

### 巻頭言

#### 1 コロナウイルスへの既視感

神里達博

### 時論

#### 2 ドイツの再エネ欺瞞はどこまで続けられるか？

小野章昌

#### 4 共同通信記事「安全対策・維持・廃炉に13兆円」から見たこと

金氏 顯

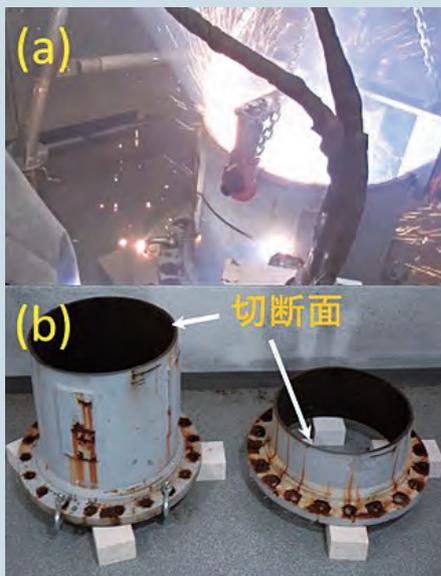
#### 6 環境への行動として、地層処分に向き合う

鈴木早苗

#### 22 レーザー法による原子炉厚板鋼材切断技術の開発

レーザー法による切断技術は制御性が高く、遠隔技術と組み合わせれば原子力施設の廃止措置適用への有望な選択肢となりうる。ここではこれまで難しかった厚板鋼材を切断する最新成果を紹介する。

田村浩司, 遠山伸一



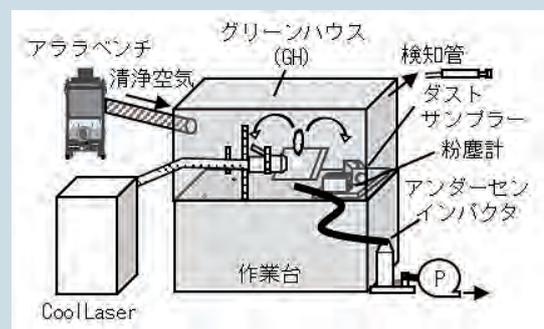
配管切断の様子 (a) と結果 (b)

### 特集 レーザーの特徴を利用した研究開発

#### 13 kW級CWレーザーを用いた表面クリーニング技術の開発と除染適用の試み

kW級CW（連続波）レーザー光の高速スキャンによる、廃止措置の放射能除染技術（レーザー除染）の研究開発を紹介する。

藤田和久ほか

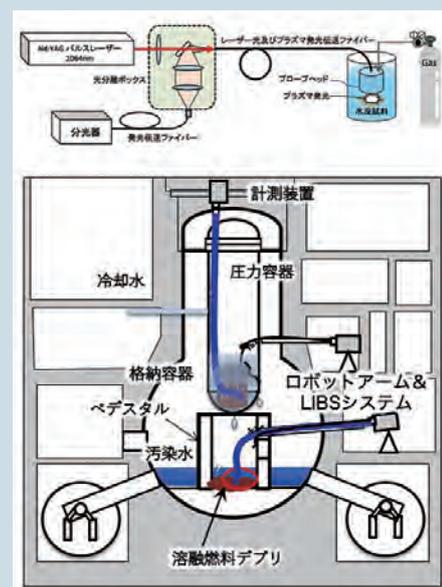


レーザー照射による発生粉塵・ガスの測定

#### 17 過酷環境下での遠隔レーザー分析技術

1F炉内の燃料デブリ性状を遠隔で分析し把握するために、レーザー光とプラズマ発光を耐放射線性光ファイバーで長距離伝送するレーザー誘起ブレイクダウン分光法の技術開発を進めている。

大場弘則, 若井田育夫, 平等拓範



光ファイバー伝送 LIBS の概念及び事故炉への適用概念

## 31 Column

「核のごみ」の最終処分に関する  
対話型全国説明会

「困るのは未来の人？」

「高校2年生になった今の私の問題意識」

「プラハ共産主義博物館を訪れて」

「私にとっての復興」

「福島復興に責任をとる」ということ

井内千穂

上野和花

小澤杏子

妹尾優希

服部杏菜

服部美咲

## 解説

### 26 集団思考 (groupthink) とは何か —複合集団における集団思考の可能性

1F事故の背景には、原子力関係者の集団思考があったとの指摘がある。集団思考とはどのようなものか。それはどうすれば防げるのか。

松井亮太

## 報告

### 44 廃炉国際ワークショップ (FDR2019) 報告—福島発 未踏領域への挑戦を 目指して

1F廃炉に特化した初の国際ワークショップを、Jヴィレッジで開催した。

FDR2019 組織委員会



## 視点 社会を語る (9)

### 48 学生にとって、社会調査の魅力 とは何か

斎藤圭介

## 理事会だより

### 49 ダイバーシティの推進について

藤澤義隆

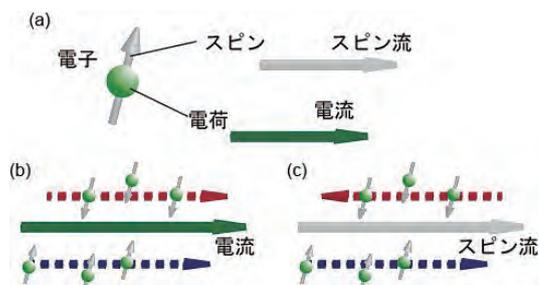
## 解説シリーズ

### 最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構 (3)

### 34 原子科学の最先端を拓く

1F事故対応では、燃料デブリと闘う未知の領域への挑戦が待っている。安全性の向上や廃棄物問題の解決も必須だ。さらに放射線利用にはイノベーションを誘起する先端技術も求められる。

R・オランダディ ほか



電子の持つ電荷スピンとその流れ

## 連載講座 基礎から分かる未臨界 (8 / 最終回)

### 39 未臨界実験が何に役立つのか

原子炉を臨界にする臨界実験と未臨界度での実験とは本質的に異なる。未臨界実験を活用し原子炉物理や臨界安全にどのように役立つのかについて述べる。

山本俊弘

## 日々是好日—福島浜通りだより (12 / 最終回)

### 47 こころ戻り、歩みだす

吉川彰浩

- 8 News 各機関提供国内、海外情報
- 50 会告 2020年度新役員候補者投票のお願い
- 52 日本原子力学会「2020年秋の大会」発表および参加申込受付のご案内
- 54 会報 原子力関係会議案内、人事公募、共催行事、英文論文誌 (Vol.57, No.5) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧
- 後付 第52回 (2019年度) 日本原子力学会賞受賞概要

# コロナウイルスへの既視感



千葉大学国際教養学部教授

神里 達博 (かみさと・たつひろ)

東京大学大学院総合文化研究科博士課程満期退学。旧科学技術庁、科学技術振興機構社会技術研究開発センター、東大特任准教授などを経て現職。専門は科学史、科学技術社会論。著書は『ブロックチェーンという世界革命』、『食品リスク』など。

新型コロナウイルスが五大陸に広がり、世界中が混乱している。

この疾病の難しさを一言でいうならば、色々な意味での「すき間」に落ち込んでいるという点にあるかもしれない。

たとえば、エボラ出血熱のように致死率が高い病原体は恐ろしいが、患者はすぐに動けなくなることが多いので、病気が遠くに広まるリスクは低い。一方、風邪のように、感染しても症状が軽いと、あちこちに動き回るので感染が広がりやすい。

SARS-CoV-2の厄介な点は、エボラと風邪の「間」くらいの性質であることだ。潜伏期間がやや長く、また多くは風邪のように症状が軽いので、無自覚にウイルスを広げてしまう。だが、ご承知の通り、高齢者や特定の基礎疾患がある方にとってはハイリスクだ。風邪に似た広がり方をして、実際、症状もとてもよく似ているのに、場合によっては重篤になり、命を奪うこともある。しかも今のところ手間のかかる「PCR」という技術を使わないと検査ができない。まさに「見えない敵」である。

また、このコロナウイルスの仲間は変異しやすく、免疫がつきにくいので、ワクチンを作るのも難しい。風邪に何度もかかるのはそういう理由だ。

そもそも、風邪の研究はこれまで、医学の世界では軽視されてきた。研究者はより深刻な病気に関心を持つ。また、一般に、製薬会社は急性疾患の薬の開発には、十分な投資をしづらいと言われる。慢性疾患の方が長期的に薬を消費するので、販売総額が大きくなるからだだろう。2003年のSARS流行などで、状況は少し変わってきたものの、感染症に向き合う体制の総体としての不足が、今回の感染拡大に影響しているかもしれない。

このように、さまざまな意味での「すき間」に入り込んでしまっているこの病への対処は、誰がやっても非常に難しいだろう。諸事情から「手が届きにくい」ため、専門家も必ずしも確信をもって対処できない。実際、現実への対応となると、専門家の意見もしばしば割れている。その結果、当然、行政の判断にバラツキが生じ、そのことがまた社会に不信感を生じさせ、混乱を惹起させる。

しかし、ふと思いつくのだ。これは、9年前の「あの事故」の時とよく似ているのではないのか、と。誰がやっても難しい問題に対して、リソースもデータも少ないままに、しかし現実的に対処しなければならない課題が次々と襲ってきた。しかもオペレーションに失敗すれば、場合によっては大変な被害が生じかねない。その責任は一部の専門家や行政に集中する。社会不安が拡大し、ネットにはデマや誹謗中傷が溢れる。

もちろん、感染症の拡大と原子力災害は、大きく性格が異なる面もある。だが、リスクマネジメントに際しての、行政や専門家に対する「信頼」の問題が大きくクローズアップされたこと、そして、民主主義と専門主義の緊張や矛盾を、どう調整していくかが大問題になった、という共通点は、注目に値するのではないか。

ただし一つだけ、9年前と全く事情が違うのは、新型コロナウイルスの禍を被っているのは、日本だけではない、という点だろう。科学の手が届きにくい領域で、不確実性に満ちたリスクに対処することの難しさに、世界はこれから本格的に向き合うことになるのかもしれない。

(2020年3月4日記)



## ドイツの再エネ欺瞞はどこまで続けられるか？



小野 章昌 (おの・あきまさ)

エネルギーコンサルタント

1962年東京大学工学部鉱山学科卒，同年三井物産(株)入社，コロラド鉱山大学修士課程に短期留学。三井物産では銅・鉛・亜鉛などの資源開発とウラン開発を始めとする原子燃料サイクル事業を担務。退職後から現職。

年頭1月4日の日本経済新聞は「独，再生エネ発電が逆転，昨年46%で化石燃料を上回る」と報道した。これはフラウンホフファー研究所の速報レポートに基づくもので，2019年の再生エネ発電割合が46.1%となり，褐炭，一般炭，ガスを合わせた化石燃料の発電割合44.0%を上回ったというものである。その後続いて発表された自然エネルギー団体のアゴラ・エネルギーヴェンデ速報レポートでも再生エネ比率を42.6%とし，2月の連邦経済エネルギー省ニュースリリースでも42.2%の数字を出している。

このようにドイツは国を挙げて再生エネ拡大の報道を行い，「エネルギー変革」の政策が順調に進んでいることを国民に印象付けようとしている。しかし，上記3つの発表に共通して言えることは，割算の分母をドイツ国内の電力消費量に取っていることである。発電割合というからには分母は国内の発電量合計であろうと読者は想像するに違いない。しかし，実際はそうではない。数字の小さい国内消費量を分母に採っているのである。とりわけフラウンホフファーは人為的に小さな消費量を採っている。

もう1つは再生エネ電源で発電された電力はすべて国内で消費されるという考えで作られた数字である。ドイツでは，稼働率の低い太陽光・風力発電設備が大幅に増えたため国内では過剰発電設備が産まれていて，需要を上回る発電が避けられない実態がある。したがって輸出される多くの電力は需要を上回って発電される再生エネ電源由来のものと考えられるのに，逆に輸出されたのはもっぱら在来型電源（火力）の電力とする誠に不自然な計算が行われている。

なぜドイツではこのように偽った数字で再生エネの見せかけの姿を大きくし，エネルギー変革政策の正当性を主張しようとするのだろうか？それは逆説的ではあるが，変動電源である太陽光・風力の実力が目に見えるようになり，政策の行き詰まりが迫ってきたからと言えよう。具体的に見て行こう。

- 再生エネ発電量：2019年の再生エネ発電量は確かに増えた。しかしその多くは風力発電量の増加(前年比+14.9%)であり，とりわけ冬季に強い風が吹いたお陰と言えよう。例年通りであれば，また例年より風が弱い年であれば，逆の現象も考えられるのである。
- 電力需要の落ち込み：今一つの要因は，ドイツの産業活動の低迷と異常な高温の気象条件で暖房需要が落ち込み，電力消費量が前年比3.3%も落ち込んだことである。ドイツ方式では分母が小さくなれば再生エネ比率は増大する仕組みである。しかし今後はヒートポンプの汎用化や車両の電動化などで電力消費は増えて行くことが予想される。
- 電源稼働率の低下：2019年に褐炭・一般炭を含む石炭火力の発電割合が大幅に減少したのは排出権取引市場での炭素価格が上昇したことと，天然ガスの市場価格が下がり，ガス火力が増大(前年比+11%)したことによると報じられている。しかし火力発電の設備量が減ったわけではなく，彼らの稼働率が軒並み低い数値に押し込められた結果と言えよう(表1参照)。褐炭・一般炭火力はベースロード電源(稼働率80%程度)としての収入は得られなくなり，ガス火力もミドル電源(40~60%程度)としての収入を期待できないピーク電源並み(稼働率30%程度以下)のレベルに下がっている。すべての在来型電源がみじめな稼働率を余儀なくされていて，これからの新規建設は全く期

表1 ドイツ電源の年間稼働率

電源	発電量 (TWh)	設備量 (GW)	稼働率 (%)
原子力	75	9.5	90.1
褐炭火力	114	21.1	61.7
一般炭火力	57	23.7	36.2
ガス火力	91	30.7	33.9
太陽光	47	49.2	10.9
陸上風力	102	53.4	21.8
洋上風力	25	7.7	37.1
バイオマス	51	8.3	70.1
水力	19	4.8	45.2

出典：Agora Energiewende 2019年速報レポートの数値より筆者作成



図1 マイナス価格の発生頻度(時間数)

待できないであろう。安定供給の役割を果たしている在来型電源が消えて行けば、太陽光・風力も存在し得なくなり、将来発電事業がドイツ国内から消え去る運命に曝されていると言えよう。

- マイナス価格の発生頻度：変動電源(太陽光・風力)の設備が増えると供給過剰の時間が増えて、卸売市場(前日スポット市場)におけるマイナス価格(現金を付けて電力を引き取ってもらう)の発生頻度が増える(図1)。2019年のマイナス価格発生時間数は前年の1.6倍に増えており、マイナスの最大値は時間平均で9ユーロセント(11円)/kWhに達している。一方で電気新聞(2019年7月16日ヨーロッパ通信)によれば、ドイツでは6月中に3度にわたって需要に比べて供給力が不足する事態が生じ、急きょ電力を輸入調達したり、大口需要家に補償金を払って消費量を減らしてもらったりしたという。結果として運転予備力(予備電源からの供給)の最高価格が4,920円/kWhまで高騰したとも報じられている。このように余剰も、不足もその発生頻度が高くなり、ドイツの電力安定供給が大きな壁にぶち当たっていることが分かる。
- 一次エネルギーに占める再エネ割合はわずか14.7%：ドイツのエネルギー変革政策は主に電力分野での再エネ拡大に主眼が置かれているが、2019年の一次エネルギーに占める再エネの割合は14.7%に留まり、前年の13.8%から0.9%増えたに過ぎない。ドイツでも一次エネルギーに占める化石燃料の割合は78.2%と依然として大きく、石油とガスの割合はむしろ前年より1.4%ずつ大きな数字となっている(図2)。このようにいくら電力分野で石炭の使用量を減らしても化石

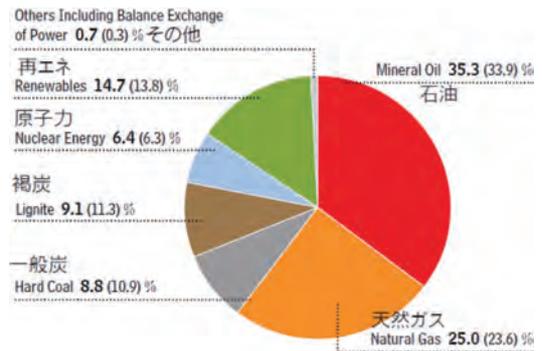


図2 ドイツの2019年一次エネルギー消費割合  
注)カッコ内は2018年数字  
出典：連邦経済エネルギー省プレスリリース8号

燃料全体の削減にはつながっておらず、CO<sub>2</sub>削減のためには産業、建築物、輸送などすべての分野でのエネルギー消費量を削減する必要があることを示している。しかし、それは現代文明社会の恩恵を受けた国民生活のレベルを一段と落とすことにつながり、一筋縄では果たせない政治的願望とも言えよう。

結論：ドイツのエネルギー変換政策は間違い：このように電力分野でいくら再エネを増やしても電力の安定供給を損なうことはあっても、CO<sub>2</sub>削減にはほとんど役立っていないことを人々は認識すべきであろう。

グレタ・トゥンベリー嬢を始めとする温暖化脅威論、そして解決策としての再エネ至上論は、ドイツの壮大な社会実験の結果を検証すれば自ずと「再エネでは解決できない問題」であることが判明するであろう。むしろ化石燃料に代わる安定供給可能な無炭素のエネルギー源(例：原子力)の開発と世界的な省エネ努力が肝要であることを人々に知ってもらう必要がある。

日本政府も、エネルギー基本計画にある「再エネを増やして原子力を極力減らす」、「再エネを経済的に自立した電源にする」という世界のポピュリズムに乗じた政策は白紙に戻し、国のエネルギー安定供給と安全保障に根ざした、真に実効性のある政策(既存原発の再稼働、新增設の必要性、新規炉の技術開発)に重点を切り替えて、併せてエネルギー技術分野におけるイノベーションの推進など国際的に胸を張ることのできる地球環境政策を押し進めるべきと考える。

(2020年2月21日)



## 共同通信記事 「安全対策・維持・廃炉に 13 兆円」から見たこと



金氏 顯 (かねうじ・あきら)

日本原子力学会フェロー、元三菱重工業 1968 年三菱重工入社、31 年間 PWR の設計、開発などに従事。取締役神戸造船所長、常務機械事業本部長、2004 年退任。2006 年シニアネットワーク連絡会設立、代表幹事。2012 年北九州市立産業技術継承センター館長。現在北九州市在住。

### 1. はじめに

西日本新聞(1/16 朝刊)に“安全対策・維持・廃炉に 13 兆円、「原発は安い」程遠く、再稼働もままならず、将来はない”，などと大きな見出しの記事<sup>1)</sup>が載っていた。“13 兆円”の根拠は、「19 原発 57 基を保有する電力 11 社の会計資料や、各社聞き取り結果を共同通信が集計したもの」と記してあった。

そこで、この“13 兆円”が発電コスト(円/kWh)のどれだけの上昇になるか、を試算してみた。その結果、確かに発電コストは 2015 年発電コスト検討小委員会の結果<sup>2)</sup>から上昇するが、他の火力発電や再生可能エネルギーのどの発電コストよりも安価であることが判明した。また、この共同通信の配信記事は全国地方紙に掲載されており、その中でも西日本新聞は他紙記事の何倍もの反原子力に偏った解説を追記していることが分かった。

西日本新聞社に意見として送り、回答も入手した。その回答や他社紙の紙面との比較などから、共同通信配信記事や地方紙の報道に関する問題点が見えた。

### 2. “13 兆円”が発電コスト(kWh/円)に及ぼす影響を試算し、見たこと

(1) 最新の原発発電コストは 2015 年発電コスト検討小委員会の結果<sup>2)</sup>10.1 円/kWh であり、これは新設なので、再稼働の場合は資本費(3.3 円)、政策経費(1.3 円)、さらに追加的安全対策費も引くと 4.5 円/kWh になる。

#### (2) “13 兆円”の検証

共同通信記事では 13 兆円の内訳を、①維持費：約 7 兆 2,033 億円、②安全対策費約 5 兆 4,044 億円、③廃炉 17 基の解体費：約 8,492 億円としている。

①まず、維持費は新基準導入前後で変わらないので、前記の 4.5 円/kWh に含まれ、発電コストの上昇要因には加えない。

②次の安全対策費は再稼働を目指す 15 基の費用であり、1 基 3,600 億円。これは各電力会社の公表値の 1 基約 2,000 億円を超えているが、テロ対策特別重大施設を含めると妥当と思われる。54 基の内廃炉が決まった

24 基を除く 30 基に安全対策費が必要とすると、15 基約 5 兆 4,000 億円の 2 倍、約 10 兆 8,000 億円になる。

③次に廃炉費用追加 17 基の合計で約 8,500 億円は 1 基 500 億円になる。しかし、廃炉費用は電気料金に含まれ積み立てており、前記の 4.5 円/kWh には廃炉費用として 718 億円/基を見込んであり、更に 500 億円も増額しなければならぬ理由は専門家に聞いたが、無い。従って、廃炉の増額はゼロとする。

なお、廃炉費用には福島第一事故機 4 基は含まれていない。

以上から、2015 年発電コストからの上昇額は再稼働可能 30 基で 10 兆 8,000 億円となる。

#### (3) 発電電力量の計算

30 基(54 基 - 24 基)、平均出力 100 万 kW、30 年間運転、稼働率 75 % とすると、発電電力量は 5.91 兆 kWh とする。

#### (4) 発電コスト増の計算

10 兆 8,000 億円を 5.91 兆 kWh で割ると、1.83 円/kWh、(1)の 4.5 円/kWh に足すと 6.33 円/kWh となる。

#### (5) 結論

再稼働原発のテロ対策特別施設などを含む安全性強化費用を考量した発電コストは 6.33 円/kWh となるが、これはどの再エネや火力発電よりも安価であることが判明した。

なお、原子力発電が最も発電コストが安いのは、1kg のウラン 235 の核分裂により、火力発電で同じ 1kg の石油や石炭による熱の約 300 万倍を発生できるという非常に優れたエネルギーだからである。

### 3. 西日本新聞社会部への意見と回答から見たこと

(意見)「(西日本新聞に上記 1 の結果を示し)、『新聞記事の「「原発は安い」程遠い」、「将来はない」などという言葉は明らかに事実誤認であると思われるので、ご回答を頂くとともに、私の検証結果が妥当であるならば、紙面にて訂正記事を掲載していただきますよう、お願いします。」

なお、運転年数は 40 年制限だが停止期間を除くべき

だし、60年運転も可能で、米国同様に80年運転も可能となると発電電力量が増えるから発電コストは益々安くなります。

また、原発を化石燃料で代替したら年間3~4兆円かかり、約11兆円は3~4年で国外流出となります。更に、毎年再エネ賦課金に3兆円払っているのです、4年で11兆円は超えます。』との意見を送った。

(西日本新聞からの回答)

『(前略)この記事は弊社の取材執筆ではありません。共同通信の配信記事を掲載したものです。もちろん、弊社には掲載した責任はありますが、記事の内容について弊社が見解を述べたり、検証したりする立場にはないというのが現実です。従って、共同通信にお問い合わせしていただくと幸いです。』との回答を入手した。

(返信)

『共同通信の配信記事であることは知っておりましたので、同社にも「お問い合わせ」欄から同じ意見を送っています。まだ回答はありません。

共同通信社配信記事の見出しは他社紙記事から見限り「原発再稼働・維持に13兆円 安全強化の新基準導入で」と事実を淡々と書いていただけと思われそうですが、御社の記事の見出しは「「原発安い」程遠く」、「再稼働もままならず」、「将来はない」、「処分先は未定」など、原子力発電を否定する言葉が踊っており、反原発を煽っています。

(中略)原子力発電は日本のエネルギー、特に電力のベースロードとして重要な位置を占めるものであり、特に九州は原子力発電4基再稼働により、電気料金の低減、電力安定供給の要になっています。批判するのは大いに結構ですが、根拠のあるしっかりした批判であって欲しいと思います。』と西日本新聞社へ返信した。

#### 4. 他新聞社の紙面との比較から見えたこと

熊本日日新聞(1/16)<sup>3)</sup>は1面に共同通信の記事を載せて解説し、2面には追加の解説記事を「巨額の内訳、詳細公表を」との見出しで、「国や電力は原発を巡る巨費の全体像をつまびらかにして、国民に議論を促すべきだ。」とメディアの使命である情報公開を迫っている。<sup>3)</sup>西日本新聞と異なり、極めて冷静かつ真面目な新聞社であることが分かる。

その後、共同通信記事は文字数約900字の記事<sup>4)</sup>であることが分かった。この記事はほぼ全国の多くの新聞社に配信され、一部の全国紙と殆どの地方紙はネットで検索する限り共同通信配信の記事の要点のみ約300字の短い記事<sup>5)</sup>であるが、前出の西日本新聞と熊本日日新聞では約2,000字の記事になっており、追加約1,100字分の

記事が共同通信配信のものなのか自社独自のものは不明だが、2紙で主張するところが大きく異なることが分かった。

#### 5. おわりに

9年前の東電福島第一事故により、原子力発電所の安全性は根本から見直しが要求され、原子力規制委員会が新規制基準を制定し、再稼働には巨額の安全対策費が必要となったので原発の経済優位性が大きく揺らいでいることは確かである。しかしながら既設の大出力の原発は、巨額の安全対策費を考慮しても、その発電コスト(円/kwh)は他のどの火力発電や再エネよりも安価であることが分かった。

また、「13兆円」という共同通信の配信記事を一部の全国紙と多くの地方紙はそのまま自社紙面に掲載したが、西日本新聞は「巨額費用」という文字だけに気を奪われて、原発の経済的優位性は無くなり将来性はないとの解説記事と見出しを掲げた。一方、熊本日日新聞は「巨額の内訳、詳細公表を」と情報公開を迫った。2紙のどちらがメディアとしての本来の姿であるか、ハッキリと見る事ができた。

一つの共同通信配信記事により、原発の経済性と原発報道におけるメディアのあり方が見えた。

最後に、巨額の安全対策費をかけても既設原発の発電コストは火力発電や再エネよりも安価であり、電力安定供給、エネルギー自給率向上にも大きく寄与するにもかかわらず、東電福島第一事故から9年が経とうとしているのに未だ9基しか再稼働していないのは大きな問題である。特に東日本、BWRの再稼働が未だ1基も実現していないのは首都圏で想定されている巨大震災時の危機管理の点で大問題だ。実にもったいない話でもあるので、廃炉を除く残り21基全ての再稼働を加速すべきである。その為には原子力規制委員会の審議加速、地元自治体の理解促進、そして何よりも政府は国家のエネルギー安全保障の要としての原子力発電の推進と技術力維持・発展への確固たる信念と果敢な実行力を発揮していただきたい。

(2020年3月6日記)

#### — 参考資料 —

- 1) 西日本新聞社 2020年1月16日朝刊。
- 2) 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告 平成27年4月。
- 3) 熊本日日新聞 2020年1月16日朝刊。
- 4) 共同通信 2020年1月15日「原発再稼働・維持に13兆円安全強化の新基準で福島事故後、電力11社集計 長期の国民負担、追加も」。
- 5) 東京新聞 2020年1月15日電子版。



## 環境への行動として、地層処分に向き合う



鈴木 早苗 (すずき・さなえ)

「原発のごみ処分を考える」事務局  
福井県地球温暖化防止活動推進員。福井県環境アドバイザー。福井市環境アドバイザー。地球温暖化防止コミュニケーター(旧 IPCC リポートコミュニケーター)。「土曜塾」塾長。(一社)さばえ文化振興事業団代表理事。

高レベル放射性廃棄物の処分問題。

この一筋縄ではいかぬ重要課題に私が取り組むようになったのは、いろいろな偶然の巡り合わせからで、最初にこの話に触れておきたい。超プライベートな事情の吐露になることを先ずもってお許し願いたい。

正に個人的な話だが、私は大阪府吹田市で生まれ育った。市内の丘陵地帯が開かれ、万国博覧会が開催されたのは1970年。会場では原子力発電による灯りが点灯して、「原子力は夢のエネルギー」と謳われるのを当時小学生だった私はなんの迷いも無く信じていた。

縁あって、福井県民になった。実は大阪に住んでいる頃、福井の原子力発電所で作られた電気を使わせていただいているという意識は微塵もなかった。福井に嫁ぐことなくそのまま大阪に住み続けていたら、おそらく放射性廃棄物の存在にすら気付くこともなかったのではと思っている。立地県で暮らすこととなった。これが妙な巡り合わせの第1号。

2番目の偶然は、もう25年ほど前になるが、フィンランドからのホームステイを受け入れたこと。私たち家族にとって、遠い北欧の国だがとても身近に感じる国となった。その後も新聞やTVのニュースで目にするように常になつてきたし、フィンランド国内の情勢に一般の方々よりは敏感であったかと思う。

たまたま我が子が義務教育を終える年に学校完全週5日制がスタートした。毎週土曜日、学校ではなく、家庭に、地域に、子どもたちが居る。この機に、地域の児童の受け皿となる活動をと思い立ち、ボランティアを始めた。環境教育をコンセプトとして小学生の参加者を集めて体験活動の場を設け、「土曜塾」と名付けた。18年経った現在も継続している。この「土曜塾」開校をきっかけに環境について自身も勉強するようになったことが巡り合わせの第3号だろう。

「土曜塾」参加者の子どもたちになにか質問されても恥ずかしい思いをしないようにという、やや身勝手な気持ちからではあるが、環境系の講座に参加したり講演を聴

講しに行き、知識を得ようと努めてきた。インプットだけではなく伝えて行きたいという気持ちから県地球温暖化防止活動推進員等々の立場になり、学校へのゲストティーチャーや講演の講師依頼などを受けるようになった。その過程で当然、エネルギー関連についても多少の知見を得て、原子力発電にまつわる課題も知ることとなったのである。

幾つかの偶然のベクトルに誘導されるかのように、私の中で最終処分の問題への関心が高まって行き、その学習会には積極的に足を運んだ。瑞浪、幌延、六ヶ所村、東海村などに見学にも出向いた。関西圏に住んでいた時はなんの意識もせずにじゃぶじゃぶと電気を使っていた私は、それが即ち使用済み燃料をどんどん生み出していたのだと知ったわけである。

温暖化や気候変動の話題と同じく、この問題についても1人でも多くの皆さんに伝えたい一心で、学習会の参加者から主催者の立場へとなる。県内嶺南地区にすえられた原子力発電所から30キロ圏内に位置する鯖江市というまちに住んでいるが、市民はまだまだ無関心なのが現状だ。鯖江に於いて有志で「原発のごみ処分を考える会」を立ち上げたのは2017年であった。本会は廃棄物処分の問題にフォーカスして勉強会・見学会を開催するという主旨を持って活動してきている。

他の団体さんが主催する従前の学習会等で、立地県ということも相まってか、原発慎重派の方々によって、原子力発電そのものの是非であったり再稼働や再処理に話がすり替えられてしまう場面を少なからず経験し、幾分辟易していたのは事実で、当会は設立時の初心を常に念頭に置く。地層処分の勉強会を糸口に、先ずこの課題の存在を「知っていただく」そして「考えていただく」場づくりにこれからも徹底して行きたいと思う。

慎重派のお声に耳を傾けると、原子力発電を始める時になぜ最終処分についてもきちんと決めておかなかったのか?と憤りを露わにされる。然もありません。同感だ。

確かに問題を先送りにしてきた感は否めない。「トイレ無きマンション」と揶揄される所以であろう。

しかしながら、なん十年も遡ってその犯人捜しに時間を費やすことを私は選ばない。一介の主婦であり二児の母である私が(子育てはとっくに役目を終えたけれど)、不思議な巡り合わせが重なって会を起すまでに至ったが、「このごみ、どうしましょう?」って皆で平生から話せるような意識の醸成ができれば、ということが唯一の願いなのである。後ろ向きに、もはや鬼籍に入るかも知れない人々を糾弾するような感情を私は持ち合わせていない。

子どもたちにどんな未来をのこすのか。私が問いかけてたいのは、この1点だ。

私の活動の原点は地球環境問題であり、原子力発電所に対しての「賛成」or「反対」の立場が入り口ではない。

私にとってはこの取り組みも環境活動の一環である。

昨年、この問題に関する活動団体を対象に、初の試みとして海外視察が9月に実施されることになり、早速応募した。参加が決定したと聞いた時はまるで宝くじに当たったような気分だったが、果たして学識者でもなく研究者でもない、'超'の付く一般人の私が視察に行かせていただくことの意義はなんだろうか。自問を続けながらも、フィンランドとスウェーデンの2国を巡った。

地層処分の研究施設や実施主体(事業者)だけでなく、議会や教育現場なども訪問する内容が魅力的なプログラムだった。この視察プロジェクトについてはVol.62, No.2の本欄で島根から参加された石原孝子氏が詳しく書きとめられているので、私からまた言及することは割愛させていただきます。バックナンバーをご参照いただきたい。

お恥ずかしい話だが、正直、理系の頭脳に乏しい私は、技術の研究や開発の行程を見学し、説明をお聞きしては、ただただ感嘆するばかりであった。世界の国々がこぞって地層処分という方法を採用しているのだから、このやり方が現時点では最も信用できるものだとあらためて感じた次第であったが、ならば、ここで、超一般人目線発揮で、なぜこの2国で世界に先駆けて処分地を決定できたのか?これが気になるところである。

両国でお会いした方々に主婦(おばちゃん!)パワーで厚かましくもお話させていただき、簡潔にお伝えすれば、「対話」「信頼」「自国の責任」「公平」「透明性」「冷静な議論」「丁寧な説明」といった言葉がどの方からも繰り返し聞かれた。我が国ではややもすると対立軸に陥って議論すら進まない状況なのに…。今の日本に欠けている点を暗に指摘されたようでぞっとした。

しかし、「積み重ね」という言葉もあった。当然のことかも知れないが、諦めることなく丁寧に対話を続け、信頼を積み上げていくしかないのだと思い知らされた。

一足飛びに叶う特效薬はどこにもないのである。

充実した視察の旅を終え、昨年11月に鯖江市内で地層処分に関するシンポジウムを開いた。

既に数十年間にわたる発電で放射性廃棄物は貯まり続けており、福井県民はそれと隣合せて日々の暮らしを刻んでいるのだが、その周知すらままならない。どうしたら皆に広がって行くのか。自分ごととして考えてもらえるのか。私たちなりの市民感覚で工夫し企画した。

基調講演の講師には(ご無礼な言い方だが)学者でも博士でもない、作家の田口ランディ氏をお招きした。言葉を生業とされる彼女が語りかける内容は、殊の外、聴衆に響いた。多様なパネリストによるパネルディスカッションも好評であった。両論あることは重々承知だが、「公平」に「対話」することを重視し、質疑応答などの時間には車座になってマイク無しで皆で話し合った。

科学的データや数値を見せる一方通行的な講演等とは切り口の異なる場を提供できたのではと内心自負している。

本シンポジウムは、なんらかの結論を導き出すことが目的ではない。「丁寧」な「積み重ね」のほんの一層になれば、それで幸いなのだ。

帰結するような判断を私は持っていないので、最後に余談を。拙宅にホームステイしていた学生はもう40歳代になり、奇遇にも日本で暮らすようになったので、話をする機会に今も恵まれている。フィンランド独立100周年記念に建てられた中央図書館 Oodi(これも石原氏の文章にある)に行ってくるよう薦めてくれたのも彼である。私は自治体議員さんたちとの意見交換で感服した視察先での話をした。「賛成の議員も反対票を投じた議員も、決まったからには前を向いて進む。」「ヒューマンエラーは起こりうるから、ミスが生じたら、その時皆でどうすればよいか考えればよい。」といったお話に感動した、と。

なんてオトナなんだろう。なんて穏やかで寛大で理性的な人たちなんだろう。

同国は長年ロシア等周辺大国に虐げられた歴史があり、100年前にやっと独立して、国民は支え合って生きてきた。意見の異なる者どうしが存在しても、軋轢や不和は極寒の地では命にかかわる。(対立ではなく)一緒に手をたずさえてきたのでしょとの彼の話に納得した。ゆりかごから墓場までと言われる手厚い福祉も、互いを思いやり助け合う気持ちのあらわれか。

人間どうし尊重し合う国民性に感動した。ともに生きる姿勢に感動した。

フィンランドがいち早く合意形成できたヒントは、技術云々も然りだが、国民の成熟度のような気がしてならない。(2020年2月28日記)

# kW 級 CW レーザーを用いた表面クリーニング技術の開発と除染適用の試み

光産業創成大学院大学 藤田 和久ほか

kW 級 CW (連続波) レーザー光の高速スキャンによる、廃止措置の放射能除染技術(レーザー除染)の研究開発を紹介する。本レーザー技術は、橋梁などの塗り替え工事における劣化塗膜やさびの除去を行うレーザークリーニング技術が元になっており、最初にその背景と内容を概観する。その除染への応用として鋼材の表層除去を想定した基礎実験をはじめ、発生粉塵の粒径把握やその回収手段の構築について紹介する。浜岡原子力発電所内に保管されていた廃棄物より得た試験片に対するホット試験も最近実施しており、レーザー技術の進展とともにクリアランス向けのレーザー除染の可能性が高まってきている。

**KEYWORDS:** *laser decontamination, decommissioning waste, continuous wave laser, fiber laser*

## I. はじめに

原子力プラントにおける放射能除染技術のうち、表面除染を対象とする場合、化学的・機械的・熱的ないずれかのエネルギーを与えて表層を削り取ることが作用のメカニズムとなる。本稿では、高い出力のレーザーを対象面に当てることで発生する熱エネルギーを利用した、レーザー除染の最近の動向を紹介する。

加熱源としてのレーザーは、光であることから、対象物までの空中伝送が可能、出力にあたり機械的反動がない、電源供給のみで消耗材が原理的にない、といった特徴がある。非接触・無反動ツールとして作業員もしくはロボット操作時の負荷がそれぞれ少なく、二次的な産業廃棄物が少ないといったメリットの源泉となる。

加えて、光の一種であるレーザーは、集光性能が高いことから、瞬時に高温状態にすることができる熱源とみることができる。レーザー加工技術は、医療用ステントなどの微細加工や自動車組立時の溶接に導入されたり、電気自動車における蓄電池を中心とした多数の銅配線の高速接合用にも開発が進められたりなど、ものづくりにおける戦略的基礎技術であり、その裾野も広がっている。

本稿では、そういった産業用の kW 級出力のレーザー装置を熱源として利用した除染の試みを紹介する。

その基本技術はインフラ維持管理を目的として開発し

*kW-class laser cleaning for steel structure maintenance and decontamination* : Kazuhisa Fujita, Hiromitsu Inagaki, Kazuaki Toyosawa, Kazuhiro Takahara, Takayuki Utsushikawa, Hiroe Fujita, Masaaki Yamada, Shin-ichiro Okihara.

(2020 年 1 月 17 日 受理)

ていたレーザークリーニング技術であり、その背景と内容を最初に紹介したあと、除染適用の試みについて最近の動向を含めて述べる。

## II. インフラ維持管理用レーザークリーニング技術<sup>1)</sup>

### 1. 鋼構造物の老朽化と予防保全

高度経済成長時代に多く建設されたインフラの老朽化が問題にされはじめて久しく、高速道路や鉄道などを支える橋梁、鉄塔、石油備蓄用などの大型タンクなど、鋼構造物もその代表である。国内に 60 万を超える橋梁に限って言えば、海からの飛来塩分や融雪剤の塩にさらされ、錆による橋梁の劣化が課題となっている。

橋梁の寿命と言われる 50 年を迎える長さ 2 m 以上の橋梁は、2023 年には全体の 43 %、2033 年には 67 %、老朽化に伴い通行規制がある橋梁(15 m 以上)は 2013 年で既に 1,381 橋あり年々増加している。事後保全から予防保全、ライフサイクルコスト低減に資する維持管理手法が今後さらに重要となる。

### 2. 塗り替え塗装工事における素地調整の課題

鋼構造物の延命化には、表面の劣化塗膜やさびをきれいに除去し、再塗装後の耐久性を与えられる素地調整として、再度の錆の発生を防止する必要がある。しかしながら従来はディスクサンダーといった電動工具による限定的な除せ(3種ケレン)に留まっており、短期間の再発錆が課題であった。ブラスト工法による 1 種ケレン作業も、多く使用するブラスト研削材の飛散防止養生・産廃コスト、騒音や粉塵環境下における作業性などに課題があり、よりよい工法が求められていた。

3. 塗り替え塗装工事における素地調整の課題

そういった課題を持つトヨコが光産業創成大学院大学と共同で開発したのがCoolLaser<sup>®</sup>(クーレーザー<sup>®</sup>)システムである。集光させたkW級のCW(Continuous Wave: 連続波)レーザービームを円環状に高速スキャンさせ(図1)、表面の付着物を瞬間的に急加熱し、熔融・蒸散・熱破碎により除去するものである。

図2(a)-(c)にCoolLaserシステムを示す。波長1μm帯、CW出力3kWのYb(イットリビウムドープ)ファイバーレーザーを光源とし、付帯設備を搭載したシステムトラック(c)から100mの光ファイバーにより照射現場まで光を届け、橋梁の塗り替え工事に対応している。光ファイバーの先端には円環状の高速スキャンを可能にするレーザーヘッド(a)を取付け、安全に配慮された装備をまとった作業員が手に持って作業できるようにしている(b)。現在、現場にて実用化が進んでいる。

図2(d)-(g)にさびたサンプルのレーザー照射前後の写真を示す。電動工具ではもちろん、ブラスト工法においても研削材の大きさからねじ山の谷面の研削は困難であるが、レーザーの場合は光が届けば処理可能である。光は吸収により消滅するため、使用済みの研削材の処理も不要であり、粉塵環境や騒音問題についても有利である。

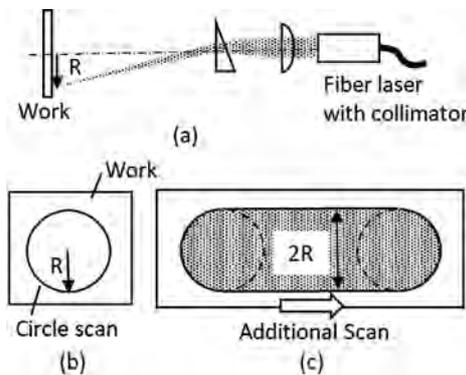


図1 円環スキャンの原理と面処理

(a)三角形のプリズムによるレーザー光の屈折偏向, (b)プリズム回転による処理対象への円環スキャン, (c)レーザーヘッドの移動による面処理

(出典)藤田ほか著, レーザー研究, 45, 7, 418(2017), p.422の図6より転載

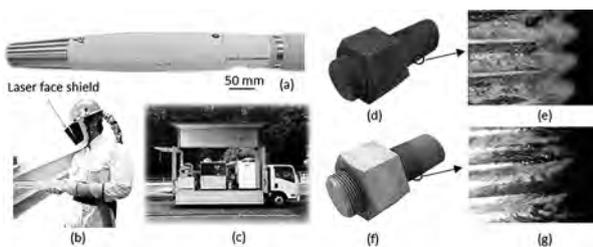


図2 CoolLaser<sup>®</sup>(クーレーザー<sup>®</sup>)システムと実施例

(a)レーザーヘッド, (b)作業員の安全装備, (c)車載システム, (d)(e)レーザー処理前のさびたネジ, (f)(g)レーザー処理後の除せいられたネジ

(出典)藤田ほか著, レーザー研究, 45, 7, 418(2017), p.420の図4およびp.421の図5より転載

る。再発錆の主要因である塩分の除去にも有利であるため、表面の塩分濃度50mg/m<sup>2</sup>以下の達成が従来工法より容易である点が特に鋼構造物の維持管理にとって利点とされている。

III. 除染適用の試み

2章で述べたレーザークリーニング技術を利用して、原子力プラントの放射能除染技術(レーザー除染)に適用するための研究開発に、中部電力および日本環境調査研究所が加わって取り組んでおり、それらを概観する。

1. 処理速度の推定<sup>2)</sup>

金属部材の汚染は放射性物質が鋼材表面の酸化被膜に付着することで生じるため、レーザー除染の処理速度は、放射性物質が含まれる深さまでの表層除去に必要なエネルギーを投入しながら、鋼材表面を走査する速度として評価できる。

そこで、CW 500 WのYbファイバーレーザーを無垢の316ステンレス表面に直線状に走査しながら集光照射し、レーザーのエネルギーフルエンス(単位面積当たりに照射したエネルギー密度(J/cm<sup>2</sup>))と走査速度をパラメータとしてステンレス表面の単位時間当たりの除去量を測定した(図3)。エネルギーフルエンスが小さすぎると加熱が足りず、大きすぎると過熱となって周囲への熱影響ばかりが大きくなってしまふ。効率的な熱(エネルギー)利用の観点から、最適値が存在することがわかっている。

このデータをもとに、10kWの市販ファイバーレーザーの使用を想定し、放射性物質の含有深さを10μmと仮定して、最適照射条件における処理速度を推定すると、1m<sup>2</sup>あたり15分となった。除染対象物によって必要な処理速度は異なると考えられるものの、十分に検討に値する速度である。実用化の可能性が期待できると捉え、実物の試験に期待することとなった。

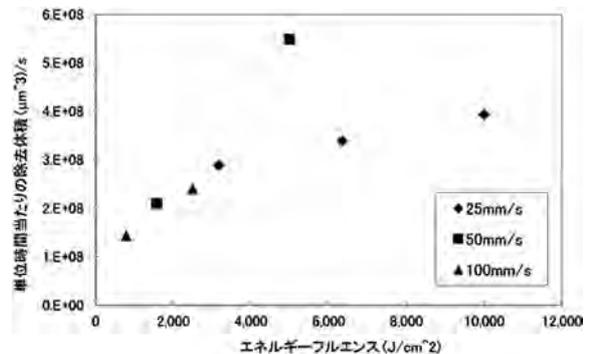


図3 レーザー照射による単位時間当たりの除去体積

(出典)稲垣ほか著, 日本原子力学会 2015年春の年会予稿, B41, 図1より著者改変

2. 水中処理による粉塵飛散防止の原理確認<sup>3)</sup>

レーザー処理に伴い発生する粉塵飛散防止について、完全に封じ込める可能性のある水中処理の基礎検討を行っている。水中におけるレーザー光の減衰、発生除去物による光路遮断の回避のための近接した照射系と給排水の両立などを検討し、500 W の CoolLaser システムに接続する水中処理専用のレーザーヘッドを試作した。図4に示すような、さび鋼板の水中における除去試験(コールド試験)に成功している。

3. 発生粉塵・ガス測定と回収装置の試作<sup>4)</sup>

より発生粉塵を閉じ込めることのできる水中処理の可能性を見出した後、さらに簡便な気中処理の可能性を検討することとした。まずは大気中におけるレーザー照射により発生する放射性物質を含む粉塵・ガスの処理方法を検討するため、2 kW の CoolLaser システムによる金属板へのレーザー照射で発生する粉塵・ガスを分析した。

試料として、4種類(ステンレス(SUS)、炭素鋼(SS)、表面がさびで覆われた炭素鋼(錆SS)および塗装された炭素鋼(塗装SS))の金属板を用いた。フィルタを通した清浄空気中で換気したグリーンハウス内で、試料表面にレーザーを1分間照射し、発生した粉塵の粒径分布とガスの成分濃度(CO, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO)を測定した(図5)。

図6は発生粉塵の粒径分布であり、対象物によって異なるがおおむねマイクロメータ程度以下であることがわ



図4 さび鋼板の水中処理

さび鋼板のうち、水中レーザーヘッドにより照射され、さびが除去されたエリアを点線で囲ってある。(その境界がわかりやすいように、部分的に点線を描いていない)

(出典)藤田ほか著、日本原子力学会 2015 年秋の大会予稿, B15, 図3より著者改変

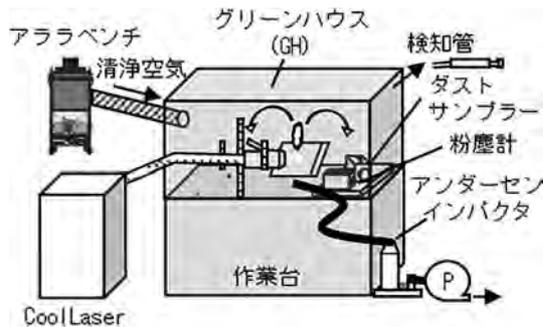


図5 レーザー照射による発生粉塵・ガスの測定

(出典)稲垣ほか著、日本原子力学会 2018 年秋の大会予稿, 2L17, 図1より著者改変

かった。発生するガスは、表面にさびあるいは塗装がある場合、NOが発生し、塗装ではNO<sub>2</sub>とO<sub>3</sub>も発生した。また、いずれの場合も、CO<sub>2</sub>が検出された(表1)。

以上の結果を踏まえ、レーザー除染に用いる粉塵・ガスの処理方法を検討し、処理装置を試作した。図7は、そのうちの粉塵吸引機構の効果を示している。図には、CoolLaserで照射されるサンプルが中央に置かれ、その周囲を取り囲むような大きなドーナツ状の粉塵吸引機構(フード)が設置されている。フードの内側に吸引口が設けられており、ここから所定の風量で吸引することで、発生粉塵やガスを飛散させない設計とした。図にあるように、動作時の効果が確認されている。

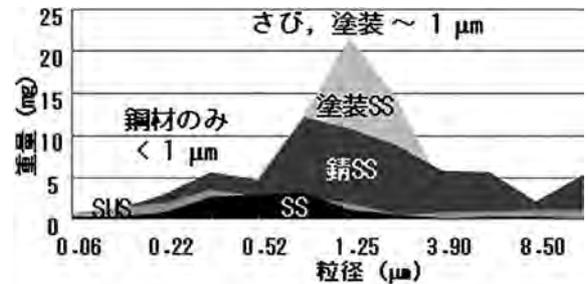


図6 レーザー処理による発生粉塵の粒径分布

炭素鋼(SS)上に塗装したもの、さび鋼材(SS)からは1μm程度の粒径が支配的。無垢鋼材(SSおよびSUS)に対しては量が少なくなり、粒径は1μm程度以下が支配的となる。

(出典)稲垣ほか著、日本原子力学会 2018 年秋の大会予稿, 2L17, 図2より著者改変

表1 発生したガスの成分濃度

測定対象	単位	BG	試料			
			SUS	錆SS	SS	塗装SS
CO	ppm	<1	<1	<1	<1	<1
O <sub>3</sub>	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.4
CO <sub>2</sub>	%	0.04	0.06	0.08	0.06	0.3
NO <sub>2</sub>	ppm	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.0
NO	ppm	<10	<10	10	<10	15

(出典)稲垣ほか著、日本原子力学会 2018 年秋の大会予稿, 2L17, 表1より著者改変



図7 試作した粉塵吸引機構(フード)の効果

新たに開発した粉塵吸引回収機構の(a)非動作時と(b)動作時における粉塵の挙動。(a)ではシート状の緑色レーザーにより照明された粉塵が舞っている様子がわかるが、(b)ではそれが見えず、粉塵が回収されていることが目視でわかる。

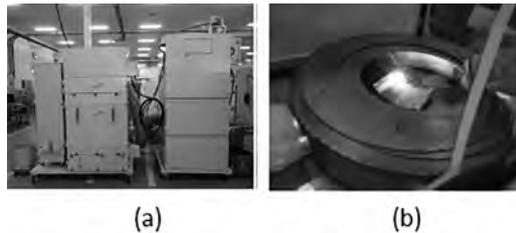


図8 レーザー粉塵処理装置(a)とレーザー除染の様子(b)  
(出典)稲垣ほか著, 日本原子力学会 2019 年秋の大会予稿, 2C17, 図1および図2より転載

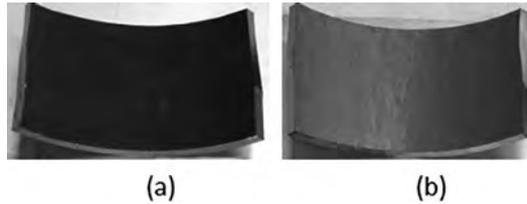


図9 レーザー除染前(a)後(b)の炭素鋼配管切断サンプル

#### 4. 実金属廃棄物を用いた除染試験<sup>5)</sup>

レーザー除染により発生する粉塵を回収処理するための装置と、前述したレーザー光を遮らないレーザー用フードを組み合わせた処理装置を製作した(図8)。除染対象として、浜岡原子力発電所内で使用され保管されていた廃棄物から得た試料(材質:炭素鋼・ステンレス, 形状:半割配管・棒材等, モルタル付着:有・無)を使用した。試料の汚染面を3 m/minの移動速度で、レーザーで走査しながら照射して除染を行った。2 kWのCoolLaserシステムによるレーザー除染前後の試料表面汚染を、GMサーベイメータを用いて測定し、除染係数(DF)を得た。

配管材試料は炭素鋼(図9), ステンレスともに一度の除染処理で検出下限値未満まで除染をすることができ、DFは3.5~19.8であった。一方、表面一部がモルタルで覆われた試料とステンレス棒材試料は3回除染処理を行っても汚染が残っており、試料の形状や状態がDFに大きく影響することが分かった。現在、実用化に向けて、これらの形状や状態に対するDF向上についての検討が進行中である。

#### IV. 展望

インフラ維持管理向けのレーザークリーニング技術であるCoolLaserとその除染適用について述べた。実金属廃棄物を用いた除染試験も開始され、多様な対象物に対する幅広い性能試験を積み重ねながら実用化に向けた開発が進もうとしている段階である。

その間に、インフラ向けのCoolLaserの性能も向上してきている。日進月歩のオリジナルなレーザー技術を逐次反映させ、要求される処理速度や粉塵・ガス回収性能を目指したデータの積み重ねにより、今後の開発の進展

と実用化が期待される。

#### — 参考文献 —

- 1) 藤田和久, 豊澤一晃, 沖原伸一郎, 前橋伸光, 高原和弘, 秋吉徹明. レーザークリーニングによる鋼構造物メンテナンス. レーザー研究. 2017, vol. 45, no. 7, p. 418-422.
- 2) 稲垣博光, 藤田和久, 沖原伸一郎, 豊澤一晃, 前橋伸光, 高原和弘, 鈴木猛, 黒柳昭博, 秋吉徹明. レーザー塗膜除去技術の原子力プラントへの適用に向けた研究開発. 日本原子力学会 2015 年春の年会, B41.
- 3) 藤田和久, 沖原伸一郎, 稲垣博光, 豊澤一晃, 前橋伸光, 高原和弘, 鈴木猛, 黒柳昭博, 秋吉徹明. レーザー塗膜除去技術の原子力プラントへの適用に向けた研究開発(2)粉塵飛散防止機構に関する基礎実験. 日本原子力学会 2015 年秋の大会, E15.
- 4) 稲垣博光, 移川隆行, 豊澤一晃, 藤田和久. レーザー塗膜除去技術の原子力プラントへの適用に向けた研究開発(3)レーザー照射で発生する粉塵処理に関する基礎実験. 日本原子力学会 2018 年秋の大会, 2L17.
- 5) 稲垣博光, 松井計雄, 移川隆行, 藤田啓恵, 樽林高志, 豊澤一晃, 藤田和久. レーザー塗膜除去技術の原子力プラントへの適用に向けた研究開発(4)実金属廃棄物を用いた除染試験. 日本原子力学会 2019 年秋の大会, 2C17.

#### 著者紹介

藤田和久 (ふじた・かずひさ)

光産業創成大学院大学

(専門分野/関心分野)レーザー工学, レーザープラズマ理工学/高出力レーザーの産業応用

稲垣博光 (いながき・ひろみつ)

中部電力

(専門分野/関心分野)水化学/廃止措置

豊澤一晃 (とよさわ・かずあき)

トヨコー

(専門分野/関心分野)レーザー表面除去/除染

高原和弘 (たかはら・かずひろ)

トヨコー

(専門分野/関心分野)レーザー表面除去/除染

移川隆行 (うつしかわ・たかゆき)

日本環境調査研究所

(専門分野/関心分野)放射線生物学, 放射線防護/廃止措置, 除染

藤田啓恵 (ふじた・ひろえ)

日本環境調査研究所

(専門分野/関心分野)放射線防護/核融合

山田正明 (やまだ・まさあき)

日本環境調査研究所

(専門分野/関心分野)放射線測定

沖原伸一郎 (おきはら・しんいちろう)

光産業創成大学院大学

(専門分野/関心分野)レーザー加工/表面処理

## 過酷環境下での遠隔レーザー分析技術

量子科学技術研究開発機構 大場 弘則,  
日本原子力研究開発機構 若井田 育夫,  
分子科学研究所/理化学研究所 平等 拓範

福島第一原子力発電所の廃炉においては、世界でも例のない事故炉からの溶融燃料デブリ等の安全かつ円滑な取り出しが求められている。我々は、事故炉内の高放射線、水中等の過酷環境下において、炉内の燃料デブリ性状把握等サーベイランスが可能な遠隔分析を実現するために、レーザー光およびプラズマ発光を耐放射線性光ファイバーで長距離伝送するレーザー誘起ブレイクダウン分光(LIBS)法を提案し、技術開発を進めている。本稿では、光ファイバー伝送 LIBS 技術を利用して様々な環境下や試料を用いて遠隔迅速その場分析を実証した試験結果、および過酷な環境へのセラミックマイクロチップレーザーを利用した遠隔 LIBS 分析技術の適用可能性について解説する。

**KEYWORDS:** *laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), harsh environment, elemental analysis, remote analysis, microchip laser, fiber-optic probe LIBS, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*

### I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(1F)の廃炉措置では、高放射線、水中・高湿度、狭隘という世界でも例のない過酷な環境下において、事故炉内に存在する核燃料物質や構造体の溶融混合物(燃料デブリ)等の安全かつ円滑な取り出しが求められている。

原子力損害賠償・廃炉等支援機構による戦略プラン2019が公表され、廃炉措置における炉内状況調査として、事故時に取得したプラントパラメータ等の実測値、事故進展解析、線量計測、画像によるPCV内部調査やミュオン測定等による現場の実態に関する情報、試験等で得られた知見に基づいた総合的な分析・評価が行われている<sup>1)</sup>。しかしながら、このような評価は、廃炉計画重要な知見を与える物ではあるが、炉内燃料デブリの現実の状態をそのまま示すものではなく、燃料デブリそのものを炉内で実際に分析する技術開発は十分なされているとは言い難い。画像で判断した燃料デブリらしき物質をサンプリングして分析するにしても、何がどこにどのような状態で存在するか、その場でその性状を把握する、といった解析的予測によらない遠隔で直接計測可能な技術を適用した廃炉措置の計画推進が不可欠となっている。さらに種々の分析についてはオフラインで行われることが一般的であり、試料の採取、前処理、分析と3

段階の作業となり、完了するまで長時間を要するために多くの専門の技術者および作業者の手を煩わしている。ましてや廃炉措置においては、取扱う試料は放射性物質であるため、作業が長引けば被曝の危険性が増す。よって事故炉内外での分析作業には迅速性も極めて重要である。

レーザー誘起ブレイクダウン分光(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: LIBS)分析法は、気体、液体、固体等の測定対象物にパルスレーザー光を直接集光照射してプラズマを発生させ、生成プラズマの発光を分光してその場リアルタイムで元素組成を計測する手法である。対象物の前処理が不要であり、多種類の元素を遠隔、オンラインで、かつリアルタイムに検出して定量できる<sup>2)</sup>ので、火星探査、海洋探査、廃棄物リサイクル、構造物、鉄鋼プロセスなど幅広い分野での適用が試みられている。こうしたことから、本手法は事故炉内外サーベイランスや燃料デブリ取出し後の分別ラベリング等として、高放射線量の過酷環境下での活用に期待できる。

そこで、遠隔・迅速その場分析を基本とし、事故炉内の高放射線環境、気中、水中で使用可能な遠隔分析技術を実現するために、レーザー光およびプラズマ発光を耐放射線性光ファイバーで遠隔伝送するファイバー LIBS 技術の開発に着手した<sup>3-6)</sup>。これまでに、我々は事故炉内部でのサーベイランスとして長さ50 mの耐放射線性光ファイバーを活用した LIBS 技術を提案し、本技術の適用により水中・近赤外波長域での燃料デブリその場迅速分析可能性の高いことを示している<sup>6)</sup>。光ファイバー

*Remote laser analysis technique in harsh environment*: Hironori Ohba, Ikuo Wakaida, Takunori Taira.

(2019年10月31日受理)

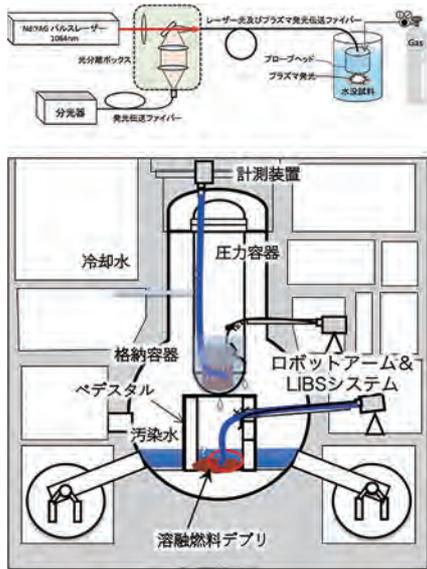


図1 光ファイバー伝送 LIBS の概念および事故炉への適用概念

伝送 LIBS の概念および事故炉への適用概念を図1に示す。パルスレーザー光は、光分離ボックス内で光ファイバーに入射されて50 m程度伝送し、先端の分析プローブ集光系でプラズマを生成させる。その発光は同一の集光系、光ファイバーを介して光分離ボックスに逆向きに伝送される。そこでレーザー光と発光とが分離され、発光は光ファイバーを通して時間分解高分解能分光器に導入されて発光スペクトルとして観測される。測定対象試料が水中に存在する場合は、分析プローブレーザー集光レンズと試料との間にガスを充填させて気相にすることで発光観測を可能としている。この手法により、放射線に敏感な計測機器類や作業者は安全性を確保できるので、分析プローブをロボットアーム等の先端に取り付けて炉内に導入すれば、燃料デブリ等の判別とその分布評価が可能になると考えられる。

本稿では、従来型光ファイバー LIBS 技術を改良して可搬性を高めた装置を開発し、様々な環境下や試料を用いて遠隔迅速その場分析を実証した試験結果、およびセラミックマイクロチップレーザーを適用した LIBS 技術開発の概要・進捗状況について紹介する。

## II. ファイバー伝送 LIBS 技術による 模擬燃料デブリ分析

### 1. 可搬型光ファイバー伝送 LIBS 装置

耐放射線性光ファイバーを利用した LIBS 装置は、作業現場に近い環境に持ち込むことを想定し、コンパクトで可搬性を重視して設計製作した。図2はプロトタイプの可搬型光ファイバー伝送 LIBS 装置の外観である。装置全体寸法は高さ900 mm、幅700 mm、奥行き500 mmであり、計測機器等一式が収まるようにしている。パルスレーザー発振器は、Qスイッチ(Q-sw.)Nd<sup>3+</sup>:YAGで

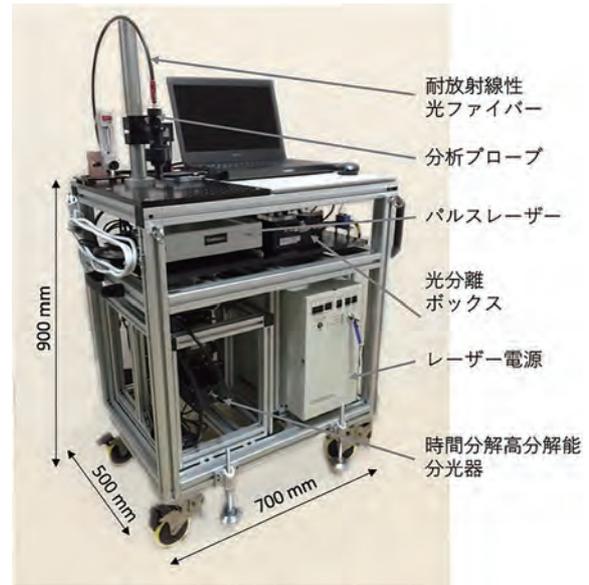


図2 可搬型光ファイバー伝送 LIBS 装置の外観

水冷フラッシュランプ励起型とし繰り返し周波数が1~15Hz可変、基本波1,064 nmの最大出力50 mJ/パルスが搭載される。光ファイバーからは開口数(NA)で定義されたレーザー光が拡散されて出射するので、プローブにて集光されるレーザースポットは光ファイバー端面の像転送となる。高出力のレーザー光を伝送させるためには、コア径が600~1,000 μmの大容量の光ファイバーが必要であるが、ブレイクダウンプラズマを生成させるには対物光学系に3分の1程度の縮小光学系の適用が求められる。また集光系をできるだけコンパクトにするため、結果として、光ファイバーの開口数は通常(NA=0.22)よりも小さく(NA=0.12)している。なお、分析プローブ内で構成されるレンズ系は放射線耐性のある合成石英製とした。発光分析は、波長分解能λ/50,000の広帯域波長分解能分光が可能なEMCCD付きエッセル型分光器を搭載する。

### 2. 発光スペクトルによる元素の同定

燃料デブリは、構造体のFeやZr、核燃料物質のUやPuといった原子構造が複雑な元素で構成されている。このため、LIBSにおいては複雑で多数の発光線が出現する。これらの元素は、300~1,000 nmの波長範囲において中性原子、1価イオンの発光線数は10,000を超える<sup>7)</sup>。そのため、測定においては、広い波長範囲を同時に高分解能でスペクトル観測できるエッセル型分光器の適用が必須である。解析における元素の同定では、公開されているデータベース<sup>7)</sup>に依るところが大きい。Pu等では非公開データも存在するため、Puを含んだ模擬試料を用いた LIBS 測定により同定して作業現場に対応してデータベース化する必要がある<sup>8)</sup>。一方、燃料デブリの判別や組成分析に適した発光線の選定では、デー

タベースおよび複数の観測スペクトルを照合し、発光線同士の干渉のないこと、再現性が良く十分なピーク強度が得られていることが重要な条件である。これに加えて、アブレーションプラズマの励起エネルギーを考慮して、例えば組成比の評価では、対象元素同士の発光線において上位エネルギー準位の近い組合せに絞込むことも有効と考えられる。

耐放射線性光ファイバーは、強い放射線照射により色中心が生じて透過率が著しく低下するが、700～900 nmの近赤外域と470 nm周辺に透過する波長域が存在する<sup>3,6)</sup>。近赤外波長域での発光線は、紫外可視波長域に比べてピーク強度は弱いが発光線の干渉はほとんど無いので、元素同定には適している。図3には、水没したU-Zr混合酸化物焼結試料<sup>9)</sup>をLIBS分析した例で、観測発光スペクトルおよび検量線を示す。レーザー光10回照射で取得した。ここでは、集光レンズと被測定試料との間に外部から窒素ガスを導入して気相状態を形成してプラズマ発光観測を実現した。スペクトルからは、近赤外波長域においては発光線が疎らであってU、Zrそれぞれの特有な発光線により識別観測が可能であることが確認できる。また、選択した波長の組合せ(U I: 826.2 nm, 2.506 eV → 1.006 eV, Zr I: 820.1 nm, 2.115 eV → 0.603 eV)では、U中のZrの量に応じた直線性の良い検量線が得られ、U中のZrの検出下限値は約1%となることが実証された。この結果は、光ファイバー伝送LIBSによる遠隔分析により、水没した物質であっても主たる元

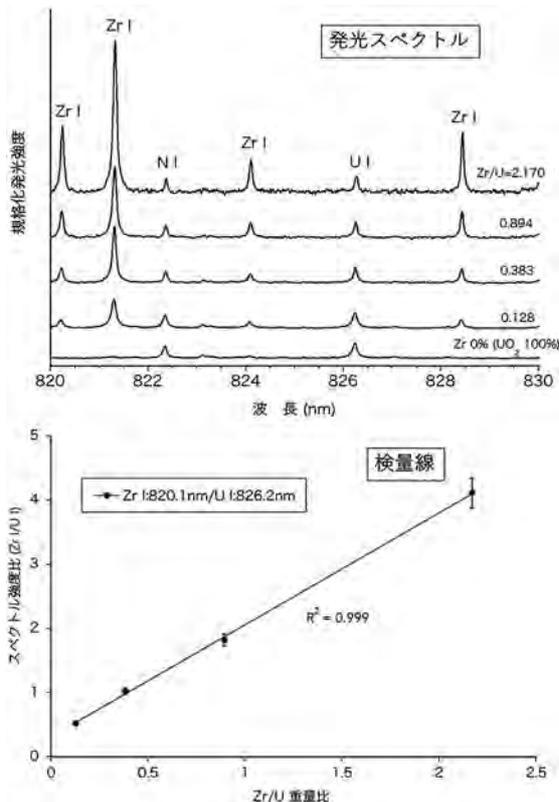


図3 水没Zr/U酸化物試料のLIBS測定例

素組成の判別のみならず定量性評価も可能であることを示している。

### 3. 放射線環境下でのLIBS分析

本節では、強い放射線環境下において、LIBSプラズマ生成・発光が影響を受けるか否か調べた結果を報告する。量研機構高崎量子応用研究所のガンマ線照射施設を利用して10 Gy/hを超える高線量率環境下、耐放射線性光ファイバーを用いて、混合酸化物焼結体を線源近傍に設置してのLIBS測定を行った。燃料デブリの構成は核燃料物質、構造材および被覆管等が主であるが、中性子吸収材ではB<sub>4</sub>Cの他に酸化ガドリニウム(Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)も含まれており、燃料デブリ中のGd存在有無の情報は事故進展解析や臨界管理上非常に重要であるので、UO<sub>2</sub>の模擬化合物としてCeO<sub>2</sub>を使用し、混合酸化物(Ce, Zr, Fe)中にGdを少量添加(0～2.5%)させた焼結試料を調製した。

図4は混合酸化物中に2.5% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含むLIBSスペクトル観測例である。光ファイバー長は50 mで、レーザーのパルスエネルギーは7～10 mJ、繰返し5 Hz、照射回数100で、窒素ガスを流しながら測定している。図4において黒色線はガンマ線照射前、灰色線は線量率が10 kGy/hのガンマ線照射中のLIBSプラズマ発光スペクトルである。ガンマ線照射により光ファイバーの伝送損失が増大して紫外可視波長域の発光強度が弱くなるものの、スペクトル強度の相対評価では計測結果を左右する大きな差異はみられないことを確認した。本混合酸化物中では、Gd発光線が干渉せずに同定できたのは観測波長域において3本のみであった。U中におけるGdを想定してCe中のGd量を評価するために、それぞれの発光線、Gd I: 501.5 nm (3.525 eV → 1.053 eV), Ce I: 475.5 nm (3.577 eV → 0.964 eV)を選定した。何れの場合でも、高い線量率のガンマ線環境下でLIBSスペクトルが観測でき、元素同定が可能であって、定性分析は問題ないことが明らかとなった。模擬試料混合酸化物中Gd濃度に対する発光強度比Gd/Ceの変化のガンマ線照射線

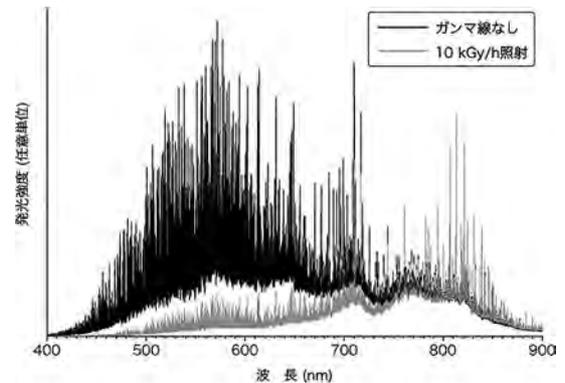


図4 Ce-Zr-Fe混合酸化物中に2.5% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含む発光スペクトル

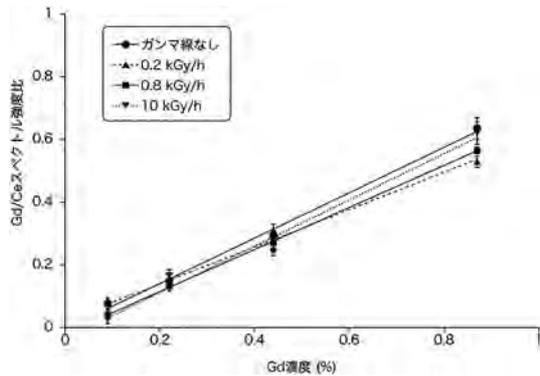


図5 Ce-Zr-Fe 混合酸化物中 Gd 濃度(検量線)

量率依存性(検量線)を示した結果を図5に示す。優れた直線性がいずれの線量率でも保持され、ガンマ線が存在していても検量線の傾きに影響を与えないことが確認された。混合酸化物中の Gd の検出下限値としては約 300 ppm が得られ、放射線環境下でも定量評価が可能であることが実証された。

### Ⅲ. マイクロチップレーザー適用 ファイバー伝送 LIBS 技術

高出力のレーザーを光ファイバーに導入する際にはその長さに大きな課題が存在する。レーザー光伝送ファイバー LIBS 技術では、高出力のレーザーを光ファイバーに導入して先端の分析プローブまで伝送させるが、1F 廃炉措置における炉内状況調査では、人が十分に余裕を持って安全に作業ができるエリアから高放射線環境下検知位置までの距離は 100 m 以上が想定される。Q-sw. パルスレーザー光を光ファイバーで長距離伝送する際、吸収や散乱損失によりレーザー光が減衰する。これまでの我々の実績により、50 m 長さの光ファイバーでは伝送損失により導入したレーザーエネルギーは半分程度に低下し、光ファイバー束の曲げ具合によってはレーザー光が発散して透過しなくなることがわかっている。また、ファイバー出口にて高出力のレーザー光を得ようとするれば、導入端面での損傷を伴う。そしてより長距離の場合では、ラマン散乱の発生を伴うために、LIBS 用パルスレーザー光の伝送が可能なファイバー長は約 85 m と言われている<sup>5)</sup>。さらに、高出力レーザー光の伝送にはコア径を大きくする必要があるので、重量と曲げ半径の増加により可搬性および可撓性が損なわれる。こうしたことから、現在実証試験中の光ファイバー LIBS と並行して上記課題を解決する代替技術の開発も進めることが不可欠である。

そこで我々は、従来の高出力パルスレーザー光をファイバー伝送する方法(図6上図)ではなく、光ファイバーの先端にレーザー光発振機能を持たせることにより、より長距離の分析標的への高いエネルギーを投入して高輝

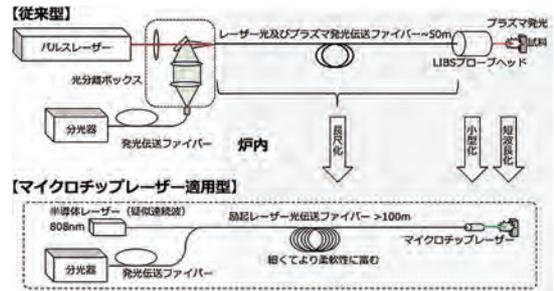


図6 マイクロチップレーザー適用光ファイバー伝送 LIBS の概念



図7 マイクロチップレーザー本体試作品とプラズマ発光状況

度のプラズマ発光を可能とした炉内挿入分析手法に着目した。これを実現するために、セラミックマイクロチップレーザー技術<sup>10)</sup>を活用して、高感度 LIBS 分析手法(図6下図)の開発に着手した。セラミックスは、単結晶レーザーコンポジット材に比べて、サイズ・形状の自由度が大きいため高出力化に適することや、量産化でコスト抑制も可能、といった点に優位性がある<sup>11)</sup>。

マイクロチップレーザーは、レーザー媒質と可飽和吸収体を組み合わせた簡便な構成でありながら、高強度パルス駆動することでジャイアントパルス発振が可能な超小型受動 Q-sw. レーザーである。Nd<sup>3+</sup>:YAG レーザー媒質に 808 nm の疑似連続波半導体レーザー光を導入して励起すると 1064 nm 光を発振し、この光が Cr<sup>4+</sup>:YAG 可飽和吸収体に導入されると吸収・光学的ポンピングが起きる。その後、可飽和状態になると Q-sw. が起きて吸収体が透過体となり、出力が数 mJ でパルス幅がサブナノ秒の 1064 nm のレーザー光を発振する。励起光は疑似連続波なので、コア系が細く曲がりやすい光ファイバーが使用可能であること、伝送長が長く損失が発生しても、注入するレーザー光エネルギーを補償することでレーザーが発振可能であるといった利点を持つ。パルス発振したレーザーは発散成分が少なく集光性に優れ、出力は MW 級にもなる<sup>12)</sup>。これにより、物質の発光を伴うアブレーションを容易に生成することができる。また、非線形結晶との組合せにより、光ファイバー先端での二倍高調波も活用できる<sup>13)</sup>。

図7にはマイクロチップレーザー本体試作品での発振状況を示した。内部には Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG コンポジット材(3 mm 角 × 10 mm 長)と集光レンズが組込まれている。出射用に短焦点レンズを選択すれば空気のプロ

レークダウンも容易である<sup>14)</sup>。これまでに、本光源にプラズマ発光分光系を組合せた LIBS 測定システムを構築し、従来のファイバー伝送 LIBS 法と同等以上の性能を確認済みである。現在、本光源を炉内に適用する場合を前提に、放射線照射環境下でのマイクロチップレーザーの発振特性を取得している。その結果、約 1 MGy のガンマ線累積線量では放射線照射前後においてレーザーの発振特性に変化が見られないこと、10 kGy/h までの強い放射線照射環境では、発振に必要な励起エネルギーのしきい値や発振出力が線量率に依存する傾向があること等が観測された。この出力損失は、励起用レーザーエネルギーによる補償が可能な範囲内であり、レーザー出力のモニタリングにより LIBS 測定に適用可能なことを確認している。

このように、マイクロチップレーザーは、強い放射線環境下でもブレイクダウン用光源としての適用可能性が示された。本光源の適用で、よりコンパクトで可搬性に優れたファイバー LIBS 分析装置開発への展開、幅広い分野への応用が期待できると考える。今後は、低線量率放射線環境下での長時間動作安定性や 100 m を超える遠隔その場分析への適用性を検証していく予定である。

#### IV. おわりに

過酷環境下、特に水中や放射線環境下において、レーザーの特徴を利用した遠隔その場リアルタイム計測を想定した装置開発および実証試験を行い、事故炉廃炉措置への適用可能性について紹介した。今後も廃炉現場ニーズに対応した機器の開発やデータ解析による分析精度の向上を進め、関係諸機関とともに 1F 廃炉加速に貢献したいと考えている。

本稿は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業により実施された委託業務「先進的光計測技術を駆使した炉内デブリ組成遠隔その場分析法の高度化研究」の成果を含みます。また、本研究開発には、佐伯盛久博士、田村浩司博士、田口富嗣博士(量研機構)、赤岡克昭氏、伊藤主税博士、高野公秀博士(原子力機構)、作花哲夫先生(京都大学)、Blair Thornton 先生

(東京大学, Univ. Southampton), 松本歩先生(兵庫県立大学), Lim Hwang Hong 博士(自然機構分子研), 水谷信雄氏(分子研装置開発室)の協力を得ました。

#### — 参考文献 —

- 1) [http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/book/20190909\\_SP2019FT.pdf](http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/book/20190909_SP2019FT.pdf)
- 2) D. A. Cremers et al., "Handbook of Laser- Induced Breakdown Spectroscopy", 2nd Edition, (Wiley, 2013).
- 3) C. Ito et al., J. Nucl. Sci. Technol., 51, 944 (2014).
- 4) F. J. Fortes et al., Anal. Chem. 85, 640 (2013).
- 5) A. Whitehouse et al., Spectrochim. Acta B, 56 821 (2001).
- 6) M. Saeki et al., J. Nucl. Sci. Technol., 51, 930 (2014).
- 7) NIST Atomic Spectra Database ver. 4, <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>.
- 8) 若井田育夫他, 光学, 49, 13 (2019).
- 9) M. Takano et al., J. Nucl. Sci. Technol., 51, 859 (2014).
- 10) M. Tsunekane et al., IEEE J. Quantum Electron., 46, 277 (2010).
- 11) T. Taira, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 13, 798 (2007).
- 12) H. Sakai, et al., Opt. Express, 16, 19891 (2008).
- 13) R. Bhandari, et al., Opt. Express, 19, 19135 (2011).
- 14) T. Taira, Opt. Mater. Express, 1, 1040 (2011).

#### 著者紹介



大場弘則 (おおば・ひろのり)

量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門  
(専門分野/関心分野) レーザーによる元素分離と分析研究



若井田育夫 (わかいた・いくお)

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門  
(専門分野/関心分野) レーザー分光・遠隔検知技術



平等拓範 (たいら・たくのり)

自然科学研究機構 分子科学研究所 社会連携研究部門/理化学研究所 放射光科学研究センター  
(専門分野/関心分野) 量子エレクトロニクス

# レーザー法による原子炉厚板鋼材切断技術の開発

量子科学技術研究開発機構 田村 浩司,  
日本原子力研究開発機構 遠山 伸一

レーザー法による切断技術は、制御性が高くロボットアームを用いた遠隔技術との整合性が高いなど利点が多く、原子力施設の廃止措置へ適用されるならば、有望な選択肢となりうると期待されている。しかし、原子炉压力容器のような厚板鋼材への適用は従来容易ではなかった。本解説では、このような厚板鋼材のレーザー法による切断技術開発の最新成果として、板厚 300 mm 鋼材や模擬压力容器の切断実証、厚板鋼材切断条件の解析、切断過程観察、遠隔切断システム、重ね切断、ヒューム対策などについて紹介する。

**KEYWORDS:** *Laser cutting; decommissioning; dismantling; fiber laser; carbon steel; stainless steel; laser cutting system; piping chopping*

## I. はじめに

運転期間終了後の原子炉は解体・撤去されるが、その際、原子炉構造物の切断による減容化が必要とされる。原子力施設の高経年化に伴い、切断技術の重要性は近年特に高まってきている。従来から実績のある切断法として、プラズマアーク法や機械式切断法が知られている。一方、レーザー光を熱源とするレーザー切断法は、制御性や遠隔技術との整合性が高く、ブレードなどの交換部品の必要性がないなど利点が多く、原子力施設解体に適用できるならば極めて有効な選択肢となりうると期待されており、近年国内外で開発が進められてきている<sup>1~4)</sup>。

原子炉は压力容器など板厚が 100 mm を超える鋼材で構成されているため、レーザー法の廃止措置適用にはこのような厚板鋼材の切断が必要とされる。しかし、このような厚板鋼材の切断に関しては、レーザー法は知見や実績に乏しかった。そのため、レーザー法の適用性や有効性の展望に関しては、必ずしも肯定的なものばかりではなかった。

本解説では、レーザー法の廃炉現場への適用を目指し若狭湾エネルギー研究センターにおいて取り組んだ、原子炉で用いられるような厚板鋼材のレーザー切断技術開発や、切断システム開発などに関する最新成果を紹介する。

## II. 厚板鋼材切断の技術開発

### 1. 厚板鋼材のレーザー切断

切断の熱源として米国 IPG フォトニクス社製ファイ

*Development of Laser Cutting Technology of Thick Steel Plates for Nuclear Facilities*: Koji Tamura, Shin'ichi Tōyama.

(2019 年 10 月 25 日 受理)

バーレーザーの発振光を用いた。レーザー光を光ファイバーで導き、加工ヘッド内のレンズで集光し、鋼材試験片に照射した。加熱溶融した金属を除去するためのガス(アシストガス)をレーザー光と同軸状にノズル先端から噴射している。厚板鋼材の切断を目指して、レーザー光の照射条件、鋼材の移動速度やガス噴射圧力など様々な条件をパラメーターに試行を行い、切断条件を探索した<sup>5, 6)</sup>。

図 1 に板厚 300 mm の炭素鋼およびステンレス鋼の切断試行後の鋼材片を示す<sup>6)</sup>。中央部の切断溝(カーフ)が直線状に左側(加工ヘッド側)から右側(出射部側)に抜けており、切断が達成された結果を示している。

図 2 はステンレス鋼(図左側の薄い部分)と炭素鋼(図右側の厚い部分)を組み合わせた鋼材の結果である<sup>5)</sup>。それぞれ、沸騰水型(a)と加圧水型(b)原子炉の压力容器壁を模している。このような複合鋼材においても切断が達成できた。廃止措置において最大板厚の対象鋼材として 300 mm 厚程度の压力容器が想定されているが、本結

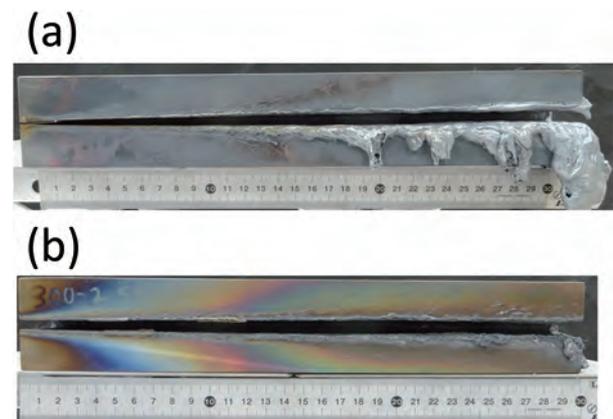


図 1 炭素鋼およびステンレス鋼のレーザー切断結果<sup>6)</sup>



図2 圧力容器を模擬した複合鋼材のレーザー切断結果<sup>6)</sup>

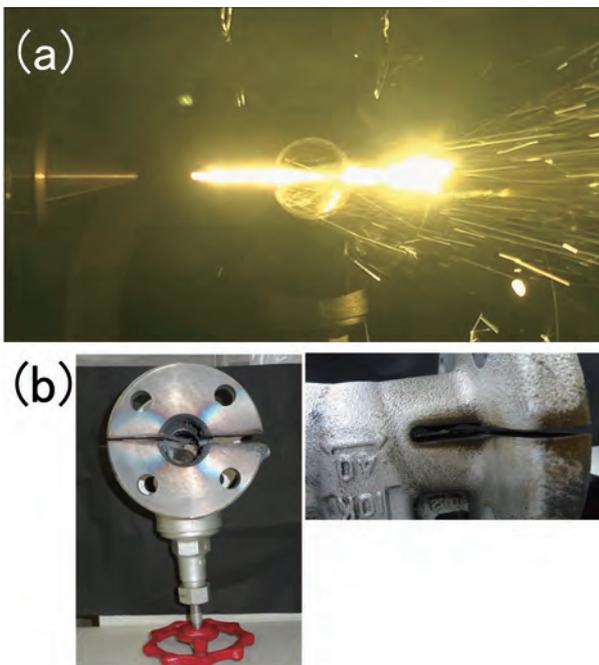


図3 構造物の切断過程(a)と切断結果(b)<sup>6)</sup>

果はレーザー法によりそれら鋼材の切断が可能であることを示すものである。

また、廃炉現場で想定される複雑な形状を有する構造物や、大型配管を模した鋼材に関しても試験を行った。図3はゲートバルブの切断例であり、その過程(a)や結果(b)を示している。バルブの複雑な形状、実効板厚やスタンドオフ距離(ノズル先端と鋼材面間距離)の大きな変化にもかかわらず、切断が可能であることが示された。

これらの結果は、レーザー切断法が圧力容器や廃炉現場の様々な対象構造物の切断に十分適用可能であることを示しており、廃止措置におけるレーザー法の有効性を実証する結果である。

## 2. 切断条件の解析

以上は、切断条件を適切に保った場合の結果である。一方、必要諸条件を満たさない場合、出射面側のカーフ幅

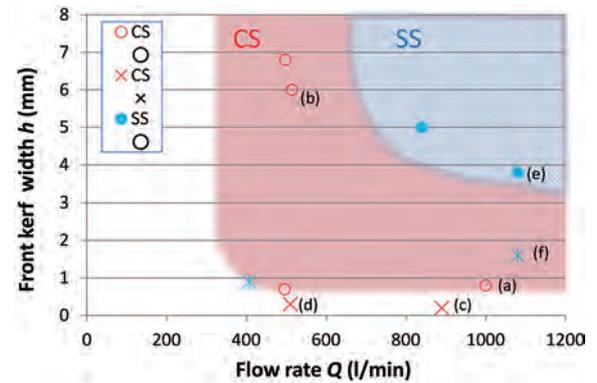


図4 切断試行可否のまとめ<sup>7)</sup>

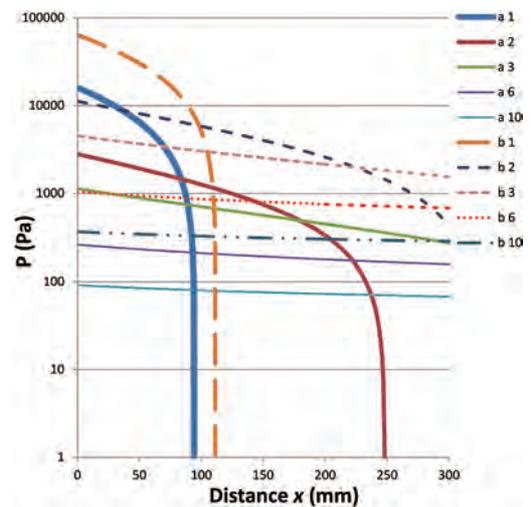


図5 カーフ領域のガス圧力の計算結果<sup>7)</sup>

が拡大し、さらには、レーザーエネルギーが鋼材内部に滞留し、熔融金属の吹き戻しや、カーフにおける空孔生成などの現象が見られた。このような条件では、切断は達成できず、また、作業安全上も問題となりうる。

どのような条件で切断が達成できるか解析を行った。図4に切断試行後の切断可否(○, ×)を、入射面のカーフ幅とアシストガス流量をパラメーターにまとめた。この結果から、条件はカーフ幅とガス流量で決まり、その範囲は対象材質によっても異なることが把握できた<sup>7)</sup>。

これらの傾向を、ガス圧力の計算を行うことにより検討した(図5)。カーフ幅が小さい場合は損失が大きく、板厚とともに圧が低下し切断不可能となる。一方、カーフ幅を増すと損失が減少し、板厚が大きい領域でも切断に適用できており、実験傾向をよく再現できた。この結果から、切断長にわたる、熔融金属を移動・除去できるガス圧力の維持が切断可能条件であると考え、傾向を説明できることがわかった。このような解析により、廃炉現場における高出力レーザーの適用を、より安全・適切に予測・制御して行えるようになるものと期待される。

## 3. 切断過程観察手法の開発

切断過程の理解やプロセス制御には、切断部の詳細な

観察が望ましいが、切断部は高エネルギーレーザー光が集光・照射されているため、その直接観察は従来容易ではなかった。そこで、家庭用ビデオカメラを用いた簡便・安価な方法を考案し、それを用いた詳細・広範囲な切断過程観察を実現した<sup>8)</sup>。図6は、この方法による切断部観察例である。レーザー光照射により熔融し、ガス流で隆起した表層金属の様子(a)が、高密度レーザー照射下にあっても観察されている。また、これがガス流により照射部の下流へ移動し、最終的に除去される様子も観察された(c)。この方法により、詳細な切断過程を広い照射範囲にわたってリアルタイムで観察することが可能となった。

一方、切断が達成できなかつた場合に関しても、過程観察が可能である(図7)。この場合、切断部に空孔が複数生じる場合が見られた(a)。切断条件が満たされず、金属除去が不十分となり、エネルギーが滞留し、空孔が生成・拡大する様子がこの方法により観察され(b)、達成できない場合に生じる現象(c)を把握することができた。

高出力レーザーの廃炉現場適用では、安全なプロセス管理が不可欠であるが、本手法はプロセスの直接モニターによる危険な状況の早期感知にも有効であると期待される。

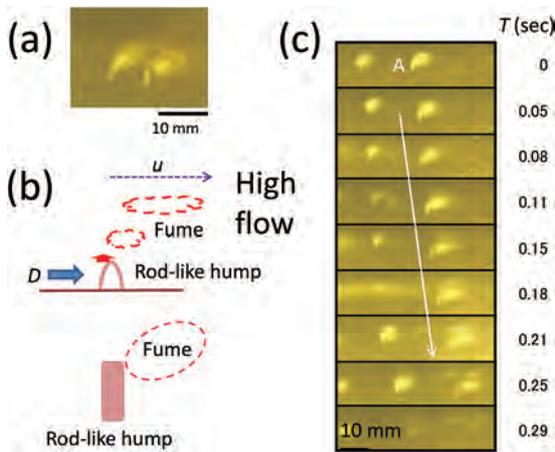


図6 炭素鋼切断の側面観察(a, c)とモデル(b)<sup>8)</sup>

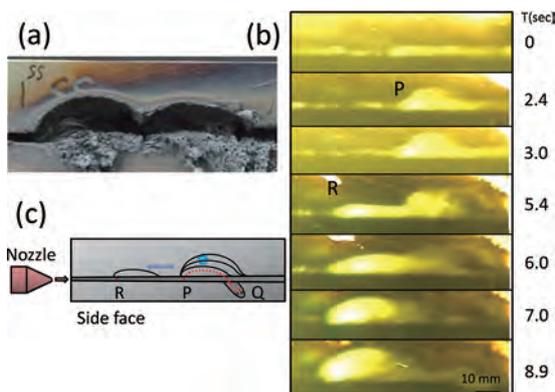


図7 試行後の側面(a), 過程(b), およびモデル(c)<sup>8)</sup>

### III. レーザー切断システムの開発と試験

#### 1. 厚板鋼板遠隔切断システム

廃止措置におけるレーザー切断では、現場適用性と廃棄物処理が重要である。台車で切断場所へ移動し、ロボットアームで駆動される遠隔切断システムを実機設計の仕様決定や課題抽出を目的として作製し、切断試験を行った<sup>9)</sup>。

レーザー切断の特徴として、図8のビームプロファイルが示すように、幅の狭いビームを用いることで狭いカーフが得られる点が挙げられる。実際、マグノックス炉の再処理施設での廃棄物搬送用格納容器の細断減容処理では、切断速度と2次廃棄物低減量ともに最も優れていることが実証されている<sup>10)</sup>。

ロボットアームの手首軸は一般に取り付け質量により可動範囲が制約されるが、開発した照射ヘッドは15 kgで小型軽量・可搬性が高く、アーム支点1,400 mmのアーム伸長が可能であり、狭隘部位への接近も容易である。プロセスケーブルは数10 kW出力で100 m程度伸長可能であり、冷却配管、ガス供給系等も遠隔操作が可能である。

図9は海水配管(材質SS41, 管長600×外径450 mm, 板厚9.5 mm)の切断試験(切断速度: 3,000 mm/min)の様子(a), および切断結果(b)を示す。ここで、アシストガス流量等の切断諸条件は、厚板切断条件に基づき炭素鋼、ステンレス鋼それぞれパラメーターを精査し、最適条件に調整した。

また、一度貫通したレーザービームをさらに利用し、部材を重ねて細断する重ね切断(切断速度: 1,000 mm/min)は(図10)、作業時間の短縮と作業空間の縮小に有効であり、また、ビームダンパー(貫通したレーザー光を吸収する装置)の設置数や2次廃棄物の拡散低減も期待される。重ね切断の結果得られたカーフ幅に関しては、配管内層の剥離や、切れ残しによる影響が見られた。剥離低減には、カーフ幅をより小さくするような条件: 例えば集光点(ビームウェイスト)を1枚目の表面近傍に設定し切断できるよう光学設計を行った加工ヘッドを用

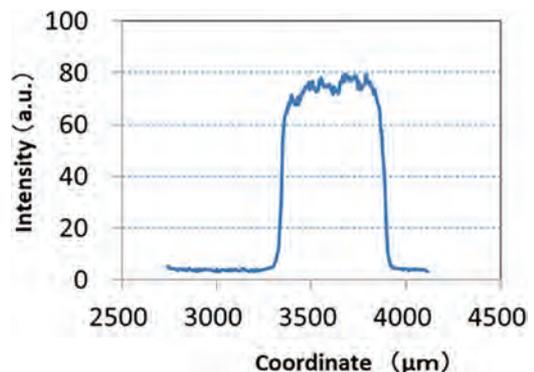


図8 焦点でのビームプロファイル

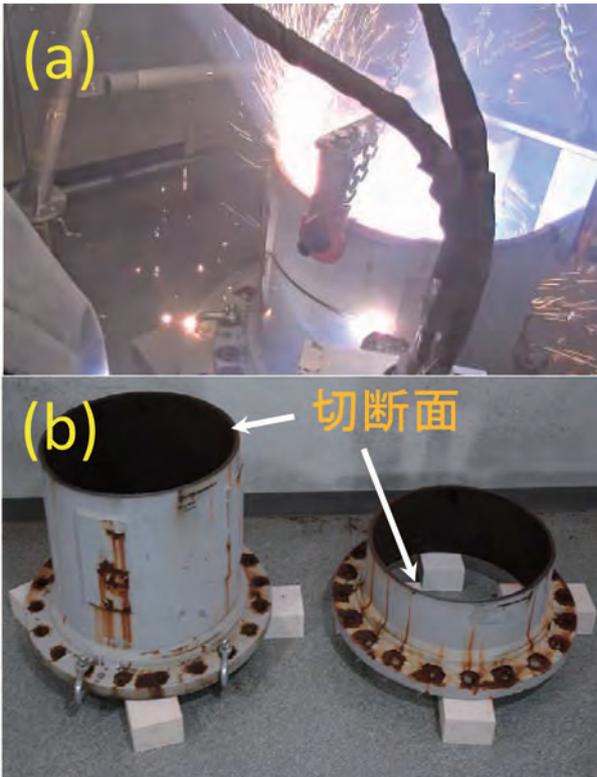


図9 配管切断の様子(a)と結果(b)



図10 重ね切断の試験配置

いることなどが、対策として考えられる。また、アシストガスの流れが切断性能へ大きな影響を与えるため、アシストガス全体の流れを把握して制御する必要があると考えられる。

## 2. ヒューム対策

切断の際にはヒュームや溶融金属がアシストガスによって飛散する。このような赤熱粒子の飛散対策として、パワー伝送系や集光ヘッド冷却配管には柔軟性のあるステンレス繊維被覆、集光ヘッド下部には耐火レーザー遮光カーテン((株)ウラセ、鯖江市)を追加・設置した。さらに、カーテンやビームダンパーへの放水・冷却などが、飛散ヒューム対策として有効であると考えられる。

また、鋼材切断で利用されなかったレーザーエネルギーやヒュームを吸収・付着するビームダンパーを、2軸制御ポジショナー等を用い、加工ヘッドと連動して制御・操作するシステムを開発することにより、切断姿勢の自由度を向上させ適用範囲を広げた、柔軟で安全性が高く、現場適用性が向上したシステムを構築できるものと期待される。

## IV. まとめ

レーザー法による厚板鋼材切断技術開発の最新成果に関して解説した。これら開発により、レーザー法は圧力容器をはじめ炉心周辺機器厚板鋼材構造物の切断へ、広汎かつ簡便に適用できることが実証された。また、遠隔システムによる被ばく低減等も期待される。レーザー切断法は、“廃炉の時代”を迎える国内外の廃止措置現場への適用をはじめ、福島事故収束や国土保全のための老朽社会産業インフラの解体など、様々な応用への有望な選択肢となりうるものと期待される。

### — 参考文献 —

- 1) H. Daido. Rev. Laser Eng., 41, 906-910 (2013) [in Japanese].
- 2) P. Hilton, A. Khan. Rev. Laser Eng., 41, 911-916 (2013).
- 3) C. Chagnot et al. Nuclear Engineering and Design, 240, 2604-2613 (2010).
- 4) J. S. Shin et al. Opt. Laser Technol., 94, 244-247 (2017).
- 5) K. Tamura, R. Yamagishi, Mech. Eng. J., 3, 15-00590, (2016).
- 6) K. Tamura, R. Ishigami, R. Yamagishi, J. Nucl. Sci. Technol., 53, 916-920 (2016).
- 7) K. Tamura, S. Toyama, J. Nucl. Sci. Technol., 54, 1011-1017 (2017).
- 8) K. Tamura, R. Yamagishi, J. Nucl. Sci. Technol., 54, 655-661 (2017).
- 9) 遠山 伸一, 峰原 英介, デコミッションング技報, 56, 55-65 (2017).
- 10) A. Khan et al, WM2016 Conference, 16192, Phoenix, Arizona, USA (2016).

### 著者紹介



田村浩司 (たむら・こうじ)

量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門  
(専門分野/関心分野)レーザー工学, 廃止措置, 光エネルギー変換



遠山伸一 (とおよま・しんいち)

日本原子力研究開発機構 原子力人材育成センター  
(専門分野/関心分野)人材育成, レーザー工学, 切断技術, 原子炉・加速器の物理

# 集団思考 (groupthink) とは何か

## 複合集団における集団思考の可能性

東京都立大学 松井 亮太

福島第一原子力発電所事故の背景には、原子力関係者の集団思考 (groupthink) があったとの指摘がいくつか見られる。しかし、集団思考という現象について、国内で十分に説明されているとは言い難い。そこで本稿では、集団思考とはどのような現象であり、どうすれば防げると考えられているのかを解説する。さらに、筆者のこれまでの分析を踏まえて、「複合的集団思考」という新しい概念を提示する。

**KEYWORDS:** *groupthink, Fukushima daiichi accident, inter-organizational relations, testimony, complex-groupthink.*

### I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、福島第一事故)から8年以上経過した現在においても、東京電力旧経営陣の強制起訴裁判が控訴されるなど、津波対策や事故対策が不十分であった問題に対する社会の関心は高い。

福島第一事故については各事故調査報告書や報道等において様々な問題が指摘される中、3.11前の日本の原子力関係者が集団思考(グループシンク)に陥っていたとの指摘もいくつか見られる。例えば、国会事故調の委員長を務めた黒川清氏は、著書『規制の虜』で「福島第一原発事故も、グループシンクの愚によって引き起こされたものといえる」(p.165)と述べている。しかし、同書を含めて日本国内の刊行物では、集団思考に関する詳しい説明や議論は十分にされていない。

集団思考 (groupthink) とは、米国の社会心理学者アーヴィング・ジャニス (Irving Janis) が提唱した概念であり、ジャニスの主要な著書として、1972年出版の『Victims of Groupthink』<sup>1)</sup>と1982年出版の『Groupthink』<sup>2)</sup>がある。後述するとおり、ジャニスの集団思考は「先行要因」「メカニズム」「集団思考の症状」「欠陥的意思決定」の4つのフレームから構成されるモデルであり、単に「愚かな集団」を意味するものではないが、ジャニスの著書が邦訳されていないこともあり、集団思考に対する誤解も少なくない。

そこで本稿では、「そもそも集団思考とは何か」「集団思考はどうすれば防げるのか」というポイントを、ジャ

ニスの集団思考モデルに基づいて解説する。さらに、筆者がこれまで行ってきた政府事故調査委員会のヒアリング記録(調書)<sup>i)</sup>の分析結果を踏まえて、複合集団における集団思考の可能性を議論する。

### II. 国内外の集団思考研究

ジャニスの集団思考モデルの詳細は次章で述べることにして、ここでは集団思考に関する国内外の研究状況を概観する。

海外の学術文献データベース Web of Science<sup>ii)</sup>と国内の学術文献データベース J-STAGE<sup>iii)</sup>を用いて、集団思考に関する文献を調査した結果、Web of Scienceで405件、J-STAGEで26件の文献が抽出された(表1)。なお、いずれもフィルターを設定していないため、ジャーナル掲載の査読付論文だけでなく学会予稿集(プロシーディングス)なども含まれる。

ここで注意しなければならないのは、日本語の「集団思考」には、ジャニスが提唱した「groupthink」だけでなく、教育現場で使われる「集団思考<sup>iv)</sup>」という用法が存在する点である。そこで、J-STAGEで抽出された26件の文献をそれぞれ確認したところ、後者(教育現場)の用法

<sup>i)</sup> 政府は2014年、本人の同意が得られた調書267件(249人分)を公開した。

<sup>ii)</sup> 180,000以上の学会誌と80,000冊以上の書籍をカバーする世界最大級のオンライン学術文献データベース。

<sup>iii)</sup> 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)が運営する国内最大級のオンライン学術文献データベース。

<sup>iv)</sup> 教育現場で使われる集団思考(集団的思考)とは、生徒同士に意見交換させて合意へと到達するプロセスのことをいう。

*What is Groupthink? The Possibility of Groupthink in Complex Organizations* : Ryota Matsui.

(2020年1月22日受理)

表1 集団思考に関する文献調査

	Web of Science(海外)	J-STAGE(国内)
調査日	2020年1月4日	2020年1月4日
検索条件	groupthink	集団思考, 集団的浅慮, 集団的浅りよ, 集団浅慮, 集団浅りよ, 集団愚考, グループシンク, groupthink
文献数	405件	26件

(注)J-STAGE の調査では, groupthink の主な日本語訳を用いた。

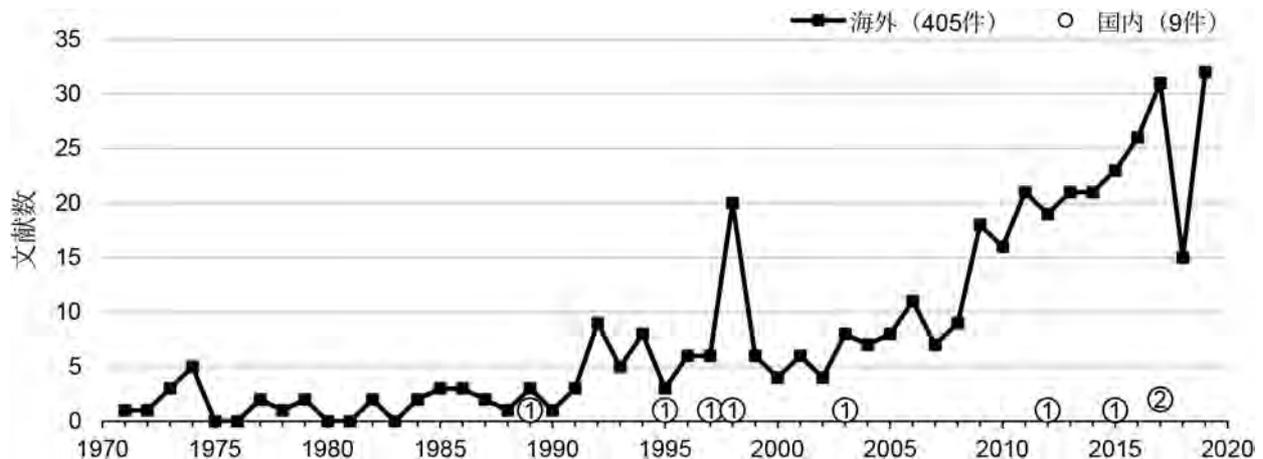


図1 海外と国内の集団思考研究の推移

(出所) Web of Science および J-STAGE のデータを基に作成。

に該当する文献が17件含まれていたため、これらを除外すると、ジャンニスの「集団思考(groupthink)」に関する用語がタイトル・抄録・キーワードに使われている日本国内の文献は9件であった。このうち、ジャンニスの集団思考モデル(後述の図2)を用いて説明している文献は、筆者の学会発表の予稿1件のみである<sup>3)</sup>。なお、当該研究は、日本経営倫理学会誌(第27巻)に「福島第一原子力発電所事故前の津波想定における集団思考」として掲載されている<sup>4)</sup>。

図1は、Web of Scienceで抽出された405件とJ-STAGEで抽出された9件の刊行年毎の推移を示している。ジャンニス(1972)が著書『Victims of Groupthink』を出版したのは、今から40年以上前のことである。この間、世界では様々な組織的失敗(組織事故など)が起り、その度に集団思考が注目されてきた。例えば、チャレンジャー号事故、コロンビア号事故、9.11米国同時多発テロなどの大事故・大事件は、集団思考の観点から分析されている。なお、1998年に刊行数のピーク(20件)が見られるが、これは『Victims of Groupthink』の出版から25年経過し、行動科学分野のトップジャーナルOrganizational Behavior and Human Decision Processes誌で集団思考特集が生まれ、集団思考に関する論文が13件掲載されたためである。2009年以降は毎年15件以上の研究が行われおり、集団思考という概念は依然として世界で注目されている。欧米における社会心理学の主要

テキストはジャンニスの集団思考モデルを取り上げており、行動科学分野において最も影響力を持つ理論の1つとして位置付けられている<sup>v)</sup>。

一方、日本でも組織的失敗はしばしば発生してきたが、集団思考の研究はほとんど行われていない。この理由は明らかではないが、日本ではジャンニスの著書が翻訳されていないことも理由として考えられる。

### III. 集団思考(groupthink)

#### 1. 集団思考とは何か

ジャンニスは、ある日、娘のシャーロットが高校のレポート課題「ピッグス湾の大失敗」で助言を求めてきたことがきっかけとなり、能力の高いエリート集団がなぜ愚かな意思決定をしたのか不思議に思い、米国政府の意思決定について研究するようになった。「groupthink」という言葉は、ジョージ・オーウェルが小説『1984』で使った「doublethink」や「crimethink」という言葉を真似たものである<sup>vi)</sup>。オーウェルの「doublethink」や「crimethink」と同様に、「groupthink」という言葉にも悪い意味が意図的に込められている。

ジャンニスは1972年、研究成果を取りまとめた著書

<sup>v)</sup> ただし、集団思考モデルに対する批判も少なくない。

<sup>vi)</sup> groupthinkという言葉は初めて使ったのはウィリアム・ホワイト(1952)とされているが、ジャンニスのgroupthinkとは異なる概念である。

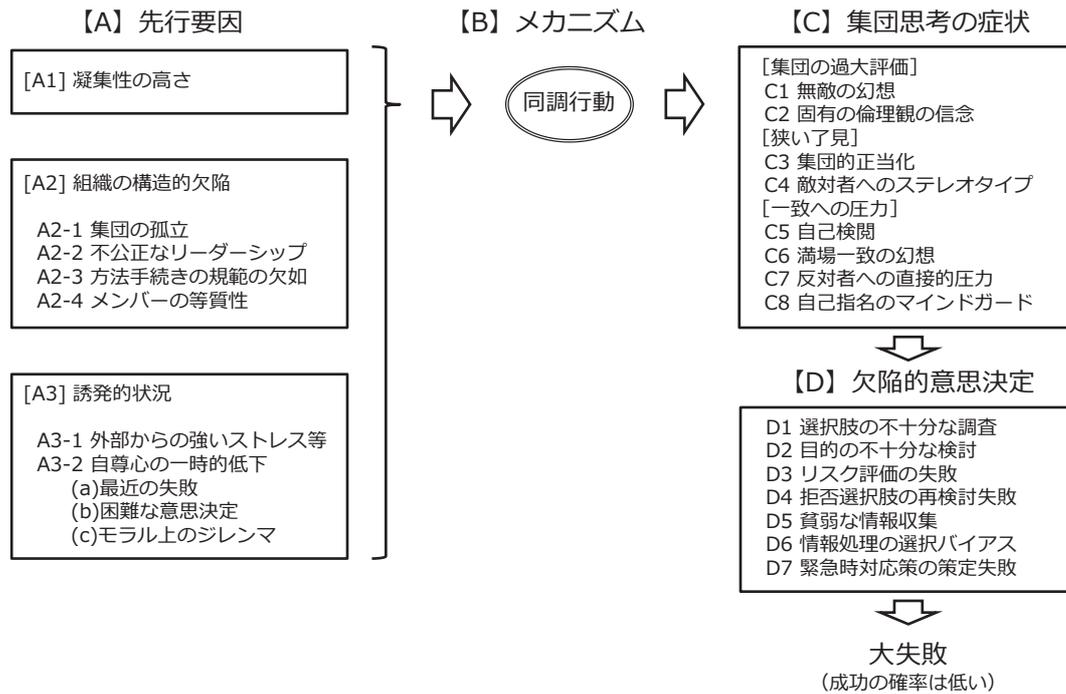


図2 ジャニスの集団思考モデル

(出所)Janis(1982, p.244)を基に作成.

『Victims of Groupthink』を出版した<sup>vii</sup>。同書では、ピッグス湾事件、北朝鮮半島への侵攻、真珠湾攻撃への準備、ベトナム戦争の拡大という米国政府が意思決定を誤った4つの失敗事例を分析し、これらの背景には集団思考があったと結論づけた。また、キューバ危機への対応およびマーシャルプランの策定という2つの成功事例も分析し、これらの事例では集団思考に陥らずに優れた意思決定を行ったことから、集団思考の防止策を考案した。

その後、ジャニスは集団思考の研究をさらに進めて、1982年に著書『Groupthink』を出版した。同書では、1972年の分析にウォーターゲート事件の失敗事例を追加し、集団思考モデルを一部修正した。それ以来、groupthinkとは1982年のモデルの意味で使われるのが一般的となっている。

図2に示すとおり、ジャニスの集団思考モデルは「A：先行要因」「B：メカニズム」「C：集団思考の症状」「D：欠陥的意思決定」の4つのフレームから構成される。3種類の先行要因(A1, A2, A3)が存在する集団には同調行動(B)が見られるようになり、それによって集団思考の症状(C1-C8)が生じる。集団思考に陥った集団には欠陥的意思決定(D1-D7)が現れ、最終的に大失敗(fiascoes)に至る可能性が高まる。なお、すべての要素が満たされなくても、大部分が該当すれば集団思考に陥っていたと判断される。

## 2. 集団思考の防止策

ジャニスは、キューバ危機への対応およびマーシャルプランの策定という2つの成功事例の分析結果から、集団思考の防止策として以下の9点を提案している。

- ①批判的評価者の設定：リーダーは、それぞれのメンバーに批判的評価者の役割を与え、メンバーが反対意見や疑問を発言するプライオリティを高めるべきである。
- ②公正なリーダーシップ：リーダーは最初から好ましい選択肢を示さず、公正なリーダーシップに努めるべきである。
- ③計画策定グループと計画評価グループの独立：それぞれのグループを独立させ、グループごとに別のリーダーの下で活動するべきである。
- ④複数のサブグループの設置：検討グループは、時々、2つ以上のサブグループに分かれ、異なる議長の下で別々に検討を進めるべきである。
- ⑤所属組織からのフィードバック：意思決定会議に関わっているコアメンバーは、その状況を自分の所属組織の信頼できる仲間に定期的に相談し、フィードバックを得るべきである。
- ⑥外部意見の取り込み：コアメンバー以外の外部専門家や適任者を会議に1人以上参加させ、コアメンバーの考えに対して異論を言うよう促すべきである。
- ⑦悪魔の代弁者(devil's advocate)：すべての会議において、少なくとも1人は悪魔の代弁者の役割を与えるべきである。
- ⑧敵対者の分析：敵対国家や敵対組織に関わる意思決定

<sup>vii</sup> ジャニスが初めて groupthink の概念を提示したのは、1971年の Psychology Today 誌の記事である。

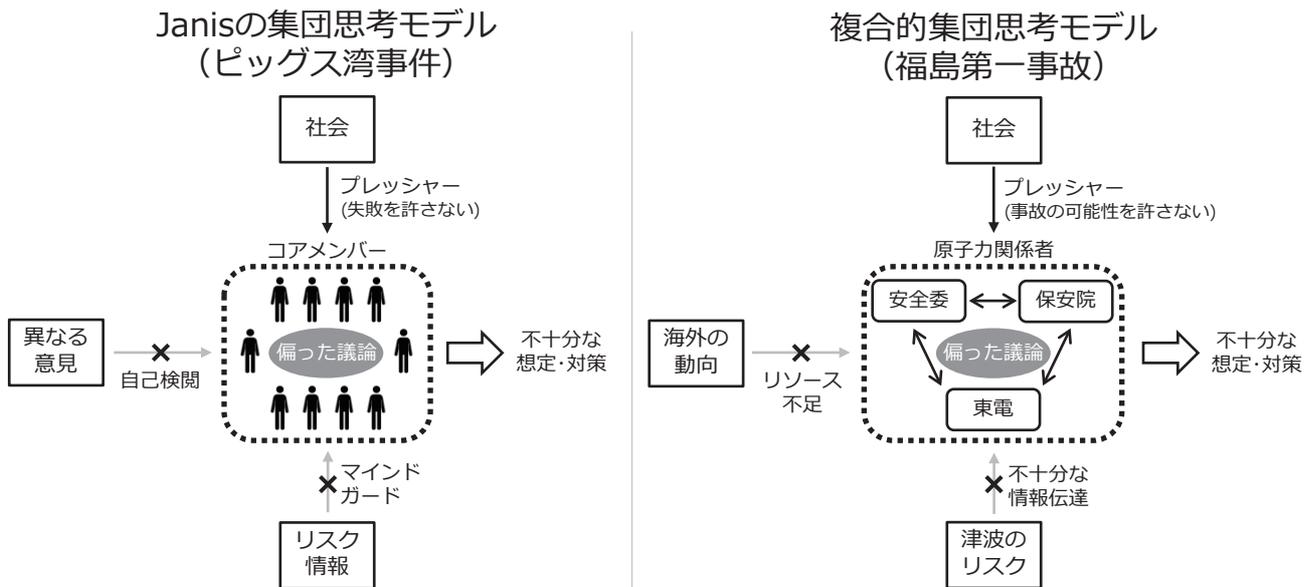


図3 ピッグス湾事件と福島第一事故の比較

の場合、「その敵対者から発せられたすべての警告の分析」および「敵対者の取り得るシナリオの検討」のためにまとまった時間を取るべきである。

- ⑨第2ラウンド会議：いったん最善と思われる選択で合意したら、意思決定集団は第2ラウンド会議を開催し、それぞれのメンバーは残された懸念事項をできるだけ鮮明に発言し、最終的な意思決定を下す前に全体を再考するべきである。

#### IV. ピッグス湾事件と福島第一事故の比較

以下では、ジャニスが分析した失敗事例の1つ「ピッグス湾事件」と福島第一事故を集団思考の観点から比較する。

ケネディ政権が失敗したピッグス湾上陸作戦は、もともと政敵のニクソン(当時はアイゼンハワー前政権の副大統領)が提案したものであった。大統領選で歴史的勝利を取ったケネディ大統領は1961年1月、大統領就任直後にCIAからピッグス湾上陸作戦の説明を受けた。ケネディ政権のコアメンバーは満場一致で作戦を承認し、1961年4月17日に作戦を執行したが、作戦は1つも計画通りにいかなかった。翌日には、上陸部隊がカストロ率いるキューバ軍に包囲され、作戦は完全な失敗で終わった。

図3(左)は、ピッグス湾上陸作戦の意思決定における主要な問題を、集団思考の観点から整理したものである。前述のとおり、ジャニスの集団思考モデルは図3に示した要素だけではないが、ここでは原子力関係者の置かれた状況と対比するために簡略化した図を用いる。

ピッグス湾上陸作戦は、もともと無理な作戦であり、ケネディ政権のコアメンバーの中には、反対意見を持つ

者もいた。しかし、ケネディ大統領の前では、誰も反対意見を発言しなかった(自己検閲)。大統領補佐官のシュレシンジャーは、ケネディ大統領以外のメンバーに反対意見を主張していたが、ケネディ大統領の弟ロバート・ケネディが「大統領はもう作戦決行を決めている。これ以上、反対意見を言うな。今は、全員が大統領をサポートすべき時だ」と説得した(マインドガード<sup>viii</sup>)。ピッグス湾上陸作戦に関するリスク情報や反対意見はいくつも存在したが、自己検閲やマインドガードにより遮断され、ケネディ大統領の出席する重要な会議では作戦に肯定的な意見ばかりが出された。さらに、コアメンバーは社会から強いプレッシャーを受けていた。そして、想定や対策が極めて不十分なまま作戦が実行され、大失敗に終わった。

次に3.11前の日本の原子力関係者について見ていく(図3右)。筆者が政府事故調の調査を分析したところ、原子力関係者に上記の自己検閲やマインドガードという症状はそれほど顕著ではなかった。一方、ジャニスのモデルとは異なる要因によって原子力関係者に必要な情報が十分伝わらなかったと考えられる。1つ目の要因は、原子力関係者と津波専門家との間の「不十分な情報伝達」である。各事故調報告書や東電旧経営陣裁判などでも明らかにされているとおり、保安院や東電は福島沖の巨大津波の可能性を認識していたが、津波という自然現象の特性や脅威は、津波専門家から原子力関係者に十分伝わっていなかった<sup>ix</sup>。逆に、原子炉のリスク情報が津波専門家に十分伝わらなかったため、津波専門家も強い危機感

<sup>viii</sup> ボディガードが大統領の身体にダメージを与えるような物理攻撃から守るために、マインドガードは大統領の自信にダメージを与えるような情報から守ろうとする。

<sup>ix</sup> 詳しい議論は松井(2020)を参照されたい。

を抱かなかった。

2つ目の要因は「リソース不足」である。日本の原子力関係者は2000年以降、東電トラブル隠しや中越沖地震などへの対応にリソースを奪われ、海外の動向を十分に把握できなかった。そのため、欧米諸国の原子力発電所ではテロ対策や洪水対策などが進められていたが、日本ではそれらの対応が遅れた。

外部事象の過酷事故対策(AM)や津波想定の見直しの必要性は事故前から指摘されていたが、安全委員会・保安院・東電の議論はトラブル隠し対応や耐震などに偏り、いずれのプレイヤーも十分に議論しないまま3.11を迎えた。

このように、ジャニスのモデルとはメカニズムが異なるものの、情報伝達や議論に問題が生じ、想定・対策が不十分になるという構図は共通している。また、ケネディ政権のコアメンバーが社会から強いプレッシャーを受けていたのと同様に、原子力関係者も社会から「事故の可能性を許さない」という強いプレッシャーを受けていた。集団に対する過度なプレッシャーは、特殊な思想を生み出す源泉となる。

## V. 複合集団における集団思考の可能性

ジャニスは10人程度の小集団を想定して集団思考モデルを提唱したのであるが、その後の研究によって、集団思考は決して小集団だけに限定されるものではなく大集団や複合集団でも起こることが示されている。しかし、そのメカニズムは十分に解明されていない。

3.11前の原子力関係者に「日本で重大事故は起こり得ない」との思想が広く存在したことや、地震対策に注力するあまり他の自然災害の検討が不十分になったことは、集団思考の症状および欠陥的意思決定に該当するものである。しかし、それらはジャニスの集団思考モデルとは異なる要因(組織間の不十分な情報伝達など)によって生じたものと考えられる。

そこで、ジャニスの集団思考(groupthink)と差別化する目的で、複合集団で発生する集団思考を「複合的集団

思考」(complex-groupthink)と呼ぶことを提案したい。小集団と同様に、複合集団も特殊な思想状態に陥る場合があるが、その要因やメカニズムは小集団と複合集団で異なると考えられる。図3では、福島第一事故の分析結果から筆者が重要と考えた要素をいくつか示したが、複合的集団思考の発生に寄与する要因は他にも存在するであろう。これらは福島第一事故の一部の要因に過ぎず、津波専門家の中で意見が収斂していなかったことや電力自由化の影響など、様々な要因が複雑に相互作用した結果、事故が発生したものと考えられる。また、本稿は集団思考の観点から福島第一事故の分析を試みたが、当然ながら集団思考ですべて説明できるものではなく、リスクガバナンスや地域社会との関係など、考慮すべき問題は多岐にわたる。

これまで日本では集団思考の研究がほとんど行われてこなかったが、原子力業界に限らず、様々な分野で組織的な失敗が起きている。それらの失敗事例を複合的集団思考という新たな視点で分析し、複合集団が集団思考に陥るメカニズムのさらなる解明、および、防止策の構築が求められる。

### — 参考資料 —

- 1) Janis, I. L. (1972). *Victims of groupthink: A psychological study of foreign-policy decisions and fiascoes*. Boston, USA: Houghton Mifflin.
- 2) Janis, I. L. (1982). *Groupthink: Psychological studies of policy decisions and fiascoes*. Boston, USA: Houghton Mifflin.
- 3) 松井亮太(2017)「集団思考の罫：福島原発事故の失敗の本質についての一考察」『組織学会大会論文集』6(2), 14-19.
- 4) 松井亮太(2020)「福島第一原子力発電所事故前の津波想定における集団思考：調書の質的データ分析を通して」『日本経営倫理学会誌』27, 169-185.

### 著者紹介

松井亮太 (まつい・りょうた)

東京都立大学大学院社会科学部研究科

(専門分野/関心分野)意思決定, 行動科学, 集団心理, 組織間関係, 組織事故

## 「核のごみ」の最終処分に関する対話型全国説明会

フリージャーナリスト 井内 千穂

2017年7月に「科学的特性マップ」を公表してからスタートした原子力発電環境整備機構(NUMO)による対話型全国説明会。3年目に入り、全国行脚も2巡目だと言う。最近はどうな様子なのだろうか？1月下旬、沼津での説明会に行ってみた。

なんと、参加者は私を含めてわずか7人。会場の中央に設けられたテーブルを囲んで着席すると、「主催者のほうが多いじゃないの」ともう一人の女性参加者がつぶやいた。あとは男性ばかり。「参加者は50代以上の男性で地層処分に慎重または反対の人が多い」というNUMO広報から聞いていたプロフィールとほぼ合致する。この人数なら少なくとも一人一度は発言の機会があり、担当者の回答も丁寧に、雰囲気自体は悪くなかったが、この規模の「対話」で国民の理解が広がる気はしなかった。唯一の収穫は、カナダで最終処分場の候補地が絞り込まれつつあり、それはフィンランドやスウェーデンとも違って、「公募制」がうまく行った稀有な例であるという最近の情報を聞いたことだろうか。

富士山を望み、科学的特性マップ上「好ましくない特性」の火山帯に近い沼津だから参加者が少なかったのかもしれない。昨年末12月に青森県の八戸と弘前で開催された説明会にはそれぞれ40人ほどの参加があったというから、原子力関連施設との距離によっても関心の高さが違うのだろう。

海外の先進地がどのようにして候補地を絞り込んで行ったのか、その手法を詳しく知りたいところだが、漠然と全国を巡回する対話型説明会に疑問を感じざるを得ない沼津の会であった。

## Column

### 困るのは未来の人？

京都教育大学附属京都小中学校 上野 和花

今年1月に原子力環境整備機構(NUMO)主催の地層処分実現に向けた提言コンテストがあり、どうすれば地層処分を自分ごととして考える人を増やせるのか、具体的かつ実現可能な方法の提言を募集していた。私は自分の経験をもとに「学校教育で具体的に取り扱う」と提言をした。他の参加者からも同様の提言があり、中でも間もなく教師となる教育学部生の意見が自分と共通していたことに勇気づけられた。

つい先日、春から小5になる妹が塾でエネルギー問題について習ったと聞いた。テキストに掲載された燃料プールの写真を見た私は、NUMOが子ども向けに製作した地層処分についてのDVD動画を見せながら詳しく妹に説明してみた。わかりやすく話したつもりなのだが理解できた内容は半分程らしく、伝える事の難しさを痛感した。「困るのは誰やる？」と質問すると「んー、未来の人！」と自分ごととは程遠い返答であった。

困るのは(自分には関係ない)未来の人だと妹が感じたのは何故か？私の住んでいる京都から原子力発電所は遠い存在で電気はスイッチを入れれば使えるし核のごみなんて聞いたこともない…初めて聞いた妹には自分の生活と関わりのあることだとは到底思えないのだと気がついた。

教育と一概に言っても、取り入れ方を工夫しなければ心を動かす事は出来ず、知識を得るだけでは自分ごととして捉えて、解決に向かう行動には繋がらないと実感した。

## 高校2年生になった今の私の問題意識

東京学芸大学附属国際中等教育学校高校3年生 小澤 杏子

1年前、私は日本原子力学会の時論に寄稿する機会をいただいた。テーマは「個々の原発問題に対する意識の差」であった。当時、私は全国の高校生たちとディベートやディスカッションを繰り返したり、講演会に参加することで、様々な刺激を受けていた。昨年春には福島第一原子力発電所、夏休みには北海道の稚内にある幌延深地層研究所の施設見学に行く機会も作っていただいた。高校生にしてこのような貴重な経験ができるような環境にいる自分は、とても恵まれている気がする。

私は高校2年生の終わりを迎えている現在(掲載される5月号の頃には高校3年生)においても、国内における「原発問題」に対する国民の意識格差に問題意識を抱いている。意識格差が埋まらない一つの要因として、若者に対する「原発問題」の教育の浅さがあるのではないかと考えている。私は中学3年の時に受けた原発に関する学習をきっかけとし、新聞投稿や様々なスタディツアーに積極的に参加するようになった。そのようなことを経たことで、私は今まで全く知ることのなかった現実を目の当たりにすることができた。「原発問題」は、教科書に書かれている内容よりずっと深い。教科書の「原発問題」の学習のみで大人になっていたら、私は自分が今までいかに無知で浅はかな見解を持っていたのかを知ることができなかったであろう。将来、私たちの世代が直面する問題の一つである「原発問題」の真相を知らないなんて、恥ずかしい。複雑な「原発問題」と向き合い、解決に一步でも前進させるためには、現状を把握できるような機会を増やすべきである。

## Column

### プラハ共産主義博物館を訪れて

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

プラハよりこんにちは。2020年元旦に、チェコの首都プラハにある共産主義博物館(Muzeum komunismu)へ観光に行きました。共産主義博物館では第二次世界大戦後の1948年から、1968年の変革運動プラハの春の8カ月間や、チェコスロバキアの社会主義政権が崩壊し、民主化が実現した1989年までのチェコの歴史や街、人々の生活の様子を、当時の写真や新聞などの展示物と共に見ることができます。

印象的だったのは、当時の小学校の教室の模型が展示されていたコーナーです。当時の防災訓練の様子や訓練に使用されていた防具が展示されており、学童に手袋や頭部を守る頭巾のようなものの他に、化学兵器や放射線から身を守る目的で、ガスマスクやビニール製のレインコートが配布されていたとの説明がありました。当時使用されていたポスターのレプリカには、ガスマスクの使用法がイラストと共に記載されており、チェコスロバキアの人々にとって、敵国から攻撃を受けることは、かなり身近であったことが伺えました。このような第一次世界大戦から冷戦時代に取り残された、核や化学兵器を用いた敵国からの攻撃への対策は、旧東側諸国で数々見受けられます。スロバキアでは約70万人を収容することができる巨大な核シェルターがブラチスラバの地下に建設されており、隣国ハンガリーでは日本の原爆の影響を受けて建設されたHospital in the Rockという病院が設立されています。

このように、敵国の侵略に対する対策はなされていましたが、1986年に発生したチェルノブイリ原子力発電所事故に関する報道が、当時の主要メディアであったRudé právoによってされたのは、事故発生4日後の7ページ目の一角で、『特筆するほどではない、よくある事故』と説明されていたそうです。

## 私にとっての復興

福島県立安達高等学校 3年 服部 杏菜

伯父の家の敷地内に一時的に埋設されていた除去土壌が、中間貯蔵施設へ運び込まれるために掘り起こされた。その話を伯父から聞き、私の頭の中に「復興」の文字が久しぶりに浮かんできた。しかしそれは、復興が進んでいると感じたからではない。私は、復興とは一体何なのだろうと考えていたのだ。もちろん、福島の復興は進んでいるとよく耳にするので、復興していないことはないのだろう。ではその復興はいつ終わるのか。環境が、心が、どの状態になれば復興が完結したと言えるのか。きっとそれは人それぞれだが、私はそこではたと気付いた。もしかしたら私は、風化と復興をほぼ同義で捉えているのではないかということに。これは自分自身心底怖かったし、同時に風評被害を払拭し復興を進めようという姿勢に疑問を禁じえなかった理由もわかった気がした。たしかに一福島県民の私は、風評被害がなくなるに越したことはないと思っている。その上で、どうしても前向きすぎるくらいに福島の食の安全性や売上の上昇をアピールしたほうが良いということもわかる。ただ、出荷されているのは基準値を下回っている物だけだと知りながらもやはり不信や不安が取り除けない人などの存在をないことにはしたくないし、当時の、福島県産のものは危険だという風潮も忘れたくない。復興とは風化を意味すると思込んでいる私は、前向きに福島をアピールし風評被害を払拭させることで、なかったことにされる事があるのではないかと危惧していたのだ。あくまで私の中での話だが、復興は終わらないものなのだろう。むしろ、復興＝結果オーライでその文脈を忘れてしまうような私は、絶対に終わらせてはいけない。

## Column

### 「福島の復興に責任をとる」ということ

フリーライター 服部 美咲

令和初の正月、東京電力福島第一原発事故による避難指示が解除された福島県大熊町大川原で、餅つき大会が開かれた。大熊の新米を搗き、舌鼓をうつ人々の笑い声が広がる。中には東京電力の社員の姿もあった。

東京電力の経営陣(当時)3名が、原発事故を起こした業務上過失致死傷罪で強制起訴され、東京地方裁判所で無罪の判決が下った。争点は2つだ。巨大津波の襲来を予見できたか。原発事故を未然に防ぐことができたか。判決ではいずれも否定されたが、裁判で明確にできるのは刑事責任に限られる。東京電力の福島復興本社代表が、地裁判決を受け、「それでも責任は責任です」とコメントした。原発事故を起こした東京電力が、事故の結果に責任を取るとすれば、福島第一原発の廃炉、適切な損害賠償、そして福島の復興が、少なくとも挙げられるだろう。

福島には、今も避難指示が続く地域がある。避難指示が解除されても、地域コミュニティの形は大きく変化した。溶けた核燃料を除き、事故を起こしたプラントを地上から撤去することはできても、かけがえのない故郷は元に戻らない。それでも「原発事故後の日常は自分たちで創る」と前を向く住民がいる。

避難指示が出た地域では、住民が減り、伝統行事の存続が危ぶまれることも少なくない。餅を搗き、新年を故郷で祝いたいという地域住民の思いは、復興の要となろう。住民の新たな日常の風景を支え、ときに祭りを共に楽しむことも、復興への責任の取り方のひとつなのかもしれない。

## 最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構

## 第3回 原子科学の最先端を拓く

R. オルランディほか

東京電力福島第一原子力発電所事故対応では、燃料デブリと闘う未知の領域への挑戦が待っている。安全性の向上や廃棄物問題の解決も必須だ。さらに放射線利用にはイノベーションを誘起する先端技術も求められる。日本原子力研究開発機構の原子力科学研究部門には3つの研究センターがあり、これらの問題に対応するため先端的な研究、基礎基盤研究や応用研究を行っている。

**KEYWORDS:** JAEA, Fukushima daiichi NPS, Nuclear Science, Tandem Accelerator, Einsteinium, SPring-8, Electron spin, Actinides, Ceramics

日本原子力研究開発機構の原子力科学研究部門には先端基礎研究センター、原子力基礎工学研究センター、物質科学研究センターという3つの研究所がある。今回はこのうち、先端基礎研究センターで行っている核分裂の根幹に迫る研究や、量子力学を駆使した新しいエネルギー変換やアクチノイドの研究、原子力基礎工学研究センターで行っている新しい原子力材料開発への取り組みなどについて紹介する。

## I. 重元素に隠された謎に迫る

## 1. 99番元素アインスタイニウム

日本原子力研究開発機構は米国エネルギー省(DOE)のオークリッジ国立研究所との協力の下で、0.5 μgの人工元素アインスタイニウム(Es)を特別に入手した。Esの取り出しは米国でも2003年以来のこととなり、日本がそれを入手するのは初めてである。なお原子力科学研究部門の先端基礎研究センター、物質科学研究センター、原子力科学研究所では、このEsを用いた以下の研究を進めている。

東海タンデム加速器での実験では、100番元素フェルミウム(Fm)以上の重い原子核の核分裂と核構造の解明を、またSPring-8の大型放射光施設では、Esと水分子

との結合の仕組みを明らかにする予定である。いずれも原子力機構の施設と独自に開発した装置を利用した研究である。

原子は原子核と電子から成り、核の周りを動く電子の軌道半径に比べると、原子核のサイズはとても小さく、1万分の1程度である。原子核は陽子と中性子でできており、陽子の数によって元素が決まっている。陽子の数が同じで質量数が違う原子核を同位体と言い、同じ元素でも複数の同位体が存在する。

今回入手したEs(陽子数は99)は質量数が254なので $^{254}\text{Es}$ と表記する。物理学者アインシュタインの名に由来するEsは、1952年に水爆実験で発見された。現在は同位体製造用のための専用の原子炉で生成される。しかし生成される量が少なく、入手は困難である。さらに $^{254}\text{Es}$ は、276日という短い半減期を持つ。このような理由から $^{254}\text{Es}$ の性質はほとんど理解されていない。一方、この同位体は原子核実験で利用できる標的原子核として最も重い元素、かつ最も多い中性子数を有し、超重元素の性質を調べるのに適している。

核分裂は1938年に発見され、その4年後にはフェルミらが最初の原子炉で臨界を達成した。今では、核分裂は重要なエネルギー生成はもとより、研究用原子炉などを通じて基礎科学を支えている。核分裂現象の深い理解や新現象の発見は、社会基盤や知の探究にまで、例えば宇宙における元素合成過程や超重元素の存在限界にまで影響を及ぼす。

最も知られている核分裂は、原子炉の中で起っているウランの核分裂であろう。 $^{235}\text{U}$ が1つの中性子を吸収

*The cutting edge of nuclear science* : Riccardo Orlandi, Kentaro Hirose, Tsuyoshi Yaita, Hiroshi Yamagami, Jun'ichi Ieda, Shinsaku Kambe, Norito Isikawa.

(2019年12月9日 受理)

■前回のタイトル

第2回 1Fの廃炉と環境回復をめざして(2)

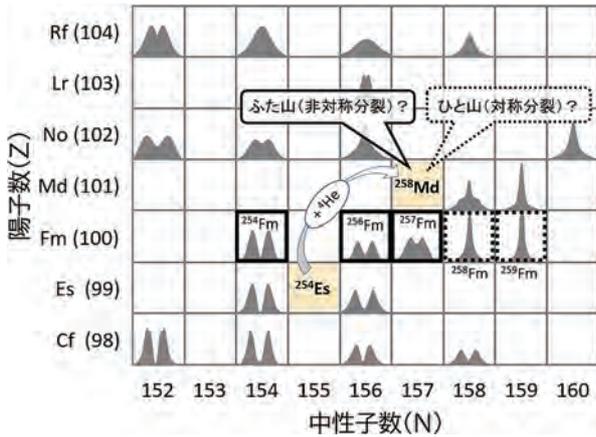


図1 メンデレビウム 258 の原子核のちぎれ方

し、<sup>236</sup>U になった後、2つの原子核に分かれる。分かれた後の2つの原子核を核分裂片というが、その質量数の分布はふた山であり、重さが異なる核分裂片が生じる(非対称核分裂)。

一方、1970年代後半、Fm 同位体の核分裂では、質量分布が劇的に変化することが発見された。Fm 同位体 254, 256, 257 まではウランと同様に核分裂後の核分裂片の重さは異なるが、中性子がたった1つ多い <sup>258</sup>Fm では2つの核分裂片の重さがほとんど同じものに分裂する(対称核分裂)というユニークな現象が発見された。このようなわずかな違いで核分裂の仕方が変わるようなことは、他の元素でも起きるのか? このようなユニークな分裂は超重元素でも普遍的に存在するのか?

これを調べるために原子力機構では、とても小さな標的にピンポイントでビーム照射できるタンデム加速を使い、ヘリウム(He)を Es にぶつけて 101 番元素であるメンデレビウム(Md)という重い元素をつくる実験を行い、それがどのような分裂の仕方をするのかを観測した。

<温度の違いで核分裂の仕方が大きく変わる>

その結果、「エネルギーをわずかに変えただけで、分裂の仕方は大きく変わる」ことがわかった。Es に He をぶつくと、その衝突エネルギーによって原子核の温度が上昇し、つくられた Md の核分裂において対称と非対称の違いをもたらすことがわかった。Fm より重い元素の核分裂はこれまで、外からのエネルギーが与えられない自発核分裂だけが調べられてきたが、今回の実験によって、わずかな温度変化で分裂の仕方が変わることが初めて観測された<sup>1)</sup>。

## 2. Es から“安定の島”へ

宇宙でつくられる超重元素をより高い精度で理解するため、今後は“安定の島”とよばれる領域に向かって核分裂を調べていく。原子核の安定性は陽子や中性子の数に応じて決まっており、特に安定になる場合を魔法数と

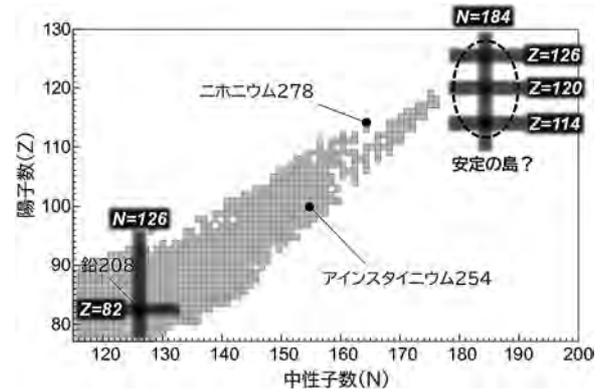


図2 Es から安定の島へ

よんでいる。例えば陽子数も中性子数も魔法数である鉛 208(陽子 82 個, 中性子 126 個)は非常に安定である。もっと重い原子核にもこのような魔法数が存在することが予想されており、その付近に寿命の長い超重元素の領域が存在すると期待されている。これが“安定の島”である。しかしながら、このように重い原子核を生成することは非常に難しいことから、いまだ発見されておらず、核物理の最大の目標の1つとなっている。

安定の島はどこにあるのか? 理論的には陽子数 114, 120 または 126, そして中性子数 172 または 184 の位置にあるだろうと示唆されている。この予想がどれくらい正しいかは、陽子数 100, 中性子数 152, 162 近傍の原子核の励起状態を調べることで推測が可能である。これらの原子核は、いわば安定の島への“航路を示す浮標(ブイ)”である。我々は今回入手した <sup>254</sup>Es に重イオンを衝突させることで、Fm(陽子数 100)や No(ノーベリウム, 陽子数 102)を合成し、それらの励起エネルギーを精密に測る実験を行う予定である。我々は Es から遠い安定の島に向けて出港したところである。

## 3. アインスタイニウム・ブレイク

周期表の中では、原子番号 89 のアクチニウムから 103 のローレンシウムまでの重い元素はアクチノイド系列と分類され、99 の Es もその中に属している。原子力機構ではこのほど、SPring-8 の放射光を利用して、世界で初めて Es の水和構造を明らかにした<sup>2)</sup>。

これまで化学の世界では、アクチノイド系列の重い元素は、原子番号が一つ一つ大きくなるとイオンの大きさが小さくなってくと予測されていた。この現象をアクチノイド収縮という。ところが 99 番目の元素である Es を計測してみると、それが Es のところで直線的な減少からはずれ、不連続になる「アインスタイニウム・ブレイク」を発見した。

水溶液中でイオンがそのまわりにいくつかの水分子をひきつけて、溶質と水との相互作用を行うことを水和と言う。原子力機構では、この「アインスタイニウム・ブレ

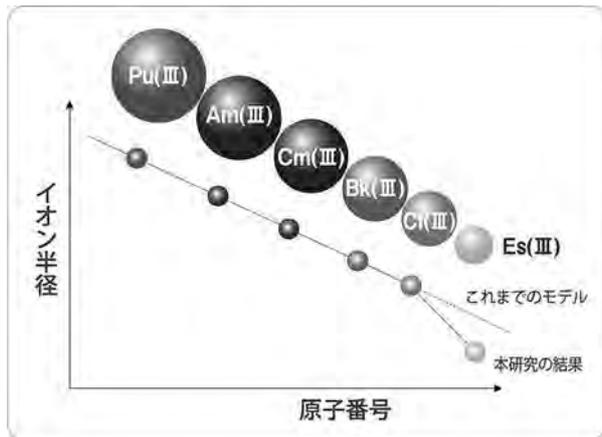


図3 アクチノイド系列元素の原子番号とイオン半径

イク」の謎を解明するために、Esの水和原子間を測定した結果、Esの水和構造は原子番号ではその前の98番カリフォルニウムと全く同じだったことがわかった。また、Esはカリフォルニウムと構造が同じであるものの、イオン半径には急激な収縮が認められた。

この不思議な現象は水和という化学的アプローチではどうしても説明がつかないため、電子の量子構造、つまり電子軌道の占有数の変化でイオン半径を計算してみたところ、「原子自体が変動して」イオン半径が小さくなったことがわかった。

このアインスタイニウム・ブレイクの発見をきっかけに、これまで保留になっていた重い元素の非常に不思議な現象の多くが、電子の量子構造が変わるといふ今回の結論で解決できる可能性がある。

## II. 電子の磁力の源、スピンの謎に迫る

<エレクトロニクスからスピントロニクスへ>

物が壁をすり抜ける。常識外れのことが、量子力学の描き出すナノの世界では起きる。実はこの現象、磁気記憶素子の性能向上に役立つなど、すでに日用の電子機器に利用されている。役割を担うのは物質中の電子である。一つひとつの電子は、決まった値の電荷(電気素)とスピン(磁気素)をもつ。電子の電荷の流れ「電流」を制御・利用するのがエレクトロニクスであり、情報通信社会を支える基盤技術となっている。だが増え続ける電子機器の利用はエネルギー消費の観点から将来的な問題を抱えている。例えば、最近その役目を終えた京コンピュータ(スパコン)では、計算機で発生する膨大な廃熱を処理するため計算機棟と同規模の冷却施設棟が必要であった。すなわち、「情報はエネルギーを大量に食う」。しかも、情報通信量の増大は今後も避けられない。

そこで注目されはじめたのが、磁気を担う電子スピンの流れ「スピン流」である。スピン流に基づく新しい科学技術は「スピントロニクス」と呼ばれ、世界中でその研究が盛んだ。冒頭の磁気記憶素子でも、スピン流が厚さ数

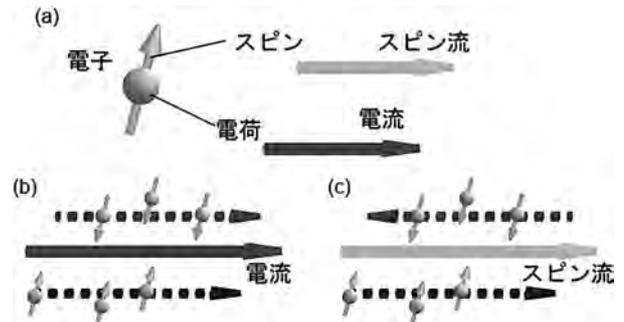


図4 電子の持つ電荷、スピンとその流れ

原子層の障壁をすり抜ける際の特性を磁気情報の読み出しに利用している。スピン流を用いれば、電子機器の発熱ロスを抑えられる、ナノスケールで効率的な磁気情報の読み書きが実現される、など大幅な省エネにつながる魅力的な機能が実現される。しかし、電流と比較して、スピン流の利用はごく最近はじまった。その理由は、スピン流の生成手段が限られていたからだ。

我々を含む日本の研究者が、このスピン流生成手段の開拓で世界をリードしている<sup>3)</sup>。微細加工とスピン計測の急速な技術進展により、これまでに電気、磁気、光、熱、振動、回転、流体渦といった外部入力からスピン流を作り出せることが明らかにされてきた。現在、世界の主要国でスピン流に基づく省エネルギー電子機器開発の大規模なプロジェクトが立ち上がり活況を示している。

その具体例の一つを紹介する。

高度情報化社会を迎え、扱われる情報量が爆発的に増加している現在、コンピュータ中で情報の書き込み・読み出しを行うメモリのさらなる高性能化が要求されている。2008年に、ワイヤ状に加工した磁石の中でN極およびS極(磁極)の向きをデジタル情報として担わせ、それらをシフトさせることで情報の読み出しを行う「レーストラックメモリ(RTM)」がIBMから提案された。

磁石をマイクロな視点で見ると、N極とS極の向きがそろった小さな磁石(磁区)の集合体であり、それぞれの磁区は磁壁と呼ばれる磁気の壁により隔てられている。RTMは、この一つ一つの磁区にデジタル情報を担わせ、それらをシフトさせることで情報の読み出しを行うしくみで、磁石が本質的に有する磁極の向きを利用するので原理的に劣化が起こらず、さらに機械的動作が必要ないため高い耐久性を有するという、半導体を凌ぐ究極のメモリとして期待されている。

しかし、電圧制御による磁区シフト(すなわち磁壁移動)はこれまで秒速1ミリメートル以下のレベルだったが、我々は東京大学や電気通信大学の研究者と共同で、絶縁体を介して磁石に電圧を加える「電界効果」という手法を用いて、秒速100メートルを超える高速な磁気の壁(磁壁: N極とS極の境界)の運動を制御することに世界で初めて成功した<sup>4)</sup>。

この研究成果は電圧による磁壁移動の高速化の可能性を、メモリとして実用可能な速度領域で実証した世界で初めての成果であり、RTMの高速化・省エネ化を実現するための大きな一歩であると言える。

### III. 磁場に負けない超伝導

超伝導現象は電気抵抗が完全にゼロとなるため、リニアモーターカーを始め、実用的な現象として利用されている。しかし、とても低い温度を作らなければならないことや、強い磁場で超伝導が壊れることが強い磁場を発生する超伝導磁石開発を困難にしているといった問題がある。そのため、より実用的な超伝導体の研究が現在も盛んに行われている。現在、原子力機構で精力的に研究を進めているウラン化合物  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  は、磁場に非常に強いという特異な性質を持っており、その原理の解明が重要な課題となっていた。

しかし、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  は核燃料物質であるために取り扱いが難しく、これまでの研究では十分な精度の測定ができていなかった。そこで、原子力機構の施設を活用することで、超純良な単結晶ウラン化合物  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  を新たに合成し、測定に最適な形状に加工した。本試料を用いることで、極低温(約  $-273^\circ\text{C}$ )領域における超高精度での核磁気共鳴(NMR)測定に成功した。核磁気共鳴法は物質中の原子核を通して、核周りの電子をマイクロに調べる手法で、超伝導を作り出す電子スピンの状態を知ることができる。その結果、超伝導を作る電子の状態が磁場でまったく変わらないことを明らかにした<sup>5)</sup>。

物質中の電子はスピンと呼ばれる磁石のような性質を持つが、スピンは普段はバラバラの方向を向いている。その電子同士が引き合うことでクーパー対と呼ばれるペアを作り、スピンの方向が整列した波のような状態を作ることによって抵抗がなくなる超伝導が実現する。通常、ここに強い磁場をかけると、電子スピンの方向が倒れてバラバラになり、クーパー対が壊れてしまうため超伝導は壊れることが知られている(図5左)。しかし、今回の研究で、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  では強い磁場でもペアの電子スピンの方向が倒れないことが明らかとなり、磁場に負けない強い超伝導が実現している事を解明した(図5右)。これはウラン原子のも

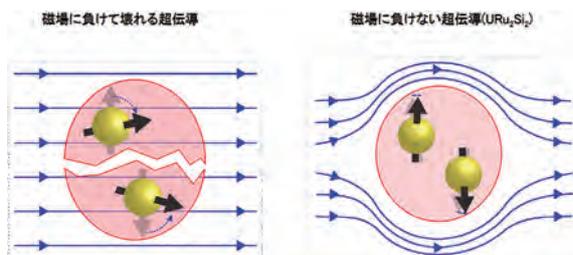


図5 超伝導に磁場を近づけた時の様子

通常の超伝導は磁場でスピンの方向が倒れてしまい、ペアが壊れてしまうが(左)、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  ではペアのスピンの方向が全く倒れない新しい電子状態が実現し、強い超伝導がつくられている(右)

つ5f電子が起源となって現れる特異な新しい電子状態である。

この成果は超伝導現象の理解を深めるとともに、磁場に強いより実用的な超伝導体の探索に指針を与えるものと期待される。

### IV. 放射線環境中のセラミックスがもつ自己修復能力

#### 1. 過酷な環境に耐えるセラミックス

一般的に材料は、放射線に曝されると劣化が進む。セラミックスも同様で、放射線環境では材料の内部や表面に損傷(照射損傷)が生じて、本来もっている材料の機能が劣化していく。特に高エネルギー重粒子線に照射されたセラミックスには、顕著な照射損傷が生じている。

しかし近年、フッ化バリウム( $\text{BaF}_2$ )や酸化ウラン( $\text{UO}_2$ )のような特定のセラミックスでは、予想より照射損傷が少ないことが分かってきた。しかし、特定のセラミックスだけがなぜ「放射線に強い」のか、そのメカニズムを解明することが大きな課題だった。

一方、高エネルギー重粒子線を照射したセラミックスの表面には、数ナノメートルの大きさを持つ超微細組織が発生することが分かっている。このため原子力機構では、この超微細組織の中に、特定のセラミックスが放射線に強い理由が隠されているのではないかと考え、この超微細組織を観察する手法の開発に着手した。

なお、これまで表面の微細観察が得意な走査型電子顕微鏡や原子間力顕微鏡を利用して、この超微細組織の観察を試みた例はあったが、分解能が足りないため超微細組織の詳細は不明のままだった。それに対して透過型電子顕微鏡は分解能が高く、原子レベルで観察できるので、微細な観察や分析に威力を発揮する。しかし、単純に透過型電子顕微鏡を利用しても、超微細組織を詳細に観察することはできない。そのため原子力機構は量研と共同で、透過型電子顕微鏡(日本電子(株) JEM-2100F型)を利用して、超微細組織を観察する新しい手法を開発することをまず目指した。

重粒子一個がセラミックス試料を通過すると、表面には超微細な隆起物が形成される。しかし、従来の観察法では、超微細組織以外の組織も重なって見えてしまうので、どれだけ高倍率で見ても超微細組織の様子はよく分からなかった。そこで、重粒子線を斜めから照射してみると、試料の端に観察したい超微細組織が形成された。

これにより様々なセラミックスにおいて、高エネルギー重粒子線の照射によって発生した超微細組織をクリアに観察することに成功した。

#### 2. 原子の整列が復元する

その結果、イットリウム鉄ガーネット( $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ )に高エネルギー重粒子線を照射すると、表面に発生した超微

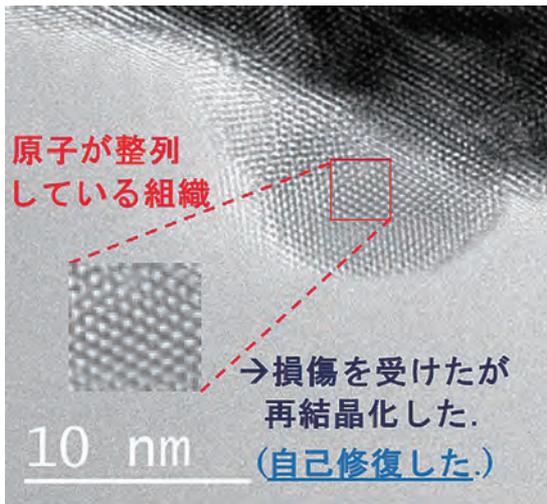


図6 自己修復できるセラミックス( $\text{BaF}_2$ ) :  
照射した表面に発生した超微細組織の写真

細組織は予想通り、内部の原子の配列が乱れていることがわかった<sup>6)</sup>。

しかし、「放射線に強い」フッ化バリウム( $\text{BaF}_2$ )やフッ化カルシウム( $\text{CaF}_2$ )では、前述のセラミックスと異なり、超微細組織の内部の原子が整列していることが分かった。超微細組織の内部の原子の配列はいったんは乱れたにもかかわらず、すぐに原子の配列が整列し直し、再結晶化したことが示唆された。「放射線に強い」これらのセラミックスは、高エネルギー重粒子線の照射によって原子の配列が乱れても、すぐに「自己修復」したと考えられる。

今後は、核燃料セラミックスである酸化ウラン( $\text{UO}_2$ )を対象にして、放射線環境での表面状態の変化を追跡することを検討している。放射線に非常に強い核燃料セラミックスが放射線環境で自己修復している可能性があり、そのメカニズムの解明を進める。また、セラミックスの自己修復能力を最大限に生かすための材料開発も進めていく予定である。セラミックスがもつ自己修復能力が解明されれば、強い放射線環境で使われる宇宙材料や原子力材料へのセラミックスの利用拡大が期待できる。また、放射線に強いセラミックスを利用した新しい原子力機器の設計・開発の可能性が広がる。

#### — 参考文献 —

- 1) <https://www.jaea.go.jp/jaea-houkoku12/text/06.html>  
核分裂における原子核のちぎれ方「基礎科学ノート」Vol.24 No1)p17.  
[https://asrc.jaea.go.jp/publication/note/pdf/39kagaku/39\\_03.pdf](https://asrc.jaea.go.jp/publication/note/pdf/39kagaku/39_03.pdf)
- 2) <https://www.u-presscenter.jp/2019/02/post-40982.html>  
未来へ元気(JAEA)2018年, No51.  
<https://www.jaea.go.jp/05/genki/genki51.pdf>
- 3) 前川禎通, 堤康雅:スピントロニクス(日本評論社, 2019), url
- 4) <https://www.jaea.go.jp/02/press2018/p18122201/>
- 5) <https://www.jaea.go.jp/02/press2017/p18011301/>
- 6) <https://www.jaea.go.jp/02/press2017/p17102702/>

#### 著者紹介

所属の記載がないものは全て、日本原子力研究開発機構

リカルド・オルランディ

(専門分野・関心分野)原子核の核構造 主な方法:  $\gamma$ 線分光法と核子移行反応の組み合わせ

廣瀬健太郎(ひろせ・けんたろう)

(専門分野・関心分野)原子核実験, 核分裂, 核子移行反応

矢板 毅(やいた・つよし)

(専門分野・関心分野)アクチノイドなどf電子系元素の化学, 地球環境化学, 放射光X線分光分析など

山上浩志(やまがみ・ひろし)

京都産業大学/日本原子力研究開発機構

(専門分野・関心分野)物性理論, 特に相対論的第一原理計算法の開発とf電子系の電子構造と物性など

家田淳一(いえだ・じゅんいち)

(専門分野・関心分野)物性理論, スピントロニクス・スピン流物性と原子力工学分野の融合に関心がある。

神戸振作(かんべ・しんさく)

(専門分野・関心分野)固体電子物性 強相関電子系の物理

石川法人(いしかわ・のりと)

(専門分野・関心分野)照射損傷学, 材料工学, ビーム科学