

巻頭言

1 3つの仕組み

岡 芳明

時論

2 エネルギー基本計画について： 変化の兆し

今回の基本計画は、今回の基本計画は、曖昧で説明不足の点が多いが、変化の兆しを読み取ることができる。
鈴木達治郎

4 六ヶ所から発信する ーガラス固化体とその言語空間

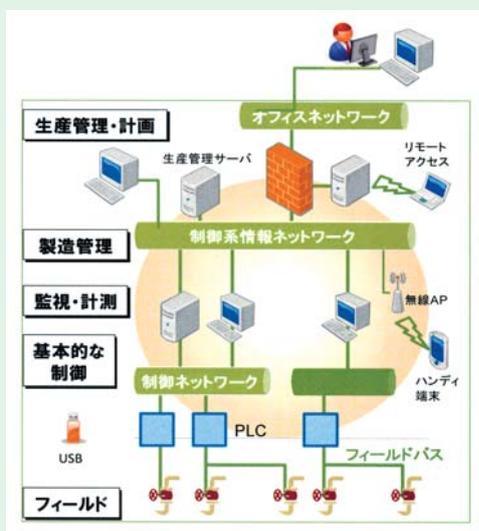
六ヶ所に住む私たちは、「核のごみ」「核のゴミ」という言葉に違和感を持つ。
荒谷美智

解説

制御システムセキュリティの重要性と現状

13 情報機器化する制御装置とセキュリティ対策

電気やガス、水道などの重要インフラや生活全般は、情報機器や情報ネットワークで支えられおり、これらを制御するシステムの情報セキュリティ対策は不可欠だ。ここでは制御システムのサイバーセキュリティを概観する。
新 誠一



制御システム

時論

6 当事者意識をもって見守る福島原発

現地を訪問してわかったことは、そこで働く人たちの強い使命感だった。
細川珠生

解説

26 核セキュリティにおける核物質の非破壊測定技術

核セキュリティ強化の鍵となる技術の一つが、核物質及び放射性同位体の非破壊測定技術の開発である。その実現に向けて、さまざまな分野の専門家による共同研究が進んでいる。
早川岳人、藤原 守

18 原子力分野における制御システムセキュリティ

2010年にイランの核燃料施設に対してサイバー攻撃が行われ、原子力分野におけるサイバーセキュリティ対策の必要性が強く認識された。原子力分野における制御システムセキュリティの脅威動向と対策や対応について述べる。
村瀬一郎

22 制御システムのセキュリティテストベッド

昨年5月に開所した制御システムセンター東北多賀城本部は、7つの模擬システムを備える制御システムセキュリティテストベッド施設(CSS-Base6)を併設した。この施設の概要と今後の課題について述べる。
澤部直太



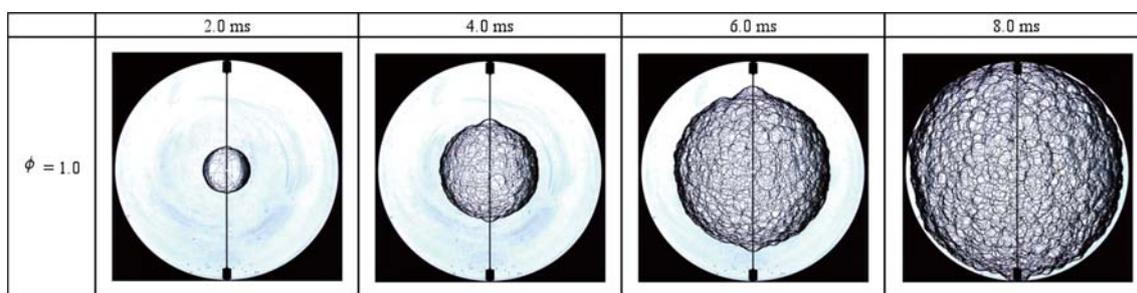
CSS-Base6の中央監視卓

解説

31 原子力発電所における水素爆発安全の課題と対策

一システム安全の考えに基づく防爆

原子力発電所における水素爆発事故を防ぐには、水素の燃焼特性や、デフラグレーションとデトネーションという2種類の爆発に関する十分な知識が必要である。その上で、合理的な防爆対策を施すことで安全を確保しなければならない。 門脇 敏



球状デフラグレーションの伝播

8 NEWS

- 原子力学会，大飯原発判決で見解
- 世界で運転中の原子力は426基に
- 原産大会，テーマは「信頼回復への決意」
- IPCC作業部会報告，原子力に言及
- トリチウムの取扱い5つを選択肢に整理
- 海外ニュース

解説シリーズ

レジリエンスエンジニアリングの動向(4)最終回

36 ポジティブ面を強調するレジリエンス

人間はエラーを犯す存在であるだけでなく、状況を適切に判断し予測的に対応することができる高度に能動的な存在である。今回はその側面に焦点をあてる。 高橋 信

報告

40 原子力・放射線業界の裾野を広げる具体的な活動

春の年会では原子力・放射線業界ロールモデル集の試作版の披露と、学生を対象とした学会体感ツアーを行った。 男女共同参画委員会



学生ポスター発表の見学

42 2013年度世界原子力大学夏季研修(WNU-SI)留学記

世界の同世代とのネットワークを構築することができた。 伴 雄一郎

談話室

44 紙芝居での啓発活動—放射性廃棄物の地層処分について学ぶ

福井県女性エネの会は会員450名で、エネルギーや環境問題について学習する団体である。

政野 澄子

ジャーナリストの視点

47 より大胆で力強い原子力規制行政を

小林 史

- 35 From Editors
- 46 新刊紹介「放射能とナショナリズム」 齋藤 隆
- 48 会報 日本原子力関係会議案内、人事公募、寄贈本一覧、原子力学会事務局長公募、新入会一覧、英文論文誌(Vol.51, No.7-8)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会ホームページの「目安箱」(<http://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/>

3つの仕組み



内閣府原子力委員会 委員長

岡 芳明 (おか・よしあき)

東京大学原子力工学科卒業(1969年)、大学院博士課程修了(1974年)、工学博士。2010年3月まで東京大学教授、2010年4月から2014年3月まで早稲田大学特任教授、日本原子力学会会長(2008年)。東京大学名誉教授、2014年4月より現職。

原子力委員長を拝命した後、「研究開発では何が重要とお考えですか」とよく質問されます。具体的なテーマよりも「仕組み」をきちんと動かすことが重要と思います、と答えています。

大学でグローバル COE プログラムの資金をいただいて海外の大学とのワークショップやシンポジウム、サマースクールなどを多数開催しました。しかし結局、大学の国際競争力の向上には、米国の大学が行っているような①フィードバック、②競争、③責任の仕組みをきちんと実行するしかないと思に至りました。大学に限らず、世界を見渡して優れた成果を挙げている組織を観察すると、この3つの仕組みをきちんと機能させていることに気づきます。

フィードバックの仕組みは様々なものがあります。企業は多種多様なフィードバックの仕組みを持っています。米国には専門家相互によるピアレビュー、大学の教育カリキュラムやその運営に関する7年ごとの第三者評価などが存在します。重要な点は外部評価を形式的に済ませるのではなく、自己変革のために自ら進んで時間を割いて実施し、組織運営に反映し利用していることです。

競争の仕組みを考える時には、何のために競争するかという組織として達成すべき目標が必要です。目標は企業と研究開発機関、大学、行政庁等で異なります。例えば企業は製品やサービスのシェアで世界一になること、研究開発機関はプロジェクトの成果やその分野の情報で世界一になること、世界中がその研究開発機関に聞きに来るようになることが目標になるのではないのでしょうか。大学の研究では被引用件数の多い影響力のある研究論文でその分野の世界一になること、行政庁は行政サービスにおいて世界で最も優れたサービスの提供が目標になるのかもしれませんが。

企業、研究開発機関、大学、行政庁がそれぞれ組織として機能させるべき競争の仕組みはこれらの目標に従って設定されると考えます。

大学では競争的資金の獲得のために必死で研究のアイデアを考えることが、研究開発機関では分野を俯瞰してよいプロジェクトを設計するのが、個人と組織を強くするのではないのでしょうか。

責任とは組織運営における人事権と予算に伴うものです。人事と予算の機会ごとにポストや予算を自動的に継承させるのではなく、それまでの組織運営の自己点検を行い、その結果を次のポストと予算の利用に組織自ら反映することが必要ではないのでしょうか。

日本では、給与や人件費を含まずに予算を考えることが多いですが、海外では人件費が含まれています。人件費を考慮すると計画に遅延のないことが重要と分かります。プロジェクトは「もんじゅ」のようなものだけでなく、目的を持った一連の研究開発がプロジェクトではないのでしょうか。

東京電力福島第一原子力発電所事故の痛切な教訓を生かすことは日本で原子力に携わる者の責務です。

原子力委員会は、原子力政策について企画・審議・決定することを任務としています。原子力政策にかかわる基本的な考え方を示すとともに、それを踏まえて各省庁が実行しようとする原子力政策を検討し、見解や決定としてその意見を表明します。原子力委員会はまず原子力平和利用や放射性廃棄物処分など我が国の原子力政策の重要課題に取り組む所存です。

「世界で輝く日本の構築」に原子力が貢献できるよう最大限の努力をしたいと考えています。

「頑張ろう原子力」



エネルギー基本計画について：変化の兆し



鈴木達治郎（すずき・たつじろう）

長崎大学核兵器廃絶研究センター
副センター長・教授

1951年生まれ。東京大学工学部原子力工学科、
米マサチューセッツ工科大修士卒。工学博士。
電力中央研究所研究参事、内閣府原子力委員
会委員長代理等を経て2014年4月より現職。
専門は原子力政策、核不拡散政策。

政府のエネルギー基本計画が平成26年4月11日、ようやく閣議決定された。3・11の東京電力福島第一原子力発電所事故後、初めてのエネルギー基本計画ということで、注目を浴びたが、一体何が変わって、何が変わらなかったのか。特に原子力政策について、注目してみた。なお、筆者が3月31日まで勤めていた原子力委員会では、12月25日に発表された「エネルギー基本計画への意見」に対して、本年1月9日に「エネルギー基本計画に対する意見について」という見解を発表しており、本論もその見解にほぼ沿ってはいるが、個人的意見をさらに追加したものである。

「はじめに」の持つ意味：「はじめに」には福島第一原子力発電所事故を防ぐことができなかつたことへの「深い反省」について記述がある。新しいエネルギー政策を構築するにあたり、事故の反省が原点であることは言うまでもない。しかし、一時この反省部分が削除されたとの報道があったが、論外と言わざるを得ない。これだけの事故を起こした反省に基づくエネルギー政策であることが、当然不可欠の原点であることを忘れてはならない。

「依存度を可能な限り低減する」：次に、原子力発電への依存度をできる限り低減する、という政策目標である。前民主党政権では、「原子力発電に依存しない社会を実現する」という目標のもと、2030年代中に原発稼働をゼロにする、という政策を立てた。そのために、「あらゆる政策資源を投入する」として、具体策として再生可能エネルギー、省エネの推進、そして「原子力発電所の新設、増設は行わない」ことを政策とした。今回のエネルギー基本計画には、依存度をできる限り低減する目標を立ててはいるが、2030年までには原発ゼロを達成するのは不可能と判断したようだ。新たな規制基準を満たした原発の再稼働を認めるのは、前政権と同じであり、40年の許認可寿命についても変化はない。最も大きな違いは「新設、増設を行わない」という政策を削除し

たことである。しかしながら、「新設、増設を行う」という明記もなかった。これが次の政策目標を説明するうえで、不透明性を増すことになる。

「原子力発電は重要なベースロード電源である・・・(原発を)確保していく規模を見極める」：できるだけ依存度を低減させる一方、その規模については「安定供給、コストの低減、温暖化対策、安全確保のために必要な技術・人材の維持の観点から、確保していく規模を見極める」という表現が入った。この持つ意味を素直に読めば、ベースロード電源としての原子力発電の役割を守ること、すなわち一定規模の原発が必要との見解である。そのためには既存の原子炉が寿命を迎えた場合、更新のための新設または増設が早晚必要となる。この点は、前政権と大きく異なる政策であり、かつ福島第一原子力発電所事故以前に「回帰する」という期待を抱かせた。その結果、前者の「依存度をできるだけ低減させる」という政策との整合性が問題となる。この点を原子力委見解は、次のように指摘した。

「…重要なベース電源に位置づけるとしたことについて、この判断に至った熟慮の内容を国民に丁寧に説明すべきである。」

政策決定者は、その政策決定の是非を議論するための材料として、その決定に至った理由、根拠について、丁寧に国民に説明する義務がある。この見解文は、上記の決定に対する説明が不足している点を強く指摘したものであり、現在執筆時点においても、文章や単語の置き換えはされても、説明については不十分なままである。こういった政策の根拠の曖昧さ、そして説明不足が、政策の信頼性、政府の信頼回復にとって、大きなマイナスとなることを、政策担当者はぜひ反省してもらいたい。原子力委員会はこの点を強く反省して、その政策決定過程の透明性向上のため、政策文書の作成過程を追跡可能とできるように内規を改めた。これにより、情報公開請求があれば、政策文書のドラフト段階から最終文書に至るま

での変更過程，誰がどのような修正を加えたかがわかるようになった。エネルギー基本計画についても，ぜひそのような政策決定過程の透明性向上対策を導入してもらいたい。

「使用済燃料対策の抜本的強化」：原子力政策のなかで，最も注目を浴びていいと思われるのがこの「使用済み燃料対策の抜本的強化」ではないだろうか。「対策を将来に先送りせず着実に進める取り組み」の第一に取り上げられている。しかも，その中身を見ると「高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた取り組みの抜本的強化」「使用済燃料の貯蔵能力の拡大」が真っ先に取り上げられている。これは使用済燃料対策として貯蔵と処分の両方の重要性を明らかにしたものとして，注目に値する。従来の全量再処理政策では使用済燃料は「リサイクル資源」であり，処分の対象ではなかった。原子力委員会では，研究炉や事故を起こした福島第一原子力発電所の使用済燃料，過去の破損燃料等を考えると，直接処分の必要性は「明らかである」として，将来の柔軟性を確保する意味でも「直接処分を可能とする取り組み」が重要であると主張してきた。今回のこの政策はそれを反映したものであると考えることができる。原子力発電所の継続的運転や使用済み燃料貯蔵の安全確保を考えても，この二つの政策は極めて重要な課題であり，早急に実現のための取り組みを進めていくべきである。

なお，高レベル廃棄物処分については，「国が科学的により適性が高いと考えられている地域を示す」等，国が前面にたって取り組む必要性が強調されている。この点は賛成であるが，経産省資源エネルギー庁の高レベル廃棄物処分ワーキンググループで議論されているように，本当に重要な改革は，社会との合意プロセスをどう構築するかである。この点で，「多様な立場の住民が参加する地域の合意形成の仕組みを構築する」とした点は極めて重要な記述であり，ぜひ実現してもらいたい。

「核燃料サイクルの柔軟性」：六ヶ所再処理工場，MOX加工工場の建設など，従来のプロジェクトについては着実に進めるとしているが，この文章は現状追認であり，新しいことは書かれていない。しかし，中・長期視点から「対応の柔軟性を持たせることが重要」としている点が注目される。

ここで最も重要な政策課題は「プルトニウム利用・管理のあり方」である。原子力委員会としては「利用目的のないプルトニウムを持たない」原則を厳守することを訴えてきているが，2012年末の時点で，国内に9トン，国外に35トンのプルトニウム在庫量を抱えている。我が国のプルトニウム利用計画は，福島事故以前の「16～18基のプルサーマル」によることが基本方針となっており，それはいまだに変更されていない。現時点で，プル

サーマルの実施規模がどの程度になるか，極めて不透明であることを考えれば，「利用目的」の妥当性に疑問が出る可能性が十分にある。従って，原子力委員会の見解文では次のように述べた。

「…六ヶ所再処理工場の竣工に際しては，立地自治体との約束を尊重するとともに，国際社会への影響にも配慮し，柔軟な稼働計画とするべきである」

この意味するところは，再処理の実施計画に合わせてプルトニウム利用計画を構築してきた政策から，需要の見通しに合わせて再処理のペースを柔軟に考える，ということである。言い換えれば，再処理ありきの「供給優先」から，需要の見通しを明確にした上での再処理，という「需要に基づく再処理」への転換と解釈することができる。この考えが，今回のエネルギー基本計画にどれだけ反映されているか，やや不透明ではあるが，核燃料サイクルについて「戦略的柔軟性を持たせながら対応を進める」とした文章の持つ意味は重いと考えられる。

「コミュニケーションの強化」：最後に，原子力政策だけではないが，国民との信頼醸成のために第5章の「国民各層とのコミュニケーション」に注目したい。まず(2)に「客観的な情報・データのアクセス向上による第三者機関によるエネルギー情報の発信の促進」が挙げられている点は，極めて重要と考えている。エネルギー政策に客観的なデータが不足しており，国民はどの情報を信じてよいかわからなくなっている。筆者は，以前より「独立・不偏の立場にたったテクノロジー・アセスメント(技術の社会影響評価)機関」の設立を訴えてきているが，この「第三者機関による情報発信」は，まさにその趣旨を一部実現するものであり，強く支援したい。最後に(3)「双方向コミュニケーションの強化」が挙げられている点も，特筆に値する。従来の「広報・広聴」というやや一方的なコミュニケーションからの脱却が必要である。この点は秋庭悦子前原子力委員も強く要望され，またご自身で実践されてきていたものだが，中でもフランスの「地域情報委員会(CLI)」を具体例としてエネルギー基本計画に書き込んである点は秋庭氏が強く推薦してきたこともあり，今後の参考例として注目される。ただ，氏ご自身も述べられているが，国民との情報共有の仕組みは各国の政治・経済・社会構造に依存するので，日本にあった仕組みを構築していく必要がある。今後はさらにもう一步踏み込んで，「エネルギー政策への国民参加」まで書き込んで実現していただきたい。これら国民との信頼醸成についての取り組みは，極めて重要であり，今度のエネルギー基本計画を踏まえて，ぜひ真摯に取り組んで実現していただきたいと願う。

(2014年4月11日記)



六ヶ所村から発信する ～ガラス固化体とその言語空間～



荒谷 美智 (あらたに・みち)

六ヶ所村文化協会文化・教育アドバイザー

お茶の水女子大学理学部化学科卒、物理化学専攻、同文教育学部哲学科で認識論、科学史を学ぶ、同大学院理学研究科修士課程修了放射化学専攻。東京大学 原子核研究所、理化学研究所 核化学研究室、(財)環境科学技術研究所を経て現職、理学博士(東京大学)。

はじめに

青森県や岩手県は宮澤賢治の詩で知られる「夏でもおろおろ歩く」やませ常襲地帯である。やませは、寒冷的な霧を伴う偏東風で、特に青森県下北半島はその影響が著しく、古来、農業よりもむしろ馬産地として知られてきた。明治以来および戦後も様々な提案や国家的規模の開発がやませ克服のために繰り返された。フジ製糖(六戸町1962～7)、むつ製鉄(むつ市1962～5)、その後、むつ小川原開発として石油コンビナートが考えられたが、2回に及ぶ石油ショックで潰え、国家石油備蓄基地(1979)という形に矮小化された。その後の新しい開発分野が原子力である。原子力船むつ母港(むつ市1967～95)、核燃料サイクル施設(六ヶ所村1985～)、原子力発電所(東通1995～)、MOX専用原子力発電所(大間町1999～)、使用済み核燃料中間貯蔵施設(むつ市1999～)、等の諸施設が誘致され、時に「原子力半島」と呼ばれることは広く知られている。

六ヶ所村では古川伊勢松村長(1973～89、4期)の時代に、一家内でも対立があるような村論二分する激論の末、核燃料サイクル施設誘致に踏み切り(1985)、青森県議会は「青森県を高レベル放射性廃棄物の最終処分地にしない」条件で立地を受け容れた(北村正哉知事1985)。以来、歴代知事は、国とのこの受け入れ条件を堅持して、政権が替わる毎に確認している。

燃料から使用済み燃料を経てガラス固化体まで

原子力発電所で数年間使用された燃料は、定期点検で原子炉から取り出され、構内のプールで冷却・保管される。3%濃縮ウラン燃料1トンのうち、ウラン235:30kg、ウラン238:970kgは、使用後にウラン235:10kg、プルトニウム:10kg、ウラン238:950kgとなり、これが①混合酸化物(MOX)燃料に加工され再利用される分である。残りが②核反応生成物:29.8kg(30kgとの差0.2kg、つまり200gが電気エネルギーや熱エネルギーに変換した分)、これが、高レベル放射性廃棄物

の実体で、工程では硝酸酸性液体であるものが、運搬や貯蔵の安全上、ガラス固化体(the vitrified)の形にされている。

その内訳は

白金族: 2kg

短半減期核分裂生成物: 26kg(セシウム・ストロンチウム10kg, 他16kg)

長半減期核分裂生成物: 1.2kg(半減期～7000年)

超ウラン元素: 0.6kg(ネプツニウム, アメリシウムなど)

である。白金族はレアメタルを含む貴金属、核分裂生成物はベータ放射体で電子源・熱源、超ウラン元素は未来の新しい型の原子炉ではウラン238と共にすべて燃料に使える元素群と考えられ、これらは正確には未利用鉱物資源である。このことは別の言い方をすれば、我々が今、原子炉と称しているものは、貴重な核燃料をこの程度にしか利用できない進化途上のものに過ぎず、人類は燃料を利用し尽くせる、より完成された原子炉を目指して研究しなければならない、ということである。少なくとも筆者はそのように解釈している。

六ヶ所村の核燃料サイクル施設が完成していない段階では英・仏両国に再処理を依頼し、日本から使用済み燃料を積み出し、MOX燃料に加工する①ウランとプルトニウム、②それ以外の残りであるガラス固化体の形で返還され、六ヶ所村にある日本原燃(株)の高レベル放射性廃棄物貯蔵センターで一時保管されている。一時保管の期間は30～50年である。本年4月末現在、海外から返還された1,574本(のガラス固化体が貯蔵されている。内容は上述の通りで、ステンレス鋼容器にガラス状で封じ込められ、内容を考慮して充分に間隔を取って掘られた地下10数mから地上までの縦穴式貯蔵庫に9個ずつ自然空冷状態で保管されている。

六ヶ所村におけるガラス固化体の受け止められ方
六ヶ所村の住民は、ガラス固化体が搬入されるところ

から見ており、例えば、雨の日に搬入されたのを見た人たちは口々に「専用運搬容器(キャスク)から湯気が立っている!」と語って、内容物が発熱体であることを理解している。津波の心配がない(海拔 55m) 充分遮蔽された建物の地下空間でステンレス鋼容器に封じ込められ、広島、長崎、第五福竜丸の被爆時のように「後は野となれ山となれ」とまき散らされた「死の灰」の形ではないことも理解し、当面、特段の心配もなく生活している。

しかし、それでも住民は「核のごみ」「核のゴミ」という言葉でガラス固化体が語られる時、不快感、少なくとも違和感を持つことを率直に表明している。たとえ六ヶ所村が引き受けなくても、国策上どこかの自治体が引き受けなければならなかったものである。六ヶ所村が今、預っているからこそ、それ以外の自治体が引き受けなくて済む以上、感謝こそされても、誹謗や蔑視は全くいわれないこと、と感じている。筆者の 20 年の経験では、原子力発電所立地地域の人々からこれらの言葉を聞いたことはない。彼らは一様に「六ヶ所村のほうに足を向けて寝られない」という。一方、大都会の住民やマスコミ(特に社会部か)は、不用意か意図的かは知らず、これらの言葉を多用する。やませ常襲地帯六ヶ所村は、無人の曠野ではなく、ごく普通の幸せを願う人里である。

ガラス固化体をめぐる言語空間

安土桃山時代の日本人は南蛮渡来のガラスをビードロと呼んだ。これは陶器を「瀬戸物」というのと同じ経緯で、スペインの Vitoria に由来する。そのまた元はラテン語の vitrum (ガラス) で火山のあるイタリアからローマ帝国と共に拡がって行ったと思われる。江戸時代には「びーどろ」と書かれるほど日本化した。子供が遊ぶびー玉はびーどろの玉だが、このおもちゃは案外新しくて明治のものだという。ガラス工房で感じたことだが、熱くてどろどろした熔融物やトロトロの熔融流体を見ていると、人間は、太古、火山の熔岩流に触発されて、こういうものを真似してみたくなったのではないかと思われる。岩手の焼け走り、浅間の鬼押し出しは面白いが、元は恐ろしい自然災害であったろう。それでも誰かがはじめて試してみたのだ。寺田寅彦が随筆でしばしば書いているように、異なる言語間にある単語の、無視し得ない一致から普遍言語学の可能性を垣間見たのも判る気がする。さて、その後、オランダ人が来るようになると「びーどろ」から「ぎやまん」になった。これは、考えてみれば、ダイヤモンドに由来している。まさに宝だ。ガラスや陶器の産地は、往々にして木を切ってしまうと禿山や砂漠になり、文明が廃ることもあった。日本の古代でも遷都は宮殿や寺院の瓦を焼いた結果であることが多い。びーどろも、ぎやまんもエネルギーの塊であることでは同じである。ガラス固化体は、今様も今様最先端の「びーどろ」「ぎやまん」である。恐ろしきいのししも「伏す亥の床」といえば優しくなりぬ、ということはある。

ガラス固化体については、新聞はじめ、週刊誌、時には月刊誌でさえも、しばしば「核のごみ」「核のゴミ」と書く。高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)は、学用語(科学、技術、法学、等)として中立性(当面の社会的意味合いや物理的状態の表現)を備えているが、「核のごみ」となると独特な感じが付加されると同時に、政策にかかわる曖昧さが増す。再処理政策のもとでは、使用済み核燃料は「核のごみ」ではあり得ないが、ワンズルー政策のもとでは使用済み核燃料が「核のごみ」である。「核のごみ」が、さらに「核のゴミ」となると、一層の異物化、異界化が進んだ言葉になる。こういう言語空間の在りようは、本来、中立的・合理的であるべき議論を感情的、非論理的に歪曲し、知的に劣化させる。

高知県東洋町の地層処分に関する最終処分地の「文献調査応募」取り下げの例は典型的であり、最後にガラス固化体が「死の灰」にまでエスカレートされた。

ガラス固化体⇒核のごみ⇒核のゴミ⇒死の灰とされたのでは冷静な議論の場が成立する訳がない。こういう強引に歪められた言語空間において田嶋裕起 前東洋町長は孤軍奮闘を余儀なくされ、「文献調査応募」取り下げを強要された(『誰も知らなかった 小さな町の原子力戦争』田嶋, 2008)。

このような理不尽なことを許さないためにどうしたらよいか。それにはまず安易な言い換えを慎み、ガラス固化体(としての高レベル放射性廃棄物)の用語で議論することが先決である。⇒が曲者である。一つの言葉には実体を示す事実軸、法のかかわる善悪軸、好き嫌いのかかわる美的軸、価値観にかかわる尊卑軸、損得勘定にかかわる金銭軸、等々、漠然と「ニュアンス」と呼ばれるが、実は極めて多次元的な背景と奥行きがある。言い換えが、単に言い換えて終ることは事実上ない。

日本は古来、言霊の幸きわう国といわれ、遠く万葉の時代から文運隆々の国であった。「日本語が面白くて面白くて帰化した」という米国生まれの日本文学者も近年あった。日本語で書く外国生まれの小説家も少なからずある。真っ当で明快な用語を使って、国家百年の計を見据えエネルギー問題を考えて行きたいと願っている。

おわりに

最後に、六ヶ所村、下北半島、青森市における地域住民の自主的な科学活動について一言書いておきたい。再処理施設というものが、多数ある原子力発電所と違って「安全神話」で仮にも押し切れるものではなかったことにも拠る。六ヶ所村文化協会読書愛好会、NPO 法人エッグ、青い森・科学 BBL は、青少年は元より親たちの科学素養向上にもこの十数年来貢献してきた。六ヶ所村文化協会読書愛好会は去る 5 月に東京日本橋でシンポジウム「六ヶ所村から発信する」を開催した。合わせて 183 歳の 2 人が六ヶ所村の歩みについて語った。

(2014 年 4 月 18 日記)



当事者意識をもって見守る福島原発



細川 珠生 (ほそかわ・たまお)

政治ジャーナリスト

聖心女子大学卒業。20代からフリーランスのジャーナリストとして、政治家や地方自治を積極的に取材、その分野の著書多数。政治評論家・故・細川隆一郎は父、故・細川隆元は大叔父。95年より「細川珠生のモーニングトーク」(ラジオ日本)に出演中。

東日本大震災から3年を迎えようとしていた今年2月、福島第一原子力発電所を視察した。震災による原発事故から初めての現地視察であった。一度、自分の目で確かめておきたいことがあったからである。

原子力発電を含むエネルギー政策は、国の重要なテーマであり、国・地方のいかなる選挙でも、各党・各候補者は、エネルギー政策について考えを明確にすることが求められている。それは震災前も後も変わらないことであるが、特に国民の関心としては、震災以降、急激に高まった。しかし、逆の言い方というよりは、正しい言い方をすれば、震災前は、エネルギー政策と言っても、地球温暖化対策という観点からであり、日本のエネルギー政策という全般的なことについては、国民はほとんど無関心であった。戦前や終戦直後の貧しい時代やオイルショックを経験していない世代には、なおさらのことである。電気や、そのもととなるエネルギーは、日本中の、いつ、どこでも当たり前のように供給されるものであると考え、何か国民として特段の努力が必要という認識は、ほとんど皆無であったといってもよいだろう。原発事故によって避難をしている福島県民は約15万人。少々不謹慎かもしれないが、この震災を機に、日本人が、無限ではないエネルギーのことについて考えるようになったのだとすれば、それは好機であると、私は考えている。

そんなことから、ジャーナリズムを生業としている私は、一刻も早く、現状の原発を見てみたいと思いながら3年が経とうとしていた今年2月、この目で確かめる機会を得ることができた。

まず、一番驚いたことは、福島第一の施設内においても、車中からであれば、頑丈な防護服を着用することなく、マスクと綿手袋と靴カバーだけの装着で、爆発をした1号機から4号機までの原子炉建屋のすぐふもとまでいくことができるということである。すぐ真下から、建屋内のがれき処理の様子や、内部までは見られなかったが、燃料棒取り出し作業が行われている4号機の様子も

見上げることができる。3号機以外は、建屋にカバーがつけられているが、周囲の様子、特に海側に残された津波の残骸をみれば、それでもなお、「軽装備」で間近で確認できることに、この3年間の現場での努力が相当なものであったと、理解できたのである。東京電力の話では、がれきを取り除いたことで、それが可能となったということであった。しかし、3号機だけはまだ放射線量の高さから、無人の重機が建屋の上に載せられ、遠隔操作でがれき処理をしている現状を合わせてみると、がれきの除去といっても、3基分の建屋のがれき、敷地内のがれきの撤去作業は、かなりの困難を極めたであろうと推察する。

2月末現在、行われていた作業は、3号機の燃料プールからのがれき撤去、原子炉の冷温停止状態を維持しながらの汚染水中の放射性物質の除去、汚染水等の貯蔵、4号機の燃料取り出しと移送、海洋汚染拡大防止のための遮水壁の設置工事、地下水の建屋下への浸入を防ぐためのポンプとバイパスの設置工事、タンク貯蔵場所の確保のための樹木の伐採、伐採した樹木や使用済みの手袋等の廃棄物処理のための焼却炉の建設などなど、相当数に上る。それでも、爆発によって大きな被害を受けた事務本館や、建屋の海側や海にあったタンクの損傷はそのまま、津波で崩れた堤防はテトラポットで代用しているだけというように、原子炉の危険除去と放射線量の低減を優先するため、手が付けられていないことも多い。事務本館には、未だ当時の社員の荷物が、そのまま残されているという。原子炉にかかわる工程については、先例がない作業だ。どれだけ熟慮を重ねても、何らかの不備が生じてしまうことは、仕方ないともではいえないが、そう簡単なことではないということでもあるのだ。

作業員たちには安全な休憩場所もないため、現在、大型休憩所を建設中であり、また高性能の放射性物質除去装置であるALPSの建設など、地下水バイパスやタンク置場の建設などと合わせて、土木工事が大変多いことも、現地へ行ってわかったことである。毎日約4,000人

の作業員が、福島第一原子力発電所の原子炉を、安全に廃炉へ導くための作業に、日夜取り組んでいるのである。

福島には、約4,000人の作業員の他に、約1,000人の東京電力社員が勤務している。働く場所も、宿泊する場所も、驚くほどに状況が悪い。社員も作業員も、そこで働くことには、それぞれの理由がある。震災以降、会社を去った社員は約1,500人に上り、それも、それぞれに理由があるだろう。しかし、今、福島で作業にあたる社員や作業員は、世界に例のない原子炉の廃炉という作業の一つ一つの工程に使命感を持って取り組んでいることは、ぜひとも多くの人に伝えたいと思うのだ。

また、福島に勤務をしていない東京電力の社員のうち、延べ4万8千人が、復興推進活動へ参加をしている。地震で瓦が落ちた家屋に漏水対策として一軒一軒シートを貼ったり、墓地や神社の草刈りや清掃、避難者の自宅の片づけ、仮設住宅での雪かき作業など、全国にいる社員たちが2泊や3泊の行程で福島に赴き、復興のお手伝いをしているのである。最初は、東電の制服を見るだけで吐き気がするとまで言われたようだが、それにもめげずに地道に、黙々と作業を続けてきたことで、少しずつ地元の人たちとの信頼関係を取り戻しつつあるようだ。

私は今でも、忘れられない光景がある。

福島第一原子力発電所での爆発の直後、東京電力に陣中見舞に行った時のことだ。

おそらく、睡眠や休息もほとんどとれず、それぞれがそれぞれの立場で、対応にあたっているだろうと予想をしていた。しかし、予想をはるかに超える過酷さが、「現場」にはあるとすぐに察することになる。私が面会した数名の社員にささやかな励ましの言葉をかけると、振り絞るように「ありがとうございます……」と発したその姿に、事態がいかに深刻であるかということを感じた。ただ、事態が深刻なだけでなく、事態の収束にあたる現場の作業員の過酷さは、それ以上のものであったはずである。

「日本人の我欲が、この自然災害を起こした」と、地震発生当時、石原慎太郎都知事が発言した。

幼稚園児だった私の子供の周囲では、地震発生以後、幼稚園が休園になり、そのまま春休みになってしまったこともあって、一斉に東京を離れていく家族が多かった。町では子供の姿を見かけることすら、珍しい状況だった。放射能の排出の状況やその影響が不明確であったことが、余計心配をあおり、「もしも」を考えて我が子

を守るために、安全な場所へ行きたいと思う親としての心理を否定するつもりはない。しかし、それまで、東京での便利で快適な生活を送るための原動力であった電力を供給していた発電所で事故がおきれば、一瞬のうちに、「迷惑だ」といわんばかりの態度をとる、その変わり身の早さに、私は驚いてしまったのである。もちろん、私だって、我が子を守りたいと思っていたし、影響力がどれほどのものであるのかが判断つかないだけに、不安になったことも事実である。

しかし、原発から300キロ離れている東京でとるべき行動がそれなのかは、どうしても理解できなかったのである。もし、本当に大きな危険が迫っていたら、私たち親子にも、とりわけ幼少の子供には大きな影響があるかもしれない。それでも私は、東京から動くことは、自分の生活として非現実的であるとしか思えなかったのである。東京から一斉に人々が消えていく、そのことが、まさに「我欲」の象徴であるとさえ、思ったものだ。

それから3年間、東京にいて、報道される内容から知ること、福島原発で、汚染水が漏れた、何かの不備があったなど、「負」の部分ばかりである。もちろん、それらの報道もあるから保たれる緊張感もあるのかもしれないと思っていたが、私は現地へ行って感じたのは、そうではなかった。そこで働いている人の多くは、これから数十年先にある「廃炉」に向けて、ただひたすら、原子力発電所でこれまでに培ってきた能力を惜しみなく発揮しようという高い意識によるものであるということなのだ。

私が、福島へ行って確かめたいと思っていたことは、そこで働く社員や作業員の姿である。もちろん、一人一人に話を聞いて確認したわけではないが、そこでの作業や、彼らがいる環境を見れば、ある意味一目瞭然であったともいえる。なぜ、それが今まで伝えられてこなかったのかも大きな疑問として残った。

エネルギー政策は、国の責任において策定することである。エネルギーの確保も、エネルギーの喪失も、国民の命に係わることであるからだ。安全で安定したエネルギーの確保のためには、二重、三重の策を講じながら、万全を尽くすべきである。これまでのエネルギー政策に、その点において不備がなかったとは言えないだろう。一方、国民の当事者意識ももっと高める必要がある。そのために必要な公正な報道がよりなされ、国民が冷静な判断力を持つことを切に願う。

(2014年3月27日記)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員（目次欄掲載）または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。

原子力学会，大飯原発判決で見解

福井地裁は5月21日、関西電力に大飯原子力発電所3、4号機の運転差し止めを命じる判決を言い渡した。これに対し関西電力はこの判決を不服だとして22日、名古屋高裁金沢支部に控訴し、「当社のこれまでの主張が裁判所にご理解いただけなかったことについて、誠に遺憾である。当社としては控訴審において引き続き、大飯発電所3、4号機の安全性について主張していきたい」とのコメントを発表した。

この裁判は、福井県などに住む住民189人が、同機の運転差し止めを求めていたもの。判決では福島原発事故やチェルノブイリ事故の場合の避難区域の規模を考慮した上で、大飯原発から250キロ圏内に住む166人を原告として適格と認定した。

判決では、原子力発電技術の危険性の本質や被害の大きさは、福島原発事故を通じて十分に明らかになっており、それをふまれば大飯原発の運転差し止めをめぐる判断を避けることは裁判所に課された責務を放棄するに等しいと指摘。「1,260ガルを超える地震が到来した場合には冷却機能が喪失し、炉心損傷を経てメルトダウンが発生する危険性が極めて高い」とした上で、「基準地震動を超える地震が大飯原発に到来しないというのは根拠のない楽観的見通しにしかすぎない上、基準地震動に満たない地震によっても冷却機能喪失による重大な事故が生じ得るといえるのであれば、そこでの危険は、万が一の危険という領域をはるかに超える現実的で切迫した危険と評価できる」と述べた。

さらに判決は、「大飯原発から250キロメートル圏内に居住する者は、本件原発の運転によって直接的にその人格権が侵害される具体的な危険があると認められるから、これらの原告らの請求を認容すべきである」と判断している。



一方、原子力学会は5月27日、この判決は「国民の皆様は原子力発電所の新しい安全対策に重大な誤解を生じさせる懸念がある」との見解を表明した。

原子力学会は同判決について、「ゼロリスクを求めめる考え方は科学技術に対する裁判所の判断として不適切。いかなる科学・技術も人間や環境に対してリスクをもたらすが、科学技術によってリスクを十分に低減させた上で、その恩恵とのバランスで社会はそのリスクを受容している。本会は津波対策、重大事故対策および事故時対策を適切に行えば、福島第一原子力発電所事故の再発防止は可能であり、かかる意味において、原子力利用は人格権を犯すものではない」との判断を示した。

さらに「工学的な安全対策を否定する考え方は不適切。現代社会は様々な形で科学技術の恩恵に浴しているが、それらの科学技術のほとんど全てに工学的な安全対策が用いられている。原子力発電所のみ、工学的な安全対策を認めないという考え方は公平性を旨とする裁判所の判断として不適切だ」とした。

（原子力学会編集委員会）

世界で運転中の原子力は426基に、原産まとめ

原産協会は4月14日、「世界の原子力発電開発の動向2014年版」を刊行した。各国の電力会社に対するアンケート調査などに基づき取りまとめたもの。2014年1月現在、世界で運転中の原子力発電所は合計426基・3億8,635万6千kWで、前年より3基・187万8千kW分減少した。

福島第一発電所事故に伴い原子力発電開発は一時停滞気味だったが、13年中に米国で35年ぶりに4基が新規着工したほか、中国で本格着工や営業運転開始が相次ぎ、世界の建設中原子炉は1992年以降最多の81基にも上った。特に、躍進著しい中国の31基を含め、アジ

アで建設中の原子力発電所は世界の6割強を占めるなど、堅実な動きがみられている。このほかベラルーシが同国初の原子炉建設を、アラブ首長国連邦も2基目の建設工事をそれぞれ開始した。ベラルーシの初号機は18年に運転を開始する予定。

13年中に世界で新たに営業運転を開始したのは中国2基、イラン1基の合計3基。初の商業炉運開となるイランを加え、原子力発電利用国は計31か国・地域となった。

具体的な進展が見込まれる新設計画としては13年中に新たに7か国の合計14基・1,370万kW分が判明

しており、計画中止分を差し引くと計画中の原子炉は合計 100 基・1 億 1,292 万 kW となった。新たに計画された国としては、バングラデシュの 2 基・200 万 kW

が特筆される。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

原産大会、「信頼回復への決意」テーマに開催

第 47 回原産年次大会が 4 月 15、16 日に都内で開かれ、国民の信頼回復などの重要課題について、国の内外から有識者や産業界関係者が参加し活発な議論を行った。大会の冒頭に所信を述べた今井敬原産協会会長は、国民の信頼の回復に向け、事業者の安全向上等の取り組みなどを国民に伝え、「不安と懸念の解消に全力を挙げなければならない」と強調した。

今井会長は、福島復興加速と被災者の生活再建が「我々の使命」とするとともに、政府のエネルギー基本計

画で原子力発電は重要なベースロード電源に位置付けられたことについては「政策の方向性が国内外に示されたものと高く評価する」と述べた。そのうえで「とりわけ、事業者のトップには、『福島第一原子力発電所と同様な事故は、二度と起こさない』という決意を事業経営の柱としていただきたい」とした。

今大会は「信頼回復への決意」を基調テーマに、原子力への信頼回復、2050 年の原子力、福島復興と地域再生等のテーマでセッションを行い、議論を交わした。

IPCC 作業部会報告書、原子力を評価しつつリスクにも言及

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の総会が 4 月 7～12 日、ドイツ・ベルリンで開催され、温室効果ガス(GHG)排出の抑制・削減に関する評価を行う第 3 作業部会の報告書を承認、公表した。10 月にデンマーク・コペンハーゲンで開かれる総会でまとめる IPCC 第 5 次評価統合報告書に盛り込まれるもの。報告書では、2100 年の世界の平均地上気温が、産業革命前の水準と比べ最大 7、8℃上昇するなど警鐘を鳴らし、エネルギー供給による CO₂ 排出量低減策として、原子力の貢献は認めつつ、リスクの存在にも言及した。

報告書では温室効果ガス排出に関し、この 40 年間の人為起源 CO₂ は 1750～2010 年の累積排出量の約半分を占め、特に 2000～10 年では経済成長と人口増加が、エネルギー面の改善による排出削減を凌いだなどと

する分析結果を示した。

数多くの緩和シナリオを分析したところ、2100 年までに産業革命前に比べて温度上昇 2℃未満に抑えられる可能性の高いシナリオの特徴として、エネルギー効率により急速に改善され、再生可能エネルギー、原子力などの低炭素エネルギーの供給比率が、50 年までに 10 年の 3～4 倍程度になっていることを挙げている。

緩和対策を行わない「ベースラインシナリオ」では、エネルギー供給部門からの CO₂ 排出量は 50 年に 10 年の約 2～3 倍になると評価しており、原子力については、「成熟した低 GHG 排出のベースロード電源だが、世界における発電シェアは 1993 年以降低下している」としたほか、各種の障壁とリスクの存在を指摘している。

トリチウムの取扱い 5 つを選択肢に整理、専門家会合

4 月 24 日、多核種除去設備による処理後のトリチウム水に関する資源エネルギー庁の専門家会合が開かれ、13 年 12 月からの議論を整理した。

トリチウム水取扱いの選択肢としては、「地層中に注入廃棄」、「海洋放出」、「水蒸気として大気放出」、「水素に還元し水素ガスとして大気放出」、「固化またはゲル化し地下に埋設廃棄」の 5 つの選択肢のほか、一時的な措

置として「貯蔵」を指摘。これらと希釈、同位体分離の前処理実施の有無とを組み合わせてリストの形にまとめた。

今後、さらに検討していく評価項目としては環境・水産物・人体への影響、処理期間、対策実施に係るコスト、技術的可能性、法規制上の困難さを挙げている。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】

ウレンコ社、濃縮工場の規模を拡張

米ニューメキシコ州ユースで遠心分離法による「ウレンコ米国ウラン濃縮工場」を操業しているルイジアナ・エナジー・サービス(LES)社は4月9日、同工場の拡張作業が第2段階を完了し、濃縮能力が3,700トンSWU/年に達したと発表した。

LES社は欧州の濃縮企業ウレンコ社の米国法人で、2006年に米原子力規制委員会(NRC)から同工場の建設・運転一括認可(COL)を取得。翌年に本格着工した後、10年6月に200トンSWU規模で操業を開始しており、徐々に拡張工事を進めていた。2012年12月からは第3段階の作業も始まっており、最終的な開発規模である5,700トンSWUを目指すとしている。

同社のD・セクストン社長兼CEOは、同工場が米国で唯一、現在のような商業規模で操業中のウラン濃縮施設になったと強調。仏アレバ社によるアイダホ州の遠心分離法濃縮工場建設計画は本格着工前であるほか、ケンタッキー州のガス拡散法工場を昨年閉鎖したUSECは、オハイオ州で「米国遠心分離ウラン濃縮プラント(ACP)」の建設を進めているが、今年3月には破産を申請した。GE日立ニュークリア社傘下のGLE社はノースカロライナ州で分子レーザー法による濃縮工場建設を計画。2012年9月に米規制委からCOLも取得済みだが、まだ着工はしていない。

DOE, WIPP での放射線漏れで 1次調査報告

米エネルギー省(DOE)は4月24日、ニューメキシコ州にある軍事・超ウラン元素(TRU)廃棄物深地層処分場(WIPP)の地下施設内で2月に放射線が検知された事象について、第1段階の調査報告書を公表した。調査委員会は、1個以上の廃棄物コンテナから漏れた微量のアメリシウムとプルトニウムが換気システムの設計不備により外部環境に放出され、21名の地上作業員が低レベルの内部被ばくを受けたと断定。「この事象は回避可能だった」とした上で、坑道内に再入場する調査チームが事象の発生源を特定した後、漏洩の直接原因と地下施設内での防護対策に重点を置いた補足報告書を公表するとしている。

<粒子状物質が調整弁からフィルタを迂回>

報告書によると、2月14日に地下655mの無人の施

設内で大気の常時監視モニタが検知した放射性物質は、地上排気棟にある粒子状物質高性能(HEPA)フィルタのろ過モジュールに誘導された。しかし、測定可能な量の放射性物質が換気システムの2つの調整弁を通してHEPAフィルタを迂回し、排気ダクトから直接環境に放出されてしまったというもの。

閉じ込め換気システムは2008年に安全上重要な機器の指定からはずされたほか、HEPAの排気管やバイパス遮断調整弁といった地上システムの設計は原子力産業界における換気コードの要件を満たす必要がなく、構造上もHEPAフィルタや格納容器と同等の性能を有していない。

ろ過されない排気環境への通り道となるこれらの調整弁は、フィルタを調整する際に閉じられていなくてはならない。設計上の漏洩率は最大で毎分1千立方フィート。調査委員会は、2月の事象時に調整弁から漏れ出した量は連邦有害大気汚染物質排出基準(NESHAP)の一般大衆に対するガイドライン以下だったとしたほか、DOEとWIPPがサイト職員用に設置した基準も下回ったとしている。

廃棄物コンテナ破損の物理的な原因については、事故後に調査委が地下に入ることができないため、現段階で最終的な判断は下せないと説明。DOEおよびWIPPの管理操業を請け負っているニュークリア・ウェスト・パートナーシップ(WNP)社が今後、組織的に地下施設に入るための復旧詳細計画を策定し、明確な原因を特定する。調査委は今のところ、天井部のボルトや壁の部分的崩落などがコンテナを破損し、汚染大気が放出されたと推測している。

【英国】

ムーアサイド計画が前進、 事業者が用地オプションを延長

英国エネルギー気候変動省(DECC)は5月1日、西カンブリア地方セラフィールドでムーアサイド原子力発電所の建設を計画している東芝と仏GDFスエズ社が、建設用地購入オプションを延長するための主要取引条件について、用地売却を担当する原子力デコミッション機構(NDA)と合意に達したと発表した。

ムーアサイド原発計画はもともと、GDFスエズ社とスペインのイベルドロラ社の合併企業であるニュー・ジェネレーション(NuGen)社が進めていたが、昨年12月に東芝はイベルドロラ社が保有していたNuGen社株50%の購入を決定。この売買取引は関連当局の承認

に加えて、NuGen 社が 2009 年に 7 千万ポンドで確保した 200 ヘクタールの建設用地購入オプションの延長が条件となっていた。

このため DECC は今回、3 基、340 万 kW 相当の原子炉を 2024 年から順次完成させるという同計画は大きく前進し、その実施が再確認されたと歓迎。英国に少なくとも 100 億ポンドの投資がもたらされるだけでなく、建設ピーク時に 6 千名以上と予想される雇用を含め、建設期間中の雇用は 1 万 4 千名規模となるほか、操業段階でも約 1 千名分の常勤雇用が維持されるとの試算を明らかにした。

東芝は今年 1 月、イベルドロラ社の 50%に加えて、GDF 社から NuGen 社株 10%を取得する方針を表明。同計画を通じて、英国に同社傘下の WH 社製 AP1000 の建設機会を確保するとしている。

【チェコ】

チェコ電力、テメリン増設計画をキャンセル

テメリン 3、4 号機増設計画を進めていたチェコ電力 (CEZ) は 4 月 10 日、投資資金回収の目処が不透明になったとして同計画をキャンセルすると発表した。前日の閣議で、政府が完成原発からの電力を固定価格で買い取る保証を与えることはできないと明言したことによるもので、入札に参加していた 3 企業連合にはすでに通知書を送付。しかし、今後 20 年以内に電力需給が逼迫していくとの見通しがあることから、さらなる原子力開発については政府が年末までに包括的な計画を提示するとしている。

CEZ は既存のテメリン原子力発電所サイトに 2 基増設するため、2009 年 8 月に公開入札を開始。これに対して、(1)東芝傘下のウェスチングハウス社、および同社とチェコ企業の合弁企業、(2)ロシアのアトムストロイエクスポート社とギドロプレス社、およびチェコ・スコダ社の企業連合、(3)仏アレバ社——が応札していた。当時は電力市場価格およびその他のファクタにおいても同計画には十分な経済的実現可能性があったと CEZ は強調。しかし、欧州の電力部門はその後、激しく変貌しており、今や自由市場での売電収入に依存する発電設備への投資すべてが危機にさらされていると説明した。

また、英国政府が固定価格での電力買取制度導入を決めたヒンクリーポイント C 増設計画の投資契約について、欧州委員会 (EC) は現在、EC 条約の国家補助規則に抵触するかの点で諮問協議を実施中。同制度に批判的な EC と EU 域内の電力部門に関する協議が今後も続くことを考慮し、チェコ政府は現時点で低炭素電源建設

に対する政府保証や価格の安定化メカニズムを提示する計画はないとした。こうした背景から、CEZ は買取価格保証などの政府支援なしで原子炉を建設することは難しいと判断。増設計画の中止を決めたと見られている。

ただし、CEZ の D・ベネシュ CEO は「これでチェコ国内での原発建設を停止するという意味ではない」と強調。今後 20 年以内に国内の電力需要をカバー仕切れなくなるというリスクは依然として深刻であり、将来的に更なる原発開発を保証していくために政府と緊密に協力していく必要があるとしている。

【トルコ】

アックユ原発増設計画で環境影響評価書を改訂

トルコ初の原子力発電設備となるアックユ発電所の建設を請け負ったロシアのロスアトム社は 4 月 9 日、同社のプロジェクト会社であるアックユ原子力発電会社が改訂版の環境影響評価 (EIA) 報告書をトルコ環境都市計画省 (MEU) に提出したと発表した。

オリジナル版で全 3 千ページという EIA 報告書は、プロジェクトの概要や目的、サイト選定の根拠、社会経済的規模など 12 分野の関係情報を網羅したもの。アックユ会社は昨年 7 月にオリジナル版を提出したが、書式の変更により MEU から一旦差し戻された。

また、同年 10 月には、トルコの様々な公的機関や団体、大学等の代表で構成される「EIA 審査特別委員会」が会合を開催。そこで取りまとめられた勧告や提案を斟酌するための修正作業が行われていた。追加情報を盛り込んだ改訂版 EIA のボリュームは約 3,500 ページに増加したと伝えられている。

【中国】

徐大堡サイトを承認、AP1000 を年内着工

中国の国家核安全局 (NNSA) は 4 月 9 日、中国核工業集团公司 (CNNC) がウェスチングハウス社製 AP1000 を 2 基建設する計画を進めている遼寧省沿岸部の徐大堡について、サイト承認を発給した。環境保護省が 3 月に一般公開した環境影響評価報告書に基づき、同サイトが安全上および環境保全上の要件を満たしていることを保証した。ただし、本格的な建設工事を始めるには国务院の承認が必要だとしている。

100 万 kW 級 PWR を最終的に 6 基建設するという徐大堡での原発増設計画に関し、CNNC は 2006 年に

地元遼寧省政府との協力取り決めに調印。09年に担当子会社として遼寧核電有限公司を設立した。11年1月には国家発展改革委員会が第1期分となる最初の2基について事前作業の実施を許可したのを受け、基礎掘削前の起工式を開催。同年9月にも1号機のコンクリート打設が行われる予定だったが、同年3月に発生した福島第一原発事故により、計画は一時凍結されていた。

現在の建設スケジュールとしては、今年中に1号機の建設工事を開始し、10か月後に同2号機も着工。それぞれ19年と20年に運転を開始すると見られている。

李首相が国家エネ委で方針、原子力推進に舵

中国の国家能源局によると、李克強國務院総理(首相)は4月18日に国家エネルギー委員会の今期初会合を開催し、主要プロジェクトとして東部沿海地域で新たな原子力発電所の開発計画にタイムリーに着手していくとの方針を表明した。

福島第一原発事故直後は原子炉新設計画の承認停止など暫定的に慎重な対応を取っていた中国だが、2012年秋には審査・承認の再開を決定。PM2.5など深刻な大気汚染問題を背景に、クリーン・エネルギー開発の促進とエネルギー需給構造の再構築を目指した大型プロジェクトを実施する方針を打ち出したもの。

李首相によると、東部沿海地域に新設する原発は、国際的な高い安全基準を満たす最新式の安全設備を装備したものとする。その他のプロジェクトとしては主に、水力、太陽光、風力の発電所、および西部から東部への高圧送電線建設が含まれるとし、これらによって安定的な経済成長を保証するとともに、エネルギーの供給保証能力を増強。エネルギー構造の調整にも役立てられると説明している。

李首相はまた、中国が大気汚染撲滅のための戦いを決意したと明言。この目標に向けて電気自動車開発の加速や、温室効果ガス排出要件をクリアしていない石炭火力発電所の改良など、生態系保全対策を強化していく。エネルギー源の多様化も図る方針で、シェールガスやシェール石油といった非在来型の化石燃料開発を促進するとしている。

19基目の寧徳2号機が運転開始

中国広核集团有限公司(CGN)は5月5日、福建省の寧徳原子力発電所サイトで2号機(PWR, 108万kW)が168時間の試運転を経て5月4日付けで営業運転を開始したと発表した。昨年12月に初臨界達成後、今年

1月に送電網への初併入を果たしていた同炉の正式な運転により、中国の原子力発電設備は19基、1,695万kWに到達。このうち62%にあたる10基、1,050万kWがCGNの所有だと強調している。

CGNは大唐集団、福建能源集団との共同出資により、運転会社の福建寧徳核電有限公司(FNNPC)を設立した後、2008年に同原発の建設工事を開始した。フランスの技術を元に開発したCPR1000設計を1期工事分として合計4基建設する計画で、機器の国産化率は80%に達しつつあると明言。すでに1号機は昨年4月に営業運転入りしている。

後続の3、4号機も建設進捗率はそれぞれ88%と68%に達しており、どちらも15年までに完成予定。3号機では4日から正式にコールド試験が開始された。4基すべてが運転を開始すれば、同原発の発電量は年間300億kWhに達する見通しで、標準炭にして年に980万トン節約できるほか、CO₂の排出量は2,400万トン、二酸化硫黄の排出量は約2,300万トン抑えることが可能だとしている。

【台湾】

龍門原発1号機は密閉管理、2号機は建設凍結に

台湾の馬英九総統は4月27日、ほぼ完成していた龍門原子力発電所(ABWR2基、各135万kW)について、1号機は現在行われている安全検査が完了し次第、密閉管理状態に置くほか、同2号機の建設作業は凍結するとの方針を発表した。1号機は廃炉とするのではなく、今後必要となった場合に操業する可能性があるとの明言。原子力という選択肢を台湾のエネルギー・ミックスから外したわけではないことを強調した。

同原発を将来、稼働させるか否かの判断は国民投票により決定すると台湾行政院(内閣)が28日付けで発表しており、それまで同原発に追加予算を割り当てたり、両炉に燃料が装荷されることはないとしている。また、現行の公民投票法では、投票案成立のためには有権者の50%以上が投票に参加した上で、賛成票が5割を超えなければならないが、この値を下方修正する特別規則の制定を求めた野党提案を行政院は却下。すべての国民投票と住民投票に現行法を適用すべきとの見解を示した。

制御システムセキュリティの重要性と現状

第1回 情報機器化する制御装置とセキュリティ対策

技術研究組合 制御システムセキュリティセンター 新 誠一
電気通信大学

現在の制御装置は情報機器である。そのために情報セキュリティ対策は不可欠である。もっとも、センサやアクチュエータなどのデバイスまでも含み、情報システムも内包する制御システムは被害の範囲が広いとともに、セキュリティ対策が難しい。それを踏まえて、本解説ではメカから始まった制御装置がシステム化、情報化されていった経緯から現在可能なセキュリティ対策まで制御システムのサイバーセキュリティを概観する。

I. はじめに

現代人の生活は、電気、ガス、水道などの重要インフラを始めとして、生活全般がマイコンと情報ネットワークに支えられている。この支えとしての学問が制御工学であり、中心になるのがコントローラである。このコントローラが電氣化され、マイコン化され、ソフト化され、ネットワーク化されている。

20世紀はマイコン化に焦点が当たっていた。そのため、2000年代初頭にはソフト化された制御装置のバグが大きな問題になっていた。しかし、既に2014年。ほとんどの個人が32ビットRISCの高性能デュアルコアマイコンが搭載され、GBを越えるメモリーを持ち、100Mbps以上の通信能力を持つスマートフォンを持つ時代となっている。その個人の活動を支えるインフラ側の制御システムもグローバルな通信が不可欠になってきた。

その意味で制御システムに対するセキュリティ対策を急がなければならない。ここでは、このシリーズ解説の口火として、制御システムとは何か、なぜ対策が必要か、そしてどのような対策が可能かということ概観したい。なお、制御システムへの情報攻撃をサイバー攻撃と呼び、それへの対策をサイバーセキュリティと呼びたい。

II. 制御システム

制御という概念は太古から存在する。しかし、学問と

Significance and Status of Control System Security (1) ; Controller as an IT device and countermeasure for cyber security : Seiichi SHIN.

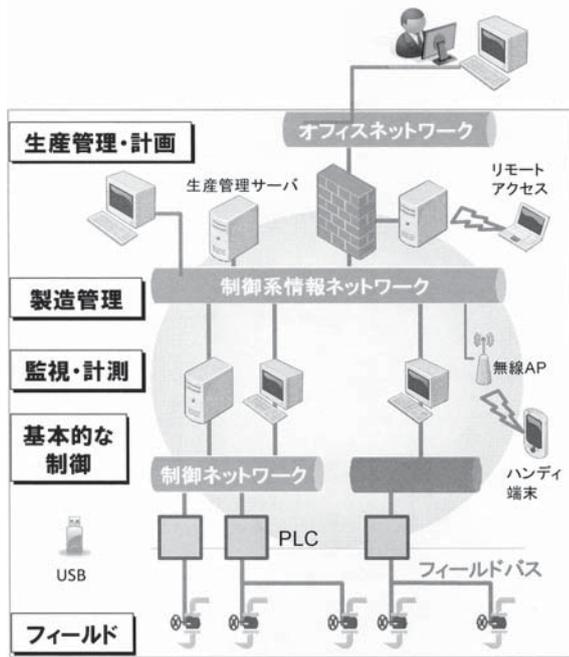
(2014年3月24日受理)

しての出発点はマックスウェルによる蒸気機関のガバナーの数理的な解析¹⁾だと言われている。ガバナーは蒸気の圧力とその蒸気で回転する重りの遠心力の釣り合いで蒸気圧力を維持する装置である。マックスウェルは微分方程式の安定性から、蒸気圧力、重りの質量、そして重りが装着されている腕木の質量や長さの関係を解析した。

その頃発達した電気工学の流れに乗って、制御工学はメカニズムからモータなどの電氣を用いた制御に移行した。電氣エネルギーは駆動力に使われるとともに、制御指令やセンサ情報を送ることに使われた。特に電氣を用いた情報伝達はキルヒホッフの法則から回線に流れる電流値が一定なことから、配線経路が長く、複雑となる工場には最適である。

第二次世界大戦後、産業界では4-20と呼ばれるアナログ通信規格が使われた。これは、4mAをゼロ%、20mAを100%とする伝送規格である。この規格に沿ってセンサからコントローラへ信号が送れるとともに、コントローラからアクチュエータに指令信号が送れるようになった。それだけでなく、この規格を満たすセンサ、コントローラ、アクチュエータを自由に組み合わせて結合することができる。ここに制御システムという概念が生まれた。

1970年代になるとデジタル化が進捗する。通信規格も4-20に代表されるアナログ規格からデジタル規格に移行した。当初は開発したベンダー毎に違った規格を使い、その枠内でしかシステム化できなかった。そのデジタル規格を束ねる国際標準として、ISO15745やIEC61784が生まれた^{2,3)}。これにより制御システムの範囲がネットワークへと広がった。



第1図 制御システム

この国際標準で想定しているシステムは、オフィス系のLAN(Local Area Network)、制御用LAN、センサ・アクチュエータを結ぶデバイス系LANの3段構成である(第1図)。制御系情報ネットワークはオフィス系と同様にイーサネットが使われている。ただし、内部の通信は制御情報に限られている。ここでは、スケジューラやプランナー、各種データベースに加え、MES(Manufacturing Execution System)と呼ばれる工場内の稼働情報を統合化するサーバーが動いている。それ以下の階層は独自のネットワークやプロトコルが使われている。具体的には制御用やデバイス系のLANは実時間性を保障するための時間同期の仕組みが取り入れられている。図中では制御ネットワークやデバイスネットワークが相当する。しかしながら、現在はIP(Internet Protocol)またはそれを改造したものをベースにする通信ネットワークに変わりつつある。

III. 制御装置

ここまでは操業に限った制御システムの捉え方である。実際は制御アルゴリズムの開発やメンテナンスまで視野にいれなければいけない。まずは制御アルゴリズム開発について説明しよう。

弁の開閉や開度などをセンサ情報に基づいて決定するのが制御装置である。リレーをマイコン化したものをPLC(Programmable Logic Controller)といい、連続値を制御するPID(Proportional Integral Derivative)コントローラなどの統轄から発展したものをDCS(Distributed Control System)という。自動車ではECU(Electronic Control Unit)と呼ばれている組込ボードがコントローラである。

業界によって呼称が異なるが、コントローラはセンサ、アクチュエータからの実時間信号を24時間、365日観測し、指示を出すための制御機能に特化している。そのために、制御アルゴリズムの開発はパソコンなど別な計算機を使うケースがほとんどである(第2図)。この開発用パソコンとコントローラとはイーサネットやUSB(Universal Serial Bus)、古くはRS-232Cなどの通信規格を用いて接続されている。パソコンで開発した制御アルゴリズムはクロスコンパイルをしてPLCやPIDコントローラなどにダウンロードされて動作する。

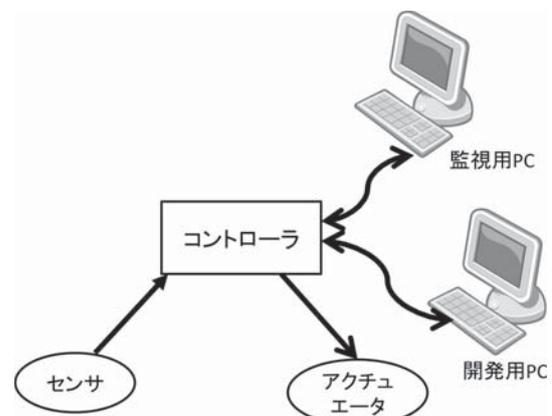
制御におけるパソコン利用は開発に留まらない。制御動作の監視や操作などにもパソコンが多用されている。その意味で、コントローラはパソコンと不即不離の関係である。

IV. ネットワーク化

1985年のプラザ合意以降、円高となり国内の人的費用が上がった要因もあり、省人化が進んだ。2000年代に入ると孤立していた制御システムがインターネットに接続され始める。一つは遠隔監視のためであり、もう一つは市場と生産の連携の進展のためである。

制御システムは山奥の取水場など人の立ち入りが難しい所や石油精製施設などの爆破の危険性があるところで稼働している場合も多い。具体的には複数の拠点をネットワークで結び、中央監視室で管理運営する形態である。

もう一つの形態は、市場連動型である。JIT(Just In Time)生産システムでは在庫を持たず、かつ欠品は許されない。市場要求に沿った生産をしなければならない。年次、月次、週次、日次と生産計画が徐々に短縮されてきている。これに呼応するためにはSCM(Supply Chain Management System)が必要であり、これはWindowsとインターネットの技術が基本である。さらに、天候や為替相場に応じた最適生産を行うと何らかのインターネット接続が不可欠である。



第2図 コントローラ

V. BYOD化

さて、20世紀までは大規模な装置のマニュアルは紙であった。一つの機器だけでマニュアルが棚を占拠することは当たり前、一つの工場であれば図書館並みの設備が必要であった。一つの設備にしても機械的な図面、電気的な図面、ソフト的な図面に標準操作マニュアルが必須である。また、機器の異常時には、それに対応した検査マニュアルもいる。

このようなわけで機器を維持管理する作業員や修理に出向く作業員は、棚一つ分に相当するマニュアルをひっくり返しながらか、機器の裏側や下側に潜り込んで作業をしなければならない。

もっとも、最近の機器は情報化が進んでいる。PDF (Portable Document Format) などの電子文書化することで、棚が不要になってきている。しかし、電子文書を読むためのパソコンが必要である。

パソコンは電子マニュアルを読む以上の使い方がされている。現在の複雑化した設備、小型化された設備ソフト化された設備は人が検査して異常の原因を探すことは不可能である。何らかのOBD (On Board Diagnosis) の仕組みが導入されている。設備内の機器レベルで異常判定をし、異常があればアラームとして操作盤などへ知らせる仕組みである。

修理する技術者は、この仕組み以上の作業が必要である。OBDで検出されないエラーが起きている場合やOBDが誤ってエラーを出している場合があるためである。いや、それ以上に、異常になったボードを外して新しいボードを設置し、その初期設定をしなければならない。そして、そのボードがシステムの中でちゃんと動作していることを確認しなければならない。

この作業は通常の運転で使用している操作盤ではできない。専用のパソコンを持ち込んで行われる。場合によってはパソコンでは完結せずにメーカーに設置されたサーバーと接続して検査することもある。接続は自前のルータというケースも少なくない。時には、BYOD (Bring Your Own Device)、自分の私物パソコンやルータが使われることもある。

VI. 対策

以上、示してきたように制御機器がネットワーク機器化してきた。直接インターネットに接続されていない事業所でもパソコンを通じて間接的に接続されていると考えてよい。制御アルゴリズムの開発、制御システムの監視、故障対応などにパソコンは必須である。このOSを最新バージョンにするためには何らかの手段でインターネットに接続する必要がある。

逆に古いバージョンのまま使うことも可能だが、それは公開された脆弱性を貯め込んだパソコンを使うことに

なる。これは大きすぎる潜在リスクを抱えることになる。

このような古いOSやアプリケーションを使い続けている事業所の中にはファイアーウォールやアンチウイルスソフトを導入していることを免罪符としているケースもある。しかし、制御システムの上位系に、この2つの対策を導入するのは当たり前だが、それでは不十分である。

このことを検証するために、制御システムと情報システムとの違いを見ていこう。簡単にまとめると、以下の2点が違う。

(1) システムの範囲

(2) 被害の規模

まず、(1)についてであるが、情報系ではサーバー、データベース、端末程度が関心の範囲である。それに対し、制御システムは下側にコントローラ、センサ、アクチュエータというデバイス群がぶら下がっている。これらのデバイスはリアルタイム動作をしていること、およびメモリー量やCPU性能などに制限がある。このため、アンチウイルスソフトをデバイスレベルで稼働できないという問題がある。さらに、情報システムが想定していない、デバイスレベルからの攻撃がありうる。

さらに、(2)の問題である。情報システムに対しサイバー攻撃がされた場合、情報漏洩、サービス停止、データベース破壊が想定範囲である。それに対しデバイスを抱える制御システムとなると電気、水道、ガスなどの現物のサービス停止や爆破や毒ガス放出などの破壊や汚染につながる恐れがある。

2010年にはSTUXNETがイランのウラン濃縮施設の攻撃に使われた。そして、2011年3月11日に発生した東日本大震災では地震による自然災害に起因して、大規模停電、上下水のサービス停止、交通網の停止、通信網が停止した。これは、現在の社会が電子機器や情報ネットワークで支えられている現実を強烈に思い知らされた出来事であった。そして、STUXNETに代表されるサイバー攻撃は、このような事態を引き起こしかねない可能性をはらんでいる。このような訳で制御システムは情報システム以上のセキュリティ対策が必要だといえる。

さて、サイバー攻撃に対する具体的な対策であるが、これは大きく三つしかない。暗号化、認証、監視である。また、情報技術は情報通信、情報蓄積、情報処理の三つの技術に分解できる。この3×3のマトリクスで制御システムを採点することで、システムのセキュリティレベルを評価することができる。たとえば、通信は暗号化されているか否か、データベースは暗号化されているか否か、処理は暗号化されているか否かである。

処理の暗号化は少し分りにくいので説明を加える。一つは暗号化されたデータを平文化せずに処理が行えるかということである。処理時に平文化されれば、そこは

脆弱性となりうる。もう一つは、どのような処理をしているかブラックボックス化ができていないかである。IC などでは耐タンパ性という言葉が使われているが、これがソフトウェアでも成立しているか否かということである。

認証も同様である。通信に認証が必要か、蓄積に認証が必要か、処理に認証が必要かどうかということがセキュリティレベルに関係してくる。外部アクセスに認証が必要、データベース操作に認証が必要は当たり前だろう。処理への認証ではホワイトリストに関心が高い。これは、許可されたサイトや処理(プログラム)をリスト化し、リスト外にはアクセスできないようにしたものである。アンチウイルスソフトの一つの機能でもある。

ファイアーウォールは通過するパケットを監視して、許可されたプロトコルやポートだけを通し、それ以外を遮断する機能である。その意味で認証であるが、最近では監視機能を持つのもでてきた。たとえば、通過するパケットやアクセスのログをとる機能があると監視の始まりである。もちろん、ただ単に記録をとるだけでなく、アクセスのパターン変化に応じてアラームを出すようになると本格的な監視機能となる。

先に述べたように、多くの事業所ではファイアーウォールとアンチウイルスソフトの導入でセキュリティ対策は十分と考えている節がある。この二つは必要である。しかし、十分ではない。アンチウイルスソフトは既知のウイルスにしか効果がない。標的型と言われるが、特定の事業所を狙った攻撃には無力である。また、ファイアーウォールも盤石ではない。情報技術の世界に存在するのはビット列のみである。これを文字とみたり、メモリーのアドレスとみたり、数値とみたり、プログラムとみたりする。この見方、解釈に脆弱性があると無害と思われていた文字列が急に凶器と化す。普段使っている文書編集ソフトや Web ブラウザー、PDF リーダーなどに脆弱性があれば、直ぐにファイアーウォールの設定を変える必要がある。まず、使われているソフトウェアを常に把握しているか、次にそのソフトの脆弱性を把握しているか、最後に新しい脆弱性に応じてファイアーウォールの設定を適切に変えているかが問題となる。

もっとも、この設定を変えるというのも問題を含んでいる。一つはウイルスの機能を遮断するように設定すると他のアプリケーションの動作に支障をきたす場合があること、二つ目は設定ミスが起こることの二つが大きな問題である。前者の問題があるので、脆弱性が既知でも強い設定にできないケースがある。後者の場合は、閉じてはいけないサーバーのポートを閉じたり、空けてはいけないサーバーのポートを開けたりしている例が多数見受けられる。

以上のことから、ファイアーウォールが設置されているとか、アンチウイルスソフトを使用しているというだ

けでは、十分な対策になっていないことは情報セキュリティに限っても明白である。

現在、それ以上の対策として有望視されているのが侵入検知システムである。これは、システム内の通信トラフィックを監視して外部との異常な通信や内部の許可されないポートへのアクセスを監視するもので、感染しない対策を施したうえで感染を早期に発見するものである。

さて、制御システム全体に、たとえば第3図に示す対策を講じることはコストが許さない。限られた予算をどこから投じていくかが実際問題としては大事である。この順番決めではリスクアナリシスが欠かせない。どのような事象が起こることが最悪であるかを決めて、その被害を最小化するように投資していく必要がある。これは、機能安全のリスク分析と同じ仕組みである。具体的には HAZOP (Hazard And Operability) 解析, FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) 解析, FTA (Fault Tree Analysis) 解析などである。このような解析は制御システムを熟知していないとできない。

さて、このように分析をすると、機能安全ブロックや二重化部分から投資することになる。機能安全ブロックの脆弱性は速やかに改善または回避(ワークアウト)すべきである。また、不要な通信ポートが直接的、間接的に接続されていないことを確認すべきである。

24 時間、365 日動いているものは制御システムに限らず二重化されている事例が多い。しかしながら、同じ機器、同じ OS、同じソフトが動いているものがほとんどである。これをホモ・システムと呼ぼう。ホモであれば、同じ脆弱性を持ち、同じ攻撃に対して同じ被害を受ける。その意味で、ホモな二重化はアリバイ作りの域を出ない。

機器を変える、OS を変える、ソフトを変えるというヘテロ性が 24 時間動いているシステムには必須である。もちろん、機器などは違っても同じ機能を果たすという意味ではヘテロな基盤上でのホモな動作である(第4図)。このホモ性とヘテロ性の組み合わせがサイバーセキュリティ対策の新たな未来である。

この中の一つとして仮想 OS が注目されている。これ

	対策技術	暗号	認証	監視
情報技術				
通信		%	%	%
記憶		%	%	%
処理		%	%	%

第3図 情報セキュリティ技術



第4図 ホモとヘテロ，同一基盤上での別なアプリケーション，別な基盤上での同一のアプリケーション。

は，ある OS 上で別な OS を動かすものである。本来は完結している OS の挙動を下側の OS や別なヘテロな OS で監視することで危険を防ぐ仕組みである。

最近ではスマートフォンなどのアプリが App Store や Google Play などの特定サイトからしかダウンロードできない。このようなサイトにアップロードされているソフトは仮想 OS 上で動作させて異常な挙動を示さないことを確認した上で公開されている。DCS などで稼働しているソフト群を別な仮想サーバーで動作させて整合性を常に監視する仕組みは必要だろう。特に，新たな攻撃手法が生まれると OS などがアップデートされる。そのアップデートが稼働するアプリケーションに悪影響を及ぼす可能性がある。多くの DCS ベンダーは，OS のアップデートに対応してアプリケーションの整合性を確認した後に OS のアップデートをすることを推奨している。しかしながら，その確認には最低でも一月程度の時間がかかる。OS のアップデートという形で世間に脆弱性情報が公開されているにもかかわらず，それを一月放置することはたいへん危険である。将来は，脆弱性情報公開と同時に整合性を検証できる仕組みも構築していく必要がある。そこには，クラウド，仮想 OS という技術が必須である。しかしながら，そのような対応は新たな脆弱性を生みかねない。この攻撃と対策のイタチゴッコが制御システムセキュリティ対策の難しさである。

もう一つのホモ・ヘテロ対策として有望視されているものが，二重化の利用である。二重化されている所は制御システムでも特に重要な部分である。現在はホモ構成なので，同じ脆弱性が存在する。同時に二つが稼働しているが，一つ稼働していれば良いということが基本である。そうならば，一つは，そのまま，もう一つだけをアップデートすることができる。新旧のソフトを二重化

コントローラで動作させて，問題ないことが確認できたら旧のソフトを新に変更すれば無停止でソフトウェア更新が可能である。

このような仕組みが可能なら，二重化されていないコントローラにも有効である。すなわち，バイパス化である。稼働しているコントローラにバイパスコントローラを設置することで疑似二重化が可能である。二重化ができれば，無停止アップデートもできる。それ以上に，感染が疑われるコントローラを切りだして検査をすることもできる。もちろん，プラントは無停止である。

以上，制御システムセキュリティ対策にはホモとヘテロの活用が重要である。

VII. まとめ

以上，制御システムセキュリティ解説の連載の皮切りとして，制御システムの説明や，情報システムを上回る対策の必要性，そして対策の概念的な説明を行った。具体的な手法や現状は続きの解説（第2回 原子力分野における制御システムセキュリティ，第3回 制御システムのセキュリティテストベッド）に期待いただきたい。

もっとも，脆弱性は技術的な側面だけでなく，人系の側面も大きい。人の管理，パスワードの管理，認証権限の管理など管理系の対策が不可欠である。技術研究組合制御システムセキュリティセンター (CSSC) は技術的な側面を中心に扱っている。管理的な面については，技術面から CSSC でもサポートしていくつもりである。

— 参考資料 —

- 1) J. C. Maxwell, "On governors," Proc. Royal Soc. London, Vol. 16, 270-283 (1868).
- 2) 新 誠一：ADS-net と国際標準化活動，計測と制御，Vol. 39, No. 3, 209-215 (2000).
- 3) 新 誠一：産業用ネットワーク技術の動向，計測と制御，Vol. 44, No. 6, 353-357 (2005).

著者紹介



新 誠一 (しん・せいいち)
電気通信大学 教授
制御システムセキュリティセンター
(専門分野/関心分野) 制御工学，計測工学，システム工学。

制御システムセキュリティの重要性と現状

第2回 原子力分野における制御システムセキュリティ

技術研究組合 制御システムセキュリティセンター
 (株)三菱総合研究所 村瀬 一郎

近年、制御システムセキュリティが話題となっている。特に、原子力分野においては、2010年にイランの核燃料施設に対して STUXNET と呼ばれるマルウェア (攻撃プログラム) によりサイバー攻撃が行われ、サイバーセキュリティ対策の必要性の認識が浸透しつつある。本稿では、原子力分野における制御システムセキュリティの脅威動向と対策の方向性、国際機関等における対応動向を述べる。

I. はじめに

以前より、IT分野のサイバーセキュリティ対策は、インターネットに接続されるシステムや、金融系のシステム等 (これらを情報システムと呼ぶ) において問題となってきた。しかし、世の中には、情報システム以外に、制御システムが存在する。制御システムは、プラントや工場、ビルにおいて、タービン、ボイラ、空調、照明等の機器を制御する役割を担っている。こうした制御システムに対するサイバーセキュリティ上の脅威は、2010年10月にイランの核燃料施設に対する STUXNET と呼ばれるマルウェア (攻撃プログラム) によるサイバー攻撃が報告され、制御システムの関係者の中で脅威が広く認識されるようになった。また、STUXNET により遠心分離機が物理的に破壊されたことが報告され、原子力分野の制御システムにおけるセキュリティ対策の必要性が叫ばれるようになった。

II. STUXNET^{1~4)}

STUXNET は、2010年7月中旬に出現し、Windows や Siemens のソフトウェアの脆弱性を悪用し、結果的に遠心分離機の破壊に至った。攻撃対象は、イランのナタンズの核燃料物質関連施設であり、クローズドなシステムに侵入し、遠心分離機に物理的な損害をもたらすに至った。これによって、制御システムはクローズであるため安全であるという関係者の認識は大きく変貌した。

Significance and Status of Control System Security (2) ; About the industrial control systems security in the nuclear sector :
 Ichiro MURASE.

(2014年3月24日 受理)

STUXNET の動作概要を次に示す。

- (1) STUXNET が制御システムまたは近傍の情報システムに侵入：USB メモリー等可搬型デバイス、または情報システムからの侵入 (Windows のネットワーク関係サービスの脆弱性を悪用した可能性が指摘されている) により STUXNET が制御システムへ侵入する。
- (2) Windows パソコンにおける管理者権限の取得：STUXNET は、Windows パソコンの脆弱性 (実際の攻撃時点では未知の脆弱性であり、未知の脆弱性を利用した攻撃をゼロデイ攻撃という) を悪用し、管理者権限を取得する。
- (3) 制御システム内で特定のソフトウェアが稼働するエンジニアリング端末に侵入
- (4) STUXNET は、Windows システムフォルダを検索することにより、Siemens の SIMATIC WinCC あるいは SIMATIC PCS 7 (いずれも Siemens が提供する制御システム向けの監視制御システムであり、端末側にはエンジニアリング機能を有する) 端末が稼働する Windows パソコンを探し当てる。
- (5) 攻撃コードのダウンロード：STUXNET は、SIMATIC WinCC または SIMATIC PCS 7 が稼働するパソコン上で、Siemens のコントローラ (PLC) のコードを攻撃コードに変更する。概要は、次の通り。
 - ・CPU が 6ES7-417 および 6ES7-315-2 である PLC を攻撃対象とする。
 - ・当該 PLC は、周波数変換装置を制御しており、STUXNET は、807 ~ 1,210Hz の高周波数部分の制御を攻撃対象とする。

- ・何か月にもわたって、周波数変換装置の出力周波数を短時間のうちに 1,410Hz, 2Hz, 1,064Hz と順に変化させる。

この結果、遠心分離機が過負荷となり、全体の 10% が物理的損害を被ったと言われている。

なお、上記の(1)~(5)以外にも STUXNET は様々な特徴を有している。代表的な特徴を次に示す。

- (a) STUXNET は、ファイル共有機能の脆弱性を利用して自らを他のパソコンにコピーし増殖
- (b) ルートキットと呼ばれる機能を有し、操作者が STUXNET の存在を認知することを阻止
- (c) 監視制御システム (SCADA) を乗っ取り、ディスプレイ上に異常状態であることを表示せず、通常状態であることを表示
- (d) イランのナタンズの核燃料施設のシステムを標的とした攻撃

このように、STUXNET は非常に高度な機能を有するサイバー兵器であり³⁾、多額のコストをかけて作成されたことが推察される。

III. STUXNET への対策

STUXNET への対策を検討する上で重要な視点は次の通りである。

- (a) 複数の公表されていない脆弱性を悪用していること
- (b) USB メモリーが初期感染源である可能性があること
- (c) ディスプレイにおける表示データと実際のデータが異なっていたこと
- (d) 標的となった核燃料施設を十分に調べたサイバー攻撃であること
- (e) クローズなシステムに対して攻撃がなされたこと

上記の視点に沿って、対策を述べる。

- (a) 複数の公表されていない脆弱性を悪用している (ゼロデイ攻撃である) こと

制御システムにおいては、端末やサーバにセキュリティパッチを適用することは、可用性重視の観点から難しい場合が多い。さらにはゼロデイ攻撃の場合、セキュリティパッチ自体が配布されていないためセキュリティパッチを適用することは不可能であり、セキュリティパッチ適用による対策をすることはできない。セキュリティパッチ適用が困難な場合の対策として、ホワイトリスト技術が注目を集めている⁴⁾。ホワイトリストとは、サーバや端末においてはあらかじめ決めたソフトウェアの動作 (ホワイトリスト) に従ってソフトウェアの動きを制限し、通信機器においてはあらかじめ決まった通信 (ホワイトリスト) のみを許可する技術である。ホワイト

リストは、制御システムで重要であるリアルタイム性確保の点からも有望とされている。

- (b) USB メモリーが初期感染源である可能性があること

STUXNET は USB メモリーを介してシステムに侵入した可能性が指摘されている。USB メモリーによるマルウェア感染を防止するためには、USB メモリーを利用不可能とすることが必要である。それには、USB ポートを塞ぐまたは着脱する、USB ポートへの I/O バスを外す、USB ポート管理エージェントを導入し USB ポート利用の際には上司の承認を必要とする等の対策がある。また、USB メモリーをやむを得ず利用する場合、USB メモリー装着前にスタンドアロンパソコン (ネットワークから切り離されたパソコン) でウイルスチェックすることは必須である。

- (c) ディスプレイにおける表示データと実際のデータが異なっていたこと

表示データと実際のデータが異なっていた理由は、SCADA の未知の脆弱性を悪用したことによる。現場においては、表示系が常に正しいわけではないことを念頭に置き、実際のデータを現場から収集するシステムを SCADA とは別に実装する (デジタルではなくアナログで実装する方式も考えられる)。

- (d) 標的となった核燃料施設を十分に調べたサイバー攻撃であること

STUXNET のようなサイバー兵器の製造のためには、サイバー空間のみならずリアル空間での事前の綿密な調査が行われていることが推察される。このような綿密な調査が行われるか否かは、攻撃側と防御側を取り巻く安保情勢に依存する。STUXNET は、イランとその周辺国および欧米諸国との不安定な関係が背景にあったと考えられる。防御側がこうした安保情勢を認識することが対策の第一歩となる。

- (e) クローズなシステムに対して攻撃がなされたこと
- クローズなシステムにおける脅威と対策は IV 章にて述べる。

IV. 我が国原子力分野における制御システムの現実的な脅威と対策

STUXNET は事前に標的を綿密に調査した標的型攻撃であり、我が国の原子力分野において、この種の標的型攻撃が現実的な脅威となりうるかは不明である。そこで、本稿では我が国原子力分野における制御システムの現実的な脅威と対策について述べる。

原子力分野に限らず、制御システムは一般的にクローズであると考えられている。こうしたクローズであると考えられているシステムの脅威と対策は、次に示すこと

ができる⁵⁾。

(1) USB ポートの利用

USB ポート利用への対策はⅢ章に挙げた通りである。

(2) リモート監視システムによる外部ネットワーク接続

コントローラの制御対象機器は、高価な機器であることも少なくない。こうした高価な機器の場合、問題発生時への対応のためにベンダがリモート監視回線を設置することがある。リモート監視回線に係る脅威は、通信経路で盗聴される可能性があること、不適正な端末をリモート監視端末として接続される可能性があること等がある。

こうした脅威への対策は、リモート監視システムを専用線により構築し暗号化通信を行うこと、リモート監視端末にはクライアント証明書をダウンロードし認められた端末以外はリモート監視端末として利用できないことにする、リモート監視端末におけるセキュリティ検査を実施する等がある。

(3) 操作端末の入れ替え

日本のある自動車会社では、2009年にエンジニアリング端末入れ替え時に、ベンダが持ち込んだエンジニアリング端末にコンピュータウイルスが混入し、組立ラインの応答が3日間程度低下した。

こうした脅威を防止するためには、ベンダが持ち込んだPCの場合でも、ネットワークに接続する前にウイルスチェックを行うことが必要である。

(4) 物理セキュリティの突破

物理セキュリティを突破された場合、サイバーセキュリティ上最も重要な脅威は、通信機器の空きポートに通信ケーブルが接続され、正規ではないパソコンによるエンジニアリング端末や監視制御端末に成りすましが実行される可能性があることである。また、USBポートは様々な機器に装着されており、USBポートからマルウェアを感染させることも可能である。

こうした脅威への対策は、入退室管理の徹底(立ち入りに係る事前申請の徹底、二要素認証、持ち物検査、共連れ防止、体重検査、ドア鍵管理等)、通信機器における物理対策(通信機器の物理的管理の徹底等)等が挙げられる。

V. 国外におけるサイバーセキュリティ対策の動向

原子力規制庁は、NRCとIAEAの動きを次のように述べている。⁶⁾

「NRC(米国原子力規制委員会)は2001年から本格的に取り組む始め、2009年に全原子炉に対しサイバーセキュリティに関する義務化を行い、さらに2010年にはガイドラインを発表している。IAEAも2011年に核施設におけるコンピュータセキュリティに関するガイドラ

インを発表し、メンバー諸国にも積極的に対策と訓練を行うように促している。日本国内の原子力発電所におけるサイバーセキュリティも世界と同レベルで万全の対策を取っていくことが必要である。」

2013年7月1日国際原子力機関(IAEA: International Atomic Energy Agency)は、核セキュリティ国際会議を開催し、核セキュリティに関する国際会議(グローバルな努力の強化)閣僚宣言を採択した^{7, 8)}。サイバーセキュリティに関しては、次のように述べられている。

「サイバー攻撃に対する認識を高めるIAEAの努力を認識し、IAEAがこの分野での国際協力を促進して、国家を支援する更なる努力を行うことを奨励。」

さらに、IAEAはサイバーセキュリティに関して様々な取り組みを行っており、その概要を述べる^{7, 8)}。

IAEAは、制御システムへのサイバー攻撃が新たなトレンドになりつつあると述べ、制御システムにおける脅威は次を挙げている。

- ・リモート監視
- ・USBメモリー等可搬型デバイス
- ・サプライチェーン
- ・物理攻撃を伴う攻撃
- ・SNS(Social Networking Service: インターネット上の会員向け情報交流サイト)を用いた情報収集や個人への接近
- ・無線通信
- ・ゼロデイ攻撃

また、IAEAはサイバーセキュリティ対策として次の活動を行っている。

- ・ガイドラインの作成
- ・情報交換会(フォーラム)の開催
- ・地域での訓練の開催
- ・地域や世界的な演習の開催
- ・インシデントレスポンス(緊急時対応)習熟のための情報提供
- ・その他の普及啓発活動

VI. まとめ

原子力分野のサイバーセキュリティ対策は決して海外のみの問題ではなく、我が国においても差し迫った問題である。IAEA等国際機関や標準の動向を念頭に置きつつ、我が国における原子力分野の制御システムのサイバーセキュリティ上の脅威を客観的に分析し対策することが重要である。

— 参考資料 —

- 1) 日本シーサート協議会: マルウェア STUXNET(スタクスネット)について,
<http://www.nca.gr.jp/2010/STUXNET/>, 2010.10
- 2) トレンドマイクロ: 「STUXNET」ファミリがSCADAシステ

- ムを狙う！、
<http://about-threats.trendmicro.com/RelatedThreats.aspx?language=jp&name=STUXNET+Malware+Targets+SCADA+Systems>, 2010.10
- 3) ニューズウィーク日本語版：産業サイバー兵器スタックスネットの防ぎ方,
<http://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2010/10/post-1683.php>, 2010.10
- 4) 猪股晃匡：STUXNETの脅威と今後のサイバー戦の様相,
<http://www.bsk-z.or.jp/kenkyucenter/pdf/23kennshouronnbunnjyushousakuhinn.pdf>, 2012
- 5) 技術研究組合制御システムセキュリティセンター：CSSCのご紹介,
http://www.css-center.or.jp/pdf/about_CSSC_ppt.pdf, 2013/12
- 6) 原子力規制庁：福島第一原子力発電所事故を踏まえた国内外での教訓,
https://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_anzenkijyun/data/0001_09.pdf

- 7) 外務省：IAEA 核セキュリティ国際会議(概要)
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/page3_000286.html, 2013/07
- 8) IAEA：核セキュリティに関する国際会議：グローバルな努力の強化 閣僚宣言(骨子)
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000007118.pdf>, 2013/07
- 9) 国際原子力機関：Office Of Nuclear Security Cyber Security Programme,
http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-05-22-05-24-TWG-NPE/day-2/4.cyber_security_introduction.pdf, 2013.05

著者紹介



村瀬一郎 (むらせ・いちろう)
 (株)三菱総合研究所
 制御システムセキュリティセンター
 (専門分野/関心分野) 制御システムセキュリティ/情報セキュリティ

学会誌への投稿記事の採否に関する判断基準

日本原子力学会 編集委員会

学会誌への投稿は、記事原稿の作成に先立ち、記事提案書(学会 HP に記載)の提出が必要となります。提出された記事提案書は編集委員会で審議し、通過したものについて記事原稿を提出していただくことにしています。

投稿記事の内容については著者に責任がありますが、記事提案書の審議において、投稿記事が下記のいずれかに該当すると判断した場合は、学会誌に掲載することをお断りすることになっています。なお、記事提案書に基づいて執筆された記事原稿につきましても、下記のいずれかに該当すると判断した場合や、記事提案書と異なる内容の原稿が提出された場合は、掲載することをお断りすることになっています。

- (1) 事実を無視し、あるいは歪曲した意見。
- (2) 真偽が不明な内容を含む場合。
- (3) 文章に論理性がない場合。文章が意味不明な場合。
- (4) 掲載することにより、学会の品位に傷がつく恐れがある場合。
- (5) 良識に欠けるとされる意見。例えば、個人あるいは組織の中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (6) 美醜、好悪に類する判断に依拠している場合。
- (7) すでに掲載された記事と同様の内容である場合。
- (8) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。
- (9) 会員にとって掲載する価値がない場合。
- (10) 余り期間を空けない同一者からの投稿。

(注1) 記事提案書の審議結果については約1か月で事務局よりお知らせいたします。

(注2) 掲載否の場合、該当事由の番号をお知らせしますが、それ以上の説明は致しません。

(改定 2012年6月1日)

制御システムセキュリティの重要性と現状

第3回 制御システムのセキュリティテストベッド

技術研究組合 制御システムセキュリティセンター
(株)三菱総合研究所

澤部 直太

技術研究組合 制御システムセキュリティセンター (CSSC) では、2013年5月に宮城県多賀城市に東北多賀城本部 (TTHQ) を開所した。TTHQ には世界でも数少ない、7つの模擬システムを備える制御システムセキュリティテストベッド施設 (愛称: CSS-Base6) を併設した。本稿では、CSS-Base6 の概要と活用事例を示し、テストベッドの運用と課題について述べる。

I. はじめに

現在、電力・ガス・その他の重要インフラは制御システムにより管理されている。昨今、国内外で制御システムに対する様々なサイバー攻撃が出現しており、国家の安全保障および危機管理上、制御システムのセキュリティ向上は非常に重要な課題と考えられている。

技術研究組合 制御システムセキュリティセンター (CSSC)¹⁾ は、制御システムのセキュリティを高める技術の研究開発を目的に、2012年3月に設立され、2013年5月には宮城県多賀城市に東北多賀城本部 (TTHQ) を開所した。TTHQ には、制御システムセキュリティテストベッド施設 (愛称: CSS-Base6) として、7つの模擬システム (各種プラント、組立工場、ビル制御、発電所、スマートシティなど) を備える制御システムのセキュリティテストベッドを併設した。

II. テストベッドの目的

CSS-Base6 の主要な目的は、制御システムセキュリティに関する研究開発と普及啓発・人材育成である。

(1) 研究開発

従来の制御システムでは専用のハードウェア・ソフトウェアが使用されていたが、近年では Windows に代表される汎用 OS が使われコモディティ化が進んでいる。このため、一般の IT システムと同様の脆弱性が制御システムにも存在することになる。そこで、マルウェア対策などが必要となるが、制御システムの可用性を重視す

る運用上の性質等から、古い汎用 OS を使い続けたり、必要なリソース (CPU やメモリーなど) が不足するなど、十分な対策ができないケースが多い。

CSSC では、これらの課題を技術と運用の両面から解決するために、セキュリティ検証やセキュリティ機能の開発を行っている。CSS-Base6 では、様々な分野の模擬システムやコントローラ等を幅広く備えることで、研究開発の加速を狙っている。

(2) 普及啓発・人材育成

制御システムに対するサイバー攻撃に関する脅威は、2010年の STUXNET (イランの核燃料施設のウラン濃縮用遠心分離機を標的としたサイバー攻撃) により広く知られるようになった。その後、各種制御システムに関する脆弱性情報が流通し始めているが、「制御システムはインターネットに接続していないから安全」という考えが根強く残っている。また、制御システムと情報セキュリティの両面に長けた人材も非常に不足している状況である。

CSSC では、セミナーや CSS-Base6 の模擬プラントを用いたデモを行うことで、制御システムセキュリティの普及に努めている。また、制御システムセキュリティの知識習得を目的とした教育プログラムの開発や、CSS-Base6 の模擬システムを用いたサイバーセキュリティ演習を実施することで、制御システムを使用する各分野の人材育成を図っている。サイバーセキュリティ演習では、各分野の設計者や運用者を対象とした、攻撃・守備型の演習も実施する。

III. テストベッドの概要

CSS-Base6 は、総床面積約 2,000m² の中に、研究開発や普及啓発・人材育成に必要な施設やネットワーク基

Significance and Status of Control System Security (3) ; About the industrial control systems security test bed: CSS-Base6 : Naota SAWABE.

(2014年3月24日 受理)

盤、模擬システムなどを備えている。

(1) 施設

教育プログラムに基づく座学形式の講義や、模擬システムを用いたデモやサイバーセキュリティ演習などを行うために、以下の部屋を用意した。

(a) 模擬プラント室

制御システムの監視センターを模した中央監視卓(第1図)を中央に設置し、6つの模擬システムを中央監視卓の周りに配置した。デモを行う場合、模擬システムの前に加えて、中央監視卓を使った操作を可能とした。

中央監視卓には80インチの大型ディスプレイを3面配置し、それぞれデジタル処理で4分割することで、合計12面のマルチディスプレイとして利用可能とした。中央監視卓の机上には6台の小型ディスプレイを配置し、各模擬システムの操作画面を表示するとともに、備え付けたキーボード・マウスを使って操作可能とした。模擬システムの操作画面や中央監視卓の画面は、72入力・72出力のデジタル方式のマトリックススイッチを介することで、CSS-Base6内の各部屋で自由に選択して表示可能とした。

(b) システム評価室(研修室)

40名程度の座学講義が可能な設備に加えて、一つの模擬システムを配置した。3台のプロジェクタを設置し、手元の講義資料のみならず、7つの模擬システムの操作画面や各部屋のモニタカメラ(天井に設置)の映像も自由に選択表示可能とした。模擬プラント室でデモを行う際に、模擬システムの操作画面や説明者の映像・音声システム評価室で視聴することも可能である。

(c) 演習室

8名程度の少人数で議論や演習を行うための演習室を4部屋(A～D)用意した。また、人数に応じて2部屋ずつ(A+B, C+D)につなげて使用することも可能である。攻撃・守備型のサイバーセキュリティ演習を行う場合に、守備側のチーム(Blue Team)が使用することを想定している。

(d) Red Team 室

6名程度で利用可能であり、攻撃・守備型のサイバーセキュリティ演習を行う場合に、攻撃側のチーム(Red Team)が使用することを想定している。演習室とは物理



第1図 CSS-Base6の中央監視卓

的に離れた位置に配置することで、演習実施時に各チームのメンバが独立して活動できるように工夫している。

(2) ネットワーク基盤

CSS-Base6のネットワーク基盤では、生活系ネットワークと研究開発系ネットワークを分離して構成した。

(a) 生活系ネットワーク

オフィス用に有線・無線の双方を提供するとともに、施設内のサイネージ(ディスプレイを使った看板)などに使う映像用(有線・無線)、来訪者などの利用を想定するゲスト用(無線)を提供している。

(b) 研究開発系ネットワーク

研究開発系ネットワークには、模擬システムや研究開発用のサーバやツールを接続する。仮想サーバや仮想ネットワークを使うことで、可能な限りサブネットに分割し、他のサブネットからの不要な通信が流入しないようにしている。また、研究開発系ネットワークでは、攻撃・守備型のサイバーセキュリティ演習や制御システムのセキュリティ検証などが行われることから、インターネットなどの外部に不正な通信が流れないように、IPS(不正侵入防御システム)を要所に設置している。

(c) サーバ室

ネットワーク基盤に用いるネットワーク機器やサーバは、生活系サーバ室と研究開発系サーバ室に分けて配置し、それぞれ異なるセキュリティポリシーでの運用を可能としている。

(d) 外部接続

インターネットアクセスに加えて、CSSC東京研究センター(東京都港区)との間を、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の研究ネットワークJGN-Xを用いて1Gbpsで接続している。加えて、JGN-Xを使用することで、同じくNICTが所有するエミュレーション基盤StarBEDと連携して、大量の計算機リソースを用いた研究開発についても計画している。

(3) 模擬システム

CSS-Base6は、以下の7つの模擬システムを備えている。各模擬システムでは、制御対象はスペース等の制約からシステムの一部やミニチュア模型などを設置しているが、コントローラやサーバ類については、実際の制御システムに使われるものと同様の機器を用いている。

(a) 排水・下水プラント(第2図)

下水処理で多く用いられている汚泥と水の分離を行う沈殿槽の制御を模擬している。安全計装および物理的な緊急停止ボタンを備えている。

(b) ビル制御(第3図)

ビルの照明と空調の制御を模擬している。模擬プラント室の照明の一部も制御対象として接続している。

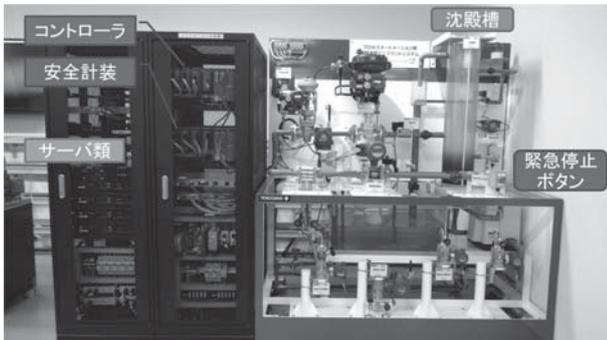
(c) 組立工場(第4図)

自動車の組立工場の一部のロボット(部品のより分け)の制御を模擬している。サイバー攻撃によるロボットの

異常動作などを体感できる。

(d) 火力発電所訓練シミュレータ(第5図)

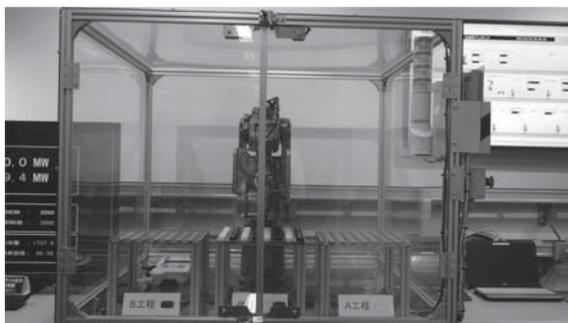
火力発電所に設置されている訓練シミュレータ装置にサイバーセキュリティの要素を加え、サイバー攻撃で起



第2図 排水・下水プラントの模擬システム



第3図 ビル制御の模擬システム



第4図 組立工場の模擬システム



第5図 火力発電所訓練シミュレータ

こりうるインシデントを模擬している。

(e) ガスプラント(第6図)

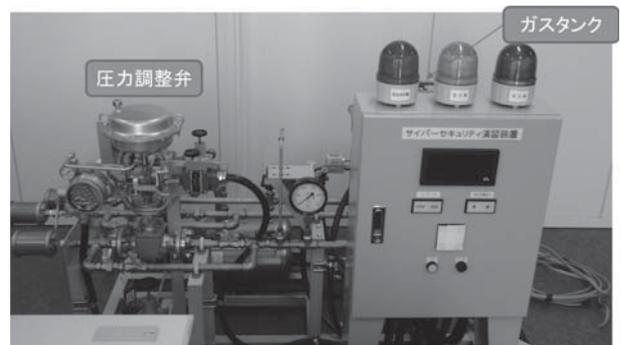
ガス製造プラントのタンクの制御を模擬している。サイバー攻撃により、ガスタンクの実際の圧力と、監視画面上の数値にずれが生じる様子や、その結果として現場での目視確認や手動操作が必要となるなどが体感できる。

(f) 広域制御(スマートシティ)(第7図)

スマートシティを構成するコントロールセンター及び変電所を模擬している。サイバー攻撃により系統制御が奪われて、停電が広域に起こりうることを体感できる。

(g) 化学プラント(第8図)

化学プラントの水槽の制御を模擬している。サイバー攻撃により水槽の水位制御が効かなくなり、液体が水槽から溢れ出す様子が体感できる。システム評価室に設置しており、模擬システムの実機を確認しながら座学講義を行うことを可能としている。



第6図 ガスプラントの模擬システム



第7図 広域制御(スマートシティ)の模擬システム



第8図 化学プラントの模擬システム

IV. テストベッドの活用事例

CSS-Base6の活用事例として、研究開発や普及啓発・人材育成を目的としたサイバーセキュリティ演習と教育プログラムについて示す。

(1) サイバーセキュリティ演習

CSSCでは2014年1～3月に、4分野(電力、ガス、ビル、化学)を対象としたサイバーセキュリティ演習を実施した。参加者(現場の担当者、技術者、関係するベンダ等)が、制御システムにおけるセキュリティ上の脅威を認識し、セキュリティインシデント発生の検知手順や障害対応手順の妥当性の検証等を行うことを目的とした。

4分野ともに、テキストベースの机上演習と模擬システムを用いた機能演習の双方を実施した。

机上演習では制御システムにおける脅威を解説した。

機能演習では、脅威が制御システムに与える影響について体感するとともに、適切な対策を行うことでリスクが低減可能であることを確認した。

(2) 教育プログラム

CSSCでは2013年11月に、制御システムセキュリティ分野を対象とする機能安全セミナーを実施した。

機能安全セミナーでは、制御システムセキュリティの国際規格であるIEC 62443を中心とする座学講習に加えて、模擬システムを用いた演習を行った。これにより、制御システムセキュリティの脅威、対策、標準化の動向についての最新の知識の習得を目指した。

V. テストベッドの運用と課題

CSS-Base6は設計時において、環境構築・変更の柔軟性を重視し、費用対効果を意識しつつ可能な限り仮想化とデジタル化を図った。その結果、2013年5月の運用開始から、CSSCの研究開発のための仮想ネットワークや仮想サーバ、攻撃・守備型のサイバーセキュリティ演習のための仮想環境や各種ツール、教育プログラムやデモのための模擬システム稼働環境、等を提供してきた。

現時点では、必要な機能や性能、可用性等については、問題なく提供できていると考えている。一方で、いくつかの課題も確認できており、今後は課題解決に向けたさらなる取組みが必要である。

(1) 運用作業の効率化、自動化

仮想化やデジタル化を進めた結果、様々なニーズに対応した機能の提供は可能となった。一方で、それらの機能を提供するための作業の多くが手作業となっているため、工数がかさみ提供までの時間もかかっている。運用作業の効率化のためには、スクリプトを用いた自動化などの対応が必要である。特に、サイバーセキュリティ演

習の環境構築の効率化や、機能演習における攻撃側の自動化ツールの開発が望まれる。

(2) テストベッド構成の変更管理

研究開発にCSS-Base6を活用する場合、仮想ネットワークや仮想サーバを提供し、場合によっては研究開発系ネットワークの一部を変更する必要がある。また、研究開発プロジェクトの終了時には、提供したリソースの撤去や研究開発系ネットワークの復元が必要となる。このような場合の構成管理が現時点では十分にできていないために、スケジュール管理機能を含めた構成管理ツール等の導入が必要である。

(3) 制御プロトコルへの対応

制御システムでは、分野やベンダの違いによって、使用する制御プロトコルが異なる。最近ではIPベースのプロトコルも増えてきているが、非IPベースのプロトコルも数多く存在する。CSS-Base6の研究開発系ネットワークでは、レイヤ2(データリンク層)/レイヤ3(ネットワーク層)のいずれのネットワークも提供できる仕組みを用意している。このため、レイヤ1(物理層)にEthernet(広く普及しているLAN規格)を使用していれば、その制御プロトコルの利用は、基本的には可能である。

ただし、CSS-Base6ではセキュリティ確保の観点から、要所にIPSを設置することで、制御プロトコルについても監視・管理を行っている。IPSにおける各種制御プロトコルのサポートは、現時点では一部のプロトコルへの対応に留まっている。今後、IPSで新たな制御プロトコルへの対応が行われた場合には、その挙動の確認方法・確認手順を含めて、テストベッドに安全に導入する手法を確立する必要がある。

VI. まとめ

制御システムセキュリティに関する研究開発は、まだ緒に就いたばかりの新しい分野であり、今後も脅威や課題が変化していくことが予想される。本稿で紹介したCSS-Base6でも、環境変化に追従して、機能の追加・変更を絶え間なく加えてゆく予定である。

— 参考資料 —

- 1) 制御システムセキュリティセンター ホームページ
<http://www.css-center.or.jp/>

著者紹介



澤部直太(さわべ・なおた)
 (株)三菱総合研究所
 制御システムセキュリティセンター
 (専門分野/関心分野)クラウドコンピューティング/情報セキュリティ/制御システム

核セキュリティにおける核物質の非破壊測定技術

日本原子力研究開発機構 早川 岳人,
大阪大学 藤原 守

世界では核セキュリティの強化が重要視されており、特に鍵となる技術の一つが核物質及び放射性同位体の非破壊測定技術の開発である。その実現のためには、従来の原子力工学の領域を超えた原子核物理学、加速器科学、レーザー科学、核融合科学等の専門家の協力が必要であり、共同研究が行われつつある。

I. はじめに

IAEA を中心とする世界の核不拡散体制は完璧から程遠く、インド、パキスタン、南アフリカ(後に廃棄)等の核兵器保有国を生み出し、現在も複数の国家で核兵器開発が疑われている。このため、核不拡散体制の強化とそのため技術開発が求められている。核不拡散体制の中で、核セキュリティは最近になって特に重要性が増してきた分野であり、国際的な監視体制の強化と共に、新しい技術が求められている。これまで、核セキュリティは核不拡散の中において、核物質の盗難などを防ぐなどの意味が強かったが、2001年9月11日に米国で発生した同時多発テロによって、核セキュリティに関する世界の情勢は一変してしまった。同時多発テロでは、人々が想像しないようなテロの攻撃を受ける可能性を示すと同時に、世界的なネットワークを持ち、高い技術力や資金力に裏付けされたテロの可能性、テロを遂行する人間の生存を無視した作戦を行って行くことを端的に示した。そのため、従来想定されていなかったような放射性同位体(核物質を含む)・核兵器を用いたテロの可能性が真剣に議論されるようになり、人々は核テロに対してどれだけ無防備なのかを認識するに至った。現在、世界で様々な核セキュリティ技術の開発が進められている。本解説記事では、核セキュリティに関する世界の状況、求められている技術、緊急の課題である核物質の非破壊測定法の開発状況について述べる。

II. 核テロの分類

まず核テロの大雑把な分類と現在開発されてきた非破壊技術について整理しておきたい。まず原子力施設への

Non-destructive Measurements of Nuclear Materials in Nuclear Security : Takehito HAYAKAWA, Mamoru FUJIWARA.

(2014年4月30日 受理)

直接的な攻撃が挙げられる。9.11同時多発テロの後、すぐに指摘されたのはハイジャックされた飛行機による原子炉施設への突撃である。また、福島第一原発の事故以降では、武装したテロリストが原子炉を占拠して原子炉を暴走させる危険性が指摘されている(すなわち、原子炉ジャックである)。いわば福島第一原発の事故を人工的に誘発するものであり、その被害がどうなるかについて我々はすでに良く知っている。これらに対する防護は、飛行機の衝突に耐えられるように格納容器の物理的な強化を図ることや、警備体制の強化など多岐にわたる。また、核物質及び放射性同位体の盗難、日本国は保有していないが核兵器そのものの盗難も核テロ防護の対象である。

実行が比較的容易な核テロは、放射性同位体(RI)の散布によるテロである。これはダーティボムと呼ばれている。医療用のコバルト60などのRIや、使用済核燃料を通常の爆弾によって発散させたり、貯水地に散布したりすることが考えられる。海外では医療用RIの事故によって死傷者が出る事態が発生しているが、ダーティボムの場合には意図的にRIを拡散させるため、一人当たりの被ばく量は下がり健康被害を受ける可能性は逆に下がる。そのためダーティボムによって死者が出る可能性は低いが、都市部で行われた場合には相当なパニックが発生すると想像され、経済的・政治的な損害は極めて大きく、特に人口1,000万人の首都圏で発生した場合には大勢の人が苦しむことになる。

核テロの中で一番大きな被害をもたらすのは、いわゆる原子爆弾を用いたテロである。首都圏で広島型原子爆弾の1/3の威力の爆弾が爆発した場合の被害の試算があり、29万人が死亡し100万人以上が負傷するとの試算結果が出ている¹⁾。首都圏の場合には、人口密度が高いため広島・長崎の被害より大きく算出されていると思われる。しかも、このような核テロが発生する確率は平成

17年当時で、1年間あたり0.4%と評価されている。単純に積分した場合、30年間で12%の確率になる。戦術核兵器と呼ばれる小型の原子爆弾をテロリストが盗み出す可能性や、核物質を入手したテロリストが独自に広島型原子爆弾を製造する可能性等が検討されている。

別の核テロの可能性はJCOの事故で偶然発生したように、準安定した臨界状態を維持する放射線源を用いたテロである。この場合には γ 線や中性子は拡散するものの放射性同位体は装置内に留まるので、広域の汚染の可能性は下がる。ただ、ダーティボム同様、パニックになる可能性がある。

Ⅲ. 世界の核セキュリティ対策

様々な種類の核テロに対して、それぞれ対応策が講じられている。核セキュリティの中でも、従来から対策されていた核物質の盗難防止や原子力施設の防護などは、より過激なテロリストによる攻撃の可能性を踏まえて世界的に強化されつつある。日本においても、原子力施設の警備を担当する警察の警備能力の強化がすすめられている。

核セキュリティの中で必要とされる新しい技術は、捜査技術、核鑑識、核物質の非破壊探知などの諸技術である。核鑑識は不法に密輸出入されようとした核物質や放射性同位体を押収した場合や、核テロが発生した現場で採取した放射性同位体を分析し、その起源(開発した国家・機関や、生産された鉱山など)を解明することが目的である。核鑑識の中核技術は精密な同位体分析技術であり、同位体組成や混合されている不純物から、生産された鉱山や工場等を同定することが主要な目的である。同位体組成の精密測定技術は、環境科学や地球化学などの様々な分野で発達しており、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)や加速器質量分析(AMS)などの技術が使われている。一般に、同じ鉱物であっても産地によって同位体組成が完全には同じではないので、同位体組成を精密に測定できれば原材料である元素を算出した鉱山を特定できる。測定技術とともに重要なのは分析した結果が照合可能な国際的なデータベースである。そのため、様々な核物質及び関連物質の精密なデータ計測と登録が重要であり、このようなデータベースの強化が核鑑識のもう一つの柱であると言える。

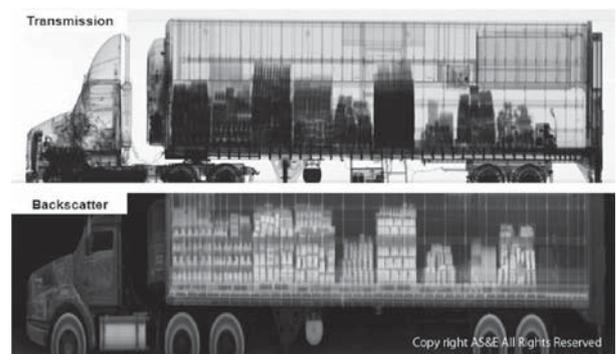
捜査技術については、東京電力(株)福島第一原子力発電所(福島第一原発)の事故は様々な教訓を与えてくれた。その中の一つが仮に核テロが発生し、放射性物質が広域に散布された場合に具体的に何をしなければならないのか、ということである。例えば、最初に汚染区域がどこで、どのような核種がどれだけ散布されているのか、素早く知る必要があり、初期の救護や核テロの捜査において被ばくを安全なレベルまで落として行う際に必要な技術である。このような実際に必要とされる技術に

ついては、日本では警視庁科学警察研究所等で実務経験をもとに研究開発されている。

核物質の非破壊測定技術は最近になって特に精力的に研究開発されている技術である。9.11の同時多発テロ以降、米国政府は本気で核物質・核兵器を用いたテロ(核テロ)の可能性を検討し、その核テロを未然に防ぐために様々な政策の実行及び技術開発を行っている。第2防衛ライン(Second Line of Defense)政策をすすめており、これは米国に不法に持ち込まれる核物質を検知して、持ち込みそのものを水際で防ごうとする政策である。海外から米国に持ち込まれるトラックの荷台、海上コンテナ、航空貨物用コンテナ等に対して外部から、核物質(放射性同位体)の有無を非破壊で測定する。非破壊で測定するのは、物流を極端に遅延させられないため検査に掛けることができる時間が限られていることと、容易にコンテナを開封することができないので開封する場合には何かしらの根拠が必要なことによる。

9.11以降、米国で新たに設立されたホームランドセキュリティ省が巨額の予算を企業や研究所に投下して、セキュリティ機器の開発を促した。その結果、核物質探知以外の非破壊装置の能力については相当に進歩したと言える。制動放射X線をプローブとして用いて、X線の透過吸収ないし後方散乱を計測することで内部の様子をほぼリアルタイムで知ることが可能になっている(第1図参照)。

ゲート型(ポータル型)の放射性同位体の非破壊測定装置は開発され、実用化されている。これらは、シンチレータによる γ 線測定器と、ヘリウム3中性子検出器から構成されるのが典型的な構成である。トラックがゲートの間を通過する時間で、環境バックグラウンドより高いレベルの放射線の検出を試みる。現在では、放射性同位体の核種同定ができるように、高エネルギー分解能のゲルマニウム半導体検出器から構成されたゲート型モニターも実用化されているが、相対的に高価である。これらの装置は、放射性同位体によるダーティボムや、プルトニウム型原子爆弾の検知に有効である。プルトニウム型原子爆弾には、通常、半減期が短いプルトニウムの同



第1図 X線透過(上)、後方散乱によるトラックの内部画像の例(ポニー工業(株)の提供による)

位体が混ざるため、放出する放射線の量が多い。米国では、第二防衛ライン政策の一部として、中核プログラム(Core Program)を遂行し、陸路で米国に持ち込まれる核物質を止めようとし、ゲート型モニター等をメキシコ、カナダとの長い国境に配備している。なお、中性子検出器の主要材料としてヘリウム3を用いているために、世界的なヘリウム3欠乏を招いている。

第二防衛ライン政策の一部は、メガポートイニシアティブ(Megaport Initiative)であり、米国に輸出する海上コンテナについて、輸出前に事前に核物質の有無の検査を輸出国に行ってもらおうとしている。最終的な目的は、米国に輸出する海上コンテナに核物質が含まれていないことを輸出国が確認することを要求することである。ただし現時点では、港湾施設において海上コンテナ中の核物質を非破壊で検知できる装置は実用化されておらず、実施は延期されている。その一方で、既存のゲート型モニター、放射線計測機器の供給とその取扱いの教育を世界の複数の港湾に対して行っている。

X線透過装置、ゲート型モニター等の既存技術の延長線上にある測定機器は実用化され、すでに世界の様々な国で配備されている。日本も例外ではなく、既に一部で導入されている。これらの機器の開発によって、ダーティボムやプルトニウム型原子爆弾の検知はある程度の見込みが立った。しかし、重要な核物質の一つである ^{235}U に対しては非破壊装置の目途が立っておらず、 ^{235}U の非破壊測定技術は核セキュリティ技術開発の中でも最重要事項と言っても過言ではない。IAEAが定める ^{235}U の有意量(Significant Quantity)は25kgであり、広島型原子爆弾では約60kgの ^{235}U が使われた。したがって、最悪の原子爆弾による核テロを防ぐにはkg単位の ^{235}U を事前に探知する必要がある。

日本では、2010年の核安全保障サミットで核セキュリティに貢献することを宣言した結果、日本原子力研究開発機構の中に核不拡散・核セキュリティ総合支援センターが設立され、様々な技術開発・教育が開始された²⁾。

IV. 核物質の非破壊測定技術

1. 中性子を用いた非破壊測定技術

原子力分野では、使用済核燃料の非破壊分析などで中性子をプローブとして用いる測定技術が使われてきた。中性子誘起反応による核分裂からの遅発中性子あるいは γ 線を計測することで核物質を測定する。その具体的な測定技術は様々なバリエーションがあるが、現在まで2つの理由で、中性子ビームを用いた核物質の非破壊測定技術は核セキュリティ分野では実用化されていない。一つには中性子源の問題がある。小型で強度がとれる中性子源としては重水素(D)-トリチウム(T)核融合反応を用いたものであり、十分な実績を有する。しかし、トリチウム自身が放射性同位体であり、水素の同位体である

ため化学的に変化しやすいため人体にも取り込まれやすく、低エネルギーの β 線しか放出しないため測定が困難であるという問題がある。仮に何らかの理由でトリチウムが流出した場合には、やっかいな放射性物質汚染事故になってしまう。そのため、厳重な管理が必要であり運用コストが上がってしまう。また、検問など野外で使うのは非現実的である。

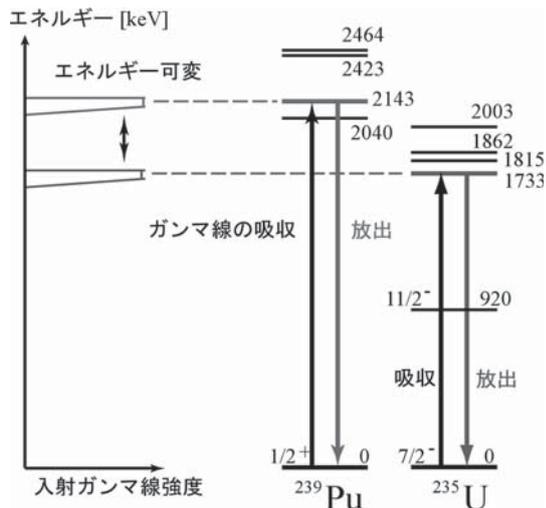
もう一つの問題は測定方法である。連鎖反応を測定原理として用いる場合には、連鎖反応が環境に大きく依存するという問題がある。核分裂で放出された中性子が効果的に減速や反射されると連鎖反応が起こりやすい。しかし、それは核物質を取り囲む物質の種類と厚さに依存するため、検知は単純な方法ではできない。中性子の捕獲反応 γ 線や中性子捕獲反応で生成された不安定同位体の β 崩壊に伴う γ 線を検知する方法も検討されているが、中性子捕獲反応は様々な物質で発生するため、結果的に様々なエネルギーの γ 線が発生し、目的とする核物質を良いS/Nで計測できるとは限らない。

京都大学で開発中の重水素-重水素(DD)核融合中性子源を用いた装置について触れておきたい。トリチウムを使うことに困難があるため、DD核融合中性子源における中性子強度の増強を行っており、既に 10^8 中性子/sを達成している。DD核融合では中性子の最大エネルギーが2.45MeVであり、核分裂によって放出される中性子の最大エネルギーより低い。そのため、入射中性子よりエネルギーの高い中性子の検知を行うことで、原理的なS/Nの改善が期待できる。また、パルス化への改造とパルスビームを用いた原子炉雑音分析法を改良した測定方法の改良を行っており、理想的な環境では0.5kgの高濃縮ウランが検知可能であることを実験的に示している。

2. 核共鳴蛍光散乱による非破壊測定技術

マサチューセッツ工科大学のW.Bertozziは、9.11同時多発テロ以降、 γ 線をプローブとした核共鳴蛍光散乱(Nuclear Resonance Fluorescence: NRF)による核物質の非破壊測定法を提案した³⁾。原子核物理学の観点から、同位体を識別する原理的に最も有効な核反応の一つはNRFであると言える。原子核と電子から構成されている原子に励起状態が存在するように、原子核にも核子(陽子や中性子)の軌道変化や原子核全体の集団運動による励起状態が存在する。原子核の励起状態のエネルギーは同じ元素であっても、同位体によって大きく異なる。そのため、核種毎に固有の励起状態が存在するので、励起エネルギーを選ぶことができれば、目的とする核種のみを測定できる(第2図参照)。

ある測定対象となる核種の励起状態のエネルギーに等しい γ 線を照射すると、特に角運動量の小さい遷移状態が選択的に励起される。この励起状態はフェムト秒から



第2図 核共鳴蛍光散乱(NRF)による分析方法の概念図

ピコ秒のオーダーの非常に短い寿命で、励起エネルギーにほぼ等しいエネルギーの γ 線を放出して基底状態に戻る。この現象を核共鳴蛍光と呼び、この時放出された γ 線を核蛍光 γ 線と呼ぶ。このエネルギーを測定することで、同位体の存在を知ることができる。また、その発生量を計測することで、同位体の量も測定することが可能である。

3. レーザーコンプトン散乱 γ 線

W.Bertozziは γ 線源として広く使われていた制動放射X線を γ 線源として採用した。連続エネルギー分布を持つ制動放射X線をNRFに用いると、NRF励起に寄与しないエネルギーの γ 線が圧倒的に多いため、これらが標的物質からの原子散乱に起因するバックグラウンドノイズとなり、NRF計測のSN比を悪化させる。

NRFによって励起できる γ 線のエネルギーはeVのオーダーの非常に狭いエネルギー幅である。したがってNRF測定には、エネルギー幅が狭い単色の γ 線を用いた場合、高いS/Nが得られる。しかしながら、これまでに利用可能な単色エネルギーの γ 線は、中性子の捕獲反応 γ 線や、放射性同位元素の自然崩壊による γ 線等にほぼ限られていた。これらの手法では、任意の希望するエネルギーの γ 線を得ることは不可能である。ローレンスリバモア研究所のC.Bartyは、 γ 線源としてレーザーコンプトン散乱(Laser Compton Scattering: LCS) γ 線を用いることを提案した⁴⁾。また、同時期に使用済核燃料の分析をLCS γ 線のNRFを使うことが日本原子力研究開発機構で提案された⁵⁾。

レーザーコンプトン散乱(LCS)とは、通常のコンプトン散乱と同様に電子と光子の相互作用であるが、電子のエネルギーが高いこと、光子としてレーザーを用いることが特徴である。コンプトン散乱されたレーザー光子には電子からエネルギーと運動量が移行され、散乱後には数桁高いエネルギーと運動量を持つ。また相対論的効果

によって散乱角が電子の進行方向に集約され、シンクロトロン放射光のような鋭いビームとなる。エネルギー幅の狭い γ 線を生成することが可能であり、実際にエネルギー(E)に対するエネルギー幅(dE)の比でみると、 $dE/E=1\sim 10\%$ が実現している。また、ほぼ100%の直線偏光や円偏光が可能という特徴を有する。

LCS γ 線のNRFを用いた場合には、(1)原理的にS/Nが良い、(2)MeV領域の γ 線を用いるため高い透過力が期待できる、(3)水素を除くすべての元素に適用可能、(4)励起状態を有する全ての安定同位体及び不安定同位体を識別可能、などの特徴を有する。これらの特徴を見ると、理想的な非破壊測定技術と思えるが、必要な条件を満たす高輝度のLCS γ 線が開発途上であるため利用されるに至っていない。

MeVエネルギー領域のユーザー利用可能なLCS γ 線としては、1990年代初頭より、米国のデューク大学及び、現在の独立行政法人産業技術総合研究所(産総研)において開発され、利用に供されていた。遅れて2005年ごろからSPring-8内のニュースバル放射光施設でも3番目のLCS γ 線装置が稼働している。原子力機構を中心とする研究チームは、厚さ1.5cmの鉄の箱の中に入れた鉛の非破壊測定の検知を産総研のLCS γ 線を使って測定するなどの基礎的実験を行って、この測定技術の有効性を検証してきた⁶⁾。また、原子炉のプールに保管された使用済核燃料中のプルトニウムを測定した場合の性能をシミュレーションによって評価するなどの研究を行っている⁷⁾。

既存のLCS γ 線より5~7桁輝度が高い次世代のLCS γ 線の開発が世界で始まっている。ローレンスリバモア研究所では核セキュリティ研究のためにVELOCIRAPTORと呼ばれる装置を開発中であり、ヨーロッパでは800億円以上の予算を投じて光科学研究のための大規模な高輝度LCS γ 線装置ELI-NPをルーマニアに今年から建設開始予定である。ELI-NPでもNRFによる核物質の非破壊測定技術の研究が行われる予定になっている。ただ、残念なことに、これらの装置では輝度は高いのだが、 γ 線の繰り返し数が10~100Hz程度と低い。一方、日本では高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が中心となり、エネルギー回収型リニアックによるレーザーコンプトン散乱 γ 線装置の試験機の開発が進行中である。ただし、生成される γ 線のエネルギーは10keV以下であり、MeV領域への拡張が期待されている。

V. 国際会議の開催

ここまで述べてきたように、新しい核物質の非破壊測定技術を開発するには、従来の原子力工学の枠を超えた最新の科学技術を取り込む必要がある。そのため、日本原子力研究開発機構の主催で、国際シンポジウム



第3図 国際会議 NPNSNP の集合写真

“Nuclear Physics and gamma-ray sources for nuclear security and nuclear nonproliferation (NPNSNP)” が2014年1月28～30日に東海村で開催された。世界各国から、原子核物理学、加速器科学、レーザー科学、核融合科学などの各分野の第一線の研究者が集まり、議論をすすめた。米国、フランス、ウクライナなど11か国から総勢63名の参加者があり、口頭発表38名、ポスター発表8名の発表があった。第3図に集合写真を示す。このうち民間企業からは3件の口頭発表があった。これらの講演では、核セキュリティに直結した講演だけでなく、諸分野の最先端研究の発表も行われた。核セキュリティの専門家にとっては、様々な分野の最先端技術を知る機会となり、諸分野の専門家にとっては自身の研究が核セキュリティ技術という形で世界平和に貢献しうる可能性を知る機会となった。幸いなことに、この会議の意義が参加者に認められ、第2回会議がローレンスリバモア研究所主催で2年後に開催されることが決まった。なお、この国際会議については、2014年3月にデンハーグ(オランダ)で開催された核安全保障サミットにおいて、安倍総理から紹介された日本の活動を説明するビデオの中で紹介されたことを付け加えておきたい。

VI. テロの可能性と対策

テロが災害や事故と本質的に異なる点の一つがある。それは、悪意を持った人間が引き起こすという点である。悪意を持った人間は、社会の弱点を探し出し意図的にテロを起こそうとする。そのため、どんな優れたシステム・技術であっても、いつかは弱点が発見され無効化されてしまう。社会をテロから守るためには常にテロリストの一步先を行かなければならず、新しい技術を開発す

る必要があるのである。

極めて残念なことであるが、テルアビブ空港乱射事件やサリン事件など、日本人はテロリズムにおいても新しい形態を生み出しているという歴史的事実がある。前者では、イスラエルで発生したテロの実行犯を直接の当事者でない日本人が務め、テロ組織の国際ネットワーク化の先駆的事例になった。後者では高レベルの教育を受けたテロリストが化学兵器を製造してテロに用いるという事例が明示された。もちろん、海外から未知のテロリストが来日する可能性もある。したがって、日本が核物質を用いた全く新しい核テロに遭遇しないとは誰にも断言できず、未知なる核テロへの対策は常に行っていなければならないものである。

核セキュリティの技術開発は原子力の推進・非推進と関係なく世界の平和に貢献するものであり、日本は高い科学技術力でリードしている面も多々ある。核セキュリティ技術開発をさらにすすめ、核兵器なき世界平和に日本が貢献すれば世界から歓迎されるだろう。

— 参考資料 —

- 1) 日本経済新聞, 平成17年2月6日, 夕刊3面.
- 2) 木村直人, 日本原子力学会誌 ATOMOS, 52[6], 318 (2010).
- 3) W. Bertozzi, R. Ledoux, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 241, 820 (2005).
- 4) J. Pruet, *et al.*, *Appl. Phys.*, 99, 123102 (2006).
- 5) R. Hajima, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 45, 441 (2008).
- 6) N. Kikuzawa, *et al.*, *Appl. Phys. Exp.*, 2, 036502-1 (2009).
- 7) T. Hayakawa, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* 621, 695 (2010).

著者紹介



早川 岳人 (はやかわ・たけひと)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野) 原子核物理学, 宇宙核物理学, 核不拡散



藤原 守 (ふじわら・まもる)

大阪大学 核物理学研究センター

(専門分野/関心分野) 原子核物理学, 核セキュリティ, 福島における放射性物質汚染マップ

原子力発電所における水素爆発安全の課題と対策

システム安全の考えに基づく防爆

長岡技術科学大学 門脇 敏

原子力発電所における水素爆発事故を防ぐには、水素の燃焼特性や爆発のタイプに関する十分な知識が必要である。特に、爆発の2種類のタイプ、つまりデフラグレーションとデトネーションの理解が重要である。また、防爆に関する欧州規格を参考として、合理的な防爆対策を施すことが必要である。具体的には、危険源の同定、リスクアセスメント、及びリスクの低減を遂行することである。これらの方策は、システム安全の考えに基づくものであり、合理的にリスクを低減して安全を確保することが肝要である。

I. はじめに

東日本大震災(2011年3月)において、福島第一原子力発電所で水素爆発事故が発生し、周辺地域は甚大な被害を被ることとなった。この水素爆発事故を通して、われわれは原子力発電所における防爆対策の重要性を再認識した。そして、原子力の分野においても、水素などの可燃性気体の燃焼特性や爆発のタイプに関する十分な知識が必要であることを知るに至った。

このような状況下において、本解説では、爆発の2種類のタイプであるデフラグレーションとデトネーションに言及し、両者の違いについて概説する。また、デフラグレーションにおける火炎伝播の加速について、固有不安定性の観点から説明する。さらに、防爆に関する欧州規格を取り上げ、システム安全の考えに基づく合理的な防爆対策について記述する。

II. 爆発

1. 爆発のタイプ

爆発とは、理化学事典¹⁾によると、「圧力の急激な発生または解放の結果、容器が破裂したり、または気体が急激に膨張して爆発音や破裂作用を伴う現象。真空びんの爆発、ボイラの爆発、火山の爆発などは物理的破裂現象であり、またガス爆発、粉塵爆発、火薬類の爆発などは化学的爆発である。」とされている。この定義によると、福島第一原子力発電所における水素爆発は化学的爆

発と考えられる。そして、「化学的爆発は燃焼や分解などの発熱反応が激しく行われた結果起こるものである。」と記述されている。ここでは、化学的爆発を取り扱い、爆発のタイプについて概説する。

爆発現象を理解するために、水素などの可燃性気体と空気などの気体酸化剤があらかじめ混合している状態(予混合気)を考える。予混合気の爆発には、2種類のタイプが存在する。つまり、デフラグレーション(爆燃)とデトネーション(爆轟)である。両者の特性の最も大きな違いは伝播速度であり、前者のそれは音速より遅く、後者のそれは音速より速くなる。

第1表は、デフラグレーションとデトネーションの典型的な特性を示したものである²⁾。ここでは、1次元の定常流れを考えており、 M はマッハ数(速度と音速の比)、 u は速度、 p は圧力、 ρ は密度である。また、下付添字1と2は、上流側の予混合気(未燃ガス)と下流側の燃焼ガス(既燃ガス)を示している。第1表より、デフラグレーションとデトネーションの特性は、全く異なっていることが分かる。したがって、爆発を精査する際には、現象がどちらのタイプに属するかを見極めることが最初のステップとなる。また、一般的には、デトネーション

第1表 デフラグレーション(爆燃)とデトネーション(爆轟)の特性

	デフラグレーション	デトネーション
M_1	0.0001 ~ 0.03	5 ~ 10
u_2 / u_1	4 ~ 16	0.4 ~ 0.7
p_2 / p_1	≈ 0.99	13 ~ 55
ρ_2 / ρ_1	0.06 ~ 0.25	1.4 ~ 2.5

Safety on Hydrogen Explosion in Nuclear Power Plants ;
Explosion prevention and protection based on the concept of
system safety : Satoshi KADOWAKI.

(2014年5月13日受理)

の方が爆発による破壊効果は大きいとされている。

第2表は、デフラグレーションにおける最大燃焼速度を示したものである³⁾。予混合気の温度は室温で、圧力は大気圧であり、気体酸化剤は空気である。最大燃焼速度は水素が最も大きい、そのマッハ数は1より十分小さいので、上流側と下流側の圧力はほぼ同じである。また、デフラグレーションでは化学反応と共に、物質拡散や熱伝導が主要な役割を演じている。

予混合気が燃焼するには、可燃性気体の濃度が特定の範囲内にある必要がある。燃焼する限界における可燃性気体の濃度が燃焼限界であり、濃度が低い方を下限界、高い方を上限界と呼んでいる。これらの限界内の濃度範囲が燃焼範囲である。第3表は、可燃性気体/空気予混合気の燃焼限界(下限界と上限界)を示したものである³⁾。水素は、アセチレンと共に広い燃焼範囲を有しているので、取り扱いには特に注意が必要である。

デトネーションには幾つかの種類が存在する。それらの中で最も一般的なのが、CJデトネーションである。ここで、CJは人名(Chapman & Jouguet)に由来している。第4表は、量論の予混合気におけるCJデトネーションの特性を示したものである³⁾。デフラグレーションと比較して、伝播速度は桁違いに大きく、燃焼ガスの圧力は非常に高くなることが示されている。

デトネーションが発生するには、予混合気中の可燃性気体の濃度が特定の範囲内(デトネーション限界内)にな

第2表 デフラグレーション(爆燃)における最大燃焼速度

可燃性気体	最大燃焼速度 u_1 (m/s)	当量比
水素	2.912	1.80
アセチレン	1.540	1.30
エチレン	0.750	1.15
メタン	0.370	1.06
エタン	0.401	1.14
プロパン	0.430	1.14
ブタン	0.379	1.13
一酸化炭素	0.430	2.57

第3表 可燃性気体/空気予混合気の燃焼限界

可燃性気体	下限界 (vol%)	上限界 (vol%)
水素	4.0	75.0
アセチレン	2.5	100.0
エチレン	2.7	36.0
メタン	5.0	15.0
エタン	3.0	12.5
プロパン	2.1	9.5
ブタン	1.6	8.4
一酸化炭素	12.5	74.0

第4表 量論の予混合気におけるCJデトネーションの特性

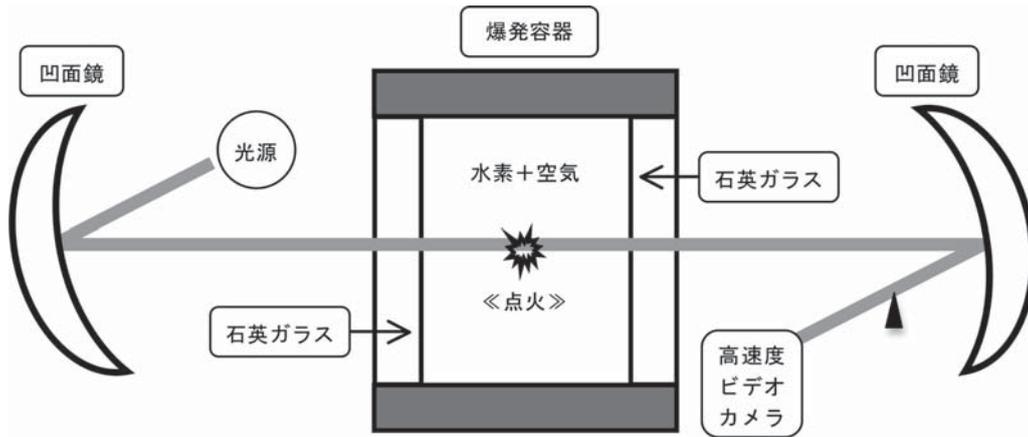
予混合気	u_1 (m/s)	p_2 (atm)	T_2 (K)
水素/空気	1967	15.6	2951
水素/酸素	2834	18.8	3682
メタン/空気	1801	17.2	2783
メタン/酸素	2392	29.4	3727
プロパン/空気	1795	18.2	2819
プロパン/酸素	2360	36.3	3830

ければならず、その範囲は予混合気が燃焼する範囲(第3表参照)より狭いことが知られている。デトネーション限界内の予混合気中をデフラグレーションが伝播すると、伝播速度は火炎面の面積増大により加速され、デトネーションに遷移する。これが、いわゆるDDT(デフラグレーション・デトネーション遷移)であり、重要な現象として多くの研究がなされている。この遷移現象の多くは、火炎面の擾乱の発達に起因するものである。伝播速度の加速により未燃ガス側に弱い圧力波が生じ、それが重なり合い強い圧力波(衝撃波)が形成され、衝撃波背後の未燃ガスが自己着火してデトネーションが発生する⁴⁾。このようなデトネーションへの遷移は、開放空間でも生じるが、伝播速度が加速されやすい管内において比較的容易に生じることが知られている。

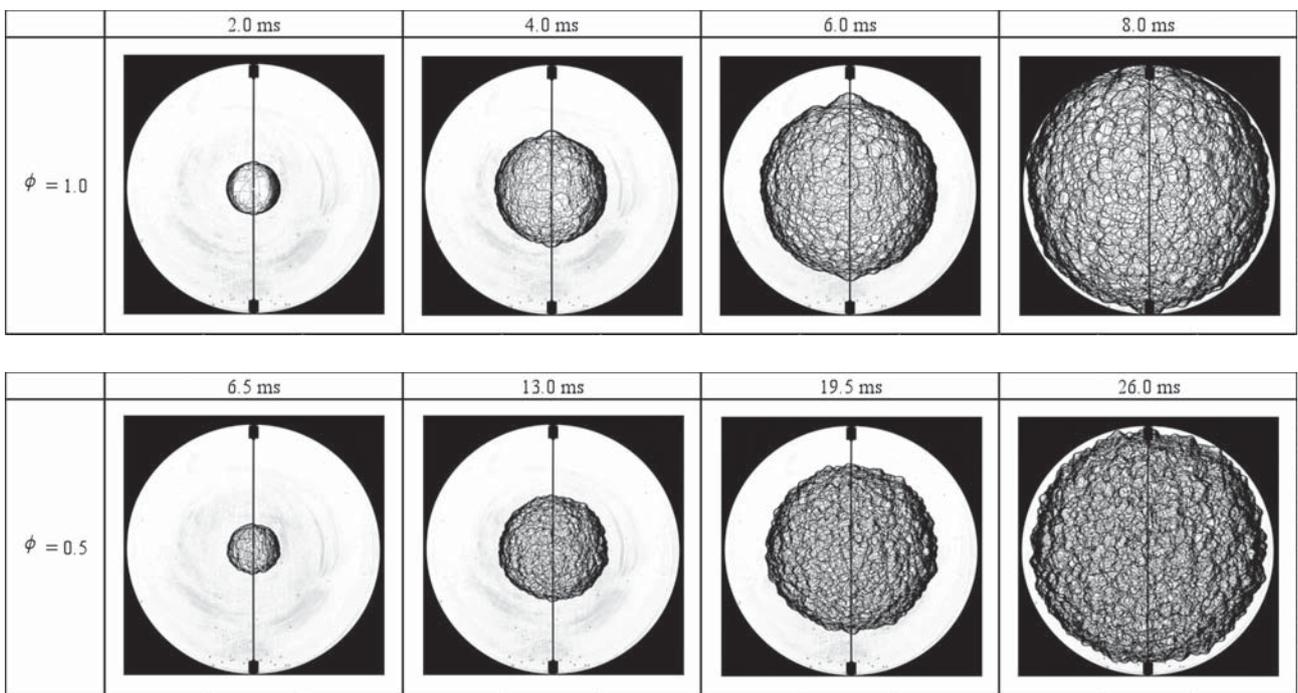
2. 火炎伝播加速

予混合気(水素+空気など)が着火した後、予混合火炎(デフラグレーション/爆燃)は球状に伝播し、その伝播速度は加速する。この現象が爆発安全(燃焼安全)の分野において注目されている。安全確保の観点から、予混合火炎の伝播速度は最も重要なパラメータであり、適切に評価する必要がある。従来は、平面予混合火炎の燃焼速度を基にし、気体の熱膨張の効果を加味して、球状デフラグレーションの伝播速度を評価していた。しかし、球状デフラグレーションの多くでは、火炎面がセル状になり、火炎面の面積が増大して伝播速度が加速することが報告されている⁵⁾。特に、「水素+空気」の予混合火炎では、予混合火炎の固有不安定性に起因してセル状の火炎面の形成が顕著になる。加えて、巨大施設内でデフラグレーションが球状に伝播する場合、伝播速度の加速はさらに激しくなる。これは、伝播速度がスケールと共に増大するからである。福島第一原子力発電所の水素爆発では、原子炉建屋内において巨大なセル状の火炎球が拡大し、その伝播速度は加速したものと推察される。

これらのことから、爆発容器内に「水素+空気」の予混合気を充填し、中心点火の後に発生する球状デフラグレーションを観察し、火炎伝播加速のメカニズムを解明することが必要である。ここでは、シュリーレン法を用いて、火炎伝播の様子や火炎面形状を高速度撮影する



第1図 水素爆発実験装置概要



第2図 球状デフラグレーションの伝播

(第1図参照)。そして、水素爆発現象の本質的な特性を理解し、火炎伝播加速モデルを構築するための知見を得るものとする。なお、シュリーレン法とは、「透明媒質の中で屈折率のわずかに変化する部分があるとき、光線の進行方向の変化を利用して、その様子を肉眼または写真撮影で見えるようにする光学的方法¹⁾」である。

球状デフラグレーションの伝播の様子を示したのが第2図である。ここで、当量比 ϕ は1.0(量論混合気)と0.5(希薄混合気)であり、初期温度は室温、初期圧力は大気圧である。中心点火の後、デフラグレーションは球状に伝播する。当量比が0.5のときの伝播速度が小さいのは、燃焼速度が小さいからである。球状に伝播する予混合火炎では、セル状の火炎面が観察される。この形状は、固有不安定性により微小擾乱が発達することによって生じるものである。一般的に、固有不安定性の要因として、

気体の熱膨張による流体力学的効果、並びに物質拡散と熱伝導の相互作用による拡散・熱的効果が考えられる。これらの効果により、セル状火炎が形成される。また、当量比が0.5のとき、セルの凹凸は激しくなっている。これは、当量比が1.0のときと比較して、拡散・熱的効果が強く作用するので、不安定性のレベルが高くなるからである。そして、火炎面の面積の増大により、伝播速度が加速していることが確認される。

今後、様々な条件下で水素爆発実験を遂行して、伝播速度の加速に及ぼす当量比や温度・圧力の影響を精査し、火炎伝播加速モデルを構築する予定である。このモデルは、水素爆発のシミュレーションにおいて有用となることが期待される。

Ⅲ. 防爆における安全規格

爆発性雰囲気においては、何らかの着火源の存在により爆発が起こり、その結果として危害が生じる。爆発の予防と防護に関する欧州規格として、EN1127-1:2011「爆発性雰囲気—爆発の予防と防護—基本概念と方法論」⁶⁾がある。この規格は、欧州指令 94/9/EC (ATEX) 並びに 2006/42/EC (機械指令) の本質的要件に適合するように策定されたものである。

欧州規格 EN1127-1:2011 では、リスクの低減において、まずは予防、次に防護を行い、最後に情報の提供を行うことが規定されている。この順序の考え方は、国際安全規格 ISO12100:2010「機械類の安全性—設計の一般原則—リスクアセスメント及びリスク低減」⁷⁾における3ステップメソッドと同一のものである。わが国では、防護による方策、例えば防爆電気機械器具 (IEC60079-0⁸⁾ など)、並びに使用上の情報に頼る傾向が強いが、本来は予防によるリスク低減が第一であり、リスクを低減できなかった場合にのみこれらの方策に頼るべきである。はじめから防護や情報で安全を確保するやりかたは、国際的な安全規格の考えから逸脱するものであり、今後の改善が強く期待されることである。

欧州規格には、爆発性雰囲気での爆発の発生確率を定性的に示したゾーン分類、並びにそこで使用される装置や防護システム及びコンポーネントのカテゴリーが記述されている。両者の関係は、第5表と第6表に示す通りである。第5表は装置の製造者の立場からのカテゴリーと適用ゾーンの関係であり、第6表は装置の使用者の立場からのゾーンと適用カテゴリーの関係である。こ

第5表 カテゴリーと適用ゾーンの関係(製造者の立場)

カテゴリー	適用ゾーン	爆発性雰囲気
1G	0, 1, 2	ガス, 蒸気, ミスト/空気
2G	1, 2	ガス, 蒸気, ミスト/空気
3G	2	ガス, 蒸気, ミスト/空気
1D	20, 21, 22	粉塵/空気
2D	21, 22	粉塵/空気
3D	22	粉塵/空気

第6表 ゾーンと適用カテゴリーの関係(使用者の立場)

ゾーン	適用カテゴリー	爆発性雰囲気
0	1G	ガス, 蒸気, ミスト/空気
1	1G, 2G	ガス, 蒸気, ミスト/空気
2	1G, 2G, 3G	ガス, 蒸気, ミスト/空気
20	1D	粉塵/空気
21	1D, 2D	粉塵/空気
22	1D, 2D, 3D	粉塵/空気

れらの表から、各カテゴリーの装置が適用できるゾーン、並びに各ゾーンで適用できる装置のカテゴリーを知ることができる。

予防により防爆のための十分な対策を施すことによって、防護のための装置が必ずしも必要とはならなくなる。安全確保の観点からのみならず、コストの観点からも今後検討する価値があると考えられる。

Ⅳ. システム安全の考え方

システム安全とは「ハードウェア・ソフトウェア、人、及び法・規範などの複合体において、設計/製造/使用などライフサイクルのすべての段階で危険につながる要因を事前に系統的に洗い出し、その影響を評価し、適切な対策を施すために、安全技術と安全マネジメントを統合的に適用して安全を確保する手法の体系」である。また、MIL規格⁹⁾にもシステム安全(System Safety)の定義が記述されているが、本質的な考え方は同等である。システム安全の考え方に則り、リスクを合理的に低減し、系の安全を確保する必要がある。

原子力発電所における防爆対策は、上記の安全規格に基づいて行う必要がある。具体的には、危険源の同定(燃焼特性, 着火要件, 爆発挙動など)、リスクアセスメント(爆発性雰囲気生成の量と可能性の確定, 着火源存在の確定, 爆発の影響評価など)、並びにリスクの低減(予防, 防護, 及び情報)を遂行することである。これらの方策は、システム安全の考えに通ずるものである。合理的にリスクを低減して安全を確保することが肝要である。

Ⅴ. おわりに

ここでは、爆発の2種類のタイプ(デフラグレーションとデトネーション)に言及し、両者の違いについて概説した。また、デフラグレーションにおける火炎伝播の加速について、固有不安定性の観点から説明した。そして、防爆における安全規格を取り上げ、システム安全の考えに基づく合理的な防爆対策について記述した。今後、原子力発電所における防爆対策が合理的になされ、爆発事故への備えが十分になることを切に願うものである。

なお、本解説で記述した水素爆発実験の結果は、資源エネルギー庁委託事業に基づく日本原子力研究開発機構からの再委託事業の成果である。ここに記して謝意を表す。

— 参考資料 —

- 1) 久保亮五, 他, 理化学辞典第4版, 岩波書店, (1987).
- 2) K. K. Kuo, Principles of Combustion, John Wiley & Sons, New York, (1986).
- 3) 平野敏右, 燃焼学, 海文堂, (1986).
- 4) 新岡嵩, 他, 燃焼現象の基礎, オーム社, (2001).
- 5) Yu. A. Gostintsev, A. G. Istratov, Yu. V. Shulenin, Self-similar

propagation of a free turbulent flame in mixed gas mixtures, Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol. 24, pp. 563-569, (1986).

- 6) EN 1127-1: 2011, Explosive atmospheres — Explosion prevention and protection, Part 1: Basic concepts and methodology, (2011).
- 7) ISO 12100: 2010, Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction, (2010).
- 8) IEC 60079-0: 2007, Explosive atmospheres — Part 0: Equipment — General requirements, (2007).
- 9) MIL-STD-882E, System Safety, (2012).

著者紹介



門脇 敏 (かどわき・さとし)
長岡技術科学大学
(専門分野) システム安全, 燃焼学
熱工学



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 —
(5月12日第11回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌は4月期に28論文、和文誌は5論文が投稿された。英文誌7-8月号福島廃止措置特集号入稿中。
- ・和文誌掲載論文の英訳/英文誌転載に関して、候補論文を選択して著者に打診したところ、いずれも英訳転載を進めることとなった。
- ・次年度の編集委員会体制を承認した。
- ・ANFC2014論文を厳選し英文誌特集号とすることを承認した。また、Physor2014特集号に関しては期間限定で無料公開することになった。
- ・英文論文審査・査読要領の改正案をほぼ確定した。
- ・英文誌 Letter to the Editor の範疇を拡大することが了承された。
- ・懸案論文の取り扱いについて決定した。

【学会誌関係】

- ・次年度編集委員長への引継ぎ資料の報告があった。
- ・他学会誌の調査結果について報告があった。今後の記事企画の参考にしていく。
- ・加速器・ビーム科学部会から提出された資料をもとに、新たな記事企画について検討した。
- ・「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」関連の記事企画について報告が担当委員よりあった。3編の掲載を予定しており、現在執筆中。
- ・次年度の学会誌編集委員構成の報告があった。
- ・各委員より、記事提案の説明があった。座談会の企画が2本続けての企画になっている。
- ・巻頭言、時論、解説、ジャーナリストの視点の企画状況、今後の掲載予定について確認した。

(6月2日第12回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌は4月期に12論文、和文誌は2論文が投稿された。英文誌7-8月号福島廃止措置特集号入稿済。9、10月号入稿済。
- ・25年度の督促状況一覧が報告された。
- ・英文論文審査・査読要領の改正案をほぼ確定した。
- ・期限切れ論文に対して著者に再確認をすることとした。

【学会誌関係】

- ・今年度最終の編集委員会ということで、編集委員長から挨拶があった。
- ・8月号より「理事会便り」は掲示板でなく、学会誌記事の一部として不定期に掲載されることになったという報告があった。
- ・新しい編集委員として、木藤啓子氏(原産協会)が5/28理事会で承認されたという報告があった。
- ・部会・連絡会との編集委員会の意見交換の一環として、核データ部会から活動状況の説明を受けた。部会活動の学会誌記事への反映についてディスカッションを行った。
- ・海外情報連絡会から提案のあった、ANSと原子力学会誌の相互交流について編集長から報告があった。今後のANS相互交流を進めるため、本件に携わっている海外情報連絡会委員の一人に学会誌編集委員として参画してもらうことにした。
- ・今後の学会誌記事企画について編集長より提案説明があった。他学会へ、他学会が発行している学会誌の紹介記事などの執筆打診を開始する。

編集委員会連絡先 < hensyu@aesj.or.jp >

レジリエンスエンジニアリングの動向

第4回(最終回) ポジティブ面を強調するレジリエンス

東北大学 高橋 信

本解説の最終回では、レジリエンスエンジニアリングが示唆する人間のポジティブ面での安全への寄与を中心に述べる。これまでのエラーを犯す存在としての人間ではなく、能動的にゴール達成に寄与し安全性の向上にポジティブな貢献をする人間という捉え方の重要性に着目する。更に、運転訓練に関して汎用的な対応能力の訓練の可能性について述べ連載の結びとする。

I. はじめに

“Constant Sense of Unease”「不断の不安」はレジリエンスエンジニアリングにおける一つの重要なキーワードである。平成26年3月29日付の朝日新聞のインタビューで、再稼働に向けての準備に関する記者の質問に対して東京電力の姉川氏は以下のように答えている。

「考え得る安全対策は施してあります。しかし『これで大丈夫だ』という慢心があってはいけない、というのが福島第一の事故の大きな反省点です。そういう慢心が自分たちの心の中に忍び込まないようにしていかないといいけない。それが保てないなら、『どうか運転してください』と頼まれてもお断りします。矛盾しているかもしれませんが、怖いと思う気持ちがなくなることが一番怖いことです。」

ここにレジリエンスエンジニアリングにおける一つの重要な考え方が見事に反映されている。連載の第1回でも述べられていることであるが、原子力発電所のような複雑巨大なシステムにおいては、システムは以下の特性を持つことを基本として考えなければならない¹⁾。

- システム・環境は常に変化している。
- 重要な意思決定は、多くの場合不完全情報状態でなされることになる。
- システムには、利益や効率を追究することが要求される。したがってシステムは特別に注意しないと次第に危険な状態へとドリフトしていく。
- 安全は重要ではあるがシステム動作の目的ではな

い。目的は(第2種安全性の意味での)動作の継続である。

このような事実を前提として考える場合、100%の安全な状態を常に確実に達成しようとするということ自体がある意味での思い上がりであろう。レジリエンスエンジニアリングではセレンディピティ(幸運な偶然)も安全達成のための一つの要素と考えられている²⁾。逆に、いくら周到に準備して綿密に計画を立てて安全対策を実施しても、そこにはなくすことのできない不確実性が残り、それが不運にも重なり合った場合(共鳴した場合)、そこに事故が発生すると考え、その可能性をゼロにすることはできないのである。ゼロリスクが幻想であることはある程度同意されつつあるが、我々はその不確実性に対して「神に祈る」ことしかできないのであろうか? そんなことはない。その不確実性に対するの切り札となるのが、人間の持つ素晴らしい柔軟な適応力なのである。

現在、福島事故以降の安全対策は、事前により広範囲に可能性のある事象を考えて、それに対して対策を施すことで不確実性を減らす方策をとっている。このような対策は現実にリスクを減らす効果は期待できるが、それでも残る可能性に対しては、堂々巡りの議論になってしまう可能性は否めない。ここで人間の安全へのポジティブな寄与という側面が意味をもってくる。これまでのヒューマンファクターの分野では、主にヒューマンエラーに注目が集まり、人間は常に誤りを犯す存在で人間さえエラーを犯さなければシステムは適切に動作するという見方が一般的であった。この考え方では人間に対してネガティブな寄与しかしていないことになる。確率的な安全評価(PSA)における人間信頼性解析(HRA)では、常に運転員がエラーを犯す確率の議論が中心である。一旦エラーを犯してもリカバリーのパスを考慮することで、一見安全へのポジティブな寄与を考慮しているよ

Current Status of Resilience Engineering (4) ; Resilience with Emphasis on Human Positive Contributions on Safety :
Makoto TAKAHASHI.

(2014年4月7日 受理)

■前回のタイトル

第3回 社会システムとレジリエンス

うに見えるが、特定の状況において運転員が自発的に気付き能動的な行動を行うことでトラブルの進展が阻止されるというシナリオは明示的には考慮されていない。

これに対して現実の状況はどうであろうか？ 運転員はPSAのシナリオで表現されているような受動的で時として誤りを犯すだけの存在ではない。運転員は状況を適切に判断し事象の進展に対して予測的に対応することができる高度に能動的な存在である。HRAにおいてはこのような人間の脳活動に基づく認知的な判断を十分な精度でモデル化できないために、人間を状況に応じてある確率でエラーを犯すだけの単純な存在としてモデル化しているのである。

レジリエンスエンジニアリング解説シリーズの最後となる本稿では、人間の安全へのポジティブな寄与という考え方を基本にして、エラー発生に関する新しい見方とそこから派生する極低確率事象に対応するための方策と訓練の方向性に関して述べる。

II. エラーに対する新しい見方

1. 根本原因分析の限界

従来の安全性向上のための基本的な考え方は、トラブル事例から「何が悪かったか」を学び、再発防止及び水平展開による類似事例発生の防止を主な方策としている。この考え方を更に突き詰めたのが失敗学のアプローチであり、トラブル事例の発生パターンを一般化することにより広範囲でのトラブル発生を防止しようとするものである³⁾。このようなアプローチの有効性を否定するわけではないが、二つの観点から別の見方の必要性を指摘することができる。

一つは、現実の状況においてはそのほとんどがうまくいった成功事例であり、失敗事例は非常にまれで特異な事例であるということである。原子力や航空業界のような高信頼性を要求される分野では特にこの傾向が強い。10,000回の作業機会があるとすると、そのうちの9,999回は成功し、失敗するのはほんのわずかな回数である(この確率は作業の質や様々な要因に影響される)。もちろんだからこそその特異な失敗例に着目し詳細な分析を行い、原因を追及するわけであるが、残りの9,999回がなぜ、そしてどのように成功しているのかという点に関してはほとんど考慮されていない。この背景には、適切な手順に基づき適切に作業を行えば成功するのは当然であるという思い込みがある。日々動的に変化する対象に対して完全な手順を記述することは不可能であり、更に現場には常に避けることのできない不確実性が存在する。このような作業環境の現実的な認識に基づけば、成功することは決して当たり前ではなく、優れた能力を有する人間が、適応的な対応をとることにより初めて成功がもたらされると考えなければならない。

もう一つの観点は、厳密な因果関係の成立性であ

る⁴⁾。根本原因分析(RCA)では、エラーの原因をその根本まで遡って詳細に分析を行うことが要求されている。この背後には、エラー発生メカニズムが線形伝播と因果関係に厳密に従うという暗黙の仮定が存在している。結果から遡れば、必ず原因にたどり着けるという信念である。対象とするシステムが単純で、要素分解が容易に行える場合にはこの前提条件はある程度は満たされるが、人間とシステムの複雑な相互作用が存在するSocio-technical(社会技術的)システムにおいては、この前提条件は満たされない場合が多いと考えるべきである。RCAはトラブル事象全体のストーリーを明示化するには有用であり、その利用価値を否定するわけではないが、逆にわかりやすい因果関係に基づくストーリーに帰結してしまう危険性ははらんでおり、その結果としての対策の実効性が十分とはいえない可能性がある。原子力プラントに代表される人間を含む複雑大規模システムは、理解しやすい形で要素分解して表現することは不可能であり、一つの結果に対して因果関係を遡ることで厳密にその原因を同定すること自体が極めて困難であるということを確認する必要がある。

2. 共鳴によるエラー発生の理解

単純な原因—結果の因果関係による事例の表現が難しいとしたら、トラブルの発生をどのようにモデル化すべきなのであろうか？ 機能共鳴(Functional Resonance)という考え方⁵⁾がそのキーとなる。この考え方の第一の前提はシステムの機能は成功/失敗というゼロかイチかという二値で表現されるのではなく、常にその間で変動しているということである。そしてこの変動が「悪い」ものではなく、それが失敗の原因でもあるが同時に成功の原因でもあるという認識である。これまでの安全の考え方は、このパフォーマンスの変動をできるだけ排除することにより安全性を高めるという方向であり、変動は常に悪いものと捉えられてきた。しかしながら、日常のパフォーマンスの変動性はシステムが機能するためには必須であり、失敗の原因でもあるが成功の原因でもある。成功も失敗もこのパフォーマンスの変動性に依存しているのであるから、変動性を排除することで失敗を防ぐことはできないというのがレジリエンスエンジニアリングにおける考え方である。現状での安全性向上の取り組みにおける、いわゆる規制強化、コンプライアンス強化という方向性は、作業内容の変動性を外的な強制力により抑え込むことに重点を置いた施策であると考えられる。このような規制強化はある程度の実効性はあるが、この方向性を過度に突き詰めてしまうと現場における自由度・柔軟性が失われてしまい、逆に成功がもたらされることに対して逆効果となる可能性もある。(筆者らの研究室では簡素化したシミュレーション環境において、規制ルール数の増加が必ずしもパフォーマンスの向上にはつながらないという研究成果を

得ている⁶⁾。)もちろん規制自体に効果がないというわけではなく、目標とする安全性のレベルに依存する問題であることは言うまでもない。原子力に代表される安全意識が十分に高い領域における更なる安全性向上を目指す取り組みとしては、変動性を抑えることは必ずしも適切な対応とはいえない可能性がある。現実の作業環境においては、パフォーマンスを完全に予測することは不可能であり、ある程度の変動性、柔軟性、適応性は、不可欠である。このような状況でシステムが適切に動作することができるのは、人間が柔軟で適応的であるからであり、システム側が完璧に考えられて設計されているからではない。技術が適切に機能するためには、人間(または組織)が、余分な変動要素を吸収できるバッファーとして機能しなければならない。このような人間が持つ柔軟性を否定して、変動を抑え込むことにより安全性を達成しようとする、必然的に望ましい結果を達成する能力にも影響を与え、逆効果となることが予想される。

このような変動する環境におけるトラブルの発生は複数の変動要素間の共鳴という形で表現することができる⁵⁾。システムの状況、組織の状況、人間のパフォーマンスは常に変動している。この変動が重なり合い共鳴をしたときに失敗が起きるといったイメージである。この共鳴モデルは厳密なものではなく、あくまでもイメージを提供するに過ぎないが、複数の変動する要素が偶然に重なりあって失敗するという考え方はある意味わかりやすい。この共鳴による失敗の発生モデルに関しては二つの点を指摘する必要がある。

一つは偶然性の問題である。この共鳴モデルにおいては複数の変動要素があり、それら一つ一つの変動に関しては、因果関係に基づきその要因を指摘することは可能であるが、それらの重なり合うタイミングに関してはある程度の偶然性を仮定している。もう一つのポイントは、良いパフォーマンスの組み合わせが結果として失敗に結びついてしまうという可能性である。連載第2回の小松原氏も指摘しているように、個別にはそれぞれ良いパフォーマンスであっても、それらが組み合わさることで結果としては失敗が生じる可能性も認めなければならないということである⁷⁾。

3. 人間のポジティブな寄与の認識

偶然の要素が避けがたく、正しい行動をとっていても組み合わせによっては失敗につながってしまう。このような事実を前提にしてしまうと、どんな安全対策をとっても失敗は避けがたいと考えてしまうかもしれない。しかしながらここで忘れてはならないのは、このような状況におかれながらも、一般的に原子力等の高信頼性が要求される分野においては、システムにおける失敗は非常にまれであるという事実である。そこには人間のポジティブな寄与が果たしている重要な役割がある。現状において普通の状態と認識されている「成功を積み重ねて

いる状態」が、実は単に手順に従い、想定される作業を行っていることのみで実現されているわけではなく、状況から要求される賢明な「調整: adjustment」を人間が行ったことにより初めて成功がもたらされているという認識が必要なのである。ここで、Work-as-imagined「想定される作業」と Work-as-done「現実の作業」の間の差異が重要な意味を持つ。レジリエンスエンジニアリングの考え方に向かう研究の中で、形式的な作業指示書と実際の作業との間のギャップに着目した研究が取り上げられている。そこでは、システムの中で様々な役割を担っている人々が、失敗につながりそうなパスを予見したり、失敗に感度よく対処できる方策を考案し実施したり、効率を高めよという要請に直面しながら(安全への)余裕を確保したりしようと苦闘してきた過程が示されている。成功は Work-as-imagined と Work-as-done の間の差異を埋めることで達成されるのではなく、人間が危険、トレードオフ、多数の(相克する)目標などに満ちている世界で、安全を作り出すために学習し適応した結果得られているのである。

III. 安全対策への示唆

前章ではエラーに対する新しい見方を述べたが、変動を許容し成功をもたらす存在として人間を捉えた場合、安全対策はどのようにあるべきかを以下に述べる。

1. 基本的安全論理

福島第一原子力発電所事故以降の安全対策の基本的な考え方は、「想定外」事象をできるだけ減らすために、より網羅的にハザード事象を洗い出し、それらに対する対策を行うという方向性である。このような取り組みは原子力の社会的受容性を向上させるという観点でも重要であるが、仮にあらゆる事象に対して予見的な対応が取られたとすると、予見されていない事象や極限的な事象を処理するのに必要な能力が失われてしまう可能性がある。もちろんこれは程度の問題であり、「あらゆる事象」に対して事前に対応策を準備すること自体が不可能であることは自明であろう。しかしながら、予見的な対応方策を重要視することと、「予見されていない極限的な事象」への対応能力の醸成は相反する可能性があるという点が重要なポイントである。この事実は「レジリエンスのアイロニー」と呼ばれている²⁾。レジリエントなシステムは準備されていなければならない、また準備されていないことに備えていなければならない。ここに我々が対峙しなければならない矛盾があるのである。これに対する回答は現時点ではまだない。しかし、次節で述べる今後の運転訓練の方向性の中で、解決していくべき問題であろう。

2. 汎化知識の可能性

従来の運転訓練においても、トラブル事象として組み合わせさせて確率的にはほとんどあり得ない(100万年に1

回)程度の事象シナリオを対象にした訓練は行われていた。しかし実際に起こったことは、これまでの訓練では体験したことのない過酷な状況であった。事故調査報告書では現場の運転員の瑕疵の指摘が多いが、レジリエンスエンジニアリングの観点からは、現場の絶望的な状況に対峙した運転員のポジティブな寄与が多数指摘できる。事故以前の発電所自体の設計や安全対策に関する津波想定のはずみは組織としてのレジリエンスの低さを明確に示しているが、発生した過酷な事態に立ち向かった運転員の対応は、事前に予期された範囲の外側の事象に対するものとしては称賛すべき点も多い⁸⁾。

今後、組織的な対応としてのレジリエンスを向上させ、より高い安全性を目指すためには、「備えのない事態への備え」をどのように向上させるかという点がキーポイントとなる。「備えのない事態への備え」という表現は自己矛盾した表現であるが、この意味するところは二つある。一つは「備えのない事態が起こりうるという認識」を持つということである。もう一つは「備えのない事態に対する創造的な対応能力を醸成する」ということである。福島第一原子力発電所事故を受けて、運転訓練の中にシビアアクシデントが組み込まれ、従来は対象外であった事象に関してもシミュレータ訓練を通じて体験し備えをする機会が与えられるようにはなった。しかし、その多くが基本的には全電源喪失から炉心溶融に至る福島第一原子力発電所事故のシナリオを踏襲しており、緊急安全対策の結果、ハードウェアによる安全対策も大幅に取り入れられ、基本的には同じようなシナリオの事故はもう起こらないと考えるべきである。このような状況で、更に何が起こりうるのかということ問いかけ考え続ける姿勢が重要である。ここで文頭に書いた“Constant Sense of Unease”「不断の不安」の重要性が再び指摘できる。

もう一つの「備えのない事態に対する創造的な対応能力を醸成する」ことは、もちろん簡単なことではないが、運転訓練における「汎化知識」の活用が一つの鍵ではないかと筆者は考えている。「汎化知識」とは特定領域に固有な知識に対する概念で、より広い状況に対して適用できる汎化された能力を意味する。従来の運転訓練は、異常事象シナリオを数多く経験し、その経験を通じてある意味帰納的に学んでいくという方法論である。現実のトラブルがほとんど発生しない原子力プラントでは、このような仮想的な異常事象を体験し対処を学ぶという方法論の有効性はこれまでの運転経験から十分に示されている。しかしながら、訓練時間の制約から体験できるシナリオには限りがあり、極低確率の極限事象も対象にした場合、更にシナリオ数が更に増加してしまう可能性がある。

訓練の目的の一つとして様々なシナリオを経験するこ

とで事故対応の知識を蓄積し、熟練者へと育成することが挙げられる。熟練者は知識をより整理された形で持ち、問題に直面した際にどうすればいいかを素早く、慎重に判断・行動ができるといわれている⁶⁾。筆者はこれまで経験したことのない事象に遭遇した際に持っている知識の汎化具合によって、状況の判断や対応行動に差が生じるのではないかという点に着目する必要があると考えている。更に、運転に関する知識だけにとどまらず、「想像を超えた事態が発生した時に適切に対処できる一般的能力」はどのように醸成されるのかという点についても検討する必要があると考えている。

IV. 結言

本稿ではレジリエンスエンジニアリングの解説シリーズの結びとして、ポジティブ面を強調するレジリエンスの考え方を中心に述べた。これまでの3回の連載でも述べられているように、レジリエンスエンジニアリングの考え方は、これまでの安全の考え方と大きく異なる前提に基づいてはいるが、これまでの安全に関する考え方を否定しているわけではないし、この考え方に基づけばすぐに安全性が劇的に向上する切り札でもない。連載の第1回目でも述べられているこの考え方が生まれてきた背景を十分に理解した上で、安全対策に取り入れて頂きたい。

— 参考資料 —

- 1) 北村正晴, レジリエンスエンジニアリングの概要と今日的意義, 日本原子力学会誌, 43 (259), (2014).
- 2) E.Hollnagel, J.Paries, D.D.Woods, J.Wreathall, Resilience Engineering in Practice, Ashgate Publishing, (2011).
- 3) 畑村洋太郎, 失敗学のすすめ, 講談社, (2000).
- 4) E.Hollnagel, D.D.Woods, N.Leveson, (Eds.), Resilience Engineering: Concepts and Precepts, Ashgate Publishing, (2006).
- 5) E.Hollnagel, 小松原明哲監訳; 社会技術システムの安全分析 FRAM ガイドブック, 海文堂, (2013).
- 6) H. Nakanowatari, *et al.*, Experimental study on the adverse effects of having excessive safety rules, International Electric Journal of Nuclear Safety and Simulation, 3 (2), 132-139 (2013).
- 7) 小松原明哲, 組織安全とレジリエンス, 日本原子力学会誌, 35 (323), (2014).
- 8) 高橋信, 福島第一原子力発電所事故とレジリエンスエンジニアリング, エネルギーレビュー, No.4, (2013).
- 9) 辰野千壽, 学習方略の心理学, 図書文化社, (1997).

著者紹介



高橋 信 (たかはし・まこと)

東北大学

(専門分野/関心分野) ヒューマンファクター, 認知工学, プレインイメージング



原子力・放射線業界の裾野を広げる具体的な活動

男女共同参画委員会

2014年春の年会において、男女共同参画委員会では2つの企画を行った。一つは企画セッション。テーマは原子力・放射線業界ロールモデル集の試作版の披露。もう一つは、高校生、学部学生を対象とした学会体感ツアー。いずれの企画も原子力・放射線業界の裾野を広げる具体的な活動である。本稿では、その成果の一端を紹介する。

1. 大盛況！企画セッション

男女共同参画委員会(以下、本委員会)を中心として、2013年秋から作成を始めたロールモデル集。まずは試作版として7名分を完成させた。この試作版を様々な立場の方に見て頂き、コメントを頂いた上で、2014年夏の初版完成につなげたいと考え、今回「原子力人材確保・育成のための具体策の一つとして—ロールモデル集の作成—」と題した企画セッションを開催した。本企画セッションは、原子力青年ネットワーク連絡会(YGN)と学生連絡会との合同セッションとして実施した。主催側も驚くほどの多数の参加者を得て、実に様々な意見を出していただくことができた。今後につながる大きな成果だと考えている。

ロールモデル集とは何か？

そもそも「ロールモデル集」とは何か。セッションの中で、フロア参加者に対して「ロールモデル集」という言葉になじみがある方は？と聞いたところ、半数の方にしか認知されていないことがわかった。ここでいうロールモデルとは、中高生や大学生などこれから社会に出る人にとって目標となるような存在、キャリアパスを指している。原子力・放射線業界には実に様々な仕事がある。それらを具体的に紹介するためのツールとして活用することが目的である。

きっかけは、夏学！

そんなロールモデル集を作成しようと思ったきっかけは、本委員会が以前より参画してきた(独)国立女性教育会館主催の「女子中高生夏の学校¹⁾」(略して「夏学」)での一コマである。夏学では理工学に関する様々なイベントが行われるが、その中の一つとして、ポスターによる学会などの紹介がある。原子力学会としては、原子力や

放射線について紹介するブースを出展している。そのブースに訪れた生徒さんから「原子力業界ってどんな仕事をしているかイメージが湧かない」「なんか危ないイメージしかない」といった声が聞かれた。彼女らにとって原子力の仕事と言えば、メディアに登場する福島第一原子力発電所での作業の様子だけのようなのだ。この状況に対して、もっといろいろな仕事があること、活躍している若手がたくさんいることを具体的に示せるようなツールを作成する必要があると考えた。

堀池会長もエール

セッションの冒頭では、堀池会長より一言メッセージをいただいた。挨拶では、「学会の活力を維持するためには、さらなる会員の増強を図る必要があると強く認識しており、本企画・活動には大いに期待している」との表明があった。

具体的に、具体的に、

企画セッションの後半は、パネルディスカッションをした。パネリストには、試作版のロールモデルの一人、日立GEの串間さん、YGN代表の東工大の西山さん、学生を代表して都市大の茂木さんに登壇していただいた。ロールモデル集の執筆者の立場と読み手の立場から、かなり実務的な話を展開するように議論を進めた。



堀池会長よりメッセージ

Activities to Broaden the Horizons of the Community : Naoto HAGURA, Misaki TAGUCHI.

(2014年4月15日 受理)

申間さんに対して「執筆にあたって苦労したことは？」
「社内の手続きは大変でしたか？」といったことを聞くと、「100字でまとめるという制限が結構難しかった。でも結果的には分量としても適当で良かったと思う」「社外発表手続きは必要だったが、今回のロールモデル集は内容的に人にフォーカスしていたので短時間で終えることができた」とのことだった。西山さん、茂木さんに「より良くするためにはどんな工夫が必要か？」と聞くと、茂木さんからは、「個人個人の内容に加えて、業界全体を紹介するようなページがあってもよいのではないか」との提案があった。

“キラキラ感”をもっと出しては？

フロア参加者も含めた議論では、実に様々なご意見を頂くことができた。「若手だけではなく、ベテランも入れるようにしては？」「今はウェブで公開というスタイルが多いが、冊子体というスタイルも残すようにした方がよい」「この冊子を見た人が、もっと質問したいとなった時のことを考えて、問合せ先を入れるようにしては？」「仕事を通しての夢を語るような質問項目があってもいいのでは？キラキラしたところを出して、魅力を伝えられたらよいと思う」などの意見が上がった。これらのご意見を今後反映させていく計画である。

2. 試行的取組み～学会体感ツアー～

「行ってみよう！知ってみよう！体感してみよう！」というキャッチフレーズで、高校生、学部学生を対象とした学会体感ツアーを企画した。合わせて10名の参加があり、専門セッションと企画セッションの聴講、企業展示、学生ポスターと原子力オープンスクールの展示見学を行った。事後アンケート結果より、皆それぞれに「初めて」の学会を堪能した様子だった。

この企画も、原子力青年ネットワーク連絡会(YGN)と学生連絡会との共催で実施した。

意外と短い！発表時間

「学会発表は一人が1時間くらい話すというイメージだった」「実際は10分程度だったので短く感じた」との感



学生ポスター発表の見学



今度は発表者として

想があった。「ポイントをまとめて発表する必要があると思った」との意見は発表の聴講を通しての素直な感想。今後自らがプレゼンする立場に立った時に、この経験を生かしてもらえたらと思う。

企業の方と直接お話できてよかった！

企業展示の見学では、各企業のご協力を得て非常に満足度の高い見学が行えた。特に、三菱重工さんのブースでは「原子力が実際にどのように使われているかだけでなく、原子力発電の現状などを知ることが出来てよかった」といった感想があった。こうした交流の場も学会の一つの側面であると感じてもらえたものと思う。

また参加したい！将来は自分も発表したい！

「放射線、中性子の勉強をしっかりと、来年は100%近く講演、発表を吸収できるようになりたい」「将来自分も学会で発表したいと思った」といううれしい感想を聞くことができた。今回は初めての試みということで、至らなかった面もあると思うが、今回参加してくれた生徒、学生の皆さんにとって、何か一つでも心に残ることがあれば、大きな成果といえるのではないかと思います。

3. さらに前へ！次のアクション

- ・ロールモデル集は今回の企画セッションでの意見を踏まえ、2014年8月の夏学までに初版を完成させる。
 - ・学会体感ツアーについては、反省点をよく整理して今後につながる報告書にまとめる。
- これからも極力具体的な活動することによってさらに前へ進む努力を継続していきたい。

(執筆担当：羽倉尚人(東京都市大学)、
田口美咲((株)テブコシステムズ))

— 参考文献 —

- 1) (独) 国立女性教育会館、女子中高生夏の学校：<http://www.nwec.jp/jp/news/2014/page01.html>



2013 年度世界原子力大学夏季研修 (WNU-SI) 留学記

(株)東芝 伴 雄一郎

WNU-SI への参加を通じて著者らは、現在の原子力業界を支えている世界各国のリーダーから講義を受けて知識を拡充すると共に、将来の原子力業界を支えていく同世代の若者と講義内容について議論をし、世界各国の原子力業界を取り巻く課題や解決策を学んだ。この経験を通じて、世界の原子力業界の構造や話題を網羅的に学ぶと共に、世界各国の同世代とのネットワークを構築することができた。WNU-SI で学んだことを今後のキャリアに生かすと共に同年代の原子力関係者に伝えていくことを考えている。

1. 世界原子力大学夏季研修の概要

2013 年 6 月 29 日から 8 月 10 日までの 6 週間、英国オックスフォード大学にて開催された「世界原子力大学夏季研修 (World Nuclear University Summer Institute : WNU-SI)」に参加した。世界原子力大学は、原子力に携わる 20、30 代の参加者 (フェロー) が世界の原子力業界を取り巻く課題や将来像についての議論を通して、原子力業界をリードする人材育成と国際的な人材交流や参加者同士のネットワークを築くことを目的として、2003 年に設立された。2013 年度の WNU-SI は、電力会社、研究機関、規制当局、プラントメーカー等と幅広い所属から技術系や事務系を問わず、第 1 表に示すような世界 24 ヶ国、総勢 72 名の参加があった。

WNU-SI では、主に午前は原子力関連国際機関や世界各国の企業から招かれた講師による講義があり、午後

第 1 表 2013 年 WNU-SI 参加フェローの参加国

地域	国名(人数)
北米	米国(12), カナダ(10)
南米	アルゼンチン(1), メキシコ(1), ブラジル(1)
ヨーロッパ	フランス(7), 英国(6), スウェーデン(3), フィンランド(3), オランダ(2), ロシア(2), オーストリア(1), スペイン(1), ドイツ(1), ルーマニア(1)
アフリカ・中東	イスラエル(2), ガーナ(1), ジンバブエ(1), ナイジェリア(1)
アジア・オセアニア	日本(6), 韓国(6), オーストラリア(1), スリランカ(1), バングラデシュ(1)
合計	72 名(男性 54 名, 女性 18 名)

The Study Abroad Programme in WNU-SI 2013 : Kikombo ANDREW-SHINOHARA, Midori HASHIGUCHI, Yuichiro BAN, Toshihiro YOSHII.

(2014 年 3 月 17 日 受理)

は 8-9 名のグループに分かれて午前中の講義内容について議論を行った。講師陣は、国際機関や各国の原子力分野のリーダーとして、World Nuclear Association 事務局長、IAEA 事務局次長、米国 DOE 次官補等が講演しており、日本からは前原子力委員の尾本彰東工大特任教授が講師兼メンターとして参加された。また、講習内容は 1 週間ごとにテーマが分かれており、詳細は参考資料を参照されたい。

2. 福島第一原子力発電所事故後の日本とフィンランドの対比

WNU-SI では、各種原子力施設を視察するテクニカルツアーがプログラムの一環として設けられており、本年度はフィンランドのオルキルオト、ロヴィーサの両原子力発電所と、両地点の処分場を視察した。また、使用済燃料の処分のためにオルキルオトに建設中の地下特性調査施設 (ONKALO) も視察することができた。研修での講義等を踏まえたうえで、これらの施設を視察して学んだことについて紹介する。



尾本先生(中央)と日本人参加者

(1) 最終処分問題

フィンランドの原子力政策のうち、日本人の視点から見て特に興味深いのは放射性廃棄物の最終処分であろう。フィンランドでは、使用済燃料を再処理せずに直接地層処分するという日本との違いがあるだけでなく、電力会社が出資する民間会社が実施主体となり、処分場を選定・建設し、運営に責任を負っている。また、フィンランドでは放射性廃棄物の地層処分について国民の理解も得られており、すでにサイトが決定している。

今回の視察では、ボーリング試料等を保管している施設で、地質調査の様子を見学した以外に、フィンランドでの最終処分に関する Public Acceptance (PA) 政策について、関係者から講義があった。その結果、日本より地質的に有利なことや、人口が少ないため教育が行き届きやすいことなど、国情の違いが地層処分に関する PA 政策を成功させている理由のひとつではないかとも感じた一方で、廃棄物は出した場所で処分するという方策についても考えさせられることが多かった。

(2) 事業者と規制当局の関係

フィンランドでは、規制当局の独立性を保持しつつも事業者と良好な関係を構築している。その一例として、定期検査時には、規制当局と事業者が密接にスケジュール調整を行い、深夜であっても検査が可能となっているなど、規制側の柔軟な対応がフィンランド国内の原子力発電所の高い設備利用率に寄与していることが、WNU-SI の講演者から紹介された。

今回の研修期間中に、各国の規制当局出身のフェローと「事業者と規制当局の適切な関係をどう構築すべきか」について議論する会合があった。その中では、プラントの安全性を担保するうえで、事業者と規制当局の間で十分なコミュニケーションが必要不可欠である一方、必要な独立性(技術的な知識も含む)の確保について議論が集中した。

WNU-SI 中の議論を踏まえて著者らは、上記の課題の解決の糸口として、計画的かつ継続的な「個人」「組織」の倫理教育と技術的な教育は欠かすことができないと考えている。特に技術的な審査に関わる規制当局関係者は、国内外の事業者側・規制側の動向を継続的に注視する必要がある。そのため、国内の研究所・事業者などとの技術交流以外に、MDEP (Multinational Design Evaluation Program: 多国間設計評価プログラム) などを通じて積極的に海外の規制当局との技術交流を図ることも重要であると考えられる。

(3) 福島第一原子力発電所事故後のフィンランド事業者の対応

フィンランドでは、米国同時多発テロの後の米国規制強化(いわゆる B.5.b)を受けた対策に取り組んでいた。特に、ロヴィーサ発電所では、電源強化として近くの水力発電所からの送電線を強化したり、非常用予備発電機

を増強したりといった対策が既に図られていた。また、使用済燃料プールの冷却強化として、空冷式の冷却システムを導入するといった強化が図られていた。福島第一原子力発電所事故後には、ストレステストを行い、その有効性を確認すると共に、その運用をさらに強化しているとのことであった。

他国の規制に見習うべきところを取り込み、安全性を向上させている姿勢を肌で感じた。我々、日本の原子力に携わる者として、これら安全性の向上への取組みについて視察することができ、非常に有益な機会であった。

3. まとめ

WNU-SI に参加することで、24ヶ国 72名の参加者たちと同じ宿舎で6週間の共同生活を行い、講義時間外も有志で集まり、深夜まで様々な内容について議論を行った。これらの研修を通じて、著者らは世界の原子力業界の構造や話題を網羅的に学ぶとともに、世界各国の若者とのネットワークを得ることができた。

なお、著者4名は、日本原子力産業協会の「向坊隆記念国際人育成事業」による奨学金を得て参加したが、国内の他の参加者として、(独)原子力安全基盤機構(現在は原子力規制庁)から大塚伊知郎氏と皆川武史氏の参加もあり、日本人参加者同士でも交流を深めることができた。このような研修に参加する機会を与えて頂いた日本原子力産業協会及び各職場の関係者に感謝の意を述べ、本留学記の結びとする。

— 参考資料 —

- 1) World Nuclear University
<http://www.world-nuclear-university.org/>
- 2) 日本原子力産業協会「向坊隆記念国際人育成事業」
http://www.jaif.or.jp/ja/wnu_si/index.html

著者紹介

アンドリュウ篠原 きこんぼ (あんどりゅうしのはら・きこんぼ)

日立 GE ニュークリア・エナジー(株)
(専門分野/関心分野) 海外 ABWR 許認可及び建設に関するプロジェクト・マネジメント

橋口 緑 (はしぐち・みどり)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 国際協力

伴 雄一郎 (ばん・ゆういちろう)

(株)東芝
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, BWR 炉心システム設計

吉井敏浩 (よしい・としひろ)

関西電力(株)
(専門分野/関心分野) プラントの設計・保守管理

談話室

紙芝居での啓発活動 ～放射性廃棄物の地層処分について学ぶ～

福井県女性エネの会 会長 政野澄子

1. 福井県女性エネの会とは

4年の準備期間を終え、平成12年に県下9市8町全域で300名の会員で結成、エネルギー問題や環境問題等について学習する団体である。

“見て、聞いて、学んで、知る”をモットーに14年間、各種講座の開講や見学会、交流会、親子サイエンス事業や地域住民との研修会等、地道な活動に取り組み、それなりの成果もあげてきた。現在は会員も増え、8ブロックで約450名に達している。

誇れる活動の一つに“でんきの消費地である関西圏の女性エネの会とでんきの生産地である女性エネの会との交流会”を毎年1回、大阪や福井で開催し、人や物、心の交流会を長く続けたこと、共通の課題を話し合えたことで理解を深め大きな収穫を得たと思う。

2. 学習した成果の啓発活動

(1) 紙芝居の実施

講座で学んだことは自分なりに理解できても他の人達に伝えることはなかなか難しく、もし間違っただけでは大変なことになる。そこで啓発活動には紙芝居を作成し、各地で上演することで理解者が増えることを願って、学んだことを4本の紙芝居にした。

- ① でんきってすごいなあ
- ② あかりとみらいのお話し
- ③ 地球温暖化って……どんなこと
- ④ これからのエネルギーは？ —福井さん一家編

以上の紙芝居を、保育園、幼稚園や児童館から老人会に至るまで、県下各ブロックで年間10回以上を目標に上演してきた。



学習会のようす

小学校3校で上演できたのは、校長先生が知り合いであったこと、その他の学校に入れて頂くのは至難の業である。まして中学校、高校へは出向き、説明は聞いてもらっても必ず2～3日後には断られることは何回もあった。

敦賀工業高校、福井大学、仁愛大学、行政では県庁ロビーで昼食時間を利用した自由参加で多くの職員に見てもらえた。県議会の先生方にも上演のチャンスを与えて頂き、喜んで参上した。大変好評で県下各地で大いに上演してほしいと励まされた。

これだけITの進んでいるときに、今、なぜ紙芝居か？と言われる人もいるが、紙芝居でなければ分からないことがある。それは、観客の反応、上演する側の理解度と、参加者から質問や意見が出ることは喜ばしいことであり、一石三鳥の得があると思う。今後もこの活動は継続していきたい。

(2) シンポジウムの開催

今回、計らずも(一財)日本原子力文化振興財団が募集している支援事業を知り、内容を熟読した。

エネの会では、活動の中で前から気にかけていたのは、多くの人から質問される“原子力発電所から出る高レベル放射性廃棄物の処理について”である。

募集要項の見出しに“放射性廃棄物の地層処分について学ぶ”、“講演会とシンポジウムを開催出来る”、飛びつきたい事業であるが、締切が当日の5時。早速、事務局と相談し、企画書を作り、FAXで提出したところ見事GOサインを頂き、実施できる運びとなった。

直ちに役員会を実行委員会に切替え開催日時や会場等を決める。

講演して頂く先生は原子力安全研究協会 放射線・廃棄物安全研究所所長の朽山 修先生。その道のベテランであり、他の所で講演された文章を読み、ぜひとも朽山先生にはご講演と、シンポジウムでもご発言いただきたいとお願いする。シンポジウムではパネラーとして、女性エネの会から副会長の木原氏、大学生には福井大学大学院工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻の山本氏の計3人をお願いし、コーディネーターには元福井新聞社論説委員長をされ、現在は仁愛大学准教授の四戸友也氏をお願いできた。

次は会場をどこに決めようかと相談の結果、県民に関



パネルディスカッションの様子



紙芝居の様子

心を持ってもらうためにあえて敦賀市へ依頼し、プラザ萬象大ホールに決めた。参加者は500名を予定し、開催日は10月30日に実施することに決定した。

後援を福井新聞社に依頼でき、新聞の折込みは嶺南地域(敦賀市、美浜町、若狭町、小浜市、おおい町、高浜町)、チラシは全体で42,000部作成。折込みに37,400部が開催日の5日前に各家庭に配布された。当日、出席できなくてもチラシを見てもらえるだけでもわかっただけかと思う。

福井新聞社には、事前案内記事の掲載や当日の取材をして頂き、新聞記事は大きく掲載された。

3. 新たな紙芝居の作成について

(1) 紙芝居「わたしたちはどこへ行くの?」を作成

高レベル放射性廃棄物の地層処分についての講演やシンポジウムを聞き、理解できてもそれはその場だけで、あとで説明するには少々難しいので、紙芝居を作成することで広く県民や小学生、中学生、高校生、大学生等に理解してもらえると信じて取り組んだ。

シナリオを書き、実行委員会に提出。その後、言葉の問題等があったとは思いますが、関西電力(株)、日本原子力発電(株)、北陸電力(株)、日本原子力研究開発機構の4社の皆さんに読んで頂き、間違いの確認や補足をし、なんとか日本原子力文化振興財団支援事業の中で出来上がることを祈りながら、みんなで苦労してパソコンで出し、絵合わせして完成。

(2) 紙芝居の内容

内容は、原子力発電所で使用するウランの物語でウラン鉱山から出てきたものを粉末にして小さなペレットに固める。4人のペレットちゃんがいろいろ会話をし、白ひげ先生から指導を受け、一生懸命電気を起こし、自らががんばっている様子。もうこれ以上使えなくなったペレット同士が「わたしたちはどこへ行くの?」…そこで白ひげ博士が地下300mより深いところに行くには使い終わった燃料から再利用できないゴミとなるものを取り出して、それを溶かしたガラスに混ぜて固めたものをキャニスターという丈夫な大きな入れ物に入れて地下に入ってもらおう。そしてゆっくり休んでもらうという物語。

登場人物は、ペレットのイエローちゃん、ピンクちゃん、ブルーくん、グリーンくん、それから白ひげ博士、ナレーションの6名で上演できる。

県下8ブロックあるのでブロックに1セットずつとエネの会に2セット、合計で10セット作成できたことを嬉しく思う。

昨年の11月25日、地域別セミナー嶺南の大会で初上演をした。参加者より、本当にわかりやすくよく理解できたとの感想、また、福井新聞の記者にも、これは素晴らしいと褒めて頂き感動した。

今年4月15日の福井県女性エネの会総会では参加者に見てもらい、参加者から感動と賞賛を得た。地層処分ということで1人でも多くの人達に理解してもらえることを念じて、平成26年度の大きな活動にしたい。

(2014年4月11日記)

新刊紹介 放射能とナショナリズム

小菅信子著, 189p.(2014年3月), 彩流社, (定価1800円)

ISBN978-4-7791-7010-2

福島第一原発事故後、東北地方では新たな差別が生まれようとしている。本書は日本と他国との戦争終結後の和解について、人道に軸足を置いて近代史を研究してきた専門家の目から見た3.11後の福島に関する体験と感想をつづったもの。

大津波や地震といった大惨事を生き延びてくださった方々に、生き残ってよかったと感じて欲しい。そのためには放射能の影響をめぐるデマや暴言、恐怖や好奇心を煽る言論を許すことは出来ないと思った著者は、被災地の実情を知っておこうと決意してボランティア活動に取り組んだ。福島での経験を中心に第一章をまとめており、第二章では長崎への原爆投下後の日本赤十字社の活動など、著者のこれまでの研究の一部が紹介されている。著者は、暴言や失言を繰り返す一部の学者に対する批判をしたところ、「トンデモ系」というレッテルを貼られたことも述べているが、他者へのレッテル貼りに異様な興味と熱意をもつ人々の相手をしてもしようがないとの割り切りも明快である。

原子力や放射線をめぐる科学的知見を十分にもたぬマスメディアの報道が風評被害を増幅させ、日本社会の不信の連鎖を強化している側面があることはもはや見逃せないが、メディア自体が反原発熱に浮かされているためにその問題構造をろくに監視も批判もできない状況に陥ってしまっている。今の日本の問題は学問が差別の根拠にされてしまうことにありと指摘する。また、福島事故の原因を日本文化特異論的に分析した調査報告は、将来の異文化圏の原子力発電所の安全性確保に対する貢献度の低いものになり、例えば女川がなぜ福島と異なる経緯をたどったのかという分析を放棄するものになったと述べている。起こったことを忘れないで、それでいて赦しあうのが今日の和解をめぐる価値観で、21世紀は修復と和解の時代だそう。いま不信の連鎖が覆い尽くそうとしている日本の状況を変えるにはどうすればよいか。今日の韓国と日本との関係修復のためのヒントも沢山含まれている。日本を取り巻く状況を考えるうえでも大変参考になる良書である。

(編集委員会・齋藤 隆)



目安箱への投書のご案内

日本原子力学会 編集委員会

編集委員会は、読者・会員・投稿者等からのご意見、ご提案をいただき、よりよい学会誌編集活動を目指すべく、意見窓口「目安箱」を設けております。

- ・学会誌の企画、編集、掲載記事や論文に関すること。
- ・新刊図書の書評の推薦

などについてのご意見・ご要望がございましたら、学会ホームページ

<http://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>、または E-Mail : aesj2005meyasu@aesj.or.jp にてお寄せください。編集委員会にて検討後、担当者より回答させていただきます。

学会誌編集活動への皆様の積極的なご参加をお願いいたします。

より大胆で力強い原子力規制行政を

日本テレビ報道局 小林 史

テレビ報道は活字メディアと違い、記者が取材を通じて得た感想や自分の意見を明確に主張する機会は、ほとんどないのが現状だ。今回、この学会誌への寄稿という機会に、この1年半余り原子力規制委員会と原子力規制庁を取材してきた私なりの感想や考えを率直に綴ってみたい。

まず最も強く感じるのは、様々な局面における規制委員会の関与の度合いの希薄さだ。

一例を挙げれば、福島第一原発の廃炉作業や汚染水をめぐる相次ぐトラブルに対する対応が非常に曖昧だと感じている。この4月、福島第一原発で本来は汚染水が移送されないはずの建屋の地下に200トンもの汚染水が溜まっていることが発覚。何らかの理由で移送配管のポンプが起動された可能性が高いと見られている。また、これに先立つ今年2月にも、汚染水貯蔵タンクに水を送る配管の弁が開閉され、すでに満杯のタンクにさらに水が送られて溢れ出るというトラブルがあった。そして、今この原稿を書いている時点で、どちらのケースについても「誰がどういう経緯でやったのか」という最も大切な問いに対する答えは得られていない。では、規制委員会の対応はと問えば、東京電力による内部調査の結果を待つと言う。

もちろん規制当局の役割は「事業者から報告を受けて指導・監督する」というもので、事業者の立場を慮ったり、必要以上に自ら手を差し伸べることには慎重であるべきだ。「規制の虜」と揶揄された福島事故以前の規制当局と電力会社との密接な関係を断ち切り、適切な距離感を保とうとする意図は理解できる。しかし、技術的トラブルやケアレスミスではなく、人為的ミス、場合によっては「悪意を伴う故意による作為」の可能性が否定しきれない最近の事案について、東京電力の調査結果を座して待つことで事態が好転するとは到底思えない。

田中俊一委員長は汚染水の誤移送について「意図的なものとは考えていない。(作業員は)自分たちが疑われると思ったら気持よく働けないし、作業も進まずトラブルも起きる。お互い信頼し合って助け合える職場環境を作ることが一番大切」と、性善説の立場を崩していない。しかし、今の福島第一原発では、悪意を持った行為に対する通常の防御機能さえ働いていないのが現状で、まさに「内部脅威」に対する脆さが露呈したとの指摘も聞こえ

てくる。ここは、東京電力でも経産省でもなく、規制委員会が自ら現場に乗り込んででも早急に真相を解明し、今後起こり得る危険性の芽を摘むことが求められているのではないか。事業者との距離感に慎重になり過ぎるあまり、“いまここにある危機”への対応に遅れが生じては本末転倒だろう。

もう一つ気になるのが、原子力防災をめぐる縦割り行政だ。原発の適合性審査が佳境を迎えている現在も、緊急時の住民の避難計画がどこまで実効性のあるものなのかは検証されていない。「規制委員会の役目は原子力災害対策指針の改訂までで、後は内閣府と自治体の役割」という“行政の縦割り”の殻を打ち破ることはできないものか。

「放射能から人と環境を守る」「地に落ちた原子力規制行政の信頼回復」を謳うのであれば、福島第一原発の事故処理にも、今後動き始めるであろう原発周辺の住民の安心安全にも、法律の枠組みを越えて規制委員会がもっと主体的にリーダーシップを発揮するべきではないか。

一方で、規制委員らの発言や考え方から日々学ぶことも多い。職業柄、記者は個別の事象やトラブルの細部を詰めることに多くのエネルギーを傾注しがちだが、田中委員長が常々発言している通り、全体のリスクを俯瞰的に見て判断することの重要性も忘れてはならないと痛感している。

事故から3年が過ぎ、原発の適合性審査も山場を越えると、規制当局に対するメディアの関心も取材頻度も徐々に低下していくことは想像に難くない。しかし、ここからがまさに本番。日本の原子力行政の過去と未来を一身に背負っていくというぐらいの気概を持って、これまで以上に大胆で力強い規制行政を実現してゆくことを期待している。

著者紹介

小林 史 (こばやし・ふみ)

日本テレビ報道局 原発取材班キャップ
1995年日本テレビ入社。社会部、外報部記者などを経て、2003年よりニューヨーク支局特派員。帰国後、『真相報道バンキシャ!』のキャスター兼アシスタントプロデューサーを経て、2011年12月より社会部・原発取材班。

