

巻頭言

1 原子燃料サイクル事業に未来を託す

戸田 衛

時論

2 原子力利用の安全基盤としての放射線影響研究と人材育成

低線量放射線の影響や他の環境有害物質との複合影響に関する研究など、原子力利用の実態に即した研究が求められている。

高橋千太郎

4 協働知創造のレジリエンスの視点から —原子力防災政策・施策の隙間

レジリエンスには点と点を線に結び付け、「木を見て森も見る」視点も必要だ。

清水美香

報告

33 福島環境回復活動の状況について

平成28年度末までに、帰還困難区域を除く福島での面的な除染終了を目指すとともに、引き続き中間貯蔵施設整備や様々な課題に取り組む。

小沢晴司

解説シリーズ

津波波圧・波力実験とその活用(2)

37 実務に活用される津波波力実験

この解説シリーズでは、津波・波圧に関する水理実験を紹介している。今回は、原子力発電所の敷地内に設置された防潮堤、タンク、配管に作用する津波波圧・波力に関する実務的評価を念頭に実施されたものを紹介する。

木原直人, 甲斐田秀樹

特集 福島第一原子力発電所使用済燃料プールからの燃料取り出しに向けた取り組みについて—原子力学会秋の大会セッションから

東京電力は福島第一原子力発電所の廃炉に向けて、政府および協力企業と共に取り組んでいる。ここではそのうち、プールの中にある燃料取り出しに焦点をあて、全体計画のあらまし及び1, 3号機における具体的な取り組みについて紹介する。

12 はじめに

高山拓治

13 各号機 使用済燃料プールからの燃料取り出しに向けた全体計画

小林 靖, 末永和也, 松岡一平

15 3号機 オペフロ大型ガレキ撤去, 除染, 遮へい体設置

井上隆司, 林 弘忠, 西岡信博

17 3号機 有人作業エリアの線量率評価

白井啓介, 松下 郁, 黒澤正彦ほか

21 3号機 オペフロにおけるγ線スペクトル評価及び線量測定結果

向田直樹, 林 宏二, 金濱秀昭, 鈴木敏和

23 3号機 カバーの設計および施工計画

松尾一平, 小川喜平, 岡田伸哉, 加藤和弘

26 3号機 燃料取扱設備等の設計および施工計画

諏訪 蘭 司, 東倉一郎, 伊藤悠貴, 篠崎史人

28 3号機 燃料取り出しに向けた準備状況

山口貴太, 工藤深也, 加賀見雄一

30 1号機 建屋カバー解体における遠隔誘導システム, ガレキ吸引装置等の開発

黒澤 到, 梶波信一, 木ノ下英雄, 山崎 忍, 塚原裕一, 廣瀬 豊



震災直後(4号機)

現在

42 気候変動問題と原子力の役割

パリ協定では地球の平均気温上昇を抑制する国際目標が定められた。この目標を達成には、原子力発電がより重要になり、その長期的な役割に関して議論を深めることが不可欠である。

小宮山涼一

報告

52 熱流動シミュレーション V&V の現状—国際会議 CFD 4NRS-6 報告

会合でのベンチマーク問題は、密度がわずかに異なる2種類の流体の混合問題であり、13の研究機関の計算結果が示された。

越塚誠一

47 平成 28 年度供給計画の概要と取りまとめについて

電力広域的運営推進機関は電気事業の広域的運営を推進することを目的として設立された。ここでは2016年4月の電力システム改革第2段階導入後初めてとなる供給計画の概要を紹介する。

寺島一希

6 NEWS

- 高速炉開発会議が方針の骨子示す
- 海外ニュース

理事会だより

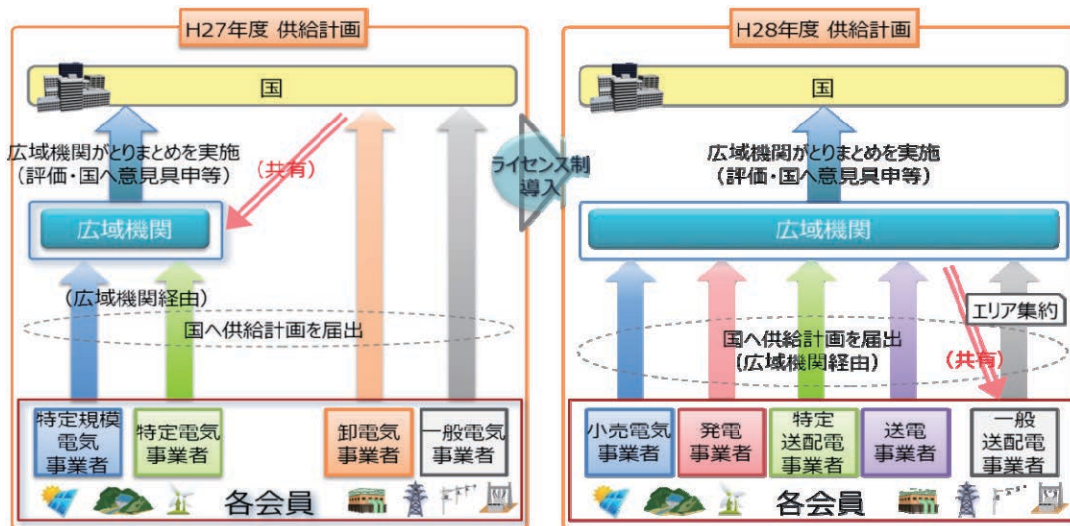
57 年会や大会での研究成果の発表について

木下 泉

- 55 新刊紹介
「なぜ日本の大学には工学部が多いのか」
木藤啓子
- 56 From Editors
- 58 会報 原子力関係会議案内、寄贈本一覧、新入会一覧、英文論文誌 (Vol.54, No.1) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

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

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



平成 28 年度供給計画での届出ルールの変更

原子燃料サイクル事業に未来を託す

巻頭言



六ヶ所村長

戸田 衛 (とだ・まもる)

六ヶ所村財政課長，総務課長，助役，副村長を経て2014年から現職。

六ヶ所村は，昭和60年の原子燃料サイクル事業受入れから31年が経過しました。原子燃料サイクル事業は，その一端を担うウラン濃縮工場，低レベル放射性廃棄物埋設センターが平成4年に操業を始め，高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターが平成7年に操業し，現在，サイクルの要である再処理施設においては，平成30年度上期しゅん工に向け，原子力規制委員会による新規制基準の適合性に関する審査が行われており，日本原燃株式会社では，審査申請を精力的に行っているとの報告を受けております。

再処理工場のしゅん工，操業は，原子燃料サイクル施設の受入れを選択した行政や地域住民にとって悲願であり，地域経済の活性化や産業の基盤強化を図る上で大きな期待をされているところであります。

東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故以降，我が国のエネルギーをめぐる状況が一変し，とりわけ，原子力に関しては，大変厳しい環境となりました。

国内では，原子力への不信や不安が根強く残り，この環境の変化に対応し原子力関連事業を進めていくためには，国は義務教育を含む原子力への理解普及を愚直に進めていく必要があると考えております。

原子燃料サイクルを顧みれば，昭和44年の新全国総合開発計画に基づき，六ヶ所村を中心とした「むつ小川原開発」が二度のオイルショック等で見直しを余儀なくされる中，昭和59年4月，電気事業連合会が青森県に対し原子燃料サイクル施設立地の協力要請を行ったことが始まりでありました。

元来，六ヶ所村は，第一次産業が主要な産業であったものの，ヤマセ(夏場に吹く冷質な北東風)により稲作等の農産物の生産に不適であったことから，村民の多くは出稼ぎにより収入を得て生計を立てておりました。

要請を受けた当時は，村内外ともに反対の気運が高く，とりわけ六ヶ所村では，住民による対立など，激しい混乱の中で原子燃料サイクル事業の受入れを選択したと記憶しております。

私も平成3年のウラン濃縮工場の安全協定締結に当たっては，当時，村企画課長として村内各地で説明会を開催し，反対派の方々から罵声を浴びせられることも度々ありました。

原子燃料サイクル施設受入れに当たっては，安全を第一義とし雇用対策を含む地域振興を行うことを旨とする「立地基本協定」を青森県並びに事業者とで締結した訳ではありますが，今思えば，この「立地基本協定」の文案に携わった先人たちは，協定の中に六ヶ所村の未来を託し，発展を強く願い作成したものと深く感銘を受けております。

現在の六ヶ所村は，開発当時と比較して雇用の場はもちろんのこと，生活や福祉，教育のインフラ等の整備も促進され，著しい発展を遂げ豊かな村となりました。村内に生業を見つけ，出稼ぎもほとんど無くなり，当たり前かもしれませんが，一年を通じて家族が皆で生活を営むことができるようになりました。

先人たちが対立の末に受入れを選択した原子燃料サイクル施設，そして魂を込め締結に至った「立地基本協定」，これらを心に刻み，原子燃料サイクル施設と共生を図りながら，六ヶ所村を発展させていくことが，今の私に与えられた責務であり使命であると考えております。

再処理関連事業は，昨年5月に，「原子力発電における使用済燃料の再処理等の実施に関する法律」いわゆる再処理等拠出金法が成立し，去る10月3日に認可法人使用済燃料再処理機構が設立されましたが，使用済燃料再処理機構，また，日本原燃株式会社におかれましては，こうした村の歴史に鑑み，安全対策や地域振興対策に関し，責任を持って業務を遂行していただければと考えております。

(2016年11月21日記)



原子力利用の安全基盤としての放射線影響研究と人材育成



高橋 千太郎 (たかはし・せんたろう)

京都大学原子炉実験所教授・副所長
放射線医学総合研究所 内部被ばく研究部研究
室長, 放射線安全研究センター長, 研究担
当理事などをへて現職

日本放射線影響学会副理事長, 日本原子力学
会保健物理・環境部会(前)部会長

1. はじめに

放射線が人や生態系に及ぼす影響に関する研究(放射線影響研究)に長年携わってきた筆者は、東京電力福島第一原子力発電所(以降、福島原発)の事故に際し、自身の経験や知識がこのような甚大な原子力災害を前にして、いかに実用的・実地的でなく、断片的なものであったかを実感せざるを得なかった。日常利用している放射線管理区域においてもめったに遭遇することのないような高い空間放射線量率や表面汚染濃度の環境が、突如、一般の市街地や農耕地に出現したのである。原子力発電が如何にリスクを内包したものであったかを実感するとともに、十分な寄与ができない自身の知識や経験を考えると忸怩たるものがあつた。もちろん、事故以前から原子力利用の潜在的な危険性を認識し、放射線安全や放射線影響に関わる研究の重要性を主張してきたが、原子力利用の実情と事故の危険性を十分に認識できていなかったと反省している。原子力を利用して行く上で、今後、どのような放射線影響研究が必要となるか、どのような視点にたち、何に留意して研究を進めるべきかについて私見を述べる。

2. 原子力発電・再処理をめぐる放射線影響研究

原子力発電・再処理の安全基盤として、今後、重点を置くべき放射線影響研究としては、1)実際の被ばく状況を反映し、2)比較影響あるいは複合影響という視点に立ち、3)人以外の生物も対象に入れた研究である。すなわち、重点を置くべき点の第一は、原子力発電や再処理において想定される実際の被ばく状況を反映した研究である。放射線の量や放射性物質の種類、その摂取形式など、実際に起る可能性の高い状況を想定した放射線影響研究が求められている。今回の福島原発事故の経験に立てば、この種の研究の重要な例として、低線量放射線の影響研究を挙げることができる。従来の放射線影響研究の多くが、実験的に影響が「検知できる」高い放射線レベルを対象とした研究であったことは否めない。一般公衆が受ける可能性のある低いレベルの放射線影響の研究が求められているのである。一般に低線量被ばくと言われ

る100mSv以下の被ばく、特に、今回の事故によって一般の方が受ける年間1mSv以下の影響を、疫学研究や実験動物を用いた発がん実験のような従来の研究手法で明らかにすることは極めて難しい。しかしながら、現在急速に発展しているライフサイエンス分野の分子生物学的な手法を活用すれば、このような低線量域でどのような生体反応が引き起こされているか、それが時間の経過に伴い、修復やどのような障害につながるかを明らかにできる可能性はある。筆者らは、人の組織の構成細胞である繊維芽細胞を対象に、どれくらい低い線量の放射線にまで人の細胞は反応するのかを調べたことがある。放医研の安倍博士らの開発した網羅的遺伝子発現解析法(HiCEP)という新しい遺伝子解析法を用いると、X線CTの一回分程度の10mGyという低線量放射線に対しても細胞は反応し遺伝子発現を行っていることが証明された¹⁾。原子力利用において一般の方が受けるであろういわゆる低線量被ばくの研究は重要な課題であつて、福島原発事故を経験した我が国として、このような低線量放射線の影響研究を先頭にたつて進める責務がある。

話題を内部被ばくの影響研究に転じ、研究対象とする放射性核種について考えてみる。筆者は長年にわたつてプルトニウムの吸入毒性研究に従事してきた。1980年から90年代前半にかけて、世界中の関連研究機関における内部被ばくによる放射線影響研究の重点は超ウラン元素にあつた。これは核燃料サイクルの推進とそれに付随する安全性の確保の観点からである。その陰で、核分裂生成物の中の β ・ γ 線放出核種に関する内部被ばく研究はSrやIの様な特異的な生体内分布を示す核種以外はあまり注目されてこなかった。福島原発事故の後、「¹³⁷Csはどれくらい危険なのですか？急性毒性はどの程度なのですか？」というご質問を受けた時は、答えに困ってしまった。¹³⁷Csの急性毒性については、我が国の内部被ばく研究の先駆者である松岡理博士が、その著書の中で旧ソ連の科学者からの私信として、実験動物における30日半致死量(LD50(30))を提示しているが、これ以外に十分なデータを知らない。また、急性毒性だけでなく、¹³⁷Csの長期摂取に伴う発がん率に関する疫

学データはもちろんなく、動物実験の知見も皆無である。このように事故時だけを見ても、実際の被ばく様式とそれに伴う健康障害やリスクに明確に答えることのできる放射線影響研究が行われてきたとは言い難い実情にあり、今後はこのような点に留意した研究が求められている。

第二に重点を置くべき研究は、比較影響や複合影響という観点ならびに個人や集団ごとの偏差に焦点を当てた研究である。放射線影響の観点から提供できる放射線被ばくリスクは「1Svの被ばくによって固形がんによる死亡の過剰相対リスクは成人で0.5である」という数字に尽きるのではあるが、そのようなリスクが他の生活習慣や環境有害物質への曝露、例えば飲酒や喫煙、紫外線、自動車運転などに比べて、どの程度のものであるのか、同じ性質のリスクかなど、原子力発電に係わる放射線影響やリスクだけに着目するのではなく、他の産業や生活習慣との比較という観点からの比較影響研究が求められている。また、このような他の危険要因との複合影響に関する研究も重要である。喫煙と放射線被ばくはその代表例である。さらに、福島原発事故後の関心事としては個人や集団の種類による影響の違いである。具体的に言えば、子供は大人よりリスクがどの程度高いのか？野菜不足は放射線リスクを増加させるのか？このような点について疫学的な人でのデータとそれをバックアップする放射線生物学的なデータが求められている。

重点を置くべき研究の第三として、生態系への影響に関する研究がある。国際放射線防護委員会(ICRP)は、1990年代までは、人に対して放射線防護を行うことで人以外の生物の防護は達成できるとしてきた。これは従来の放射線影響の指標が主として致死効果であり、急性照射による致死を指標とすると人が最も放射線に対して感受性が高かったからである。しかしながら、近年の環境保護意識の拡大とチェルノブイリで人以外の生物種にも影響が認められたことを受け、ICRPが生態系への影響に関する調査と勧告のため第5委員会を設置するなど、世界的に生態系(人以外の生物)への影響評価研究が注目されてきている。原子力のエネルギー利用においては、環境中への放射性物質の拡散(平常時も含め)は避けることができない。実際に起きうる被ばく様式を明らかにして、生態系への影響を評価して行くことが必要である。

3. 新たな原子力利用に係わる放射線影響研究

原子力に関連した放射線影響の研究は、今後も軽水炉の平常時や事故時と関連したものが主流となるであろうが、新たな原子力利用を視野に入れた研究も重要になってくる。核融合の利用に伴うトリチウムの使用はその典型例である。一時期、トリチウムの生物影響に関する研究が精力的になされた時期があったが、トリチウムの様な低エネルギーのベータ線の生物効果を観察できる鋭敏

な手法が無かったこともあり、十分な知見が蓄積されたとは言いがたい。現在急速に進歩している遺伝子解析などの分子生物学的手法を活用した今後の研究の展開が望まれる。

原子力関連の革新的な技術として注目されているものの一つに、核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・再利用がある。高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命核分裂生成物を分離回収し短寿命核種もしくは安定核種に核変換するとともに、白金族核種などの有用金属を回収して再利用しようという技術開発である。資源の少ない我が国にとって極めて魅力的な技術である。このような新たな技術開発もまた、それに付随する放射線防護の問題の解決が必要であり、その基礎となる放射線影響の研究が求められている分野である。さらに、医学分野においても原子力・放射線を利用した新しい技術が開発され利用されてきている。重粒子線治療やホウ素中性子捕捉療法(BNCT)、短半減期アルファ核種を用いた内用療法などである。このような新たな利用においては、これまででない放射線被ばくの場合や状況が生まれてくることが想定され、そのリスクを評価するための放射線影響研究が求められている。

4. 教育と人材育成

福島原発事故を契機に、原子力や放射線に関する教育・人材育成の重要性が再認識されてきている。その様な中で、放射線影響に関しては、往々にして健康に及ぼす悪い影響のみが語られることが多い。放射線影響をうまく使って、私たちの生活に役に立っている応用面も含めた教育が必要である。また、先に述べたような新たな原子力利用における放射線影響研究、例えば、高レベル放射性廃棄物から回収した有用金属の利用に伴う放射線防護のような面についての教育も求められている。

5. 結語

原子力の利用においては常に放射線影響の問題が付随するにもかかわらず、従来は原子力利用の実際と放射線影響研究の間にかい離が生じていたことは否めない。原子力学会としては、このような原子力利用に伴う放射線被ばくの場合に関する情報を提供し、関連学会と連携してその様な場における被ばくリスクを明らかにすることにより、人での障害を未然に防止する研究や教育の一翼を担って行くことが重要であると考えている。

— 参考文献 —

- 1) Extremely low-dose ionizing radiation upregulates CXC chemokines in normal human fibroblasts. *Cancer Res*, 65: 10159-10163, 2005.

(2016年9月30日記)



協働知創造のレジリエンスの視点から ：原子力防災政策・施策の隙間



清水 美香 (しみず・みか)

京都大学グローバル生存学大学院連携ユニット特定准教授

大阪大学国際公共政策博士。在米日本大使館、野村総合研究所アメリカ、米国East-West Center、京都大学防災研究所等で研究職に従事。専門は公共政策、社会システムデザイン、災害リスクマネジメント。

「協働知創造のレジリエンス」

現代リスク社会において、リスクおよびそれを取り巻く環境が複雑であればあるほど、また不確実性が増せば増すほど、従来散在しがちな個々の情報、データ、教訓、経験、専門知は、評価や検証、分析のプロセスを経て体系化され、統合されることがより求められる。そうしたプロセスが継続されることによってはじめて、運用可能な情報が生み出され、いざという時に行動可能な政策(施策)に繋がる。私は、こうした観点を拙著『協働知創造のレジリエンス～隙間をデザイン～』(京都大学学術出版会、2015年)の中で「レジリエンス」を政策または防災に組み入れていく上での柱の1つに据えた。

レジリエンスを一言で訳せば、回復力などの訳が当てられるが、「前進する」という意味も含まれるように、一言で片づけられるものではない。また、レジリエンス研究をしているとマニュアルはあるかと尋ねられることがあるが、その類で理解され得るものではない。レジリエンスの本質を紐解いていくと、そこに機能に関する意味合いが内在する。その詳細は後述するが、端的に主なものを述べると、レジリエンスには、「点」だけの視点に終始せず、点と点を線に結び付け、多様な側面を俯瞰し、「木を見て森も見る」アプローチが深く関わる。このため、同書では、幅広い層に分かりやすく伝えることを念頭に、レジリエンスを「状況変化を重視し、短・中・長期的な視点から社会に散在する点を線で結び、木を見て森も見ながら、予測しないことが起きても、逆境にあっても折れない環境を生み出すこと」と記した。また、経験・知識・システムの俯瞰をベースにして、知と知、人と人、システムとシステムを繋げることから協働知が生まれ、そこからレジリエンスが創られることを示唆して、「協働知創造のレジリエンス」を提示した。これを下敷きにして、現代リスク社会とレジリエンス、原子力防災政策・施策の関係はどこにあるのか、レジリエンスの視点から原子力防災・施策の隙間はどこにあるのか、現状を一步前に進めるための一石を投じてみたい。

現代リスク社会の特徴とレジリエンスの関係性

現代リスク社会の特徴をいえば、「複雑性」と「不確実性」に集約される。東日本大震災が地震・津波・原子力災害という3つの災害をもたらした例は顕著であるが、これに留まらず、従来自然・人為的・技術的といった主要因ごとに分類されてきた災害リスクの多くが、現代の災害リスクと重複する傾向にあり、さらに従来リスクと現代リスクの相互作用が加わることによって、リスクの複合連鎖化が見られる。それによって、「不確実性」も単にデータや予測の不確実性だけでなく、その解釈に関わる不確実性、過去の状況の知識に関わる不確実性、将来的な状況の知識に関わる不確実性があり、さらにこうした不確実性が社会に与える影響に関わる不確実性というように、何層にもわたる不確実性(深い不確実性)がつきものであると認識することが肝要である。

こうした現代リスク社会において、単純にリスク予測やデータが「不確実だから」公開・報告しないと、「リスクがおきるのは極めて低いと考えられるから」政策・施策考慮に入れないなど、その不確実性に向き合わない施策・政策は、レジリエンスとは逆行しているといえるだろう。こうしたリスクの複雑性と不確実性は、現代リスク社会において私たちが直面しなければならない現実であり、そのダイナミックな環境変化の中で、どのように現代リスク社会に向き合うかを協働で問い続けなければならない。こうした変化においては従来のアプローチだけでは問題解決方向に向かうのは難しい。その問題解決に道筋を開くためにこそ、レジリエンスを政策・施策に組み入れることが要求される。

レジリエンスを政策・施策に組み入れる

上述の「木を見て森も見る」アプローチは、「システムズアプローチ」から引き出される。そのアプローチの柱として、1)各サブシステム(サブシステム)は、それぞれ独立して機能する必要がある一方で、「システム全体」を動かすための中央調整機能が不可欠である、2)システム

全体を見る上で、各サブシステムの各機能、その機能を取り巻く環境の変化、各機能の境界分野を分析する必要がある、3)システム全体において、各サブシステムが有機的に体系化される必要がある、4)システムおよびサブシステム両方において、正しく機能させるために、継続的な評価が必要不可欠であることが挙げられる。

こうしたアプローチを、防災の個別項目に当てはめると判りやすい。簡単な例として避難計画に当てはめると、防災ではこの避難計画は基本中の基本であるが、この計画ができあがったところまでは、運用可能な情報、行動可能な施策になるまでには未だほど遠い。(1)その避難計画が実際に機能するために、どのような関係者がどのように関わるのか、それはその関係者に広く理解されているか、どこが調整機能になって動くことになっているのか、また(2)避難計画を取り巻く環境・リスクの変化(たとえば新たな地震リスクなど)、現場近くに住む人々の生活の変化、社会の変化を常に見直しているか、(3)この避難計画をもとにした実際の避難訓練が定期的に行われているか、避難訓練の結果からみるとどのような現実が見えるのか、(4)(1)～(3)を踏まえて、避難計画を定期的に見直しているかが関わることになる。実際には、こうした一連のことが実施されるには、1つの関係機関や原子力専門家だけではない、様々な分野の専門家と実務家と現地の市民が垣根を越えて「協働知」を通して実現するものであり、そこから現場の、地域のレジリエンス、あるいは実際の緊急時に備えたレジリエンス機能の一角がつかれることになる。

より具体的に、レジリエンス機能をつくるとはどういうことか。著書では、一般的に組織やプログラムの中で用いられることを想定し、様々なレジリエンスに関わる研究を集約して、A. リンケージ(繋がり)、B. プロセス、C. 時間、D. スケールという4つの角度を網羅することをレジリエンス組立のための基本的な枠組みとして提示した(図1参照)。これは原子力防災政策・施策にも応用

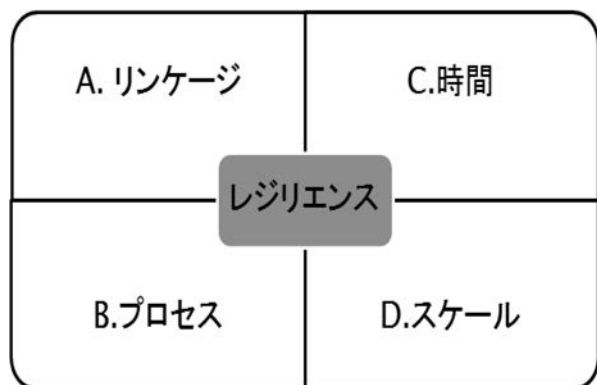


図1 レジリエンス組み立てのための枠組み

可能であると考えられる。

それぞれの角度に含まれ得るものを原子力防災政策・施策に沿ってみると、A. 「リンケージ」でいえば、単純なことのように思えるが、あらゆるレジリエンスづくりの根幹となる、市民を含む関係者同士の双方向のコミュニケーション、現場と意思決定者の繋がりといったことが挙げられる。B. 「プロセス」でいえば、リスクを検証しながら、より良い原子力防災政策・施策を追求するための評価と学習の一体プロセス、多様なステークホルダーが参画するためのプロセス、前述の協働知創造のレジリエンスの根幹を成す、オープンな情報と、データ・情報・知識・経験・教訓を統合し、使える情報、行動に結び付ける仕組みなどが挙げられるだろう。

さらにC. 「時間」についていえば、日常の行動から緊急時を意識した取り組みを重ねること、単に早ければいいということではなく、複数の時間軸(短期・中期・長期的)をもち、定期的に見直しながら一貫して進めるアプローチなどが関わってくる。D. 「スケール」でいえば、過去の決まりきったルートに依存するのではなく、例外に気づき見直しをかけるアプローチなどが関わる。特に原子力防災政策・施策において、単に決められた時期に決められた項目を調べるリスク評価に依存するだけでなく、様々な環境の変化、リスクの変化に鑑み、リスク評価アプローチも更新していくことが鍵になると見ることができる。

原子力防災政策・施策の隙間

上記のレジリエンスの視点を踏まえ、現行の原子力防災政策・施策において、リスク評価の運用、市民と現場と意思決定者との関係性、リスクコミュニケーション、SPEEDI(緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム)の運用の経緯などいずれの分野をみても、A～Dを軸にみると、様々な隙間が見えるのではないだろうか。総じて、情報をオープンにし、専門分野の垣根を超えて知を結集し分析と評価を繰り返しながらより良い原子力防災の方向性を追求し、現場と市民のニーズや観点を取り込みながら、現実を直視した政策や施策を協働でつくるということを、レジリエンスを組み入れた原子力防災政策・施策の原点とすれば、その方向には至っていない。しいていえば、こうしたことを原点にする原子力防災政策・施策でなければ、現場に、地域に、さらにいえば想定を超えた緊急時にレジリエンスを維持する、つくことは難しい。だからこそ、今レジリエンスの視点から、原子力防災政策・施策の足元を見直し、その在り方を協働で再構築していくことが求められる。

(2016年10月4日記)



高速炉開発会議が開発方針の骨子示す、「戦略ロードマップ」策定へ

政府の高速炉開発会議は2016年11月30日、3回目の会合を行い、年内に取りまとめる「高速炉開発の方針」の骨子案を示した。

会合ではまず、目標の再掲示として、「エネルギー基本計画」に基づき、核燃料サイクルを推進するとともに、高速炉の研究開発に取り組むことを「堅持」し、世界最高レベルの高速炉の開発、実用化、国際標準化を目指し、高い安全性と経済性の同時達成を追求するとしている。その上で、高速炉開発を進めるに際し関係者が共有すべき4原則として、(1)国内資産の活用、(2)世界最先端の知見獲得、(3)コスト効率性の追求、(4)責任体制の確立——を掲げた。

今後、高速炉開発会議の下に実務レベルのワーキンググループを設置。2017年初頭にも作業を開始し、2018年を目途に「戦略ロードマップ」を策定するとしている。前回10月27日の会合で、資源エネルギー庁が、高速炉開発の各プロセス「実験炉」、「原型炉」、「実証炉」、「商用炉」における主目的、実施内容、実施主体について大まかに整理したが、今回の会合で示された骨子案では、最重

要となる実証ステージにおける向こう10年程度の開発作業を特定し、実証ステージ以降のプラントの基本的設計思想と開発体制を固めていくとされた。

「高速炉開発の方針」には高速炉特有の技術課題、その解決に向けた国際ネットワークの活用についても盛り込まれるが、30日の会合では、三菱重工業、米国エネルギー省がプレゼンを行い、それぞれ実用化段階の高速炉プラントをイメージした3次元設計技術、実験炉「常陽」を活用した協力の可能性を披露するなどした。

今回の議論に関し松野博一文部科学相は、「もんじゅ」の運転から得られる成果は、「常陽」や海外プラントからも獲得できるとの考えを示す一方、去る25日の福井県・西川一誠知事との意見交換も踏まえ、国内の技術基盤を活用する重要性も強調した。また、世耕弘成経済産業相は、様々な国との協力に向け可能性を模索していく期待とともに、これまでの「もんじゅ」の経緯に鑑み、民間主体となる今後の開発プロセスについて、社会的信頼性を確保する必要性も訴えた。

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

[ロシア]

80万kW級の高速実証炉「BN-800」が営業運転開始

ロシアの民生用原子力発電会社であるロスエネルゴアトム社は2016年11月1日、親会社であるロスアトム社の承認に基づき、電気出力80万kWの高速実証炉「BN-800」がベロヤルスク原子力発電所4号機として営業運転を開始したと発表した。同サイトではすでに、出力60万kWの原型炉「BN-600」が1981年から3号機として稼働しているほか、後続の5号機として出力120万kWの大型商業用高速炉「BN-1200」の建設も2025年に運転開始予定。プルトニウムおよびウラン・プルトニウム混合酸化物(MOX)燃料の燃焼が可能な高速炉の実用化に向けて、ロシアは着実に歩を進めている。

ベロヤルスク4号機は1980年代に着工されたものの、政治体制がロシアに変わる中で作業が一時中断。作業は2006年に本格的に再開され、2014年6月に初臨界を達成した。その後、2015年12月にウラル地方の送電網に初めて接続され、出力を徐々に上げながら段階毎に機器のテストや性能確認などを実施。2016年8月にはフル出力による15日間の運転試験を成功裏に完了しており、設計パラメーター通りに通常負荷に耐えられることが確認された。これまでの試運転期間中に、同炉はすでに28億kWh以上を発電。今回の営業運転開始に先立ち、連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTECHNADZOR)はすべての必要項目を確認し、同炉がプロジェクトの仕様と技術ガイドライン、および法令を遵守しつつ運転可能であると結論付けていた。

[ポーランド]

高温ガス炉を 2025 年までに建設

ポーランドは現在、国内の2サイトで合計600万kWの原子力発電設備建設を計画中だが、これと並行して高温ガス炉(HTR)を導入する実行可能性調査(FS)を担当している政府の諮問委員会は2016年10月10日、「HTRによる熱電のコジェネレーションは商業的に有望」との見解を表明した。FSを主導する国立原子力研究センター(NCBJ)のG.ウロフナ教授は、熱出力1万kW、電気出力0.4万kWの研究用HTRを2025年までに完成させるため、2015年5月にURENCO社やAMEC社が参加する英国の企業連合と基本合意書に調印したと発言。その他の英国企業やフランス政府関係機関も関心を示しているほか、英米両国政府とは最近、関連協議を実施したことを明らかにした。

この見解は、欧州原子力学会が10月9日～13日までポーランドの首都ワルシャワで開催している「欧州原子力会議」の席上で発表されたもの。今回の会合はNCBJが共催機関に加わっており、参加者は会議後、シフィエルクにあるNCBJで1970年代に運転開始した同国唯一の研究炉「マリア炉(熱出力3万kW)」を視察予定となっている。ウロフナ教授によると、原子力はポーランドの経済成長を促す原動力となる可能性があり、HTR技術を原子力導入プログラムに含めることは、ポーランドがこの分野で成功を納める重要ファクターの1つになる。諮問委員会所属の専門家も、「化学産業などが必要とする熱の供給源として利用すれば天然ガスの輸入量を大幅に削減できる」という点で合意。ただし、1基あたりの発電量は比較的少ないため、原子力導入プログラムにおける第一目標の達成には適さないとの認識である。

ポーランドでは2015年10月に保守派の「法と正義」党による新政権が発足。経済省に代わってエネルギー省が原子力導入プログラムを担当している。同省のK.トゥホジェフスキ大臣は2016年7月、HTRの開発条件について分析や準備を行う諮問委員会を正式に設置。ポーランドを最も進んだ原子力技術の利用国とするため、NCBJの専門家や大手エンジニアリング企業の代表を委員に任命し、第4世代の技術であるHTRの利用可能性を集中的に評価する作業を開始していた。HTRが供給する摂氏500度～1000度の熱は水素製造や石炭のガス化といった化学反応に利用できるほか、そうしたプラントの隣接区域で安全に運転できるため、輸送ロスを最小限に抑えられると同委は評価。国家や企業の科学技術事業でHTRを最も効果的に活用し、熱生産や分配の潜在的な市場を分析するための勧告をまとめ、ロード

マップも策定することになっている。

[チェコ]

フィンランドのポシバ社、チェコに最終処分場ノウハウ提供

フィンランドで世界初となる使用済燃料の最終処分場建設計画を進めているポシバ社は2016年10月14日、チェコ政府の使用済燃料最終処分プロジェクトに専門的知見を4年にわたって提供する275万ユーロ(約3億1,500万円)のサービス契約をチェコ放射性廃棄物処分庁(SURAO)から獲得したと発表した。ポシバ社は2016年6月、同社が最終処分に関して保有する技術的ソリューションのマーケティング子会社として、ポシバ・ソリューションズ社を設立。チェコのプロジェクトには、この子会社がフィンランドのエンジニアリング企業や地質調査所(GTK)、およびスウェーデンのSKBインターナショナル社とともに参加予定で、フィンランドの最終処分場建設予定地に併設した地下岩盤特性調査施設(ONKALO)で得られた経験を提供するなど、この分野における知見の商業ビジネスを世界レベルに拡大していく考えだ。同社はすでに、フィンランドのピュハヨキでハンヒキビ原子力発電所の建設を計画しているフェンノポイマ社から、同様の技術専門サービス供給契約を受注。このほか複数の国からも打診があったことを明らかにした。

チェコでは現在、ドコバニとテメリン、2つの原子力発電所で6基が稼働しており、使用済燃料と高レベル放射性廃棄物(HLW)を安全に管理する方法として、政府は深地層における最終処分を選択。SURAOは2065年の深地層処分場(DGR)の操業開始を目標に、2014年に建設候補に残っている7地点すべてで第1段階の地質調査を実施することを承認した。今回の契約はSURAOとポシバ社が2015年11月に結んだ協力覚書に基づいており、SURAOは2025年までにDGRの建設サイトを最終決定する方針だとコメント。フィンランドの専門家との協力を通じて、立地戦略の改定や処分概念とDGR設計の作成、および処分概念のセーフティ・ケース改良などに関する助言を得たいとした。また、DGR建設計画の環境影響声明書(EIS)作成やステークホルダーとの交流促進、DGRの社会的受容性の拡大などにおいても支援を期待するとしている。

[ドイツ]

内閣、中間貯蔵・最終処分経費の事業者負担法案を決定

ドイツ連邦政府の G. ガブリエル経済エネルギー大臣は 2016 年 10 月 19 日、使用済燃料の中間貯蔵と最終処分に関わる経費として合計 235 億 5,600 万ユーロ(約 2 兆 6,700 億円)を原子力発電事業者 4 社に支払わせる法案を閣議決定したと発表した。放射性廃棄物の管理事業における事業者と連邦政府の責任分担を明確にすることが目的で、同法案は今後、議会審議にかけられる予定。12 月 31 日の成立を目指すとしている。

今回の負担総額は 2016 年 4 月、脱原子力政策の実行経費を審査する専門家委員会(KFK)が政府に勧告していたもので、KFK は中間貯蔵施設と処分場の建設・操業事業は政府に移管すべきだとする一方、その経費は事業者が負担すべきだとしていた。今回の法案はこの勧告に沿った内容となっており、事業者はまず、中間貯蔵施設とキャニスターの製造、最終処分場の建設・操業に必要な 173 億 8,900 万ユーロ(約 1 兆 9,700 億円)を政府が新たに設置する基金に法案成立後 7 か月以内に払い込む。次いで、2022 年末までにこの額の約 35.5%にあたる 61 億 6,700 万ユーロ(約 6,990 億円)を、利子などで経費が超過した場合の「リスク保険料」として追加で支払うとしており、放射性廃棄物の管理に十分な資金を確保する方針。これらの支払完了後は、事業者が更なる支払義務を負うことはなく、将来的な中間貯蔵と最終処分の経費調達は政府が責任を負うことになる。

[米国]

20 年ぶりの新設炉ワッツバー 2 が営業運転開始

米国のテネシー峡谷開発公社(TVA)は 2016 年 10 月 19 日、テネシー州東部のワッツバー原子力発電所で、米国では 20 年ぶりとなる 2 号機(PWR, 120 万 kW)が営業運転を開始したと発表した。1996 年に隣接区域で同 1 号機(PWR, 123 万 kW)が営業運転を開始して以来の新設炉であり、米国における 100 基目の商業炉となった。

TVA は 1973 年、当時の古い許認可システムに従ってワッツバー 1, 2 号機の建設許可を取得。1 号機が運転開始にこぎ着けた一方、2 号機の建設工事は TMI 事故後の安全要件追加や電力需要の低下などから 1985 年に停止された。TVA は 2007 年になって、約 25 億ドルの予算で同炉の完成計画を決定し、2008 年 1 月に工事を再開。米原子力規制委員会(NRC)は 2015 年 10 月、同炉は事故時の影響緩和策や使用済燃料貯蔵プールの計装強化など、福島第一事故関連の指令に適合するとして運転許可を発給した。初臨界を達成したのは 2016 年 5 月のことで、6 月 3 日付けで送電を開始したものの、その 2 日後にタービン系の不具合で自動停止。8 月には主要変圧器

で発生した小規模火災の修理に約 1 か月を費やすなど多少の遅延はあったが、今回、広範な出力上昇試験をすべて完了するとともに定格出力で 3 週間以上連続運転するなど、信頼性が確認されたとしている。

最終的な建設コストは 47 億ドルに達したが、営業運転の開始により同炉は晴れて、TVA の資本的資産から営業資産に移行。セコヤー(120 万 kW 級 PWR × 2 基)およびブラウンスフェリー(110 万 kW 級 BWR × 3 基)の両原子力発電所と並んで、TVA が保有・運転する原子力設備の 1 つとなり、試運転中に発電した 5 億 kWh のクリーン電力は既存の 6 基とともに、TVA が排出する CO₂ の削減に貢献した。TVA の J. グリムズ発電担当副総裁は「1 日 24 時間、週に 7 日間、炭素を出さないエネルギーをフルに供給できる電源は原子力だけだ」とコメント。TVA がテネシー峡谷で運転する原子炉や、全米で稼働するその他の原子力発電所は、米国における将来のクリーン・エネルギー社会にとって不可欠な投資の象徴だと強調した。

原子力産業界、トランプ氏の大統領当選を祝福

米原子力エネルギー協会(NEI)の M. コースニック次期理事長兼 CEO は 2016 年 11 月 9 日、原子力産業界を代表して次期大統領に決定した共和党の D. トランプ氏と M. ペンス次期副大統領を祝福するとの声明を発表した。エネルギー政策が大きな争点とならなかった今回の大統領選挙で、トランプ氏は原子力政策にあまり触れておらず、国内および対外的な原子力プログラムについて連邦政府の具体的施策が示されるのはもう少し先のことになる模様。それでも、同氏が国内石炭産業の復活や石油・天然ガス資源の活用拡大に加えて、原子力発電の必要性も明確に主張していた点に NEI は注目しており、原子力技術で米国が世界のリーダー的立場を維持するとともに、重要なエネルギー・インフラや環境保全の問題解決には原子力が不可欠であるという面からも、次期大統領が継続して原子力を支援していくよう働きかけたいとしている。米国では、民主党政権が過去に「国際核燃料サイクル評価」を提案したほか、ユッカマウンテン深地層処分場計画を打ち切るなどの原子力政策を取る一方、共和党は概して原子力推進派であることから、自由化された電力市場における既存原子力発電所への優遇措置といった改善で、トランプ氏率いる共和党政権への期待があると見られている。

コースニック次期理事長はまず、トランプ氏が原子力発電所を新たに建設する必要性と米国のエネルギー供給全体の拡大を訴えていたとし、「成功した不動産業者で

ある彼は、莫大な利益を得るための経済成長基盤として信頼性の高い電源が早急に必要であることを理解している」と指摘した。停滞した経済とは裏腹に、米エネルギー省(DOE)は電力需要が2040年までに23%増加すると予測しており、これには200基以上の大型原子炉が必要になるとの認識を次期理事長は明示。この予測と、利用できるエネルギーすべてを活用するというトランプ氏のアプローチを結びつけば、原子力施設が供給する低炭素で信頼性のある電力を米国のエネルギー・ミックスにおける主要部分とし続けねばならないことは明らかだとした。次期理事長はまた、選挙戦期間中を通じて原子力の重要性は超党派で認識されており、両候補の間で一般的見解が一致していた数少ない分野の1つだと明言。一般市民の意識調査でも、回答者は米国のエネルギー・ミックスの中でも原子力は重要という傾向であり、各人が支持する候補者とは無関係だったと指摘した。

なお、トランプ氏は選挙戦における政策方針書の中で「アメリカ第一主義のエネルギー計画」を訴え、米国は原子力発電などのエネルギー技術で世界のリーダー的存在であると明記。同計画により、エネルギー自給を達成するとともに数百万の雇用を創出し、クリーンな大気と水を保全すると公約していたが、2016年5月にノースダコタ州で行った演説では、2020年以降の新たな温暖化対策である「パリ協定」をキャンセルすると断言した。オバマ政権が批准した同協定は11月4日に発効済みで、通常の手続きではトランプ氏の任期期間中に脱退できないことになっている。しかし、一部の法律専門家は、合法的近道を使って1年以内の脱退が可能という認識を示した模様で、同協定および地球温暖化問題を巡って巻き起こる国際論争の行方が注目されている。

[中国]

海上浮揚式原子力発電所の実証プロジェクトを正式に開始

中国広核集团有限公司(CGN)は2016年11月4日に広東省の深圳で記者会見を開催し、中国初の海上浮揚式原子力発電所実証プロジェクトを正式に開始すると発表した。熱出力20万kWの小型PWR「ACPR50S」について、原子炉容器の購入契約を東方電気と締結したもので、2020年にも送電開始する見通しとなっている。沖合設備に対するエネルギー供給は、南沙諸島など南シナ海の領有権を握って海軍力や権益の拡大を目指す中国にとってクリアしなければならない課題であり、CGNと並ぶ中国の大規模原子力開発企業である中国核工業集团公司(CNNC)も、出力10万kWのモジュール式小型PWR「ACP100」の海上浮揚式版として「ACP100S」を開

発中。これらが完成すれば同国の離島や沿岸地域、南シナ海などで石油・ガス採掘構造物等への熱電併給および海水脱塩などに利用されると見られている。

中国において陸上と海上の両方で利用可能な小型炉の開発は、100万kW級の大型原子炉開発を補完するとともに、エネルギー供給オプションの多様化を図るという位置付け。CGNはフランスの技術をベースに開発した第3世代設計「ACPR1000」の小型版として、熱出力45万kWの陸上用PWR「ACPR100」の設計を進めている。CGNの発表によると、国家発展改革委員会(NDRC)は2015年12月、革新的エネルギー技術の開発に関する第13次5か年計画の一部として「ACPR50S」の実証プロジェクトを承認。CGNはその後、原子炉容器を含む主要機器の製造について入札を実施しており、その結果として今回、CGN研究院と東方電気が購入契約にこぎ着けた。陸上の原子力発電所の場合、中国では原子炉系統部分への最初のコンクリート打設をもって正式着工となるが、土木工事が不要な海上浮揚式の場合は、原子炉容器の調達契約調印が正式着工になるとCGNは指摘。船体部分の建設工事が比較的短期間で済む一方、すべての機器の中でも製造に最も時間がかかる原子炉容器は、今回の契約により正式にエンジニアリング段階に入ると説明した。

海上浮揚式原子力発電所の建設については、現在ロシアが最も進んでおり、民生用原子力発電所を管轄するロスエネルゴアトム社は2016年10月、極東地域に位置するチュクチ自治管区のペベクで、世界初の海上浮揚式発電所となる「アカデミック・ロモノソフ」(出力7万kW)の係留用陸上設備の建設工事を開始した。近隣地区にあるピリピノ原子力発電所(1.2万kWのLWGR×4基)をリプレースする形で、2019年に運転開始する予定である。

[インド]

ロシアの協力でクダンクラム3・4号機を着工

インド原子力発電公社(NPCIL)とロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は2016年10月15日、両国政府が1988年に結んだ協力協定に基づきインド南端で開発中のクダンクラム原子力発電所について、Ⅱ期工事にあたる3、4号機の増設工事を開始したと発表した。8月末に送電開始した2号機についても、同じ記念式典で竣工を祝い、ロシアからインド側へ正式に引き渡された。原子力供給国グループ(NSG)が30年以上にわたってインドへの原子力資機材・技術の輸出を禁じていた間も、ロシアは同発電所の建設など原子力平和利用分野におけ

るインドとの協力を継続。2014年には、クダンクラムその他のサイトで今後20年間に少なくとも12基建設するとの「戦略的ビジョン」をインドと策定した。これにはロシアからインドへの技術移転も盛りこまれており、インドにおける将来的な原子力機器国産化も含め、両国の協力関係は一層拡大していく見通しだ。

これらの発表は、インド西海岸のゴアでBRICS諸国（ブラジル、ロシア、インド、中国、南アフリカ）の首脳会合が開催され、ロシアのV.プーチン大統領とインドのN.モディ首相が会談したのに合わせて行われた。3、4号機増設計画では100万kWのロシア型PWR（VVER）を2基建設予定で、ロスアトム社によると、採用設計はロシアのみならず国際原子力機関（IAEA）、および欧州電力要求（EUR）の規制・技術要件を満たしている。一般的な設計作業はロスアトム社傘下のアトムエネルギープロジェクト社が実施した一方、詳細設計や機器供給および技術支援はアトムストロイエクスポート（ASE）社が請け負った。

ASEグループのV.リマレンコ総裁によると、インド側はこれまでにクダンクラムⅡ期工事の着工に必要な準備作業をすべて完了。インフラ設備が全面的に整ったほか、建設エリアの設計文書も完成しており、NPCILは発給された掘削許可に基づく作業を実施。15日には建設エリアの基礎スラブとして、地表をコンクリートで固める作業が行われた。現地の報道によると、3号機原子炉建屋部分への最初のコンクリート打設は2017年の第1四半期に行われる模様で、工期は約70か月と見られている。両国はまた、後続の5、6号機増設計画についても、一般枠組協定など関連する政府間協定の最終調印に向けた作業を進めていることを明らかにした。

[パキスタン]

中国の協力でチャシュマ3号機が送電開始

パキスタンで原子力発電設備の開発に協力している中国核工業集团公司（CNNC）は2016年10月16日、同国4基目の商業炉となるチャシュマ原子力発電所3号機（C3）（PWR、34万kW）が15日付けで送電を開始したと発表した。2011年3月に本格着工した同炉は、10月2日に初めて臨界条件を達成。年内にも営業運転に入ると見られている。同発電所ではこのほか、9か月遅れで着工した同型の4号機（C4）も、2017年の営業運転開始を目指して順調に建設中となっている。

パキスタン政府は2050年までに4,000万kWの原子力発電設備開発を目標に掲げているが、核不拡散条約（NPT）に未加盟のため欧米の原子力先進国から技術面

や資金面での支援が得られず、中国がこれらの両面で20年以上にわたりパキスタンに協力している。チャシュマ発電所で2000年と2011年にそれぞれ営業運転を開始した1、2号機（各PWR、32.5万kW）も、CNNCの全面的な協力により建設されたもので、設計は中国の秦山第1原子力発電所（PWR、31万kW）の設計をベースとする「CP300」。チャシュマ3、4号機にも同じ設計を採用しており、これら2基の建設プロジェクトは2010年2月、中国とパキスタン両国政府間で融資協定が発効したのにもない、実行に移されていた。

パキスタンではさらに、カラチ原子力発電所2号機（K2）（PWR、110万kW）が2015年8月に本格着工しており、中国が知的財産権を保有する輸出用の第3世代設計「華龍1号」を採用。中国国外で同設計が建設される最初のプロジェクトとなり、中国製原子炉の今後の海外進出が注目されている。

[国際]

中国とロシア、原子力平和利用分野の協力拡大で合意

中国の李克強首相とロシアのD.メドベージェフ首相は2016年11月8日、両国間の様々な協力分野の中でも原子力の平和利用分野における戦略的な協力を一層拡大していくことで合意した。両首相が共同議長を務める中ロ定例会合が7日にロシアのサンクトペテルブルクで開催された際、この方針を盛りこんだ声明文が採択されたもの。中国ではすでにロシアの協力で建設された原子力発電所やウラン濃縮工場などが稼働中だが、今回の声明文は、中国においてロシアの国営原子力総合企業ロスアトム社による大規模原子力プロジェクトの実施促進を目的とする一方、双方が利益を得るための調整原則に基づき両国の原子力部門における協力をさらに進展させるとしている。

ロシアが中国で初めて建設協力した原子力発電所は、江蘇省の田湾原子力発電所1、2号機（各100万kW級のロシア型PWR）で、両炉とも2007年に営業運転を開始した。現在はⅡ期工事にあたる3、4号機（各100万kW級のロシア型PWR）の建設工事を、それぞれ2012年と2013年から実施中。これらは2018年以降に完成する見通しとなっている。ただし、これらに続くⅢ期工事の5、6号機は、中国核工業集团公司（CNNC）がフランスの技術をベースに開発した第3世代のPWR設計「ACP1000」が採用されており、5号機は2015年12月に本格着工。6号機も2017年に着工すると見られている。

ロスアトム社の発表によると、両首相は田湾発電所Ⅳ期工事にあたる7、8号機の建設計画に触れ、中ロが共同

を進めるとの方針を支持。同プロジェクトの政府間議定書の調印準備を早急に完了し、複数の関連契約締結を促進したいと述べた。また、中国の新たなサイトでロシア製原子炉を建設する計画があったほか、海上浮揚式原子力発電所および第4世代の有望な高速中性子炉などの開発でも協力を拡大する考えを明らかにした。

高速炉関連のこれまでの協力についてロスアトム社は、ロシアの専門家が共同設計した電気出力2.5万kWのナトリウム冷却・プール型高速実験炉(CEFR)が、北京の原子能科学研究院(CIAE)で2011年に送電開始した事実と言及した。同じ年にはまた、ロシアのTENEX社が1992年の中ロ協定に基づき中国陝西省の漢中で建設した遠心分離法ウラン濃縮プラントで、4つ目の濃縮モジュールが日程を前倒して操業開始したと指摘。海上浮揚式原子力発電所の開発についても、2014年7月にCNNC傘下の新能源有限公司とロスアトム社傘下のルスアトム・オーバーシーズ社が、建設協力に関する了解覚書を締結したと強調している。

韓国電力公社、UAEのバラカ原子力発電所の運営管理に参加

韓国の産業通商資源省(MOTIE)は2016年10月20日、韓国電力公社(KEPCO)の企業連合がアラブ首長国連邦(UAE)で建設中のバラカ原子力発電所(140万kWのPWR×4基)について、KEPCOが首長国原子力会社(ENEC)の運営管理事業法人に共同投資することになったと発表した。9億ドルを投資して一定の持分を確保し、4基の原子炉が稼働する60年間に合計491億ドルの売上を得る見通し。今回の事業契約締結により、韓国とUAEの関係は原子力発電所の安全な運転を共通目標

とするパートナー関係に格上げされると強調した。

UAE国営通信によると、この日、KEPCOとENECが締結したのは、UAEの原子力平和利用プログラムにおける長期的な連携と協力のための合併事業契約。バラカ原子力発電所建設プロジェクトの資金調達・管理を行う新会社「バラカ・ワン」をENECの子会社として創設し、KEPCOは同社株の18%を取得。残り82%はENECの持分で、同社の最高財務責任者(CFO)がバラカ・ワン社の最高経営責任者(CEO)代行を務めるとした。また、バラカ発電所の運転管理会社としてENECが2016年5月に創設した「NAWAH エナジー社」についても、KEPCOは18%を保有することになる。バラカ・ワン社が管理する資金総額については244億ドルになるとの報道があり、直接借款の196億ドルと株式転換確約社債の47億ドルで構成される模様。この関連で韓国輸出入銀行(KEXIM)は同日、バラカ建設プロジェクトの資金調達として、ENECに対し31億ドル規模の融資を行う契約書に調印したと発表している。

KEPCOが率いる韓国企業連合は2009年末、約200億ドルで140万kW級の原子炉「APR1400」を4基、設計・建設するとともに、追加200億ドルでそれらの運転支援、機器の取替・検査を60年にわたって請け負うとする契約をENECと締結。アブダビ首長国西部に位置するペルシャ湾岸のバラカで、2012年から1号機の建設工事を開始した。現在は1~4号機の作業を同時に行っている状況で、これら全体の進捗率は71%に到達。1号機の営業運転は2017年を予定しており、ENECは年内にも最初の燃料を装荷したい考えだ。2020年に4基すべてが完成すれば、UAEにおける総電力需要の約25%を賄えるだけでなく、年間1,200万トンのCO₂排出が抑制できると期待している。

特集

福島第一原子力発電所使用済燃料プールからの 燃料取り出しに向けた取り組みについて —原子力学会秋の大会セッションから

2011

3/11	3/12	3/13	3/14	3/15
14:46 地震発生	15:36 1号機原子炉建屋 水素爆発		11:01 3号機原子炉建屋 水素爆発	6:14 4号機原子炉建屋 水素爆発
15:37 津波襲来				午前頃 2号機原子炉建屋 放射性物質 建屋外放出



1号機



2号機



3号機



4号機

東京電力ホールディングスは福島第一原子力発電所の廃炉に向けて、政府および協力企業と共に、使用済燃料プールからの燃料の取り出し(1～4号機)、原子炉圧力容器及び原子炉格納容器からの燃料デブリの取り出し(1～3号機)といった前例のない課題に取り組んでいる。本特集ではこれらの廃炉作業の中でもプールの中にある燃料取り出しに焦点をあて、全体計画のあらまし及び1, 3号機における具体的な取り組みについて紹介する。

(福島第一廃炉推進カンパニー・バイスプレジデント・高山拓治)

(1) 各号機 使用済燃料プールからの燃料取り出しに向けた全体計画

2011年3月11日に福島第一原子力発電所で事故が発生して以来、東京電力は廃炉に向けて政府及び協力企業と共に、原子炉や燃料プールの注水冷却、使用済燃料の取り出し、汚染水問題等に取り組んでいる。廃炉の主な項目は、使用済燃料プールからの燃料(以下、プール燃料)取り出し、燃料デブリの取り出し及び原子炉施設の解体である。本稿では各号機のプール燃料取り出し計画について紹介する。

東京電力ホールディングス 小林 靖, 末永 和也, 松岡 一平

KEYWORDS: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Decommissioning, Spent fuel pool, Spent fuel removal



図1 事故後の福島第一原子力発電所(2011年3月16日撮影)

I. プール燃料取り出し計画の概要

各号機のプール燃料取り出しは、まず原子炉建屋最上階(以下、オペフロ)に堆積してプール燃料取り出しに干渉するガレキを撤去して、オペフロの除染とオペフロへの遮へい体設置からなる線量低減を実施する。

その後、プール燃料を取り出すための架構・設備(以下、燃料取り出し用カバー等)を設置してプール燃料を取り出し、共用プールへ移送、保管する(図2)。

共用プールについては、空容量を確保するため共用プールに貯蔵中の使用済燃料を乾式キャスクに充填し、キャスク仮保管設備へ移送、保管する。

なお、震災前からキャスク保管建屋内の乾式キャスク9基に保管していた燃料については、震災後、9基の乾式キャスクの健全性を確認した上でキャスク仮保管設備へ移送、保管している(図3)。

Master Plan toward Spent Fuel Removal from the Spent Fuel Pools of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station : Yasushi Kobayashi, Kazuya Suenaga, Ippei Matsuoka.

(2017年11月29日 受理)

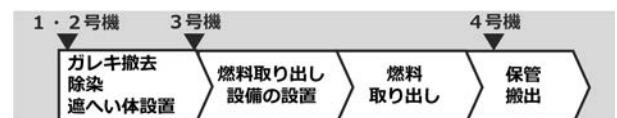


図2 プール燃料取り出しの手順

II. 1号機のプール燃料取り出し計画

1号機は水素爆発により原子炉建屋上部が損傷したため、放射性ダスト飛散の抑制を目的とした建屋カバーを、2011年10月に設置した。その後、原子炉安定冷却等により放射性ダストの放出量が大幅に低減した為、2015年5月に建屋カバー屋根・壁パネル取り外しに着手し、2016年11月に完了した。その後、オペレーティングフロアに堆積した瓦礫を撤去して、燃料取り出し用カバー等を設置する(図4)。

III. 2号機のプール燃料取り出し計画

2号機は、水素爆発は発生しておらず原子炉建屋は健全だが、炉心が損傷してオペフロ内が高線量である。現

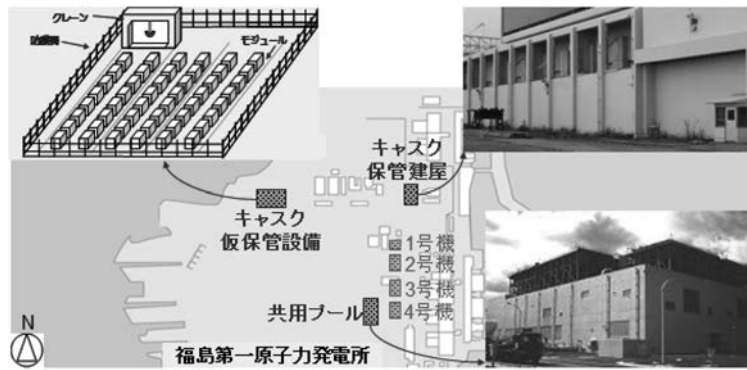


図3 プール燃料の保管先

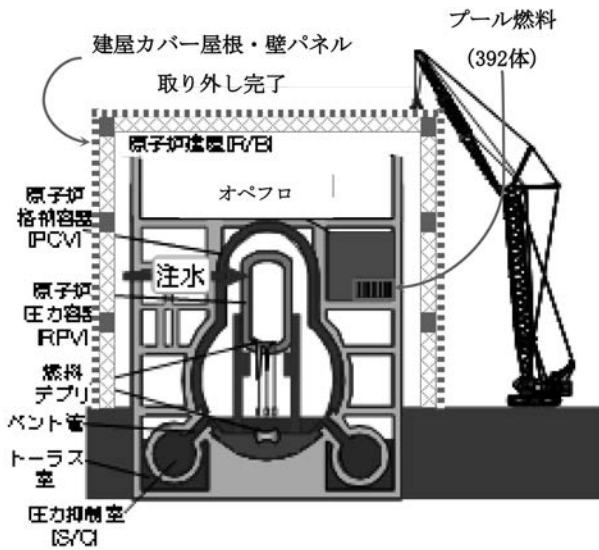


図4 1号原子炉建屋の現状

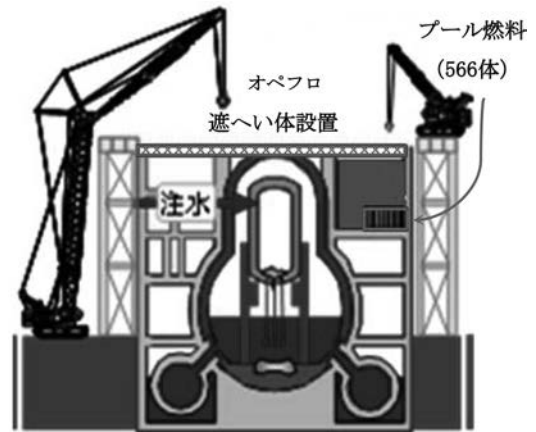


図6 3号機原子炉建屋の現状

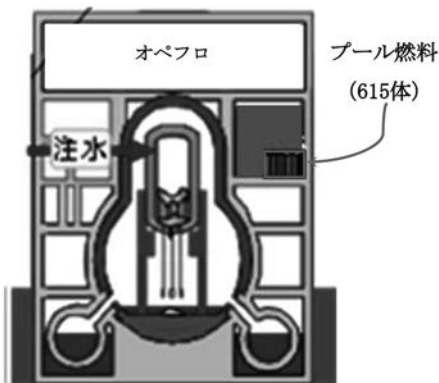


図5 2号機原子炉建屋の現状

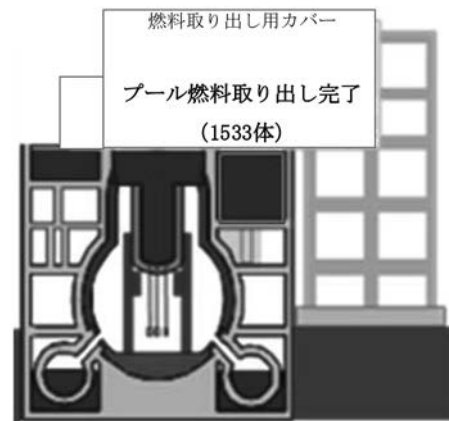


図7 4号機原子炉建屋の現状

在は、原子炉建屋西側敷地の整備を実施している。

敷地整備後、建屋上部を解体して、燃料取り出し用カバー等を設置する(図5)。

IV. 3号機のプール燃料取り出し計画

3号機は、1号機と同様、水素爆発により原子炉建屋上部が損傷し、オペフロに堆積した大型瓦礫の撤去に2011年9月に着手、2013年11月に完了した。その後、線量

低減を目的に除染および遮へい体設置を実施、線量低減と並行して、使用済燃料プール内大型瓦礫撤去を実施した。プール内大型瓦礫撤去は2015年12月に完了、除染は2016年6月に完了、現在は遮へい体設置を実施している。

遮へい体設置後、燃料取り出し用カバー等を設置する(図6)。

V. 4号機のプール燃料取り出し計画

4号機は、水素爆発により原子炉建屋が損傷したが、

他号機と比較して、オペフロ線量が低かったため、プール燃料取り出しを2013年11月から先行実施した。

プール燃料取り出しは2014年12月完了し、大きな実績となった(図7)。

著者紹介

小林 靖 (こばやし・やすし)

東京電力ホールディングス

福島第一廃炉推進カンパニープロジェクト計画部

土木・建築設備グループ

末永和也 (すえなが・かずや)

東京電力ホールディングス

福島第一廃炉推進カンパニープロジェクト計画部

土木・建築設備グループ

松岡一平 (まつおか・いっぺい)

東京電力ホールディングス

福島第一廃炉推進カンパニープロジェクト計画部

土木・建築設備グループ

(2) 3号機 オペフロ大型ガレキ撤去, 除染, 遮へい体設置

3号機におけるプール燃料取り出し計画の最初の取り組みは、崩落したトラス鉄骨やコンクリート片などの汚染瓦礫の解体撤去と、著しく汚染した床表面の除染および床上への遮へい体設置などの準備工事であった。解体撤去に当たっては遠隔操作機器の開発を進める一方で、詳細な調査結果に基づいた瓦礫取出の計画と挙動シミュレーションを繰り返し、切断・つかみ位置の詳細な手順および監視方法を検討した。除染・遮へいの計画は崩落瓦礫下のオペフロ状況を推測し、適切な除染方法の選定及び遮へい体の許容荷重の評価を行った上で、いずれも遠隔操作による除染計画、遮へい体設置計画を立案し機器開発を行った。現在、燃料交換機を含むオペフロ上瓦礫撤去と除染作業を終え、遮へい体の設置工事を実施中である。本稿では計画の概要と高線量下で実施したこれまでの取り組みを紹介する。

鹿島建設 井上 隆司 東芝 林 弘忠, 西岡 信博

I. 瓦礫撤去

1. 崩落瓦礫撤去計画

水素爆発で損傷した3号機建屋は、図1に示す通り、オペフロから上部の躯体が崩落し不安定な状態で残っていた。撤去計画はクレーン吊りカメラで崩落状況・接合状況を確認する調査から始めた。撮影画像を3D点群データに変換し、設計図と照合して部材データに置き換え、3Dモデルを作成し、接合部の状態を確認・評価して挙動解析用データを作成した。

作成した3Dモデルを使用してクレーンとアタッチメントの性能を条件に、撤去ブロックを設定し切断手順を検討した。切断時の挙動は作業ステップ毎にシミュレーションし(図2)、全体影響が最小と考えられる手順を選択した。撤去の実施に当たってはシミュレーションとの差異がない事を確認するため、挙動監視ポイントを設定

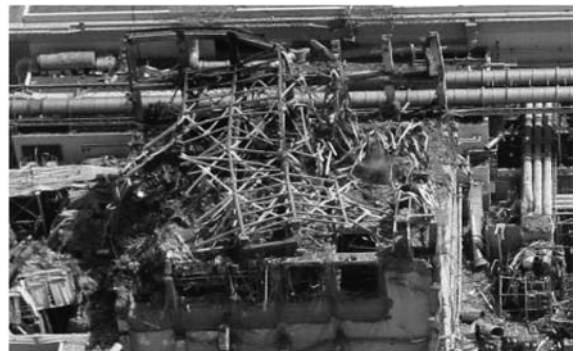


図1 3号機外観(事故当時)

し、常時監視しながら一つ一つ丁寧に切断撤去を行った。

2. 遠隔撤去ツール

解体作業は建屋の西・南に600tクローラークレーンを配置し、図3に示す解体・撤去ツールを使用して実施した。東側の柱は周囲に架設した構台に解体重機を載せて解体した。全ての重機は遠隔化仕様に改造を施し、作業は免震重要棟のリモート室から行った。

3. 燃料交換機の撤去

使用済燃料プール内に落下した燃料交換機について

Rubble removal work, Decontamination and Shield installation on the Reactor Building Refueling Floor of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3: Takashi Inoue, Hirokata Hayashi, Nobuhiro Nishioka.

(2017年11月29日 受理)

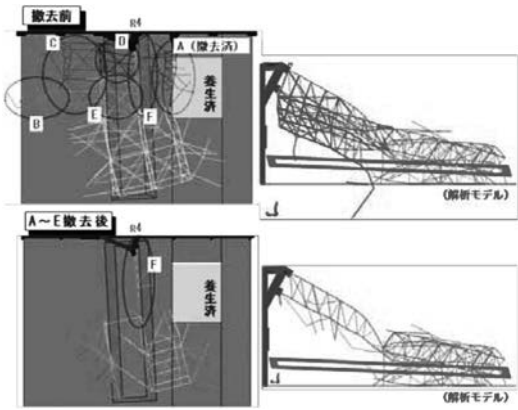


図2 屋根トラス解体シミュレーション



図3 遠隔撤去ツール

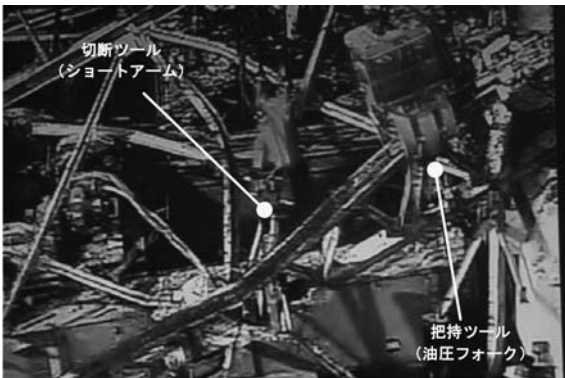


図4 トラス把持切断状況(リモート室画像)



図5 燃料交換機吊上げ状況

は、プール内にカメラを挿入し燃料交換機部材の変形状態および部品位置の調査を行った。その後、確認した映像を基に設計図と照合して3Dモデルを作成した。

燃料交換機の撤去方針は一括案、分割案、細断案が考えられた。そこで、落下時の燃料への影響や吊上げ時の燃料交換機の変形といったリスク評価を行い、更に、撤去ツールの実現性、吊上げ時の燃料交換機とプール設備の干渉等のシミュレーションを行い、リスクと実現性の観点から分割案を採用した。

施工にあたっては、燃料交換機の梁モデルを作成し、実際の状態に合わせて梁モデルを変形させ、強度解析を行い、損傷状態を把握した。さらに、強度解析結果を基に、撤去手順を作成し、損傷した燃料交換機専用の取扱ツールを製作した。

このような綿密な事前準備を行い、燃料交換機を撤去した。

II. 線量低減

1. 線量低減検討

クローラクレーンによる線量測定の結果、オペフロの空間線量は原子炉ウェル直上(756mSv/h-オペフロ+700mm, 2012年5月15日測定)を中心に極めて高い値を示した。使用済燃料取出し及び燃料取出し用架構の構築には近傍での有人作業が不可避であることから、除染・遮へいの組合せによる線量低減策を講じる必要があった。

工程の制約上、線量低減計画は瓦礫撤去の計画と並行して検討する必要があった為、十分に映像確認ができない範囲については損傷状況等を推定して計画を進めた。

2. 除染計画

除染は、大きくオペフロが損傷した北西部分とD/Sピットを除く範囲を対象とし、床損傷状況と表層の材質を条件として検討した。



600mm以上のスラブ厚さがあり躯体が健全であると推定されるウエルカバー上部(Aエリア)、及びプール東と南の範囲(Dエリア)はスカブラー、ステンレス仕上げのキャスク洗浄場所(Cエリア)には化学(泡)除染、床損傷が推定される範囲(Bエリア)にはウォータージェットを採用する方針とした。いずれの機器も解体ツール同様遠隔化施工前提で開発、作業を実施した。

3. 遮へい計画

遮へい計画はオペフロ除染後の線量予測と躯体の許容耐力を勘案して検討した。原子炉・プール周辺等、許容荷重が大きい範囲(A, D, E工区)は、要求遮へい性能を

	(1)t≧600スラブ	(2)t=300スラブ	(3)キャスク洗浄 エリア	(4)特殊部
想定状況				
汚染形態	浸透 (エポキシは保護と想定)	浸透	表層	表層
材質	RC+エポキシ	RC+エポキシ	ステンレス	狭隙部・凸凹部
面積	440㎡	260㎡	70㎡	72㎡
除染方法	スキャブラー	ウォータージェット	化学(泡)除染	ウォータージェット +専用パーツ
選定理由	・ほつり能力が最も大きい ・処理速度が最も早い	・床面にひび割れや多少の 凸凹があってもはつる事が 可能	・構内の実測異物試験にて 金属材料に対して特に有効 性が確認された為	・狭隙部および凸凹部の 構造に応じた専用パーツを 準備する事が望ましい
期待効果	・文庫より表面から5mmで 放射線は1/100程度となる	・文庫より表面から5mmで 放射線は1/100程度となる (電氣部については不明)	・上記除染試験では1回の除 染で1/10以下に低減	・適切なツールを用意すべ ば狭隙部や凸凹部の異物排 出しが可能な見込み
装置写真				
対応 エリア	A・Dエリア	Bエリア	Cエリア	ワエルカバー座間 レール・溝部

図6 エリア別除染機器と稼働状況

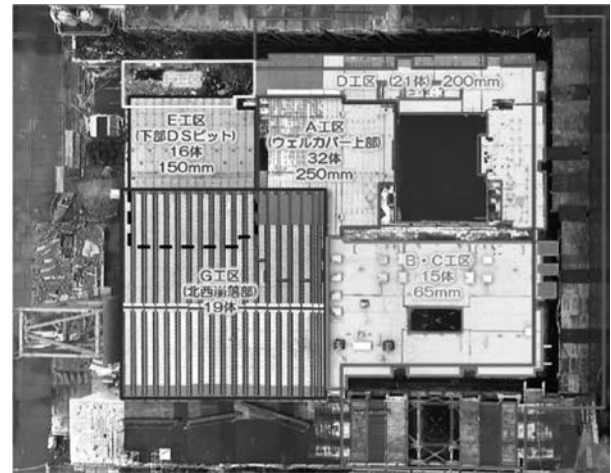


図7 遮へい体配置・設置状況(2016年9月20日現在)

満たすよう鋼製150～250mm、許容荷重制限のある範囲(B, C工区)では鋼製65mmの遮へい体を使用した(図7)。

遮へい体は全て遠隔化施工での設置が必要なため、遮へい体の設置に先立って、設置位置に呼び込むガイドフレームを計画した。ガイドフレームは既存躯体の外壁、開口や突出部をガイドに設置した。なお、遮へい体設置後には地震時の脱落防止のためのカバープレートで固定する事となる。また、その後の線量調査や線量シミュレーションの結果、当初計画に加え、崩落部(F, G工区)、構台間隙間をカバーする遮へい体も計画している。

著者紹介

井上隆司 (いのうえ・たかし)

鹿島建設 東京建築支店 電力関連事業部

林 弘忠 (はやし・ひろただ)

東芝 原子力化学システム設計部
化学システム設計第四担当

西岡信博 (にしおか・のぶひろ)

東芝 原子力機械システム設計部
機械システム設計第二担当

(3) 3号機 有人作業エリアの線量率評価

使用済燃料取扱設備設置時及び運用時にオペフロ上において有人作業が計画されている。予め有人作業の可否を確認するためにオペフロ上へ「(2)3号機 オペフロ大型ガレキ撤去、除染、遮へい体設置」にて設計された遮蔽体を設置した後の線量率を評価する必要がある。そこで、クローラクレーンを使用した遠隔での線量測定を実施し、線量測定値から放射能濃度を推定する手法を開発し、得られた放射能濃度を用いて遮蔽体設置後の有人作業エリアにおける線量率を遮蔽体構造を三次元で精緻にモデル化して評価しており、その過程を紹介する。

東芝 白井 啓介, 松下 郁, 黒澤 正彦ほか

I. 概要

福島第一原子力発電所3号機の使用済燃料プール(以下、SFP)からの燃料取出しに向けて、原子炉建屋オペレーティングフロア(以下、オペフロ)上において有人作業が計画されている。有人作業を行うに当たり、主要な

Dose evaluation of working area on the Reactor Building Refueling Floor of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3: Keisuke Shirai, Kaoru Matsushita, Masahiko Kurosawa, Naoki Mukaida.

(2017年11月29日 受理)

作業エリアであるFHM ガーダ上(以下、有人作業エリア)における線量率を1.0mSv/h以下とすることで必要な作業時間を確保する。そこで、遮蔽解析コードを用いてオペフロ上へ遮蔽体を設置した後の有人作業エリアにおける線量率の評価を行い、現状の計画によるFHM ガーダ上における有人作業の可否を確認した。

II. 線量測定と放射能濃度設定

遮蔽体設置後の有人作業エリアの線量率を評価するためには①放射能濃度、②遮蔽体形状、③評価点位置等が

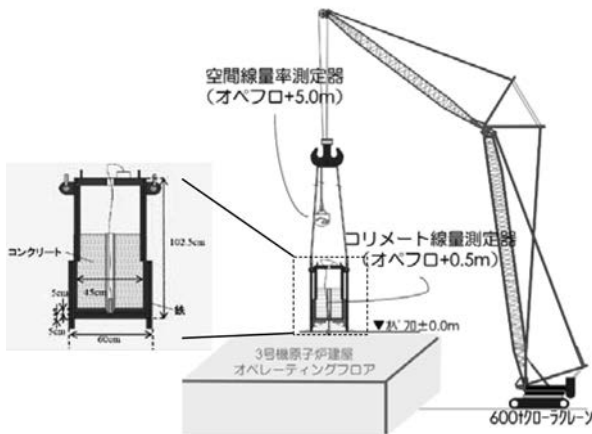


図1 線量測定イメージと使用したコロメータ

必要となる。②は「(2)3号機 オベフロ大型ガレキ撤去、除染、遮へい体設置」で述べられている遮蔽計画により策定されている。③は別途検討されている燃料取り出し計画を基に設定する(3(2)参照)。①の放射能濃度そのものを実測することは困難なため、何らかの手段で算出する必要があった。そこで、遠隔操作で線量測定を行い、測定された線量率からオベフロ床面高さに平面状に仮定した放射能濃度を算出する方法をとった。

1. 線量測定

オベフロ上の空間線量が非常に高く作業員が接近して線量測定を直接行うことができないため、線量測定は図1に示すようにクローラクレーンにより無線式GM管式線量計を内包したコロメータを遠隔操作して実施した。測定位置の再現性及び作業時間を考慮して、オベフロを約4m×4m幅で130分割(以下、ターゲットエリア)し、それぞれの中心でオベフロから50cm高さを測定点とした。既存のコリメータの側面に鉄製の遮蔽体を追加し、約4m×4mのターゲットエリア外からの寄与を除外し、ターゲットエリアからの検出効率が0.99となるようにコロメータを設計した。

2. 放射能濃度設定

図2に線量測定値から放射能濃度への算出フローを示す。特定の幾何形状であれば放射能濃度と線量率は比例関係にあるので、コロメータ内での線量測定値と線源距離との関係性をモンテカルロ法解析コード(MCNP5ver1.6)¹⁾で事前に評価しておくことで測定された線量率からターゲットエリアの放射能濃度を逆算できる。この際、ターゲットエリア外からコロメータ内への線量寄与を上記関係性を用いて除外することで、ターゲットエリアからの寄与のみを評価することで放射能濃度を算出した。なお、評価対象核種は線量測定を行った2016/3時点での減衰を考慮してCs-137(Ba-137m)とCs-134の比率が1:0.21となるように設定した。設定した放射能濃度の妥当性を確認するために、コロメータでの線量測定と同時にオベフロから5m上空の空間線量率

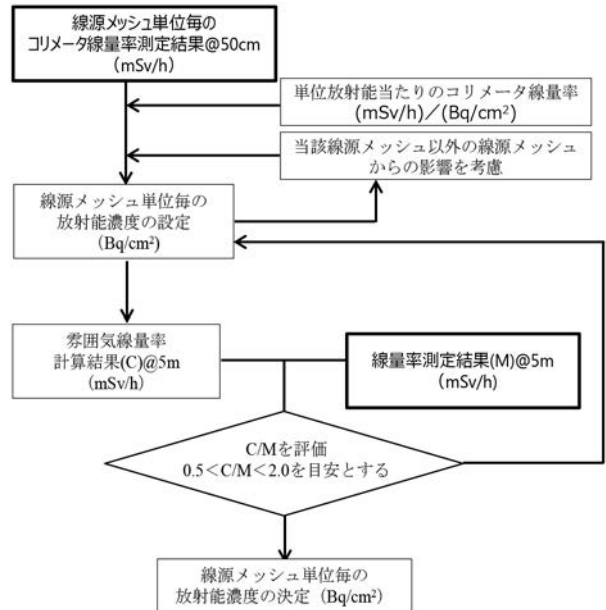


図2 放射能濃度算出フロー

を予め測定しており、算出した放射能濃度を用いて空間線量率を算出し、線量測定値との比較を行った。計算値(C)と測定値(M)の比(C/M)が $0.5 < C/M < 2.0$ であることを目安として、この後の線量率評価に用いる放射能濃度として妥当であると判断した。図3に設定したCs-137の放射能濃度を示す。原子炉ウエル上は除染作業により線源の除去を図ったが、依然として高濃度の汚染が残存している結果となった。これは、「(4)3号機オベフロにおけるγ線スペクトル評価及び線量測定結果」においてオベフロ表面の汚染だけでなく、ウエルプラグ内部の汚染の可能性が指摘されていることから、ウエルプラグ内の汚染源からの線量をコロメータによる線量測定時に計測することで高濃度となっている可能性も考えられる。また、D/Sピット周囲や原子炉ウエルの北西部にも高濃度の汚染が残存している結果となっている。D/Sピット周囲は、早い段階でD/Sピットを塞ぐ

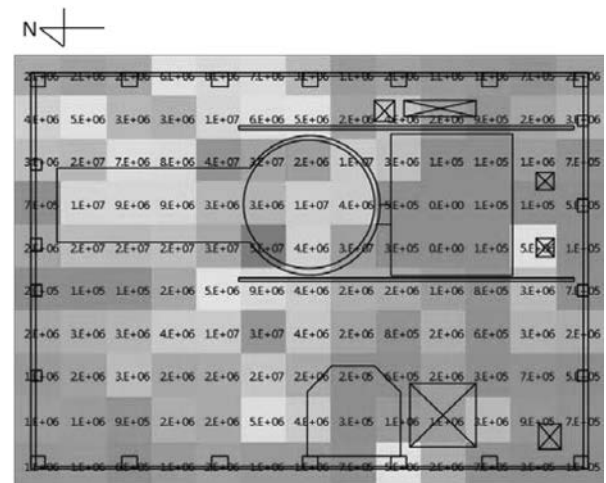


図3 設定した放射能濃度 (図中の数値はCs-137の濃度(Bq/cm²)を示す。)

形で遮蔽体を設置しているため、D/Sピット内及び周囲の汚染源を除去しきれていない。原子炉ウエルの北西部はオペフロの床が崩落しており、高濃度の汚染が確認されているにもかかわらず、残存している瓦礫の撤去が困難であった。

また、原子炉建屋とタービン建屋間の屋上に堆積した瓦礫、原子炉建屋北西の崩落部及び大物搬入口内壁等オペフロ以外にも有人作業エリアの線量率へ寄与する線源（以下、オペフロ外線源）がある。このオペフロ外線源も同様に線量測定値を基に放射能濃度を設定し有人作業エリアへの線量寄与を評価した。評価対象としたオペフロ外線源の例を図4に示す。

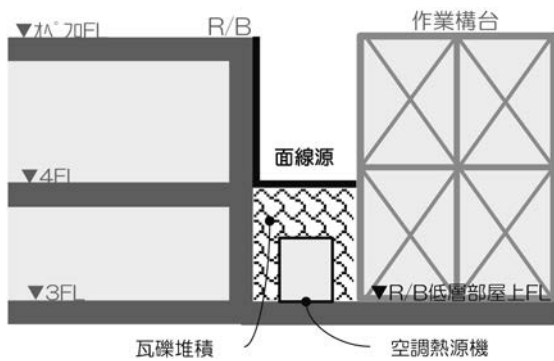


図4 評価対象としたオペフロ外線源

III. 線量率評価

1. 評価モデル

有人作業エリアの線量率は遮蔽解析コードである点減衰核積分法コード(QAD-CGGP2R)²⁾を使用して評価した。遮蔽体としては当初計画として、原子炉ウエル、D/Sピット及びSFP周囲は遮蔽体の荷重に耐えられるため150~250mm厚の鋼製の遮蔽体、SFPの西側は躯体が損傷しており許容荷重に制限があるため65mm厚の鋼製の遮蔽体が設計された。当初計画された大型遮蔽体に加えて、オペフロ外線源からの線量寄与を低減するためにオペフロ-構台間の隙間を塞ぐ鋼製の遮蔽体や原子炉ウエルの北西部及び北東部のオペフロの躯体が崩落している箇所を遮蔽する48mm厚の鉛製の遮蔽体も計画された。線量率評価モデルとしてはそれらの遮蔽体に加え、FHMガードストップやガード床チェッカープレートのようなFHMガードを構成する構造材も詳細にモデル化した。図5に線量評価モデル(オペフロ上)を示す。

オペフロ上の線源は前述のとおり平面状にモデル化して線量率の評価を行ったが、オペフロ外線源は、堆積した瓦礫であれば体積状の線源として、壁に付着していると想定される線源であれば壁表面に平面状の線源として、個々の線源に合わせた形状で線源形状をモデル化して線量率を評価した。

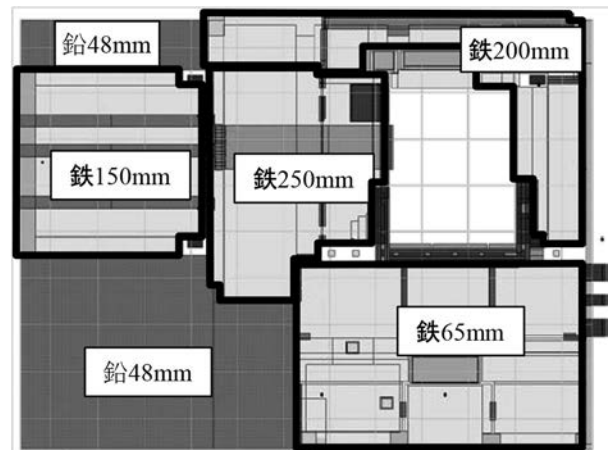


図5 線量率評価モデル(オペフロ上)

2. 評価点

オペフロから約6m高さにFHMガード床チェッカープレート(以下、作業床)が設置され、作業床上においての有人作業が計画されている。そこで、作業床上での作業員の被ばくを考慮して評価点はオペフロから7m高さとした。また、FHMガード上での主な有人作業が計画されている代表的な箇所を評価点として18箇所を選定した。図6に示す評価点位置は燃料取り出しを行うSFPとの位置関係がわかりやすいように、7m高さにある評価点をオペフロ上に表示している。図7に評価点の

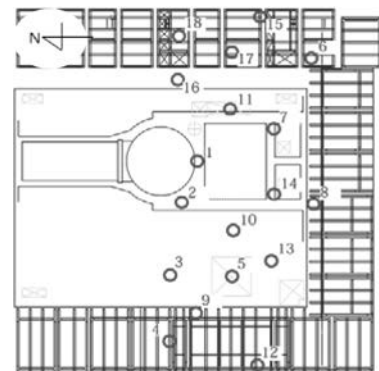


図6 線量率評価点(オペフロから7m高さ)

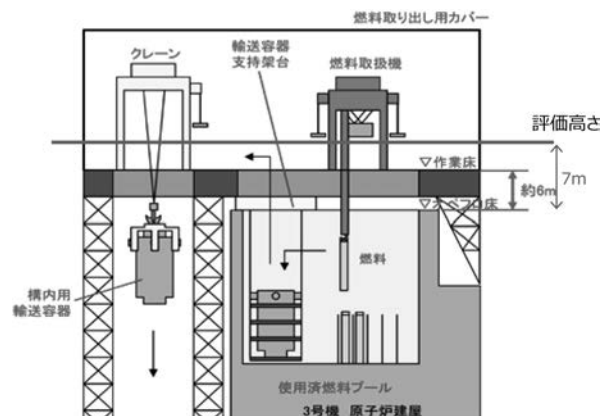


図7 線量率評価点高さのイメージ

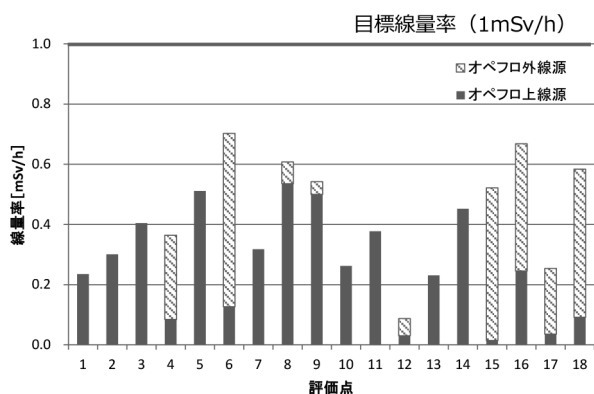


図8 線量率評価結果

高さのイメージ図を示す。SFP 上部は、FHM による SFP 内へのアクセスルートであり、燃料を取り出した後の構内用輸送容器の輸送ルートとなるため、作業員がアクセスすることはなく、評価点を設定していない。

3. 評価結果

オペフロ上に設定した線源からの線量率及びオペフロ外線源からの線量率を合計した数値を各評価点における線量率とした(図8)。図8に示す通り、FHM ガーダ上の代表作業箇所における線量率は、18点すべての評価点において有人作業エリアの目標線量である1.0mSv/hを下回った。

評価点6、15、16、17、18(図6中の上部位置参照)のように東側の構台上に位置する評価点では、原子炉建屋とタービン建屋間の空調機室屋上に堆積した瓦礫からの寄与が大きい。また、評価点4、9、12のように西側の構台上に位置する評価点では、原子炉ウェル北西のオペフロの躯体が崩落している位置の瓦礫や大物搬入口内の壁に付着した線源からの寄与が大きい。これらのオペフロ外線源に対する線量低減のため設置するオペフロ-構台間遮蔽体を追加した結果として1.0mSv/hを下回る結果が得られた。

IV. 終わりに

SFP からの燃料取り出し作業における代表作業箇所においては、本評価結果から現在の計画通り遮蔽体及びFHM ガーダを設置することで有人作業が可能となる見込みがたつた。ただし、遮蔽体やFHM ガーダ施工は大半の作業が遠隔操作にて実施されるが、メンテナンス等で一部有人作業が必要となる。遮蔽体やFHM ガーダ設置途中では本評価より高い線量となることが想定されるため、作業内容ごとに仮設の遮蔽体による一時的な雰囲気線量の低減又は一人あたりの作業時間を制限することで被ばく線量の低減を図っていく必要がある。

— 参考文献 —

- 1) X-5 Monte Carlo Team, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987, (Revised 2/1/2008).
- 2) Y. Sakamoto and S. Tanaka, QAD-CGGP2 and G33-GP2 : Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP Code with Conversion Factors from Exposure to Ambient and Maximum Dose Equivalents, JAERI-M 90-110, (1990).

著者紹介

白井啓介 (しらい・けいすけ)

東芝 エネルギーシステムソリューション社
原子力安全システム設計部

松下 郁 (まつした・かおる)

東芝 エネルギーシステムソリューション社
原子力安全システム設計部

黒澤正彦 (くろさわ・まさひこ)

東芝 エネルギーシステムソリューション社
原子力安全システム設計部

向田直樹 (むかいだ・なおき)

東京電力ホールディングス
福島第一廃炉推進カンパニープロジェクト計画部
放射線・環境グループ

(4) 3号機 オペフロにおける γ 線スペクトル評価及び線量測定結果

福島第一原子力発電所3号機の使用済燃料プールからの燃料取り出しに向けて、原子炉建屋オペレーティングフロア(以下「オペフロ」)は、100mSv/h以上の高線量の放射線環境であるため、オペフロ上の作業の実施には被ばく低減対策が不可欠である。オペフロにおける作業環境線量の低減手法は、除染や遮へいが考えられるが、より有効な線量低減対策を講じるためには、方向依存性と γ 線エネルギー分布の測定により現状を把握することが重要である。本稿では当該測定方法及び結果について紹介する。

東京電力ホールディングス 向田 直樹, 林 宏二, 金濱 秀昭
千代田テクノロ 鈴木 敏和

KEYWORDS: *photon energy spectrum, CdZnTe spectrometer, directional dose, dose rate monitor, Fukushima daiichi nuclear power station, unit3 reactor*

I. 目的

1. γ 線スペクトル測定

線源の種類や散乱線の寄与の状況を把握した上で有効な線量低減対策を検討するために、以下の事項について γ 線スペクトル測定で検証する。

①核種の定性

オペフロの主要核種は、Cs-134, Cs-137と想定しているが、Co-60等の他核種からの線量寄与を明らかにする。

②線源位置の推定

線量寄与の主成分がオペフロ表面か建屋内部であるかを、 γ 線スペクトル形状で推定し、更なるオペフロ表面除染の必要性を検証する。

③遮へい効果の確認

オペフロに設置した遮へい体の有無による γ 線スペクトル形状の違いから、遮へい効果を確認する。

2. 6方位線量測定

上下方向、水平方向からの線量を測定して方向依存性を把握した上で、線源方向への追加遮へい(有人作業エリアの衝立遮へい等)の必要性を確認する。

3. 地上面の線量測定

オペフロ上の線量が地上面の線量にどの程度影響を与えているかを確認するため、構内に設置している線量率モニタでオペフロ上の遮へい設置前後の推移を確認する。

II. 測定方法

1. γ 線スペクトル測定

γ 線スペクトル測定として、冷却不要で小型のCdZnTe半導体検出器を用いた。校正場のCs-137線源照射で300mSv/hまで γ 線スペクトルが崩れず、かつ感度が確保できる寸法の鉛コリメータを用意し、その中にCdZnTe半導体検出器、バッテリー、スティックPCを収納した。この鉛遮へい体を架台に固定し、クローラークレーンで吊り上げてオペフロから約50cm高さで、合計24箇所の γ 線スペクトル測定を実施した。

2. 6方位線量測定

オペフロ上の方向性線量を把握するために、立方体のアクリルファントム(30cm×30cm×30cm)の6面に個人線量計を固定して、上下方向、水平方向の線量を同時に測定した(138箇所)。遮へい体上から約120cm高さで測定することで、オペフロ上の有人作業の被ばく線量(Hp10)を確認できるようにした。方向依存性は、最大値を示す方向をベクトルマップに示した。

3. 地上面の線量測定

構内に設置した線量率モニタのうち3号機周辺にある5箇所の線量率モニタにより、オペフロ上の遮へい設置前後の推移を確認した。

III. 測定結果

1. γ 線スペクトル測定(図1参照)

①核種の定性

オペフロ上のいずれの測定箇所においても、Cs-134とCs-137以外の光電ピークは確認されなかった。

Gamma-ray Spectra and Dose Measurement Results on the Reactor Building Refueling Floor of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3: Mukaida Naoki, Hayashi Koji, Hideaki Kanehama, Toshikazu Suzuki.

(2017年11月29日受理)

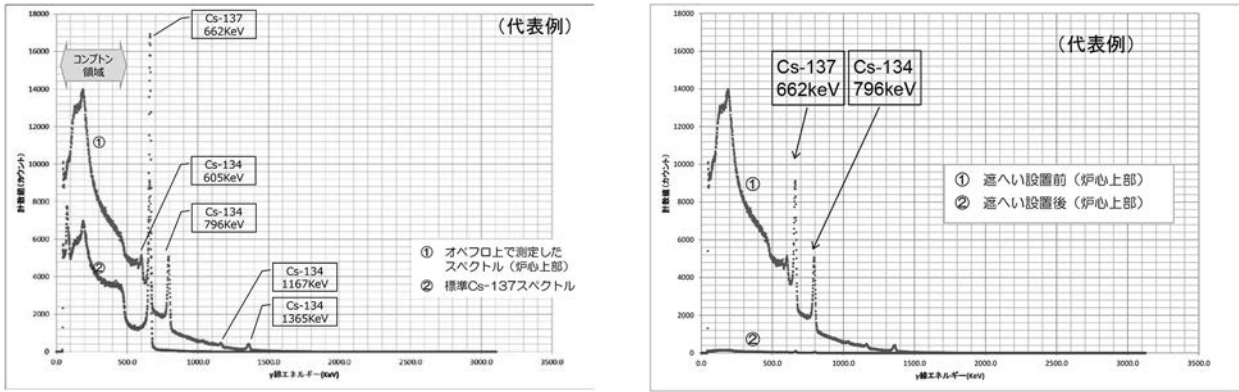


図1 γ線スペクトル測定結果
 (左図)γ線スペクトル測定結果(赤線は校正場で照射した標準Cs-137スペクトル)[2015.10.20測定]
 (右図)原子炉ウエル上部における遮へい前後のγ線スペクトル測定結果[2015.10.20, 2016.5.31測定]

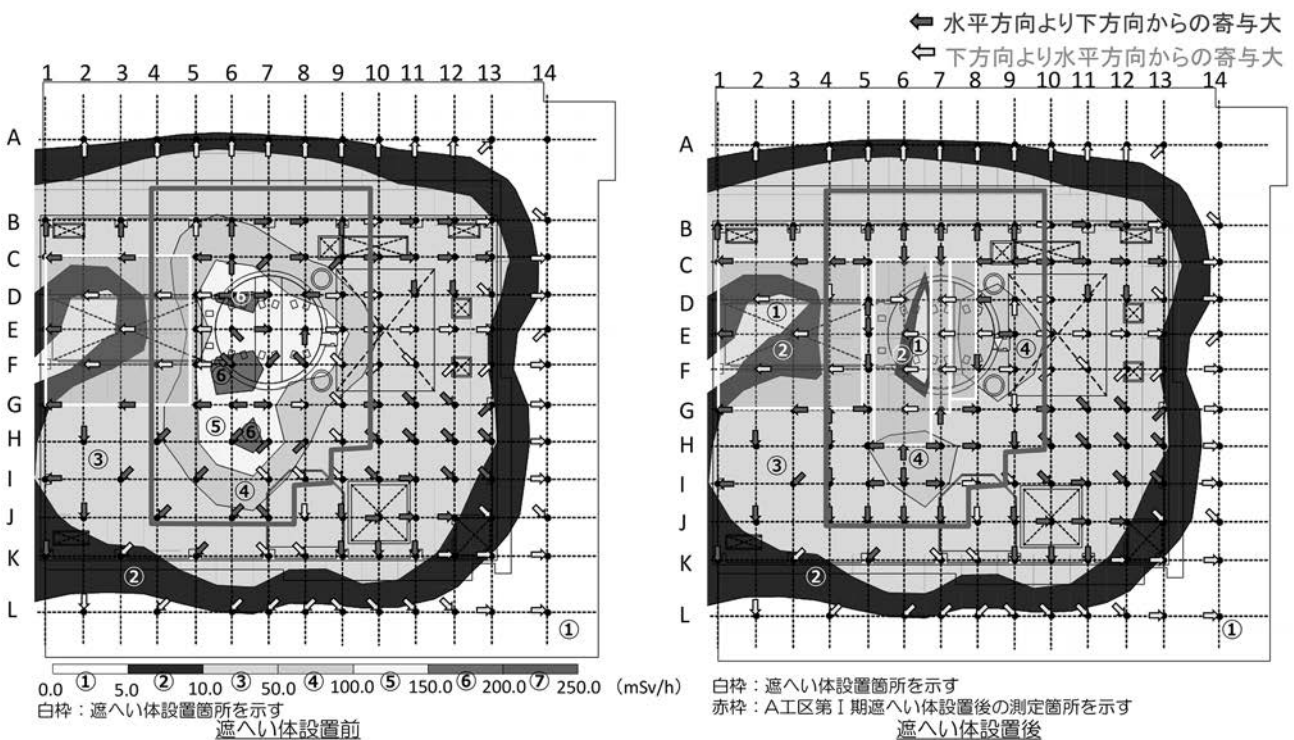


図2 遮へい前後の線量分布と方向依存性
 [左図 2016.3.24~29測定, 右図 2016.4.25~26測定]

Co-60等の他核種からの線量寄与を考慮する必要がないことを確認した。

②線源位置の推定

校正場でCs-137線源を照射した場合は、Cs-137の光電ピークの方がコンプトン領域よりも高く、散乱線成分よりも直接線の寄与が大きい結果が得られた。一方、オペフロ上のスペクトルはこれとは異なり、Cs-137の光電ピークの高さはコンプトン領域より低く、散乱線成分が多いことが分かった。この結果から、オペフロ表面に線源が残っているというよりも、散乱線の大きくなるような領域(表面ではない場所)に線源があると推定し、今後は除染よりも遮へいに移行する段階にあることを確認

した。

③遮へい効果の確認

遮へい体を設置した箇所は、寄与割合の大きい散乱線が大幅に低減していることを確認した。

2. 6方位線量測定(図2参照)

①水平方向からの線量寄与

オペフロ上の線量率最大値の箇所(原子炉ウエル上)は、A工区遮へい後 222 → 5mSv/h に低減した。

②方向依存性

A工区遮へい後は下方方向からの線量寄与が低減したため、遮へい体上の測定点は、下方方向から水平方向の寄与に変化した。

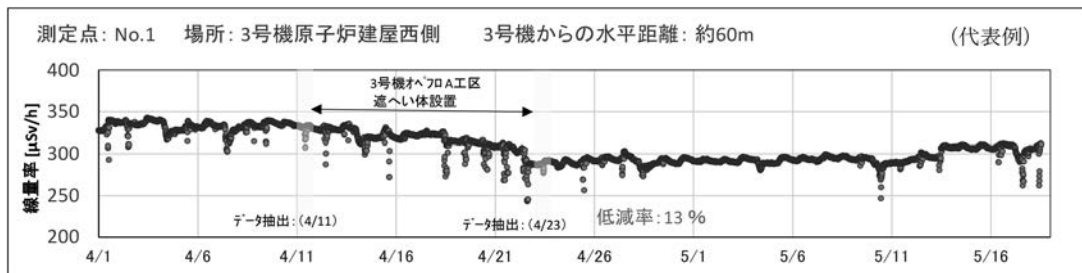


図3 線量率モニタの遮へい前後の推移

他の工区の遮へい設置後も本測定を行い、線量の方向依存性を確認する。

3. 地上面の線量測定(図3参照)

3号機周辺に設置した5箇所の線量率モニタの値(地表から約1m高さ)は、いずれもA工区に遮へい体を設置した前後で10%程度低減した。オペフロの遮へい設置により散乱線の寄与(主にスカイシャイン線)が低減したことによるものと考えられる。

他の工区の遮へい設置後も地上面の線量の推移を引き続き確認する。

著者紹介

向田直樹 (むかいだ・なおき)

東京電力ホールディングス
福島第一廃炉推進カンパニープロジェクト計画部
放射線・環境グループ

林 宏二 (はやし・こうじ)

東京電力ホールディングス
福島第一廃炉推進カンパニープロジェクト計画部
放射線・環境グループ

金濱秀昭 (かねはま・ひであき)

東京電力ホールディングス
福島第一廃炉推進カンパニー福島第一原子力発電所
放射線防護部 作業環境改善グループ

鈴木敏和 (すずき・としかず)

千代田テクノル
営業統括本部 技術アドバイザー

(5) 3号機 カバーの設計および施工計画

使用済みプール燃料を安全に取り出すために、損傷した建屋上部に燃料取り出し用施設(カバー)を構築する予定である。カバーは、燃料取扱設備の走行性、耐震耐風安全性を確保すると共に作業時の汚染ダスト飛散抑制に配慮した設計がなされている。また、除染遮へい後も少なからず高線量下での構築作業となるため、作業員の被ばく低減に向けた様々な工夫を組み込んでいる。これらの技術的概要について紹介する。

鹿島建設 松尾 一平, 小川 喜平, 岡田 伸哉, 加藤 和弘

I. カバーの設計

1. カバー設置の目的

図1に燃料取り出し用カバーの外観イメージを示す。燃料取り出し用カバーを設置し、その内部で燃料取扱設備と門型クレーンが走行し、雨風にさらされない良好な作業環境下で使用済み燃料プール内の使用済み燃料貯蔵ラックから燃料を取り出し、キャスクに詰めて原子炉建屋か

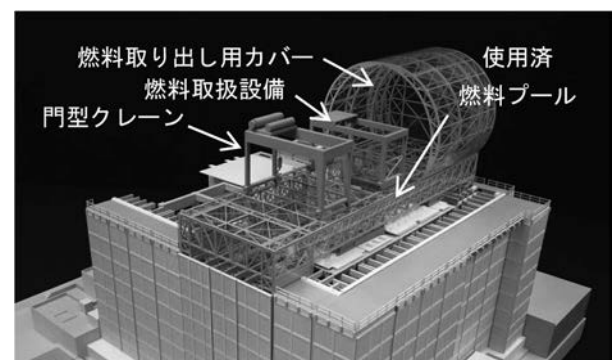


図1 外観イメージ

Design and Construction plan of Spent Fuel Removal Structure for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3: Ippei Matsuo, Kihei Ogawa, Shinya Okada, Kazuhiro Kato.

(2017年11月29日 受理)

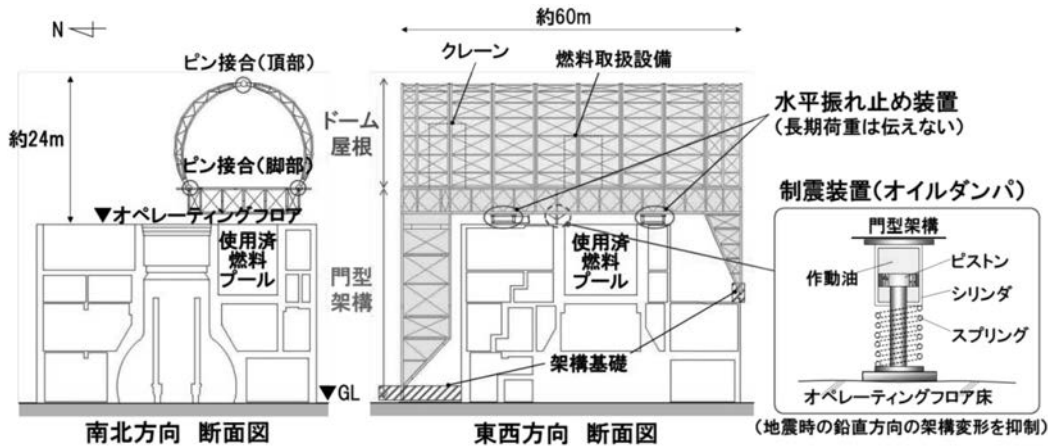


図2 構造概要



図3 ドーム屋根鉄骨の組立手順

ら搬出する。

2. 要求された機能と設計方針

燃料取り出し用カバーは、燃料取扱設備の支持、作業環境の整備及び放射性物質の飛散・拡散防止ができる機能が要求される。具体的な設計方針を以下に示す。

- 燃料取り出し作業環境の整備
風雨を遮る設計とする。
- 放射性物質の飛散・拡散防止
内部に除去フィルタ付き換気設備を設け、作業時の放射性物質の大气放出を抑制する設計とする。
- 燃料取扱設備・門型クレーンの支持
燃料取扱設備および門型クレーンが安定走行できる設計とする。
- 耐震性・耐風性
基準地震動 S_s が発生しても倒壊せず原子炉建屋や使用済み燃料プールに波及的影響を及ぼさない設計とする。また、基準風速 30m/s に相当する強風にも耐える設計とする。

3. 構造概要

燃料取り出し用カバーは燃料取扱設備を支持する架構で、構造は鉄骨トラス構造である。図2に示すように損傷した建屋に荷重をかけないように、幅約 19m、スパン約 57m、地盤面から高さ約 54m の陸橋状の大スパン門型架構としている。燃料取扱設備が走行するガーダ架構上部は、風雨を遮り放射性物質の大气への放出を抑制するための軽量のドーム状屋根で覆う構造である。

燃料取り出し用カバーの重量は全て、爆発による損傷をほとんど受けていない原子炉建屋 1 階と 3 階の下屋部分に支持させる。また、損傷を受けた原子炉建屋 5 階床には、比較的損傷の少ない部位を選び地震時や燃料取扱設備走行時の水平振れ止め装置(ストッパ)と鉛直振れ止め用の制震装置(オイルダンパ)を取付け、耐震性と機能性の向上を図っている。

II. 施工計画

1. 計画概要

高線量下の現地における作業員の被ばく低減を最優先に考え、サイト外で予め可能な限り大型ユニットに分割組み立てし、海上輸送により現地へ搬入し、遠隔操作による 600ton 級の大型クレーン 2 機を用いて最終組み立てする計画である。以下に具体的な計画について述べる。

a. 門型架構脚部の鉄骨組立

まず、門型架構の東・西脚部の大型ユニットを一気に建て込む。基礎にはアンカー工事による被ばくを避けるため置き基礎を採用し、プレファブ工法を用いて施工する。

b. 門型架構のガーダ鉄骨組立

燃料取扱設備が走行するガーダ架構は、両サイドに高さ 4.4m × 幅 2.0m のメイントラスを配し、その間をサブトラスが繋ぐ構造である。2 台のオイルダンパを含め総重量は約 680t である。ガーダ鉄骨は大型



図4 鉄骨ユニットのサイト外仮置き状況

クレーンの能力範囲内で可能な限り大きく分割し(最大75t)、2列のメイントラスを5ユニット、サブトラスも5ユニットに分けて組み立てる。

ユニット相互のボルト接合は、高線量下での現地作業を余儀なくされる。伝達すべき応力が小さい箇所を選定し超高強度ボルトで接合することで、ボルト本数の極力低減をはかっている。

c. ドーム屋根鉄骨組立と燃料取扱設備などの設置

総重量は約490tである。長手方向に8分割、更に中央で半割した三日月型のユニット(約30~50t)に分けて組み立てる。図3に示すように、最初にクレーンが届きやすい位置で三日月ユニットをドーム状に組み立てる。次にクレーンが届きにくい奥まで燃料取扱設備用のレール上をスライド装置(電動モータ)により自走させる。これを数回繰り返し、途中で燃料取扱設備・門型クレーンを吊り込みドーム屋根を完成させる計画である。

三日月ユニット相互の頂部とガーダ架構との脚部接合部には、誤差を吸収しやすく現地作業も比較的少ない差し込みピン方式を採用する。また、8分割したユニット相互はあえて緊結せず独立した構造とする。ユニット間の相対変形を吸収しつつ隙間が生じにくい特殊ゴム製のラバー材を配置することで、フレキシブルなジョイント構造としている。これらの工夫により高線量下かつ高所作業における被ばく低減と

安全性の向上を図る。

2. 施工性確認試験

全ての鉄骨ユニットは既に製作が完了している。サイトに仮置きされた状況を図4に示す。現在、これらのユニットを用いて各種施工性確認試験を実施中である。門型架構の組立試験、ドーム屋根の組立試験やスライド試験を予め十分行うことで、高線量下における現地作業の円滑化をはかると共に被ばく低減に向けた一層の改善策を追求している。

著者紹介

松尾一平 (まつお・いっぺい)

鹿島建設 原子力部 原子力設計室

小川喜平 (おがわ・きへい)

鹿島建設 原子力部 原子力設計室

岡田伸哉 (おかだ・しんや)

鹿島建設 東京建築支店

鹿島・清水・竹中・熊谷・間 建築工事共同企業体
東電福島3号機原子炉建屋カバーリング工事事務所

加藤和弘 (かとう・かずひろ)

鹿島建設 東京建築支店

鹿島・清水・竹中・熊谷・間 建築工事共同企業体
東電福島3号機原子炉建屋カバーリング工事事務所

(6) 3号機 燃料取扱設備等の設計および施工計画

3号機は現場の雰囲気線量が高いため、遠隔操作にて小型瓦礫の撤去と燃料取り出しを安全確実に実施できる設備が必要である。小型瓦礫撤去と燃料の取り出しから構内用輸送容器による燃料の原子炉建屋地上階への搬出までの一連の作業を、遠隔にて実施可能な燃料取扱設備を開発した。

東芝 諏訪 薫 司, 東倉 一郎, 伊藤 悠貴, 篠崎 史人

I. はじめに

3号機原子炉建屋オペフロは雰囲気線量が高く、被ばく低減の観点から有人作業による使用済燃料プールからの燃料取り出し作業が困難であるため、遠隔操作にて燃料を安全確実に取り出す設備が必要である。また燃料を取り出すためには、使用済燃料プール内の特に燃料上部に堆積した瓦礫(以下、小型瓦礫)の撤去を行うことが必要である。

株式会社東芝は東京電力ホールディングス株式会社と共に、小型瓦礫撤去と燃料取り出し、及び燃料を取納した構内用輸送容器を原子炉建屋地上階に移送するまでの一連の作業を遠隔にて実施可能な燃料取扱設備を開発した。ここでは燃料取扱設備の概要と各機器を用いた施工計画を紹介する。

II. 燃料取扱設備の設備概要

燃料取扱設備は、3号機使用済燃料プール上部に懸架されたFHM ガーダ上に設置され、さらに全体を燃料取り出し用カバーで覆われる。燃料取扱設備の設置イメージを図1に示す。

燃料取扱設備は、小型瓦礫撤去、燃料取り出し及び構内用輸送容器への収納を行うための燃料取扱機、構内用輸送容器の一次蓋ボルトの締付と、原子炉建屋の地上階まで移送するクレーン、各機器を駆動するための制御盤コンテナ内の制御盤及び水圧ユニット、及び一連の作業を遠隔監視するためのITVシステム等で構成される。各機器の操作は別建屋内(事務本館)に設置される遠隔操作室から操作する。燃料取扱設備の主構成機器の概要を以下に示す。

1. 燃料取扱機

燃料取扱機は、ブリッジ、燃料把持機、テンシルトラス、マニピュレータ及び補助ホイスト(東西各1基)で主に構成され、FHM ガーダに設けられたレール上に設置

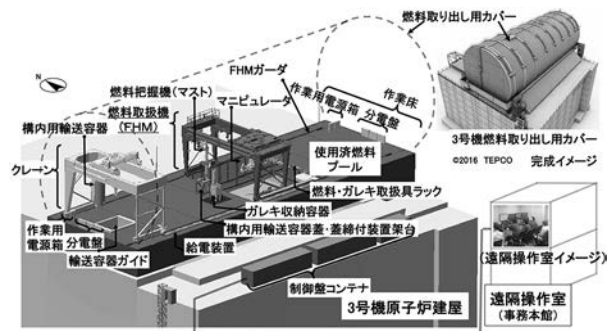
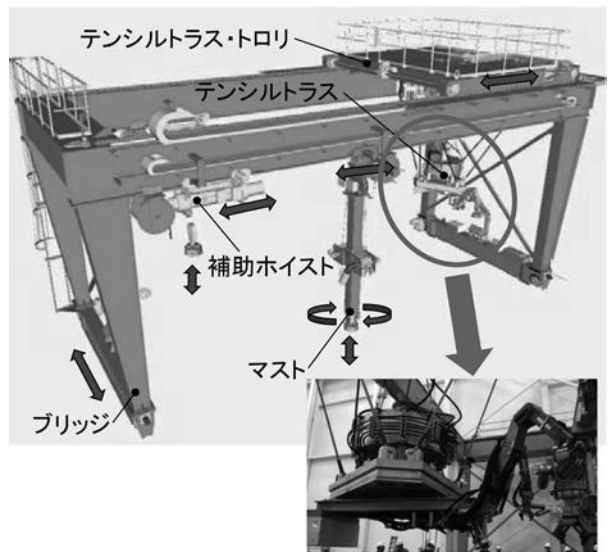


図1 燃料取扱設備の設置イメージ



テンシルトラス、マニピュレータ

図2 燃料取扱機概略図

し、遠隔操作室内に設置する操作卓にて遠隔操作する。テンシルトラスは図2に示すように、ブリッジ上のテンシルトラス・トロリに設置され、ブリッジ上を横行し、燃料把持機、補助ホイストはブリッジ側面を横行する。

使用済燃料プール内の燃料は、燃料把持機先端の燃料つかみ具にて取り扱い、また小型瓦礫撤去は主にテンシルトラスに設置されたマニピュレータと吸引装置にて行う。マニピュレータは両腕タイプでテンシルトラスに取り付けられており、小型瓦礫の把持、切断、燃料取り出

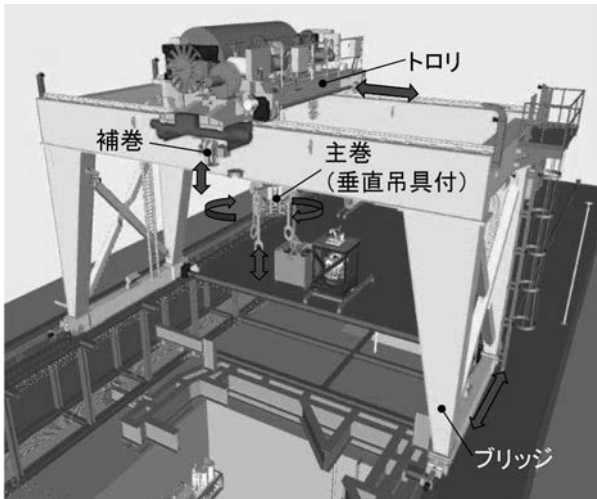


図3 クレーン概略図

し時の作業補助等を行う。マニピュレータの左腕先端には標準つかみ具が取り付けられ、右腕先端には瓦礫の切断、把持などの作業に応じた各種の瓦礫取扱具に取替えができる構造となっている。吸引装置は、水中ポンプと吸引した小型瓦礫を集積するフィルタ付きの容器(遠隔操作にて取替可能)からなり、マニピュレータでの取扱いでは時間を要する細かな瓦礫を回収する。燃料取扱機には、3台の気中用の耐放射線性カメラと水中でも使用可能な7台の耐放射線性カメラが取り付けられている。燃料取扱機の操作は、遠隔操作室に設置される操作卓を用いてカメラ画像等を確認しながら遠隔操作にて行う。ブリッジ、トロリ、燃料把持機、補助ホイスト等にはインターロック機能を設け、燃料の落下防止、クレーンとの衝突防止、使用済燃料プールから燃料が過度に吊り上げられるのを防止する等の安全対策を設けている。

2. クレーン

クレーンは、ブリッジ、トロリ、主巻及び補巻で主に構成され、遠隔操作室内に設置される操作卓にて操作し、FHM ガーダに設けられた走行レール上を走行する。図3に示すように、トロリには主巻と補巻を備え、ブリッジ上のトロリレールを横行する。

構内用輸送容器と瓦礫収納コンテナの地上階までの吊下げ及びFHM ガーダ上への吊り上げは、主巻にて行う。補巻の先端は各種ツールが付け替え可能な構造としており、遠隔操作による構内用輸送容器の一次蓋の取り付け・取り外し等が可能な蓋締付装置等を接続可能である。

クレーンには、3台の気中用の耐放射線性カメラと水中でも使用可能な2台の耐放射線性カメラを取り付けている。クレーンの操作は、燃料取扱機の操作と同様に遠隔操作室に設置される操作卓を用いてカメラ画像等を確認しながら遠隔操作にて行う。ブリッジ、トロリ等にはインターロック機能を設け、構内用輸送容器の安全輸送経路の設定、クレーンの衝突防止等の安全対策を設けている。

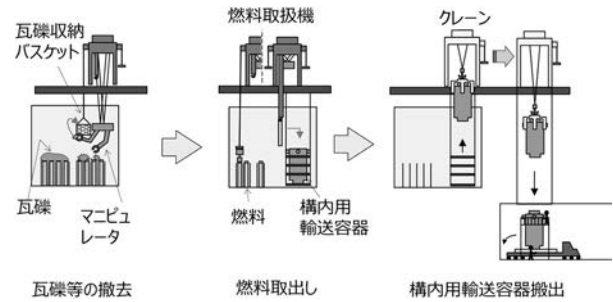


図4 作業フロー

Ⅲ. 施工計画

燃料取り出し作業は、①小型瓦礫撤去、②使用済燃料プール内の燃料を構内用輸送容器へ充填、③構内用輸送容器の地上階とFHM ガーダ上への搬出入の3つに大きく分類される。作業フローを図4に示す。

小型瓦礫撤去は、主に燃料取扱機のマニピュレータと吸引装置等を用いて実施され、撤去した瓦礫は瓦礫収納バスケット及び瓦礫収納コンテナに集められ、クレーン主巻にて地上階に搬出される。使用済燃料プール内の566体の燃料取り出し及び構内用輸送容器への燃料充填は、燃料把持機先端の燃料つかみ具を用いて実施する。構内用輸送容器には7体の燃料を充填でき、構内用輸送容器の搬出入は、クレーン主巻で実施する。また使用済燃料プール内に設置した構内用輸送容器の一次蓋ボルトの緩めと取り外し、及び燃料充填後の一次蓋の取り付けと一次蓋ボルトの締め付けは、クレーン補巻先端に接続した蓋締付装置で実施する。各作業では、機器の細かな位置合わせ等の作業補助のためマニピュレータを使用する。またマニピュレータ、テンシルトラス、補助ホイスト、マスト等に設置されたカメラを用いて各作業時の視野を確保しながら施工する計画としている。

Ⅳ. まとめ

3号機は現場の雰囲気線量が高いため、遠隔操作にて小型瓦礫の撤去と燃料取り出しを安全確実に実施できる設備が必要である。このため、小型瓦礫撤去と燃料の取り出しから構内用輸送容器による燃料の原子炉建屋地上階への搬出までの一連の作業を、遠隔にて実施可能な燃料取扱設備を開発した。今後、燃料取扱設備の操作訓練等で得られた知見を実機及び各作業要領に反映することで、現場作業における更なる安全性の向上を図る。

著者紹介

諏訪 菌司 (すわぞの・つかさ)

東芝 エネルギーシステムソリューション社
原子力機械システム設計部
機械システム設計第二担当

東倉一郎（とうくら・いちろう）
東芝 エネルギーシステムソリューション社
原子力機械システム設計部
機械システム設計第二担当

伊藤悠貴（いとう・ゆうき）
東芝 エネルギーシステムソリューション社

原子力機械システム設計部
機械システム設計第二担当

篠崎史人（しのざき・ふみひと）
東芝 エネルギーシステムソリューション社
原子力機械システム設計部
機械システム設計第二担当

(7) 3号機 燃料取り出しに向けた準備状況

3号機使用済燃料プールがあるオペレーティングフロアは常時作業を有人で行うには高線量下であり、使用済燃料プール内の燃料ラックにはガレキが堆積している状態である。燃料取扱設備を設置した後、遠隔操作にてガレキ撤去、燃料取出し、構内用輸送容器への燃料移動の作業を行うことになる。これらは、これまで経験したことのない遠隔操作で実施することから模擬燃料プール、燃料取扱設備を設置し、遠隔操作訓練を実施した。なお、1F3号機へ燃料取扱設備設置後に実機における再訓練も予定している。

東京電力ホールディングス 山口 貫太, 工藤 深也, 加賀見 雄一

KEYWORDS: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Unit 3, Spent fuel pool, Spent fuel removal

I. 概要

3号機の使用済燃料プール(SFP: Spent Fuel Pool)があるオペレーティングフロアは常時作業を有人で行うには高線量下であり、使用済燃料プール内の燃料ラックにはガレキが堆積している状態である。燃料取扱設備を設置した後、遠隔操作にてガレキ撤去、燃料取り出し、構内用輸送容器への燃料移動の作業を行う必要がある。遠隔操作での燃料取り出し作業は経験がないため、模擬燃料プールを設置し、実際に3号機で使用する燃料取り出し設備を用いて遠隔操作方法を習得するために訓練を実施した。

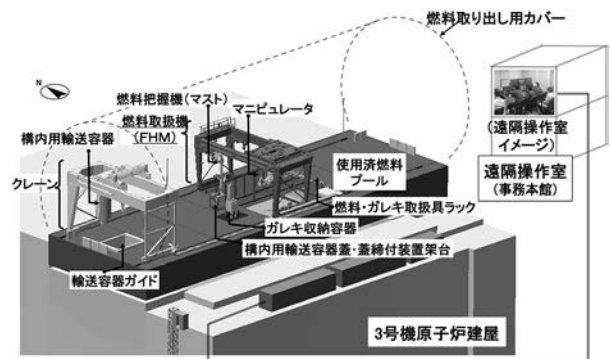


図1 3号機オパフロ設備概要

II. 設備概要

3号機の燃料取り出し設備はオペレーティングフロア上に作業床を設置し、その上に燃料取扱機(FHM: Fuel Handling Machine)、クレーンを設置し、遠隔操作室から操作を行う。プール内はガレキが堆積しているため、ガレキの吸引装置、マニピュレータ、マストや補巻のアタッチメントのツールを設置し、あらゆるガレキの撤去、燃料取り出しができる構成としている。構内用輸送容器は原子炉建屋の機器ハッチを通さず、原子炉建屋周囲に建造した構内用輸送容器から吊り上げ、吊り降ろしを行う。訓練は実際に燃料取り出しに使用するFHM、クレーン、

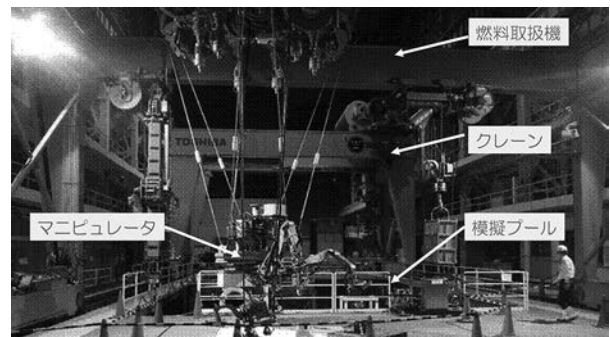


図2 訓練設備概要

マニピュレータ等を用いて模擬燃料プール、模擬構内用輸送容器を設置して実施した。

Current situation of preparation for fuel removal from the Spent Fuel Pool of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3:
Kanta Yamaguchi, Shinya Kudo, Yuichi Kagami.

(2017年11月29日 受理)



図3 訓練(左：燃料取扱訓練, 右：ガレキの移動・把持・切断訓練)(提供：(株)東芝)

Ⅲ. 訓練内容

訓練はガレキ撤去、燃料取り出し、構内用輸送容器取扱作業について行った。全作業の共通項目として座学、遠隔で SFP 内、オペレーティングフロア上を監視するためのカメラ操作訓練、マニピュレータの基本的な操作訓練、設備の駆動源となる水圧ユニット取扱訓練、各操作卓の基本的な操作訓練、マニピュレータ、クレーンマスト、補巻のアタッチメントのツール交換訓練、総合訓練、警報対応訓練を実施した。

各作業個別にはガレキ撤去訓練ではガレキの収納容器の取扱訓練、マニピュレータを用いたガレキの把持・移動訓練、ワイヤーや鉄筋の切断訓練、吸引装置を用いたガレキ吸引訓練を実施した。

燃料取り出し訓練では FHM による燃料取扱訓練、ガレキが挟まることで、燃料ラックに燃料が引っかかった場合の引っ掛け解除用の治具の取扱訓練、引っ掛け解除治具を用いても取り出せない燃料があった場合に用いる燃料ラック切断・拡張訓練を実施した。

構内用輸送容器取扱訓練では燃料装てん後の容器蓋の遠隔締付装置の取扱訓練、蓋締付後の密封確認訓練、燃料装てん時に輸送容器蓋のフランジ面に乗ったガレキの吸引訓練、輸送容器の蓋の締付装置が固着した場合の分離訓練を実施した。

Ⅳ. 抽出された改善点

訓練等から明らかとなった改善すべき点を抽出し、リスクアセスメントを実施した。例としてカメラの映像のみで作業を実施するために、有人作業と比較して、視野が制限されること、燃料を移動させるための構内用輸送容器の蓋閉めが、遠隔操作のために時間を要すること、また、同様に、遠隔操作のため機器の故障時の対応に長期間作業中断となることなどが挙げられる。

これらについて発生頻度、影響の大きさ、リスクが生じた際の対応に必要な期間等について、改善策の実施前後で評価を行い、安全性を担保しながら、作業手順、設

備等の改善を効果的に実施していく。改善策は設備改造や作業要領書等の整備、予防保全といった予防的な改善と異常時の対応手順書の整備や予備品準備といった緩和的な改善の観点で立案、評価、実施する。

実施を検討している改善事項の一例として監視カメラの増設、カメラの確認作業を効率的に行うためのマーキング、通信異常時対応の要領書の整備、調達に期間が必要なマニピュレータ等の予備品の準備、及び交換が容易となるような設計変更などがある。

Ⅴ. 今後の方針

今後、訓練で使用した燃料取り出し設備は 3 号機へ設置する準備に入るため使用できなくなる。今回、3 号機に導入されたマニピュレータは従来の燃料取扱設備にはない特殊な操作性であり、継続して訓練の必要があるため、訓練用のマニピュレータを新たに設置して継続して訓練を行う。

また、3 号機へ燃料取り出し設備設置後に実機において、模擬燃料と空の構内用輸送容器を用いて、実作業と同じ環境での再訓練も予定している。

著者紹介

山口貫太 (やまぐち・かんだ)

東京電力ホールディングス
福島第一廃炉推進カンパニー福島第一原子力発電所
機械第三グループ

工藤深也 (くどう・しんや)

東京電力ホールディングス
福島第一廃炉推進カンパニー福島第一原子力発電所
機械第三グループ

加賀見雄一 (かがみ・ゆういち)

東京電力ホールディングス
福島第一廃炉推進カンパニー福島第一原子力発電所
機械第三グループ

(8) 1号機 建屋カバー解体における遠隔誘導システム，ガレキ吸引装置等の開発

水素爆発により原子炉建屋のオペフロ上部が損傷した福島第一原子力発電所1号機からの放射性ダストの飛散を抑制するため、2011年10月に原子炉建屋カバーを設置した。また、原子炉廻りの安定冷却の継続等によりダスト放出量が大幅に低減したことから、2015年5月より建屋カバーの解体に着手した。建屋カバー解体後は原子炉建屋オペフロのガレキ撤去、燃料取り出し用カバー架構等を設置した後、使用済み燃料プールから燃料を取り出すことを計画している。

ここでは、建屋カバー解体技術である遠隔誘導システムの開発、万一の放射性ダストの飛散に備えた、ミスト散布装置の設置に干渉する小ガレキを吸引する装置の開発、及び、支障鉄骨を撤去する装置の開発について報告する。

清水建設 黒澤 到，梶波 信一，東京電力ホールディングス 木ノ下 英雄ほか

KEYWORDS: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Decommissioning, Remote Guide System, Rubble Suction Device, Rubble Handling Device

I. 建屋カバー解体技術遠隔誘導システムの開発

1. 遠隔誘導システムの開発

原子炉建屋カバーの設置や解体は、作業員が近づけない高線量環境下での作業となるため、遠隔誘導により部材の設置や取外しを行う必要不可欠な技術として、2011年の着工時(カバー設置時)に開発したものである。図1及び図2に、誘導システムの概念及び誘導システムのモニター画面を示す。

原子炉建屋の周囲に配置したレーザー計測器を免震重要棟から遠隔操作し、吊り治具に取り付けたプリズムの位置を正確に把握するシステムを構築した。このシステムを用いることで、カメラワークに頼る施工を計測数値による正確な施工に変えることができ、玉掛け時間が短縮し、解体作業の安全性が飛躍的に高まった。

このシステムは、建屋カバーの設置や解体のみならず、ガレキ状況を把握するための各種調査機械の誘導、飛散防止剤散布装置の誘導等、主な工事の誘導ツールとして幅広く活用している。

2. 自動玉掛装置の開発

自動玉掛装置は、2011年の着工時(カバー設置時)に開発した技術である。建屋カバーは応急措置として設置し

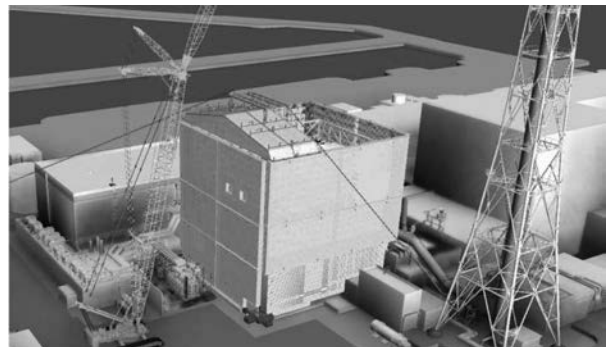


図1 誘導システム
(レーザー計測器による吊り治具の位置把握)



図2 誘導モニター
(複数のカメラ映像，吊り治具の位置を数値表示)

た構築物であり、解体することを見据え、あらかじめ自動玉掛装置を開発した。図3に屋根パネルの撤去状況

Development of Remote Guiding System, Rubble Suction Device, etc. for Dismantling Building Cover of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 1: Itaru Kurosawa, Shinichi Kajinami, Hideo Kinoshita, Shinobu Yamazaki, Yuichi Tsukahara, Yutaka Hirose.
(2017年11月29日 受理)



図3 屋根パネル撤去状況

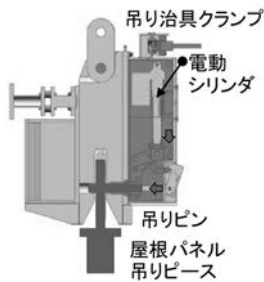


図4 自動玉掛装置

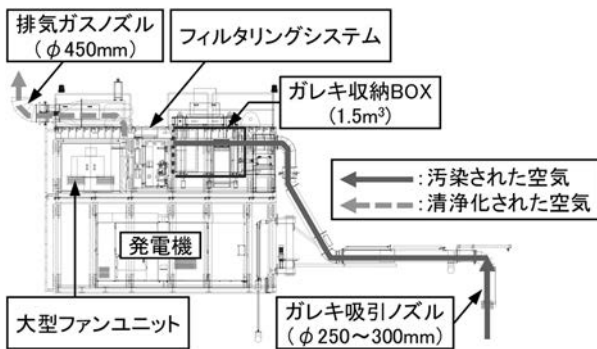


図5 ガレキ吸引装置

- ・重量：約 22t(ガレキ回収前)
- ・ガレキ吸引能力(小ガレキ 1 個)
- 寸法：約 250mm, 重量：約 20kg

を、図4に自動玉掛装置を示す。遠隔誘導システムを使って吊りピースとクランプの位置を一致させたのち、電動シリンダの遠隔操作によって、吊りピンを吊りピース孔に挿入することで玉掛けが完了する装置である。

II. 小ガレキ吸引装置【Karuwaza-1】の開発

1. 背景

1号機は原子炉建屋オベフロ上部の鉄骨構造のうち、屋根部材の大部分は最上階の上に崩落しているが、壁を構成していた鉄骨部材は外周に残存している。この残存鉄骨を利用し、ガレキ撤去作業時の万一の放射性ダストの飛散に備え、舞い上がった放射性ダストを抑え込むミスト散布装置の設置を計画したが、残存鉄骨上に堆積した小ガレキが計画の障害となっていた。そこで、小ガレキを吸引する装置を開発した。

2. 開発のポイントと対応

図5にガレキ吸引装置の構成、図6に外観、図7に狭隘部での小ガレキの吸引状況を示す。開発のポイントは以下に示す通りである。

- ①狭隘部の小ガレキを吸引できること
- ②放射性ダストを排気ガスと一緒に排出しないこと
- ③吸引した小ガレキを容易に、安全にサイト内の保管箱に移動できること

①については、伸縮式吸引ダクトおよびダクト旋回装置を組み込むことで、プレース用ガセット付近等の狭隘部にある小ガレキの吸引を可能とした。また、排気ガスノズルに水平旋回装置を組込むことで、吸引装置のより

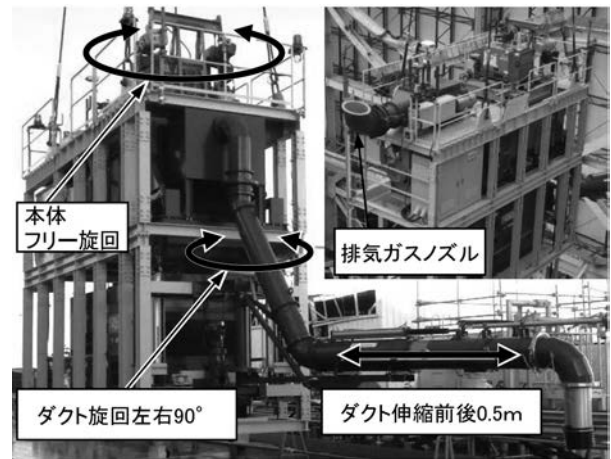


図6 ガレキ吸引装置外観



図7 小ガレキの吸引状況

細かい姿勢制御を可能とした。②については、HEPAフィルタを備えたガレキ収納BOXを内部に持つ構成とした。また、万一のフィルタの損傷に備えて、排気ガス出口にさらに同種のフィルタを組み込むことによって、2重化した。③については、上記のガレキ収納BOXをそのまま家庭用掃除機の紙パックの要領で回収ボックス(保管容器)に収納できるサイズとした。

III. 支障鉄骨撤去装置【ひとくち】の開発

1. 背景

前章で述べた原子炉建屋最上階の外周の残存鉄骨には、小ガレキだけではなく、折れ曲がった鉄骨や配管等が引っかかっており、ミスト散布装置を残存鉄骨に引っ掛ける計画の障害となっていた。このため、これらを撤去する装置を開発した。

2. 開発のポイントと対応

図8に装置の外観、図9に切断ツール、図10に把持ツールの概要を示す。開発のポイントは以下に示す通りである。

- ①撤去時・切断時に撤去対象物を落下させないこと
- ②細かな位置合わせができること
- ③狭隘部でも安全に作業できること

①については、鉄骨の切断ならびに確実な把持力を確保するために油圧駆動方式を採用し、切断ツールにも把持機能を設けた。200kgまでのガレキの保持・切断が可



図8 装置外観
(クレーンで吊り下げて使用)
重量：約18t、駆動装置：油圧

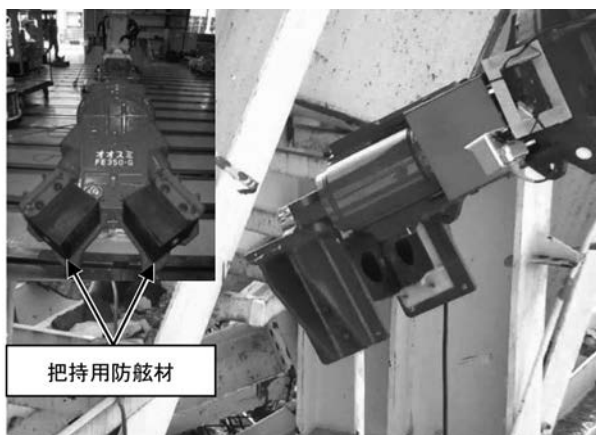


図9 切断ツール



図10 把持ツール

能とした。②、③については、装置上部に旋回制御装置を具備することで、クレーンでの大まかな位置決めと方向制御を可能とした。また、装置のアーム部分から先に5つの自由度を設けることで、最適な姿勢でのアプローチを可能とした。更に、全体の機器構成を縦型とすることで、残存鉄骨コーナ部等の狭隘部での作業も可能とした。

装置各所にカメラを合わせて6台装備しているが、それでもクレーンオペレータが対象物と装置の距離感をつ



図11 ミストノズルユニット設置状況(東面)
(東面7箇所、西面6箇所)

かむことは極めて難しい。今回の作業では、高い安全性と精度が要求されるため、本装置に並行して盛替可能な昇降式俯瞰カメラを開発した。本カメラは、作業部位の位置に合わせて設置し、対象作業に合わせて高さを変えて俯瞰した画像を取得できるので、対象部位への衝突を回避しつつ、把持、切断作業が効率的に行えた。これによって、クレーンオペレータの負荷を大きく軽減することが可能となった。

IV. おわりに

建屋カバーの屋根パネルを撤去し、更にミストノズルユニットに干渉する小ガレキの吸引、鉄骨や配管等の撤去の後、図11に示す通り原子炉建屋オペフロ既存鉄骨にミスト散水ノズルユニットを設置した。これら作業の間にダストモニタ、モニタリングポストの指示値に有意な変動は無かった。

今後も作業員の被ばく低減に資する省人化・無人化機器を活用し、廃炉に向け安全・着実に作業を進めていく。

著者紹介

黒澤 到 (くろさわ・いたる)

清水建設

原子力・火力本部計画部

梶波信一 (かじなみ・しんいち)

清水建設

建築総本部生産技術本部

木ノ下英雄 (きのした・ひでお)

東京電力ホールディングス

福島第一廃炉推進カンパニー福島第一原子力発電所

建築部建築第一グループ

山崎 忍 (やまざき・しのぶ)

清水建設

建築総本部生産技術本部

塚原裕一 (つかはら・ゆういち)


清水建設

建築総本部生産技術本部機械技術部

廣瀬 豊 (ひろせ・ゆたか)

清水建設

建築総本部生産技術本部機械技術部


 報告

福島環境回復活動の状況について

環境省 福島環境再生本部 小沢 晴司

平成 23 年 3 月の原子力災害発生後、浜通りや中通りを主とする福島県内各地で除染が進められてきた。同年 8 月成立の放射性物質汚染対処特別措置法に基づき、環境省では避難指示区域 11 自治体で国直轄による除染事業を進め、平成 28 年度末までに帰還困難区域を除く同地域における面的な除染を終了させることを目指している。本稿では、平成 26 年春の本誌解説以降の進捗状況や今後の課題等について報告する。

KEYWORDS: *Off-site Cleanup, Decontamination, Radioactive Pollution, Fukushima, Ministry of the Environment*

I. はじめに

「福島で暮らす子ども達が、やがて大学生や社会人になり、県外の仙台や東京、大阪等にでていったとき、そこで出会う人達から次のように聞かれるかもしれない。ー福島の水を飲んでいたか、お米は食べていたか、除染は意味があるか、放射線の影響はないのか。ー

放射線や福島の状況に関するそれらの問いに答えられるよう、子ども達を支える教育が大切だ。」

福島県内の首長や医師、教育者等の間で話されるこのような課題に関し、まず除染の効果について紹介する。続いて除染等の進捗状況を概観し、帰還困難区域の取扱い等今後の課題について触れる。

II. 除染の効果

発災後初期の被災地域住民への除染等説明会で、また事故後 5 年以上が経過した今も、よく問われるのが「除染後、再び風雨等により風上や上流側、又は未除染区域から放射性物質が流れてくるのでは」という除染の効果への疑問である。以下に除染の際の線量調査や、線量低減効果と、併せて住民の不安対象の一つである仮置場の管理状況を記す。

1. 除染の際の線量調査

除染対象地区では、地権者の同意を得て事前に空間線量を調査する。除染直後にそれらの地点の線量を確認する。その後約半年から 1 年後にモニタリング調査を実施

Progress on Off-site Cleanup Efforts in Fukushima 2016: Seiji Ozawa.

(2016 年 9 月 30 日 受理)

し、線量低減維持とならない箇所があれば、事情を調べ、必要に応じフォローアップとしてのスポット的除染を行っている。それらの箇所について事後も継続してモニタリング調査を行う。

これまで、国直轄除染地域で、平成 28 年 8 月現在、除染着手前に 99 万地点に及ぶ空間線量を測定している(内訳：宅地約 62 万地点、農地約 12 万地点、森林約 6 万地点、道路約 19 万地点)。線量が比較的高い地区では、地元との協議により事前に放射能濃度調査も実施している。

モニタリング調査を通じた知見の蓄積により、除染後に放射性物質が集まる可能性のある地形や建築構造も抽出されてきている。雨樋の下、地面のアスファルト等のクラック、裏山斜面からの水みち等は特に注意を払って調査する。現在では、最初の除染の段階でもこれらの箇所については注意をして作業が行われている。

2. 長期的なモニタリングデータ

除染による線量低減の状況に関し、発災後長期間にわたり採られている調査データがある。平成 23 年 11 月から翌年 4 月まで内閣府による除染モデル実証事業が行われた。その実施地区での空間線量率追跡調査である。

避難指示区域を主に 18 地区でモデル事業を実施し、そのうち 14 地区ⁱで追跡調査が行われている。1 地区あたり概ね 20 カ所の測定地点があり、平成 27 年末までに 11 回の追跡調査が実施されている。現在までの結果では、大熊町夫沢地区(除染前の地区の平均空間線量率

ⁱ 途中から 1 地区の追跡調査が開始され現在は 15 地区で実施されている。

67 μ Sv/h)から楡葉町南工業団地(同平均0.39 μ Sv/h)まで、線量に高低のある合計288測定点の全てで空間線量が減少し、継続的に上昇している測定点は確認されていない。14地区の平均では除染直後に6割程度線量が減少し、それ以降も、除染直後の値に比べ平均でさらに6割減少している。この間の物理減衰による線量低減効果は5割と見込まれている。

3. 仮置場の管理

環境省による直轄除染で発生した土壌等を保管する仮置場は、平成28年8月現在、避難指示区域内(既解除区域含)に約270カ所あり、約700万袋(1袋約1立米)が管理されている。この他約70万袋分の可燃物が仮設焼却施設等に運ばれ処理されている。

中間貯蔵施設への搬出までの間、除去土壌の安全な保管が行われるよう、仮置場は次のように整備される。

- ・敷地内に遮水シート等を敷設
- ・その上に大型土嚢袋に入った除去土壌を重ねる
- ・周囲と上部に汚染されていない山砂などが入った土嚢袋(各約1立米)を遮蔽用に積み上げて配置
- ・さらに上部を含め全体を防水シート等で覆う
- ・この構造により除去土壌の放射線量は99.8パーセント以上低減される
- ・現在、仮置場近傍での線量は周辺とかわらない状況
- ・仮置場整備後、定期的な巡回等により、空間線量や温度、CO濃度測定は週一度、地下水や浸出水測定は月一度、草刈りなどは年4回程度実施して、仮置場の状況を監視している

福島県内で、国直轄除染ではない市町村による除染地域での仮置場数は、平成28年6月現在約830カ所、現場保管14.5万地点、除去土壌等の量は約550万立米となっており、各自治体の事業により管理されている。

Ⅲ. 除染の終了に向けて

1. 除染特別地域

国が直接除染を行う除染特別地域では、対象11自治体のうち田村市、川内村、楡葉町、葛尾村、川俣町、大熊町、双葉町の7市町村で除染実施計画に基づく面的除染が終了している。残り4自治体での平成28年8月現在の進捗状況は表1のとおりであり、いずれも同計画に従い、平成28年度末までに面的除染を終了させる予定となっている。この作業を進めるため、平成24年7月

表1 除染特別地域における除染の進捗

	地権者等の同意率(%)	実施率(%)			
		宅地	農地	森林	道路
飯舘村	99.6	100	91	98	82
南相馬市	95	96	38	69	39
浪江町	98	87	51	96	75
富岡町	終了	100	99	100	99.9

以降28年8月までの直轄除染区域での除染作業員の延人数はおよそ900万人に達し、一日最大動員数は約2万人弱(平成27年11月)となった。

表1の4自治体のうち、南相馬市では、帰還困難区域を除き7月に避難指示が解除され、飯舘村については平成29年3月に避難指示を解除(帰還困難区域除く)することが決まっている。除染が終了している7自治体のうち、田村市、楡葉町、川内村、葛尾村の4自治体の避難指示(帰還困難区域除く)が解除されている。

除染が終了した自治体については、前述のとおりその後の線量低減に関するモニタリング調査を実施し、除染の効果が維持されていることの確認等を行うとともに、地域住民との連絡のもと、適宜フォローアップ作業を検討するなどの対応を行っている。

2. 汚染状況重点調査地域

国が直轄で除染を行う除染特別地域以外の汚染状況重点調査地域で、除染実施計画が策定された自治体では主に市町村が主体となって除染を行う。福島県内では平成28年7月時点で36自治体で除染事業が取り組まれている。

県内各市町村の除染実施計画における除染等の措置完了予定時期は平成28年度とされ、平成28年7月現在、住宅、農地・牧草地、子どもの生活環境を含む公共施設等で除染の進捗率は約9割に達した。一方、道路は約5割、生活圏の森林は約6割の進捗状況となっている。

Ⅳ. 放射性汚染廃棄物の処理

1. 汚染廃棄物対策地域での廃棄物処理

国が直接廃棄物処理を実施する汚染廃棄物対策地域は、除染特別地域と同じ11自治体の区域に指定され、同地域内で、災害廃棄物等は平成28年1月現在合計約116万5千トンと推定されている。平成28年8月までに99万トンの廃棄物が各被災現場等から仮置場に集約された。うち15万トンは焼却処理され、38万トンは再生利用にまわっている。

対策地域内で帰還に向けた取り組みが進むにつれ、避難者が一時的に自宅管理等のため地元に戻った際に出る片付けゴミについても回収と処理が進められている。並行して被災家屋の解体も進められ、平成28年8月現在、約9,400件の申請を受け、これまでに3,900件の家屋が解体撤去された。

対策地域内災害廃棄物等のうち、可燃性廃棄物を焼却する仮設焼却炉について、川内村、飯舘村(小宮地区、蔵平地区の2カ所)、富岡町、南相馬市、葛尾村、浪江町、楡葉町、大熊町の8市町村9施設で計画され、平成28年10月現在、大熊町の施設が建設中、川内村の施設は処理完了となり、残り6町村7施設が稼働している。7施設の処理能力は、合計で一日あたり1,600トンに達し、平

成 28 年 8 月までの処理量は約 33 万トン(除染廃棄物 19 万トン含む)となっている。

2. 指定廃棄物の処理

対策地域外で、1 キログラムあたり 8 千ベクレルを超える廃棄物は、指定廃棄物として国が処理を行う。福島県内での指定廃棄物は、平成 28 年 6 月現在、焼却灰が 11.6 万トン、下水汚泥 1 万トン、稲わらなどの農林業系副産物 4 千トンなどを合わせ約 14.7 万トンとなっている。

農林業系副産物や下水汚泥などの可燃性廃棄物等は、焼却や乾燥により減容化が進められており、これまで、福島市や郡山市に下水汚泥の減容化施設が、鮫川村に農林業系廃棄物の処理施設が整備され処理が行われた(平成 28 年 7 月現在いずれも終了)。飯館村蔵平地区の減容化施設では自村のほか近隣自治体の可燃性指定廃棄物も処理しており、会津や県中県南方面の農林業系副産物等については川内村と田村市にまたがる南いわき開閉所に減容化施設を整備し処理する計画となっている。

3. 管理型処分場

上述の福島県内の指定廃棄物のうち、1 キログラムあたり 10 万ベクレル以下の廃棄物については、富岡町(搬入路は楡葉町)に所在する既存の管理型処分場(旧フクシマエコテッククリーンセンター)に埋め立てて処分する。

施設活用に関し、平成 27 年 12 月、富岡町長、楡葉町長、福島県知事が事業容認を国に伝え、国では平成 28 年 4 月に施設を国有化、同年 6 月、2 町と県、国との間で施設周辺の安全確保に関する協定を締結した。

同処分場の埋め立て対象物は、対策地域内廃棄物、指定廃棄物、及び双葉郡内の生活ごみのうち、1 キログラムあたり 10 万ベクレル以下のもので、処分量は約 65 万立米が予定されており、平成 28 年 9 月現在、関連施設の整備が始められ輸送のための地元調整が進められている。

V. 中間貯蔵施設の整備

福島県内で除染により発生した除去土壌等と、1 キログラムあたり 10 万ベクレルを超える対策地域内廃棄物や指定廃棄物を貯蔵する施設として、大熊、双葉両町内約 16 平方キロメートルの地域に計画されている。処分量は約 1,600~2,200 万立米(可燃物の焼却後)と推定されている。

1. 用地取得

平成 23 年夏以降、国から福島県へ、中間貯蔵施設整備への協力要請があり、現地調査や地元説明など、国、県、関係自治体、避難住民との間での様々な対話が行われてきた。その結果、平成 26 年 12 月、大熊町が施設受

入れを表明、平成 27 年 1 月には双葉町が施設受入れを表明し、以降、対象地域の 2,300 人を超える地権者への用地交渉が開始された。全国に避難している地権者の連絡先を調べ、電話や面談等により中間貯蔵施設事業の目的を説明、地権者の家屋等財産や土地の調査の承諾を得るという手続きとなる。現地での家屋等施設や立木、庭石の一つ一つを確認し、それら物件を評価、算定し、その上で地権者と連絡し物件評価結果が確認できれば用地取得契約に進む。平成 28 年 9 月現在、連絡先がわかっている地権者は約 1,600 人、その所有する面積は計画地の 9 割であり、連絡先が確認できた者のうち物件調査まで了解された者は約 1,400 人、その所有する面積は計画地の 8 割強となっている。さらに物件調査まで済んだ土地は計画地全体の 6 割に達した。現地調査後の物件算定等でも対象物の再確認等時間を要するケースがあり、契約済みとなった土地は平成 28 年 9 月現在 144 ヘクタールとなっている。

2. 輸送

平成 27 年 2 月及び 3 月の大熊町、双葉町による中間貯蔵施設への除染土壌等の搬入受入れ表明により、同年 3 月、中間貯蔵施設計画地域への輸送が開始された。その際、施設本体の整備に先立ち、大熊、双葉両町の各工業団地内の一部を保管場とした。平成 27 年度は、輸送安全管理の状況と搬出入時の課題確認等のため県内 43 市町村からの試験的なパイロット輸送として位置づけ、総搬出量は約 4.5 万立米となった。輸送は概ね前年までに計画地内に確保できた用地の状況に規定されるが、平成 28 年度は約 15 万立米、以降 30~50 万、90~180 万、160~400 万、平成 32 年度は 200~600 万立米の輸送見通しとしている。

3. 施設建設

平成 28 年秋、中間貯蔵施設建設のためにまとまった用地が計画地域に確保されつつあり、本格施設(受入れ分別施設、土壌貯蔵施設等)の整備に着手した。中間貯蔵施設計画地域には、概ね海に向かって水田の広がる谷状の地形が幾筋か展開し、その合間に丘状の地形が連なる。大量の土壌を貯蔵する施設は、谷状の地形をダムのように埋め立てるイメージで検討されたが、用地の確保状況に応じた柔軟な土地利用と施設設計を行うことが求められている。

4. 再生利用と最終処分

中間貯蔵施設は、福島県内で発生する除染土壌等を当面の中間貯蔵管理する施設であり、貯蔵開始後 30 年以内の福島県外での最終処分について、日本環境安全事業株式会社法に趣旨が規定された。最終処分までのプロセスでは、具体的には、放射能の物理的減衰を踏まえ、まず

研究・技術開発、減容化・再生資源化等の可能性を踏まえた検討に取り組むこととし、最終処分に向けて8つのステップに沿って行われることがイメージされている。その際、中間貯蔵施設に運び込まれた除染土壌等について、放射性物質が比較的多く吸着する土中の微細な粒と、そうでない比較的大きな土粒とを分級して再生利用することや、比較的低線量の土壌を、適切に管理される公共事業施設整備の中で活用することも検討されている。

VI. 今後の課題

1. 森林の取扱い

森林地域における除染は、住宅地域や農地等への影響を考慮し、それらの土地から概ね20メートルの範囲を対象としている。放射性物質が飛散した福島県内で、特に阿武隈山系は林業や山菜・きのこ取りなど森林資源に依拠した自給的経済圏が展開してきたといわれる。この森林全体の取扱いに目をむけていくことが大切との県内各地の声に沿い、平成28年初めから国の関係機関で森の取扱いに関する検討が行なわれ、実証の一つとして今後里山再生モデル事業が取り組まれることとなっている。

2. 帰還困難区域の取扱い

除染特別地域では、これまで居住制限区域及び避難指示解除準備区域について除染事業が進められていたが、帰還困難区域については、数カ所の除染モデル実証事業、常磐道や国道6号線などの幹線道路、住民にとって重要な場所である墓地、加えて大熊町、双葉町、富岡町の復興拠点などを除いて、面的な除染は実施されていなかった。平成28年8月に同区域の取扱いに関する与党提言がまとめられ、それを受け同年8月末に政府の対応方針が示された。

今後、対象となる自治体では、復興拠点等を整備する計画を作り、同拠点のインフラ整備と一体的に除染を進めていく。あわせて、広域的なネットワークを構成する主要道路について除染等の整備を行うこととされた。

VII. 除染等のリスクコミュニケーション

除染、中間貯蔵施設建設、放射能汚染廃棄物処理等、いずれも被災地住民や関係機関の理解と協力のもとで進められる。国においては、そのようなリスクコミュニケーションの先駆的拠点施設として、平成24年1月、福島市内に除染情報プラザを開設し、その後の平成26年5月、いわき市内に放射線リスクコミュニケーション相談員支援センターを開設した。また、県内の環境の動態調査やリスクコミュニケーション活動を一体的に行う、福島県、国立環境研究所、日本原子力研究開発機構連携に

よる福島環境創造センターが、平成28年7月、三春町に開所した。

これら3施設の連携は重要な課題であり、現在、各担当スタッフ相互の連絡、情報共有が進められており、今後、県民の様々な要望や相談に適切に対応していくことが求められる。

前述3施設のうち、初期より福島でのリスクコミュニケーション活動や交流等のプラットフォーム的役割を果たしてきた除染情報プラザの取り組みは次のとおり。

- ・設置の目的：除染や放射線に関する情報提供等
- ・運営方法：環境省と福島県による共同運営
- ・活動概要
 - －専門家派遣：除染や放射線関係分野の専門家を登録、自治体等の要請で研修会等へ専門家派遣
 - －施設内展示：プラザ内で除染や地域理解等展示と解説
 - －移動展示：放射線や除染に関するコンテンツを自治体要請によりイベント会場に設置、解説
 - ・活動実績（平成24年2月から平成28年8月まで）
 - －専門家派遣：1,193件、受講者等47,000名超
 - －移動展示場：460会場、延べ593日の期間中の来場者は51,000人超
 - －来館者数：22,000名超

VIII. 終わりに

冒頭に掲げた課題に関し、福島の実況や放射線のことについて説明できる強い子ども達ばかりではなく、福島のお米や水をとることを控える状況におかれる者もある。福島の子供達が県外にでていったとき、彼らに福島のことを聞くというのではなく、むしろ彼らを受け入れる地域社会の側で、あらかじめ除染や放射線についてしっかりと学んでいて、彼らを受けとめていくことが大切なのではないだろうか。

現在の日本で、福島の実験を活かすということは、一つにはそのようなことを意味するのではないだろうか。

－ 参考資料 －

- 1) 小沢晴司、除染の進捗状況、日本原子力学会、2015-6
- 2) 放射性物質対策：www.env.go.jp/jishin/rmp.html
- 3) 除染情報サイト：http://josen.env.go.jp
- 4) JAEA 除染モデル実証業務 website
- 5) 除染モデル実証事業後の空間線量率の推移 website

著者紹介



小沢晴司（おざわ・せいじ）
環境省福島環境再生本部
（専門分野/関心分野）景観史の研究・保護区管理/自然及び人文景観を含めた地域景観の再評価。博士（環境科学）。平成24年より現職。

津波波圧・波力実験とその活用

第2回 実務に活用される津波波力実験

電力中央研究所 木原 直人, 甲斐田 秀樹

原子力発電所の耐津波性能の向上に寄与する防潮堤や水密工の設計等においては、主要な外力である津波波圧・波力を適切に評価することが肝要である。本シリーズでは、津波波圧・波力に関する水理実験について2回に分けて解説する。第1回では、この種の実験に関する基礎的内容を紹介した。第2回では、原子力発電所の敷地内に設置された防潮堤、タンク、配管に作用する津波波圧・波力に関する実務の評価を念頭に実施された水理実験について解説する。

KEYWORDS: *Tsunami, Wave pressure, Hydrodynamic force, Hydraulic experiment*

I. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波による原子力発電所の被災を機に、防潮堤や水密扉・防水壁の設置等による発電所の耐津波性能の向上が図られている。発電所を津波から防護する施設的设计においては、主要な津波作用である津波による波圧・波力を適切に評価することが重要である。50年以上の歴史を有する津波の波圧・波力実験を通して、津波が陸上構造物に対して作用させる波圧の特徴が明らかになってきた。また、これら実験データに基づいて、流速や浸水深の情報から波圧・波力を求める評価式も多数提案されてきた。これらの津波波圧実験に関する基礎的な内容については、本解説シリーズの第1回目で紹介した。

本解説シリーズの第2回目では、実務で活用される応用的な津波波圧実験に着目し、原子力発電所の敷地内に設置されている防潮堤やタンク、配管を対象とした波圧・波力評価のための実験について解説する。

II. 防潮堤やタンク、配管を対象とした実験

本章では、原子力発電所の敷地内に設置されている防潮堤やタンク、配管に作用する津波波圧の評価に着目した波圧・波力実験について順に紹介する。

1. 防潮堤

東日本大震災以降、原子力発電所の耐津波性能向上のための様々な対策が施された。津波対策の中でも、敷地高さを越える大規模な津波に対して最も効果的に発電所の耐津波性能をあげる施設の一つとして防潮堤が挙げられる。発電サイトによっては、その役割や位置づけから防波壁や防護壁と呼ばれることもある。これらの多くは震災後の緊急安全対策に伴い、耐震・耐津波の両者の観点から設計されており、津波荷重としては、朝倉ら¹⁾の波圧評価式や、当時の津波避難ビル等に係るガイドラインによって求められた津波波圧が採用されていることが多い。ただし、これらの波圧評価の適用の難しさ、保守性の不明確さから、震災後、防潮堤に作用する波圧について精力的に実験研究が進められた。ここでは原子力施設に設置された防潮堤を念頭に実施された4つの津波波圧実験による研究成果について紹介する。1つ目と2つ目の研究は、防潮堤に作用する津波波圧の特徴および、その評価方法について議論されたものであり、3つ目と4つ目の研究は、特徴的な立地環境下での防潮堤に作用する波圧の評価方法について議論されたものである。

まずは、著者ら²⁾の研究であり、シリーズその1でも

Hydraulic experiments on tsunami wave pressure and their applications-Part2 Experiments for design-: Naoto Kihara, Hideki Kaida.

(2016年9月29日 受理)

【前回のタイトル】

第1回 津波波力に関する基礎的な実験

紹介した津波・氾濫水路を用いた大規模水理実験によって防潮堤に作用する研究波圧を調べた研究である。この実験では、平坦な陸上に設置された高さ1.5m、厚さ0.3m、幅は4mで、水路を横切るように設置された直立防潮堤に作用する津波波圧が計測されている。防潮堤前面に圧力センサを0.05mから0.1m間隔で縦一列に並べることにより、防潮堤に水平に作用する津波波圧の鉛直分布が計測されている。実験で用いられた波形は、防潮堤前面での最大浸水深が1.2mの非越流れから2.2mの越流れまで6種類あり、流れの継続時間は80秒以上で、室内実験で用いられる波形としては、流れの継続時間が非常に長い点が特徴である。この実験により、シリーズその1で紹介した時間的に変化する津波波圧の特徴を明らかにすると共に、津波先端部が防潮堤に衝突した際に発生する衝撃波圧を、先端速度および先端部の水面勾配から推定できることが示された。また、津波の防潮堤到達後、数秒間で防潮堤前面において反射波となる跳水が生成され、その間は動圧の寄与が大きい。ただし、津波到達から10秒程度で、防潮堤に作用する波圧は防潮堤上流側での静水圧とほぼ一致する。すなわち、持続波圧となる。なお、防潮堤前面での浸水深から推定される波圧の推定精度は非常に高く、推定値と計測値のばらつきを表す対数標準偏差は0.013であった。

次に、水深係数 α とフルード数 Fr の関係に着目して防潮堤に作用する波圧を調べた実験³⁾について紹介する。水深係数とは、防潮堤前面に作用する各高さでの最大波圧 $p_{z\max}$ と、防潮堤が設置されていない条件での流れである通過波における浸水深 h との関係を表すパラメータであり、次式における α に相当する。

$$p_{z\max} = \rho_w g(\alpha h - z)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 z は地面からの高さである。この研究の実験では、ピストン型の造波水路が用いられ、縮尺1/40と1/10の2種類のスケールが想定されており、高さ1mと高さ1.2mの直立防潮堤に作用する波圧が調べられている。文献に基づき、前者を中規模水理試験、後者を大規模水理試験と呼ぶ。中規模水理試験においては、高さ方向に0.1m間隔で、大規模試験においては高さ方向に0.3m間隔で、防潮堤前面において圧力が計測されている。中規模試験の波形は、周期が5秒程度の孤立波で、防潮堤設置位置での通過波における最大浸水深は0.25mである。一方大規模試験の波形は、周期が15秒と20秒の正弦波であり、防潮堤設置位置での通過波における最大浸水深は0.75mである。実験より、通過波のフルード数が増加するにつれて水深係数も増加する結果が示されている。

次に、盛土の背後に設置された防潮堤に作用する津波波圧を調べた実験について紹介する(図1)⁴⁾。長さ

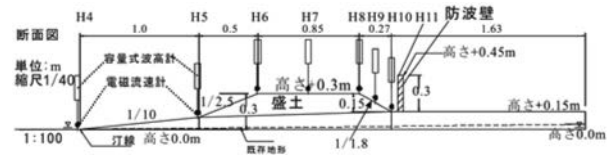


図1 盛土背後に設置された防潮堤(防波壁)に作用する波圧評価実験での防潮堤設置環境(松山ら⁴⁾の図-1(b)を引用)

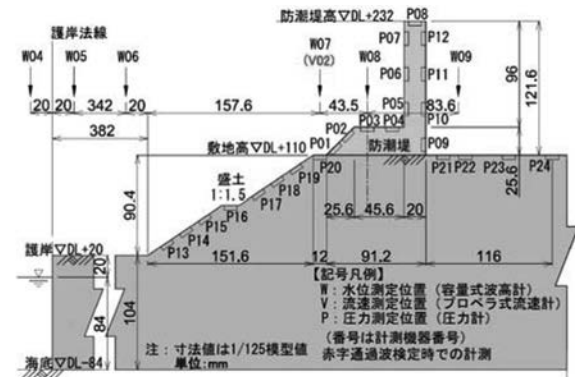


図2 盛土上に設置された防潮堤(防波壁)に作用する波圧評価実験での防潮堤設置環境(大村ら⁵⁾の図-4を引用)

205m、幅3.5mの大型造波水路において縮尺1/40の想定で実施されたものである。防潮堤の高さは0.3mであり、静水面を基準とした標高で0.45mである。防潮堤の海側に設置された盛土の天端の標高は0.3mである。陸域近傍での流れの継続時間は20秒程度であり、造波する津波高さを変えることで、防潮堤の越流有り/無し条件での実験が実施された。この実験により、防潮堤に水平に作用する波力の最大値は、上流側での浸水深の静水圧による波力と同等となることが示されている。また、防潮堤に作用する津波波圧が有するこの特徴により、防潮堤前面での浸水深に対して盛土が与える影響が微小であることから、防潮堤に作用する波圧に対して盛土が与える影響も微小となることが示された。

次に、盛土上に設置された防潮堤に作用する津波波圧を調べた実験について紹介する(図2)⁵⁾。ポンプ式の津波造波装置を持った水路で実験されており、縮尺1/125の想定で実施されたものである。波形はフルードの相似則で現地スケールに換算して5分と20分の2種類の周期の孤立波、および、それらの重ね合わせであり、流れの継続時間が比較的長い。また、国土交通省による波浪計測網である全国港湾海洋波浪情報網ナウファス(Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS)によって、岩手南部沖GPS波浪計で計測された東北地方太平洋沖地震津波の波形と同様に、長周期波形の上に短周期波形が重なった波形が実験で用いられている点が特徴的である。静水面からの高さ20mmの護岸の背後に110mmの高さの敷地が設置されており、敷地上に高さ90mm、法勾配1:1.5の盛土があり、さらに盛土上に高さ122mmの防潮堤が設置されてい

る。そして、盛土、防潮堤前面・天端面・背面、および背後地面で圧力が計測されている。この実験では、水位変動が緩やかであり、さらに盛土の効果により津波先端部が防潮堤に衝突することがないため衝撃波圧は発生せず、主に静水圧分布の持続波圧が計測されている。そして、防潮堤に設置された各圧力センサにおいて計測された最大波圧は、防潮堤前面での最大水位での静水圧とほぼ一致することが報告されている。

以上の4つの実験研究を踏まえて、防潮堤に作用する津波波圧の評価について以下で解説する。防潮堤の立地環境によっては、津波の先端部が切り立ち、高流速で防潮堤に衝突する場合がある。この場合、衝撃波圧が発生する。ただし、盛土や急斜面の地形の上に設置された防潮堤に対しては、先端部がほぼ平坦となることから衝撃波圧が発生しない、もしくは、発生したとしても無視できるほど小さい。津波到達後、数秒で防潮堤前面から反射波となる跳水が生成され、その間、動圧の寄与が大きな波圧が生じる。ただし、10秒程度経過すると、反射波が上流側へ伝播されることにより、防潮堤直前面での流れが停滞する。その結果、防潮堤に作用する波圧は防潮堤上流側での静水圧とほぼ一致する。すなわち、津波先端到達直後や短時間での急激な水位変動が生じない限り、防潮堤前面での浸水深に規定される静水圧とほぼ同じ波圧が防潮堤に作用する。

なお、防潮堤が設置されていない流れ、すなわち通過波の諸元から水深係数を推定する方法があるが、防潮堤のように周辺流れ場に対して顕著に影響を与える施設に作用する波圧の推定において、通過波が持つ代表性には疑問がある。水理実験のように、正弦波や孤立波といった単純形状の津波が、単純形状の地形上に設置された防潮堤に真っ直ぐ向かってくる場合には、その実験の系において通過波が波圧を表す一定の代表性を有することは理解できる。しかしながら実際には、数百メートルから数キロメートルに伸びる防潮堤に非一様な高さかつ様々な方向から津波が到達すると、防潮堤から非一様な反射波が発生する。その反射波の影響を受けながら、継続する押し波によって防潮堤に沿って非一様に水位上昇が生じる。すなわち、防潮堤に作用する波圧は、押し波だけでなく、防潮堤やその周辺地形による影響が混在した流れ場によって規定されるものであり、防潮堤の影響を受けていない通過波の情報だけでは規定されない。このことから、防潮堤に作用する波圧の評価には、防潮堤の影響を受けた流れ場の諸元を用いるべきであろう。

2. タンク

2011年の東北地方太平洋沖地震では、原子力発電所に設置されている石油貯蔵用の大型タンクの倒壊が生じた。タンクの津波による損傷モードとして、滑動・転倒・浮遊・座屈が想定される。炉心冷却のバックアップ

用冷却水を貯水する復水タンクや、非常用ディーゼル発電機の燃料を貯油する軽油タンクは、原子力発電施設の安全上重要な施設である。そのため、これらのタンクに対する耐津波評価は重要であり、東北地方太平洋沖地震津波以前から現在に至るまで、タンクに作用する津波波力を推定する手法の提案や、波力の作用に対する石油タンクの安定性に関する検討が進められてきた。

まず、円筒形のタンクに作用する波圧・波力評価実験から整理された特徴とその推定手法について解説する。榊山⁶⁾では、長さ205m、幅3.4mの造波水路内の一様勾配斜面上(勾配1/215)に、タンクを単体・横列・縦列・格子状に設置した敷地模型を設置して、敷地に遡上させた津波をタンクに作用させる水理実験(縮尺1/75)が行われた。タンクを設置したケース/しないケース双方の実験が行われており、タンクを設置しないケースでは、いわゆる通過波の浸水深・流速が、タンクの設置位置を含む複数地点において計測されている。タンクを設置したケースでは、浸水深と流速に加えて、タンク周囲の水位と圧力、水平荷重と鉛直荷重が計測されている。図3は実験の様子であり、図の左側から津波が進行している。タンクの上流側前面で水位が上昇している一方、側面から背面にかけて水位が急激に低下していることが分かる。図4はタンク周囲の無次元最大水位(図4左図、タンクの円周上の最大水位を通過波の浸水深 ζ_0 で無次元化したもの)と無次元最大圧力分布(図4右図、敷地床面から0.02m地点におけるタンク円周上での最大圧力を $\rho g \zeta_0$ で無次元化したもの)である。両図とも、左側から津波が進行している。常流時($Fr < 1$)には津波がタンク



図3 タンクに作用する津波波圧に関する実験の様子⁶⁾

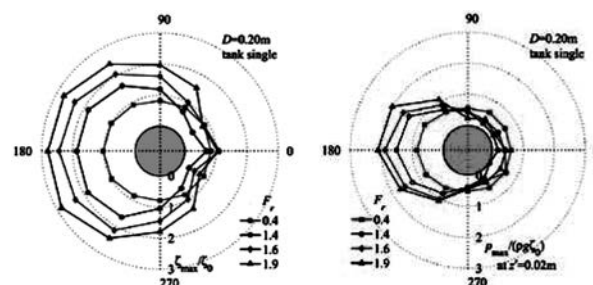


図4 無次元最大水位(左図)および無次元最大圧力(右図)の分布(榊山⁶⁾の図-12を引用)

背面にも回り込み、水位差がほとんど生じない一方、射流時($Fr > 1$)にはタンク前後の水位差が大きくなる。特に射流時には、タンク前面に大きな波圧が作用することが分かる。一方、このとき背面に作用する波圧は小さく、その結果水平方向の波力が強く作用することとなる。このようなタンクに作用する波圧の特徴から、タンクに作用する水平波力を推定する際には、その周囲の水位分布を知ることが重要となる。

藤井ら⁷⁾は、大型平面水槽を用いて、円筒形タンクに作用する波圧・波力に関する水理実験(縮尺 1/100)を実施した。実験は、波高、周期、タンクの直径、タンクの有無および配置、防油堤の有無などを組み合わせて行われ、通過波の浸水深と、タンク周囲に沿った水位および波圧が計測されている。そして、通過波の浸水深を用いることにより、水平波力が最大になる時刻におけるタンクの周囲の津波水位をフーリエ級数により近似できることを示した。この実験結果に基づき、総務省消防庁⁸⁾により、タンクに作用する波力算定手法が提案されている(以下、消防庁式)。消防庁式では、上記手法によりタンク周囲の水位分布を予測し、静水圧分布を仮定してタンク周囲の波圧を計算・積分することにより水平波力が推定される。 Fr に依存する係数を水位分布の推定に導入している点が消防庁式の特徴である。ただし、消防庁式の構築に利用された実験データの範囲は、 $Fr \leq 1.5$ に限られており、高 Fr の条件下での検証は行われていない。また、図4右図に示したタンク底部の無次元圧力の分布から、射流時にはタンクの側壁の背面部において無次元最大圧力が1以下であることから、静水圧分布を仮定した消防庁式が実験結果を過大評価することが分かる。

そこで、佐野ら⁹⁾は、榊山⁶⁾による実験結果と数値解析結果を基に、高 Fr 領域におけるタンク周囲の流動現象を検討し、タンク周囲の流動で生じる動圧を考慮した動圧項を導入することにより、高 Fr においても実験結果と良好に一致する波力評価式を提案した。この動圧項は、タンク周囲の表面流速と底部流速の差に起因する動圧差で表される。提案された評価式は、 $Fr \leq 1.9$ の領域では水平波力を良好に推定することができる。

上記のようにタンクに作用する波圧評価のための実験に加えて、津波波圧実験と数値解析とを組み合わせることで、タンクの津波に対する安定性評価も実施されている。榊山ら¹⁰⁾は、まず、タンクに作用する水平・鉛直方向の津波波力を計測する水理実験を行った。次いで、汎用構造解析コード ABAQUS を用いた座屈解析を行った。ここでは、水理実験により得られたタンク側壁の周方向の圧縮応力が最大になる瞬間の波圧分布が外力として与えられている。そして、単純な円筒状の静水圧分布を与えた場合とは異なり、波圧が強く作用する箇所に局部的に座屈が生じることを示すとともに(図5)、運用時の最低油位の低い小型タンクに対する弾塑性解析によ

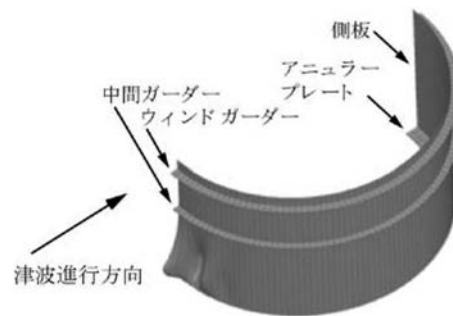


図5 直径 26.16m の浮き屋根式大型石油タンクの座屈解析の結果(座屈1次モード)。変位量を 1000 倍にして表示している(榊山ら¹⁰⁾による図-15を引用)。

り、油位が低い場合には座屈発生までの余裕が小さくなることが示されている。このように、波圧実験結果を、津波に対するタンクの安定性評価に活用できる。

3. 配管

原子力発電施設において復水タンクと原子炉建屋を繋ぐ配管などは炉心冷却を維持する上で重要な設備であるため、屋外配管を対象とした津波波力実験も実施されている。津波波力作用時の主要な損傷モードとして、縦型円柱タンクの場合には、上述したように転倒・滑動・浮遊・座屈が想定されるため、安定性評価においてタンク側面・床面に作用する波圧分布の推定が必要となる。一方、屋外配管の場合には、配管系全体における曲げによる損傷が想定されることから、配管軸方向の波力分布が必要となる。また、流体励起振動にも留意する必要がある。そのため、タンクと配管では両者共に円柱形の設備であるが、必要となる波圧・波力情報が異なる。

一様流中の円柱体に作用する流体力に関しては古くから研究されているが、津波等の非定常性な自由水面を持つ流れ場に設置された円柱に作用する流体力に関する実験例は多くない。米国の FEMA ガイドラインの基となっている実験では、水平な床上に立てられた円柱に、ゲート急開によって発生された段波を衝突・流下させることにより、円柱に作用する水平波力を計測し、抗力係数が1から2の間の値となることが示されている。一方、津波は非定常で水面を有するため、配管に接触した際に衝撃的な荷重が生じ、非定常性に起因した慣性力が発生する。この特徴を波力評価に取り込む検討もされている。渡邊ら¹¹⁾では、実験水路中に水平配管を設置し、ゲート急開によって発生させた段波によって水平配管に作用する波力が計測されており、実験結果および再現計算結果を基に、波力評価方法が検討されている。波浪によって配管に作用する波力評価には、抗力と慣性力とで構成されるモリソン式がしばしば用いられる。それに加えて、津波が配管に衝突した際には、液面と固体の衝突に伴って単発型の衝撃波圧が発生することもあるため、モリソン式に衝撃力項を付加することにより、その衝撃

波圧による波力が評価される。さらに、変動流体力項も付加することにより、後流渦によって励起される変動揚力も評価される。新しい波力評価式を用いることにより、抗力のみで波力が表される FEMA ガイドラインの式よりも精度良く波力が評価されることが示されている。

Ⅲ. 波圧評価実験に今後期待されること

震災後、原子力施設を対象とした波圧・波力実験が多数実施され、その評価方法が高度化されてきた。その一方で、評価式が多数提案されたことにより、与えられた条件に対する適切な評価式の選定や、各々の評価式の精度を認識することの重要性は高まった。ほとんどの評価式は、津波波圧実験の結果に基づいているため、誤った評価式は無いはずである。ただし、入力条件や適用条件、また推定される波圧の意味が異なる点に留意する必要がある。これらの点を明確にするための議論が今後望まれる。

実験を通して得られた波圧に関する知見は、施設の耐津波性能の評価に活用される。耐津波性能の評価には、波圧評価だけでなく、波圧作用時における施設・構造物の応答の評価も必要となる。波圧作用と構造物応答の両者を併せて実験で評価する上で、相似則が課題になる。実際の津波の高さと長さのスケールを考慮すると水理実験では縮尺模型実験を実施せざるをえない。その時、流れに対する相似則にはフルード則が採用されることが一般的であるが、構造物側の応答は当然フルード則に従わない。したがって、小スケールでの室内実験では、津波の作用と構造物の応答の両者を併せて評価することが難しい。この理由により、津波による波圧等の作用の評価と、構造物の応答の評価を分離させた実験が実施されてきた。ただし、近年、大規模な津波実験が可能となってきた。そのため、波圧や波力といった作用の評価だけでなく、波圧・波力作用時における構造物の応答・損傷の評価も含めた流体・構造連成の試験が可能であろう。そうすることにより、波圧評価技術だけでなく、津波作用時における構造評価技術の検証データも取得でき、実務における耐津波評価において非常に有用である。

－ 参考資料 －

- 1) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則, 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.911-915, 2000.
- 2) Kihara, N., Niida, Y., Takabatake, D., Kaida, H., Shibayama, A., Miyagawa, Y., Large-scale experiments on tsunami-induced pressure on a vertical tide wall, Coast. Eng., Vol.99, pp.46-63, 2015.
- 3) 石田暢生, 森谷寛, 中村英孝, 飯島亨, 川内英史, 防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について, NRA 技術報告, NTEC-2014-4001, 2014.
- 4) 松山昌史, 内野大介, 橋和正, 田中良仁, 榊山勉, 仲村治朗, 稲葉大介, 盛土を越流する津波に対する防波壁の効果に関する実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 68 巻, 第 2 号, pp.I_236-I_240, 2012.
- 5) 大村英昭, 尾崎充弘, 平田一穂, 秋山義信, 岩前伸幸, 池谷毅, 波形特性を再現した防潮堤に作用する津波波力実験, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 第 70 巻, 第 2 号, pp.I_432-I_437, 2014.
- 6) 榊山勉, 津波遡上流によるタンクに作用する流体力に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 70 巻, 第 2 号, pp.I_891-I_895, 2014.
- 7) 藤井直樹, 大森政則, 池谷毅, 稲垣聡, 石油タンクに作用する津波波力と被害予測手法, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.271-275, 2006.
- 8) 総務省消防庁, 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書, 325p, 2009.
- 9) 佐野理志, 石井英二, 後藤祥広, 池末俊一, 串岡清則, 羽田野琢磨, 榊山勉, 森北豊一, 単体の円筒タンクに作用する高フルード数領域を考慮した津波波力評価式の提案, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 第 71 巻, 第 2 号, pp.I_581-I_586, 2015.
- 10) 榊山勉, 松山昌史, 松浦真一, 河島宏治, 佐野正和, 石油タンクに作用する津波波力と津波波圧に対する座屈解析, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.836-840, 2007.
- 11) 渡邊勝信, 山口敦嗣, 羽田野琢磨, 串岡清則, 熊谷直己, 榊山勉, 森北豊一, 水平配管に作用する津波波力評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 第 71 巻, 第 2 号, pp.I_593-I_598, 2015.

著者紹介

- 木原直人 (きはら・なおと)
本誌, 58[11], P.35(2016)参照。
- 甲斐田秀樹 (かいだ・ひでき)
本誌, 58[11], P.35(2016)参照。

転機を迎えるエネルギー市場

(その7 / 最終回) 気候変動問題と原子力の役割

東京大学 小宮山 涼一

パリ協定では、地球の平均気温上昇を産業革命前に比べ2度未満に抑え、さらに1.5度への抑制に向けて努力する国際目標が定められた。この目標を達成するための厳しい環境制約下では、温室効果ガスを排出せず経済効率的なベースロード電源である原子力発電の役割が重要になること等が国際機関等の見通しで示されている。気候変動対策に資する原子力技術の発展には、イノベーションや市場への導入を促す制度環境の基盤整備とともに、長期的な気候変動対策の中で、原子力がどの程度の役割を果たすべきか、今後とも議論を深めることが不可欠であると考えられる。

KEYWORDS: *climate change, radiative forcing, climate sensitivity, Paris Agreement, IPCC, mitigation, adaptation*

I. はじめに

世界の温室効果ガス排出量の削減には、世界各国が参加する国際枠組みの構築が不可欠であり、2015年12月のCOP21で世界のほぼ全ての国が削減目標を設定するパリ協定が採択された。京都議定書では、世界の排出量の約13%~22%分の国々しか削減義務を課せられなかった状況から大きく改善し、国際的な地球温暖化対策の本格的な実施に向けた機運が高まりつつある。

地球温暖化に代表される気候変動問題への対策には、二酸化炭素等の温室効果ガス排出量を削減する施策(緩和策と呼ばれる)と、長期的な気候の変化に適應するための施策(適応策と呼ばれる)がある。適応策は進行する温暖化の影響に対して、環境や社会のあり方を調整する施策である。この中で、緩和策や適応策の実施に関しては、長期的視点で、社会でのコストとベネフィットを総合的に考えることが必要となる。緩和策は地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出を抑制する施策であり、気候変動の顕在化を予防するための対策となるが、将来の実施のタイミングは、技術開発の動向を考慮しつつ、

費用対効果の観点から検討する必要がある。もし適切な緩和策を講じることができず、将来の気候変動の影響が大きくなった場合、コストの高い適応策に頼らざるを得なくなるため、社会的費用が増加し、また、温暖化による被害額が拡大することで、適切に緩和策を導入実施した場合よりも、社会全体のコストがかえって増加する可能性にも留意する必要がある。一方、過度な緩和策の導入実施により生じるコストが、適応策の実施を考慮した場合の対策コストを上回り、社会全体に余計なコストが課せられる可能性もある。したがって、気候変動問題を考える際は、緩和コスト、適応コスト、および温暖化による影響の被害コストを、長期的な時間軸で総合的に考慮する視点が不可欠となる。

原子力は、温室効果ガスを排出しないエネルギー供給源であること、再生可能エネルギーに比べ安定的なエネルギー供給が可能な技術であることから、気候変動の緩和策として必須のオプションとして内外で認識されており、長期的視点でその役割を検討することが重要である。本稿では、最近の気候変動問題の現況を紹介し、気候変動対策としての原子力の長期的な役割を展望する。

II. 気候変動問題の現状

気候変動に関する国際的課題解決の必要性の高まりを受けて、世界各国が効果的な対策を講じるための科学的知見を提供するため、IPCC (Intergovernmental Panel

Turning point in energy market - (No.7) Climate change issue and the role of nuclear energy : Ryoichi Komiyama.

(2016年10月13日 受理)

【前回のタイトル】(その6)原子力を巡るエネルギー情勢 - 「エネルギー白書2016」に見る内外の動向

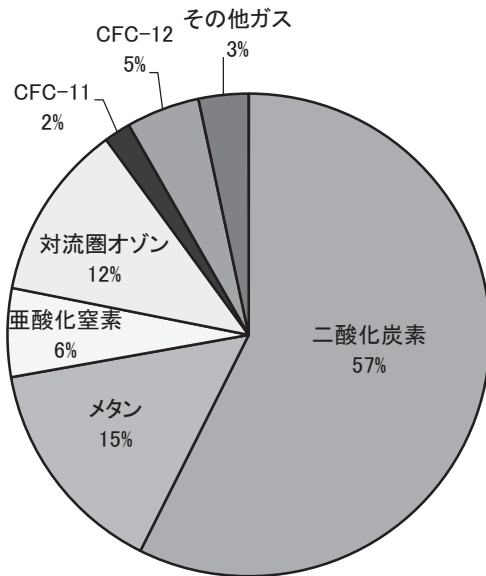


図1 放射強制力増加(1751～2015年)に占める各温室効果ガスの寄与度
(出所)Oak Ridge National Laboratory データベース

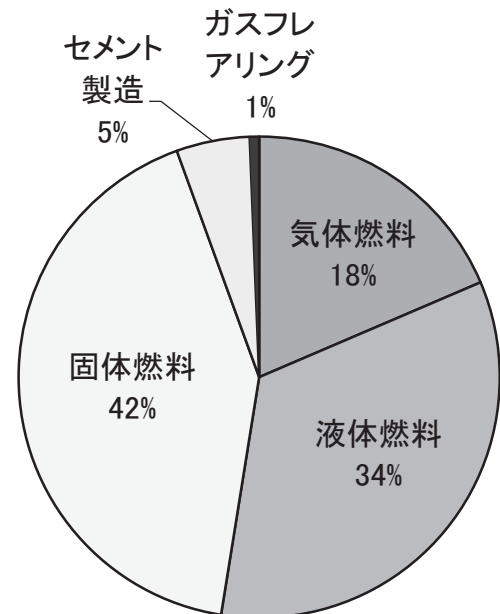


図2 二酸化炭素排出量の燃料別割合(2010年)
(出所)Oak Ridge National Laboratory データベース

on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル)が1988年に設立された。IPCCは人為的な気候変動リスクの科学的知見をとりまとめ、その世界への情報提供を目的として活動を行っている。IPCCが数年毎に発行する評価報告書は気候変動に関する世界中の専門家の科学的知見をまとめた報告書であり、内外の地球温暖化政策に影響力がある。本節では、IPCCによる最新の報告を交えて、最近の気温上昇とその不確実性等を紹介する。

(1) エネルギー問題と地球温暖化

温室効果ガスのなかで、放射強制力の増加を通じて地球温暖化に強く寄与しているのが二酸化炭素である。放射強制力は、成層圏と対流圏との圏界面での下方向放射の強さの変化量であり、地球・大気圏システムのエネルギー出入バランスに与える影響に関する指標である。正の強制力は地表を暖め、負の強制力は地表を冷却することに相当する。1751～2015年の放射強制力の増加を見ると 3.38W/m^2 に達しており、二酸化炭素による放射強制力増加の影響が6割に達している(図1)。また二酸化炭素の排出起源を見ると、その大半が石炭(固体燃料)、石油(液体燃料)、天然ガス(気体燃料)といった化石燃料の燃焼によってもたらされているため(図2)、地球環境問題はエネルギー問題と表裏一体の問題として理解できる。

(2) 世界の平均気温の推移

地球は過去1万年以上にわたり約280ppmの濃度で大気中に存在していた二酸化炭素の温室効果により、温暖な気温(平均約 15°C)に維持され、人類の発展が支えられた。しかし産業革命以降、人類の社会経済活動が拡大

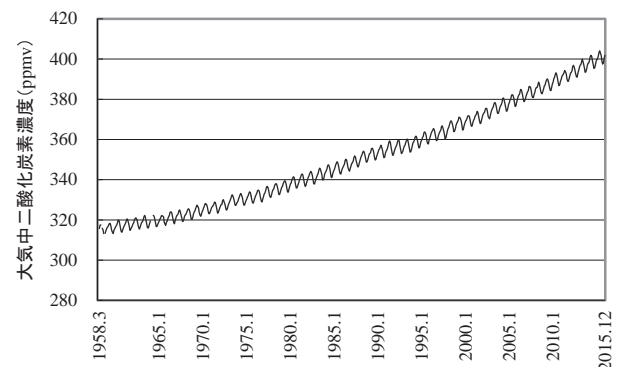


図3 大気中二酸化炭素濃度の推移(ハワイのMauna Loa観測所での二酸化炭素濃度)
(出所)Oak Ridge National Laboratory データベース

して化石燃料の消費増大に伴い、二酸化炭素排出量が増加した。近年は天然ガスによる排出が徐々に増加している。

IPCCによると、2002～2011年の10年間平均で、化石燃料燃焼等により大気中に放出された年間の二酸化炭素等の量は、炭素換算83億トンである。一方、海洋による大気中の二酸化炭素の吸収量は炭素換算24億トン、森林等による吸収量が同16億トンと推定され、大気中に残存する炭素は43億トンと推定されている。これにより、大気中の二酸化炭素濃度は年間約 1.6ppmv (ppmvは100万分の1、容積比)の割合で増加が継続している。大気中の二酸化炭素濃度は徐々に上昇しており、産業革命前の約280ppmから、2015年で平均401ppmに達している(図3)。

一方、地表の平均温度は過去100年当たり約 0.7°C 上昇したが(図4)、この変化の全てを気候システムにおける自然変動に起因すると判断することは難しいと考えら

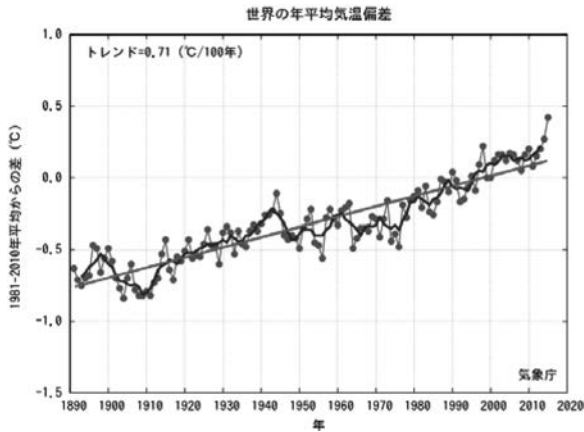


図4 1891～2015年の世界の年平均気温上昇の推移 (出所)気象庁¹⁾

れており、二酸化炭素等の温室効果ガス排出増加の影響が原因として指摘されている。2015年の世界の年平均気温は1891年の観測開始以降、2年連続で過去最高値を更新した(図4)¹⁾。またIPCCは、2013年に発表した第5次評価報告書(AR5)²⁾において、温暖化は確実であり、近代の気候変化の多くは数十年～数千年間で前例がないこと、人類の活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の原因であった可能性が高いことなど、人為的な二酸化炭素排出が地球温暖化を促しているとしている。また現在、放射強制力は徐々に増加しているが、実際の気温上昇は1998年よりしばらく停滞していた。この気温上昇の停滞はhiatus(中断)とたとえられ、hiatus(ハイエタス)問題と呼ばれた。この気温上昇停滞の原因に関して、IPCC AR5²⁾では放射強制力と自然の気候変動の観点から解説されているが、今後の観測や研究の進展で、気候メカニズムの一層の解明が期待される。

またIPCCでは、分野横断的な観点での温暖化リスク評価を行っている。IPCC AR5³⁾では気候変動に伴うリスクが体系的に評価されている(図5)。図5はエンバーダイアグラムと呼ばれており(エンバーは燃えさし(ember)の意味)、白黒の濃淡は4段階の危険度に対応している。二酸化炭素の排出量の増加につれ、気温上昇、降水量の変化等を通じて、様々な気候の変化、海面上昇、海洋酸性化、極端な気象事象の顕在化などの影響が懸念されている。

(3) 温室効果ガスと気温の関係

IPCC AR5は新たな知見として、二酸化炭素の累積総排出量と世界平均地上気温は、ほぼ比例関係にあることを指摘した(図6)²⁾。この知見に基づき、2100年の世界の平均気温上昇を2度以内に抑制するためには、累積排出量を炭素換算7,900億トンへ抑制することが必要であるとしている。19世紀末から2011年までの約100年間の世界の累積排出量は5,150億トンに達していることから、今世紀末までに2度上昇以内に抑制するためには、

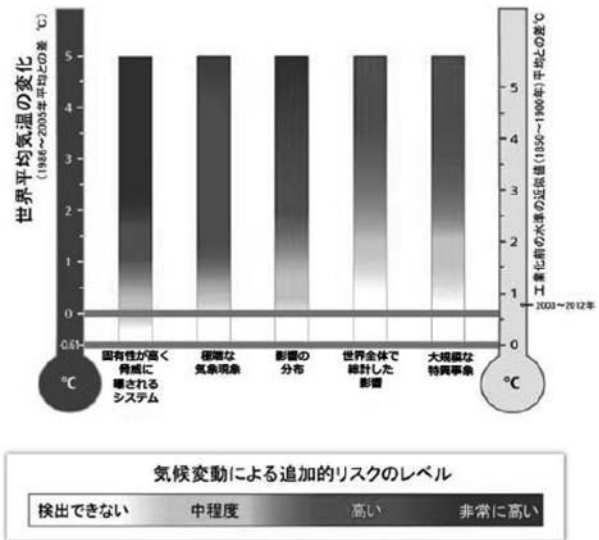


図5 気候変動のリスク (出所)IPCC WG2 AR5³⁾(環境省邦訳版)

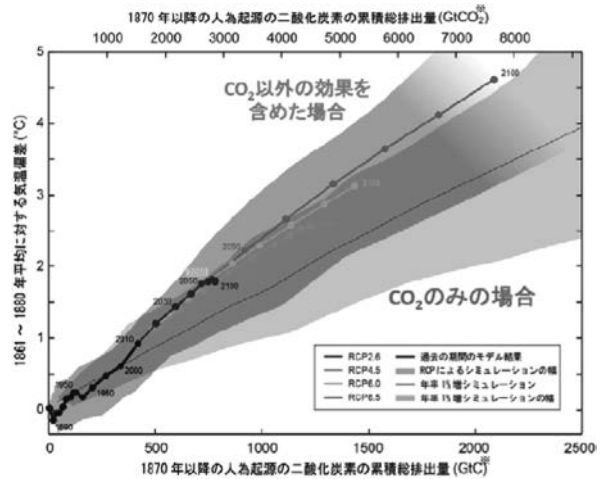


図6 累積CO2排出量と平均気温上昇の関係 (出所)IPCC WG1 AR5²⁾(環境省邦訳版)

2100年までの今後約90年間で許容される累積排出量を2,750億トン程度に制約することが必要となる。

またIPCC AR5²⁾では、将来の気温上昇を予測する上での重要な指標である平衡気候感度(二酸化炭素濃度の倍増により、平均気温が何度上昇するかを表す指標)に関して新たな知見を発表し、1.5～4.5度の確率が高いとしたが、最良推定値では合意できなかった。この数値は、前回の2007年の第4次評価報告書(AR4)⁴⁾での推定値2.0～4.5度や最良推定値3.0度に比べ、今回は最良推定値で合意できないなど、気候メカニズムに関する不確実性が増していると言える。AR5での気候感度の数値は、2001年の第3次評価報告書(TAR)⁵⁾等での報告と同程度となっている。このように気候感度には不確実性があるため、2100年の気温上昇を2度や1.5度以内に抑制するために許容される世界の二酸化炭素排出量やその排出パスにも不確実性が生じる。したがって気候メカニズムの不確実性、およびそれに起因する温暖化による社

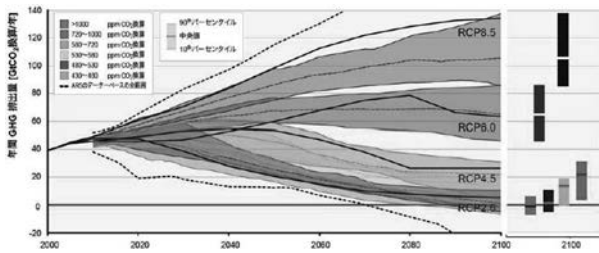


図7 2100年までの温室効果ガス排出パス
(出所)IPCC WG3 AR5⁸⁾(環境省邦訳版)

表1 21世紀末での世界平均地上気温の変化の予測
(1986~2005年平均を基準とした予測値)

	シナリオ	2081~2100年	
		平均	予測値の幅
世界の平均気温の上昇値(°C)	RCP2.6	1.0	0.3~1.7
	RCP4.5	1.8	1.1~2.6
	RCP6.0	2.2	1.4~3.1
	RCP8.5	3.7	2.6~4.8

(出所)IPCC WG3 AR5⁸⁾

会経済影響の不確実性を総合的に理解して、最新の科学的知見を踏まえ、不確実性に柔軟に対応できる内外での戦略の構築が必要であると考えられる。また、パリ協定で合意された2度目標は必ずしも科学的知見に基づき世界に広く認められた目標ではなく⁶⁾、政治的に合意された目標であり、2度目標達成は現実的にはハードルが高いとする見方もある⁷⁾。

(4)地球温暖化の将来シナリオ

IPCCの第5次評価報告書(AR5)では代表的濃度経路(RCPs: Representative Concentration Pathways)と呼ばれる4つの排出シナリオが定義された。これは将来の温室効果ガス安定化水準とそこに至る排出経路のうち、代表的経路を選択したシナリオである(図7)。そのシナリオの数値が大きいほど、2100年の放射強制力(温暖化を引き起こす効果)が大きいことを意味し、2100年の1750年に対する放射強制力により区別されている(RCP2.6シナリオでは約2.6W/m², RCP4.5シナリオでは約4.5W/m², RCP6.0シナリオでは約6.0W/m², RCP8.5シナリオでは約8.5W/m²)。2081~2100年の世界の平均気温の1986~2005年平均に対する上昇量は、4つの各シナリオで1.0~3.7度と予測されている(表1)。

Ⅲ. 気候変動問題と原子力の役割

パリ協定では、世界の大半の国に対して、温室効果ガス排出削減に公平に取り組むことを法的に求める国際枠組が構築された。同協定では、地球の平均気温上昇を産業革命前に比べ2度未満に抑え、1.5度に抑制できるように努力するとの目標が掲げられ、さらに世界の温室効果ガス排出を早期にピークアウトさせた後、大幅に削減し、今世紀後半までに人為起源排出量と吸収源(シンク)

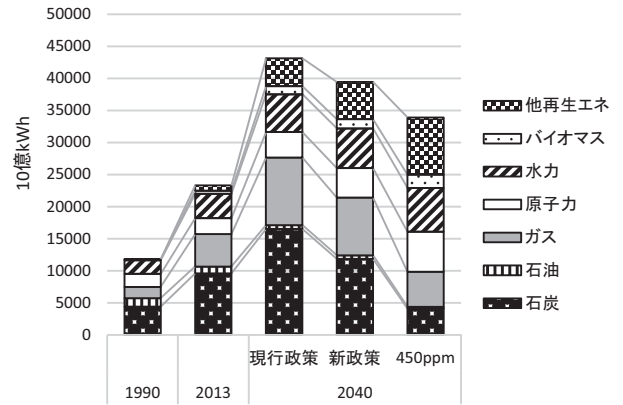


図8 電源構成の展望(~2040年, 世界)
(出所)IEA/OECD⁹⁾

による吸収量を均衡することが必要であるとされた。

このような排出パスを実現するためのエネルギーミックスの具体的検討が世界で行われている。国際エネルギー機関の見通し「World Energy Outlook 2015」によれば⁹⁾、世界平均気温上昇を2度に抑制するには原子力、再エネ、省エネが重要な役割を担うことが示唆されている。2度目標と整合性の高い450ppmシナリオでは、2040年における世界の原子力と再エネ合計の電源比率は約7割に達する(図8)。2040年の原子力の電源比率は、2013年の11%から、蓋然的なケース(現行政策ケース)で9%、新政策シナリオで12%、450ppmシナリオで18%に達しており、国際機関の見通しでも、原子力は気候変動対策を強化する上で重要な電源として位置付けられている。

2100年という超長期的視点で、2度目標達成のための世界のエネルギーミックスの検討も内外で行われている。IPCC AR5⁸⁾では、2度目標を達成するため、2100年の温室効果ガス濃度を430~480ppmに安定化するためには、世界の一次エネルギー供給に占める低炭素エネルギー供給(再生可能エネルギー、原子力、CCSまたはBECCS(バイオマスCCS))の比率を2100年までに9割まで拡大することが必要であることが示唆されている。また、核燃料サイクル技術を考慮して世界のエネルギーのベストミックスを分析した文献¹⁰⁾によれば、2度目標と整合性の高い温室効果ガス排出制約の下では、世界の発電構成は、21世紀後期にかけて二酸化炭素排出原単位の大い石炭火力は大幅に減少し、原子力の導入が着実に拡大する(図9)。そのなかで、今世紀後半に、可採年数約70年のウラン資源が枯渇化するため、ウラン資源に頼る軽水炉の導入拡大がピークアウトする。一方、核燃料サイクル技術により、枯渇化するウラン以外の核燃料として、プルトニウムの持続的利用が可能になるため、今世紀半ばより2100年にかけて軽水炉にかわり高速増殖炉の導入が進み、発電構成に占める原子力の比率は一定割合で維持される(図9)。この結果は、核燃料サ

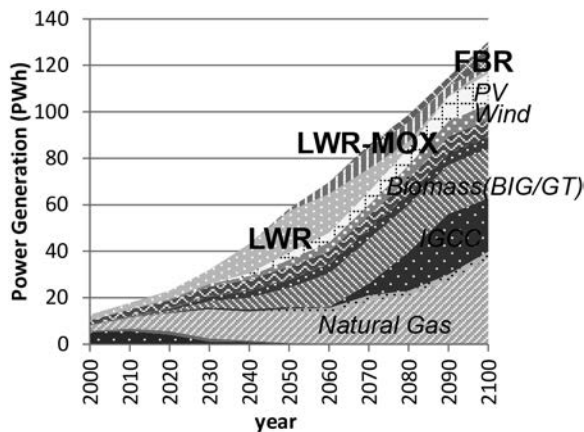


図9 温室効果ガス排出制約下での世界の電源構成(LWR：軽水炉，LWR-MOX：MOX 燃焼軽水炉，FBR：高速増殖炉)¹⁰⁾

イクルや高速増殖炉等を活用できれば，ウランの資源制約を克服して，厳しい環境制約の中で，2100年にかけて原子力利用を維持することが可能になることを示唆している。このため，気候変動対策を今後着実に進めるためには，プルトニウム利用や，ウランのリサイクル利用により原子力の資源価値を引き上げるといった核燃料サイクル技術の意義を正確に理解し，グローバルな視点から超長期的視野で先進的な原子力技術開発を進めることが重要であると考えられる。

また IPCC 報告書では⁸⁾，2 度目標と整合性のある 2100 年に温室効果ガス濃度を 430～530ppm とするシナリオでは，2100 年の二酸化炭素限界削減費用は約 1,000～3,000 ドル/トンに達すると報告されている。しかしこの限界費用は原油価格に換算すれば，バレル当たり 400～1,200 ドルもの油価上昇に相当するため，こうした限界費用の高い削減策を現実に実行することは大変困難であり，原子力技術を含めた気候変動対策のイノベーションが不可欠である。そのため幅広い分野でイノベーションを促す社会経済環境の基盤整備が重要であると考えられる。

IV. まとめ

パリ協定では，地球の平均気温上昇を産業革命前に比べ 2 度未満に抑制する目標が，国際政治的合意の上で設定されたため，気候変動とその影響に関する不確実性は現時点では依然として大きい，その目標達成に向けた対策強化が不可欠である。

その中で原子力発電は温室効果ガスを排出しない経済効率的なベースロード電源であり，温暖化抑制策としての役割が重要になることが内外の見通しで示されているが，足元では，世界の原子力の発電比率は 1993 年以降，低下傾向にある。背景として，福島原発事故以降の社会受容性の問題や，国際的な電力自由化による運転リスクの顕在化，規制のリスク，シェールガスや再エネ等の競

合資源の台頭等が挙げられる。温暖化抑制という社会経済的な要請の中で，原子力エネルギーを今後も継続的に利用するためには，これらの課題の克服に資する原子力技術のイノベーションや制度設計が必要であり，技術面では，安全性をさらに高めた原子力技術(高温ガス炉等)や廃棄物処分問題の解決に貢献する技術(核変換処理，大深度処分等)の研究開発がより一層重要になると考えられる。制度面では，国際的なエネルギー市場改革の中では，短期的な効率性の高い技術が近視眼的に選択される一方，原子力発電などの資本集約的で事業面での不確実性を伴う技術への投資が抑制され，原子力等を活用した長期的に効率性の高い気候変動対策への取組が停滞する可能性がある。原子力技術の発展に資する総合的な研究開発，制度環境を整備することとともに，長期的な気候変動対策の中で，原子力がどの程度の役割を果たすべきか，今後とも議論を深めることが不可欠であると考えられる。なお本稿中の図を詳細に知りたい読者におかれては，参考資料にある各図の出典を確認されたい。

— 参考資料 —

- 1) 気象庁；世界の年平均気温
< http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html >
- 2) IPCC WG1; Fifth Assessment Report: The Physical Science Basis, Cambridge University Press (2013).
- 3) IPCC WG2; Fifth Assessment Report: Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press (2014).
- 4) IPCC WG1; Forth Assessment Report: The scientific basis, Cambridge University Press (2007).
- 5) IPCC WG1; Third Assessment Report, Cambridge University Press (2001).
- 6) R. Knutti, J. Rogelji, J. Sedláček, E.M. Fischer; A scientific critique of the two-degree climate change target, Nature Geoscience 9, 13-18 (2016).
- 7) D. Victor, C.F. Kennel; Climate policy: ditch the 2 C warming goal, Nature 514, 30-31 (2014).
- 8) IPCC WG3; Fifth Assessment Report: Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press (2014).
- 9) IEA/OECD, World Energy Outlook 2015, OECD, Paris, 2015.
- 10) Fujii, Y. and Komiyama, R., Chapter 5: Long-Term Energy and Environmental Strategies, J. Ahn et. al. (Eds) Reflections on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Toward Social-Scientific Literacy and Engineering Resilience, Springer (2014).

著者紹介



小宮山涼一 (こみやま・りょういち)

東京大学

(専門分野/関心分野) エネルギー需給分析，電力システム，エネルギー安全保障

報告

平成 28 年度供給計画の概要と取りまとめについて

電力広域的運営推進機関 寺島 一希

電力広域的運営推進機関(以下「広域機関」という。)は、平成 23 年 3 月の東日本大震災後に発生した電力需給のひっ迫を契機に、国の「電力システムに関する改革方針」(平成 25 年 4 月 2 日閣議決定)にて示された電気事業の広域的運営を推進することを目的として設立された。

本稿では、本年 4 月の電力システム改革第 2 段階導入後初めてとなる供給計画を広域機関が取りまとめたので、その概要を紹介する。

KEYWORDS: *Electricity Supply Plan, OCCTO, Electricity System Reform, Electric power deregulation, Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators JAPAN*

I. はじめに

広域機関は、平成 23 年 3 月の東日本大震災後に発生した電力需給のひっ迫を契機に、国の「電力システムに関する改革方針」(平成 25 年 4 月 2 日閣議決定)にて示された電気事業の広域的運営を推進することを目的として設立された。この改革全体は 3 つの段階によって進められている(図 1)が、広域機関はその第 1 段階として位置付けられ、昨年 4 月 1 日に発足した。第 2 段階の小売全面自由化や、電気事業者の事業類型の変更(いわゆる「ライセンス制」の導入)などは、広域機関の業務に密接に関係があるため、発足後 1 年かけて第 2 段階に向けた準備を進めてきたところである。

本稿では、本年 4 月の第 2 段階導入後初めてとなる供給計画の取りまとめを行ったので、その概要を中心に紹介する。

II. 広域機関の業務と電力システム改革第 2 段階

広域機関の業務は主として計画業務、運用業務、電力システム利用者間の紛争解決サービスに大別される。

そのうち計画業務としては、電気事業法(以下「法」という。)において電気事業者に提出が義務付けられている供給計画の取りまとめ、日本の基幹送電系統である広域連系系統(主に上位 2 電圧の基幹系統)の設備形成計画の立案、発電所などの電力システムへの接続検討などを行う系統アクセス業務から成る。

また運用業務は、広域連系系統の監視、需給状況悪化時の指示、一般送配電事業者供給区域間を結ぶ連系線の

Outline of Electricity Supply Plans JFY 2016: Kazuki Terashima.

(2016 年 10 月 27 日 受理)

	2015年度	2016年度	～	2020年度
第1段階	2015/4/1 電力広域的運営推進機関 業務開始			
第2段階		2016/4/1 小売全面自由化 ライセンス制		
第3段階				2020/4/1 送配電部門の法的分離 【小売料金規制解除】

図 1 電力システム改革スケジュール

管理、広域周波数調整、広域連系系統設備の作業停止計画調整、系統情報公表などから成る。

電力システム改革第 2 段階のうち、小売の全面自由化と並んで大きな制度改革となったものが「ライセンス制」の導入である。旧法においては、電気事業者の類型としては、一般電気事業者、卸電気事業者、特定電気事業者、特定規模電気事業者(新電力)の 4 類型が定められていた。しかし、今回のライセンス制導入にて、発電事業、送配電事業(一般送配電事業、送電事業、特定送配電事業)、小売電気事業のライセンスを有する者に再分類された。(図 2)

これにより、一定の要件を満たす発電設備を所有する者(発電事業者)が新たに電気事業者となり、法に基づき広域機関の会員となった。同時に、発送小売一貫の電気事業制度の下で行なわれていた電気事業の運営について様々な見直しを行うこととなったが、その一つが供給計画のとりまとめである。

III. 平成 28 年度供給計画の概要

1. 供給計画について

供給計画とは、法第 29 条に基づき電気事業者が作成する今後 10 年間の電気の供給並びに電気工作物の設置

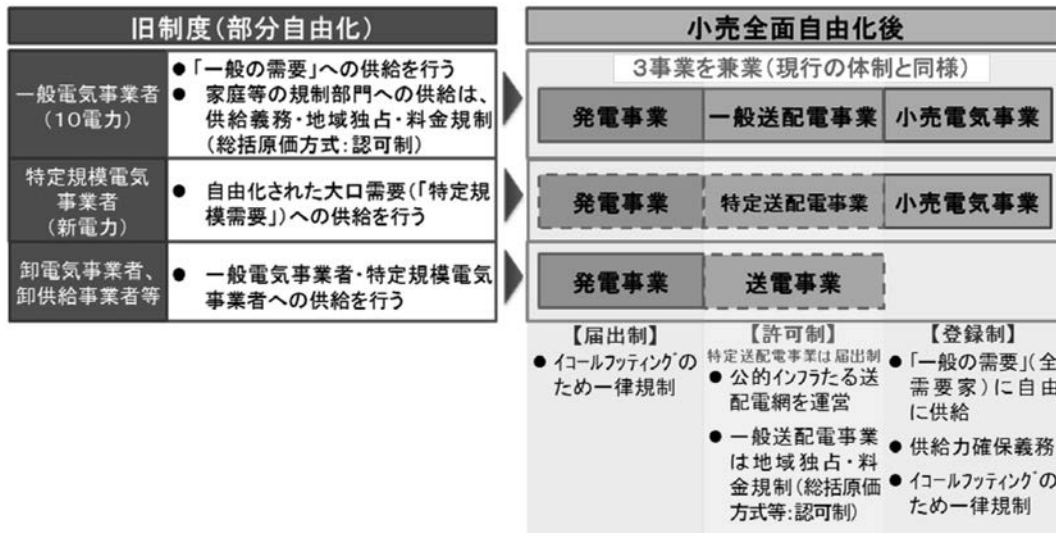


図2 電気事業の類型変更(ライセンス制の導入)

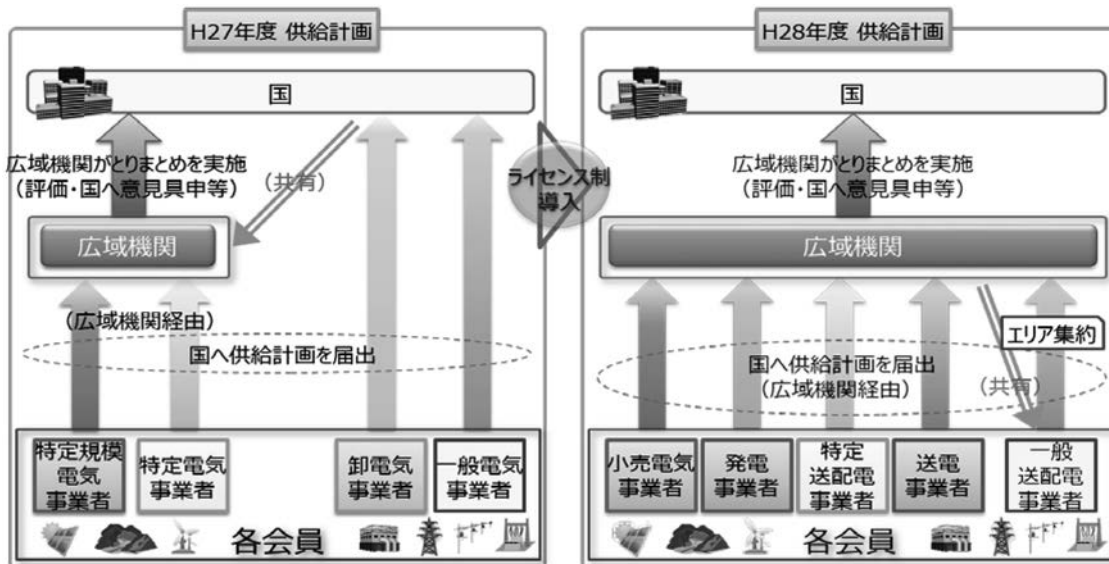


図3 ライセンス制移行に伴う供給計画届出ルール

及び運用についての計画であり、毎年、広域機関を経由して国に届け出ることとなっている。広域機関は、電気事業者から供給計画の提出を受け、短期・中長期の電力需給の実績及び見通し、電源や送電線の開発計画等を取りまとめ、その内容について意見があるときはそれを付して国に提出する。国は、供給計画が広域的運営による電気の安定供給の確保その他適切でないとき認めるときは、電気事業者に対し、その供給計画を変更すべきことを勧告することができることとされている。

広域機関は、通常は供給計画の届出及び取りまとめを年度開始前(3月末)までに行うこととされているが、本年は、前述のライセンス制の導入の時期と重なったため、経過措置として、広域機関は4月以降に電気事業者となった者から供給計画の提出を受け、6月29日に供給計画を取りまとめて経済産業大臣へ送付した(図3)。

2. 平成28年度供給計画の取りまとめ概要

本年、取りまとめた電気事業者数を表1に示す。ここで、取りまとめた発電事業者数は21者となっているが、これは、発電事業ライセンスの取得が、改正法施行時(4月1日)から3か月間猶予されることより、結果的にとりまとめに間に合う時期(4月末)までに提出できなかった事業者がいたためである。しかし、取りまとめた21者の中には大手の発電事業者(旧一般電気事業者及び卸電気事業者であった12者)が含まれていることや、4月末以降6月10日までに提出された一定規模の発電事業者69者についても、電力供給能力(以下、「供給力」という。)を追加加算して需給バランス評価(後述)を行ったことから、その評価結果には大きな支障はないものとなっている。

供給計画の取りまとめ項目は、法施行規則の様式「供給計画の取りまとめ送付書」に記載のとおりであり、そ

表1 取りまとめ事業者数

事業者区分 (ライセンス区分)	取りまとめ 事業者数	供給力を加算評価 した事業者数
小売電気事業者	276	-
発電事業者	21	69
登録特定送配電事業者	16	-
送電事業者	1	-
一般送配電事業者	10	-
合計	324	69

れに沿って取りまとめた。(詳細は広域機関のホームページにて公表)

https://www.occto.or.jp/jigyosha/kyokyu/2016_0629_h28_kyoukyu_keikaku_torimatome.html

この中で、当該年度以降10年間の電力需給の見通しを得るべく実施した需給バランス評価の結果について次に紹介する。

3. 需給バランス評価の結果

(1) 評価手法と基準

需給バランス評価とは、将来の電力需要想定と供給力から、安定供給に必要な電力需給のバランスが保たれうるかどうかを確認するものである。ここで、将来の電力需要としては、将来の経済指標(GDP, IIP等)や人口見通しなどを用いて、一般送配電事業者の供給区域(以下「エリア」という。)毎に想定している。また、将来の供給力については、各電気事業者の供給計画に記載された各種計画(発電・販売計画、需要・調達計画等)を集計し、小売電気事業者及び一般送配電事業者の調達した供給力と発電事業者の発電余力とを加算して算定している(図4, 図5)。なお、太陽光発電、風力発電等の自然変動電源については、供給力として安定して期待し得る量として過去の発電実績等を用いて月の下位5日平均値をベースに算定している。

需給バランス評価の基準は、現在、広域機関が設置する「調整力及び需給バランス評価等に関する委員会」にて旧来からの基準の見直しを現在検討中であることから、今回は暫定的に旧来の基準「エリア需要に対して供給力の予備率が8%以上あること」を用いることとした。また、予備率が8%に満たない場合には、連系線を活用して他エリアからの供給力の振替を考慮して評価を行った(図5)。なお、沖縄エリアは小規模単独系統であることから例外的に「最大電源ユニット脱落時にも供給力がエリア需要を上回ること」とした。

なお、平成23年東日本大震災以降、昨年度(平成27年度)までの供給計画では、原子力発電の再稼働状況が見通せず発電計画が立てられないことから、原子力発電以外も含めてその供給力を「未定」としていたため、需給バランス評価を行うことができなかった。しかし、今年度

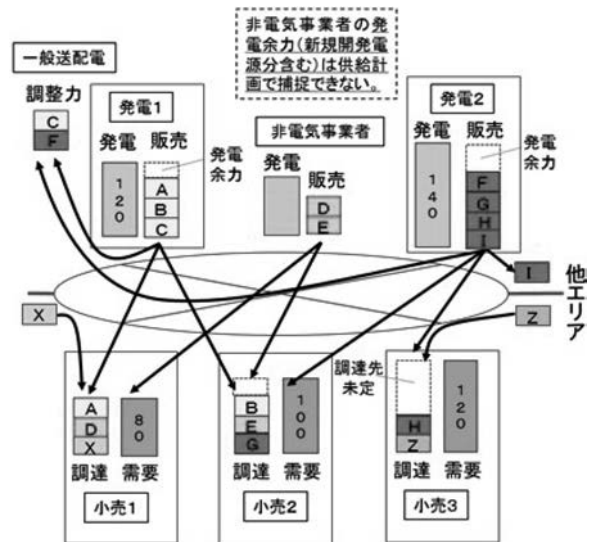


図4 発電・小売電気事業者の需給計画の記載

エリアの予備力は自エリアの供給力として評価するが、連系線の空容量がある場合、他エリアの供給力に振替えることも考慮。

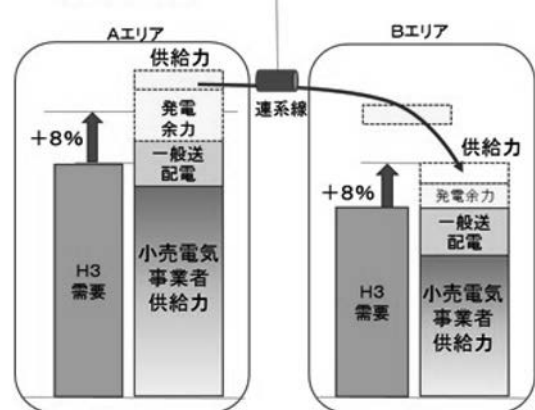


図5 エリア間の供給力振替イメージ

は供給計画届出書の記載要領(資源エネルギー庁)にて、「稼働時期が見通せない原子力発電所・号機については供給力を「未定」と記載し、その発電所・号機の供給力を「ゼロ」として算定」することとなったため、「未定(=ゼロ)」も含めて供給力が記載されることとなった。そのような記載方法の見直しの下、今回の供給計画での原子力発電の供給力としては、計画を作成した時点(本年4月初旬)で再稼働しているもの以外は、今後10年間に亘り「未定」として提出(=ゼロとして算定)された。

(2) 評価結果

需給バランス評価の結果を表2に示す。表2は、今後10年間のエリア毎の予備率の見通しを示しており、その中で、太枠(白地)は他エリアからの供給力の振替により予備率8%以上を確保できる見通しの箇所、太枠(ハッチング)は他エリアからの供給力の振替を考慮しても予備率8%を確保できない箇所を太枠で示しており、それ以外は、自エリアの供給力で予備率8%以上を確保できる見通しの箇所を示している。

ここでは、東京エリアでは基準となる8%に満たない年度があることから、現在建設中で平成32年度に運用開始予定である新規連系線を使ってエリア間の供給力を振替すると仮定した場合、同エリアの予備率は表2から1.8ポイントアップすることが判った。また、新規発電事業者など供給計画に計上されていない電源で、同エリアで平成33年度までに運転開始を予定している電源の公表情報を調査し、それらをすべて供給力に加算したところ、予備率は更に2.7ポイント程度アップすることが判った。

上記の通り、供給計画の取りまとめの中では予備率が8%を下回るエリア・年度が存在するものの、電気事業者ではない事業者等の新規開発電源の供給力が捕捉されていないこと、更に、原子力発電の供給力のほとんどがゼロ計上となっていることを考えると、今後10年間の電力需給の見通しは、直ちに安定供給に支障があるとは言えず、今後実施する需給変動リスク分析もふまえ、引き続き注視が必要な状況と判断した。

また、この需給バランスの評価では、原子力発電の代替として多数の高経年火力発電の供給力が織り込まれていることに伴う諸課題や、供給力に織り込まれている新規の電源開発が、電力自由化の中で計画どおりに進められるかという問題もあり、その点でも引き続き注視が必要である。

(3) 評価手法の課題

前述のとおり、需給バランス評価における供給力の見通しは、電気事業者より提出される供給計画をもとに集計するため、そもそも供給計画を届け出ない事業者の供給力は収集できない。例えば、将来、大規模電源の開発を計画しているが、現時点で発電事業を行っていない事業者は、事業開始までにライセンス取得すればよく、その計画を供給計画として届け出る方法がない。また、供給計画を届け出る発電事業者でも、電源の開発計画を供

表2 需給バランス評価の結果

(夏季:8月)										
	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34	H35	H36	H37
北海道	21.4%	19.8%	35.2%	47.5%	45.8%	41.0%	39.4%	40.8%	50.0%	48.5%
東北	14.1%	16.2%	15.2%	15.9%	17.3%	8.0%	8.0%	18.2%	18.0%	17.7%
東京	9.8%	9.8%	12.1%	8.8%	9.2%	7.4%	5.1%	9.0%	11.2%	10.3%
東日本3社計	11.3%	11.6%	14.1%	12.5%	13.0%	9.6%	7.8%	12.7%	14.9%	14.0%
中部	12.3%	8.3%	8.2%	8.8%	10.2%	11.0%	8.8%	8.6%	8.4%	8.1%
北陸	16.8%	13.0%	12.0%	12.7%	12.1%	11.5%	10.7%	10.1%	9.4%	9.6%
関西	13.3%	9.7%	12.7%	11.9%	9.6%	8.0%	10.3%	12.7%	12.8%	13.0%
中国	19.2%	20.4%	21.4%	12.6%	17.8%	11.7%	17.2%	22.9%	22.6%	22.1%
四国	13.1%	15.3%	14.4%	14.3%	14.8%	14.7%	12.1%	17.4%	17.5%	17.5%
九州	17.5%	14.1%	8.7%	8.6%	16.5%	16.0%	15.7%	15.3%	14.9%	14.5%
中西日本6社計	14.7%	11.9%	11.9%	10.7%	12.4%	11.3%	11.8%	13.4%	13.2%	13.1%
9社計	13.2%	11.8%	12.9%	11.5%	12.7%	10.5%	10.0%	13.1%	14.0%	13.5%
沖縄	50.5%	47.1%	50.5%	53.8%	40.2%	43.9%	43.4%	43.3%	51.9%	41.3%
10社計	13.5%	12.1%	13.2%	11.9%	12.9%	10.8%	10.3%	13.3%	14.3%	13.8%

(冬季:1月)										
	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34	H35	H36	H37
北海道	17.1%	14.2%	11.9%	23.2%	21.8%	19.2%	18.0%	26.4%	25.1%	23.8%
東北	10.7%	9.6%	10.2%	10.1%	10.9%	9.6%	8.7%	10.0%	9.1%	8.2%

他エリアからの供給力の振替により予備率8%以上を確保できる箇所
 他エリアからの供給力の振替を考慮しても予備率8%を確保できない箇所

給計画に記載する時期については事業者の判断に委ねられており、ある程度開発が進められている電源でも、供給力に計上されていないものがある。

これらの供給力計上における課題については、現在、広域機関が実施している電源入札等の必要性判断のための需給バランス評価・需給変動リスク分析の中で追加的に評価できるようにするなど検討を進めているところである。

4. その他の取りまとめ結果

(1) 電力システムの整備状況

供給計画では、今後10年間の主要送電線路・変電設備の整備計画を取りまとめている。その結果を図6に示す。平成37年度末までに423kmの主要送電線路、15,440MVAの主要変電所、1,200MWの変換所の新增設が計画されている。地域間連系線の整備計画については、「北斗今別直流幹線」、「飛騨信濃直流幹線」及び「関ヶ原北近江線」の3計画が前年度同様、計画されている。

(2) 小売電気事業者の確保済み供給量の状況

供給計画の中では電気事業者の特性についても分析することになっている。その一例として、小売電気事業者が自社の想定需要に対して、契約等で既に確保している供給力の比率を表したものを図7に示す。ここでは特に、200万kW未満の中小規模の小売電気事業者が現時点では中長期の供給力を既に契約等で確保している比率は少なく、記載上は「調達先未定」として計画していることがわかる。

5. 経済産業大臣への意見について

最後に、広域機関が供給計画の取りまとめを経済産業

○主要な送電線路の整備計画(こう長) ○主要な変電設備の整備計画

区分	架空(km)	地中(km)	合計(km)	区分	変電所(MVA)	変換所(MW)
新增設	384	39	423	新增設	15,440	1,200
廃止	△72	△0	△72	廃止	△2,000	0
合計	312	39	351	合計	13,440	1,200

連系エリア	名称	容量	使用開始年月
北海道～東北	北斗今別直流幹線	300MW	平成31年3月
東京～中部	飛騨信濃直流幹線	900MW	平成32年度
中部～関西	関ヶ原北近江線	—	未定

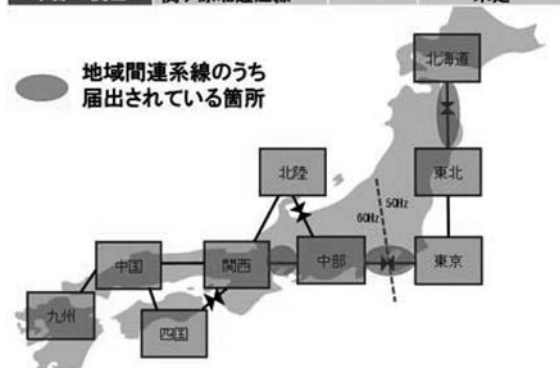


図6 主要送電線路・変電設備の整備計画

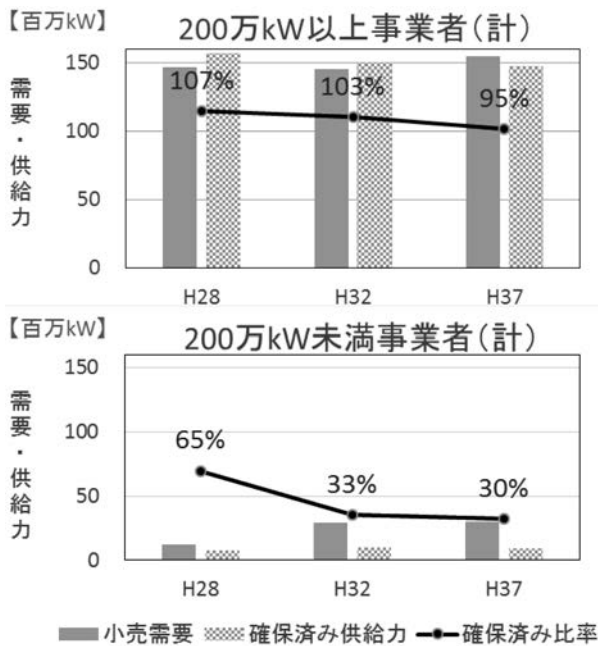


図7 小売電気事業者の確保済み供給力の状況

大臣に提出するに当たって、供給計画の取りまとめに付した意見(2点)について紹介する。

1点目は、小売電気事業者の供給力確保の実効性についてである。前述のとおり今回の供給計画では、小売電気事業者の多くが、中長期の供給力を「調達先未定」とし、今後、卸電力取引市場や新たな相対契約等の締結により確保する計画であることがわかった(図7参照)。発電事業者にとって、小売電気事業者との間に長期契約等がない場合、保有する電源を期待通りに稼働させられるのかどうかの確証が得られず、結果として計画通りに電源の開発が進まない可能性があり、将来、市場調達可能な供給力が、需要に対して十分に確保されないことが懸念される。このため、広域機関としては状況を注視しつつ、需給変動リスク分析を通じて、将来の電力需給見通しや、電源入札等の必要性などについて検討を深めていくこととし、国においては、国民負担とのバランスに配慮しつつ、容量メカニズム(発電等の供給能力が存在することの価値を認め、その対価に応じた電気の容量価格(kW 価格)を支払う仕組み)の導入等も含め、実効性のある供給力確保の在り方について検討を進めることの重要性について意見を述べた。

2点目は、稀頻度リスクへの対応についてである。今回の供給計画の取りまとめを通じて幾つかの電気事業者からは、

- ①競争力が相対的に低い石油火力等の経年火力が今後、徐々に廃止される中、東日本大震災のように大規模かつ長期間に亘り供給力が減少するような稀頻度事象

が発生すると、電力需給は極めて厳しい状況になる。こうした事態が発生する可能性(稀頻度リスク)を踏まえた石油火力発電等の供給力の確保のあり方を検討することが必要ではないか。

- ②需給調整契約等の非常時に供給力の代替として使い得る手段について、旧一般電気事業者としての非常時のリスク対応の観点から、契約を維持しているものの、競争環境の変化やコスト面も鑑み、保有し続けることが難しく、今後の取扱いについて整理が必要ではないか。

との意見があった。広域機関としても、これらは重要な課題であると認識し、稀頻度リスクをどう考えるべきか、また、その対応として電源入札その他の手段を講ずるべきかについて議論を進めていくこととし、国においても、稀頻度リスクについての考え方を整理し、その対応について検討することの重要性について意見を述べた。なお、これらの件については、現在、広域機関が主催する「調整力及び需給バランス評価等に関する委員会」にて検討を進めているところである。

IV. おわりに

本稿では、第2段階(ライセンス制)導入後、初めてとなる平成28年度供給計画のとりまとめについて、その概要を紹介した。これは、向う10年先の需給バランス評価を東日本大震災以降5年ぶりに再開できたという意味でも特徴的なものであった。また、評価の過程で幾つかの論点、課題を見出すことになり、その中から経済産業大臣に意見として付したことも1つの成果であった。

今回の事業制度改革により、この供給計画の持つ意味合いも変革している。ここでは、多様な事業者の個別の事業計画(発電・需要・調達計画等)を取りまとめる過程のなかで、事業環境変化や事業者の動向にも注視し、そこに内包される将来の需給上のリスクを予見しつつ、その対応策案などについても言及し、評価・とりまとめに反映していくことが求められる。その点では、新しい制度の下での供給計画のとりまとめとしては、正に緒に付いたところであり、来年度以降もより相応しいとりまとめ評価となるように尽力していきたい。

著者紹介



寺島一希(てらしま・かずき)
電力広域的運営推進機関 理事
(専門分野/関心分野)電力送配電設備
の計画・運用



熱流動シミュレーションの V&V の現状 ～国際会議 CFD4NRS-6 報告～

東京大学 越塚 誠一

国際会議 CFD4NRS-6 が 2016 年 9 月 13～15 日に米国のマサチューセッツ工科大学(MIT)で開催された。原子力分野の熱流動シミュレーションの V&V(Verification and Validation)に関する最新の研究が報告された。この会議は第 6 回目であり、毎回あらかじめベンチマーク問題が示され、その結果が会議で報告される。今回のベンチマーク問題は、密度がわずかに異なる 2 種類の流体の混合問題であり、13 の研究機関の計算結果が示された。計算結果には不確かさを同時に示すことが要求されていて、V&V の考え方が広く共有されていることが感じられた。

KEYWORDS: *CFD, Modeling and Simulation, V&V, Benchmark, Uncertainty Quantification*

I. 国際会議 CFD4NRS-6

CFD4NRS は、Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor Safety の略であり、「原子力安全のための数値流体力学」の意味である。OECD/NEA/CSNI (Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency / Committee on the Safety of Nuclear Installations) の WGAMA (Working Group on the Analysis and Management of Accidents) の活動として、2 年に 1 回開催され、今回で 6 回目になる。

ここでの「数値流体力学 (CFD)」は 3 次元流体シミュレーションという狭い意味で使われており、1 次元でシステムを表現してシミュレーションを行ういわゆるシステムコードは含まれない。原子力安全にかかわる CFD の利用は増えており、その際に CFD の信頼性を確保するために V&V(Verification and Validation)の考え方が示され、これに沿った活動が展開されている¹⁾。なお、これまでの会議録は Web で公開されている²⁾。

この国際会議では事前にベンチマーク問題が示され、その問題に対して複数の研究機関が計算結果を提出し、実験データと比較されてきた。今回も単相流の乱流混合問題がベンチマーク問題となり、会議中に報告があった。これについては II で紹介する。

CFD4NRS-6 は 2016 年 9 月 13-15 日に米国のマサチューセッツ工科大学(MIT)において開催された(図

Present Status of V&V for Thermal-Hydraulic Simulation : Seiichi Koshizuka.

(2016 年 10 月 5 日 受理)

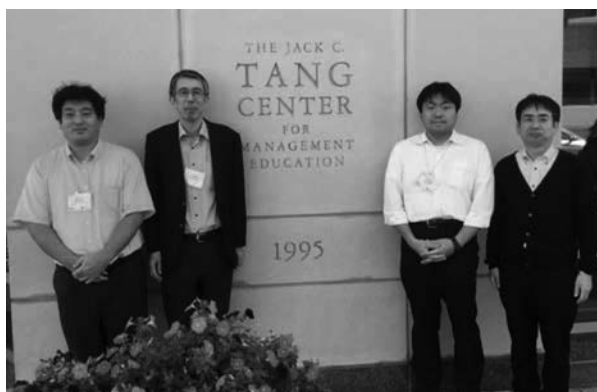


図 1 CFD4NRS-6 の会場となった MIT Tang Center

1)。冒頭に Prof Buongiorno から MIT の原子力工学科の紹介があり、その後、プレナリーレクチャーが 1 件、キーノートレクチャーが 4 件、口頭発表が 2 部屋に分かれて合計 44 件、ポスター発表が 15 件、学生セッションのポスター発表が 12 件、2 日半にわたって行われた。最終日の後半は MIT の研究室等の見学に充てられた。

日本からは筆者を含めて 5 件の発表があった。筆者は日本原子力学会の標準委員会において 2015 年に制定した V&V のガイドライン³⁾について紹介した。これに関しては III で報告する。また、会議を通じて筆者が感じた原子力熱流動分野における V&V の現状と課題については IV で述べる。

II. ベンチマーク結果

会議の最初のキーノートレクチャーとして、今回のベンチマーク結果が報告された。ベンチマーク問題は、水

平な矩形の流路において2種類の流体が平行に異なる速度で流入し、界面での速度分布や乱流エネルギー分布について計算するというものである。2種類の流体の密度差が1%の場合について、実験結果をあらかじめ知らせることなく計算結果を集めた。1%というわずかな密度差によって界面での乱流エネルギーにピークが見られるのが特徴で、しかもこのピークは密度差がない場合には現れないというものである。

計算結果を提出した研究機関は13であった。計算結果には同時に不確かさについても評価することが求められた。不確かさの評価のために800ケース以上の計算を実施した機関もあった。ただし、最も成績が良かったとされた結果ではわずか6ケースの計算で不確かさが求められていた。CFDの不確かさの評価については様々な方法が試みられているのが現状であると感じた。

このベンチマークでは実験結果を知らない状況で計算結果を不確かさとともに提出しなければならず、V&Vにおける「予測」を要求するものである。計算結果の中の1件については、後のポスターセッションで詳細が示された。不確かさをASME (American Society of Mechanical Engineers, 米国機械学会) V&V-20⁴⁾によって算出し、速度分布および乱流エネルギー分布の計算結果を不確かさとともに示している。不確かさの中にはGCI(Grid Convergence Index)によって求めた空間離散化誤差も含まれている。しかしながら、実験データとの比較を詳細に見ると、評価した不確かさの範囲の外に実験データのプロットがある場合があり、発表者に質問したところ、実験結果には実験の誤差が示されなかったという問題があるとのことであった。V&VではValidationに用いる実験に対しても誤差評価をしなければならないとされている。そのため、今回のベンチマークではCFDによる予測と実験が合っていたのかどうかを、V&Vの標準的な手順として評価するにはまだ不十分な点がある。会議を通してV&Vに用いるための実験データの品質が今後の課題として述べられていた。

なお、ポスターセッションにおけるこの計算結果の発表者は米国規制当局(USNRC)に所属しており、筆者がV&Vと規制の関係を質問したところ、一般論としてASME V&V-20の手順は重過ぎるが、計算結果の信頼性を何らかの方法で示すことは規制では要求されるべきである、との回答であった。もちろんこれは、アカデミックな国際会議の場での専門家個人としての回答であり、USNRCの公式な見解ではない。

III. 日本原子力学会のV&Vガイドライン

日本原子力学会標準委員会では、V&Vに関する規格「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」を2015年12月に制定した。その内容について筆者が発表した。一般的にV&Vには2種類あり、モ

デリングとシミュレーションに関するV&V(モデルV&V)と品質マネジメントに関するV&V(品質V&V)である。日本原子力学会標準委員会のガイドラインが扱っているのはモデルV&Vであり、日本では初めての規格である。米国のこれまでのモデルV&Vに関する規格と比較して、第1に核、熱流動、構造などの広い分野のシミュレーションに関する専門家を委員として作られた規格であること、第2に「予測」を手順に加えたことに特徴がある。

本ガイドラインは、日本原子力学会標準委員会の基盤応用・廃炉技術専門部会の下に「シミュレーションの信頼性分科会」が2012年に作られ、そこで原案が作成された。ただし、シミュレーションの信頼性に関しては、日本原子力学会に計算科学技術部会が2002年に設立されて以来、部会に設置された研究委員会やワーキンググループにおいて10年にわたって継続的に調査・議論を行ってきており、その実績に基づいている。そもそも計算科学技術部会が核、熱流動、構造などの分野横断的な部会であり、これまでの議論も分野横断的に行われてきた。そのため、本ガイドラインの第1の特徴である広い分野にわたる委員構成が実現できた。

予測とは、内挿・外挿・スケールアップなどを含んでおり、シミュレーションと実験との比較であるValidationとは異なる条件を有する実機に対するシミュレーションである。一般的に外挿では不確かさが増大するだけでなく、未知の現象が現れる可能性もあり、予測精度が悪化すると考えられている。内挿においても共鳴現象では大きく挙動が変わることがある。また、二相流ではスケールアップによって相関式が大きく変化する場合がある。そのため、米国の従来のモデルV&Vの規格でも、予測に対して悲観的な立場と積極的な立場とが存在する。日本原子力学会のガイドラインではモデルV&Vを行う意義は予測の信頼性を高めるためであると考え、予測の手順を明示的に加えている。ただし、Validationの手順の中で予測におけるモデルの適用性の確認や、不確かさの拡大の定量化を求めている。なお、予測を手順に加えたモデルV&Vを、V2UP(Verification + Validation + Uncertainty Quantification + Prediction)と呼んでいる。

本国際会議では、実験結果を予め示さない状況でのベンチマークを行っており、これは予測に相当するので、モデルV&Vにおける予測に対して積極的な立場を取っていると解釈できる。

IV. 熱流動分野におけるV&Vの現状と今後の課題

日本原子力学会のモデルV&Vガイドラインの発表に対する質問として、福島原発事故における津波予測に基づいた津波対策の問題をどのように考えるか、というのがあった。その場での回答は、予測の後には「意思決

定]の手順に進む必要があるが、そのガイドラインへの取り込みについては今後の課題であると述べた。モデルV&Vでは不確かさを伴うシミュレーションの予測が得られるが、さらにこれを用いて設計値を決めたり安全性の判断が行われる。予測の後に意思決定の手順を踏むことで仕事が完結する。不確かさを伴う情報を用いた意思決定は、リスク情報活用においても標準手順の作成が求められている。本国際会議の最後のまとめのセッションにおいて、日本原子力学会のガイドラインに関しては意思決定の重要性が座長により再度強調された。

本国際会議全体の印象としては、モデルV&Vを熱流動の3次元詳細シミュレーションに限定して、狭く考え過ぎているように感じられた。たとえば、参考とする規格として引用されるのは、熱流動が表題に明示的に書かれているASME V&V-20のみであり、固体力学を表題に含んでいるASME V&V-10は引用されない。実際にはV&V-10もV&V-20も、様々な分野に共通する内容が書かれている。そのため、本国際会議ではV&V-20において詳しく記述されている不確かさ評価とその統合に重点が置かれている。V&V-10ではむしろPIRT

(Phenomena Identification and Ranking Table)を活用するなどの、モデル作成にも重点があるのだが、そうした議論はほとんどなかった。

なお、今回は上海交通大学で2018年に開催される。

— 参考資料 —

- 1) OECD/NEA/CSNI, Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications, NEA/CSNI/R (2007)5.
- 2) 日本原子力学会, シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン: 2015, AESJ-SC-A008:2015.
- 3) <https://www.oecd-nea.org/nsd/csni/cfd/>
- 4) ASME, Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, ASME V&V 20-2009.

著者紹介

越塚誠一 (こしづか・せいいち)

東京大学

(専門分野/関心分野) 数値流体力学, 粒子法, 原子力熱流動, V&V

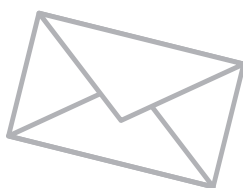


メール配信サービス (AESJ-NEWS) 会員限定配信のご案内

これまで任意登録していただいていたメール配信サービス「AESJ-NEWS」は、2016年7月から会員限定配信に変更になりました。

会員管理システムにご登録いただいているメールアドレスへ配信しておりますが、会員管理システムにメールアドレスを登録していなかったり、古かったりすると配信されません。配信希望の方でAESJ-NEWSが届いていないという方は、会員管理システムへのメールアドレスのご登録、または、登録しているメールアドレスのご確認をお願いいたします。

◇ 配信を希望されない方は、本会HP会員情報変更の情報メール (AESJ-NEWS) の受信を希望しないをチェックしてください。



◇ 会員情報変更 ◇

PCからはこちら

http://www.aesj.net/service_for_member/membership_service

スマートフォンからはこちら



新刊紹介

なぜ日本の大学には工学部が多いのか

功刀滋著, 297p. (2016.7), 講談社(定価 2,200 円)
ISBN978-4-06-156705-4

気になるタイトルの答えは、「明治以来この国を富ます(富国)ため、常に工学系の教育が推進され、第二次大戦前は多くの国が直接担い、戦後にそのほとんどを「大学」としたこと、高度経済成長期には私立大学がかなりの部分を担当したこと」となろう、と著者は最後に説明している。

こう聞くと、本書は、明治以降の工学教育の歴史を辿ったものと思われるかもしれないが、それだけではない。副題の「理系大学の近現代史」も、本書の内容を十分表しているとはいいがたいように思う。それほどまでに、本書は、情報量の多さとそれを丹念に読み込み整理した仕事の丁寧さにあふれている。

本書は、明治期の近代高等教育の黎明から現代まで、日本の工学教育の変遷を俯瞰しただけでなく、大学について中国唐にならって制定した大宝律令までさかのぼって考察した。さらに、米、英、仏、独などの海外諸国と比較して、日本の工学教育の特徴を形成することとなった来歴を詳細にひもといている。

このようにして、本書は、時代の必要に応じて、国の施策として取り組まれてきた日本の工学教育の歴史を包括的に検

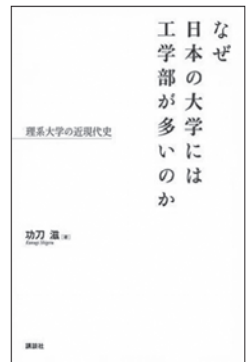
証することで、これからの理工系大学の進むべき方向を著者の意見を交えて示すことを可能にした。

著者の次の意見は、現状の理工系大学教育への危機感の表明であり、解決に向けた関係者への激励であるに違いない。「国内生産が海外生産にシフトする中で、従来の発想を超えた理工系人材を育成できるかどうか、大学とりわけ

国立大学の理工系学部などが生き残れるかどうかがかかっていると云えよう。」「形式的な『質の保証』に留まらず、自己発展的な学修・学習へと本気かじを切り替える必要がある。まさにこの点に日本の理工系大学組織の将来が懸かっていると云える」。

この書評を大学の工学の先生が書かれたとしたら、ご自身の受けた教育や指導の体験と重ねて、より深いところで共感され、一層危機感を共有されたのではないかと思う。ぜひ、大学の先生にお読みいただきたい。また、工学教育のあり方について考えるヒントを探るため、原子力に係る人材育成を担当されるみなさんにもお勧めしたい。

(日本原子力産業協会・木藤啓子)



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

<https://ssl.aesj.net/publish/meyasubako>, 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。



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－
(12月6日第6回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・10月16日～11月15日に英文誌へ25論文、和文誌へ1論文の投稿があった。
- ・和文誌に掲載された福島事故関連の論文を英訳して出版することを了承した。
- ・編集委員会論文誌関係の平成28年度後期の予算執行見込みと、平成29年度予算案の報告があった。予算案の一部についてコメントが出たため、今回の幹事会では平成28年度見込みのみ承認し、予算案については後日、修正版をメール審議し承認する予定。
- ・論文審査・査読要領の見直しに合わせて、ArticleとTechnical Materialの範疇を再検討した。

【学会誌関係】

- ・学会誌の電子化について、J-STAGEへの掲載申請の結果報告があった。日本原子力学会誌、日本原子力学会誌ATOMOとともに、掲載誌として採択されたが、平成30年度以降の掲載となった。
- ・福島関係記事英文化について、同日に開催されたWGの検討結果の報告があった。英文化事業を年度内に実施するかどうか決定し、来年度中に作業完了する目標で、引き続き検討を続けていく。
- ・学会誌11月号のアンケート結果の報告があった。寄せられた意見の検討を行った。近号で9月から3か月分のアンケート結果のまとめを掲載予定。
- ・学会の各部会による連載講座の検討を行った。
- ・記事の進捗状況、巻頭言、時論その他記事の企画検討をした。
- ・今年度予算執行の見込みと来年度予算について報告があり、承認された。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

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。

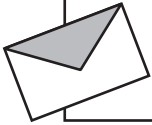
- (1) 事実を無視し、あるいは歪曲した意見。
- (2) 真偽が不明な内容を含む場合。
- (3) 文章に論理性がない場合。文章が意味不明な場合。
- (4) 掲載することにより、学会の品位に傷がつく恐れがある場合。
- (5) 良識に欠けると思われる意見。例えば、個人あるいは組織の中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (6) 美醜、好悪に類する判断に依拠している場合。
- (7) すでに掲載された記事と同様の内容である場合。
- (8) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。
- (9) 会員にとって掲載する価値がない場合。
- (10) 余り期間を空けない同一者からの投稿。

(註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。

(註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)

理事会だより



年会や大会での研究成果の発表について

皆様、明けましておめでとうございます。

昨年(2016年)の学会誌10月号に英文論文誌のインパクトファクターについての報告がありました。これによると2015年のインパクトファクターは1.202で、Nuclear Science部門のJournal 32誌中で8位であったとのこと。2013年は過去最高の1.452、2014年は1.118と、以前に比べると(2011年は0.707)ここ数年は高い水準を維持しているようで、世界的にも認知される論文誌になってきているとのこと。また、著者へのアンケートの結果によると、多くの著者から、投稿から掲載までの過程に満足しているとの回答が得られたようです。これは、例えば、プレスクリーニングの導入などにより、掲載までの時間が大きく短縮されたことなどによるものと考えられています。これらはひとえに編集委員や査読者の皆様方の献身的なご努力の賜物と、心より感謝致しております。

さて、私はまだ理事の経験が数ヶ月と浅く、理事会の動きを何かテーマを絞って述べるのは難しいので、春と秋の年会・大会での研究発表について、以前から個人的に感じていることを述べさせていただきます。

最近の発表を見ていますと、パワーポイントを駆使したり、中には動画などを用いたりして分かりやすく説明され、また事前にはリハーサルを入念に行っているのか発表時間を大幅に超過するようなことはなく、昔(30~40年くらい前)に比べると大きく改善されてきました。私が学生の頃や就職したての頃の発表は、手作りのスライド(しばらくしてOHP)を用いて行っており、現在と比較すると非常に不鮮明で分かりにくかったと思います。また、発表時間については、今ほどきちんとは守られていなかったように思います。しかし、質疑応答については、時間も多くとっていましたが、内容も充実していました。その分野の著名な先生方が発表会場の前のほうに座っておられ、発表が終わると同時に手を挙げて本質を突いた厳しい質問をされ、発表者、共同研究者とも回答に窮する場面もありました。質疑応答の内容を聞いている私たち若手の研究者も非常に勉強になりました。また、例えば、「解析コードにこんな数値を入れてみたらこんな結果がでました、というだけの発表ではないか?」、「この研究のオリジナリティーはどこにあるのか、〇〇氏が〇〇年前に行った研究と本質的にどこが違うのか?」など、オリジナリティーを問われる質問や既往研究を良く勉強しておかないと答えられないような厳しい

意見などもありました。発表者が答えられない場合、指導教官あるいは関係者が手を挙げて、「共同研究者の〇〇ですが、……」と助け船を出しても收拾がつかず、発表者は横に置かれて議論を始め、そのセッション終了後も廊下で議論を続けているということもありました。先日、私が学生時代に大変お世話になった先生とお会いする機会があり、その先生が若い頃の印象深いこととして、「あるテーマについて、〇〇大学の〇〇研究室と□□大学の□□研究室とが、学会の研究発表の場で論争を続け、2年半程度かかってようやく決着がついた件があった。」というような昔話をされていました。これは極端な話ですが、以上のような光景を以前は学会の研究発表の場でよく見たように思います。

それに比べて最近の研究発表はスマートですが、質疑応答では白熱した議論は少なく、例えば、質問が無いので座長が1~2件質問をして終了することがあるなど、なんとなく物足りなさを感じています。理由は良く分かりませんが、発表件数が多いため会場の数が増え、例えば聴きたい発表が同じ時間帯に複数の会場であることなどにより、聴講者が分散してしまったこと、また、座長持ち時間が少なく、十分な議論をする時間が少なくなってきたことなども考えられます。中には、これが研究成果の発表か?と疑問に思わざるを得ない発表も稀ですがあるように思います。さらに、変わった研究者、くせのある研究者が少なくなったこと、年配の先生方も含めて皆さんがやさしくなってきたことも要因として挙げられるかもしれません。以前は、若い研究者を鍛えよう、育てよう、というような雰囲気もあったように思います。

エネルギー産業と深い関係を持つ原子力学会にはいろいろな使命があると思いますが、基本的に学会は学術研究の向上発達を図ることを主たる目的としていますので、「論文誌の充実」と「研究成果を発表し議論する場の活性化」は力を入れて取り組まなければならない事項です。最初に記載しましたように論文誌の充実については、関係者の皆様のご努力で大きく改善されてきていますが、研究成果発表の場は今のままで良いのか、考えてみる必要があるのではないかと思います。

(海洋生物環境研究所 木下 泉)

「理事会だより」へのご意見、ご提案の送り先
rijikaidayori@aesj.or.jp