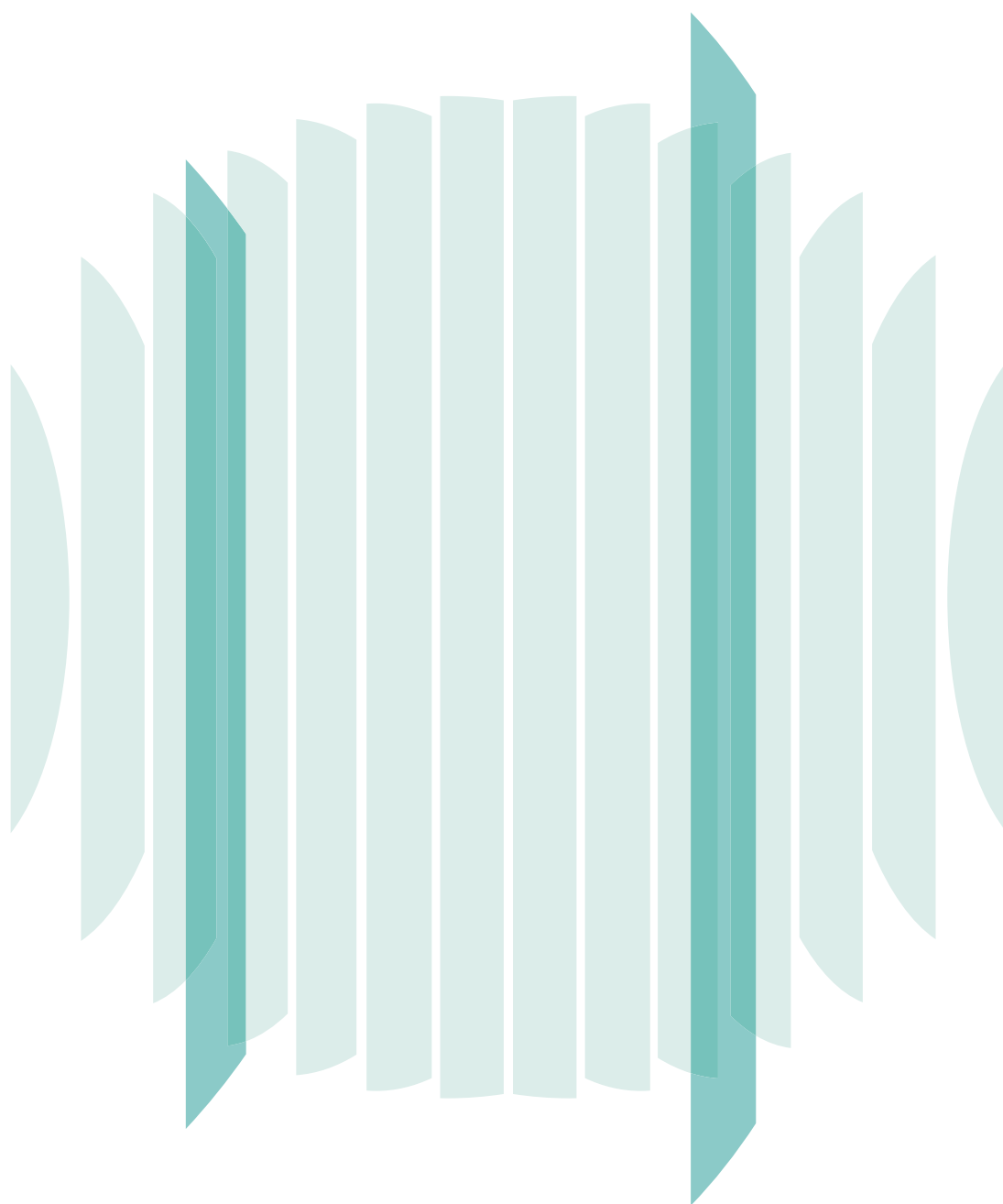


季報 エネルギー総合工学

Vol. 43 No. 2 2020. 7



一般財団法人 エネルギー総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

【調査研究報告】

世界の原子力に関する最新動向と今後に向けた考察

企画部 部長 茶木 雅夫 …………… 1

【調査研究報告】

気候変動対策における原子力の役割と技術的・社会的課題

～「気候変動と原子力の役割に関する国際会議」を踏まえて～

プロジェクト試験研究部 研究員 高野 大志 …………… 15

【調査研究報告】

廃止措置を推進する技術者育成カリキュラムの構築と研修の実施

原子力技術センター 参事 田中 健一 …………… 25

【調査研究報告】

将来を担う廃止措置技術者の養成 ～廃止措置海外研修の意義と成果～

プロジェクト試験研究部 特任参事 林道 寛 …………… 37

【事業報告】

令和元年度 事業報告の概要 (一財)エネルギー総合工学研究所 …………… 54

【研究所のうごき】 …………… 57

【編集後記】 …………… 58

世界の原子力に関する最新動向と今後に向けた考察

茶木 雅夫（企画部 部長）



1. はじめに

世界的に見ても原子力に関する国民の認識や理解度は国、地域によって大きく異なる。これは歴史、文化、地政学の影響等、様々な要因により一概に何が原因とは言いきれない。一方、パリ協定に代表されるように気候変動への関心はごく一部の国を除いて世界共通である。

本稿では、導入として筆者の個人的な海外駐在経験から始め、世界的に見た原子力発電の現状、さらには欧米の産官学を実際に訪問した際に得た情報等から、まず、世界の原子力の最新動向をまとめる。

次に、この動向を踏まえた日本の原子力の今後に向けた考察を気候変動との関係も踏まえて述べる。原子力のみでなくエネルギー問題は国民理解を得ることが重要である。再生可能エネルギー（再エネ）は固定価格買取制度（FIT）等の政府・国民負担で導入が進んでいる。福島第一原子力発電所事故の当時国である日本の原子力は他国より厳しい状況であるが本稿が何らかの参考になることを期待する。

2. 英国駐在時の経験

2013年10月から英国のロンドンにエネルギー分野での研究開発立ち上げのために3年間駐在した。駐在開始して直ぐ、フランスのアレバ社が英国で新設予定の原子力発電所のストライクプライス（固定買取価格）が決定された。その後1週間程はテレビ、新聞での報道のトップはこの事案だった。日本の場合、

まず安全性の話が議論の中心になると考える。ところが、英国では論点が、テレビ、新聞とも価格（火力の約2倍）と中国の（50%までの）資本参加の2点であった。安全性の議論はほぼ無く、反原発派も高レベル放射性廃棄物の最終処分の課題を指摘する程度であった。

ロンドンでは冬になると、大気汚染で毎年数日、子供と老人は外出を控える要請が出される。また、欧州全体で火力発電由来の大気汚染影響で毎年30～50万人が死亡していると推定されるという公的機関の報告があると、テレビや新聞で大きく報道された。参考までに表1に経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）が2018年に発行したレポートの発電源別の健康影響の比較を示す。表1は火力と原子力の比較になっているが、欧州では、事故時の従事者の死亡率以外で原子力は全てが一桁以上小さい。事故時の従事者死亡を入れても、火力全般の事故時の死者数と大気汚染影響の死者数の合計との比較では、原子力は明らかに一桁以上小さい。

2011年4月に英国の原子力規制機関が国民の健康と安全を所轄する英国環境安全庁から独立した。元々は原子力規制機関も他分野、多産業と横並びであった。以前は、原子力も火力も、さらには化学プラント、鉄道等も含めて人工物全般の国民の安全と健康への影響を全て横並びで評価していたとみなせる。このことと表1の評価を見ると、フランス・アレバ社の英国での原子力新設のニュースで安全について議論されないことも理解できる。とは言え、国民は火力による大気汚染を日々実感してお

表 1 発電源毎の健康影響評価の例（欧州）

(Europe, deaths/cases per TWh)

	Deaths from accidents		Air pollution-related effects		
	Among the public	Occupational	Deaths*	Serious illness†	Minor illness‡
Lignite	0.02 (0.005-0.08)	0.10 (0.025-0.4)	32.6 (8.2-130)	298 (74.6-1 193)	17 676 (4 419-70 704)
Coal	0.02 (0.005-0.08)	0.10 (0.025-0.4)	24.5 (6.1-98.0)	225 (56.2-899)	13 288 (3 322-53 150)
Gas	0.02 (0.005-0.08)	0.001 (0.0003-0.004)	2.8 (0.70-11.2)	30 (7.48-120)	703 (176-2 813)
Oil	0.03 (0.008-0.12)	..	18.4 (4.6-73.6)	161 (40.4-645.6)	9 551 (2 388-38 204)
Biomass	..	..	4.63 (1.16-18.5)	43 (10.8-172.6)	2 276 (569-9 104)
Nuclear	0.003	0.019	0.052	0.22	..

Data are mean estimate (95% CI).

* Includes acute and chronic effects. Chronic effect deaths are between 88% and 99% of the total. For nuclear power, they include all cancer-related deaths, including accident and long-term effects.

† Includes respiratory and cerebrovascular hospital admissions, congestive heart failure, and chronic bronchitis. For nuclear power, they include all non-fatal cancers and hereditary effects.

‡ Includes restricted activity days, bronchodilator use cases, cough, and lower-respiratory symptom days in patients with asthma, and chronic cough episodes. TWh=1012 watt hours.

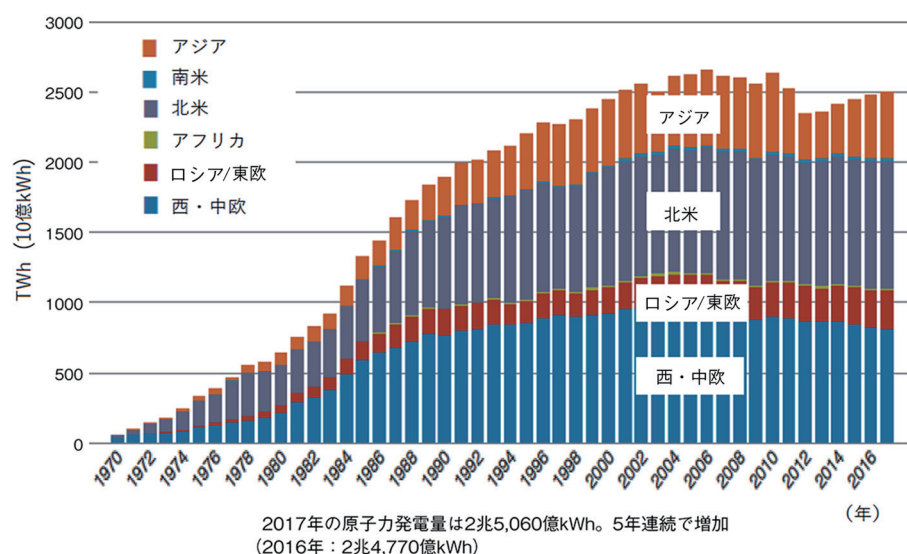
（出所：OECD/NEA, The Full Costs of Electricity Provision, April 2018）

り、健康と安全に関するリスクについて、明示してなくても1つの人工物のみでなく横並びで評価する文化ができていると実感した。

また、英国には ALARP（As Low As Reasonably Practical）という固有の安全評価原則がある。“Reasonably Practical”とは合理的に実践可能という意味で、「合理的」には費用対効果も含まれる。過大な安全対策は、最終的に電気料金等を通じて国民負担となり、国の産業競争力に係わるので、ある意味、当然とも言える。ロンドン駐在で、よく言われる欧米式合理主義の一部を身に染みて感じられたのは貴重な経験である。

3. 世界の原子力発電の状況

日本では再稼働を進めている段階であるが、世界的には原子力発電所の新設がアジア、ロシア/東欧を中心に盛んである。日本ではドイツ、イタリア、スイス等の脱原発政策がクローズアップされる。それだけを聞くと、世界的に原子力による発電量が減少しているという印象を与える。図1に世界の原子力発電量の推移を示す。福島第一原子力発電所事故後、日本での原子力発電所停止の影響でアジアが2011年に落ち込んだが、世界的には増加傾向が続いている。以下、国、地域毎の特徴を述べる。



（出所：日本原子力産業会議、世界原子力協会「世界の原子力発電所実績レポート 2018」）
図表紹介（仮訳）、2018年10月

図1 世界の原子力発電量の推移（地域別）

米国の原子力発電所の基数は、1990年の112基をピークに減少している。一方、設備稼働率と出力向上により年間発電量はほぼ一定水準を維持しており、2018年には過去最高の総発電量を記録した。但し、今後は、原子力発電所の運転停止が進み全体的な発電量は減少していく見込みである。世界的な原子力による発電量増加は現状、主に中国、東欧・ロシアによるものである。

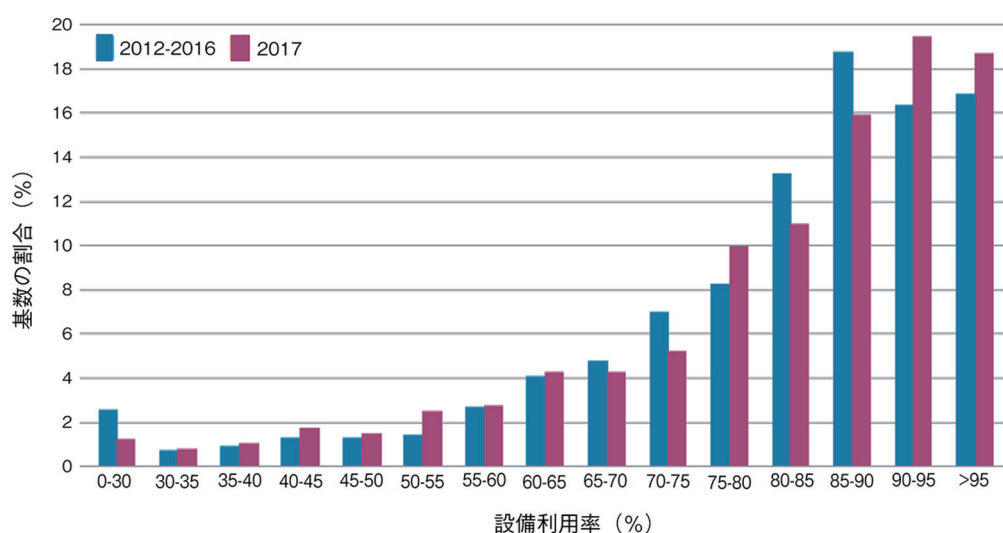
世界の原子力発電所の設備利用率の状況を図2に示す。2012～20216年と比べて2017年は設備利用率90%以上の割合が増えた。一方で、最近では負荷追従運転を行う原子力発電所も増えており平均設備利用率の低下につながっている。全体として80%以上が多く、

福島第一原子力発電所事故前の日本と比べても高い水準である。

2017年12月末時点の新規建設中の原子力発電所の状況を表2に示す。この時点で建設中は59基で、ほとんどが過去10年に建設を開始した。また、大半がアジアとロシア/東欧で発電量増加の傾向と同様である。

中国で2017年に送電開始した原子力発電所の建設期間を図3に示す。ほぼ50～60カ月で比較的短期間である。少なくとも中国ではこの程度の期間で建設可能とも言える。

ロシア、中国とも政府の強い指導力で新興国等への輸出を強化している。特に近年は、ロシアが規制制度/機関とプラントをセットで売り込んでいる模様である。一方で、中国



過去15年間、世界の平均設備利用率はほぼ一定。最近では、負荷追従運転を行う原子炉が増えており、平均設備利用率の低下につながっている。

(出所：前掲書)

図2 世界の原子炉の設備利用率の状況

表2 世界の地域別建設中原子炉 (2017年12月末)

	BWR	FNR	HTR	PHWR	PWR	計
アジア	4	1	1	4	30	40
東欧&露					11	11
北米					2	2
南米					2	2
西・中欧					4	4
計	4	1	1	4	49	59

2017年末の建設中原子炉数は59基。ほとんどの建設中原子炉は、過去10年間に建設開始。(出所：前掲書)

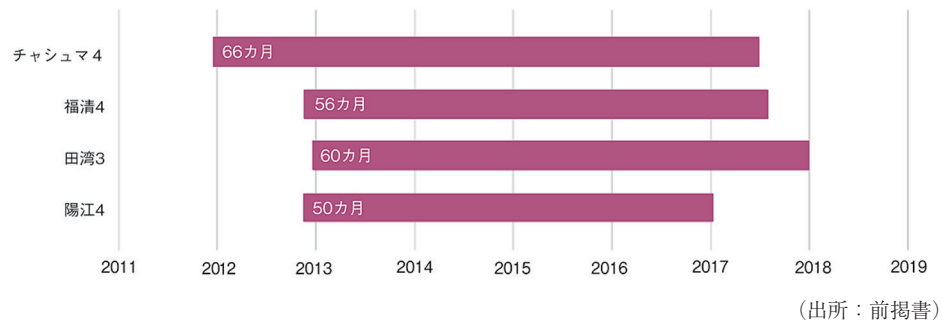


図3 2017年に送電開始した新規原子炉の建設期間

は国内での新設がやや減速気味である。これは沿岸部がほぼ開発されたためと推定される。

現状、新設の3分の2以上が、ロシア、中国が設計した原子力発電所である。一方で、先進国での新設は少なく、全般に先行き不透明である。

4. 欧米の産官学からの情報

当所は、欧米の原子力に関する情報収集を主目的に2019年3月から10月にかけて、米国マサチューセッツ工科大学（MIT）及びサザン電力／米国エネルギー協会、英国国立原子力研究所（NNL：National Nuclear Laboratory）と個別に打合せを行った。そこで得られた情報を以下に記す。

（1）米国 MIT との打合せ

MIT は2017年に、2050年に向けた低炭素社会における原子力の将来に関するレポート“The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World”（以下、MIT レポート）を発行した。当所も2050年超を視野に2019年1月、「中長期ビジョン」⁽¹⁾を発行しており、それらの内容比較も含めて議論した。

MIT レポートでは、以下の6つの地域について二酸化炭素（CO₂）排出レベル毎に2050年の電源構成を試算している。

MIT レポートでは、再エネ導入比率向上が困難な①⑥、その逆の②⑤について、中国と米国のそれぞれ2つの地域で試算している。CO₂ 排出レベルは、先進国の現状に近い

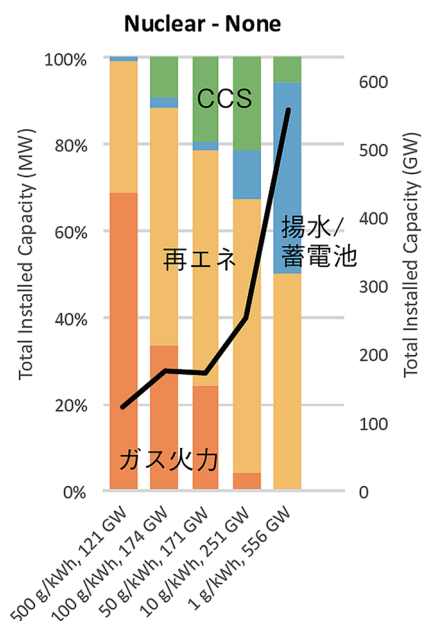
- ① 中国 北京付近
- ② 中国 上海付近
- ③ フランス
- ④ 英国
- ⑤ 米国 テキサス州
- ⑥ 米国 ニューイングランド地域

500g/kWh から実質ゼロに近い1g/kWh まで幅広く設定し、それらの結果等から様々な提言をしている。MIT レポートは、公開されておりホームページ⁽²⁾からダウンロードできるので、興味のある方は各自で詳細確認頂きたい。

以下に、MIT レポートのポイントを中心に記す。

評価の前提条件として、MIT レポートでは送配電（グリッド側）の制約は無く、如何なる電源構成でも対応可能としている。電力の需給調整は、火力、水力か蓄電池で対応し、このためのコストは評価していない。二酸化炭素回収・貯留（CCS）のCO₂回収率は90%としている。これは当所「中長期ビジョン」と同じ条件であり、経済性を考慮すると2050年視点でも妥当との点でMIT と意見が一致した。評価上、発電コストの低い電源が、その電源の導入制約上限またはCO₂排出量制約に到達するまで、優先的に選択されることとなる。これも「中長期ビジョン」と同じで、現状、一般的な評価方法である。

図4にMIT レポートの評価例として、テキサス州で原子力無しの場合のCO₂ 排出レベル毎の電源設備容量比率を示す。パリ協定でのターゲット範囲と想定される50～100g/kWh



（出所：MIT, “The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World” (2018) を基に作成）

図4 MIT レポートのテキサス州の原子力無しの評価例

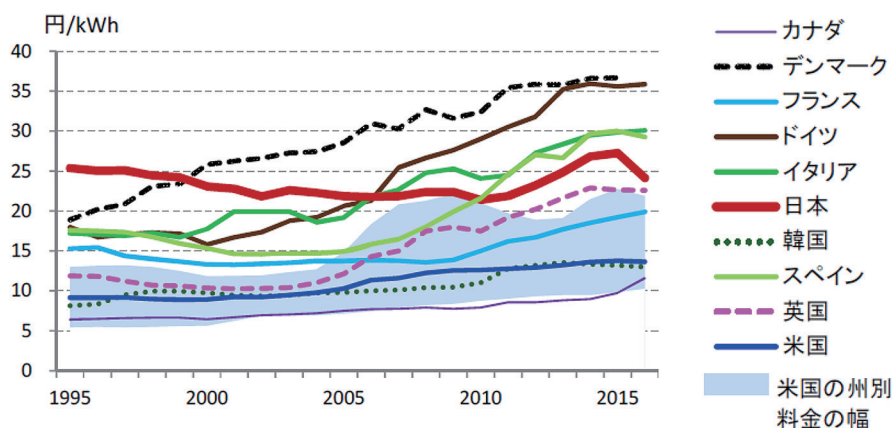
では黒の実践の総発電設備容量は大きく変化しないが、10g/kWh 以下に CO₂ 排出量を抑制すると総発電設備容量は増大する。これはこの水準まで CO₂ 排出量を削減すると CCS 付きの火力発電（回収率 90%）も使えなくなり、更に増えた再エネの出力変動対応の水力 / 蓄電池割合が増えるためである。MIT レポートには、このケースでは「テキサス州の土地の 5% が再エネ対応に使われることになる」との記載

があり、この意味を打ち合わせで確認した。「現実的に不可能という意味で記載している」との回答であった。5% という数字自体は比率としては小さいが、実際の面積としては膨大である。出力密度の低い電源の大量導入については、このような考察も重要である。

「中長期ビジョン」では、日本の電源構成等を再エネ、原子力比率等の 6 つのケースに分類して評価した。発電による CO₂ 削減量として近いのは 50g/kWh であり、製鉄等の素材産業や輸送関係での削減が課題という点は MIT レポートと同じである。「中長期ビジョン」は日本の評価のみであり、再エネ導入量等の制限から 1 g/kWh までの評価は実施していない。

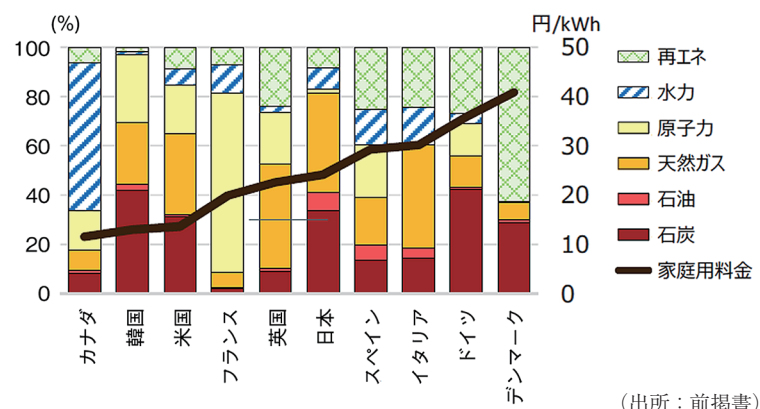
日本と諸外国のエネルギー事情を比較する際には、各国の電気料金を把握しておく必要がある。図 5 に家庭用の電気料金比較を、図 6 にそれらの国の発電源別の発電量比率を示す。図 5 から分かるように、ドイツ、イタリア、スペインといった再エネ早期導入国では概ね再エネ導入後から電気料金が上昇している。また、電気料金が低い国もこれらの国である。図 6 は電気料金が低い国から高い国を並べ、各国の発電源別の発電量割合と合わせて示したものである。福島第一原子力発電所事故後の特殊な状況の日本を除くと、電気料金と再エネ比率の相関が極めて高いことが分かる。

MIT との打ち合わせでは、MIT レポートで



（出所：電力中央研究所, 「電気料金の国際比較 - 2016 年までのアップデート - , 2018 年 1 月）

図5 家庭用電気料金の国際比較（1995～2016年）



(出所：前掲書)

図6 家庭用電気料金の国際比較 (2016 年)

評価した6つの地域のうち、日本に近いのは何処かが議論点の1つであった。当初、MIT側は中国の北京付近ではとの意見であったが、上記の電気料金比較等に鑑みると、「これといって近い地域はない」が結論となった。また、後述のサザン電力 / 米国エネルギー協会打合せ時も、米国はシェールガスの影響もあり電気料金が安く、更に州毎のばらつきも大きく、他国との比較は困難との意見であった。

MIT レポートには数多くの提言が記載されている。MIT レポートへの問い合わせで一番多いのは、規制側への提言の中での小型モジュール炉 (SMR: Small Modular Reactor) や革新炉の導入に向けた規制に関する部分とのことであった。MIT 側の意図は規制自体を変えることなく、開発初期段階からベンダー側と規制側が技術情報交換を継続していれば現状の規制で対応可能という意味だと強調された。

MIT との議論で出た他の情報として、使用済み燃料対策はドライ (キャスク) での中間貯蔵が一番合理的だという意見があった。「将来的に超ウラン元素消滅炉等が実現する可能性があり、今の段階で地層処分とか決め打ちする必要はない」というのが主な理由であった。50年後に消滅炉が実用化されると、地層処分は逆に負の遺産になりかねないとも言っていた。砂漠を含め土地が広大な米国と日本とでは、前提条件が違うことを考慮する必要があるが、待てるのであれば今後30～50年の技術進歩を見てから使用済み燃料対策の判

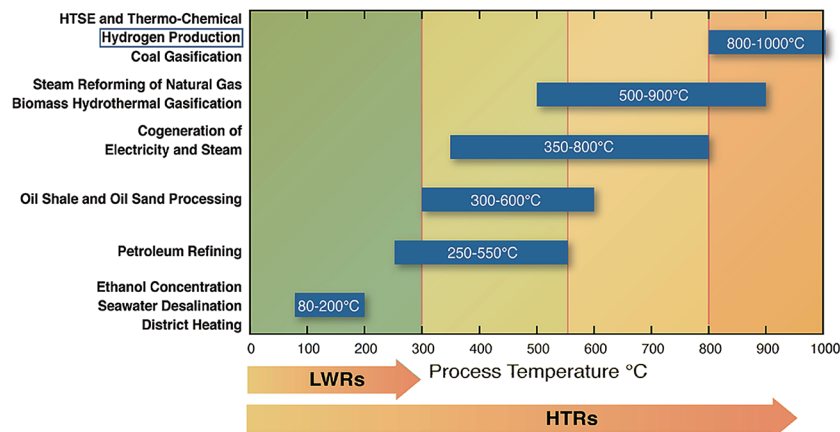
断をするということには合理的な面もある。

先述したが、MIT レポートと「中長期ビジョン」は、産業界、特に製鉄等の素材産業とトラック、重機、船、飛行機等の輸送での低炭素化が2050年視点でも難しいという点で一致している。MIT レポートでは、図7に示すように、熱利用についても分かり易くまとめている。この中で、将来的な水素製造についても議論した。図7では800～1000℃が水素製造の対象となっているが、経済性も考えると1000℃超が必須で、「現状、難しい。見通せない」というのがMITの見解であった。

「中長期ビジョン」では、日本での低炭素化を実現するために、CO₂フリー水素の輸入を取り入れた。国内に資源の少ない日本では合理的であるが、米国ではシェールガスも豊富で関心を持たれなかった。一方で、二酸化炭素回収・有効利用・貯留 (CCUS: Carbon Capture, Utilization and Storage) については、MITの別の研究室等で研究をしている等、非常に関心を持たれた。

(2) サザン電力とNEIとの打合せ

主に米国の原子力産業界との議論のため2019年3月、サザン電力と原子力エネルギー協会 (NEI: Nuclear Energy Institute) と打ち合わせを行った。サザン電力は現在、AP1000を2基建設中で、さらに革新炉開発にも積極的な米国の大手電力会社である。NEIは、原子力発電ならびに原子力技術産業



(出所：MIT, “The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World” に一部追記)

図7 MITレポートでの熱利用に関するまとめ図

に関する政策機構である。

米国では、AP1000がボーグル3, 4号の2基が建設中である。2基建設後の大型炉の新設計画について尋ねたところ、次にAP1000を作る場合、この2基の経験で建設費は下げられるが、現状、米国では大型炉新設の動きはないとの話であった。既に述べたように米国では電気料金が安く、電力の卸単価が3円/kWh程度であり、大型の既設炉で採算ラインぎりぎりのようである。今後は、運転コストが高くなる、1サイト1基の原子力発電所から順次運転を停止し、1サイト2基までは基本停止とする計画をまとめている。一方で、CO₂排出削減への寄与から州によっては原子力発電を補助する動きもあり、運転停止が延期される動きもある。

NEIとの議論では、米国原子力産業界で運転期間長期化への投資は2000～2010年で終了、福島第一原子力発電所事故対応への投資も概ね2012年で終了し、その後は原子力発電所への投資は減りつつあることが分かった。逆にいうと、既設炉への投資はしにくい状況とも言え、中国、ロシアへの対抗も踏まえた小型炉や革新炉への投資に前向きな印象であった。実際に、近年、サザン電力等も革新炉開発への投資を開始している。また、米国内で月1回程度、小型炉ベンダーや大学、国立研究所等が参画する革新炉関係の連携会合

が開催されるなど、動きが活発である。米国全体として、世界の原子力発電所の新設の3分の2以上が中国、ロシアが設計した炉であることに危機感を感じており、小型炉/革新炉での対抗を目指し、この分野で日本と協力していきたいとの発言もあった。

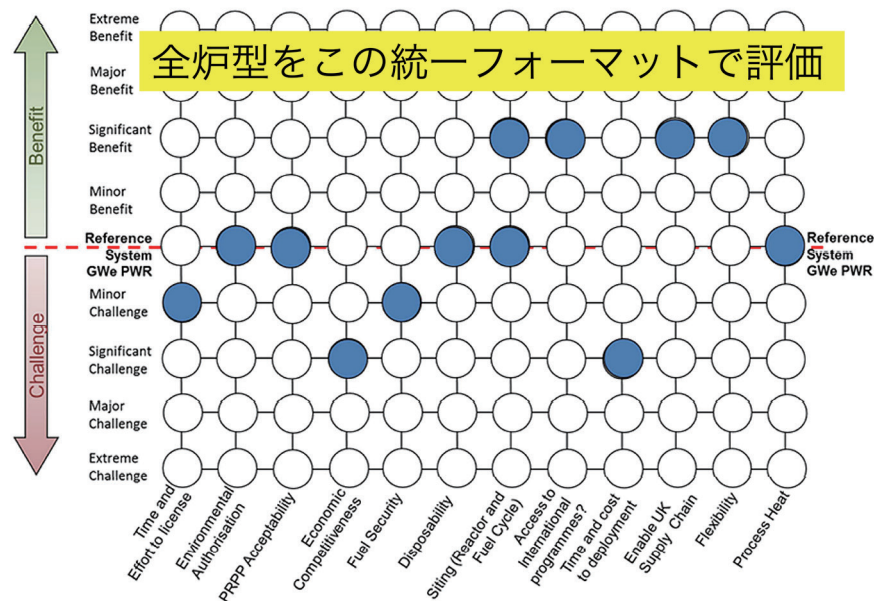
米国の電力会社も2050年にCO₂のネットゼロエミッションを公約として掲げ出した。具体的にどう実現するのかについて聞いたが、正直、実現手段は見えていないとの回答だった。

(3) 英国NNLとの打合せ

英国でも2014年頃から政府が小型炉開発への支援を表明しており、それ以降、小型炉の評価レポートが多数発行されている。当所は、これら小型炉の評価レポートを取りまとめているNNLと今までの小型炉の評価結果と今後の実用化に向けた動きについて、2019年10月に議論した。

NNLのSMR評価レポート“SMR Techno-Economic Assessment, Project 3 : SMRs Emerging Technology”(2016)では、各小型炉を図8に示すようにすべて同じフォーマットで比較・評価している。そこで、小型炉の長所、短所の意味についてまず確認した。

利点(benefit), 課題(Challenge)について、Minor, Significant, Major, Extremeの4段階評価となっている。基準となる原子炉は



（出所：NNL, "SMR Techno-Economic Assessment, Project 3: SMRs Emerging Technology," March 2016 に一部追記）

図8 NNLの小型炉評価レポートの比較フォーマット

100万kW級PWRである。利点の4段階は線形ではなく指数的に変化していくイメージとのことである。課題の4段階では、Minor, Significantはまあ頑張れば何とかなる範囲で、Majorはかなりの頑張りが必要、最後のExtremeは技術革新が必要というイメージだと説明であった。

課題については、最初の2段階MinorとSignificantであれば、後は実用化時期と経済性が主要な議論項目になる。一方、3段階目のMajorになると実用化時期が先に、最後のExtremeは実用化を可能とする技術革新がいつ可能になるかが議論項目となる。

図8の利点、課題の各評価項目に関してもレポートに明記されていない点が多く、それらの点について議論した。ここでは以下の2点のみ説明する。

SM (Small Modular) -PWRの電気出力が報告書に記載されていない。確認したところ30万kWとのことだった。燃料サイクルコストも評価諸元が記載されていないため確認した。結果は、基本的に各小型炉の公開文献を

参照しており、独自の評価はしていないとのことであった。

SM-PWRについては、最近提案されている小型炉の電気出力が30万kWより小さくなっており、燃料についても濃縮度20%未満の燃料（HALEU：High-Assay Low-Enriched Uranium）使用の例が多くなっている。これらを受け、NNLは既に再評価を実施中であり、2020年発行予定（当時）の改定版に向けて見直し中とのことであった。

近年英国でも、原子力の非電力利用のうち、水素・熱利用の議論が開始されている。英国の場合、マイクロ原子炉を含む小型炉は過疎地向けが中心であるが、その開発全体はフィージビリティスタディ（FS）段階にある。グリッドの柔軟性についても英国の電力会社EDF Energyがレポートにまとめて発行しているが、まだ詳細に議論する段階ではないとのことであった。

英国での小型炉の実用化時期についてであるが、政府の公式見解では2030年に初号機が運転開始するとのことである。英国では保守党、労働党の2大政党とも原子力推進を掲げ世論

も安定して原子力に肯定的である。一方で、予定していた原子力発電所の新設が遅れているため、停止予定だったガス冷却の原子力発電所の寿命延長で対応しているが、2023年にもガス炉がすべて止まる可能性がある。英国は日本と同じ島国で大陸側との連携にも限界がある中、今後電化が進むと将来の電力需要が2倍になるとの試算もある。これらの事情でエネルギー安定供給の観点も含め、現在の20%弱程度の電力を原子力で確保したいという考えは強い。但し、小型炉の初号機については、“deployment”の意味合いが不明確で、一般には実用段階の商用炉ではなく原型炉／実証炉的な意味で使われている例が多いとのコメントがあった。

英国の小型炉開発状況も活用の方向性も日本と近いという印象であった。英国は米国との関係が強いことや島国である点も日本と似ており、今後の動向は継続して注視していく。

5. 日本の原子力の今後に向けた考察

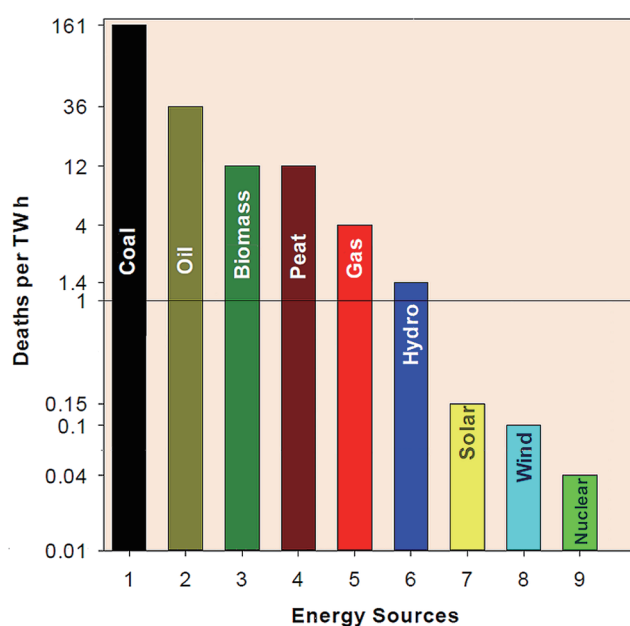
(1) 原子力に関する欧米との違い

欧米では本稿の導入部分で記した通り、大

気汚染、洪水、高潮、テロや様々な産業での事故やリスクがメディアでしっかり取り上げられ、それが日常会話や教育現場まで浸透している。また、安全や放射線影響も基本的に、他産業や他の人工物と横並びでの比較となる。

一方で、日本では、洪水、津波、地震はメディアで取り上げられるが、テロや他産業の事故、リスク等はほとんど取り上げられない。テロに関しては、ほぼテロの無い安全な国であることに由来していると考えられるが、他の経緯は不明である。産業や人工物のリスクに関して、これだけ原子力と放射線影響に特化・集中している国は珍しいと考える。

図9に、欧州での発電源別の単位発電量当たりの死亡者数の比較を示す。様々な評価結果があり、細かい数字は評価例、年度によって異なるが、図9の縦軸が対数目盛であることから多少の変動を考慮しても順位に大きな変化は起こらず、原子力の死亡者数が一番少ない評価となると推定できる。欧米では発電中や発電所内だけでなく、設計、製造、建設、運転、廃止措置に伴って環境中に放出されるCO₂、NO_x、SO_x、PM2.5といった微粒子等の影響もすべて



出所：Professor I. Pioro, University of Ontario Institute of Technology, "Potential of Hybrid Energy Systems based on SMRs and Renewables for Energy Supply and Security, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power, October 2019

図9 単位発電量当たりの様々な発電源別の死亡者数

含めたライフサイクル評価が標準である。発電中はリスクがあると思えない太陽光も図9のようにライフサイクルで評価すると製造、建設（据付）時のリスク等で原子力より高い数字となっていると考える。このようなことは日本で報じられることはほぼない。

日本では、使用済み核燃料や高レベル放射性廃棄物処分の問題も原子力固有の問題としてよく議論される。確かに、放射能を帯びた燃料や廃棄物は原子力固有ではある。一方で、高レベル放射性廃棄物も日本で過去及び将来に亘って発生するものすべてが、ビル1棟に入るものである。日本のCO₂排出量は毎年10億トン以上である。この体積についてご興味のある方は計算してみて頂きたい。驚くほど大きな体積になる。米国での打ち合わせのところで述べた「土地の5%」同様、具体的にイメージしやすい物理量での説明、比較が重要な場合もあると考える。

（2）原子力・放射線影響への不安

一般に「分からないもの」、「見えないもの」へのリスクは過大評価される傾向があると言われている。直近では、新型コロナウイルスもその一例かも知れない。ただ、コロナウィルスは「新型」であり、本当に分からない点が多く、「分からないもの」、「見えないもの」としては同類であるが、原子力・放射線影響と同列ではないと考える。

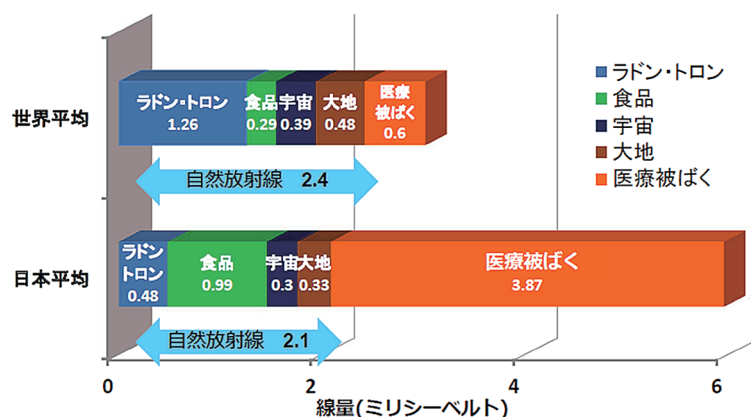
何故ならば、原子力・放射線影響については科学的には概ね知見が蓄積されているからである。課題はそのことが、国民に理解されていないことである。すなわち、「原子力発電は安全だ」と言われても良く「分からない」から不安になる。放射線影響も「目に見えない」ものであり、良く「分からない」ので不安が増長していくという循環である。

日本では国、電力会社を含む産業界でイメージ回復に向けて多大な努力が継続されているが、「分からない」から抜け出せていない。更に、ツイッター、フェイスブックなど近年のソーシャル・ネットワーキング・サービス（SNS）を含めた情報化社会の進展、感覚で動きやすい社会への移行で正確な技術・事実が伝わりにくくなっていることも見逃せない点である。

以下、主に放射線影響に関する事実を中心に、猛毒と言われるダイオキシンの例も参考に説明する。

図10と表3は環境省の「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料」（平成26年度版）からの引用である。年次は少し古いですが、基礎資料なので今も内容はほぼ同じと考えて問題ない。

図10は人間が1年間で被ばくする線量の世界平均と日本平均を被ばく源毎に示したものである。自然界から世界平均で2.4mSv、日本の平均で2.1mSvの被ばく線量となっている。放射線は確かに見えないのであるが、原



（出所：環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料」（平成26年度版））

図10 年間当たりの被曝線量（世界平均と日本平均）

表3 がんのリスクの放射線と生活習慣の比較

放射線の線量 (ミリシーベルト)	がんの 相対リスク※	生活習慣因子
1,000 ～ 2,000	1.8 1.6 1.6	喫煙者 大量飲酒（毎日3合以上）
500 ～ 1,000	1.4 1.4	大量飲酒（毎日2合以上）
200 ～ 500	1.22 1.29 1.19	肥満（BMI≥30） やせ（BMI<19）
100 ～ 200	1.15 ～ 1.19 1.11 ～ 1.15	運動不足 高塩分食品
100 ～ 200	1.08 1.06	野菜不足
100 未満	1.02 ～ 1.03 検出困難	受動喫煙（非喫煙女性）

※放射線の発がんリスクは広島・長崎の原爆による瞬時的な被ばくを分析したデータ（固形がんのみ）であり、長期にわたる被ばくの影響を観察したものではありません。
※相対リスクとは、被ばくしていない人を1とした時、被ばくした人のがんリスクが何倍になるかを表す値です。（出所：前掲書）

子力発電所がなくても、大気中のラドン/トリロン、食品、宇宙や大地からの放射線で毎年この程度は被ばくしており、これは避けようがないものである。医療被ばくはなるべく低くすることを原則に別扱いとなっており、ここでは触れない。

表3は、がんのリスクについて放射線と生活習慣因子で増加の程度を比較したものである。これは広島、長崎の原爆による瞬時的な被ばくを分析したもので、原子力発電の場合、チェルノブイリや福島第一原子力発電所事故といった過酷事故時の影響に近いものである。

100mSv 以下ではがんの相対リスク増加は検出困難となっており、統計的に有意な差はみられない（不明）というのが現実である。

100mSv を超えると相対リスクが有意に出てくる。生活習慣因子との比較で見ると、200mSv までは野菜不足、500mSv までは肥満、やせ、運動不足、高塩分食品と同等である。さらに、1000mSv までだと毎日2合以上の飲酒、2000mSv までは毎日4合以上の飲酒と喫煙と同等である。

一般公衆の被ばく限度は年間1mSvとされている。これは一生かかっても100mSvに到達しないという意味でもある。一方で、生活習慣因子との比較で見た場合、100mSvを超えても、それが野菜不足、運動不足と同等のリスクであるのも事実である。

このような生活習慣因子との比較は極めて

分かりやすく、ネット上でも公開されている。課題はこういう情報が国民の何%に正しく伝わって、真に理解されているかである。

更には、実際にリスクがあっても、知らなければ実態として「問題」とならないのも事実である。これに関して実際に問題やリスクがあるということとは別に、一般に猛毒と言われているダイオキシン類について簡単に説明する。

ダイオキシン類で有名なのはPCBであるが、ダイオキシン類は物が燃焼する際に発生する物質で、逆に言えば、物を燃やす限り出てくるものである。実は、ダイオキシン類とは、ポリ塩化ジベンゾジオキシン、ポリ塩化ジベンゾフラン、コプラナーポリ塩化ビフェニルという3種類の物質群の総称で、ダイオキシンと言う単一の物質は存在しない。ダイオキシン類の化合物の種類は極めて多く、ダイオキシン類の健康影響は、各化合物の毒性をもとに毒性等価係数（TEF）で積算評価する。表4にこのTEF値の例を示す。この評価方式は、放射線影響の評価でガンマ線、ベータ線、中性子、アルファ線等で重みづけしているのと似た考え方である。

実際に、日本で国民がどの程度ダイオキシン類を摂取しているかを示したものが図11である。1日に摂取して健康に影響がない体重1kg当たりの4pg・TEQの約3分の1の1.35pg・TEQとなっている。ダイオキシン類

表4 毒性等価係数（TEF）の例

	化合物名	TEF値
PCDD (ポリ塩化ジベンゾ-パラ-ジオキシン)	2,3,7,8-TCDD	1
	1,2,3,7,8-PeCDD	1
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1
	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01
	OCDD	0.0001
PCDF (ポリ塩化ジベンゾフラン)	2,3,7,8-TCDF	0.1
	1,2,3,7,8-PeCDF	0.05
	2,3,4,7,8-PeCDF	0.5
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1
	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1
	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01
	OCDF	0.0001
コプラナーPCB	3,4,4',5'-TCB	0.0001
	3,3',4,4'-TCB	0.0001
	3,3',4,4',5'-PeCB	0.1
	3,3',4,4',5,5'-HxCB	0.01
	2,3,3',4,4'-PeCB	0.0001
	2,3,4,4',5'-PeCB	0.0005

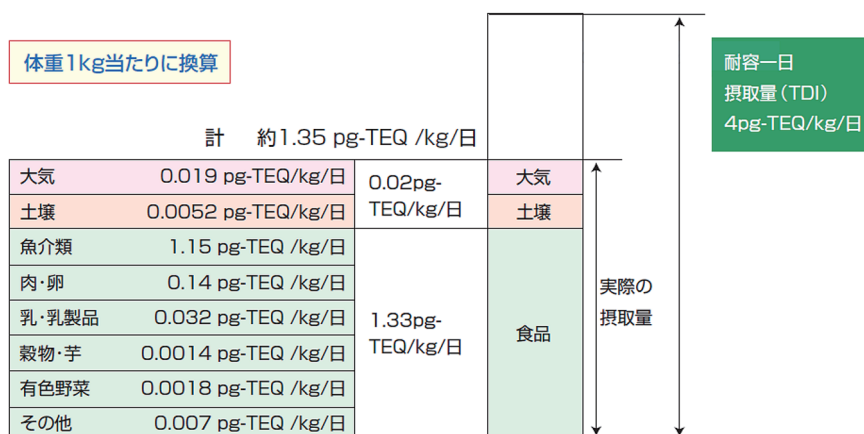
(以下、省略)

(出所：関係省庁パンフレット「ダイオキシン類」(2005))

については、焼却施設等の規制強化等によって日本では発生量が年々減っており、実際に健康に影響があるというものではない。一方で、ダイオキシン類の摂取量の大半が食品からというのを知っている方はどの程度いるだろうか。別にこれを全国民に周知しなくてはならないというものではないのである。知ってもどうしようもないのであるし、不安を煽るだけで終わる可能性が高いのである。また、1日の摂取量にしても、健康に影響のない値としている4pg・TEQ/kg/日も十分に余裕を持った量で、実際には健康影響が出る水準の

10分の1以下と考えるのが妥当である。

先ほどの被ばく線量によるがんのリスクは100mSvまで有意な差がないということと、公衆の被ばく線量限度が1mSv（100mSvの100分の1）であることを考えると、ダイオキシン類のリスクも似たようなものとも考えられないだろうか。放射線影響のみが大きく騒がれる原因は何なのか。欧米式のライフサイクルでみた電源別の死亡者数等の評価で考えるのが妥当という見方もでき、皆様の今後のリスクに関する考察の参考になれば幸いである。



(出所：前掲書)

図11 日本のダイオキシン類の1人1日摂取量

(3) 気候変動抑制と原子力

IAEA 主催、OECD/NEA 共催の気候変動と原子力に関する国際会議の詳細は本報掲載の高野研究員の報告に詳しいが、筆者もこの会議に参加した。主に感じたことは以下のことである。

- ①はこの認識をどう国民理解につなげるか、
- ②は意図・評価は理解も達成へ向けてどうしていくのか、
- ③は真の意味での小型炉市場の立ち上がりが必要である。

気候変動対策に原子力が必要として、単純な自由競争下で巨額かつ長期の投資は民間だけでは困難というのが最近の動向である。大型炉新設には何らかの政策的支援が必要とな

- ① 気候変動抑制には原子力が必要なことは本国際会議参加者（専門家）間では共通認識
- ② IAEA の 2050 年 1.5℃目標達成への、再生可能エネルギー約 30 倍、かつ原子力も約 3 倍
- ③ 新興国は CO₂ 排出抑制と経済発展の両立に原子力利用に前向きも、大型炉はニーズ少なく小型炉に期待

り、欧米で色々な案が出ているのは事実である。再エネも FIT 等の政府 / 国民負担の下で導入が促進されているのも事実であり、この点も周知しつつ考えていくことが重要と考える。エネルギー / 電力需要の少ない新興国や出力が変動する再エネとの相性の観点から、原子力、特に大型炉はニーズが小さいとの意見もある。原子力発電比率が高いフランスで、負荷追従運転が実施されているのは事実である。一方、再エネ向けの蓄電、蓄エネ技術（水素利用等含む）は原子力でも活用できるものである。この辺りは、将来的な電気自動車(EV)の活用も含めた電力システム全体の話となるので、幅広い検討、議論が必要と考える。

小型炉は再エネとの共存に向いているとの見方もあり、国、地域によってはその通りである。スケールデメリット克服はまだ実績がなく、小型炉が何基目で安くなるかも不確定な部分がある。最終的には、航空機のように 100 基単位の受注にならないと目標コストは実現しないのではとの意見もある。近年の技

術進歩は早く、IoT、AI、3D プリンター等の技術を上手に活用すれば 10 年後がどうなっているか分からない時代である。原子力関係の議論も決め打ちではなく幅広く考える必要がある。

日本の小型炉、革新炉開発は、高温ガス炉以外では欧米、特に米国に大きく遅れているのが実情である。大型炉から小型炉までフルラインアップのロシア等の存在も踏まえた、日本の戦略も重要である。

現状、日本は再稼働に注力せざる負えない状況にある。この間に、繰り返しになるが、専門家でない一般国民に原子力発電の必要性、放射線影響、高レベル放射性廃棄物処理等について正確で分かり易い情報を提供していく必要がある。これには、基本的な知識の可視化が一案として挙げられる。気候変動による影響としては何十年も前から言われている、南極の氷が解けると海水面が 40 ～ 70m、グリーンランドの氷が解けると 7m 上昇といった話から入っていくことも必要かもしれない。当所のある東京都港区西新橋交差点は海拔 3.8 m である。これは 7m 海水面が上昇すると少なくとも交差点付近のビルの一階はほぼ水没することを意味する。我々が生きているうちにこういうことが起こるとは考えにくい、いずれ直面する課題であることは常に考えておく必要がある。

6. まとめ

気候変動の抑制については世界的に産官学に加え、国民の理解も進んでいる。原子力についても、小型炉、革新炉の開発の動きは活発であり、民間資金も入りつつある。但し、本当に今まで世界で幅広い運転実績のある大型炉の代替が小型炉のみで可能かは不透明である。

再エネの導入は、日本も含めて世界的に一定レベルまでは進むことが確実であるが、導入量には限界があり、グリッド側のコストも考慮する必要がある。再エネでカバーできな

いエネルギー源として、結局、火力か原子力に頼らざるをえない。

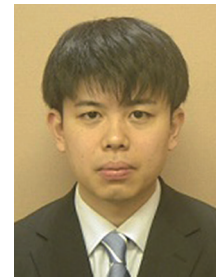
資源のない日本が国際社会で生き残るために、まずは気候変動を切り口にエネルギーに関するライフサイクルで、かつ、個別ではなく横並びでの議論が進めることが重要と考える。どのエネルギー源もライフサイクルで見れば長所、短所があるからである。本稿がこのような議論を促す一助になれば幸いである。

参考文献

- (1) (一財) エネルギー総合工学研究所, 『中長期ビジョン～2050年に向けたエネルギー技術展望～』, 2019年1月
- (2) <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf#search=%27The+Future+of+Nuclear+Energy+in+a+CarbonConstrained+World%27>

気候変動対策における原子力の役割と技術的・社会的課題 ～「気候変動と原子力の役割に関する国際会議」を踏まえて～

高野 大志 (プロジェクト試験研究部
研究員)



1. はじめに

気候変動問題は、国際社会が一体となって取り組まないと解決できない重要な問題である。その取組みの一環として、2015年12月の第21回国連気候変動枠組条約締結国会議(COP21)において、パリ協定が採択された。パリ協定では世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、努力目標として1.5℃に抑えることとしている。さらに、パリ協定では締約国が自主的に温室効果ガス(GHG)の排出削減目標を作成する義務を負っている。この協定に従い、締約国が2030年前後における削減目標を掲げているが、現状では全ての国がこの目標を達成したとしても、トータルの削減量が平均気温上昇を2℃以下に抑えるために必要とされる削減量には達しないことが分かっている。それを踏まえ2019年スペインで開催されたCOP25においては、削減目標の上乗せや削減のインセンティブとなるような二酸化炭素(CO₂)に係る国際市場メカニズムについて議論されたが、有効な結論には至っていない。

このように世界的に困難と認識されている気候変動問題であるが、その対策の1つとして原子力発電が有力視されている。2019年10月には、国際原子力機関(IAEA)主催、経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)共催で、ウィーンにおいて「気候変動と原子力の役割に関する国際会議」が開催された。この会議では、各国のエネルギーミックス(電源構成)目標と合わせた気候変動問題への取組み状況、原子力

の既存技術や先進技術の状況とそれらによるGHG削減効果、各国国民の原子力や気候変動問題に対するイメージやその向上活動について報告がなされた。この会議には79カ国、18の国際機関が参加し、参加人数は550人であった。

本稿では、この国際会議での議論の内容を中心に、気候変動対策における原子力の役割、技術的・社会的課題等について報告する。最初に、パリ協定目標達成に向けた各国の取組み状況を示す。次に、原子力産業の維持・発展に必要な技術として運転寿命長期化(LTO: Long-Term operation)の評価、小型モジュール炉(SMR: Small Modular Reactor)の開発状況、水素エネルギー市場における原子力の役割について。最後に、今後の原子力導入を推進する上で必要と考えられる各国における国民の原子力に対するイメージとその向上策について述べる。

なお、本稿の図は、大部分が上述の会議での発表からの引用である⁽¹⁾。また、会議での発表の動画は、IAEAサイトのLive video streamで観ることができる⁽²⁾。各動画は日付と会場ごとに整理されているので、巻末参考文献の末尾に対応する日付と発表場所を示す。

2. 気候変動問題への対応

まず、会議で示された気候変動対策(パリ協定目標達成への取組み)の現状と各国の電源構成目標について述べる。

(1) パリ協定目標と各国の自主削減目標

図1にOECD/NEAが発表した、34カ国が

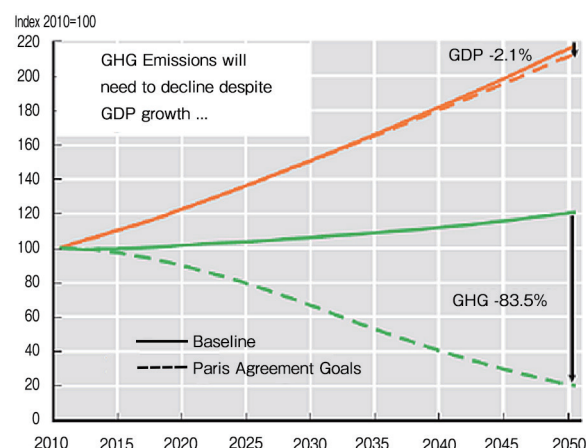


図1 OECD/NEA が提示したパリ協定目標達成のための GDP と GHG 排出量 ⁽³⁾

ら成る OECD 諸国がパリ協定目標を達成する場合の国内総生産（GDP）と GHG 排出量の試算結果を示す。図が示しているように、パリ協定目標の達成には、Baseline（CO₂ 排出対策をしない場合）と比較して、2050 年時点で GHG 排出量を 83.5% 削減しなければならない。これは大変厳しい目標である。その一方で、GDP の減少はごくわずかに抑えなければならないという二律背反的な課題と言える。

その点について、OECD/NEA は、気候変動対策と経済成長が矛盾すると認識すると目標の達成がより困難になるので、再生可能エネルギー（再エネ）と費用対効果の高い原子力をバランスよく適用することが問題解決策の 1 つになるとしている。

次に、パリ協定目標にして各国が自主的に設定した 2030 年前後の CO₂ 削減目標を表 1 に示す。表で注目すべき点が 2 つある。1 つ

は、各国とも CO₂ 削減の基準年がバラバラに設定されている点である。アメリカ、EU、日本は CO₂ 排出量がピークに近い年を基準年として削減目標を設定していることが推察される。もう 1 つは、各国の CO₂ 削減目標の評価基準が異なることである。中国、インドは今後の自国の GDP 増大を想定し、対 GDP 比での CO₂ 削減目標としている。このように各国とも異なる基準を用いているため、その解釈には注意を要する。

各国が定めた CO₂ 削減目標の達成状況はどのようなのか。パリ協定目標達成状況を監視する、32 カ国から成る独立機関、Climate Action Tracker による整理を図 2 に示す。世界のほとんどの国が CO₂ 削減目標を達成できておらず対応が不十分であると評価されている。各国ともこの状況は認識しているが、先述の通り、経済成長との両立が困難な状況にある。

表 1 主要国が定めている CO₂ 削減目標

国名	目標年	基準年	CO ₂ 削減目標
アメリカ	2025年	2005年	26～28%
EU	2030年	1990年	40%
中国	2030年	2005年	60～65% （GDP比）
インド	2030年	2005年	33～35% （GDP比）
日本	2030年	2013年	26%

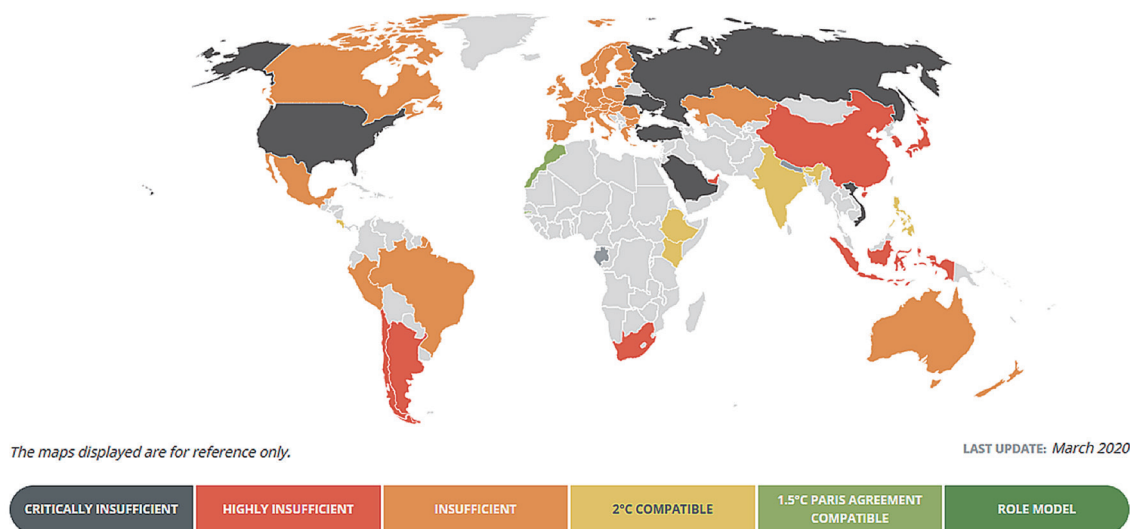


図2 Climate Action Tracker が整理した各国のパリ協定目標達成状況⁽⁴⁾

(2) パリ協定目標のための世界の電源構成

国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）で集約された 1.5℃ シナリオの中から、IAEA が平均的と評価したシナリオを図 3 に示す。評価の内容については、参考文献（5）をご参照頂きたい。

太陽光、風力は、2050 年までに発電容量を 34,000TWh 増やし、全体の約 53% を占めると想定されている。これは 2016 年の約 30 倍であり、導入には立地の確保や出力変動対策等の課題がある。原子力の発電容量は、2016 年

の約 3 倍に相当する 5,300TWh 増やし、全体の 12% を占めると想定している。現在の社会情勢を踏まえると、これは容易ではないと考えられるが、IAEA は経済的、資源的、産業的観点で実現可能としている。なお、この原子力導入量を実現するには年平均 200TWh の導入が必要であるが、これは原子力導入がピークだった 1990 年前後の 1.5 倍に相当する。

(3) 電源構成から伺える今後の原子力導入

次に、今後の原子力導入について、原子力先進国から英国、原子力新興国からインド、

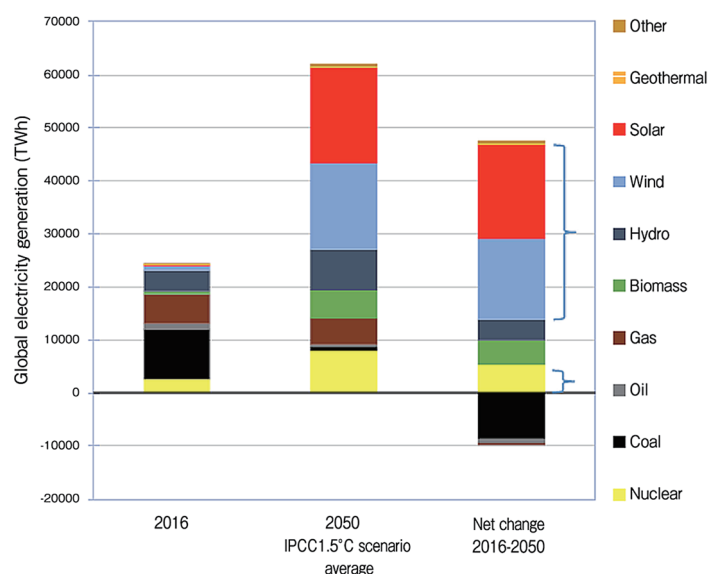


図3 パリ協定目標実現に向けた平均的シナリオでの電源構成⁽⁶⁾

さらに導入検討中の国からガーナの電源構成について述べる。

図4は、英国の非営利団体 Energy for Humanity が試算した、新型原子炉導入の有無による2034年の英国における電源構成の違いである。この発表は国家目標ではない点に注意を要するが、2018年では、天然ガスが50%程度、次いで原子力が20%程度を占めている。

2034年までに新型原子炉を導入できないケースでは、現状の半分程度の天然ガス火力の利用と電力需要の微減を想定している。これに対し、新型原子炉を導入するケースでは、天然ガス火力をさらに削減しながらも、電力需要増にも対応可能となっている。この試算からは、原子力への期待が伺える。

図5にインドの電源構成を示す。それによると、電力需要は2016年から2027年までに2.3倍になる。また、2016年時点で30%だった非

化石エネルギー（石炭、天然ガスを除く）の割合は、2027年には56%になる。一方、原子力の割合は、2016年、2027年ともに2%で、比率としては横ばいである。しかし、この間に電力需要が2.3倍に増大するので、比率の横ばいは、原子力発電量の増加、すなわち原子力発電所の新規建設が想定されていることを意味する。2016年時点でのインドの原子力発電容量は5.8GWであるから、2027年までに7.5GW程の新設が想定されていることになる。

続いて、会議で積極的に質問をし、今後の原子力導入に前向なガーナの電源構成目標を図6に示す。ガーナの電力需要は、2018年から2046年までに約20倍になると見込まれている。また、2018年時点では、天然ガスと水力発電でほぼ全部の電力を供給しているが、2028年頃に原子力を2基導入し、2046年には発電量の約30%を原子力で供給することを想定している。

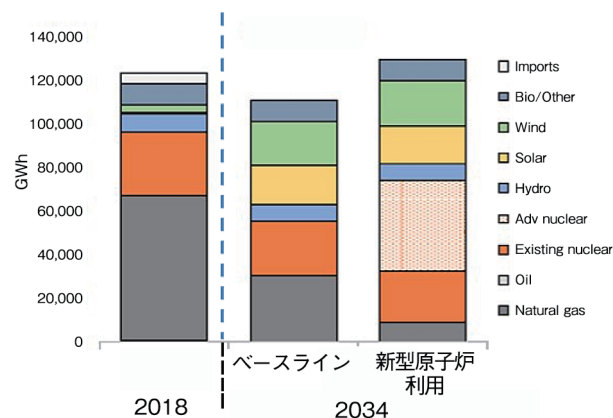


図4 新型原子炉導入の有無による英国の電源構成の違い (7)

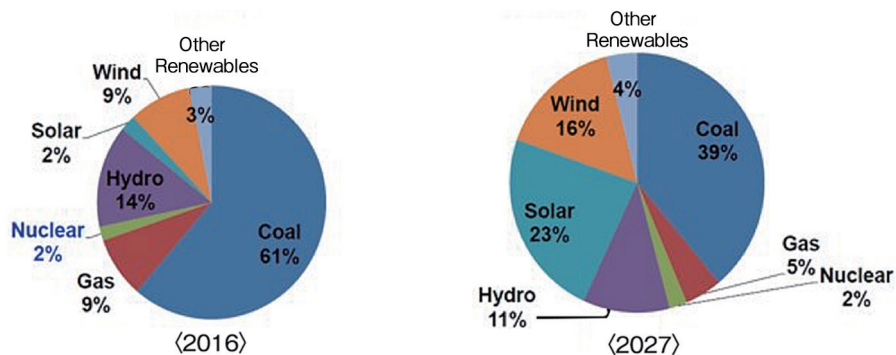


図5 インド資源エネルギー研究所（TERI）が提示したインドの電源構成 (8)

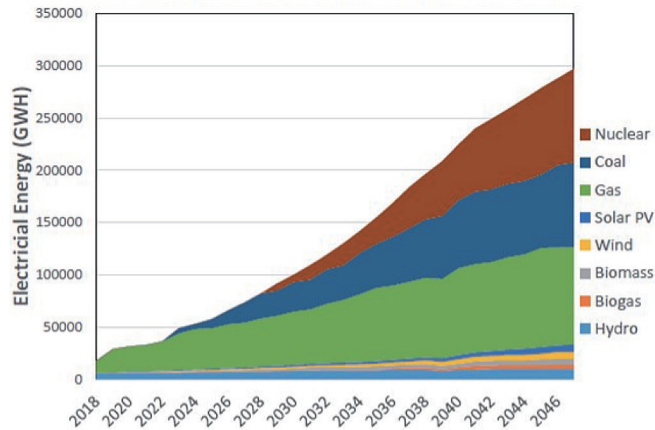


図6 ガーナの2046年までの電源構成⁽⁹⁾

3. 原子力技術の開発

(1) 運転寿命長期化

会議での運転寿命長期化（LTO）の必要性についての発表の中から、欧州原子力産業協会（FORATOM）が行った発表を取上げたい。FORATOMによる検討結果として、欧州連合（EU）でのLTOの有無による原子力発電の割合の推移を図7に、他の電源との比較による原子力発電の発電コストを図8に示す。

図7で、LTOが無い場合、2030年の原子力発電の割合は6%にまで低下する。しかし、LTO有りの場合は、2030年に25%を維持できる。すなわち、LTO技術が2030年頃のEUの原子力を支える鍵となることを示唆している。

図8の左は、既存電源（LTO有の原子力発電を含む）の発電コスト比較、右は新設した場合

合の比較である。LTO有の既存の原子力発電の発電コストが最も安価であることが示されている。しかし、右では、原子力発電のコストは平均的な水準である。原子力の新設が順調に進んでいないこともあり、既存の原子力発電所でのLTOの活用は、2030年前後の原子力利用の重要技術の1つになると考えられる。

(2) 先進的原子力技術～SMR

現在各国において、小型モジュール炉（SMR）の開発が進められている。SMRは初期コストが低いため導入へのハードルが低い、内蔵する放射能が少ないため防災計画エリアの縮小が可能、モジュール化することで現地工事の負担軽減ができる、小容量により電力の小規模需要への対応が期待できる等、多くのメリットがある。

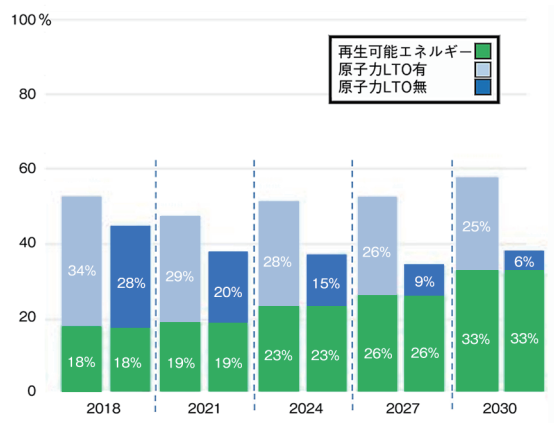


図7 LTOの有無による原子力発電割合の推移⁽¹⁰⁾

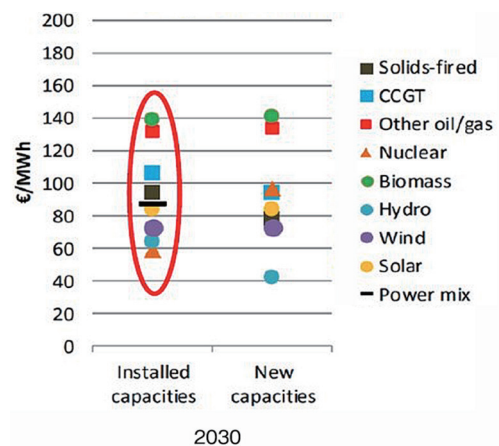


図8 EUにおける各電源の発電コスト⁽¹¹⁾

会議での発表から、IAEA が、ロシア、アメリカ、中国、日本、英国、カナダ、アルゼンチン等を主要な SMR 開発国と認識していることが分かる。中でも IAEA が導入間近と認識している 3 タイプの SMR を図 9 に示す。それぞれアルゼンチン、ロシア、中国の 3 カ国が開発中の SMR である。特に、ロシアの KLT-40S は建設試運転を完了し早期の商用化が期待されている。

図 10 は、ケンブリッジ大学による SMR によるコスト評価である。この評価は開発者の提示したデータに基づくため、やや楽観的過ぎるという面はあるが、SMR の経済性への期待を示す一例と言える。図中の一番左の棒グラフが大型炉のコスト、左から 2 番目以降の棒グラフが SMR のコストである。単純にス

ケールダウンすると、左から 2 本目のグラフに示すように、SMR は大型炉のコストを大きく上回る。しかし、標準化、モジュラー化等の様々な要因によりコストダウンを見込むことができ、初号機では大型炉のコストを下回ると評価されている。さらに習熟効果などにより 10GW の SMR 建設時点では大型炉の半分以上のコストになると評価されている。

このような SMR に対する期待は大きい。例えば、ケニアは、自国の送配電網の規模を勘案して、大型の原子炉よりも SMR の導入に期待を寄せており、会議でも SMR の実用化時期について、繰り返し質問している。

4. 水素エネルギーへの原子力利用

水素は燃焼時に CO₂ を排出しない二次エネルギーであり、GHG を大幅に削減する方策の 1 つとして注目されている。

本章では、水素エネルギーによる低炭素化の実現、水素生成への原子力発電の適用の必要性について述べる。

アーヘン工科大学の発表によると、図 11 に示すように、原子力、再エネ等多様な選択肢があるため、電力分野の低炭素化は容易である一方、鉄鋼、セメント等の産業、船や航空機などの大型輸送、さらに電力の負荷変動追従等の分野での CO₂ 排出削減は難しい。そ

	CAREM	KLT-40S	HTR-PM
開発国	アルゼンチン	ロシア	中国
開発状況	建設中	商用化準備中	試運転中
炉型	PWR	浮揚式PWR	HTGR
電気出力	30MW	35MW	210MW
近況	初臨界2021年9月予定	・建設終了 ・試運転完了	・建設完了 ・試運転(2019～2020年)

図 9 導入間近と認識される SMR ⁽¹²⁾

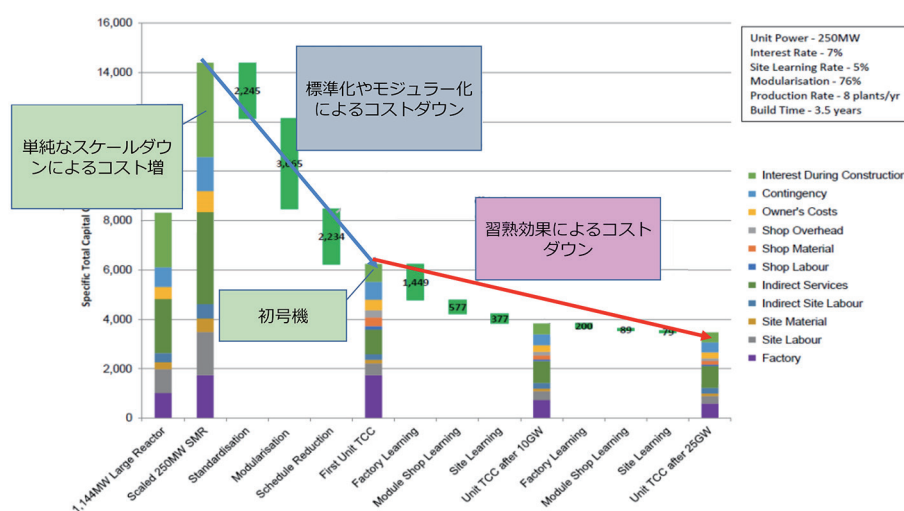


図 10 ケンブリッジ大学による SMR のコストダウン試算 ⁽¹²⁾

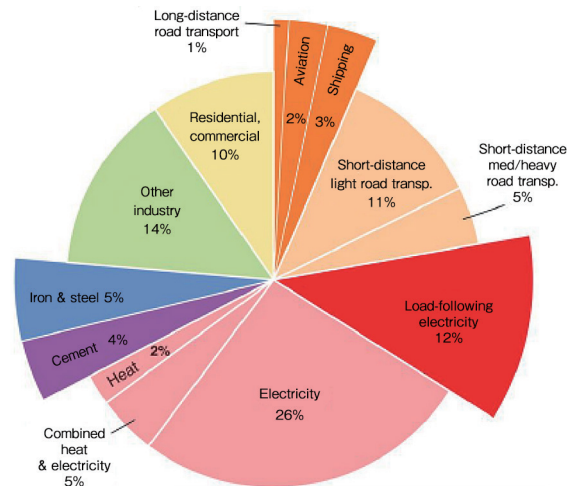


図 11 アーヘン工科大学による CO₂ 排出削減分野の評価⁽¹³⁾

これらの分野では、水素エネルギーを利用することで CO₂ 排出削減ができるとアーヘン工科大学は評価している。なお、当研究所は、『中長期ビジョン～2050 年に向けたエネルギー技術展望～』（2019 年 1 月）をとりまとめたが、その検討及び意見交換を通して、CO₂ 排出削減が困難な分野については、国内外関係者と概ね共通の認識を持っている。対策については必ずしも国内外関係者との共通認識はないが、当研究所のビジョンも含め、水素への期待は小さくはないと考えている。

現在の世界の水素エネルギー市場は 80Mt 規模である。これは世界の一次エネルギー消費量の 1.9% に過ぎない。ROSATOM の発表によれば、2050 年までに水素エネルギーの市場は 250 ～ 550Mt 規模に拡大する。これは主に水素の商業用利用規模が拡大することを想定しているためである。同じく、ROSATOM によると、現在水素エネルギー利用は工業用 90%、商業用 10% であるが、2050 年には商業用が 65% まで拡大する。

しかし、水素は利用時こそ CO₂ を排出しないものの、現在主流となっている化石燃料からの水素製造だと生産過程で CO₂ を排出する。そこで、水素製造のエネルギー源として風力、水力、太陽光等の再エネ電力を用いて、CO₂ を排出せずに水素を生成する（CO₂ フリー水素）ことが研究されている。

同様に、原子力、二酸化炭素回収貯留（CCS）や二酸化炭素回収有効利用（CCU）技術を利用すれば CO₂ フリー水素を生成できることから、水素エネルギーへの原子力利用の期待も示されている。

5. 各国における国民の原子力への認識

これまで述べてきた通り、複数の国が原子力発電を気候変動問題の対策として評価しているが、国内外ともに原子力に対してあまり良いイメージを持ってない人も少なくない。本章では、原子力の気候変動問題への貢献と国民イメージの乖離、そしてそのイメージ向上の方法について述べる。

（1）原子力の気候変動問題への貢献と国民イメージの乖離

図 12 は ROSATOM が示した、電源毎の単位発電量当たり CO₂ 排出量である。そこでは発電施設の設置から廃棄に至るまでのライフサイクルを通して排出される CO₂ が考慮されている。原子力は、水力や太陽光よりも CO₂ 排出量が少なく、風力とほぼ同等となっている。

このように CO₂ 排出が非常に少ない原子力だが、各国の国民はそう認識していないというアンケート結果が出ている。図 13 は、アメリカの環境科学技術団体が、自動車、石炭

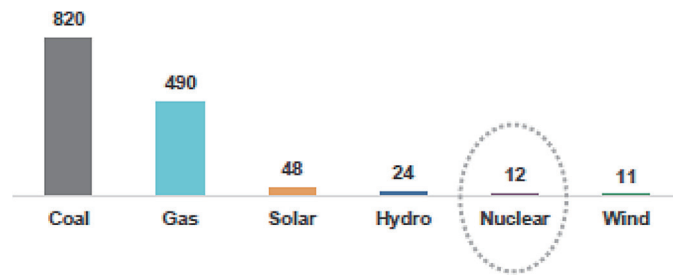


図 12 電源別の CO₂ 排出量（単位発電量当たり）⁽¹⁴⁾

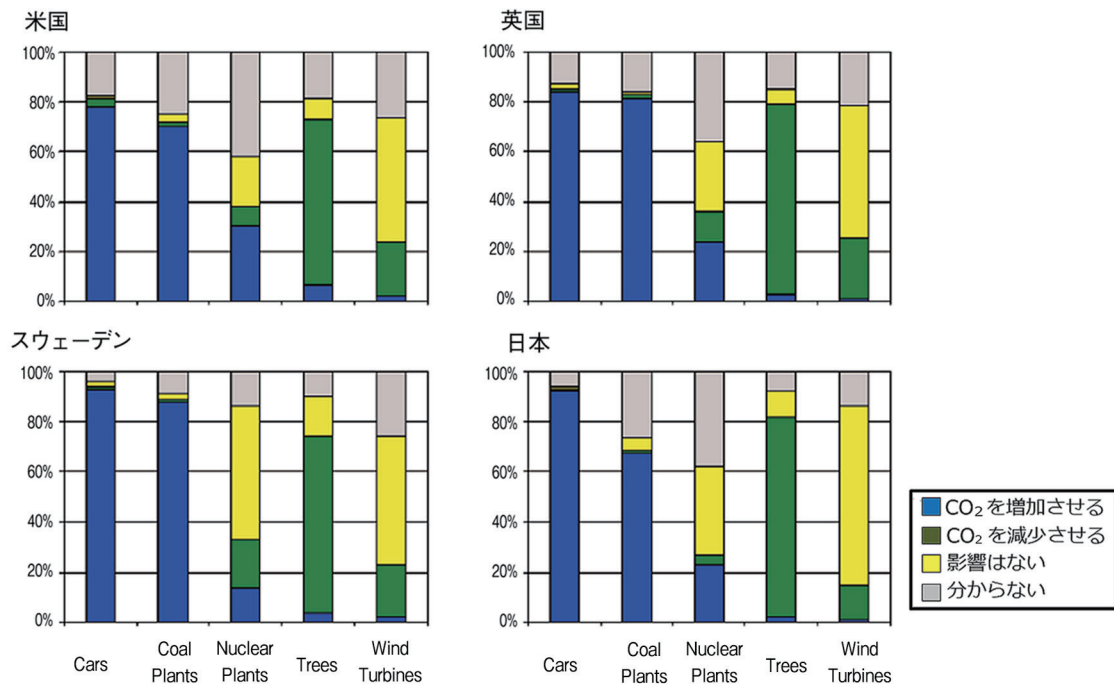


図 13 CO₂ 排出削減への寄与に関するアンケート調査結果 ⁽¹⁵⁾

発電，原子力発電，樹木，風力発電の 5 項目で，CO₂ 排出削減への寄与について，アメリカ，イギリス，スウェーデン，日本で調査した結果である。これを見ると，樹木については CO₂ を減少させると認識している人が多いが，原子力は，減少させないどころかむしろ CO₂ を増加させると認識している人がどの国でも少なくなく，現実と認識のずれは大きい。

原子力の安全性についても図 14 のようなデータがある。これはカナダの発表からの図であるが，各発電方法の単位発電量当たりの死亡者数を比較している。石炭の死亡者数 161 人 / TWh に対し，原子力は 0.04 人 / TWh となっている。一概には言えないが，原子力の安全性を示すデータの 1 つと言える。

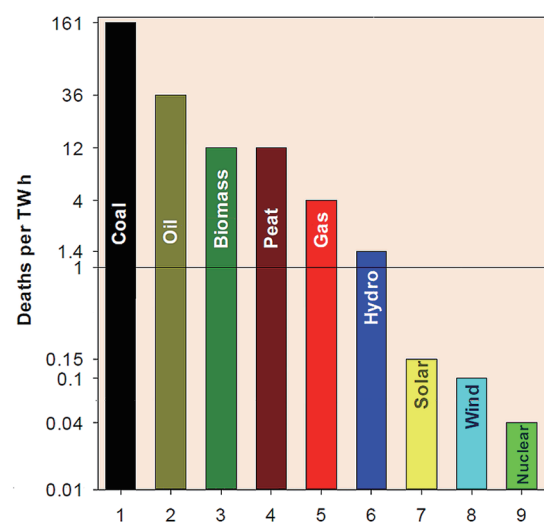


図 14 各電源の単位発電量当たりの死亡者数 ⁽¹⁶⁾

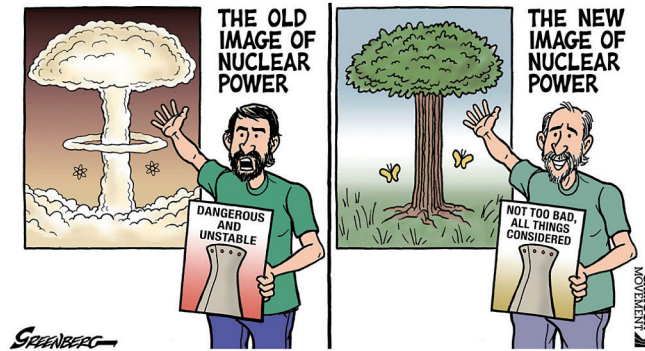


図 15 原子力のイメージ向上を呼び掛けるインドのイラスト (17)

(2) イメージ向上策

以上のように、原子力是他電源と比べ安全というデータもあり、また CO₂ 排出量が少ないのであるが、国内外で原子力に対しては余り良いイメージを持たれているとは言えない。

そこで、国民への原子力の必要性や、CO₂ 削減問題への貢献の重要性をアピールする 1 つの手段として、可視化を挙げることができる。2019 年 4 月～6 月、IAEA 主催で“visualization challenge”コンテストが開かれ、その優秀作品が会議のサイドイベントで発表されている。優秀作品では、各国の GDP の増加、CO₂ 排出量、原子力比率の推移が視覚的に分かりやすく確認できるようになっており、原子力や気候変動問題の各国の状況を直感的に理解できるものである。

また、図 15 はコンテスト作品ではないが、インドの発表の中で使われた図で、図中の左のような過去の原子力の悪いイメージを、右の新しいクリーンなイメージに変えていこうということを分かりやすく示している。

このように、可視化を用いて視覚的に CO₂ 排出量問題、原子力のイメージ等を訴えることは、各国の国民の原子力への認識の向上に役立つと考えられる。

6. まとめ

原子力発電は、費用対効果が高い非化石エネルギーであるため、気候変動問題を解決する上で重要な手段の 1 つと考えられている。

IAEA が評価した 2050 年のシナリオによれば、再エネの大幅増加を見込んでもなお現在の約 3 倍の原子力発電を導入する必要がある。その実現のためには各国が協力して原子力発電所の建設を進めていく必要があるが、当面は、LTO 技術や SMR の開発などを各国が技術を共有して推し進めていくことが 1 つの手段となると考えられる。

また、水素製造に原子力発電を利用することで、CO₂ を排出せずにクリーンな燃料を生成できると考えられている。このような原子力技術導入を進める上で、国内外とも各国国民の原子力へのイメージを向上させる必要があり、会議の中であった可視化の活動は 1 つの解決法となりうると考えている。

参考文献

- (1) <https://www.iaea.org/atoms4climate>
- (2) <http://streaming.iaea.org/21229>
- (3) William D. Magwood, NEA, Nuclear Energy and the Decarbonisation of Electricity: A Better Vision, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-07 am BR B/M1)
- (4) <https://climateactiontracker.org>
- (5) H. Turton, Planning and Economic Studies Section, IAEA, Accelerating Deployment of Low Carbon Power for 1.5° C, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-08 pm BR B/M1)
- (6) H. Turton, Planning and Economic Studies Section, IAEA, Accelerating Deployment of Low Carbon Power for 1.5° C, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-09 pm BR B/M1)
- (7) Kristy Gogan, Flexivle Nuclear Campaign, Flexible Nuclear Campaign: Nuclear-Renewable Integration for

Advanced Clean Energy Systems, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-10 am BR B/M1)

Role of Nuclear Power (2019-10-10 am BR B/M1)

- (8) A. Vinod Kumar, India, Role of Nuclear Power in reduction of Greenhouse Gas emissions – Indian Scenario, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-08 pm BR B/M1)
- (9) Isaac Ennison, Energy Commission, Ghana, "THE ROLE OF NUCLEAR POWER IN THE MITIGATION OF GHANA' S LONG TERM GREENHOUSE GAS EMISSION, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-08 pm M2)
- (10) Andrei Goicea, FORATOM Executive Manager, The Importance of Long-Term Operation of the Existing EU Nuclear Fleet, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-09 am BR B/M1)
- (11) Frederik Reitsma, Nuclear Power Technology Development, IAEA, Potential of Hybrid Energy Systems based on SMRs and Renewables for Energy Supply and Security, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-09 pm BR B/M1)
- (12) A Roulstone, Cambridge Nuclear Energy Centre, Potential of Hybrid Energy Systems based on SMRs and Renewables for Energy Supply and Security, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-08 am M2)
- (13) Nils Haneklaus, RWTH Aachen University, The Role of Nuclear Hydrogen Production in a Low-Carbon Economy, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-09 pm M2)
- (14) Polina Lion Chief Sustainability Officer, State atomic energy corporation Rosatom, ESG policy challenge: is there any space for nuclear?, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-08 am BR B/M1)
- (15) Reiner et al. (2006), American Exceptionalism? Similarities and Differences in National Attitudes Toward Energy Policy and Global Warming, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-10 am BR B/M1)
- (16) Professor I. Pioro, Ph.D., Dr. Tech. Sc., P.Eng., Fellow ASME, CSME& EIC, University of Ontario Institute of Technology, Potential of Hybrid Energy Systems based on SMRs and Renewables for Energy Supply and Security, International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power (2019-10-09 am BR B/M1)
- (17) Haseeb Cheerathadayan, India, Environment, Nuclear Power and People's Movement: India's Triangular Dilemma, International Conference on Climate Change and the

廃止措置を推進する技術者育成カリキュラムの構築と研修の実施

田中 健一（原子力技術センター
参事）



1. はじめに

（一財）エネルギー総合工学研究所（以下、当所）では、2015年度～2017年度までの3年間、東京大学が実施している文部科学省の原子力人材育成等推進事業（事業責任者：岡本孝司教授）の協力機関として、「廃止措置マインド」を持った技術者育成事業（以下、技術者育成研修）を実施してきた。2018年度からは、この事業の後継事業として「プロジェクトとしての廃止措置」のマネジメント（プロジェクトマネジメント：PM）にスポットを当てた人材育成事業（以下、PM研修）を実施しており、本年度が最終年度となる。

本稿では、廃止措置を担当する技術者に求められる視点を「廃止措置マインド」という技術者の心構えとして紹介すると共に、求められる技術を説明する。さらに、このような知識及び技術を有効かつ効果的に活用し、廃止措置を遂行していくために必要なマネジメントの手法について説明する。そして、これらを習得するために構築した研修カリキュラム及びその成果と今後の展開について紹介する。

2. プロジェクトとしての廃止措置

国際原子力機関（IAEA）の定義では、原子

力施設（以下、施設）のライフサイクルは立地、設計、建設、運転開始手続き、運転及び廃止措置の6つの段階で構成されるもの⁽¹⁾としている。業務の形態では、6つの段階のうち運転段階のみが「ルーチンワーク」（日常業務）であり、他の5つの段階は図1に示すように「プロジェクト」（事業）と分類される。

運転段階より前に実施される4つの段階は、供用という施設本来の目的を達成するために実行されるものである。その供用の活動は、「電力を供給する」または「新規の研究環境を提供する」などのために実施されるものであり、「新規事業の開発若しくは顧客に対する新たな製品またはサービスの提供を達成するための一連の活動」であり、一般的なプロジェクトの定義⁽²⁾に従うものである。すなわち、その実現に至る活動は、企業や組織が設定した戦略（以下、企業戦略）を具現化していくための事業計画に従い管理がなされていくものである。

一方、廃止措置というプロジェクトでは、その終了後に企業戦略を具現化するための何らかの事業というものは存在しない。廃止措置は、供用を終えた施設を解体し撤去することが目的であり、施設の跡地を放射線管理上の規制から全部または一部を解除することを目標とするものである。ここでは、「施設を更地に戻すこと」が目的である。そのため、「要した経費を完了



図1 原子力施設のライフサイクルと業務形態の関係

後に回収することができない」という点で、他の4つの段階におけるプロジェクトと大きく異なっている。また、廃止措置の段階は、最短でも10年程度、通常は30～40年、海外では100年を要するものもあり、プロジェクトの担当者が数世代に及ぶ長期プロジェクトである。

このような特有な条件が存在する廃止措置のプロジェクトを放射線被ばく上の安全を確実にした上で効果的かつ効率的に実施し完了するためには、日本工業規格の「プロジェクトマネジメントの手引」(JIS Q 21500:2018)に規定されているPMの手法を基本にし、廃止措置に課される条件に適合した管理を適用することが必須である。そして、PMの手法を理解し、廃止措置に特有の条件を把握している技術者の育成が求められている。

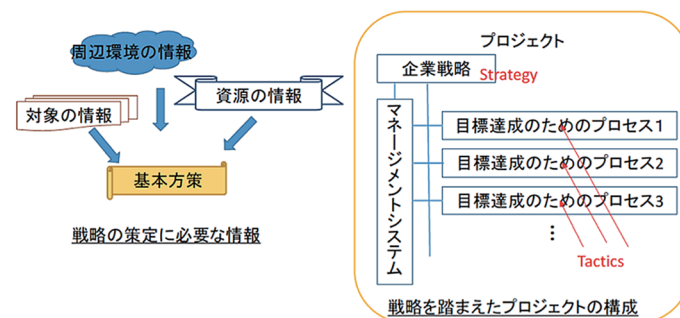
3. 企業戦略上考慮すべきプロジェクトとしての廃止措置の特徴

通常の企業戦略と廃止措置における企業戦

略の比較図を図2に示す。廃止措置の段階における企業戦略上考慮すべき特徴として以下の事項が挙げられる。このような特徴は、プロジェクトの計画立案で考慮すべき必須の事項である。

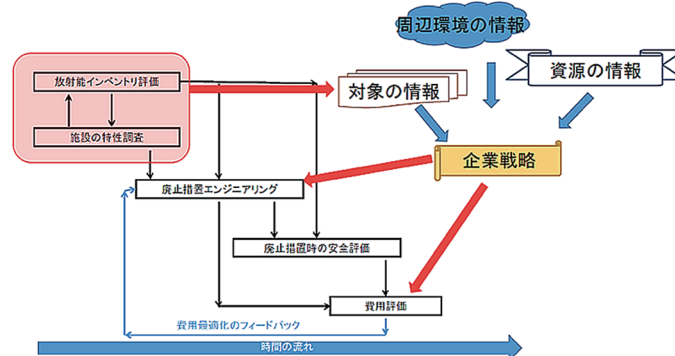
(1) 事業に要した経費を回収できない

廃止措置は、施設のライフサイクルの最終段階である。施設の供用という事業を終了したのちに実施される活動である。廃止措置というプロジェクトの終了は施設の完全な終了であり、施設自身(施設の供用を前提)として廃止措置に要した費用を回収するということはできない。廃止措置に要する費用は、例えば原子力発電所であれば解体積立金という制度によって、電力会社は運転段階に必要な費用を積み立てておくことが義務づけられている。この積立金では実際に必要な費用に不足するという見通しもあるが、それ(積立金の額を超過すること)も含めて要した費用は終了後にいっさい回収できないということで



Strategy (戦略) ⇔ Tactics (戦術) : 目標を達成するための具体的な方法、手段

〈目的達成のための企業戦略〉



〈廃止措置における企業戦略〉

図2 企業戦略の違い

ある。廃止措置に要する費用をプロジェクト完了後にその施設自身で賄うことができないということは紛れのない事実である。このため費用の最適化については、他の段階に増して十分な配慮とその実現に最大限務めることが求められる。廃止措置というプロジェクトでは、コスト意識をより強く持つことが求められる。

(2) 長期にわたる事業である

廃止措置は、運転段階とほぼ同じ期間かそれ以上の期間を要する長期にわたるプロジェクトである。このような長期プロジェクトでは、技術及び知識の伝承、人材の確保及び育成が重要な課題となる。設計、建設及び運転の各段階で活動した人材は、順次リタイアしていく。また、廃止措置の期間初期にプロジェクトに従事した者が期間後期にはリタイアしていることも当然起こり得ることである。このような状況下では、新たな人材の確保並びに新たな人材への技術及び知識の伝承は、企業戦略の最重要事項の1つと位置付けられなければならない

(3) 廃止措置に特化した技術分野はない

施設の解体を行い撤去することだけに着目した場合、廃止措置という事業のみで用いられる固有の技術というものは存在しないと言える。を行い撤去するという活動は、乱暴な言い方をすれば「復帰しない解体点検」と言えるのである。施設によっては、極めて高線量の箇所や有害物と放射性物質が混在する箇所などが存在する。しかし、そのような箇所であっても既存技術を組み合わせて対応していくことが十分可能である。廃止措置がプロジェクトである以上、これまでに経験したことない課題を解決していく局面が発生することは当然である。そのような局面でも、課題解決のためだけの独自の新規技術の開発を行うのではなく、既存技術の組み合わせで解決していくことを企業戦略に組み込

んでおくことが重要である。既存技術を効果的に組み合わせて課題解決を図っていくということは前節(1)で説明した費用の最適化に不可欠な要素である。そして、そのような既存技術の組み合わせによる課題解決には施設に関わる知識が必須であり、このためには、前節(2)で述べた技術と知識の伝承が重要である。

なお、上述の特徴以外に、例えば「廃止措置では施設の状況が廃止措置の進捗とともに刻々と変化していくこと」も特徴として挙げるべきではないかということもある。しかし、「刻々と変化していくこと」は、業務が一方方向に進んでいくプロジェクトの要件そのものであるから、プロジェクトマネジメントの中で扱っていくものであり、それ自体は企業戦略上考慮すべき特徴とはならない。

4. 目標とする廃止措置技術者像

技術者育成研修では、当所は、廃止措置を推進していく技術者の育成を目的とした研修カリキュラムの構築と研修を担当した。一方、PM研修では、廃止措置というプロジェクトを戦略的な視点を持って効果的かつ効率的に推進していくための知識を有する技術者の育成を目的としている。

両研修ともに育成を目指す技術者像は次の通りと設定した。

「原子力工学全般にわたりバランスよく知識を有する者であって、廃止措置の特徴を理解した廃止措置マインドを持った技術者であり、将来的に監督を行う者(廃止措置主任者)となりうる資質を有する人材」
--

言うまでもなく、この研修の研修生が皆同じ様なキャリアを経て、ここでいう「将来的に監督を行う者」(廃止措置主任者)となっていく訳ではない。ある者は、施設を運営管理する企業または組織で経験を積み、廃止措置を行う事業者として活躍するであろう。また、ある者は、メーカー、ゼネコン、エンジニアリング会社、

メンテナンス会社などにおいて技術者として廃止措置工事を現場で実施いく人や規制の立場で廃止措置に携わっていくであろう。立場や役割、キャリアなどが異なったとしても、廃止措置という事業に必要な基本的な技術や知識、すなわち、施設としての役割を終了し退役する施設を安全かつ合理的に解体し撤去していくために必要な基本的技術や知識は共通である。これら研修を通して、廃止措置という事業の基本的な考え方、計画立案及び廃止措置工事实施の要点の習得を目指すものである。

原子力は総合工学であり、廃止措置もその一分野である。廃止措置では、施設の所有者である企業または組織、それを建設し保守しているメーカーやゼネコン、そして設備維持のために日々現場で働くメンテナンス会社、また、廃止措置の計画及び実施について、規制や助言等を行う省庁などが、それぞれの立場でそれぞれの役割を果たして行くことが求められる。このために、この研修を通して「廃止措置マインド」を身につけ、廃止措置という事業において、研修生がそれぞれのキャリアにおいてそれぞれにふさわしい役割を果たす担い手となっていくことを目指している。

「廃止措置マインド」とは、先述した廃止措置の企業戦略上考慮すべき事項を理解し、廃止措置の戦略的な展開を可能としていく、廃止措置に関わる独自の視点のことである。安全かつ合理的であり、社会的に受容される廃止措置の計画立案及び実施を担当していくことを可能とする力量や廃止措置計画を管理できる技術者が持つべき視点とも言える。そして、この「廃止措置マインド」は、施設を運営管理し廃止措置を推進する企業または組織に属する者だけでなく、施設の設計、建設及び／又は運転に携わり、廃止措置を現場で進めていくメーカー、ゼネコン、エンジニアリング会社、メンテナンス会社などに属する技術者、そして、規制の立場で廃止措置に携わっていく者の間で共有されるべきものである。

廃止措置の推進には、その活動が社会に受容されることが前提になる。施設を解体撤去する行為は、立地地域にとっては税収や雇用、地元企業の業務受注など経済的な利点を減ずるまたは消失させるものである。廃止措置の戦略的な特徴が、必ずしも立地地域に利するものではないということも十分に理解しておかなければならない。立地地域のこれまでの事業に対する理解と協力に対して十分な敬意を払い、廃止措置の意義について、立地地域に不利な点も含め丁寧な説明ができるということが「廃止措置マインド」を持つ技術者に求められる重要な要件の1つでもある。

5. 研修のカリキュラム

本章では、目標とする廃止措置技術者像を実現するために構築した研修カリキュラムについて紹介する。

(1) 施設の構造と運転に関する講義

技術者育成研修とPM研修の両方の研修で廃止措置対象となる施設（研修では原子力発電所が対象）の構造と運転についてほぼ1日かけた講義と実習を行うこととしている。このような講義と実習を設けた理由は、「対象施設に対する知識と理解なしに廃止措置は行えない」という基本的な考え方によるものである。先にも述べたように、廃止措置には独自の技術は存在しない。廃止措置は、施設のライフサイクルの最終段階に位置するものであり、廃止措置で行う活動はそれ以前の段階で行われたこと、または、発生した事象を前提とするものだからである。「廃止措置のことだけを知っていれば、廃止措置ができる」ということなどあり得ないのである。

研修カリキュラムでは、原子力発電所を対象として、施設の構造の講義及び運転シミュレータを用いた実習を行うこととした。当然、この程度の内容で原子力発電所の構造と運転

について十分な理解が可能となる訳ではない。この講義と実習では、廃止措置の対象となる原子力発電所の概要を知ることはもちろん、対象施設に対して「知ること」の重要性とその困難さについて理解させることで、施設の構造やそこで行われたこと、発生した事象を知らなければ廃止措置は行えないという事実を研修生の意識の中に強く刻みつけ、研修生が廃止措置を担当することになった場合、「第一にすべきことは施設を知ることである」ということを習得させることを目指している。

(2) 廃止措置の現場の視察

技術者育成研修及びPM研修のどちらの研修においても、原子力発電所の廃止措置の現場を半日かけて行うことにしている。廃止措置という事業を理解する上で「百聞は一見に如かず」を実践するものである。現場視察は、日本原子力研究開発機構ふげん発電所、日本原子力発電(株)東海発電所及び敦賀発電所1号機のいずれかとした。これら3つの発電所は、1960年代から70年代にかけて建設され、当初の目的を達成した、または、経済的な理由で退役したものである。今後の原子力発電の主力を担う新しい発電所の施設とは明らかに異なる施設及び／又は設備を自分の目で見ることは、廃止措置の技術や知識の習得という範囲を超えて、原子力全体にわたる知識を深めることにもなる。この経験は、総合工学である原子力分野を俯瞰できる技術者になるための第一歩になるものと期待している。

また、廃止措置の現場を目の当たりにすることは、廃止措置の実態を把握する上で最も有効な手段である。廃止措置の現場は、放射線被ばく管理の施策を除けば、一般の工場などの解体と変わらないことが実感として理解できるはずである。別の見方をすれば、放射性被ばくへの対策、すなわち、放射線防護が一般の工場などの解体との大きな違いとなっており、原子力発電所の廃止措置を特別なものに行っていることが

理解できる。このような体験を通じた理解は、企業戦略上の特徴を踏まえ、廃止措置をどのように安全かつ合理的に実施していくかを考える上で極めて重要なものである。

(3) 廃止措置に必要な知識

当たり前のことではあるが、廃止措置というプロジェクトの企業戦略上の特徴を理解すれば廃止措置を遂行可能になるということはない。廃止措置がどのような行政上（法令上）の枠組みの中で、どのような技術を用いて、どのように計画し、実施し、そして、終了させるかという知識の習得が必須であることは言うまでもない。このために技術者育成研修では、以下の知識及び技能を有する技術者の育成を目指すために、講義のカリキュラムを設定し、必要な教材を作成して研修を実施した。

- 廃止措置の対象となる施設の構造や運転上の特徴の把握
- 廃止措置を実施する上での行政上（法令上）の枠組み
- 施設に残存する放射性物質の種類、量及び分布の評価（放射能インベントリ評価）
- 廃止措置期間中の平常時及び事故時の環境影響評価
- 施設の除染工事及び / または解体工事の工法検討並びに工事工程の立案（廃止措置のエンジニアリング業務）

このために、以下のようなカリキュラム（教材）を作成し、講義を実施した。

① プラントの設備概要

- (a) 原子力発電所の主要設備の概要（原子力発電所の設計）
- (b) 核燃料物質の管理と譲渡
- (c) 原子炉の材料

② 廃止措置の要求事項、関連法令

この講義では、原子力事業に係る法律の体系は「禁止の解除」を原則としていることを第一に説明する。禁止の解除とは、法律、政令、省令及び規則（以下、法令）上、行為が禁止されている事項について、法令の要求する事

項が満足されていることを示し、禁止の解除を申請し行為の許可を得るというものである。施設は、技術等の審査に合格した後、設置許可を得て建設し、法令に定められた検査を経て運転（または供用）を開始する。施設が運転（または供用）を停止してもこの設置許可は効力を失っておらず、廃止措置を行う場合は、設置許可の範囲で廃止措置計画を立案し、その計画が法令の要求する技術的要件を満たし、安全に廃止措置を行うことが可能であることを示し、認可を得る必要がある。ここでは、原子力発電事業に係る法令体系の概要を紹介し、廃止措置の認可に必要な法令の要求事項及び廃止措置中も従うべき法令の要求事項を解説する。

また、原子力安全の基本原則は、IAEA が定める安全要求に示されている。IAEA は運転（供用）中の施設だけではなく、停止した施設に対しても安全要求を体系的に定めている。この安全要求は、国内において法令にある安全審査の指針に反映されている。この安全要求を理解し、廃止措置の計画や実施に適用していくことが、廃止措置を安全に進めていく必須条件となる。ここでは、IAEA が掲げる原子力安全の基本原則も紹介し、安全で合理的な廃止措置を計画及び実施していくために必要な事項も説明していく。

③ 対象施設の状況把握

廃止措置対象施設の状況把握とは、施設の特徴を調査し把握するものである。廃止措置計画を立案するための準備作業では最初に行われる作業であり、また、廃止措置工事の進展に合わせ随時見直しを行っていくものである。状況把握において行う作業には次の2つがある。

(a) 放射能インベントリ評価

施設に残存する放射性物質の種類、量、性状及び分布を把握すること。

(b) 施設の特徴調査

施設に設置されている構造物、設備及び機

器の設置場所、設置状況、設置個数、それらの形状、構造材料、仕様の条件及び履歴などを調査すること。

これら作業の信頼性が廃止措置計画の信頼性を決定すると言える。施設の状況を如何に正確に把握できるかが、廃止措置の安全かつ合理的な計画立案と工事の実施に大きな影響を与えるものである。

④ 廃止措置工事（除染工事、解体工事）の概要

廃止措置で行うことは、大きく分けて除染工事、解体工事及び廃棄物の処理の3つである。ここでは、廃止措置で実施する除染工事と解体工事を取り扱う。

(a) 除染工事

除染とは、放射性物質で汚染されたものから汚染を取り除くことをいう。廃止措置において除染を行う目的は、廃止措置工事作業に従事する者（以下、作業従事者）の被ばく低減と廃止措置によって発生する廃棄物の放射能レベルの低減にある。この目的を効果的に達成していくため、廃止措置では除染を実施時期、実施対象及び実施方法によって分類している。

実施時期に関しては、解体工事に先立って実施するものを「解体前除染」と呼び、主として作業従事者の被ばく低減を目的とする。また、解体工事によって発生した解体撤去物に対して実施するものを「解体後除染」と呼び、廃棄物の放射能レベル低減を目的とする。

対象に関しては、大まかに設備、機器に対するものと建物に対するものに分類している。前者は主として金属を対象にし、後者はコンクリートを対象としている。また、設備を対象とする場合、全体を一括して実施するものを「系統除染」、特定の部位に対して実施するものを「機器除染」と呼んでいる。

除染方法は、汚染部位を削り取るといった機械的なもの（機械的除染）と化学薬品を用

いて除去する化学的なもの（化学的除染）に分類される。化学的除染には、電気分解を用いる化学電氣的除染という方法もある。

ここでは、廃止措置における除染の分類とその特徴を踏まえた適用について解説している。

(b) 解体工事

解体工事は、その解体対象から機器解体と建物解体（建屋解体）に分類される。解体方法は、通常の構造物や建物などで用いられているものと変わらないが、原子力発電所に特有の問題である残存する放射能に対する安全対策が重要な要件となる。これは、解体工事によって発生する放射性物質を含む粉塵（放射性粉塵）などの拡散防止や作業従事者の被ばく低減に対する対策が求められるということである。

ここでは、解体工事において発生する放射性物質の拡散とその抑制方法及びこのような事項を実現するための工事工法及び工事工程について解説している。

⑤廃棄物の処理処分の概要

例えば、軽水炉型の原子力発電所の場合、廃止措置で発生する固体状の廃棄物の90数%が放射性廃棄物として取り扱う必要のないものである。軽水炉型の原子力発電所の廃止措置では約50万トンの解体撤去物が発生する。このうちの1万トン程度（約3%前後）が放射性廃棄物として取り扱う必要のあるものとされている。また、廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物は全て低レベル放射性廃棄物に分類されるものである。さらに、この低レベル放射性廃棄物はその放射能濃度から次の3種類に分類される。

- 余裕深度処分対象（L1）：放射能レベルの比較的高い廃棄物
- 浅地中ピット処分対象（L2）：放射能レベルの比較的低い廃棄物
- 浅地中トレンチ処分対象（L3）：放射能レベルの極めて低い廃棄物

L1 廃棄物の発生はほぼ炉心周辺に限られ、沸騰水型軽水炉（BWR）で100トン、加圧水型軽水炉（PWR）で200トン程度と見積もられている。廃棄物の量はL2、L3の順で増えていくが、いずれも数千トン程度である。

廃棄物の処理処分で最も重要な作業の1つは対象物の識別である。取り扱う解体撤去物が放射性廃棄物として扱う必要のあるものであるかどうかを識別し、必要がある場合は、どの区分に分類されるかを判断する。そして、処分を適正に行うために必要な小割や容器への封入、固化等の処理を行っていく。廃棄物の処理処分について廃止措置が取り扱う範囲は、処分を適正に行うための処理までとなる（処分は埋設事業という別事業）。

ここでは、固体状の廃棄物について処分を適正に行うための処理について解説している。固体状の廃棄物の処理は、識別と区分管理がキーワードになる。廃止措置で発生する廃棄物には、固体状のもの他、液体状、気体状のものが発生する。これら2種類のものは運転中と同様な方法を用いて環境中に放出する。このために、排水施設及び廃棄施設を適切に維持管理していく必要がある。この施設の適正な維持管理についても説明を行う。

⑥廃止措置の保安管理と安全確保

ここでいう保安、安全とは、第一に放射線被ばくに関することであり、施設周辺公衆の被ばく及び作業従事者の被ばくの管理のことを指す。また、作業従事者の労働安全、設備機器等の保全も含まれる。

施設の保安管理は法令の要求事項であり、法令の定めるところに従いJIS9001（ISO9000）の規程に沿って品質保証体制（QMS）を確立し、これを遵守することで進めていく。ここでは、原子力の全般にわたる保安と安全の確保について説明を行っている。

廃止措置の段階における保安管理と安全確保は施設の運転段階は明らかに異なることを

理解することが重要である。廃止措置を開始した以降は、安全を確保するために要求される事項が変化する。運転の段階では安全確保の大原則として、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」がある。運転の段階ではこの3項目を確実にする必要があるが、廃止措置では既に運転を停止しているので、「止める」が不要なのは自明である。また、使用済燃料の施設外への搬出が終了すれば、「冷やす」が不要になり、「閉じ込める」だけを確保すれば良いということになる。このように、廃止措置の進展に伴い保安管理や安全確保の要件を段階的に緩和していくことが合理的に廃止措置を実施していく上で重要なのである。このように、状況を踏まえて適正な対策及び／又は対応を講じていくことを「グレーデッドアプローチ」と呼ぶ。廃止措置の段階では、時間の経過（工事の進捗や放射性物質の崩壊）によって施設内に残存する放射性物質の量が漸減していく、このような変化を確実に把握し、保安管理及び安全確保に対して「グレーデッドアプローチ」を適正に適用していくあり方について解説を行っている。

（４）知識定着のための実習

前節の内容は、座学（講義）の形式で研修を実施したが、知識の定着とより実地に近い体験を目的とした実習も実施した。実習は3日間のスケジュールで、1日に1課題を課し、数名のグループで検討を行いその結果を相互評価する形式で実施した。以下は実習課題の例である。

実習課題 1：あなたが廃止措置を実施中の原子力発電所で廃止措置全般の管理責任者である廃止措置主任者（廃止措置の安全な実施に責任を持つ者）であるとします。勤務時間中にあなたは廃止措置工事の現場から次のような連絡を受けました。あなたがすべきこと（行うべき対応及び／または対策として、あなたが原子力発電所の職員、作業員などに指示すべき事項、または、自分自身で行うべきこと）を時系列で説明（列記）してください。

＜連絡を受けた事項＞

① ある配管（パイプ）を切断し、撤去する工事を行いました。

- ② この配管は放射性物質による汚染はないと識別されました。
- ③ この配管を切断したところ、工事を行っている場所（室内）の放射線モニタのアラームが鳴りました。
- ④ 放射性物質による汚染はないという識別は誤りであり、配管の切断により配管内側に汚染していた放射性物質が室内に飛散したものと考えられます。
- ⑤ 放射性物質による汚染がないことを前提とした配管の解体工事なので、被ばくや放射性物質の飛散、拡散等に対する対策は何もしていません。

その他の課題としては次のものを設定した。

実習課題 2：廃止措置工事における火災防護の対策

実習課題 3：任意の装置解体工事に関する環境影響評価

これらの課題は、実際の施設で発生したこと、実際に講じられていること、実施されたことに基づき設定したもので、実習の模範解答として実際に行われたものを示すことで、廃止措置の擬似体験をより現実的なものとしている。

（５）廃止措置のプロジェクトマネジメント

廃止措置には、「始まり」があり、「終わり」がある。また、管理すべき対象の状況が進捗に伴い変化する。そして、廃止措置の行為は同じことが繰り返すことはまれであり、個々の行為のほとんどは、廃止措置の期間を通して1回しか行わないものである。さらに、廃止措置の対象の施設と行為に伴うリスク（危険性）も進捗に伴い変化していく。このようなことから廃止措置は、「プロジェクト」としての要件を満たしているのである。

ここでいう「廃止措置のプロジェクトマネジメント」とは、廃止措置を「プロジェクト」として捉え、それをどのように管理し、運営していくかということである。ここでは、廃止措置における企業戦略上考慮すべき点及び廃止措置に特有な事項を踏まえ、一般的なプロジェクトマネジメントの手法をどのように廃止措置に適用していくかを学ぶ。そして、マネジメントを通して、どのように廃止措置を最適化していくかを、ケーススタディを通して習得していく。

上記の目的を達成するために、講義主体の机上研修とグループ作業を主体とした実習のカリキュラムを整備した。

① 机上研修

プロジェクトマネジメントとはどのようなものであるか、これを廃止措置に適用するとどのようなものになるか、そして、廃止措置を最適化していくためにはどのような点に着目する必要があるかについての講義教材を作成し、講義を行っている。講義の内容は次の通りである。

(a) プロジェクトマネジメントの概要

JIS Q21500:2018 に規定されているプロジェクトマネジメントについて概要の解説を行う。プロジェクトは、あらゆる業種業態によって行われているものであり、工学の一部門である原子力についてもプロジェクトとして業務を実施していく場合にも、JISの規定に準拠していくものである。廃止措置という事業において適正なプロジェクトマネジメントを行おうとするのであれば、JISに規定された手法及び手順を知ることが必須であることは言うまでもない。この講義では、JIS Q21500:2018の規定から次の事項について概要を説明している。

- プロジェクトの定義
- 企業戦略とプロジェクトの関係
- プロジェクトマネジメント（目標設定、計画及び実行）の概要
- プロジェクトマネジメントを構成するプロセス
- プロジェクトマネージャー、フォローアップ
- ステークホルダーとの関係

(b) 廃止措置のプロジェクト管理

ここでは、JISの規定を廃止措置に適用した場合についてプロジェクトマネジメントのあり方について解説を行うものである。先にも述べた通り、廃止措置というプロジェクトはプロジェクトの目的、目標を達成した時点で「事業

として何もない」という状態になるという点が一般的なプロジェクトと大きく異なる。また、先述の通り企業戦略上考慮すべき事項が存在する。このような点を踏まえ、廃止措置におけるプロジェクトマネジメントはどのように行っていくべきかについて解説している。

廃止措置は、計画段階、実施段階及び終了段階に大きく分類できる。また、これら3つの段階においても、さらに段階を分け、それぞれにおいて実施する作業、その段階において達成すべき目的、目標が存在する。全体及び個別の段階についてJISに規定されるプロセスグループ及びサブジェクトグループを割り振り、整理していく手順に関する講義に加え、グループ作業を課して理解を深めるように努めている。また、このグループ作業自体もプロジェクトであると位置付けて、作業自体をプロジェクトマネジメントしていくことを求めている。さらに、作業の過程と成果を文書化すること、グループ間での相互レビューを行うことで対外的な説明（ステークホルダーとの関係構築）のあり方を学ぶものとしている。

(c) 廃止措置プロジェクトの最適化

合理的な廃止措置を実現するための最適化の考え方について解説を行うものである。廃止措置における最適化は、数理計画問題としてではなく、社会科学としての最適化、すなわち、最適化を意思決定の手段として捉える手法及び手順の解説を行なっている。「廃止措置における最適化」という大雑把な言い方は総論としてはありえるが、現実の局面では全く意味をなさない。最適化では、最適化を図る個別の事項を設定し、ひとつ1つを丁寧に検討していくことが必要となる。講義では最適化の要因となる個別の事項を示し、社会科学的な最適化の手法である、ゲーム理論を適用する事例研究をグループ作業として課している。ここで挙げた個別の要因とは次の通りである。

- 廃止措置の期間を最適化（最短化）する。
- 廃止措置の費用を最適化（最小化）する。
- 廃止措置における被ばくリスクを最適化（最小化）する。
- 廃止措置から発生する放射性廃棄物を最適化（最小化）する。
- 廃止措置に最適な人材を育成する。

なお、このうち「廃止措置の期間を最適化（最短化）する。」の期間と費用のトレードオフに関わる検討例は表1の通りとなる。

②プロジェクトマネジメント実習

プロジェクトマネジメントの習得は、座学の受講だけでは十分な成果が得られるものではない。マネジメントは実際に体験してみないと理解できないものである。このため3日間という短い期間ではあるが、研修生自らが提案する廃止措置業務の最適化の方策をプロジェクトとして取り組むという実習を設定している。

この実習自体がプロジェクトとし、研修生らはJISQ21500:2018に規定される手法及び手

順に従い課題に取り組むことになる。研修の課題は、「廃止措置業務の最適化」であるが、何についてどのような施策を講ずるべきか、また、その実現にはどのような「障壁」があるのかという調査から開始し、目標設定を行う準備作業から着手する。準備作業の結果を受けて3日間でやるべきことの計画を立てる。ステークホルダー役の講師の承認を得るためのプレゼンテーションを行い、承認ののち、提案を策定する実施段階を経て、報告を行う。この進め方は、現実のプロジェクトマネジメントを模擬している。実習に取り組むためには、本項でここまでに紹介してきた研修カリキュラムの内容を全て活用することが必要になる。実習の実施状況は図3に示す通りであり、3日間を通して研修生の間で活発な討議及び提案の取りまとめ作業が行われていた。

なお、この実習の成果は講師らが評価するだけではなく、海外研修で訪問する廃止措置の対象施設の技術者らとの技術交流のテーマとしても活用している。

表1 廃止措置期間の最適化（最短化）＜期間と人件費削減の関係＞の検討例

	人件費削減 (人数の削減)	人件費増額 (人数の増加)
期間の短縮 (維持費用の削減)	(人数の削減) (維持費用の削減) ⇨実現する方法は？	(人数の増加) (維持費用の削減) ⇨維持費と人件費の トレードオフ
期間の延長 (維持費用の増加)	(人数の増加) (維持費用の削減) ⇨維持費と人件費の トレードオフ	(人数の増加) (維持費用の増加) ⇨効率の低下 【不採用】



図3 プロジェクトマネジメント研修の実習の様子

(6) 海外研修

日本国内における廃止措置は、旧日本原子力研究所の動力試験炉 JPDR が最初であり、終了したのも JPDR の廃止措置のみである。一方、欧米では多くの原子力発電所や施設が廃止措置実施中であり、終了したものも多数ある。日本国内における廃止措置の推進には海外の先行事例が有効であることは言うまでもない。

海外研修というと、ともすれば単なる見学会になりがちであるが、本研修事業では研修生が国内の研修で得た知識や経験をもとに訪問先の技術者と技術交流及び意見交換を行うものとしている。訪問先では、施設や廃止措置実施状況の視察とほぼ同等の時間をこのような議論の場に当てている。

技術交流の場を持ち、それが研修として価値あるものとするためには、十分な準備が必要となる。このため、海外研修に参加する研修生は、海外研修をプロジェクトとし目標とする成果が得られるように準備に取り組むのである。研修生は全国から集まっているため、プロジェクトの遂行はインターネットを介し、SNS を活用した。準備にあたっては、海外の技術者と情報交換を行う際のエチケットなどの講義も行い、国際的に活躍可能な技術者の育成を図っている。

6. 成果と今後の展開

当所では、2015 年度～2017 年度までの3年間、東京大学が実施している文部科学省の原子力人材育成等推進事業の協力機関として、「廃止措置マインド」を持った技術者育成研修と。この事業の後継事業として、「プロジェクトとしての廃止措置」のマネジメントにスポットを当てた PM 研修を 2018 年度から実施している。技術者研修及び PM 研修（3 年計画の 2 年目）では、これまで 100 名程度の学生（大学学部生、院生及びこうと専門学校生）及び 50 名程度の社会人若手技術者を対象として本

稿で紹介したカリキュラムに基づく研修を実施してきた。また、廃止措置にこれから参入を計画している企業 3 社に対してカリキュラムの中から要望のあった事項についてそれぞれの企業の社内研修の一環として研修を行った。

また、研修生の中からこれまでに 40 名（毎年 6～8 名）を選抜し、フランス、ドイツ、イギリス、スペイン及び米国の廃止措置を行っている施設の視察を行ってきた。

研修生らのその後の進路を追跡すると、ほぼ全員が原子力に関連する官庁、企業または研究機関に就職をしており、本稿で紹介した研修がその決断のきっかけになったと答えている。彼らの廃止措置に限らず原子力の分野における今後の活躍を大いに期待している。

先にも述べた通り、廃止措置のための人材育成の事業は 2 つの事業は今年度で 6 年目に入る。作成したカリキュラムは、研修を通してその内容を研修するとともに、毎年成果を検証し改訂を行っている。技術者育成研修で作成したカリキュラム及び教材は、PM 研修においても活用しその内容の改訂を継続しており、それなりの完成度に達していると評価している。

PM 研修は、本年度（令和 2 年度）が最終年度あり、今年度は新型コロナウイルスの影響もありこれまでと同じような研修の実施が危ぶまれるところではあるが、かえってこれを良い機会とし在宅勤務などのテレワークを活用したさらに多くの人たちに受講可能な構成とするよう教材の見直しを行っているところである。

当所としては、これまでに蓄積してきた廃止措置の技術者育成のための教育資源をさらに多くの場で多くの人たちに提供することを計画し、この方法を検討しているところである。また、これら教材をもとに、技術者育成だけでなく原子力のバックエンド分野全体にわたり一般の方達に情報提供を行える仕組み

づくりの検討を開始しているところである。

参考文献

- (1) IAEA, Decommissioning of Facilities, General Safety Requirements Part6 (No. GSR Part6), July 2014
- (2) 日本工業規格, プロジェクトマネジメントの手引き, JIS Q 21500 : 2018 (ISO 21500 : 2012), 2018

将来を担う廃止措置技術者の養成 ～廃止措置海外研修の意義と成果～

林道 寛 (プロジェクト試験研究部
特任参事)



1. はじめに

廃止措置技術者養成事業は、廃止措置に移行する原子力施設の安全で合理的な廃止措置計画の立案や廃止措置の実施を担う、いわゆる廃止措置プロジェクトマネジメントを行うための人材を育成することを目的として実施してきた。前述のように、国内研修において、廃止措置についての基本的な研修とマネジメントに必要となる応用研修を終了した受講生のうち、5～8名を選抜して、1週間ほどの期間で、海外の廃止措置を実施中の機関とプラントを訪問し、現場の第一線の技術者と議論を行う。現在までに5年間にわたり欧州や米国の16の施設や機関を訪問し、着実な成果をあげてきている。

訪問にあたり、わが国の廃止措置の現状と課題を抽出すると共に、訪問先の廃止措置や放射性廃棄物処理処分の取組について詳細に調査し、学生が抽出した課題や質問事項を事前に訪問先に送付し、深みのある議論ができるように工夫している。これらの訪問結果は、参加した学生の事後研修として取りまとめると共に、次年度以降のカリキュラムの開発に反映している。

2. 事前国内研修

(1) 予備知識の習得

人材育成事業に参加を希望する学生は、大学・高専で、原子力を専攻する学生に限らず、

廃止措置の講座はほとんどないため、基礎から学習することになる。このため、国際原子力機関（IAEA）の世界の原子力発電所のデータベースである PRIS、研究炉のデータベースの RRDB、核燃料サイクル施設のデータベースである INFCIS や公開されている経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）の放射性廃棄物管理委員会（RWMC）、原子力施設の廃止措置及びレガシー廃棄物管理委員会（CDLM）のデータベースや関連する報告書および欧州委員会（EC）の廃止措置関連報告書などを参考にして、世界の廃止措置と廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物管理に関する講義を行う。この講義の中で、単に技術的側面のみならず、廃止措置にとって重要な社会的側面（利害関係者：ステークホルダーとの連携、広報活動や事業の透明性の確保など）についても学習する。なお、学生への講義については、訪問先の現状を詳細に説明するが、課題などは自ら考えるよう、先入観を与えないように工夫している。

(2) 海外研修資料の作成

海外の施設を視察して帰ってくるだけでは研修にならない。このため、海外研修に選抜された学生は、研修にあたり、①日本の廃止措置や放射性廃棄物管理の現状と課題についての説明資料の作成、②訪問先の現状や特徴を踏まえ、想定される課題と質問事項のとりまとめ、および③参加学生の自己紹介資料などを英文資料として作成する。なお、日本

の現状と課題や質問事項は、有意義な議論ができるように、事前に訪問先に送付しておく。資料の完成までには時間がかかるため、国内研修後にも作業を行うことから、SNS等を利用して対応を図る。説明資料のポイントは、国や訪問先の機関及び実施状況について、日本の現状との比較に重点を置いてとりまとめる。海外研修では、訪問先に対してギブアンドテイクという考え方で対応し、より深みのある情報を得て、廃止措置や放射性廃棄物管理の実態を的確に学ぶことにした。

海外研修を通して、国による規制の在り方といった法令等の制度面はもちろんのこと、原子力そのものに対する考え方が日本とは同じではない海外の進め方を直接わが国に適用することは必ずしも現実的ではない。しかしながら、考え方や制度の違いがあるからこそ、見習うべきものもある。

国内の研修では、廃止措置に関する IAEA の取組みにある“Graded Approach”の考え方に基づく講義を行っている。海外研修では、この考え方を基本として、実際の現場を視察し、現場の指導者との議論を通して、課題の解決方法を考える力を身に着ける極めて有効な方法である。

3. 海外研修の実施

前述のように、今までに5年間にわたり、5回の海外研修を実施している。表1に研修先と研修先の選定理由を示す。全国の大学・高等専門学校から参加しており、原子力施設の廃止措置や放射性廃棄物管理について、高い関心があることが分かる。海外研修の参加人数は年々減少しているが、これは予算の関係による。

表1 海外研修先とその理由

	研修先	選定理由
第1回 (欧州)	ホセカブレラ(ENRESA/スペイン)	・良好事例として多くの国から技術者が訪問 ・建屋解体が佳境
	マルケール(CEA/フランス)	・原子力研究開発の中核機関 ・多種多様な施設の廃止措置と廃棄物管理を実施 ・廃止措置と放射性廃棄物管理の教育プログラム
第2回 (欧州)	マンチェスター大学ダルトン校(英国)	・廃止措置の講座があり、NDAが支援 ・大学院生が種々の遠隔技術のR&D
	国立原子力研究所(NNL/英国)	・NDAの支援の下、BE関連の様々な技術開発を実施 ・大学院生がNNLの研究者と一緒に技術開発を実施
	セラフィールド・Windscale・NDA HQ(NDA/英国)	・原子力の中核機関 ・多種多様な原子力施設の廃止措置と放射性廃棄物管理を実施 (原子力発電所の廃止措置方式の日本との相違) ・事故炉の廃止措置
	グライフスヴァルト原子力発電所(ドイツ)	・5基の廃止措置を実施(20年間)とサイトの活用 ・放射性廃棄物対策(処分場が確保されていない)
第3回 (米国)	サン・オノフレ原子力発電所	・1号炉の原子炉保管と2,3号炉の取組 ・ステークホルダーとの連携
	ES本社(米国) ザイオン原子力発電所 ラ・クロス原子力発電所 クライブ処分場	・米国の廃止措置から発生する放射性廃棄物の処理・保管・輸送・処分までの一連の対策
第4回 (米国)	サバンナリバー研究所(DOE:米国)	・DOEの原子力研究施設の廃止措置(原子炉の現位置埋設)
	バーンウェル処分場(ES社:米国)	・近隣住民が多い場所の処分場の実態(クライブとの相違)
	ES社廃止措置部門本社(米国)	・セミナー形式による議論(ES社の技術者が多数参加し、専門の立場から意見交換)
第5回 (欧州)	オーブ・モルビリエ処分場(ANDRA:フランス)	・フランスのVLLWとLLWの処分の実態
	スーパーフェニックス(EDF:フランス)	・高速増殖炉(実証炉)の廃止措置と放射性廃棄物管理と課題
	マルケール(CEA/フランス)	・核燃料関連施設の廃止措置とR&D&レガシー廃棄物 ・高速炉(原型炉フェニックス)の廃止措置
第6回 (予定)	ドーンレイ原子力研究所(NDA/英国)	・旧UKAEAの高速炉サイクルの技術開発拠点 ・廃止措置から放射性廃棄物処分までをサイトで実施
	ハウエル原子力研究所(NDA/英国)	・原子力研究開発拠点(多数の研究施設の廃止措置) ・サイトの再開発(サイエンスパーク)

訪問先の選定については、講師が訪問先の責任者を良く知っており、趣旨の説明をすることで、毎回快諾を得ている。欧州では、各国の規制の違いや、処分場の確保、ステークホルダーとの連携など、様々な状況の違いがある。各国がこのような状況を踏まえつつ、“Graded Approach”の考え方を踏まえて、合理的に廃止措置を実施するための工夫をしている。一方、米国では、国の施設（エネルギー省（DOE））の研究炉の廃止措置－原位置埋設（Entombment）やレガシー廃棄物の管理を行っている。また、原子力発電所は、廃止措置の専門事業者が廃止措置、放射性廃棄物管理（処理処分）を一元的に行い、極めて短期間で廃止措置を終了させている。

このように、日本の現状と廃止措置が進められている国やその機関との進め方の相違点を把握し、今後の日本の廃止措置の進め方を自ら考えることは大変意義深いものがある。研修後には、参加した学生は研修報告書を提出することになっており、研修前後の学生の知識や知見の深みとその吸収力には驚くものがある。

（１）欧州の研修

① スペイン

（a）ホセカブレラ原子力発電所

スペインの原子力施設の廃止措置と放射性廃棄物の処理処分の実施主体は、国の機関（公社）であるエンレサ（ENRESA）が全て実施している。ENRESAは、まず廃止措置にとっては重要な放射性廃棄物の処分場（低レベルと中レベル廃棄物、後に極低レベル廃棄物）を準備し、廃止措置を遅滞なく実施できるようにした。廃止措置施設はVandellous-1、PIMIC（様々な研究施設サイト）およびホセカブレラと３つの施設の廃止措置を順次実施してきた。

ENRESAはスペイン唯一の廃止措置実施会社であり、単に解体するのみではなく、Lessons Learnedを次の廃止措置プラントに反

映できるシステムを構築している。ホセカブレラの廃止措置については、良好事例として海外から多くの廃止措置に係る人々が視察に訪れている。また、徹底した情報公開と地元住民や規制機関を含めたステークホルダーとの連携を行っている。学生の海外視察時にも、翌日に訪問をウェブサイトで公開しており、迅速な対応を行っていることが分かる。

今回訪問したホセカブレラは、内装設備の撤去がほぼ終了したが、廃棄物処理施設やクリアランス測定装置などが残っており、装置の使用方法も含めて学生が良く理解できるように丁寧な説明をしていただいた。また、国内研修では見られなかったダイヤモンドワイヤーソーによるコンクリート切断の迫力ある現場を視察した。さらに、使用済燃料と線量の高い解体した炉内構造物の貯蔵設備を視察した。コンクリートキャスクによる乾式貯蔵であるが、日本と異なり、屋外に野ざらしの状態に貯蔵していることに驚いていた。再処理施設を持たない欧米諸国ではよく用いられている貯蔵方式であるが、日本との規制の違いを認識していた。

廃止措置現場の視察後に、ENRESAやホセカブレラの廃止措置に対する質問事項、日本の原子力発電所の廃止措置をとりまく状況と課題の説明を行った。次にホセカブレラ所長から、ENRESAの廃止措置と放射性廃棄物の処理処分に対する取組、ホセカブレラの実施状況と課題について多くのパワーポイント資料による説明があり、質疑応答が行われた。図1にその状況を、図2に現場の解体作業状況を示す。

研修後の学生の主要な所感は以下の通りである。

- 廃止措置をスムーズに実施するためには、ステークホルダーや国民の理解を得ることが重要な要因の一つである。ENRESAは全ての工程をオープンにして実施している。また、日本で課題となっている廃止措置により発生する放射性廃棄物の処分場につい



図1 学生による日本の廃止措置の状況説明（左）とオンダロ所長との質疑応答（右）



図2 ホセカブレラの解体作業現場の状況

では、賛否両論があることはどこも同様であるが、中立的に考えて議論を促進するというメディアの役割が明確であることと指摘していた。

- 日本も廃止措置については、ENRESAのような第三者機関を設けるべきではないかと考える。これにより廃止措置に関する技術や知見の伝達も容易になると思う。
- プラントの廃止措置は、運転から廃止措置への移行期間（4年間）は共管となり、この間に廃止措置をスムーズに行うことが可能となるが、プラントの履歴を含む管理情報の引継を綿密に行う必要がある。
- 事業者とステークホルダーとのインターフェースをどのように行うかが原子力産業の発展と一般大衆の受容性を決定づけるという考え方が視察でより明確になった。対話や議論といったコミュニケーションの側

面をより大切にしながら、キャリアを蓄積していきたいと感じるようになった。

②フランス（マルクール、スーパーフェニックス、オーブ・モルビリエ処分場）

フランスのマルクール研究所は第1回と第5回の研修、スーパーフェニックスとオーブ・モルビリエ処分場は第5回の研修で訪問した。

(a) マルクール

マルクールは研究開発のための研究所であり、原子炉・燃料サイクル関連施設・放射性廃棄物処理施設など、原子力施設が数多く存在しており、原子力・代替エネルギー庁（CEA）が運営主体のサイトである。

マルクールは、1950年代初頭にCEAの原子力の開発拠点として設立され、現在、図3に示すように、多くの施設が廃止措置や環境

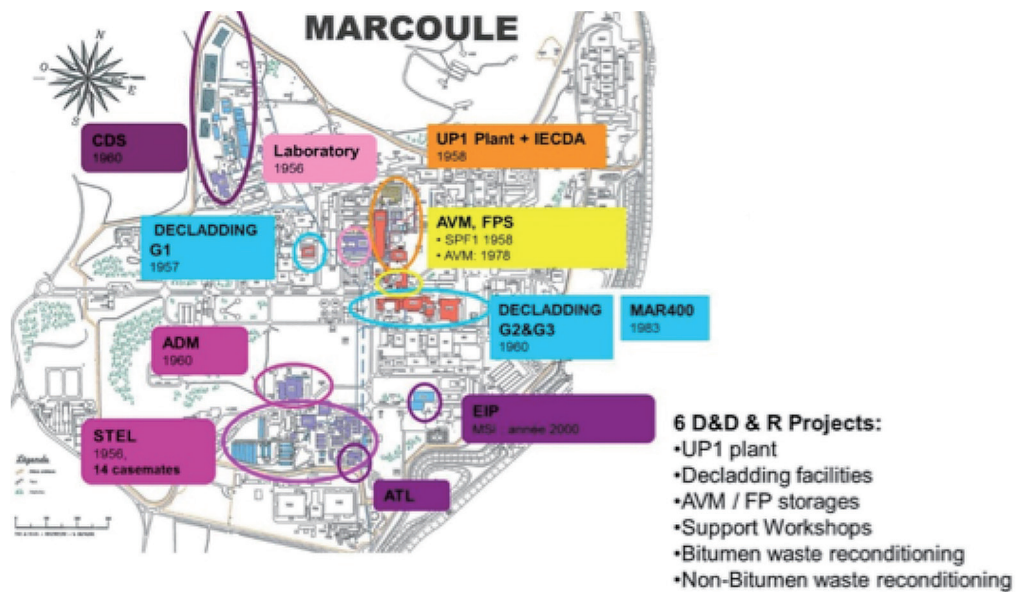


図3 マルクールの廃止措置と環境修復作業を実施している施設

修復段階にある。これらの施設から少し離れたところにも、高速原型炉フェニックスがあり、これも廃止措置中である。

マルクールは廃止措置を実施するための技術者や学生の教育訓練プログラムも充実しており、実務教育施設や講義施設も含めて幅広い人材教育を行えるようになっている。さらに原子力について学ぶための施設であるヴィジアトム（Visiatom）には、近隣の学生にも良く理解できる施設が充実している。また、廃止措置中であるが、炉心構成要素である黒鉛の処分サイトがないため、途中段階で中断している黒鉛冷却炭酸ガス炉であるG1の原子炉建屋と格納容器がモニュメントとなっており、内部はインフォデム（InfoDEM）と呼ばれている廃止措置のPR施設となっており、様々な展示物があり、廃止措置活動が良く理解できるように工夫されている。

マルクールは廃止措置のための技術開発の拠点でもあり、特にホットラボや再処理関連施設、高速炉など、通常の軽水炉とは異なる原子力施設の廃止措置に必要な技術開発を実施し、実際のプラントへ適用している。また、フランスは関連する事業者がそれぞれ連携して経験から得られた知識や開発した技術を類似のプラントへ適用する仕組みが整っている。

例えば高速炉についてはCEAの技術がフランス電力会社（EDF）のプラントへ反映され、この経験がCEAのプラントへ反映されている。再処理についてもCEAからオラノ（ORANO）へ同様の反映するようになっており、フランス国内でいかに廃止措置や放射性廃棄物管理を合理的に効率的に行うかといった仕組みが構築されている。

マルクールでも、学生はこれらの施設を責任者から現場において、丁寧に説明を受けると共に、CEA本部の廃止措置責任者からCEAの廃止措置プロジェクトの全容の説明および学生による日本の現状とマルクールを含むフランスの廃止措置の課題について1時間以上に及ぶ質疑応答を行った。

学生の主な所感は以下の通りである。

- 廃止措置を行うための充実した設備や環境に驚いた。また、原子力に対する意識の違いにも痛感した。廃止措置により設備撤去した原子炉格納容器がそのままモニュメントとして展示してあり、原子力そのものが社会から存在意義を認められており、日本との相違を大きく感じた。
- 廃止措置に対する人材育成の制度が整備されており、廃止措置の技術者のみならず学生の教育も実施している。日本でも廃止

措置事業が拡大することは明白であり、フランスのシステムを参考にして教育の仕組みを構築することに力を入れていくべきである。また、ここマルクールで教育を受けたい気持ちになった。

- 原子力は複合的な学問の上に成り立っており、多様な分野の人材が必要であり、男女を問わず人材を確保していく必要がある。施設の案内はすべて女性が行っていたが、特に化学を専攻する人材には女性が多く、職員の男女比は日本と相当の違いがある。

- 廃止措置の技術がかなり進んでいる。ヴァーチャルシステムのコンピューターによる遠隔操作で実際の施設内で解体作業などを行う MAESTRO システムの技術の高さには驚いた。ヴァーチャルであるが、施設内の状況を精密に模擬しており、臨場感あふれるシステムである。この技術は下記の複合技術との組み合わせにより操作手順の確認や解体前後の線量評価を行うことも可能となっている。必要とするデータを揃えることにより福島第一の解体作業に用いることができるのではないかと考えた。

- 再処理施設の解体には技術的革新が必要であり、ロボット工学、シミュレーション技術として、3D CAD、レーザースキャン、ガンマスキャンの複合技術を改良し、実際の施設の解体に適用している。

- マルクールは原子力に関連する施設を1つのサイトにまとめていることから、これらの施設の廃止措置を支援するための施設がまとまっているため、合理的な廃止措置を進めることが可能であると思う。また、研究開発は現場のニーズに合わせて行っているため、よりスムーズかつ迅速に進めることができる。

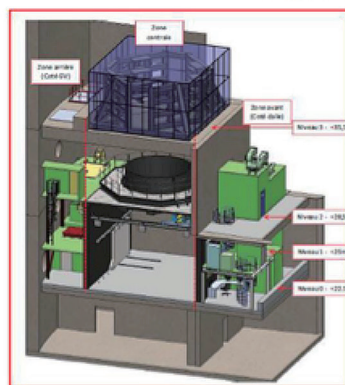
- 原子力分野の国際的な技術者育成組織として CEA の下に INSTN があり、施設や装備、教材が充実している。日本にも同じような教育環境があれば、若い技術者の養成や教員、現場作業者の研修を1つの場でできるのではないかと感じた。

(b) スーパーフェニックス

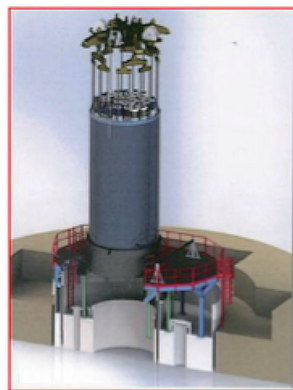
スーパーフェニックスは電気出力 120 万 KW のタンク型の高速増殖炉であり、約 30 年間で廃止措置を終了する予定である。訪問時には、主要な周辺設備の撤去は終了し、原子炉容器内設備の解体準備のために原子炉容器内にゆっくりと水を注入している段階であった。巨大な原子炉格納容器と内部で実施されていた主要機器の解体ホールに学生は圧倒されていた。

訪問時には図 4 に示すワークショップが原子炉建屋内に設置されていた。また、図 5 に示すように、原子炉容器内に水を注入中であ

第3段階（2018～2030年）：原子炉の解体、除染



炉心上部機構と小回転プラグの解体



原子炉建屋内ワークショップの設置(～2018年)
炉心上部機構の引き抜き(2018年)
小回転プラグの引き抜き(～2019年)



図 4 原子炉建屋内に設置されたワークショップと大型機器の解体撤去

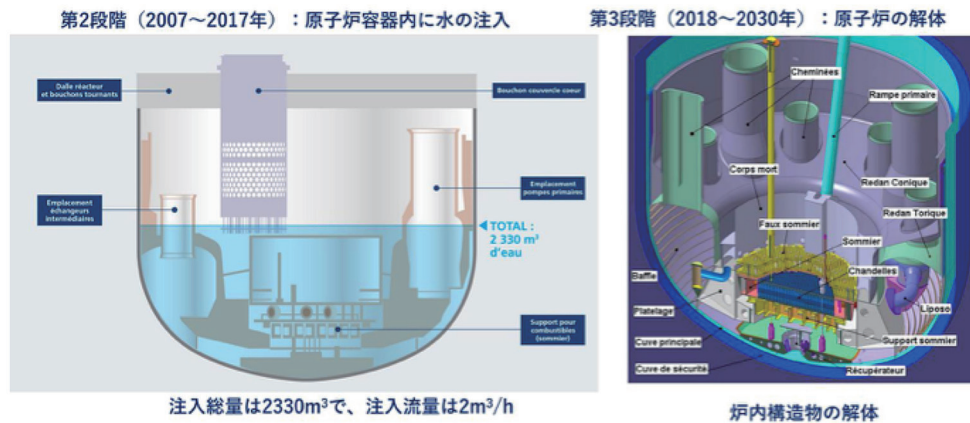


図5 炉内構造物を遠隔解体する前に原子炉容器内に水を注入

り、原子炉内構造物の撤去に向けた対応が実施されつつあった。水を注入するにあたっては、ガス中の水素濃度、温度、圧力等を管理する必要がある。その後、遠隔で炉内構造物を順次解体し、最終的には水を抜いて原子炉容器を解体する。高速炉の廃止措置は、軽水炉と異なり、冷却材に水と接触すると激しく反応し、水素を発生するナトリウムを使用していることから、廃止措置時には注意を要する。スーパーフェニックスでは、抜き取ったナトリウムの処理処分、残留ナトリウムの対策が課題であった。

プラントの視察後に現場の技術部長と広報対応の責任者との質疑応答を行った。学生からは、日本の高速炉の廃止措置や廃止措置から発生する廃棄物の処理処分、技術者の確保やステークホルダーとの対話と連携などの課題について説明し、フランスの現状について多くの質問を行った。

学生の主な所感には以下の通りである。

- CEA で開発した技術（ナトリウムの処理）をスーパーフェニックスで実際に使用し、その経験がマルクルのフェニックスに引き継がれるといった組織間の連携がうまく機能しており、合理的な廃止措置が可能となっていると思う。日本の場合は多くの電力会社があり、それぞれが廃止措置を実施することから、このような連携ができれば、合理的な廃止措置ができるのではないかと

思った。

- 廃止措置により発生する放射性廃棄物の処分は、訪問した ANDRA のオーブやモリビリエの処分場で処分されるが、苛性ソーダにしたナトリウムをセメント固化した廃棄物は処分するための規制が確立されていないので、量も多くもう一度処理することになると時間と手間がかかると思う。

- ステークホルダーとの関係は良好であり、CEA のマルクルと ANDRA の処分場も同様であるが、情報公開に積極的であるためであると思った。

(c) オーブ、モリビリエ処分場

第5回目の海外研修では、フランスのアンドラ（ANDRA）が運営するオーブ（低中レベル廃棄物）、モリビリエ（極低レベル）の両処分場を訪問した。フランスも廃止措置が比較的順調に行われているが、極低レベル、低レベル、短半減期中レベル処分場が用意されていることが1つの要因となっている。学生はフランスと日本の廃棄物分類の相違点や ANDRA がいわば国の事業として処分を行っていること、処分方法など、高い関心を持って質疑応答を行っていた。表2にフランスの放射性廃棄物の分類を示す。

表2 フランスの放射性廃棄物の分類（日本よりも細かく区分）

	<i>Very short lived</i> ($T < 100$ days)	<i>Short lived</i> ($T < 31$ years)	<i>Long lived</i> ($T > 31$ years)
Very low activity level (VLL)	<i>Natural radioactive decay on production site</i>	<i>Surface storage</i> (CIRÉS waste collection storage and disposal facility) VLLW	
Low activity level (LL)		<i>Surface disposal</i> (CSA waste disposal, Aube) LILW-SL	<i>Subsurface disposal</i> (research ongoing) LL-LLW
Medium activity level (ML or IL)			ILW-LL
High activity level (HL)		<i>Reversible deep geological disposal</i> (research ongoing under the Act of 28 June 2006) HLW	

フランスの処分場での対応は非常に印象深く、学生の主な所感は以下の通りである。

- モルビリエが遮水シートで上部も下部も覆い袋状にするのは、放射性廃棄物を産業廃棄物と一緒に処分するという観点から、産業廃棄物への対策であり、「外部と隔離し、漏洩を防ぐ」ためである。
- フランスはクリアランスという制度は設けていない。「ゾーニング」という考え方を採用しており、これに濃度減衰の考え方を取り入れることで、日本のクリアランスに近い対応を行っている。
- フランスでは放射能だけではなく半減期も考慮して細かく廃棄物を分類している。その理由としては、細かく分類することでそれぞれに最適なバリアを作ることができ、より合理的に処分ができるからである。（表2参照）
- 市民に原子力についての正しく理解を深めてもらう。その為に事業者は実際に現場を見せ、市民との意見交換が行えるようにする必要性を感じた。また、廃止措置が「長期的な産業」であることを理解してもらう必要がある。（市民と事業者との関係）
- 日本の放射性廃棄物の分類の指標に「半減期」を追加して合理的な分類を行うとともに、合理的な分類が必ずしも簡潔なもの（分類が少ないもの）ではないことなど、既成概念にとらわれない考え方も行われるべきである。（規制の見直し）

③ ドイツ

(a) グライフスヴァルド

グライフスヴァルド発電所は第2回目の海外研修で訪問した。旧東ドイツに位置する旧ソ連のVVER型の原子力発電所で、5基が運転中であったが、安全性の観点から運転を停止した。その後廃止措置を進め、約20年間で内装設備を撤去した。

グライフスヴァルドでは、解体廃棄物の処分場がない時の合理的な廃止措置の進め方、大型設備（タービン・蒸気発生器建屋）の再利用方法、運転時の職員の新たな活用法と得られた知見を新たなビジネスへの展開など、学生にとっては、日本の廃止措置の進め方との比較検討を含めて学ぶべきことが多いという印象であった。

その例として、図6に原子炉容器や中間熱交換器、蒸気発生器を一括解体し、放射能の濃度減衰を待った後に処理処分に対処するための巨大な中間貯蔵施設を、図7に再開発により工業団地としてのサイト利用の様子を示す。解体は現場では細断や除染は行わず、ワークショップへ搬送してから実施して作業の効率化を図っている。

また、完成後に運転ができなかった6号機を隅々まで視察することができたのは、学生にとっては、発電所の内部構造まで視察できたことに興味津々であった。



図6 中間貯蔵施設内の解体撤去された原子炉容器や蒸気発生器等



図7 巨大クレーンや風力発電所のシャフトの製造施設などに再利用されたタービン建屋

視察後に、現在のサイト管理を行っている管理者と運転から廃止措置まで行った元技術部長が参加して、EWN社の取組の説明、学生による日本の廃止措置の現状の説明と事前に用意した質問事項を含めて活発な質疑応答が行われた。学生の主な所感は以下の通りである。

- ワークショップ内の各設備は一連の工程がスムーズに進むような配置となっており、被爆防護の観点において作業の効率化が図られている。日本における廃止措置に伴う除染作業においても見習う点がある。
- 解体技術は、最先端の目新しい技術ではなく、対象物に合わせて既存の技術を適用している。
- 廃止措置の中でも地域住民を含む国民の理解をどのように得ていくのかがドイツ、日本における共通課題と思った。

● どのように複数の除染方法を使い分けるかは Learning by doing によって得たものがほとんどである。除染方法に限ったことではないが。

- 廃止措置の作業員は、もともと稼働中の原発で働いていた職員であり、運転から廃止措置への経験を積むことによりスペシャリストになっていく。
- 解体や除染技術は、既存の技術やその組合せであることが視察で良く理解できた。

④ 英国

英国の西カンブリア地方のNDA本社の周辺の原子力施設のある機関であるセラフィールド地区、ウィンズケール発電所、国立原子力研究所、マンチェスター大学ダルトン校を第2回目の海外研修で訪問した。

(a) セラフィールド地区 (NDA)

セラフィールド地区では、廃止措置中のガス冷却炉のウィンズケール発電所や使用済燃料池、放射性廃棄物保管施設などを視察した。その他にも再処理施設を初めとして様々な原子力関連施設があり、廃止措置を積極的に行っている。特に再処理施設の廃止措置には、遠隔システムの適用が不可欠であり、丁寧な説明を聞くことができた。

核燃料サイクル施設は、維持管理費用が原子力発電所に比較するとかなり大きいことや放射能の濃度減衰が期待できないこともあり、NDAはセラフィールド地区の廃止措置を優先して進めている。図8にセラフィールド原子力施設の俯瞰図とウィンズケール原子力発電所の外観および、図9に使用済燃料の貯蔵池を示す。

学生の主な所感は以下の通りである。

- 野ざらし状態の使用済燃料池は日本では地域住民の理解も得られにくいという理由から考えられない。

- 優劣の話ではなく、世論の問題として、日本において同じ施設があったとしたら、確実に屋根や遮蔽建屋に覆われているだろうから、とても興味深い光景であった。

- 所々に遠隔システムによる探査、操作システムが備わっており、安全管理だけでなく、作業員の方の被曝量低減効果も期待できる。

- 全体を通して廃止措置作業を効率よく行うような工夫が見て取れた。

- 放射性廃棄物容器が超大型のフォークリフトを用いて平積み状態にされており、日本のような地震大国では決して見ないだろう光景である。

(b) マンチェスター大学ダルトン校

ダルトン校は原子力廃止措置機関 (NDA) の支援を受けて、様々な技術開発を行っている。特にロボティックスの開発は、そのままセラフィールドへの適用を考慮しており、学生が中心となって装置開発を行っている。例



図8 セラフィールド地区の全景とウィンズケール原子力発電所



図9 野ざらし状態の使用済燃料プール

として、図 10 に遠隔操作ロボットとこれを使用した空間の可視化画面、図 11 に水中探査ロボットを示す。

学生は、図 12 に示すように、昼食時にもダルトン校の学生や教職員と技術に関する議論を行っていたのが印象的であった。学生の主な所感は以下の通りである。

- 現在は遠隔操作に重きを置いた研究がすすめられており、自律的システムの展開に力を入れている。具体的には、遠隔操作デバイスのパフォーマンスの向上、放射線環境下での自律的システムの能力と性能の向上、危険の予測や大量のデータの収集と解析等の研究を進めている。

- 実際に、どこでも移動できるように場所によって形が変わり、そのデバイス周辺にある物の形が映像で送ることが可能な遠隔操作デバイスを拝見した。実際の映像ではないが、どのような形の物がそこにあるのか判断できるものであった。

- 現地の研究員と互いにプレゼンテーションし合い、双方の廃炉技術について理解を深めた。特に印象深かったのが遠隔ロボットは印象深いものがあった。

- 国内でも同様の遠隔ロボットがあるが大がかりで高コストなものに注力しているのに対し、開発しているロボットはできるだけシンプルで費用を抑えて製作されている

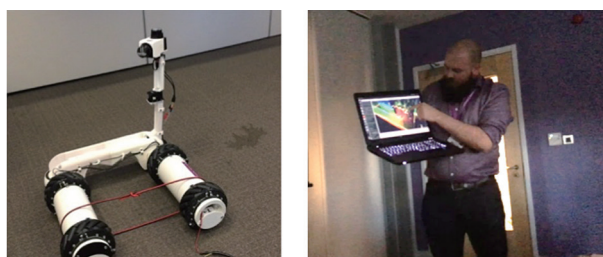


図 10 多彩な動きをする遠隔操作ロボットと空間可視化

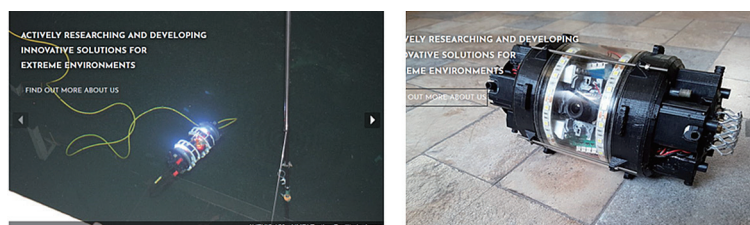


図 11 水中で自在な動きをする遠隔探査ロボット



図 12 昼食時も遠隔操作技術に関する議論をする学生とダルトン校の学生

のが印象的だった。

- 基礎研究だけではなく、セラフィールドで実炉や廃棄物処理施設を用いた実験も行えて、より現実に即した研究も行えるのが他にはない強みである。
- より現実に即した研究を行っている印象を受けた。
- 放射線に対する耐久性などまだ課題点は存在するが、近い将来、このシステムが実際に使われると思った。
- みなさん楽しそうに研究していると感じた。施設も1つ1つ丁寧に説明していただき、加えて私の拙い英語のプレゼンや質問にも懇切丁寧に答えいただいた。日本の原子力産業を発達させていく上で研究以外のところにも、日本にはない素晴らしい点を学んだ。

(c) 国立原子力研究所 (NNL)

NNLは広く人材を求めており、国内外からの企業や大学の研究者が集って研究に参加し

ている。また、大学院のマスタークラスの学生がNNLの研究者と共同で研究をしている。国立の原子力研究所なので、基礎研究から実務に使用するための研究まで多岐にわたる研究を行っているが、近郊にあるセラフィールドで使用するための研究を多く実施している。NNLではNNLで研究を行っている各国の学生との交流会を行った。双方から廃止措置と廃棄物の現状についての説明があり、その後、活発な議論が行われた。図13に遠隔作業を行うためのホットセルとマニピュレータ、図14にはジオメルト法を用いたバッチ式のガラス固化施設を示す。

学生の主な所感は以下の通りである。

- 遠隔操作設備では、操作側とその内側を見学した。左右に二つあるコントローラーで細かな作業も行うとのことだったが、操作が難しそうに感じた。
- 作業員の方の被曝量を極力抑えるためには非常に優れた機能であると感じた。
- それぞれの実験部屋が非常に広々してお

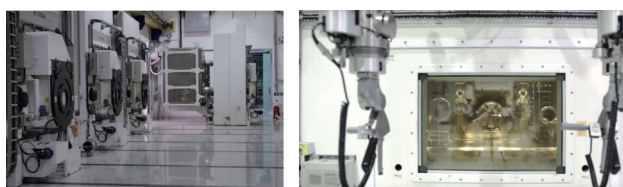


図13 遠隔作業セルとハンドリングのマニプレーター



図14 ジオメルト法を用いたガラス固化処理施設（技術開発用）

り、スペースに十分余裕がある造りをして
いることである。スペースが十分あること
で、実験作業中におけるミス（物の衝突、
散乱）を防ぎ、結果作業員の被ばくを防ぐ
ような仕組みが自然とできている

- 交流会において、英国の方々とは私と同年
代くらいの方でも自国の廃止措置に精通し
ている。またそれに対する自分の意見を持っ
ていて、自分に足りないものを知ることが
できた。

- 自分と同世代の人が最先端の研究に携
わっており、非常に刺激を受けた

（２）米国の研修

米国へは、第３回と第４回の研修を行った。
研修先は、原子力発電所３基（サン・オノフ
レ、ザイオン、ラ・クロス）、DOE のサバン
ナリバー研究所、２カ所の低レベル放射性廃
棄物処分場（クライブ、バーンウェル）およ
びエネジー・ソリューションズ（ES）本社で
ある。米国はフランス、イギリスやスペイン
とは異なり、廃止措置は専門会社に任せる方
式であり、一部を請負う方式、全体を請負う
方式、最近では廃止措置プラントを買取る方
式が主流になりつつある。上述の欧州各国が、
いわば国営企業といった形で廃止措置と放射
性廃棄物管理（処理処分）を行う方式に対して、
米国は処分場の運営も含めて、民間の原子力
発電所の廃止措置は民間の専門会社が行う方
式となっている。

（a）原子力発電所（サン・オノフレ、ザイオン、
ラ・クロス）の廃止措置

いずれの廃止措置も、ES 社が部分請負か完
全請負で実施している原子力発電所である。

ES 社は廃止措置を行う専門会社であり、クラ
イブとバーンウェルの２つの廃止措置により
発生した解体廃棄物の処分場を所有している。
解体した放射性廃棄物は、発電所から貨車に
より直接処分場に搬送できるようになってい
る。また、処分場には細断や貨車の除染を行
う装置が整備されており、解体から処分まで
一貫して合理的な対応ができるようになって
いる。

米国は運転停止後に廃止措置活動報告書
（PSDAR：Post Decommissioning Activities
Report）を提出する必要があるが、これは日
本の廃止措置計画書のように認可制ではない。
安全が最優先はどの国も同じであるが、解体
方法は極めて合理的である。実際にザイオン
発電所やラ・クロス発電所の解体現場を視察
した時には、学生のみならず、講師もその方
式に驚かされた。図 15 にラ・クロスおよび
ザイオンの原子炉格納容器の解体方法を示す。
解体方式はいずれも同様であり、格納容器の
側面に大きな開口部を設けて、その前面にテ
ントを設置する。訪問時にはラ・クロス発電
所は図に示すようにテントの設置の直前であ
り、格納容器内の解体現場が良く観察できた。
また、ザイオン原子力発電所はテントの設置
後であり、解体物の処理状況がテント外から



図 15 ラ・クロス原子力発電所とザイオン原子力発電所の解体現場

見ることができた。このテントの中で解体物を細断して、図 16 に示す貨車に積み込み、処分場へ搬送する。この作業を繰り返す方式で極めて合理的な考え方になっている。

(b) サバンナリバー国立研究所

サバンナリバー国立研究所はエネルギー省 (DOE) が所轄する研究所であり、現在核燃料サイクル、環境技術や次世代原子炉開発を担っている研究所である。1950 年代からに設置され、主にトリチウム生産や濃縮ウランの処理、使用済燃料の保管などを行っていた。古い施設は順次廃止措置を実施しているが、特筆すべきはその方式である。米国では商業炉は別にして、DOE の試験研究炉は原位置埋設方式を適用している炉がいくつかある。今回の訪問では、その 1 つである図 17 に示すの P-Reactor を視察した。使用済燃料を炉心から全て取出し後、全体にモルタルを充填し

て、そのままの状態で放射能濃度の減衰を待つて終了する。学生も方式は知っていたが現実のプラントを目の当たりにしたのは初めてであった。

学生の主な所感は以下の通りである。

- 70 年間の研究の実績による信頼が確保されて地元に根付いている。
- スカラーシップで学校や地元の中小企業を支援し、材育成と継続的なサプライチェーンに反映している。
- 市民との相互理解に対するトレーニングとスキルが充実しており、公衆との共通言語を作っていくのが印象的であった。
- 原子炉 (研究炉他) のモルタル充填による原位置埋設はシンプルな方法であり、日本でもできないかと思った。
- 外層が崩れたとしても問題ないことを構造物の倒壊を前提にして外部環境放射線の時間推移で計算してグラフ化して、安全性をア



図 16 貨車で搬入された廃棄物 (左) とそのまま処分する大型機器 (右)



図 17 原位置埋設を行っている P-Reactor

ピールしている。しかし、コンクリートにクラックが発生している。数百年も持つのか心配であるし、不確実性が残るのではないか。

(c) クライブ・バーンウェル低レベル廃棄物処分場

両処分場ともエナジー・ソリューション社が運営を行っている。米国は、放射性核種の種類とその最大放射能濃度により、クラス A、クラス B およびクラス C に分類されている。解体廃棄物処分に関しては、クライブ処分場はクラス A、バーンウェル処分場はクラス A、B、C の 3 つのクラスの放射性廃棄物を処分している。

クライブ処分場の場合、廃止措置により発生した汚染瓦礫／土壌・機器・配管等は貨車やトラックで搬送される。廃棄物を廃棄後の貨車は、高圧水で洗浄し、汚染確認後に廃止措置現場に返送される。大型機器（蒸気発生器や熱交換器など）やガラクタ類はそのまま処分し、土をかけて平に整地し、多層構造後に上部を粘土層・砂利などでバリアを形成する。日本と比較するとかなり簡単な処分方法という印象を受ける。図 18 にクライブ処分場の状況を示す。

学生の主な所感は以下の通りである。

- 施設の建設と運用については、公開・誠実・正直が重要との考え方であり、日米の原子力に対する考え方（政策）の根本的な相違を感じる。情報提供や信頼性を高めるための活動への熱意の高さを感じた。

- 安全性は最優先だが、事業者も住民も経済合理性を考慮している。こういった考え方は日本への適用性や必要となる工夫を考える良い機会を得た。

- 処分場に限らず、原子力分野全体を通して、真摯に市民に寄り添っていくという姿勢が最も重要と認識させられた。また、安全を維持することで地元住民がサポーターになっている。

(d) エネジー・ソリューションズ (ES)

エネジー・ソリューションズ (ES) は第 3 回と 4 回にそれぞれ本社と廃止措置本社を訪問した。ES 社は廃止措置を請負う民間の専門会社であり、廃止措置と廃棄物処理の多くの技術を有している。過去の知見と知識を集約し、これをノウハウとして活用しており、廃止措置のマネジメントにも長けている。

コリン・オースチン上級副社長を初めとして、第一線で廃止措置を行っている技術部長、広報部長等が参加して、廃止措置に関するセミナーを開催し、学生の質問に対して丁寧に分かりやすく解説を行っていただいた。図 19 にセミナーによる研修状況を示す。

ES 社の説明において、学生が最も印象に残っていることを図 20 に示す。図 20 (左) は廃止措置を実施中の敦賀 1 号機であるが、廃止措置段階では、プラントという意識を変えて、廃棄物の塊という認識を持つこと。図 20 (右) は安全とコンプライアンスは交渉の余地はないが、廃止措置の戦略的優先事項は



図 18 処分後の覆土を行った状態 (左) と洗浄後の貨車 (廃止措置の現場へ) (右)



図 19 学生の説明と ES 社専門家による質疑応答（左）と
ES 社副社長による ES 社の取組説明と学生との質疑応答（右）



図 20 廃止措置実施中の敦賀 1 号機（左）と廃止措置・解体撤去とは？（右）

工程と廃棄物管理であり、いかに合理的・効率的に実施し、全体のコストを下げることを認識することを示している。

学生の主な所感は以下の通りである。

- 廃止措置プラントは廃棄物の塊というマインドの必要性を大いに認識した。
- ES 社は廃止措置について、徹底的な合理主義と同時に安全文化の醸成を行っている。
- ステークホルダーとの対話と連携が必須であることが理解できた。このためには、正直さ・透明性の確保が重要であり、適切な管理とリスクの説明が必要である。
- 日本でも、ES 社のような専門会社が必要と感じた。過去の成功・失敗の経験を次に反映していく仕組みを構築することが大事である。特に失敗事例は重要である。
- ES 社が行っている解体工法、輸送方法や処分方法を日本でも行うことは、かなり難しいと思うが、見習うべき点は多いと思う。

4. まとめ

使命が終了した原子力施設は廃止措置を行う必要がある。日本は既に廃止措置段階にある原子力発電所は、福島第一の廃炉を含めて 20 基以上ある。また、日本原子力研究開発機構には、再処理、MOX 燃料製造施設、もんじゅ、ふげんなどの大型施設を初めとして 40 あまりの施設の廃止措置を行う状況にある。原子力発電所やこれらの大型施設の廃止措置には約 30 年～40 年の期間がかかるため、これを合理的かつ効率的に行っていく必要がある。

欧米諸国では、廃止措置や放射性廃棄物の処分が先行しており、これらの実態を知ることにより、日本の課題に対する理解と考え方が深化すると考えている。現在まで 36 名の学生が海外研修に参加したが、作業中の迫力ある現場を視察し、訪問先の幹部と意見交換や課題に対する考え方を議論することで自信に

つながっている。また、日本の大学には廃止措置関連の講座がないため、海外研修後の廃止措置に関する関心と理解度が飛躍的に向上している。

原子力施設のライフサイクルのゴールは廃止措置の完了であり、本海外研修は極めて重要である。本年度でこの企画は終了予定であるが、今後も継続的に実施することが、日本の廃止措置を円滑に効率的に実施するためにも重要と考える。

令和元年度 事業報告の概要

(一財) エネルギー総合工学研究所

当研究所における令和元年度事業の概要は以下の通りである。

(1) 当研究所は、昭和53年4月の設立以来、「エネルギーの未来を開くのは技術である」との認識の下、時々のエネルギー情勢を踏まえつつ俯瞰的長期的な視座を持って、産学官の連携を図りながら、エネルギー技術に関する調査、研究、評価、普及に取り組んできました。平成31年においては受託事業等の労務費計上に係る不適切事案が発覚し、関係機関の皆様にご迷惑とご心配をおかけし、賛助会員をはじめ社会の信頼感を損ねたことは誠に遺憾でありお詫び申し上げる次第であります。

(2) 本年度においては、経済産業省及びNEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）からの受託事業等に係る指名停止措置を受けており、調査研究については、継続案件を除き民間企業等からの受託事業が主たるものとなっています。これに加え、将来の研究能力向上のための自主研究に取り組みました。なお、上記不適切事案への対応として、過去における受託事業等について従事実態の確認、エビデンスの整理等の作業を行いました。

(3) 本年度においては、国内外のエネルギー情勢、気候変動問題への対応の緊要性等を踏まえ、次世代電力ネットワーク、風力発電系統接続時の蓄電池システム、太陽熱利用技術、

蓄熱発電技術、カーボンリサイクル技術を中心としたCO₂有効利用技術、水素の製造・輸送・需要等に関する調査研究等を実施しました。また、原子力災害の発生を踏まえ、現在の軽水炉の安全性向上に資するための技術開発を継続するとともに、シビアアクシデント時の安全系機能に関する研究、原子力安全基準の動向調査、通常炉の廃止措置に係る標準の調査検討と人材育成の支援も進めました。さらに、個別分野研究会として、次世代電力ネットワーク（APNet）研究会、人為的カーボンサイクル（ACC）技術研究会等、受託事業の運営として、CO₂フリー水素普及シナリオ研究会、原子力発電所廃止措置調査検討委員会等について、不祥事の発生もあり例年通りではないものの、検討会の開催、技術動向の情報共有等所定の活動を行いました。

(4) 調査研究に加え、我々の諸活動を支えていただいている賛助会員へのサービス向上の観点から、後述の通り、月例研究会の運用改善、ニュースレターの内容充実等に取り組んできました。

(5) 上記のような事業活動の状況により、今年度決算については事業収支がマイナスとなりました。今後については、向こう数年間で健全な事業収支を達成できるよう、令和2年度事業計画の通り、研究内容に見合った人員、スペースの削減等によるコスト削減、民間企業等からの受託事業の強化、賛助会員様への

サービスの強化等、構造的な改革を進めてまいります。併せて、当研究所の組織体制を刷新強化し、再発防止策を徹底するとともに、新型コロナウイルスへの対応下での新たな勤務体制を確立します。引き続き、関係者の皆様のご理解とご支援をよろしくお願い申し上げます。

(6) 以下に各エネルギー分野における調査研究活動の概要を示す。

① エネルギー技術全般

国内外の地球温暖化に対する緩和策にとって重要な技術についてのイノベーションに関する調査、温室効果ガス排出削減に係る気候変動対策技術のポテンシャル等環境貢献度に関する調査、脱炭素社会の実現に向けたエネルギーシステムに係るエネルギーマネジメントに関する研究を行ったほか、最新の技術情報及び評価を提供するエネルギー技術情報プラットフォームの内容の充実、エネルギーに関する公衆の意識調査を実施した。

② 新エネルギー・省エネルギー・電力システム関連

電力システム分野では次世代電力ネットワークの調査検討を進めるとともに、風力発電の系統接続において必要になると考えられる蓄電池システムの最適化に関する調査を実施した。

また、再生可能エネルギー分野では集光型太陽熱発電（CSP）等に関する調査研究や蓄熱を活用した発電技術の調査等、省エネルギー分野では排熱を活用した高効率発電システムの検討を実施した。

③ 水素エネルギー関連

CO₂フリー水素の普及シナリオに関する研究や製造・貯蔵・輸送に至るサプライチェーンに関する調査、水素の利用技術である酸素・水素燃焼技術の研究開発に係る調査等を実施した。

④ 化石エネルギー関連

化石燃料の高度転換技術に係る研究に関して、石炭ガス化複合発電（IGCC）に関する調査やカーボンリサイクル技術を中心とするCO₂有効利用（CCU）技術に関する検討、評価、及び再生可能エネルギーを利用したCO₂の燃料転換事業に関する検討等を行うとともに、積極的に炭素を活用するCCU技術について、研究会の場において議論、意見交換を行った。

⑤ 原子力関連

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、さらに高い水準の安全確保を図るため、原子力の安全性向上に資する技術開発プロジェクトを実施したほか、過酷事故（シビアアクシデント）時の原子炉隔離時冷却系の機能に関する研究等を進めた。また、国際原子力機関等における安全基準の動向調査等を行うとともに、国内廃止措置を円滑に進めるための課題解決に向けた検討、原子力発電所の廃止措置計画に係る標準に関する調査検討、原子力発電所廃止措置の計画立案や実施、計画のプロジェクトマネジメントを担う人材の育成に関する事業等を行った。

⑥ 国際標準関連

ISO（国際標準化機構）の国際規格に関し、エネルギーマネジメント・省エネルギー分野や、CCS分野における国際規格の策定に係る活動を進めた。

(7) また、以下に広報・情報発信の充実に係る取組みの概要を示す。

① 定期刊行物の出版

当研究所の調査研究活動の紹介及び重要なエネルギー技術開発の動向の情報提供を目的として、毎年、四半期毎に、「季報エネルギー総合工学」を作成しており、平成31年度も4号（第42巻第1号～第4号）を発行した。（発行部数各約1,100部）

② 月例研究会の開催

当研究所の賛助会員等を対象に、研究所の調査研究成果の報告及び外部有識者による、時宜を得た情報の提供を目的とした「月例研究会」を昭和 58 年度から開催しており、平成 31 年度も引き続き、下記のテーマについて計 11 回開催した。

また、講師や聴衆間の意見交換及びネットワーキングの活発化、賛助会員サービスの向上等の観点から、レイアウト変更等の会場運営の変更、講演資料のデジタル化及び賛助会員限定ウェブサイトへの事前掲載などの運営方法の変更を行ってきている。こうした内容面、運営面の取組みもあり、参加者数に増加傾向が見られた。

③ メールマガジン（IAE Newsletter）の発行

当研究所の研究員によるコラムを新設しエネルギー・環境分野の内外動向等に関する考察を発信するとともに、月例研究会の開催概要、個別研究会の動向を掲載するなど、コンテンツの充実を図った。

研究所のうごき

(令和2年4月1日～6月30日)

◇ 第13回評議員会 (書面決議)

決議があったものとみなされた日: 5月13日(水)

議 題:

- | | |
|---------|---|
| 第一号議案 | 評議員の一部改選について |
| 第二号議案 | 役員退職金の支給について |
| 報 告 事 項 | 受託事業に係る労務費の不適切
計上事案について
令和2年度事業計画, 令和2
年度収支予算について
指定正味財産の振り替えにつ
いて
評議員の辞任について |

◇ 第23回理事会

日 時: 6月26日(金) 14:00～15:00

場 所: 航空会館(9階) 901号室

議 題:

- | | |
|---------|---|
| 第一号議案 | 令和元年度事業報告および決算
について |
| 第二号議案 | 公益目的支出計画実施報告書
について |
| 第三号議案 | NUPEC 承継財産管理運営規程
等の改訂について |
| 第四号議案 | 定時評議員会の開催について |
| 報 告 事 項 | 受託事業に係る労務費の不適
切計上事案について
業務執行の状況について |

◇ 月例研究会

第399回月例研究会 (Web会議)

配信日時: 6月12日(金) 14:00～16:00

テーマ:

1. 2020年度 電力供給計画の取りまとめにつ
いて (概要)
(電力広域的運営推進機関 理事 寺島 一希 氏)
2. 中東情勢と新型コロナウイルスが共鳴する
シェール・ガス革命とシェール・オイル革
命の未来
(和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛
一 氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者: 加藤 悦史

テーマ: ネガティブエミッション技術の最新動向

発表先: 令和2年度 LCA 日本フォーラム総会セミ
ナー「ネガティブエミッション 技術 国内
シンポジウム」

日 時: 6月30日

[論文]

発表者: 石本 祐樹他

テーマ: Large-scale production and transport of hy-
drogen from Norway to Europe and Japan:
Value chain analysis and comparison of liq-
uid hydrogen and ammonia as energy car-
riers

発表先: International Journal of Hydrogen Energy
(5月27日)

発表者: 坂田 興

テーマ: エネルギーモデルから見る 2030年の水素
需要

発表先: (一社) 水素エネルギー協会『水素エネ
ルギーシステム』Vol.45, No.2 (6月)

編集後記

本季報では、当研究所の調査研究から、原子力に関する報告について、合計4件を取り上げている。

まず、原子力全般にわたるテーマとして、IAEAの主催により開催された国際会議における議論の内容を中心に、気候変動問題への対応策の1つとして有力視されている原子力の役割や技術的・社会的課題について報告するとともに、世界の原子力発電の現状や欧米の諸機関との情報交換にもとづく最新の動向、さらにはこれらを踏まえたわが国の今後の原子力のあり方に関する考察を紹介している。

もう一方では、廃止措置を取り上げている。今後わが国において廃止を選択する原子力発電所が増加していくことが予想される中、円滑な廃止措置の実施を図る上で必要な技術者等の育成を目的として実施されている人材育成事業についてカリキュラムや海外実地研修の意義・成果を報告している。

エネルギー・環境を巡る内外の情勢が絶えず変化する中、今後の事業活動に関する検討等のご参考となれば幸いである。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第43巻第2号

令和2年7月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2

新橋SYビル（6F）

電話（03）3508-8891

FAX（03）3501-1735

<http://www.iae.or.jp/>

（印刷）株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。