけて、継続的に安全性の向上に繋げていくというところが違う。
- ・原子力発電所を利用するかどうかは誰が決めるのか。事業者、規制側だけではなくて、国民にどう考えてもらえるかが重要。例えば、リスクと安全という言葉の違いも考えていく必要がある。「リスク目標」とは言わずに「安全目標」と我々は使う。安全という観点で取り残されていることは何か。そこが、PRA を使っていくプロセスの中で繋がってくる。安全神話の復活を許さないというのは極めて重要なこと。

## 2. リスク評価を行う際の課題の特定

- ・ハザード評価に関しては、自然現象なので、断層が持つ本質的な挙動の不確かさがある。それを確率で評価するというのは非常に重要だが、注意しないといけないのは、正規分布のように不確かさを適度にばらしてやればよいのかということ。確率で表すとそこで思考が停止してしまう。東北地方太平洋沖地震はある意味、外れ値で全く予期しないものだった。しかし、これを如何に扱うか、本質はそちらにあって、そこを考えて研究するのがサイエンスの立場。単に正規分布で表すのではなくて、ロジックツリーを増やす努力をするような視点が重要である。
- ・決定論的なアプローチというのは、ある種バイアスの掛かった評価になる。例えば、保守的な方向のバイア

スに偏る傾向が強い。しかし、リスク評価としてはバイアスの掛からない評価が必要で、かつ、不確かさも評価する。確率論的なハザード評価により、できるだけ注意深く定量化していくしかない。不確かさを定量化するためのツールも生まれてきている。

- ・ハザードは新たな知見によって変化する。定期的に再評価することが必要。安全に係る意思決定をしようとしているのだから、迅速に評価を行う。その際、PRA は追加の洞察を与えてくれる。
- ・日本では定期安全レビューの枠組みの中でやっていたがうまく機能しなかった。それが新規基準では安全性向上評価制度として義務化され、自然ハザードに起因することも含めて評価をする要求になった。これがどのように実行されていくのか、学会としてもきちんとウォッチしていく役割がある。
- ・ハザード側の難しさに比較して、フラジリティ側は事前にしっかり備えておくための準備ができる。
- ・講演で紹介のあった断層変位に対するフラジリティ評価は、実際の耐力はもっとあると考えられる。実験なども含めて、更に精度を上げて現実的な評価にしていけることが必要。それによって、ハザード側が変わった場合にも対応できるようにしておくことが重要。
- ・ハザード評価側の責任は重い。例えば日本では地表地震断層が出現する地震は6~7年に1回程度で、非常に稀な現象。熊本地震では色々なデータが得られたが、データの蓄積には非常に時間が掛かる。一方、国際的なデータを集めてくるやり方もあるが、一般化されて、地域性が消されてしまう。副断層をどう評価するかも少しずつ知識は増えているが、熊本地震のように新しいことが起きることによって逆に分からないことも増えてくる。ただ、何らかの答えを出すためには、現時点での評価で出すしかない。
- ・幅広いデータベースを構築していく取組みは重要であるが、評価サイトでできるだけデータを集めることが重要。それをベースにして、物理の法則や経験則も使って、個々の発電所ベースのアプローチが必要。

## 3. リスク論的アプローチの実装

- ・米国において PRA は、ROP (Reactor Oversight Process) など多くの分野で使われている。適用範囲はオープンである。PRA の質などで制約があるかも知れないが、本質的な課題はないだろう。
- ・我々が備えないといけないのは、過去のデータから出てくるリスクに対してではなくて、将来のリスクに備えるということ。それをきちんと提示しなければ、とても国民が納得できるようなものにはならない。
- ・データが必要というのはそのとおりだが、データをとっていく計画を立て、データがどこで必要かということも分かる人材を育てていかないと研究も繋がらな

い。課題を理解する人が課題を設定して、予算・人員をしっかりと配置して、これをどうやってまとめてアウトプットしていくか。そして、批判的な方々も含めて議論する必要がある。電中研 NRRC でも取り組んでいることで、その仕組みを回していくということが極めて重要。迅速性という問題についても十分に認識することが必要。

- ・データが揃うまで安全対策の検討をしないというような考え方が出てくると、福島事故前と同じ考え方で極めて危険である。事故から7年経って、そのような考え方がそろそろ出始めているのではないかと敏感に感じ、学会でのこのようなシンポジウムの議論の場も通じてきちんと発信していくことが重要なポイントである。

## V. まとめ

本シンポジウムでは原子力発電所に対する断層変位に関わるリスク評価を主たる技術テーマとした。講演やパネルディスカッションを通じて、断層変位に限らず、あらためてPRAを含めたリスク評価や深層防護の概念の適用の重要性、福島事故を経験したわが国の原子力安全に取り組む姿勢など、幅広い観点から有意義で建設的な議論を交わすことができた。

また、リスク評価の経験で先んじている米国からの二人の専門家の知見は、わが国関係者にとって大いに参考

表4 リスク評価のねらい

地震・断層変位を受ける原子力発電所のリスクを計量し、社会が受容できる水準と照らして、発電所を利用するかどうかの意思決定を行うため。

- ・定性的目標から定量的目標へのより高い議論へ(安全かどうかでなくて、どれくらい安全か?)
- ・細分化され全体像が見えにくい状態の回避(トータルシステム)
- ・プラントの総合的挙動評価(ロバスト性確保)
- ・分野を超えた安全確保の思想の一貫性の確保(トータルプロセス)
- ・異分野連携のツールとして、工学的説明性の向上
- ・「絶対安全論至上主義」から生じる様々な不条理の解消
- ・科学技術と社会との接点をつなぐ役割として(リスクコミュニケーション)

にすべきものがあったと考える。

パネルディスカッションにおいては、座長として表4のような整理を行い、一定の共通理解とした。

断層変位に対するリスク評価に関しては、各学協会や原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会の検討成果<sup>1~3)</sup>、電中研 NRRC をはじめとした産業界等の研究開発成果が得られてきている。福島事故後に策定された規制基準やこれらの検討結果を踏まえながら、現在、原子力学会標準委員会において、断層変位PRA実施基準策定に向けた検討が進められている。

断層変位に対するリスクも含め、分野横断で知見を集約し、リスクを評価して原子力安全に関わる意思決定に繋げていくための取組みが引き続き求められている。

## — 参考資料 —

- 1) 原子力安全推進協会敷地内断層評価手法検討委員会，原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書，2013年9月。
- 2) 土木学会原子力土木委員会，断層変位評価小委員会研究報告書，2015年7月。
- 3) 日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会，断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会報告書，2017年3月。

## 著者紹介



高田毅士 (たかだ・つよし)

東京大学  
(専門分野/関心分野)耐震工学, 信頼性工学, 確率論的リスク評価, リスクコミュニケーション



糸井達哉 (いとい・たつや)

東京大学  
(専門分野/関心分野)地震工学, レジリエンス工学

## 1F 汚染水処理二次廃棄物ガラス固化体の浅地中処分の 安全性評価

原子力安全研究協会 原 啓二, 雨宮 清  
キュリオン ジャパン 安部田 貞昭

福島第一原子力発電所(1F)では汚染水の処理に伴って様々な放射性廃棄物(汚染水処理二次廃棄物)が発生しており, 現在, これらの放射能インベントリ等の調査や処理処分技術の検討が進められている。汚染水処理に使用されたゼオライト系メディアは放射性廃棄物であるが, 化学成分としてはガラス形成材である  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  等で構成されている。これらの成分を他の汚染水処理二次廃棄物をガラス固化処理するための原料として利用することにより, 新たな資材の利用を最小限に抑えた合理的な廃棄物処理が可能となる。筆者らは, 汚染水処理二次廃棄物の処理にガラス固化技術を適用することを前提として, 固化体の核種閉じ込め性能が期待できるガラス固化体を浅地中ピット処分した場合の安全性について評価検討を行った。

**KEYWORDS:** 1F waste, Vitrification, Near surface disposal, Safety assessment, Leaching model

### I. はじめに

福島第一原子力発電所(以下, 1F という)では現在, 汚染水処理二次廃棄物と瓦礫・伐採木等の放射性廃棄物が発生している。また今後, デブリ取り出し作業に伴い大量の解体廃棄物が発生する。これらの廃棄物は多様な性状にあるため, その性状に応じて分類し, 適切な減容および固化技術を選定する必要がある。

廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議(平成 29.9.26)は「福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」において, 2021 年頃には処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見通しをたてる目標を示した。

これを受け, 日本原子力研究開発機構は 1F で発生する放射性廃棄物の処理に向けた「減容・固化技術カタログ」を整備した<sup>1)</sup>。ここでは, 実規模での開発実績が確認されている技術について, その原理, 処理能力, 固化体性状等の適用性評価に必要な項目がまとめられている。

すなわち, 汚染水処理二次廃棄物を想定した「粉粒体・液体廃棄物」に適用する固化技術としては, セメント混練固化, ジオポリマー固化, 水ガラス固化, アスファルト固化, プラスチック固化, ガラス固化, 溶融固化, 焼結固化, 水熱固化, HIP(Hot Isostatic Pressing)固化, お

よびペレット成形・圧縮固化の 11 技術が, そして, 瓦礫・伐採木と解体廃棄物を想定した「雑固体廃棄物」に適用する固化技術としては, モルタル充填固化およびガラス固化の 2 技術が抽出され, カタログ化された。

また, 国際廃炉研究開発機構(IRID)は, セメント混練固化, ジオポリマー固化, ガラス固化, 溶融固化, 焼結固化, およびペレット成形・圧縮固化の 6 技術について基礎試験を開始している<sup>2)</sup>。

このうちガラス固化は, 廃棄物にガラス形成材を混合して加熱・溶融し, 冷却固化する方法であり, 高レベル放射性廃液の安定化技術として開発された。ガラス固化体は水に溶けにくく化学的に安定しているため, 放射性物質や有害物質を長期間にわたり閉じ込めるのに優れた材料である。ガラス固化は産業廃棄物分野の PCB 汚染土壌といった有害廃棄物の安定化においても内外で採用されており<sup>3)</sup>, 1F で発生する多様な廃棄物に対応できると考えられる。また, 1F の汚染水処理に用いられたゼオライト系のメディアは放射性廃棄物であるが, 化学成分としてはガラス形成材やガラス修飾材となる  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  等であるため, 他の廃棄物をガラス固化する際のガラス原料として用いることができる。

本編では, このような観点から, 汚染水処理二次廃棄物にガラス固化技術を, 瓦礫類(金属, コンクリート片)にセメント充填固化を適用した場合について, 浅地中ピット処分の可能性を評価するために以下の事項について検討した結果を報告する。

・ガラス固化技術

*Safety Assessment of Near Surface Disposal of Vitrified Secondary Waste from 1F Contaminated Water Treatment* :  
Keiji Hara, Kiyoshi Amemiya, Sadaaki Abeta.

(2018 年 8 月 2 日 受理)

- ・廃棄物の物量と核種インベントリ
- ・浅地中処分施設と安全性評価

## II. ガラス固化技術の想定<sup>1)</sup>

ガラス固化技術は「溶融炉内材料の加熱方法」と「処理フロー」の違いから以下のように分類される。

「溶融炉内材料の加熱方法」による分類には、炉内の材料に電極を接触させジュール加熱を行う“直接通電加熱法”と炉外のコイルに高周波を印加しその磁界によって炉内材料に誘導電流を発生させる“高周波誘導加熱法”とがある。この二つがガラス固化の溶融方法として採用されているが、この他にも、炉内材料に電磁波を放射し高周波の電界をつくり誘電加熱を行う“マイクロ波加熱法”や廃棄物とガラス材料に粉体金属燃料を混合し点火燃焼させる方式も検討されている。

「処理フロー」からの分類には“バッチ式”と“流下式”とがある。“バッチ式”とは、起動～材料供給～溶融～冷却～固化～停止までを1サイクルとして溶融容器内で繰り返す方式である。作成したガラス固化体は溶融容器ごと、または容器から取り出して処分することが可能である。“流下式”は、溶融した廃棄物を炉から連続的に廃棄体容器に排出し、冷却・固化する方式である。

このような技術を組み合わせた固化プラントは内外で設計、試験されている。本稿では、流下プロセスの省略からシステムが単純で扱いやすく、かつ溶融容器ごと貯蔵、運搬、処分が可能である「バッチ式直接通電加熱法」によって汚染水処理二次廃棄物をガラス固化した場合を想定し、処分施設の概念検討と安全性評価を実施した。

## III. 廃棄物の物量および核種インベントリの試算

廃棄物の発生量は、東京電力ホールディングス(株)による2017.6.8時点のデータを用いた<sup>4)</sup>。各廃棄物の放射能濃度については全体をまとめたデータは報告されていないので、本検討においてはこれまで報告されているサンプル分析データや吸着塔出入口の濃度分析に基づいて放射能濃度を設定した<sup>5,6)</sup>。ガラス固化対象とする廃棄物は、汚染水処理二次廃棄物である使用済み吸着塔の内容物と廃スラッジ、スラリーとし、ガラス固化後の体積は減容率の実績を踏まえ試算した。

瓦礫のうちコンクリート片は容器内でセメント固化、金属類は圧縮後セメント固化を想定した。1Fで発生している汚染土壌の一部はガラス形成材として汚染水処理二次廃棄物と混合してガラス固化に用いるものとした。

本報告で検討対象とする廃棄物データを表1に示す。

表1 検討対象廃棄物データ

廃棄物の種類	廃棄物量(m <sup>3</sup> )(注1) 総放射能(Bq)(注1)	固化体量 (m <sup>3</sup> )	固化体重量 (ton)(注2)	放射能濃度(Bq/ton) (主要核種)
①セシウム吸着装置	1,140m <sup>3</sup> (758本) 2.5E+17Bq(Cs-137)等	230	600	4E+14(Cs-137) 8E+13(Sr-90) 4E+9(Se-79) 8E+7(I-129)
②第二セシウム吸着装置	280m <sup>3</sup> (188本) 1.5E+17Bq(Cs-137)等	60	150	1E+15(Cs-137) 1E+15(Sr-90)
③除染装置	597m <sup>3</sup> 6E+15Bq(Sr-90)等	120	310	2E+13(Sr-90) 1E+12(Cs-137)
④多核種除去装置(I)	1,030m <sup>3</sup> (361本) 1E+15Bq(Sr-90)	210	540	2E+12(Sr-90)
⑤多核種除去装置(C)	5,900m <sup>3</sup> (2072本) 6E+16Bq(Sr-90)	1,180	3,070	2E+13(Sr-90)
⑥高性能除去装置	350m <sup>3</sup> (73本+9塔) 2E+17Bq(Sr-90)等	70	180	1E+15(Sr-90)
ガラス固化対象廃棄物(注3) ①～⑥計	9,300	1,870	4,850	1.7E+14(Total) 8.0E+13(Cs-137) 9.1E+13(Sr-90) 5.0E+8(Se-79)
⑦瓦礫(金属類) セメント固化体	179,500 5E+15Bq(Cs-137)等	199,500	482,800	1E+10(Cs-137) 1E+7(Sr-90)
⑧瓦礫(コンクリート片) セメント固化体	29,400 1E+15Bq(Cs-137)等	29,400	65,300	2E+10(Cs-137) 2E+7(Sr-90)
合計①～⑧計	218,000	231,000	553,000	1.5E+12(Total) av.7.1E+11(Cs-137) av.8.0E+11(Sr-90) av.4.4E+6(Se-79) av.8.8E+4(I-129)

(注1)廃棄物量：廃棄物量が貯蔵容器の本数として報告されている場合、それぞれの容器の外形寸法<sup>7)</sup>から内容積を推定して廃棄物量(m<sup>3</sup>)を推算。総放射能：JAEA等によって報告されている各装置の入口、出口の濃度分析等に基づき推定。

(注2)以下の密度を想定し試算。ガラス固化体密度2.6g/cm<sup>3</sup>。金属類瓦礫；処理前かさ密度1.13g/cm<sup>3</sup>，減容比1/3，充填率0.3，モルタル密度2.0g/cm<sup>3</sup>，固化体密度2.42g/cm<sup>3</sup>。コンクリート片瓦礫；固化前かさ密度1.48g/cm<sup>3</sup>，隙間充填モルタル密度2.0g/cm<sup>3</sup>，固化体密度2.22g/cm<sup>3</sup>。

(注3)ガラス固化の減容率：多核種除去装置のスラリーと除染装置のスラッジの水分量が不明なため、この量を土壌とみなして一括ガラス固化すると仮定。産業廃棄物の土壌処理の実績値を参考に固化体の減容率を一律1/5に設定。

## IV. 浅地中処分施設の検討

### 1. 容器と廃棄体

ガラス固化体(汚染水処理二次廃棄物)とセメント固化体(瓦礫類)の容器の概要を図1に示す。ガラス固化体は

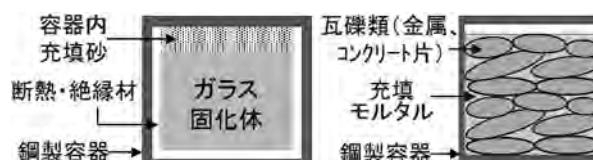


図1 廃棄体(左:ガラス固化体, 右:セメント固化体)

溶融、固化、貯蔵、輸送および廃棄の各プロセスにおいて移し替えを行わず、容器は兼用して利用されるものとする。よって容器には、遮蔽性、断熱性、ハンドリング可能性等が要求される。現時点で容器の詳細な検討は行われていないが、本報告では、遮蔽性(表面線量を2mSv/h以下に設定)から鋼材の厚さを14cmとし、その内側に断熱材として耐火煉瓦および砂を敷設する構造とした。また、セメント固化体(瓦礫類)は放射能濃度がガラス固化体に比べ4桁程度小さいため、鋼材の厚さを5cmと設定した。

ガラス固化体容器は、廃棄体のハンドリング性を考慮して、縦2.0m、横2.7m、高さ1.8mの直方体とした。ここに収容されるガラス固化体は縦1.5m、横2.3m、高さ1.0m、重量9.5tonであり、容器を含めた廃棄体の総重量は42tonとなる。セメント固化体(瓦礫類)容器は、処分場での作業効率に配慮し、ガラス固化体容器と同じ外寸とした。鋼材の厚さは5cm、容器の重量は11tonである。ここに金属類瓦礫の場合23ton、コンクリート片瓦礫の場合21tonのセメント固化体が収納される。

## 2. 人工バリアの仕様

表1のガラス固化体およびセメント固化体の放射能濃度は、現行の低レベル放射性廃棄物のトレンチ処分の濃度上限値を超え、またガラス固化体の一部核種濃度はピット処分の濃度上限値も超えるものがある。ただし、現行の発電所廃棄物に適用されている濃度上限値は、セメント固化体等を対象とした瞬時放出モデルによる算定値であり、1F廃棄物の埋設基準等は今後検討されることから、本稿では、ガラス固化体の核種閉じ込め性能を考慮し、現行の濃度上限値にこだわらず、表1のガラス固化体およびセメント固化体を全て同一のピット処分場に混合処分する場合の検討を行った。

また、濃度上限値算定モデルではコンクリートピットは飽和帯に設置されることを前提としているが、わが国は地下水位が高く、コンクリートピットは強固な岩盤に設置することを求められているため、コンクリートピットは一般的に飽和帯に設置されることになる。既存の埋設施設は、深さ約10mの岩盤上の飽和帯に設置されており、地下水の浸透を抑制するためにピット周辺に

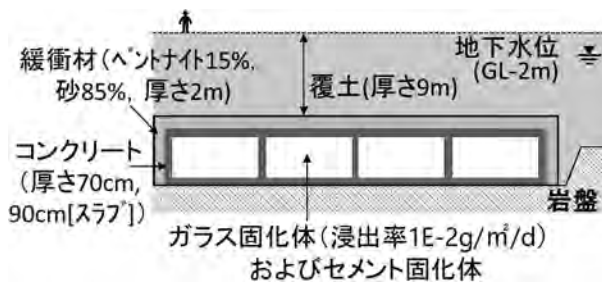


図2 人工バリア構成と仕様

は低透水性の緩衝材が敷設される設計となっている。従って、本稿においても、コンクリートピットは飽和帯に設置され、ピット周囲には同一仕様の緩衝材を設置することとし、覆土厚を9m、地下水位を保守的に2mと設定した。図2に人工バリア構成と仕様を示す。

なお、ガラス固化体の核種閉じ込め性能については、高レベル放射性廃棄物(HLW)の地層処分の核種移行評価に用いられている長期浸出モデルを参照し、そこで用いられている浸出率より一桁高い値(1E-2g/m<sup>2</sup>/d)を用いて保守的に評価することとした。

## 3. 埋設施設の仕様

処分場の規模については、表1の現在発生廃棄物から推定される最終発生見込み量(廃棄体約32万m<sup>3</sup>)を2期に分割建設するものとし、1期あたりの規模を16万m<sup>3</sup>とした。

埋設施設については、多様化の検討が行われている浅地中処分施設の設計例<sup>8)</sup>から、大型角型容器にも対応可能な形態である、側壁と覆いを先行構築する「横入れ型ピット方式」を参考にしてその概念を例示した(図3)。

ここで、廃棄体は2段積みとし、遠隔操作のフォークリフトによって搬入される。処分ピット中ではガラス固化体とセメント固化体をそれぞれの発生量に比例して均等に埋設する配置とした。ピット寸法は幅122m×奥行き85m×高さ6.2mとなる。ここにガラス固化体22体、セメント固化体2,778体が設置されその後埋設される。一つのピットに埋設される固化体は26,000m<sup>3</sup>、収納率(=固化体体積/ピット体積)は40%となる。安全性評価

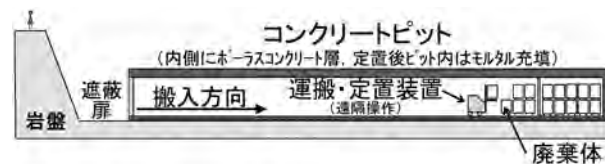


図3 横入れ型ピット方式

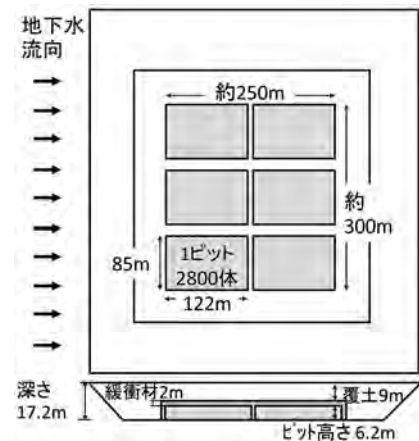


図4 安全性評価の対象とする埋設施設 (許認可単位約16万m<sup>3</sup>)



の対象は、2,800 廃棄体収納のピットを6基配置する許認可単位約16万 m<sup>3</sup>の施設とした(図4)。

V. 安全性評価

1. 評価シナリオ・モデル・パラメータ

安全性評価においては、濃度上限値算定シナリオおよび既存の安全評価事例を参照して、基本シナリオ(建設, 居住, 河川水利用)と希頻度シナリオ(井戸水摂取, 大規模掘削)を選定評価した。図5, 6に基本シナリオおよび希頻度シナリオの概念モデルとパラメータを示す。

基本シナリオでは、固化体から廃棄物層空隙水に溶出した核種は緩衝材中を移行して周辺土壌に漏出し、周辺土壌は地下水位2mまで一様に汚染されるものとし、その地表面での建設, 居住シナリオを評価した。河川水利用シナリオにおける帯水層中の核種移行は一次元移流分散モデルにより評価した。これらの線量評価は、基本的に濃度上限値算定モデルとパラメータを用いた<sup>9)</sup>。この際に、セメント固化体には、従来の瞬時放出モデルを適用したが、ガラス固化体には浸出モデルを用い、廃棄物層中の核種インベントリを下式で与えた。

$$I_2 = I_{init} \frac{\eta_1}{\eta_2 - \eta_1} \{ \exp(-\eta_1 t) - \exp(-\eta_2 t) \} \exp(-\lambda t)$$

ここで、

$I$  : 廃棄物層の核種インベントリ[Bq]

$\lambda$  : 壊変定数[a<sup>-1</sup>]

$\eta_1$  : ガラス固化体からの浸出率[a<sup>-1</sup>]

$\eta_2$  : 廃棄物層からの漏出率[a<sup>-1</sup>]

である。

大規模掘削シナリオについては、ピットが定置される硬い地盤まで掘削され、廃棄物層と周辺土壌の汚染混合土からの被ばく線量を評価した。この際、ガラス固化体は肉厚14cmの頑強な鋼製容器に入っていることから、セメント固化体の場合のように掘削による粉碎混合は考え難いことから、鋼製容器の遮蔽効果を維持したまま掘削混合土に散在するとした場合とセメント固化体のように容器共々粉碎・混合する場合についても評価を行った。

2. 評価結果

各シナリオにおける被ばく線量(μSv/y)を表2に示す。なお、基本シナリオのうち、跡地利用シナリオについては、300年の管理期間終了時点、地下水利用シナリオについてはピーク線量の出現時点、希頻度シナリオについては300年の管理期間終了時点の線量を整理した。

基本シナリオにおける最大線量を与える決定経路は混

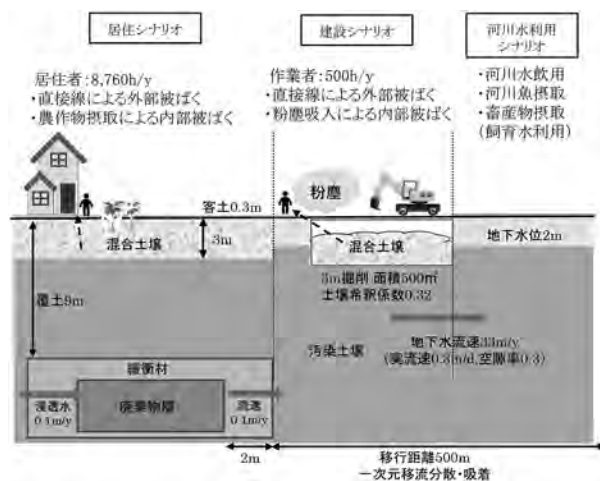


図5 基本シナリオの概念モデル

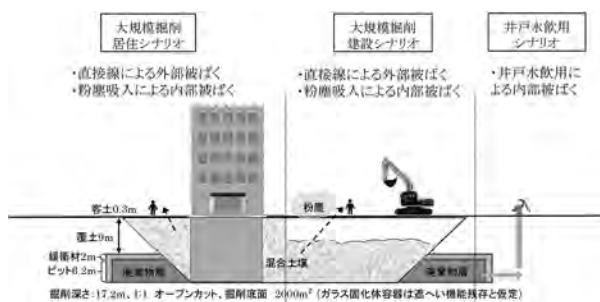


図6 希頻度シナリオの概念モデル

表2 被ばく線量評価結果のまとめ(単位 μSv/y)

シナリオ分類	形態	評価シナリオ	被ばく経路	被ばく線量		
				小計	核種毎の被ばく線量	
基本シナリオ	跡地利用	建設シナリオ	直接線	0.15	Cs-137 0.15 Sr-90 0.00	
			粉塵吸入	0.00	Cs-137 0.00 Sr-90 0.00	
		居住シナリオ	直接線	0.02	Cs-137 0.02 Sr-90 0.00	
			農作物摂取	1.10	Cs-137 0.04 Sr-90 1.06	
		河川水利用	河川水シナリオ	飲用水	0.00	Cs-137 0.00 Sr-90 0.00
				魚摂取	0.00	Cs-137 0.00 Sr-90 0.00
	畜産物摂取			0.00	Cs-137 0.00 Sr-90 0.00	
	希頻度シナリオ	井戸水利用	井戸水シナリオ	井戸水飲用	0.46	Cs-137 0.10 Sr-90 0.36

シナリオ分類	形態	評価シナリオ	被ばく経路	被ばく線量	
				容器遮蔽効果残存の場合	容器粉碎混合の場合
希頻度シナリオ	跡地利用	大規模掘削建設シナリオ	直接線	82	2800
			粉塵吸入	0.022	1.4
		大規模掘削居住シナリオ	直接線	13	460
			粉塵吸入	0.004	0.24

合土壌から農作物への経根吸収による内部被ばくであり、ガラスの核種閉じ込め効果により、被ばく線量は10 $\mu$ Sv/yを下回る結果となった。

稀頻度シナリオでは大規模掘削・建設シナリオでの混合土壌からの直接線被ばくが最大線量となり、容器の遮蔽効果が維持される場合と維持されない場合のいずれについても10mSv/yを下回る計算結果となった。

## VI. まとめ

1Fで発生する放射性廃棄物のうち、汚染水処理二次廃棄物をガラス固化、瓦礫類をセメント固化した場合を想定し、廃棄体物量と核種インベントリを試算した。これらを大型の角型容器に収納し、浅地中処分を行う場合の施設形態を検討しその安全性評価を行った。

ガラス固化体の核種閉じ込め機能を考慮した浸出モデルにより評価した最大線量は10 $\mu$ Sv/y以下となった。

管理期間終了直後を想定した稀頻度シナリオにおいては、蓋然性に応じて2ケースについて評価し、いずれのケースでも大規模掘削・建設シナリオでの混合土壌からの直接線被ばくが最大線量となったが、10mSv/yを下回る計算結果となった。

以上の検討から、ガラス固化により処分システムの安全性が飛躍的に向上し、1F汚染水処理二次廃棄物ガラス固化体の浅地中ピット処分の可能性が示唆された。今後は、安全評価の頑健性を確かめるために、評価モデルと入力パラメータの不確実性を考慮した包括的な安全評価を行う必要がある。

### － 参考文献 －

- 1) 加藤潤, 中川明憲他, 福島第一原子力発電所の廃炉によって発生する放射性廃棄物の処理に向けた固化技術及び減容技術カタログ, JAEA-Review 2017-015, 2017.7.
- 2) IRID, 平成26年度廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄

物の処理処分に関する研究開発), 最終報告, 平成29.8.

- 3) 大栄環境 HP, <http://www.dinsgr.co.jp/geomelt/principle/>; アクセス日(2018.6.22).
- 4) 東京電力ホールディングス HP, 水処理二次廃棄物の管理状況(2017.6時点).
- 5) J. Kato, Y. Meguro, "Inventory Estimation of 137Cs in Radioactive Wastes Generated from Contaminated Water Treatment System in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", E-Journal of Advanced Maintenance, 7(2)138-144 (2015).
- 6) JAEA-Data/Code 2017-001, 東京電力福島第一原子力発電所において採取された汚染水および瓦礫塔の分析データ集.
- 7) 日本原子力学会特別専門委員会, 福島第一原子力発電所自己により発生する放射性廃棄物の処理・処分, 平成26年3月.
- 8) 電事連, 性能規定化に係る規制検討要望について, H28.10.12.
- 9) JAEA; 低レベル放射性廃棄物処分に対する濃度上限値評価コードGSA-GCL第2版, 2011.

### 著者紹介



原 啓二 (はら・けいじ)

原子力安全研究協会 処分システム安全研究所  
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処理処分研究



雨宮 清 (あめみや・きよし)

原子力安全研究協会 処分システム安全研究所  
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分技術開発



安部田貞昭 (あべた・さだひろ)

キュリオン ジャパン  
(専門分野/関心分野)軽水炉燃料開発, 放射性廃棄物処理技術開発

# 談話室

## 福島第一原発を視察して

児童文学作家 野間 美智子

「福島第一原発に行きたいんだけど」

夫にそう告げると、「別に反対しないけど、どうせ反対したって行くんでしょ？」という答えが返ってきた。

そのとき、もし反対されたらそれを言い訳にやめようと思っていたのは、実は自分の方だったのではないかと、気づかされた。

七年前のあの日からしばらく、ヒステリックな毎日を過ごしていたように思う。原子力、原発、放射線、放射能、シーベルト、ベクレル、半減期、メルトダウン、原発やくざ、原子力ムラ、御用学者、ネトウヨ、ブサヨ、プルトニウムは食べても大丈夫、ヨウ素はイソジンを飲めばいい、もう日本は終わりだ、西へ、海外へ逃げなくては……。

テレビに映されるニュース、ネット上に踊る記事はセンセーショナルで、SNSで流れてくるものはたいいデマで、冷静に、客観的に情報を見極めたいと思えば思うほど、真実は情報の中に埋もれていき、何が正しいのか見えなくなった。上にも下にも右にも左にも寄ることができず宙ぶらりんのまま、時が流れていくのをやり過ごしていた。「人は自分の信じたい物を信じる」そんな言葉を目にした途端、自分が見ていたものが信じられなくなり、電気を使う首都圏在住の人間として、どうやってこの事故に向き合って、答えを出したらいいのか、よけいにわからなくなった。

時の流れで少しは冷静になれたものの、ずっと福島第一原子力発電所のことは気にしていた。意見を持ってなくても、事故の前みたいに無関心でいたくないと思っていたからだ。しかし最近ネットの記事を探しても見つからない。七年経った今、海外の友人から、「まだ福島は危ないんでしょ？」と聞かれても、明確に答えることができない。悶々としていると、五月に参加した「福島の今を知るバスツアー」のつながりで、福島第一原発の視察についてのメールをいただいた。

迷ったが、行くことに決めた。冒頭のようにわずかな恐怖心もあったが、なにか答えを見つけれられるかもしれない。物書きとしての好奇心も背中を押した。

東京からでは朝の集合時間に間に合わないため、ツアーの参加者は全員、いわき駅周辺に前泊した。主催の澤田哲生氏を含めて十名。電力関係の方やエネルギー関係の方など、多彩な職業の方が集っていた。いわき駅から富岡駅まで常磐線に乗り、車窓から見える海岸線を眺める。抜けるような青空の下、穏やかにきらめく海面を見ていると、七年前の災害のことを忘れてしまいそうになる。乗車率も高く、大きなカバンを持った学生やクルビズの社員が目についた。列車が木戸駅付近を走るあたりで急に白いモヤが現れる。霧だった。この時期、海水の温度が下がるため、陸との温度差で発生するのだという。一瞬にして海岸線が見えなくなった。

白い車窓を見ながら、原発についての自分の考えを整理する。私は「原発を現実的にすぐ無くすことは無理なので、数を減らしつつ別のエネルギーに切り替えていくことができれば」という消極的の反対派である。しかし代替エネルギーが、市場や経済にうまくのるかは別問題だと思っている。

やがて富岡駅に到着し改札を出ると、早速、東京電力の送迎バスが停まっていた。五分ぐらいで旧福島第二原子力発電所エネルギー館に到着。ここは近い将来、廃炉のための取り組みを展示する資料館になるそうだ。身分証明書を提示し、机の上に用意された資料に目を通す。案内の方がわかりやすく説明してくれる。四号機に関しては使用済み核燃料を取り出すことができ、現状リスクはない。しかし一号機から三号機に関しては、この七年間でやっと瓦礫を取り除き、線量を低くすることができただけで、燃料取り出し作業は2023年からだという。それだけ事故の被害は甚大で、ここまでの道のりも困難だったことは想像に難くないけれど、この先に待ちうける途方もない年月と作業の難しさが改めて意識され、早くも気がふさいだ。

説明が終わると、いよいよ視察へ向かう。カバンはおろか携帯電話やカメラ、貴重品もすべて旧エネルギー館に置いていかなければならなかった。かるうじてペンとメモ帳は持ち込めるが、ポケットに入るものだけ。核物質防護上、持ち込みを制限しているためだという。最大

0.1 ミリシーベルト被曝する可能性があるとの説明は受けていた。

入退管理棟に入ると、空港のセキュリティチェックのようなゲートを通り抜ける。メタリックピンクのAPD（警報付ポケット線量計）を渡されたベストの胸ポケットに入れる。男性より女性の方が放射線に弱いのだと聞いたことがあるが、この辺りには作業服で働く女性従業員の方も居る。線量は下がってきているのだろう。

バスに乗り込み一時間ほど構内を回る。とにかく目につくのは、汚染水を入れるタンクと廃棄物の貯蔵庫だ。

置き場所がなくなれば木を切ってスペースを作り、何年も保管していかなければならない。1,000 トンのタンクも一週間から十日でいっぱいになり、900 基あるものがさらに増え続けている。2021 年 1 月までは管理が可能だが、それ以降はどう扱っていくのか決まっていないらしい。

やはり原子力発電を手放して賛成できない点がここにある。未来の子どもたちに、どうしようもできないゴミを無責任に置いていくのは気が引ける。将来、放射能を無毒化できるような薬が開発されるとか、半減期が早まる装置が発明されるとか、安全で安価な方法で放射能ゴミを捨てられるという状況にならない限り、やはり原子力発電には疑問が残る。

高台から原子炉四基の建屋外観を臨んだあと（しかし海からの霧でほとんど見えなかった）、今度は建屋を下から見るためバスは坂を下りていく。途中、津波が押し寄せたあとが線となって残っている壁や、ひしゃげた階段を見る。本当に津波の被害はすごかったのだと感じるとともに、階段をそのまま残しているのは、実は見せるための「演出」なのかもしれないと、意地の悪い見方をした。

やがて、一番線量が高いという二号機と三号機の間を通り過ぎる。突如、車内でアナウンスしていた方が、線量をカウントする。140 $\mu$ Sv/h からぐんぐん上がって、235 まで達する。その声を聞きながら私は三号機を、見



上げた。爆発によって屋根の一部が吹き飛ばされ、破壊された部分から建屋の中の空洞が見えていた。

バスでの視察を終え、2015 年に建てられた大型休憩所に入る。福島第一原発で働く方々が食事をしたり、休んだりする施設だ。事故直後、昼食はコンビニのおにぎりや菓子パンを食べるしかなかったため、この休憩所ができてから労働環境はぐっと良くなったらしい。しかも日本唯一の「靴下でしか入れないコンビニ」もある！

（休憩所内が土足厳禁だからなのだが）

食堂でのメニューは定食二種、丼、カレー、麺の中から選ぶことができる。これらの食事は、帰宅困難地域になっている大熊町の除染した地域に給食センターを建て、そこから昼食だけで 2,000 食、ここまで運んできているという。お米は 100 パーセント地元の広野産、野菜は福島県内、豚や魚はいわきや小名浜の物を使用。全体の三分の一強が県内産、地産地消とのことだ。

その日は蒸し暑かったため、第一原発での午後の作業は中止になるだろうと聞かされた。私は近くに居た東京電力の社員の方に「ふだん、作業員の方は何時から何時まで働くのですか？」と尋ねる。

するとその社員は「え？ 決まってないです」と怪訝な



顔をやる。話を聞くと、作業によって会社の管轄が異なり、下請け会社によって作業内容も就業時間も違う、とのことだった。

私は合点がいくと同時に、東京電力は下請けの現場についてどこまで関知しているのか、と訝った。作業員の労働条件について、東京電力はどう考えているのだろうか？ 下請けや孫請け、ひどいと六次請けまでであると噂のある作業受注システム。元請けである会社は下請けに丸投げし、以降は知らんぷり、というのは、どこの業界にもあることだけれど。三十年、四十年と続く廃炉作業において、出生率減少に伴う人員不足も想定される中で、果たしてそのシステムで今後もうまく行くのだろうか？ 除染をして地域に償いをしていくのはもちろん、事故の責任を取る、ということは、福島第一原子力発電所で働くすべての人に対しても責任をもつことなのではないだろうか？ 既にそのような取り組みが始まっていることを、信じたいと思う。

今回行って良かったことは、細い糸のようではあるものの、暗闇の中に希望の光が見えるな、と思えたことだった。ここまで取り組んできた作業員の方々や地域の方々には、脳天気な電気を消費してきた者として本当に頭の下がる思いだ。ただ一方で、この視察プログラムに関しては、「しっかりやっています」という対外的なパフォーマンスに見える部分もいくつかあった。また廃棄物の問題においては自然を切り崩して保管場所を作らなくてはならないことに、暗澹たる思いがした。

年間の福島第一原発の廃炉にかかる予算が2,400億円だと聞く。東京電力の社員の方は「捻出し払い続けていく」とおっしゃっていたが、それはつまり電気料金、もしくは公的資金という名目の税金として私たちにのしかかってくるのだろう。別にそれはいい。起こってしまった事故は仕方のないことだし、電気を使う私たちにも責任がないとは言えないから。しかし、リスク・ベネフィットの論理で考えるならば、原子力エネルギーを持ち続けることや開発していくことが、本当にベネフィットになるのか、一人ひとり、じっくり考える必要はあると思った。

ちなみに私は——明確な答えを見つけることはできなかった。七年前の問いに、これからも、しばらくそのまま向き合い続けることになるのだろう。

帰路、疲れに目を閉じると、視察中のバス車内から目にした三号機の建屋が思い出された。爆発で鉄骨が剥き出しになり、外壁が崩れている。まるで、深傷を負った巨獣のようだった。四十年あまり休みなく働き続け、最後には忌み嫌われるようにして役目を終えていく。現代の、冥王ハデス。悪神として描かれることも多いが、すべてを受け入れる神としても信仰され、感情豊かな側面も持つ、二面性のある神。彼は今なにを思い、傷ついた姿をさらすのか。職業作家のいらぬ感傷だと思いながらも、私はしばらく、言葉にできない痛みを感じていた。

(2018年8月31日記)

# 談話室

## リケジョの思い(2) ラボコーヒー

研究室からコーヒーの香りがする。コボコボという音が聞こえる。所属研究室には、コーヒーメーカーがある。お代は研究室内のコーヒー好きで等分している。コーヒーメーカーのレンタル代、コーヒーの粉代を合わせてひと月、一人あたり900円ほど。月に一度、業者の人から研究室に電話をくれる。「はい、統計物理学研究室です」「お世話になっております、〇〇です。明日、宅配に伺おうと思うのですが、よろしくお願ひします。」次の日、10階にある研究室まで宅配に来てくれるのである。

宅配の管理は私たち学部4年生の仕事である。届いた箱を真顔で開けながら、私は内心喜んでいる。「また小

樽ブレンドか。誰が決めたの」と同期。「誰だろうね。たまには変えたらいいよね。」「このブレンドはどんな味なんだろうね。」私はコーヒーが好きである。しかしカフェインに弱く、せいぜい1週間に1杯か2杯しか飲めない。するとコーヒーの値段は一杯100円から200円くらいになる。自動販売機では80円で買えることを思えば、研究室のコーヒーは割高になる。

そろそろコーヒーがたまってきた。いただこうかな。コーヒーメーカーは先輩方の席に近いところであって、コーヒーをとり席を立つと、先輩の手元が見える。そのときに先輩に話しかけてみる。「おつかれさまです」「おつかれ。解析がうまくいかない」「そうなんですか」

「積分がちょっとね」「へえ…」「いま何の勉強をしているの。」「カオスのこの教科書を読んでいるの。」「ああ、これかあ」と先輩。「読んだことがあるな。数学の言葉がたくさん出てくるから、そっちをちゃんとやらないと、きちんとはわからないんだよね。なんとなくの理解でいいなら、数学はとりあえず飛ばしてもいいんだけど。」「そうですね…」「ところでN君、研究はどうなってるの。」「ひと段落です。」「ひと段落って言うのは…」さっきまでキーボードの音がしていた研究室に、コーヒーの香りがして、学生たちがなんとなく集合する。私はこの平和な時間がとても好きである。

話が終わると先輩方も席に戻り、それぞれの活動を再開する。目の前には確率論のテキストがある。ペンをとる。コーヒーがなくても先輩に話しかけたり、議論を吹っ掛けたりできるようにならないと。平和にしているだけではだめだよなあ…。コーヒーメーカーは相変わらずコボコボ言っている。なんだかくやしい。もう少し、頑張るか。

### 著者紹介

口町和香 (くちまち・わか)

北海道大学理学部物理学科。統計物理学を勉強しつつ、科学コミュニケーションを手掛けています。



## 未来の選択

青山学院大学 岸田 一隆

小説やドラマや映画などでは、陰謀論が人気です。この世界は特定の人物や集団が牛耳っていて、彼らが全てを決定しているというものです。フィクションだけでなく、現実社会も実際にそうなっていると思っている人は意外に多いかもしれません。確かに、影響力のある人物や集団は存在するでしょう。しかし、その影響力は一般に、一部の領域や一部の期間にかぎられていることが普通です。

支配や関与にはコストがかかるため、現代の支配層は「関与からの離脱」を図り、既得権の確保のみに力を注いでいると指摘しているのは、社会学者のジグムント・バウマンです。もし、その通りだとすると、私たちの長期的な未来への舵取りをしている人は、どこにもいないこととなります。

たとえば、日本について詳しく見てみましょう。政治家はどうでしょうか。「国家百年の計」というぐらいですから、国政を預かる人たちが長期的な視野に立って、国を運営しているのではないのでしょうか。ですが、政治家には選挙があります。それゆえ、彼らの身分は、選挙と選挙の間という短期間しか保証されていない不安定なものです。実際に、政治家自身から「我々はどうしても短期的に考えて、その利益を有権者に訴える傾向がある」と告白されたことがありました。

では、官僚はどうでしょうか。政権が変わっても、政策に多少の変更があっても、省庁が継続性を保っていれば、国の行方の長期的な舵取りに安定性がもたらされるのではないのでしょうか。これは、ある程度はそうかもしれません。しかし、最も大きな問題は、彼らは1年や2年といった短い期間で、ポストが変わってしまうことです。省内の様々な仕事を経験するため、などの理由はあるのですが、本腰を入れた仕事をして、プロジェクトの長期的な責任を担うには、あまりに短い期間です。

民間企業はどうでしょうか。企業は利益を出すことで持続可能となりますから、世界全体のことに責任を持つのは無理でも、自分たちの業界や関連産業のことに長期的な視点が必要なのではないのでしょうか。これは、本来はそうでした。ですが、現在の日本では民間企業に余裕がありません。昔に比べ、株主の力も強くなっています。四半期決算といった、短い期間での収支も厳しく問

われます。「世界の長期的な未来をより良くするために、本社はこれから十年間赤字を出し続ける」と発表すれば、株主総会は騒然とした雰囲気になるでしょう。

では、一般市民はどうでしょうか。市民は毎日の暮らしに忙しく、長期的な絵を描くなどといった時間的な余裕はありません。それに、そうした長期的な計画を立てたとしても、それを実現に移すすべがありません。考えるだけ無駄だと感じます。

ですが、「考える」ということに、それほどのコストがかかるわけではありません。時間的にも、ほんの少しでもよいのです。もし、一般市民が長期的な視野を持って世の中を眺め、長期的な意味でより良い選択を支持したら、世界はどう変わるのでしょうか。

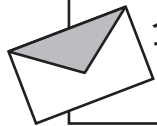
市民の視点が変われば、「長期的な視野を持った候補者」の当選確率が上がりますし、政治家は世論に影響されます。必然的に、彼らは長期的な視野に立った政策を訴えるようになります。官庁の長期的なプロジェクトも同じです。市民の支持を得て期待されている計画は、官僚のポストが次の人へと交代しても、着実に継続されるでしょう。民間企業もそうです。市民が長期的な意味でより良い商品、より良いサービスを選択すれば、企業はそのような商品・サービスを生み出すために努力をし、それが利益につながります。そして他方、政治家・官僚・企業の方も、新しい政策・ライフスタイル・商品を提案することによって、市民に新たな気づきを与えることができます。互いに影響を与え合う、このような関係を「共進化」と呼びます。

うまく「共進化」の関係が働けば、私たちの未来はより良い方向へ選択できるでしょう。それには、第一段階としての「市民の成熟」が必要となります。たとえば、「エネルギーの選択」です。これは、エネルギーのことだけを考えればすむ問題ではありません。文明全体を見据え、私たちがどんなライフスタイルを選択するか、ということです。考えるためには、市民に豊かなりベラルアーツが必要となります。

すなわち、「科学コミュニケーション」や「若者たちへの教育」が、未来を創る上で決定的な役割を果たすと、私は確信しています。

(2018年9月14日記)

# 理事会だより



## 企画委員会：2018年秋の大会 理事会セッションから

### 1. 企画委員会の活動

企画委員会は、現在20名の委員から成り、原子力学会のなかでも大所帯な委員会の一つになっている。本会の理念・ビジョンを具現化するための計画立案を担うという重いミッションのため、正副委員長、幹事の3役は学会理事が就任し、会員からの10名の委員に加えて、各担当理事が特別委員として7名参画している。毎月の委員会と、企画内容によってはタスクグループを作り少人数での検討を進めている。主な活動の一つが、専門委員会、部会などの設置・改廃であり、本会の理念に沿った内容であるかを審議し、理事会に具申し承認を得ている。活動のなかでも重要なのは、年会、秋の大会での理事会セッションの企画、運営である。

年会、秋の大会では、様々な企画があるが、理事会セッションは学会を代表する場となるため、マスメディアが取材(聴講)に入ることも多く、そのテーマは1年くらい前から議論、準備を進めている。

今年の秋の大会では、「学協会は福島復興と廃炉推進に向けてどのように貢献すべきか」をテーマとした。

### 2. 2018年秋の大会 理事会セッション

2016年5月に福島復興に関連する学協会が集い、「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」(ANFURD; 現在、36学協会が参画)が結成された。本セッションでは、上坂充前会長(東大)の座長のもと、ANFURDから以下の3つの課題に関して、論点の整理と今後の進め方について提言いただき、会場を含めて討論した。(以下、敬称略)

課題(1)放射線被ばくと健康・リスクコミュニケーション[放射線影響学会:松本秀樹(福井大),松本義久(東工大)]:100mSv以下の放射線被ばくの影響は、国際放射線防護委員会ICRPの見解でも、疫学的検出は困難とされている。つまり、生活習慣、体質の個人差の影響と区別できないレベルというのが国際的なコンセンサスになっている。福島県での県民健康調査では、甲状腺がんの診断症例数が報告されているが、日本の平均罹患率と有意差がないと評価している。一方で、生涯、自覚症状の出ない「潜在がん」を検出する過剰診断の可能性もあり、診断を受けた人の精神的負担が大きくなることにも配慮が必要と提言した。正しい情報を県民に伝え理解いただくことが重要であり、まずは医師や教師の方々への情報普及を進めたい、との方針を示した。

課題(2)トリチウム水の取扱い[水産学会:森田貴己

(中央水産研), 本会:宮原要(JAEA)]: 経産省のトリチウムタスクフォースおよび小委員会では、海洋放出を含めた5つの処理法を技術的に検討してきた。希釈して海洋放出する方法が、短期間にそして最も低コストに処理が可能であるが、水産業側の状況としては、ほぼ全ての魚種の試験操業が開始した段階にあり、風評への影響を避けたいという思いが強い。消費者の信用を得ることがより重要となる。正確なデータの提示や科学的知識の愚直な普及など、ANFURDでも今後も継続して貢献していくことを説明した。

課題(3)燃料デブリ取り出しにおける潜在的課題[腐食防食学会:鈴木俊一(東大)]: トリチウム水などが現下の課題であるが、廃炉は長い取り組みであり、これから本格化する段階である。RPV、PCVからのデブリ取出し、ベデスタルの健全性維持、取り出し時の放射性物質の環境動態など経験のない事象に対して、将来何が起こり得るかを俯瞰して技術課題を抽出していく必要がある。廃止措置が終了した姿、エンドステートを明確にした目標の設定と、リスクとその回避策の検討が重要である。社会的側面からはプロジェクトのアーカイブ化も貴重であるし、長期的な取り組みとして若手への魅力の発信や人材育成も重要であると提言した。

上記の3つの課題の発表後、本会廃炉検討委員会の宮野廣(法大)と福島特別プロジェクトの布目礼子(NUMO)から、ANFURDと協調し福島復興に貢献していく方針が説明された。

会場との討論では、正確な情報をメディアに取上げて貰えるように、学会の活動強化への期待の声があった。最後に、本会の駒野康男会長(MHINS エンジ)が、「事実には勝るものはないとの認識のもと、科学的、客観的な事実を各学協会と連携して発信していく」としてセッションを締めくくった。

### 3. セッションの反響と今後の企画活動

学会セッション当日の夕方には共同通信社から配信があり、10を越える各紙がそれをWEB版等に掲載した。会場を聴講した福島民報ほか数紙はさらに詳しく報じた。

企画委員会では、来春の年会の理事会セッション(防災テーマを検討中)と、来年2月14日に創立60周年を迎える本会のマイルストーンとして学術シンポジウムの開催(来年4月予定)を企画検討中です。会員各位の多数の参加とご協力をお願いします。

(企画委員長 理事 西野由高)