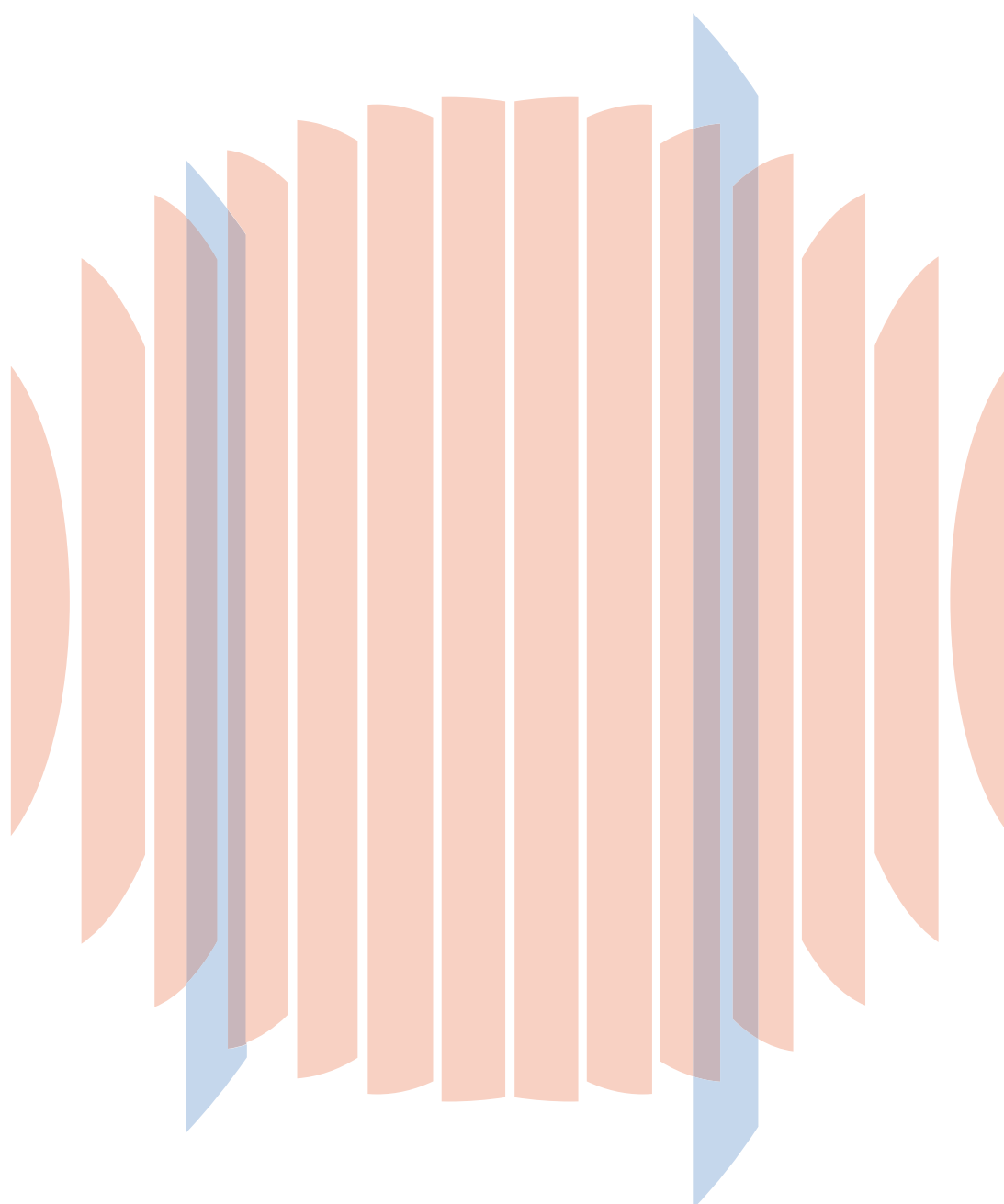


季報 エネルギー総合工学

Vol. 47 No. 1 2024. 4



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

【寄稿】

ブルーカーボン生態系修復による温暖化対策の現状と
今後の展開

工学院大学 先進工学部 環境化学科 准教授 酒井 裕司 1

【寄稿】

狭小空間専用ドローンの特徴と電力設備での活用事例について

株式会社 Liberaware スマート保安事業部 北川 祐介 14

【調査研究報告】

原子力発電所におけるドローンの利用

原子力技術センター 参事 田中 健一 20

【寄稿】

事故耐性燃料（ATF）被覆管の研究開発について

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究センター 照射材料工学研究グループ 根本 義之 27

【事業計画】

令和6年度 事業計画 （一財）エネルギー総合工学研究所 33

【研究所のうごき】 45

【第46巻通巻目次】 47

【編集後記】 51

[寄稿]

ブルーカーボン生態系修復による温暖化対策の現状と今後の展開

酒井 裕司 (工学院大学 先進工学部
環境化学科 准教授)



1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けた具体的な取り組みは世界中で加速化しており、各国で、様々な技術やそれらの導入方法、さらに導入に伴う政策や制度などの検討が進められている。

2015年の国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）第21回締結国会議（COP21）での「パリ協定」採択後、各国において、大気中の二酸化炭素（CO₂）を除去・隔離し排出量をマイナスにする技術（ネガティブエミッション技術（NETs））の導入と開発も急速に進行している。NETsには以下の技術が挙げられる⁽¹⁾。

- 植林／再植林
- 土壌炭素貯留
- バイオ炭
- BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)
- DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage)
- 風化促進や鉱物化
- 海洋肥沃化など

海洋利用による NETs として、海洋肥沃化の他にも、海洋アルカリ度の向上、沿岸生態系のブルーカーボン管理、その他（大型海藻養殖を含む）のアプローチが提案されている。なかでも、植林／再植林、森林管理、農地への土壌炭素貯留、沿岸生態系のブルーカーボンなどを活用した土地利用に基づく技術は、自然の生態系を利用した技術で、BECCS、DACCS、鉱物化といった他の技術よりも低コ

ストで広範囲に実施できるということで注目されている⁽²⁾。ここで、「ブルーカーボン」とは、藻場・浅場など沿岸の海洋生態系に取り込まれた炭素のことで、そのような生態系を「ブルーカーボン生態系」と呼ぶ。これらの生態系を活用した技術は、陸域および沿岸域などの自然生態系における炭素吸収量、隔離量および貯蔵量を保持・増加させることに寄与している。

ブルーカーボン生態系を含む自然生態系を基盤とした対応策は、国連自然保護連合（IUCN）により、「自然を基盤とした解決策」（NbS）として、「社会課題に効果的かつ順応的に対処し、人間の幸福及び生物多様性による恩恵を同時にもたらす、自然のあるいは改変された生態系の保護、持続可能な管理、回復のための行動」のように定義されている⁽³⁾。すなわち、NbSは、環境、社会、経済における利点を提供しつつ、生物多様性と人間の生活への好循環をもたらすものということもできる。NbSには、生態系修復（回復）に関するアプローチをはじめ、気候変動への適応と緩和に関する生態系を基盤としたアプローチや、防災・減災、さらに沿岸や水資源の管理などに関するアプローチなどがある。

NbSは、緩和と適応の両面での気候変動対策であるだけでなく、生物多様性の保全にも寄与するなど、地域に適合した導入や活用により複数の課題を同時に解決できる可能性を有しているため期待されている。

なかでも、高い炭素貯留ポテンシャルを有

するブルーカーボン生態系は、①気候変動対策への貢献、②災害・防災などへの寄与、さらに、③環境、社会、経済における生物多様性と人間生活と自然との共生への重要な貢献といった点で注目されているが、年々生育面積が減少しているという現状から、保全かつ修復の重要性が認められている。

このような背景のもと、本稿では、NbSのなかでもブルーカーボン生態系に着目し、それらの炭素貯留に関する機能や生態系利用による炭素隔離技術の実証例、そして、今後の展開や可能性について概説する。

2. ブルーカーボン生態系と炭素貯留

(1) 分布と炭素貯留能力

2009年に国連環境計画(UNEP)から「ブルーカーボン報告書」⁽⁴⁾が出版されたことで、ブルーカーボン生態系がそれまで以上に注目され始めた。図1にブルーカーボン生態系の分布とマングローブ林、塩性湿地、海草藻場の画像を示す。

地球上の炭素循環に重要な役割を担う海洋のうち、大型の植物が繁茂するブルーカーボン生態系(約4900万ha)は、海洋面積のわずか0.5%以下の生育面積にもかかわらず、年間の炭素貯留量は、海洋の堆積物中で年間に貯留さ

れる全炭素量の50%～71%にも達すると報告されている。また、ブルーカーボン生態系に存在する植物の総現存量は、陸上植物の僅か0.05%に過ぎないが、年間の炭素貯蔵量は地球上のすべての陸上植物が貯蔵する炭素量に匹敵するとも報告されている。そのため、ブルーカーボン生態系は、非常に効果的な炭素吸収源(ブルーカーボン・シンク)と位置付けられており、その炭素吸収速度は、熱帯林と同程度もしくはそれ以上である。また、海藻類では、大型海藻がブルーカーボン・シンクの主な対象になると考えられ、日本国内でも導入の期待度が高く、大量培養が目指されている。

(2) 消失が続くブルーカーボン生態系

このように、温暖化対策としても重要なブルーカーボン生態系であるが、表1に示すように、消失し続けている。

ブルーカーボン生態系の特徴と状況を以下に述べる。

① マングローブ林

マングローブ林は、最も炭素貯留量の豊富な熱帯・亜熱帯林である。マングローブ林および塩性湿地は、年間約6～8MgCO₂e/haの炭素を貯留すると推算される。これは、天然の熱帯林の約2～4倍の量に相当し、陸上森林よりも



図1 ブルーカーボン生態系の分布と画像⁽⁴⁾⁽⁵⁾

表1 ブルーカーボン生態系の面積と消失率⁽⁶⁾

ブルーカーボン生態系	面積 [km ²]	消失率(現状) [%/年]
マングローブ林	138,000	0.11
塩性湿地・干潟	55,000	1-2
海草藻場	325,000	2-7
海藻藻場	3,540,000	不明

高い炭素貯留ポテンシャルがある。例えば、2000年～2012年のマングローブ林の面積と炭素貯留量の変化を全球的に評価した研究では、2012年でのマングローブ林による全球レベルでの炭素貯留量は、4.19 Pgと推算され、インドネシア、ブラジル、マレーシア、パプアニューギニアの国々で約半分を占めている⁽⁷⁾。

しかし、マングローブ林の破壊傾向は、1900年代初期よりも減少したものの、今なお、年0.11%の率で消失している。地域では、東南アジアで最も多く消失しているが、ラテンアメリカやアフリカでも消失している。全球的には、42%のマングローブ林は、保護地域に存在している。例えば、Global Mangrove Watch プロジェクトは、マングローブ林のさらなる損失を食い止めるための目標を発表し、2030年までに40万haを回復すると報告している⁽⁸⁾。このような目標を多く実現させるためにも、地方自治体や地域社会との連携を強化し、政策的にも連携することが、将来のマングローブ林の保全と修復を強化する上で重要なステップとなると考えられる。

② 塩性湿地

塩性湿地は、海岸に存在する湿地・沼地であり、潮汐の影響を受け、満潮時には定期的に塩水が浸水する地帯である。塩性湿地は、鉱物堆積物と有機物の蓄積によって形成され、潮汐の影響を受ける生態系であり、深さ数メートルにもなる土壌中には、塩性湿地生態系におけるほとんどすべての炭素が含有されている。2000年～2019年の間に、全球的には約1453km²が消失した。なかでも、米国やロシ

アが消失量の約64%を占め、16.3 Tg-CO₂の炭素貯留量の損失にあたと推算されている。

③ 海草藻場

海草は水草の一種で、海水中で育成し、大部分の炭素は土壌に貯留される。海草は、多い場合には、面積当たり陸上森林の約2倍程度の炭素を貯留する。海草は熱帯から寒帯まで分布しているが、その多くは熱帯域・亜熱帯域に分布し、スガモやアマモの仲間は温帯域から寒帯域に分布する。地球上の炭素循環にも重要な炭素貯留域でもあり、食料安全をサポートし、かつ、生物多様性、水浄化、海岸線保護、病害軽減などの多くの機能も有する。

全球レベルでは、海草の消失が急速に進行しており、年間6.5億tCO₂の貯留量が消失していると推算されている⁽⁹⁾。ただし、海草の生育面積やそれらの変化については、正確な炭素貯留量の推算に更なる解析が必要である。

(3) ブルーカーボン生態系の保全（維持）と修復（再生）

以上のような各生態の消失の状況からも、ブルーカーボン生態系の保全（維持）と修復（再生）が必要であることは言うまでもない。

海藻養殖の拡大、乱獲の廃止なども含めた、ブルーカーボン生態系での対策と炭素吸収の潜在能力が表2のように試算されている。対象となるブルーカーボン生態系である、マングローブ林、塩性湿地・干潟、海草藻場、海藻藻場については、保全（維持）と修復（再生）の категория に分けて試算されており、マングローブ林、塩性湿地・干潟、海草藻場では、

表2 ブルーカーボン生態系での対策と CO₂ 吸収の潜在能力の試算⁽⁹⁾

対策の種類	対象	緩和試算値(2030 年)	緩和試算値(2050 年)
		[GtCO ₂ e/年]	[GtCO ₂ e/年]
保全(維持)	マングローブ林	0.02-0.04	0.02-0.04
	塩性湿地・干潟	0.04-0.07	0.04-0.07
	海草藻場	0.19-0.65	0.19-0.65
	海藻藻場	試算不可	試算不可
修復(再生)	マングローブ林	0.05-0.08	0.16-0.25
	塩性湿地・干潟	0.004-0.01	0.01-0.03
	海草藻場	0.01-0.02	0.03-0.05
	海藻藻場	試算不可	試算不可
海藻養殖の拡大		0.01-0.02	0.05-0.29
乱獲の廃止		試算不可	試算不可
Total		0.32-0.89	0.50-1.38

表3 ブルーカーボン生態系における炭素貯留量・貯留速度⁽¹⁰⁾

生態系	面積 [km ²]	炭素貯留量 [MgC/ha]	炭素貯留速度 [gC/m ² /年]	炭素貯留量(年間) [TgC/年]
マングローブ林	138,000	864	163	23
塩性湿地	51,000	162	151	7.7
海草藻場	177,000	140	101	18

保全（維持）の値は、2030 年と 2050 年とで変化はない。修復（再生）の炭素貯留量は、2050 年で増加している。2050 年ではマングローブ林が最も高い増加幅を示しており、修復（再生）の炭素吸収能力は、塩性湿地・干潟、海草藻場よりも高いと言える。また、海藻藻場に関しては、表 1 で消失率が不明であると示した通り、現状では、緩和試算値が算出されていない。さらに、海藻養殖の拡大による効果が期待されており、2030 年から 2050 年への増加が確認できる。

表 3 の通り⁽¹⁰⁾、マングローブ林の炭素貯留量は、塩性湿地、海草藻場よりも多い。塩性湿地の約 5.3 倍、海草藻場の約 6.2 倍で、年間の炭素貯留量も最も高い数値となっている。

以上のことから、ブルーカーボン生態系が地球上での炭素貯留に関係する重要な生態系であり、温暖化対策としても保全や修復が必要で

あることが分かる。なかでも、炭素貯留能力の高いマングローブ林、海草と海藻藻場などでの修復（再生）の取り組みと今後の展開について以下で概説する。

3. マングローブ生態系と植林／再植林によるブルーカーボン貯留

マングローブは、熱帯・亜熱帯地域の汽水域に生息している植物の総称である。その生育環境は、塩分濃度、潮汐、温度、降水量や土壌環境などの影響を受ける。また、マングローブは、耐塩性植物、好塩性植物で、様々な根の形態（通木根、支柱根、膝根、板根など）を有しているという特徴もある。このようなマングローブの多くは、一般的に、樹上で幼植物体にまで成長する胎生種子を生育し、それが成熟して落下し、着床した場所で発根し

て成長する。また、塩分濃度により、生育に適した樹種が変わるという特徴もある。

マングローブは、主に北緯 32 度から南緯 38 度の熱帯・亜熱帯地域、112 カ国に存在し、世界の海岸線の約 12% を占めている⁽¹¹⁾。表 3 で示したように、その面積は約 13 万 8,000 km² で、東南アジアが 33.5% を占める。なかでもインドネシアが世界全体の 20.9%、東南アジアの 60% 以上を占めて世界最大である。次いで、南米、中央・北アメリカと続き、ブラジルが 8.5%、オーストラリアが 6.5% を占める⁽¹²⁾。

全球でのマングローブの平均総炭素貯留量は、692.8 ± 23.1 MgC/ha と報告されている。

そのうち、深さ 1m の土壤中の平均炭素貯留量は、516.4 ± 19.8 MgC/ha と全体の約 74% を占め⁽¹³⁾、それはバイオマス中の炭素貯留量の約 2.9 倍である。また、マングローブは、根を有するため、他の陸域系の樹種と比較して、地下部バイオマスによる炭素貯留量が高いのも特徴である。さらに、各国での研究事例から、土壤中炭素貯留量には地域差があることも確認されつつあるが、一般的な森林生態系よりも炭素貯留量が多いことから、表 4 に示すように、土壤中と地上部および地下部バイオマスを含めたマングローブ林が注目されている。

表 4 マングローブ林でのバイオマス（地上部・地下部）、土壌中および総炭素貯留量⁽¹³⁾

地域	炭素貯留量 (地上部バイオマス) [MgC/ha]	炭素貯留量 (地下部バイオマス) [MgC/ha]	炭素貯留量 (土壌) [MgC/ha]	総炭素貯留量 [MgC/ha]
アフリカ	89.5	88.0	402.4	638.8
東南アジア	115.7	44.9	656.1	806.4
南, 東アジア	94.2	35.9	445.4	482.8
中央・北アメリカ及び カリブ海周辺	92.5	41.4	577.4	730.1
南アメリカ	104.3	85.2	236.9	419.4
中東	30.6	41.2	150.9	224.9
オーストラリア及び ニュージーランド	55.1	79.7	465.3	563.4
太平洋諸島	213.7	172.9	599.7	987.4

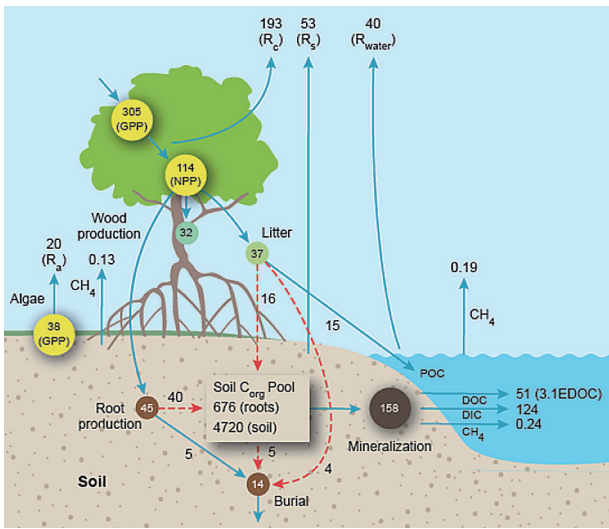


図2 マングローブ生態系における炭素フローのマスバランスモデル⁽¹⁴⁾

マングローブ生態系における炭素循環について図2に示す。林冠部および林床部の植生が、光合成によって大気から吸収した炭素は、マングローブ林全体の「総一次生産量」(GPP)と呼ばれる。GPPから植物体(葉, 地上部, 根)の呼吸(独立栄養呼吸)によって放出された炭素を差し引いた値が生態系の「純一次生産」(NPP)となる。図2には、土壌炭素についての無機化から、溶存有機炭素(DOC), 溶存無機炭素(DIC), 粒状有機物質(POC), 交換性溶存有機炭素(EDOC), そして、メタン(CH_4)も含めた炭素フローが年間ベースの数値(TgC/year)で示されている。このような図からもマングローブ生態系での炭素貯留を定量的に理解することができる。

以上のように、マングローブ植林/再植林による炭素貯留量の増加が注目され、これまで多くの研究例がある⁽⁷⁾ ⁽¹⁵⁾ ⁽¹⁶⁾。最近の報告⁽¹⁶⁾では、これまで世界中で実施されてきた370以上の植林および再植林試験のデータから、植林よりも再植林の方が単位面積当たりの炭素貯留量が高いこと、より炭素蓄積の高い場所における潮間帯における位置、より高い窒素利用量、低塩分濃度などの条件が炭素貯留量の増加に関係していることが示された。世界中のマングローブ伐採地での再植林では、40年間で約680 $\text{TgCO}_2\text{-eq}$ の吸収を促進することができた。干潟での同面積の新規植林よりも60%高いこともあり、温暖化対策におけるNbSとして有用な手法であることが示されている。

また、筆者らが実施したタイ南東部エビ養殖放棄池(ASP)での再植林では、図3に示すように、18年間で生態系炭素貯留量が約180 MgC/ha 増加したという結果が得られた。これは、エビ養殖放棄池で再植林をしなかった土壌堆積のみの地域(NPA)での炭素貯留量の約2.6倍であった⁽¹⁷⁾。また、タイ南東部では、安定同位体窒素および炭素の分析結果から一次生産者から最終消費者までのフードチェーンを推定することで、破壊された生

態系の修復段階の進行も確認できるようになった⁽¹⁸⁾。このように、再植林による生態系炭素貯留量の増加効果と生態系修復効果を科学的に実証でき、さらに修復地域での漁業などに与える経済効果、修復活動を通じた環境教育の効果など、マングローブがもたらす様々な効果を確認することができた。

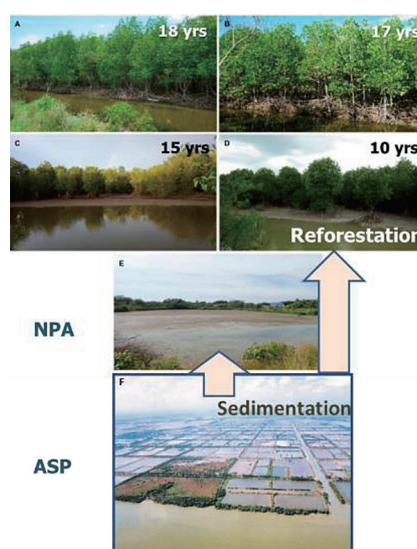


図3 タイ南東部エビ養殖放棄地でのマングローブ再植林の生育状況⁽¹⁹⁾

このように、各地域における生態系環境の修復効果を、環境面、経済面、社会面などの多方面から研究調査し科学的に報告された実証例は、ブルーカーボン生態系を保全・修復していく上で重要なデータとして解析され、今後の新たなカーボンクレジットの概念や試算などにとっての貴重なデータとなる。

4. 海藻(海草)生育、藻場造成による炭素貯留

海草および海藻も、マングローブ林、塩性湿地と同様、炭素貯留にも貢献する生態系である。海草藻場における炭素貯留量は、前出の表3に示すように、マングローブ林の約6分の1と少ないが、年間では塩性湿地よりも多いなど、ブルーカーボン生態系として注目されている⁽²⁰⁾。現時点で海藻は、「ブルーカーボン・シンク」という扱いではないが、なかでも、大

型海藻による炭素吸収能は非常に大きいと期待されており、特に、日本では導入の促進が図られている。

海洋植物は、海水中を浮遊する植物プランクトンの種と、海底に定着して生活する大型底生植物の種の2つに大別でき、さらに後者を海藻類と海草類に分けることができる。

海藻類は、底生植物であり、海底に固着して底生生活を営む。一般に、海藻類は、数mm～10m以上になる藻体を海底に固定させ、波浪などで流出しないよう岩盤などの硬質で安定的な基質を選択して生育する。特に、コンブ、アラメ・カジメ、そしてホンダワラの仲間（ガ

ラモ）が、炭素の隔離速度が大きい大型海藻である。つまり、生育に伴う堆積物を持たないために炭素貯留機能は無いが、成長速度が速いことが隔離機能を高くしている。さらに最近では、図4に示すように、海藻内に隔離した炭素が輸送され、堆積作用を持つ沿岸浅海域の他の生態系や深海へ到達することで炭素貯留に貢献すると報告されている⁽²¹⁾。さらに、図5に示すように、天然大型海藻における炭素フローと隔離の経路における概念図内に定量的なデータもあり、隔離に関与する炭素量についても定量的に概算できるようになってきている。図5で長期間の炭素貯留を示している経路が新たに

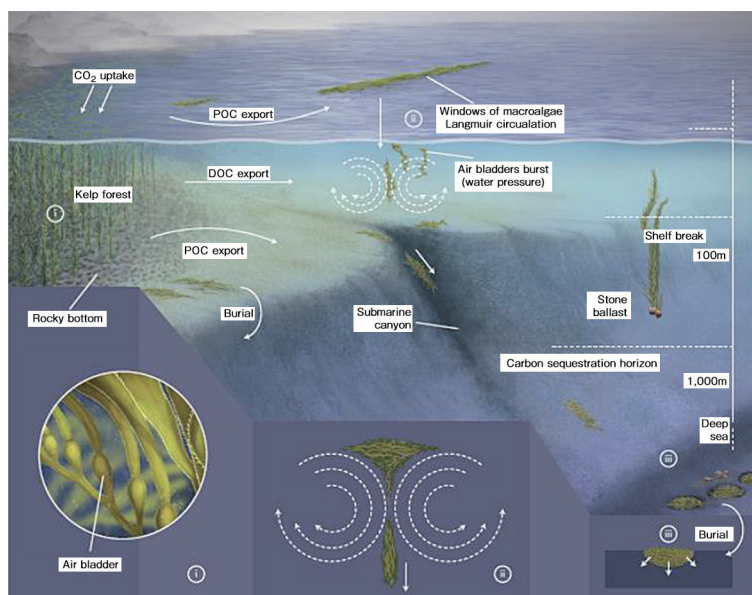


図4 大型海藻による炭素輸送および隔離フローの概念図⁽²¹⁾

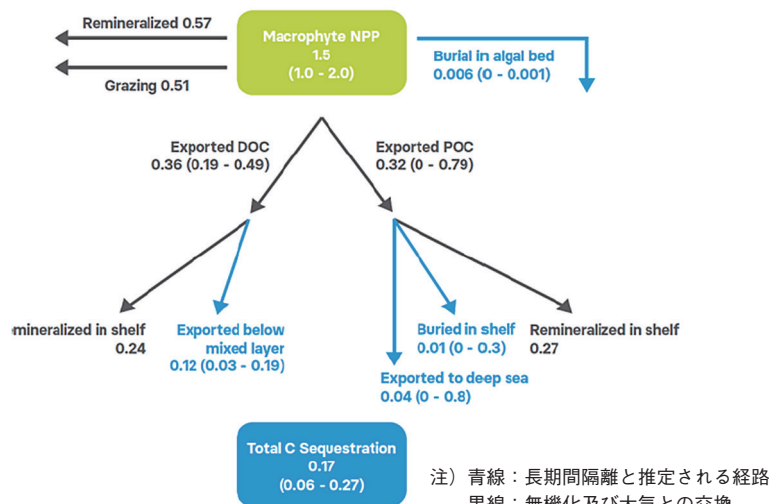


図5 天然大型海藻における炭素フローおよび隔離経路の概念図（単位：PgC/yr）⁽²²⁾

着目されており、研究が進められている。

また、海草類は、底生生物であるが、分類学上、海藻類とは異なり、被子植物の仲間、海中で花を咲かせて種子をつくる顕花植物である。つまり、根、茎、葉の区別を持ち、砂泥域などの海底に根と地下茎を伸長させて定着するという特徴を持つ。このような生態的な特性が、海草類の炭素隔離・貯留機能の高さにつながっており、海草藻場は一次生産力が地球上でも最も高いブルーカーボン生態系の1つとして報告されている⁽²³⁾。特に、海草類では、海底堆積物から海中に出ている葉の部分の成長速度が速く、さらに、海中に覆い茂るような葉が、海水の流速を減衰させ水中浮遊する有機物の堆積を促進することでも炭素貯留機能を高めている。そして、地下茎が海底堆積物内に繁殖しているため、底質の流出を防ぐだけでなく、安定した底質が堆積した有機物の再懸濁を抑制して炭素貯留能を高めている⁽²⁴⁾。さらに、地下茎や根の成長により、海底内土壌に有機物を蓄積することも炭素貯留能の向上に貢献している。なかでも、北半球の温帯域から亜寒帯域に分布するアマモは、生育分布が広い海洋植物で、草本であるが、生育期間が平均約60年と長く⁽²⁵⁾、生育に適した環境下においては、株が千年以上の寿命を持つという特性があり⁽²⁶⁾、長期間の炭素貯留を可能にするとして注目されている。

そして、日本国内での海草・海藻の生産による年間での炭素隔離量の算出結果⁽²¹⁾から、表5に示すように、沿岸浅海域で隔離される有機炭素量は、約470万トンCO₂/年と推算され、

海藻による炭素貯留への貢献が大きいことも分かってきた。ただし、前出の表1、表2のような海藻藻場でのデータがないことにも関係するが、コンブ場をはじめ他の海藻種などでの実証に伴う基礎的知見が少ないことや、前出の図4、図5で示したような未解明の隔離炭素量におけるデータの精度などからも、今後も海藻生育域での精確な観測と測定が必要である。この点に関して、後述のように、最近、国内でも試算に関するハンドブックが発刊された。

また、前述のように、海藻生育地域だけでなく、他のブルーカーボン生態系での海底堆積物、生態系内外の水中における難分解性溶存有機物、生態系外（陸棚、深海）での堆積物中における炭素貯留量の試算や貯留期間などの詳細な分析や解析が行われることで、よりブルーカーボン生態系における炭素貯留と隔離量の高さが示され、展開が進んでいくと考えられる。

海草・海藻藻場における炭素貯留量として算定できるプロセスには、次の4つが挙げられる⁽²⁷⁾。

- 堆積貯留：枯れた海草・海藻が藻場内の海底に堆積して長期間貯留されるプロセス
- 難分解貯留：枯れた海草・海藻、その細分化された破片が流出して長期間CO₂に変換しない難分解性の細片（粒子状）で、藻場外の沿岸域に堆積して長期間貯留されるプロセス
- 深海貯留：波浪などで破碎された海草・海藻が流れ藻となり沖合に流出して、浮力を無くし深海へ沈降し長期間貯留されるプロセス
- 難分解性溶存態有機炭素（Refractory Dissolved Organic Carbon: RDOC）貯留：海草・海藻が放出する難分解性の溶存態有機炭素が長期間にわたり海水中に貯留されるプロセス

表5 日本国内における藻場での海草・海藻の生産によるCO₂隔離量⁽²⁰⁾

海草・海藻種	海草・海藻生産量 [kg 乾重/m ² /年]	炭素含量 [%乾重]	CO ₂ 隔離量 [トンCO ₂ /ha/年]	面積 [ha]	総CO ₂ 隔離量 [トンCO ₂ /年]
アマモ場	1.0±0.7	35.0	12.6±8.9	61,667	508,459
コンブ場	6.2±6.8	30.0	60.5±71.8	20,356	1,159,836
アラメ場	2.1±0.4	32.5	24.6±4.7	63,120	1,631,851
ガラモ場	1.4±0.2	32.0	16.0±2.6	88,041	1,413,685
計					4,713,831

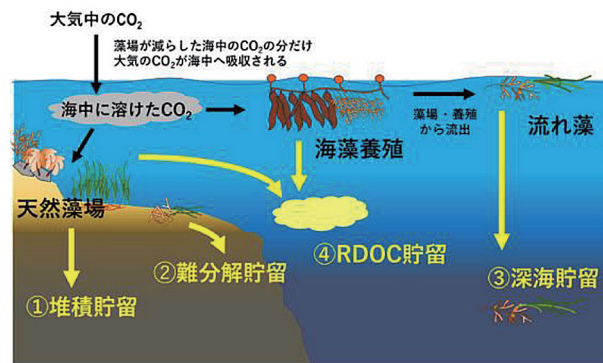


図6 ブルーカーボン生態系での大気中 CO₂ に由来する有機炭素の流れと貯留プロセス ⁽²⁷⁾

それぞれのプロセスへの炭素フローおよび貯留期間などの解明が今後も研究され、図6に示すような海草・海藻藻場における炭素フローの定量化が行われるような知見が蓄積されていくことになる。

5. ブルーカーボン生態系を利用した実践例と今後の展開

2006年のIPCCによる温室効果ガス収支に関するインベントリ作成のガイドラインが2013年に改訂された。それまで着目されてこなかった浅海域の植生が、「湿地」の項目の中に「沿岸湿地」として新たに導入されることになった。その後、前述のように、マングローブ林をはじめ、海草および海藻藻場も炭素吸収源として注目されてきていることから、ブルーカーボン生態系の保全（維持）および修復（再生）の実施が今後も注目され続けるであろう。そこで、以下にブルーカーボン生態系を利用した実践例について簡単に紹介する。

欧米を中心に、海洋NETsに関するプロジェクトが進められている。特に、米国、オーストラリアでは、生態系保全の観点からもブルーカーボン分野の研究が積極的に行われ、インベントリへの算入や独自の評価手法開発も着手されている。なかでも、ブルーカーボン管理とは、マングローブ・塩性湿地・沿岸海草の藻場などの生態系の保全（維持）および修復（再生）によるNETsのことであるが、現時点では、

海藻藻場や大型海藻養殖はブルーカーボン管理の対象ではなく、沿岸における海藻類を含む他の炭素隔離の可能性について議論がなされているところである。また、「その他の海洋NETs」のうち、海洋バイオマスのNETsオプションとして大型海藻養殖などが含まれている。大型海藻養殖とは、沿岸、沖合におけるコンブなどの大型海藻の養殖を指す。

以上のように、欧米では、海洋NETsに関して、プロジェクト体制で総合的な研究開発が進められている。一方で、日本では、精確および迅速な観測技術など要素技術の開発が進められているが、欧米のような今後の大規模化のための生産技術や観測技術など多面的な研究開発への更なる取り組みとあわせて海洋NETsが実施される必要があると考えている。日本国内では、自主的なクレジット制度が整備されてきており、Jブルークレジットが取り込まれつつある。しかし、今後のクレジット認証のためには、定量的な炭素吸収能の評価、さらには、賦存量管理を把握するための海洋観測技術の開発が進められる必要がある。そのような観測技術の例を図7に示す。最近、農林水産省が2021年5月に策定した「みどりの食料システム戦略」で、炭素吸収源としての「海洋生態系で貯留される大気中CO₂由来の炭素（ブルーカーボン）」の活用が位置付けられ、2023年度からわが国におけるCO₂など温室効果ガスの排出量と吸収量とをとりまとめたデータ目録（温室効果ガスインベント

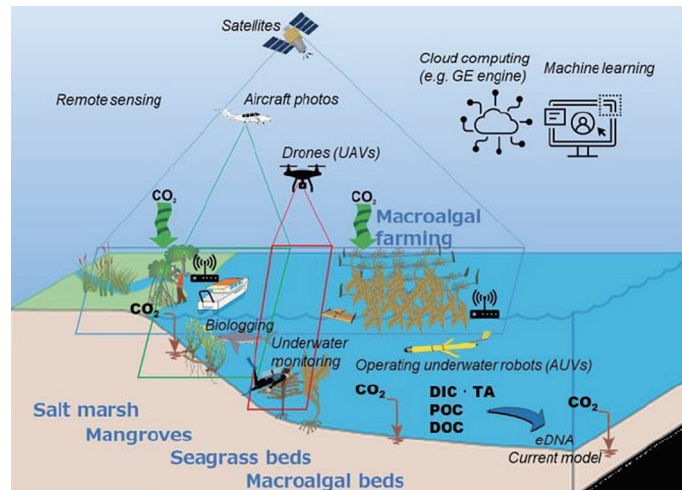


図7 ブルーカーボン算出のための正確なパラメータ化改善のための観察技術およびツール⁽¹⁰⁾

り)への登録が開始され始めている。また、海草・海藻藻場の炭素貯留量の算定に向けたガイドブックも、2023年11月に(国研)水産研究・教育機構から公開され、今後、気候変動対策技術としてのブルーカーボン生態系への理解が深まり、漁業関係者、自治体、企業、NPOなどの関係者による同ガイドブックの活用が進むことが期待できる。

ブルーカーボン管理および大型海藻養殖のような海洋NETsの日本国内での利点としては、排他的経済水域の広く(世界第6位)海岸線も長いこと、土地、水資源の競合がないこと、多くのコベネフィットを有すること、海藻養殖技術を有すること、藻場造成技術を有すること、発展途上国へ展開(技術移転)の可能性を有していることなどが挙げられる。一方で、気候変動等により環境変化(藻場減少)が生じる

こと、産業従事者(関連水産業)/関連研究者が減少すること、藻場造成・大型システム設置にコストがかかること、漁業権および沖合漁場の使用権利に問題があること、評価方法が未確立(炭素吸収能評価、賦存量、環境影響など)であることなどの多くの検討項目に対しても、適宜、措置や対応なども検討していく必要があると思われる。前述のガイドブックの中では、藻場タイプや海域区分別の炭素貯留量を算定する具体的方法も示されており、藻場の炭素貯留算定手法も公開されているため、今後の日本国内におけるブルーカーボンのクレジット化に向けて着々と進行していると言える。他の懸念事項などにも配慮しつつ、他国に無い新たなクレジット化のための概念導入なども検討しつつ発展していくものと思われる。

最後に、2050年を視野に入れた海洋ベース

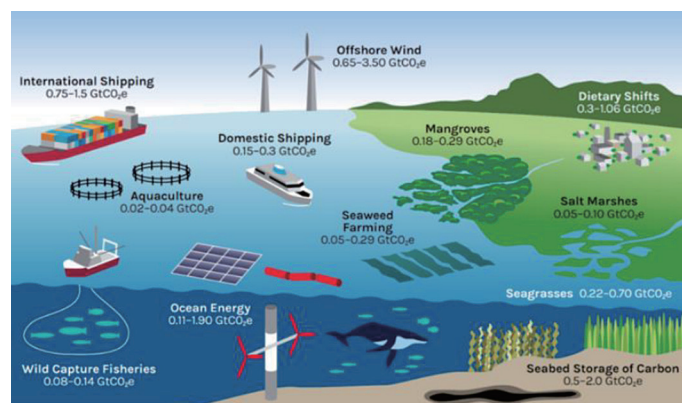


図8 海洋ベースの緩和策および関連する2050年における年間緩和ポテンシャル⁽⁶⁾

の地球温暖化緩和策としては、図8に示すように、今回本稿で取りあげてきた自然生態系利用による対策と養殖以外にも、洋上風力や波力を利用したエネルギー利用なども含め、沿岸域における統合的な環境およびエネルギーシステムなどの導入を挙げることができる。図中に示されている炭素吸収による緩和ポテンシャルからも、各海洋ベースでの技術のポテンシャルを把握することができる。このことから、本稿で述べてきた沿岸域での自然を基盤とした温暖化対策の取り組みだけでなく、海藻養殖の拡大、さらには洋上風力や波力などのエネルギー利用も考慮した沿岸域生態系での新たな地域での共生も含めた展開が重要である。

6. おわりに

カーボンニュートラル実現に向けた具体的な取り組みが、日本のみならず、世界各国で加速している中、沿岸浅海域でのブルーカーボン生態系に着目した海洋における気候変動対策への機運が高まってきている。そのような対策がNbSとして、地球上の生態系修復とともに炭素貯留を目指せることの意義は非常に大きい。今後も持続可能な気候変動対策への1つのアプローチとして、ブルーカーボン生態系修復技術が確立し普及されるであろう。

まずは、対象とするブルーカーボン生態系における生物種の違いや地域差も含めて、炭素貯留に関する知見を確立することが必要である。しかし、各種ブルーカーボン生態系での炭素フローや炭素貯留年数などを明確な数値として決定することや、その後のバイオマスを有効に利用する際の方法論など、今後のクレジット化の実用に向けて検討すべき内容も多く存在する。クレジット化実現のためにも、今後も実践的な導入事例における炭素フローと貯留量を精確に分析・調査して試算することが必要である。

具体的には、ブルーカーボン生態系での海

底堆積物、生態系内外の水中における難分解性溶存有機物、生態系外（陸棚、深海）での堆積物中における炭素貯留量の試算や貯留期間などの詳細な分析や解析が行われることで、より精確なブルーカーボン生態系における炭素貯留と隔離量とそれらのポテンシャルが示され、展開していくと考えられる。マングローブに関しては、ブルーカーボン生態系の中でも生態系炭素貯留評価の実施例や導入事例が多いことから、米国やオーストラリアをはじめ、日本でもカーボンクレジットとしての導入が進んできている。今後も、マングローブだけでなく、海草や海藻藻場などブルーカーボン生態系の生存面積と炭素貯留量を精確に把握するために、上述の炭素隔離量と期間の各生態系での科学的かつ高精度な炭素吸収能を評価すること、さらに、賦存量管理を把握するための各海域での生態系に適合した海洋観測技術やモニタリング技術などの開発も必要になってくる。そして、このようなブルーカーボン生態系を活用した炭素貯留・隔離のNETsは、低濃度の炭素を低コストで固定できる能力やコベネフィットを持つという特徴があるため、環境影響やその後のベネフィットについても科学的な評価が重要となってくるであろう。

そして、日本国内では、まず2030年での目標設定のために、NDCとしての設定、さらに、ブルーカーボン・オフセット制度やクレジット制度へのブルーカーボン生態系の活用を目指す必要がある。そのような課題もあるなか急速に進展しているので、今後の動向に着目していく必要がある。そこでは、算定に活用可能な統計情報の収集のための調査結果の活用や新規データベースの開発も必須になり、今後の継続的なデータ更新も必要になってくるであろう。

また、ブルーカーボン生態系での修復技術方法も含めた炭素貯留に関係する科学的な根拠となるデータの収集および算定方法の確立は重要である。具体的には、沿岸の海藻養殖が貢献する吸収量をわが国のインベントリに登録

することを目指すことや、ブルーカーボン生態系による炭素貯留量の算定方法の明確化、国内ボランティアクレジット制度の拡大などの取り組みを継続して進めていくことも必要であろう。さらに、炭素除去市場の創出と拡大のために、未だ国際的に確立されていない NETs の重要性や概念について国内外で理解を図りつつ、各々の技術と目的および段階に応じた最適なルール形成を構築する必要もある。

参考文献

- (1) Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. O., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L., Wilcox, J., Dominguez, M. M. Z. (2018), "Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis" *Environmental Research Letters*, Vol.13, 063001
- (2) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM), "Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda", Washington, DC, The National Academies Press (2019)
- (3) International Union for Conservation of Nature (IUCN) (2020), "Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions: first edition"
- (4) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds.). (2009), "Blue Carbon. A Rapid Response Assessment." United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no
- (5) the BLUE CARBON initiative, <https://www.thebluecarboninitiative.org/>
- (6) Watanabe, A., Kuwae, T., Duarte, C. M., Kohsaka, R., Quevedo, J. M. D., Nagai, H. (2023), "Blue Carbon Roadmap: Carbon Captured by the World's Coastal and Ocean Ecosystems" (ICEF Innovation Roadmap Project)
- (7) Hamilton, S. E., Friess, D. A. (2018), "Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012" *Nature Climate Change*, Vol.8, 240-244
- (8) Leal, Maricé and Spalding, Mark D (editors), 2022 *The State of the World's Mangroves 2022*. Global Mangrove Alliance
- (9) Hoegh-Guldberg, O., et al. 2019. "The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for Action." Report. Washington, DC: World Resources Institute
- (10) Batzer, D.P., Sharitz, R. R. (eds.) (2014) *Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands*, p.277-309, University of California Press (Chapter 7: Bridgham, S. D.: Carbon Dynamics and Ecosystem Processes)
- (11) Basha, S. K. C. (2018) "An overview on global mangroves distribution" *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, Vol.47, 766-772
- (12) Spalding, M., Blasco, F., Field, C. Eds. (1997) "World mangrove atlas", 178 pp, Smith Settle UK
- (13) Alongi, D.M. (2022), "Impacts of Climate Change on Blue Carbon Stocks and Fluxes in Mangrove Forests" *Forests*, Vol.13, 149
- (14) Alongi, D.M. (2022), "Carbon Cycling in the World's Mangrove Ecosystems Revisited: Significance of Non-Steady State Diagenesis and Subsurface Linkages between the Forest Floor and the Coastal Ocean" *Forests*, Vol.11, 977
- (15) Liu, H., Ren, H., Hui, D., Wang, W., Liao, B., Cao, Q. (2015), "Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China" *Journal of Environmental Management*, Vol.133, 86-93
- (16) Song, S., Ding, Y., Li, W., Meng, Y., Zhou, J., Gou, R., Zhang, C., Ye, S., Saintilan, N., Krauss, K. W., Crooks, S., Lv, S., Lin, G. (2023), "Mangrove reforestation provides greater blue carbon benefit than afforestation for mitigating global climate change" *Nature Communications*, Vol.14, 756
- (17) Sakai, Y., Kouyama, T., Kakinuma, K., Sakaguchi, Y., Yuasa, N., Thongkao, S., Boonming, S., Chantapromma, K., Kato, S. (2023), "Recovery of mangrove ecosystem carbon stocks through reforestation at abandoned shrimp pond in Southeast Thailand" *Ecosystem Health and Sustainability*, Vol.9, Article 0018
- (18) 加藤茂, 酒井裕司, 小島紀徳, 「マングローブ植林による生物多様な生態系回復と炭素隔離」, 日本海水学会誌, 第 67 巻 6 号, 305-317, 2013 (総説)
- (19) 酒井裕司, 「自然を基盤とした沿岸生態系修復によるブルーカーボン貯留」, 日本福祉大学経済論集, 第 67 号, 13-31, 2023 年 9 月
- (20) 堀正和・桑江朝比呂・所立樹・渡辺謙太・吉田吾郎・仲間雅裕他, 「ブルーカーボン—浅海に

おける CO₂ 隔離・貯留とその活用」地人書館,
2017 年 5 月

- (21) Krause-Jensen, D., Duarte, C. (2016),
“Substantial role of macroalgae in marine carbon
sequestration” *Nature Geoscience*, Vol.9, 737-742
- (22) Fujita, R. M., Collins, J. R., Kleisner, K. M.,
Rader, D. N., Augyte, S., and Brittingham, P.
A., (2022) . Carbon sequestration by seaweed:
background paper for the Bezos Earth Fund -
EDF workshop on seaweed carbon sequestration.
Environmental Defense Fund, New York, NY.
URL
- (23) Duarte, C. M., N. Marbà, E. Gacia, J. W. Four-
qurean, J. Beggins, C. Barrón, and E. T. Apostolaki
(2010), “Seagrass community metabolism: Assess-
ing the carbon sink capacity of seagrass meadows”
Global Biogeochemical Cycles, Vol.24, GB4032
- (24) Hendriks, I. E., Sintes, T., Bouma, T. J., Duarte,
C. M. (2008), “Experimental assessment and
modeling evaluation of the effects of the seagrass
Posidonia oceanica on flow and particle trapping”
Marine Ecology Progress Series, Vol.356, 163-173
- (25) Hemminga, M. A., Duarte, C. M. (2000),
“Seagrass Ecology” Cambridge University Press.
- (26) Reusch, T. B. H, Bostrom, C., Stam, W. T.,
Olsen, J. L. (1999), “An ancient eelgrass clone in
the Baltic” *Marine Ecology Progress Series*, Vol.
183, 301-304
- (27) 水産研究・教育機構, 「海草・海藻藻場の
CO₂ 貯留量算定ガイドブック」, 2023 年 11 月

[寄稿]

狭小空間専用ドローンの特徴と電力設備での活用事例について

北川 祐介 (株式会社 Liberaware
スマート保安事業部)



1. はじめに

(株) Liberaware（本社千葉市）は、主に「狭い・暗い・汚い」狭小空間専用のドローン開発と製造を手がける企業である。当社のドローンは、大空を飛行する一般的なドローンと違い、狭小空間を安定して飛行できるという特徴を有し設備の点検業務に活用されている。

本稿では、当社の狭小空間専用ドローンの性能・機能面の特徴と、電力設備などでの活用事例を紹介する。

2. 狭小空間専用ドローンの性能と機能

(1) ドローンの特性～地面・壁付近での不安定性～

「狭小空間を飛行するのであれば、機体サイズを小さくすればよい」という声をよく聞けるが、事はそう単純ではない。

ドローンのような回転翼機には、地面(床面)付近や壁面付近を飛行する際に、図1左のように、姿勢が不安定になるという特性がある。地面近くを飛行すると大きく傾いたり、壁面

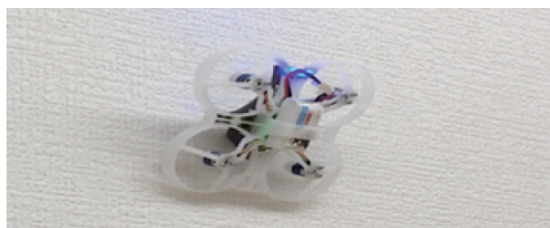
付近を飛行すると壁に吸い寄せられたりする。ドローンは、重力に対抗する上向きの力をプロペラの高速回転による推力によって生み出すが、その際、機体の大小にかかわらず強力なダウンウォッシュ（下向きの風）が発生するからである。特に、床面や壁面が近い状況が続く狭小空間では、この特性が安定飛行の妨げとなる。

当社では、そういったドローンの特性による問題を克服し、「狭い・暗い・汚い」極小空間でも安定的に飛行できるドローンを開発した。次節以降では、当社の極小空間専用ドローン「IBIS（アイビス）2」を狭小空間にどう適合させたかについて説明する。

(2) IBIS2 の形状と姿勢制御技術

IBIS2の外寸は、図2に示す通り、194mm × 199mm × 58mm（プロペラガード込み）で、重量は243g（バッテリー込み）である。

基本的に、天井裏のような狭小空間での飛行では、ドローンがどこにも衝突することなく行って帰ってくることは想定できない。むしろ多少の衝突を繰り返しながらも、良い映



＜一般的なドローン：壁に吸い寄せられて不安定になる＞



＜当社のドローン：壁面近くを飛行させても安定している＞

図1 壁面近くを飛行した際の姿勢の比較



図2 狭小空間専用ドローン「IBIS2」の外観

像を撮影して無事に帰還することが求められている。

様々な箇所に接触しながらもすぐには姿勢を崩さないことや、壁に吸い寄せられても安定した姿勢で壁からゆっくり離れられることが重要である。ここで必要となるのが「姿勢制御技術」である。

当社はIBIS2用にフライトコントローラーを独自開発した。フライトコントローラーとは飛行制御を行う電子デバイスであり、機体の姿勢やモーターの回転数などを司る機能を担うものである。このドローンの頭脳にあたるフライトコントローラーを独自開発することで、狭小空間での安定飛行に特化した設定を自由に細かく行うことが可能となり、上記のような挙動をさせることに成功している。

多くのドローンメーカーは、このフライトコントローラーについて市販品やオープンソースのものを採用している。この場合、機体に応じた細かな調整を行うことや、大きく改修して独自性を打ち出したりすることが難しくなる。

(3) エクステンションアンテナ

当社の狭小空間専用ドローンを飛行させるエリアとして多いのが、天井裏のようにそもそも人が進入できないエリアと、酸欠、墜落、有毒ガス吸引、放射線被曝等の理由で人が進入すると危険なエリアである。

一般的なドローンでは、操縦機と機体との間で直接無線の送受信を行って操縦を行う。この

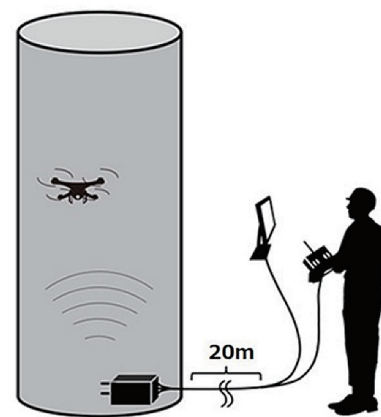


図3 エクステンションアンテナを使った作業のイメージ

方式だと、ドローンを飛行させるために、操縦機を手にした操縦者が危険な閉鎖空間に進入する必要がある。これでは、安全性の面で従来の点検手法と何も変わらない。

この問題を解決するため、当社はエクステンションアンテナを開発した。アンテナ部分(131mm × 272mm × 59mmの箱状)と操縦機は20mのケーブルでつながっており、操縦者は、図3に示すように、アンテナ部分だけを開口部から閉鎖空間に入れ、外側の安全な場所からドローンを操縦することができる。設備点検業務において、このエクステンションアンテナは欠かかすことができないものである。

(4) 超高感度カメラとLED照明

一般的なドローンの場合、上空から高精細



＜市販のドローンカメラ＞



＜当社オリジナルの超高感度カメラ＞

図4 市販のカメラと当社オリジナルカメラで録った画像の違い

な映像を取得することがミッションである。そこでは、カメラ性能について、解像度や分解能といった数値を競う側面がある。

一方、IBIS2では、真っ暗な空間を目視点検の代替として撮影してくることがミッションであるため、暗くてもいかに鮮明な映像を取得できるかが重要なポイントとなる。

このため、IBIS2には、オリジナルの「超高感度カメラ」と「LED照明」を搭載している。超高感度カメラには、暗視カメラに近い性能を有するソニー製イメージセンサーSTSRVISを採用した。また、LED照明（ヘッドライト）は、最大380lm（5段階調光可能）の明るさである。その結果を、市販の一般的なドローンとの比較で図4に示す。

（5）粉塵と防滴の対策

「狭い・暗い・汚い」狭小空間は、粉塵が多いところや水しぶきが舞っているようなところが少なくない。このため、IBIS2には、粉塵と防滴の対策を施し、高い防水・防塵性能規格「IP51」相当の性能を持たせた。

中でも、ドローンにとって粉塵は大敵である。一般的なドローンのモーターのほとんどは、プロペラを高速で回転させる際に生じる熱を逃がすため内部のコイルが見えるほどに開放された構造となっている。大空の飛行にはそれで何ら問題がないが、粉塵のある狭小空間では大きな問題となる。実際に、一般的なドローンでは、粉塵がモーター内部のコイ



図5 密閉型防塵モーター

ルの間にまで入り込んでしまい、数回飛行させただけでモーターが故障してしまうケースが頻発している。

当社では、この問題に対応するため、図5に示す、ニデック㈱と共同開発した「密閉型防塵モーター」をIBIS2に採用している。これにより、これまで粉塵が原因でドローンが飛行できなくなったことは一度もない。

（6）反転して起き上がることができる「タートルモード」

ドローンは人が操縦するため、操縦ミスといったヒューマンエラーで墜落させてしまう可能性はゼロにできない。万ードローンの機体が墜落してひっくり返ってしまった場合、一般的なドローンは、その時点で帰還できなくなってしまう。IBIS2が飛行する狭小空間は、障害物の数や航行スペースの狭さが桁違いであるため、一般的なドローンと比較しても墜落させてしまうリスクは高い。そこで、IBIS2には、図6に示すように、ひっくり返っ



図6 タートルモード機能で起き上がる IBIS2

た状態から起き上がれる「タートルモード」機能を付加している。この機能により100%ではないが、帰還率は飛躍的に向上した。

なお、「タートルモード」は、起き上がる際の支点を「前面」「後面」「右側面」「左側面」の4つの辺から選択することができる。操縦者はひっくり返ってしまった機体の状況を見極めながら起き上がる際の支点を選択し、タートルモードの動作を慎重に実施することになる。

(7) 狭小空間専用ドローンの注意点

IBIS2の使用上の注意点は以下の通りである。

① 低い耐風性能

狭小空間を安定的に飛行するための姿勢制御、ギリギリまでの軽量化、実質全周ガードなどの理由から、一般的なドローンよりも耐風性能が低い。

運用にあたっては、風速3m/s以上の風が吹き込んでいる場合には飛行させないルールを設けている。このため、いつ何時突風が吹くか予想できない屋外の飛行には不向きである。

② ドローンの機体とエクステンションアンテナの通信距離

IBIS2に限らず、無線通信で制御・操縦する機器の全てに共通することであるが、見通しが悪くなると、エクステンションアンテナと機体との間で、無線の送受信ができなくなるので注意が必要である。

また、見通しが良くしても、狭い配管内、コンクリートや水で囲まれた空間では電波が減衰しやすく、無線の受信強度には注意深く気を配らなければならない。

なお、エクステンションアンテナと機体の見通しが良い場合は、200m程度は無線の送受信が可能である。

3. 電力設備における狭小空間専用ドローンの活用事例

(1) 火力発電所・バイオマス発電所

電力設備において、当社の点検実績が一番多いのは、火力発電所（バイオマス発電所を含む）である。

具体的には、「ボイラ内」「サイクロン内」「煙突内」の点検である。特に、ボイラ内では天井付近の二次加熱器周辺は、そもそも点検自体が困難なエリアでもあり、震災時などにおいて、緊急点検を依頼されることが少なくない。

サイクロン内や煙突内の点検についても、足場架設を必要とする従来の点検手法よりも時間と費用がかからないことから、定期的に受注することが多い。点検に要する時間の短縮＝稼働率の向上であるため、機会損失の減少へつながることも、当社の点検サービスが評価されている理由の1つであると考えている。

(2) 水力発電所

水力発電所設備では、「サージタンク（調圧

水槽)」点検の実績がある。従来、サージタンク内の点検は難しく、特殊な足場の架設やロープアクセスなどが必要であったが、当社の狭小空間専用ドローンの活用により、費用と時間の面からも日常的な点検が可能になったと評価されている。

この他、「水圧鉄管」内もこの狭小空間専用ドローンによる点検が可能と考えている。

（３）原子力発電所

原子力規制委員会や東京電力ホールディングス(株)からも発表されているとおり、2024年3月に福島第一原子力発電所における「1号機PCV内部気中調査」を実施し、成功した。東日本大震災以降、初めてペデスタル内の気中部の撮影に成功し、少なからずメディアにも取り上げられ、エポックメイキングな事例となった。

原子力発電所設備での活用は、まだ緒に就いたばかりで、今後、様々な発電所に対してニーズのヒアリングをしながら、少しずつ活用範囲を広げていけるよう技術開発に取り組んでいきたい。

（４）風力発電所

風力発電設備での実績はまだないが、当社の狭小空間専用ドローンにより「ブレード内部」の点検を実施できると考えている。プラントのダクト内点検と同様、ブレードを内部から点検することで、外部からの撮影では判別がつかない異常箇所を見つけられる可能性がある。引き続き、風力発電設備メンテナンス会社などとの連携を深めていきたい。

４．最後に～画像処理による3Dデータ生成技術との組み合わせ～

当社では、狭小空間専用ドローンが撮影した動画データを解析・編集し、3D化、点群化、オルソ画像化する業務にも注力しており、近年、この業務への関心が非常に高まってきている。図7に天井裏の点群化、図8に煙突内部の3D化の例を示す。ここで、画像処理には、SfM（Structure from Motion）技術を活用し、動画データから3Dデータを生成している。

点検業務において、これまでの文字や手書きの図を中心とした報告書からドローンの動



図7 天井裏の点群化

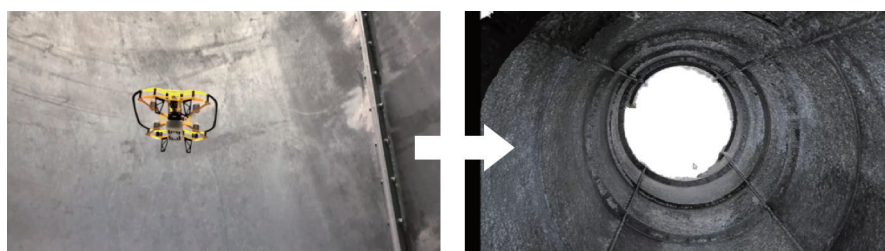


図8 煙突内部を3D化（写真情報入り）

画データのアーカイブへと移行することは、それ自体デジタルトランスフォーメーション（DX）の一步となるが、設備内部の3D化でより一層進んだDXになると考えている。

また、3D化で設備の様子の一覧性が高まるため、定期的に3D化すると経年変化を比較しやすくなる。例えば、正しく計測できるようになったクラックの成長率や設備の歪み率の情報を多く蓄積することは、設備を修繕すべきタイミングの予測精度を高めることにつながっていく。当社の3D化サービスは、製造業、建設業を問わず、時間基準保存（TBM：Time Based Maintenance）から状態基準保存（CBM：Condition Based Maintenance）への移行の推進に貢献できると考えている。

さらに、定期修理のように時期を決めて修繕を行う体制から、必要な時に必要なだけ修繕を小まめに行う体制への変革を進めるには、日常のかつ小まめに点検を行い、修繕時期の予測精度を高める必要がある。

最後に、「狭い・暗い・汚い」狭小空間専用ドローンと画像解析技術の組み合わせがCBMの浸透に一役買うことになればと考えている。今後は、AIによる異常箇所の自動検出技術の組み合わせも含めて、さらなる技術開発に取り組んで行きたい。

原子力発電所におけるドローンの利用

田中 健一 (原子力技術センター 参事)



1. はじめに

ドローンの利用拡大については、“空の産業革命”として首相官邸主導のもとロードマップが定められ、“環境整備”、“技術開発”および“社会実装”に関わる方針が示されている⁽¹⁾。“空の産業革命が起こる”と期待される分野は、農業、林業、水産業分野、災害発生時の被災状況把握や救助などの支援、緊急時の医療活動支援、また、測量や施設の点検などと多岐にわたる。

ところで、ここでいうドローンとは、航空法上無人航空機と分類されるものであり、狭義には機体の重量が100g以上のマルチコプターと呼ばれているものを指している。一口にドローンと言っても大きさや構造はその用途に従い多種多様のものが存在している。ドローンを用いて業務の改革、改善を行おうと

する者は、適用しようとする業務の特性や用いる環境などの特徴を考慮し、どのようなドローンを自らの業務に適用していくかという選択を行うことが求められる。

本稿では、原子力発電所に点検業務において“どのような対象にはどのような仕様のドローンが必要であるか”について、筆者が所有する3種類のドローン飛行経験をもとに説明する。

2. ドローンに関する規制

(1) 航空法上の規制

国土交通省は、図1に示すように、ドローンを屋外で飛行させる場合の飛行形態を“飛行に伴うリスク”に応じて3つのカテゴリーに分類し、カテゴリー毎に必要な手続き（許可や承認）を定めている⁽²⁾。適切な許可・承

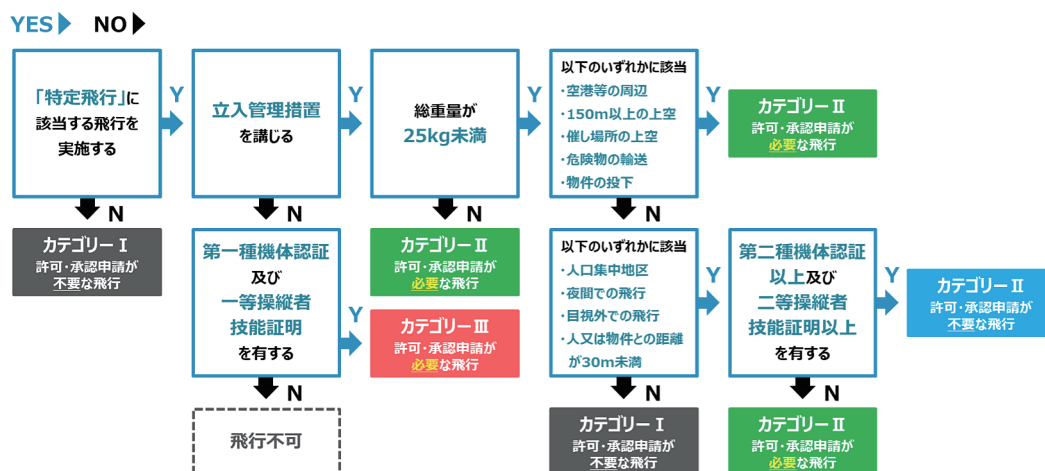


図1 飛行カテゴリー決定のフロー図⁽²⁾

認を取得せずに飛行させた場合は処罰の対象となる⁽³⁾。“飛行許可・承認が必要となる空域および方法での飛行（特定飛行）”に該当するカテゴリー II および III の飛行では、機体の登録、機体識別のための登録記号の表示およびリモート ID の搭載、操縦者の技能証明取得、飛行許可・承認の申請、飛行計画の通報および飛行日誌の記載が必須となる。

なお、ここでのいう“飛行に伴うリスク”は、有人航空機の安全およびドローンの飛行区域における一般公衆の安全に対する脅威に対して想定されている。このリスクが十分に小さいと判断される飛行は、カテゴリー I に分類され、飛行許可・承認は不要とされている（“特定飛行”に該当しない）。

（２）小型無人機等飛行禁止法

「小型無人機等飛行禁止法」⁽⁴⁾は、同法で定めた重要施設およびその周囲概ね 300m の周辺地域の上空の飛行を禁止している。対象施設の敷地・区域の上空を“レッド・ゾーン”、周囲概ね 300m の上空を“イエロー・ゾーン”と呼ぶ。この重要施設には国の重要施設、外国公館など、防衛関連施設および空港に加え原子力事業所が指定されている。原子力事業所については、原子力発電所や核燃料取扱施設 22 カ所が挙げられている。ただし、次の 4 つの飛行については施設の設置されている都道府県公安委員会への通報を行うことで飛行禁止が解除される⁽⁴⁾。

- 対象施設の管理者又はその同意を得た者による飛行
- 土地の所有者が当該土地の上空において行う飛行
- 土地の所有者の同意を得た者が、同意を得た土地の上空において行う飛行
- 国又は地方公共団体の業務を実施するために行う飛行

「小型無人機等飛行禁止法」は、国の重要施設などへの外部からの破壊行為や情報盗取などを想定し、施設内で飛行および施設への外

部からの接近を禁止しているものである。飛行の禁止は、当該施設又は周囲での飛行がそのようなものでないことが明らかであり、飛行についてその旨を予め通報されることによって飛行禁止は解除されるものである。

（３）原子力発電所の敷地内での飛行

原子力発電所の敷地内において点検などでドローンを用いる場合、次のような飛行の状況になると想定される。

- 原子力発電所に設置されている建物や構造物の高さは航空法などに定められた飛行制限高度を超えるものはない。すなわち、有人航空機が原子力施設の敷地上空 150m 以上で飛行することはない。
- 原子力発電所の敷地内は立ち入りが制限されており、さらに、ドローンを用いた点検などを行う作業範囲を飛行区域として設定し、関係者以外の立ち入りを禁止することが可能である。
- 点検などのために行う飛行は原子力施設の管理の下で行われる業務である。

最初の 2 つの状況は許可・申請が不要なカテゴリー I の飛行であり、最後の状況は飛行禁止の解除対象であることから、公安委員会に通報することで全てで飛行禁止の解除ができる。

上記 3 つの事項それぞれに対し、最適化に関連する実的な課題を考慮しなければならない。また、廃棄物、再使用／再利用を想定する資材を搬出するための全ての活動は、廃棄物管理の枠組みの下で行われる。この枠組みは、施設内での活動および施設外（オフサイト）での活動を網羅するものである。なお、この活動には、廃棄物、資材の再使用／再利用または埋設処分のいずれもが含まれる。

3. 原子力発電所におけるドローンの利用

原子力発電所におけるドローンの利用として、図 2 で示す 3 つの用途を挙げることができる。これらについて以下に説明する。

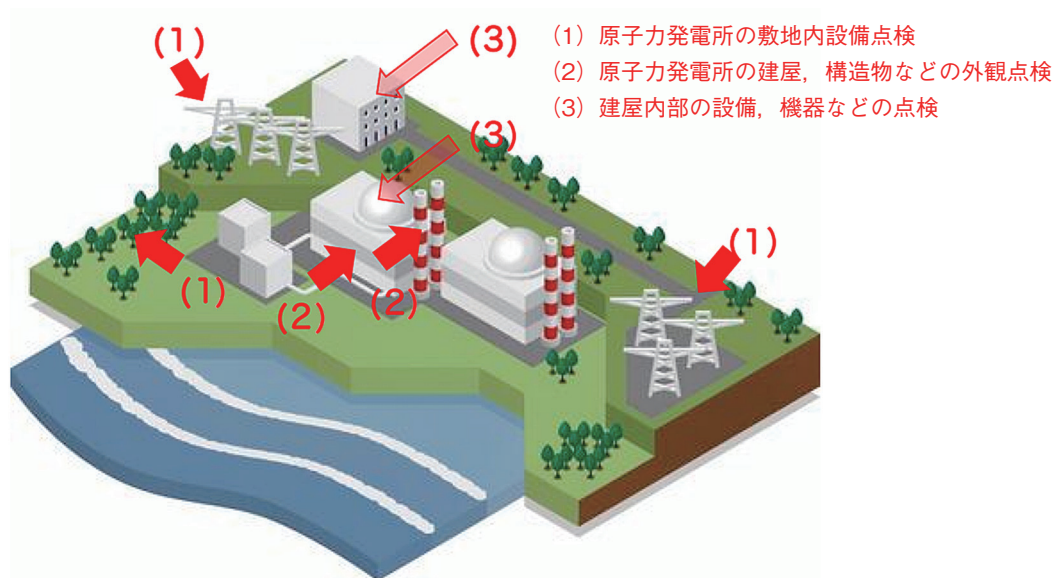


図2 原子力発電所でのドローン利用箇所の例

(1) 原子力発電所の敷地内設備点検

敷地内設備の点検として所内の送電線点検、敷地境界（フェンス、PP 設備など）および敷地内地上設備（屋外配管など）点検がある。このようなドローンを用いた点検は、原子力発電所に限らず、送電線の点検や敷地内の設備点検には数多い実績が存在する。

広範囲の点検（広範囲の飛行）を行う場合には、“ウェイポイント”と呼ばれる自律型飛行機能を用いることで作業の合理化を図ることができる⁽⁵⁾。

なお、ウェイポイントとは、電子地図上にドローンの通過ポイントを配置してポイントごとに高度や速度、カメラ向き、撮影などを設定することができる自立飛行機能をいう。自立航行は、電子地図に配置されたポイントの経度・緯度および高度並びに方位の情報とGPSを利用して自動操縦で行うものである。

(2) 原子力発電所の建屋、構造物などの外観点検

ドローンを用いた建屋、構造物などの外観点検も、原子力発電所を含め種々の工業施設において多くの実績がある。原子炉建屋、タービン建屋および廃棄物貯蔵建屋などの外壁、スタックなど構造物並びにスイッチヤードな

ど屋外施設の外観点検にドローンを活用することには次のような利点がある⁽⁶⁾。

- 高所点検の代替手段（高所作業を行わないことによる労働災害リスクの低減）
- 高所の設備点検の容易化、足場設置の費用削減
- 点検画像のデータベース化
- 映像や画像を撮影し、過去の画像との比較分析
- 点検頻度向上による設備管理強化
- 死角となる箇所の点検、死角となる場所を高所から撮影し、各部署と情報共有が可能

(3) 建屋内部の設備、機器などの点検

原子力発電所を含めて種々の工業施設などにおいて建屋内部の設備、機器などの点検についても同様に多くの実績がある。ドローンを用いた屋内の設備、機器などの点検においても屋外における利用と同様の利点がある。

特に、“点検箇所が高所にある、又は、接近経路が複雑”で、かつ、放射線量が高い箇所に点検では、作業者の被ばくを低減することが可能になる。

4. 原子力発電所での利用例

(1) 国内における利用例

国内の原子力発電所の利用例として次のようなものがある。

(1) 屋外利用の例：中部電力㈱、浜岡原子力の緊急時の放射線測定計画⁽⁷⁾

- (a) 計画内容：重大事故が発生した事態を想定して、ドローンを使って周辺調査する飛行試験を実施
- (b) 使用ドローン：NTT e-Drone Technology 製 ZION PRO 800
- (c) 計画の内容：浜岡原子力発電所が面する海域でドローンを飛行させて、放射性物質の濃度や放射線量の調査を行う。

(2) 屋内利用の例：中部電力㈱浜岡原子力発電所タンク内点検⁽⁸⁾

- (a) 点検内容：放射性液体廃棄物貯蔵タンク内の目視点検
- (b) 使用ドローン：スイス社製 ELIOS 2
- (c) ドローン利用の利点：
 - ⇒ 作業量を大幅に削減
 - ⇒ 作業員の負担軽減や安全性向上、被ばく低減に寄与

- (b) 得られた効果：ドローンの飛行環境に対して十分な情報が得られない状況下の高所であつ高線量の環境下の点検を安全かつ効果的に実施することを可能にした。

(3) 福島第1原子力発電所での利用

福島第1原子力発電所の建屋内に高線量の箇所が存在する。このような箇所では線量を低減し、作業環境の改善を行うためには、線量分布および汚染状況の把握が必須である。このような情報を得るためにタービン建屋内でドローンを用いて以下の測定を行っている。

- (a) 使用箇所：1Fの3号機 逆洗弁ビットタービン 建屋オベフロ
- (b) 実施内容：飛行性能試験、3次元復元図を作成
- (c) 使用ドローン：“RIZER”
- (d) レーザーを利用した SLAM (Simultaneous Localization and Mapping：自己位置推定と環境地図作成を同時に行う機能) による制御：GPS 波の届かない屋内環境下であっても安定した飛行が可能

5. 原子力発電所でドローン利用する場合の考慮点

原子力発電所におけるドローンの利用は、先述の通りいくつかの実例がある。これらの利用に今後さらに活用を拡大していくために確実にしておくべき事項について説明する。

原子力発電所の屋内外を問わずドローンの機能および考慮すべき点として次が挙げられる。

(1) 屋外利用の例：原子炉建屋の外壁点検⁽⁹⁾

- (a) 実施内容：ブレイリー島の原子炉建屋2棟の外壁点検に小型無人航空機を使用して、2日間で作業を完了した。
- (b) 得られた効果：
 - ⇒ 通常クレーンを用いて約1週間の作業を必要とする点検コストを削減
 - ⇒ クレーンが不要になったことで、作業員は点検の大半を地上で行うことが可能になり安全性が向上
 - ⇒ リアルタイムで高解像度の画像が提供で可能であり、より質の高いデータを提供

(2) 屋内利用の例：建屋内の設備配置と放射能分布の把握⁽¹⁰⁾

- (a) 実施内容：詳細が不明な状況下における自動航行を行うアルゴリズムを開発した。このシステムをドローンに実装し、放射能分布を含めた3D マッピングを行った。

- (1) 狭隘箇所での飛行：屋内の設備、機器などの点検では狭隘部を飛行することになり、狭隘部での飛行安定性に考慮が必要
- (2) 接触、衝突：屋内の設備、機器などの点検時に接触や衝突によるダメージ
- (3) セキュリティ：点検時に撮影した映像(写真、動画)の漏洩。外部からの飛行制限
- (4) 放射線の影響：装備されているセンサー、コントローラへの放射線の影響
- (5) 画像取得：光学カメラ、レーザスキャナーなどの選択
- (6) 360度(全方位)カメラ：点検時の人の行動に即した映像の取得

表 1 使用経験を参考にしたドローン

機種	MAVIC MINI	AIR2S	PHANTOM 3
重量	249 g / 199 g (日本)	595 g	1,216g
寸法	折りたたんだ状態：140×81×57 mm (L×W×H) 展開時：245×289×55 mm (L×W×H)	折りたたんだ状態：180×97×77 mm (L×W×H) 展開時：183×253×77 mm (L×W×H)	対角寸法：350mm (プロペラ除く)
飛行時間	30 分 (無風で 14km/h の速度で飛行時に測定) 18 分 (日本向け) (無風で 12km/h の速度で飛行時に測定)	31 分	約 23 分

この検討では、市販の 3 種類のドローンの使用経験を参考にした。3 種類のドローンは表 1 の通りである。3 種類とも世界ドローンシェアの 7 割以上を占める DJI 社製 (中国製) である。

(1) 狭隘部での飛行

屋内の設備や装置などはいずれも原子炉の運転制御、放射線監視などの重要設備であり、ドローンの接触や衝突により破損させるようなことがあってはならない。接触や衝突による設備などへ与えるダメージは機体の重量、ブレード (プロペラ) の大きさ、形状、材質および回転力に依存する。ブレードの接触では、ドローンの重量によりブレード (プロペラ) の大きさ、形状および回転力が変化することから、重量の重いドローンのブレードが接触した方が、軽いものよりダメージが大きい。衝突についても重量が重い方がダメージは大きい。

PHANTOM3 では、屋内壁にブレードが接触した際石膏ボードを数ミリ程度えぐるというダメージを与えた。AIR2S のブレードは PHANTOM3 のものより軽量であるため壁と接触しても表面に傷をつける程度であるが、ブレードが薄く作られているため“鋭利な刃物”のように細いケーブルであれば簡単に切断する。MAVIC MINI の場合は、壁に接触しても傷を与えるようなことはなく、むしろブレードが破損した。

ドローンを用いて屋内 (狭隘部) で設備、機器などの点検を行う場合は機体重量の軽い

ものを用いるべきである。また、ドローンはブレードが設備、機器などと接触するようなことのないような構造が望ましい。

(2) セキュリティ

ドローンを原子力発電所のような重要インフラ施設で利用する場合のセキュリティ管理としては、映像などの点検情報の盗取、漏洩と飛行の妨害 (“ドローンの乗っ取り”) への対策が必須である。現在一般に流通しているドローンのほとんどが WiFi を用いて操縦およびデータ通信を行っている。屋内で使用している場合、WiFi の出力から原子力発電所の敷地外からこれらの行為を行うことは難しいと言えるが、“絶対大丈夫” という訳ではない。このような行為を防止する手段としては通信電波の暗号化などがあるが、最も効果的な方法としては、ドローンを飛行させている区域およびその周辺への関係者以外の立ち入り又は接近を禁止し、徹底することであろう。

また、米国ではスマートフォンなどからの情報漏洩が懸念され、政府機関での利用について特定の国で製造されたものに対して使用制限が講じられている例もある。この点を踏まえて使用するドローンを選択することが好ましい。さらに言えば、国産のものが望ましいと言える。

(3) 放射線の影響

ドローンに装備されているセンサー、コントローラは全て半導体で構成されている。このようなものを放射線の存在する場所で使用

する場合には相応の耐放射線であるべきである。また、飛散性のある放射性物質が存在する箇所での使用を行うのであれば放射性物質が付着しづらく、除染が容易な構造、材質であることが求められる。

(4) 画像取得

ドローンを用いた点検では、点検箇所を撮影し、映像を確認することになる。撮影の方法としては光学カメラを用いるものとレーザスキャナーを用いるものがある。後者については、“現場の状況把握”という観点で3次元形状の取得で有効である。レーザスキャナをドローンに装着して画像取得を行うことも可能であるが、レーザスキャナー自体が相当の大きさと重量を持つため装着できるドローンも大型となる。レーザスキャナーは現場の情報把握において大変有効な機器ではあるが、これを搭載したドローンの屋内での利用は相応の広い空間がある区域など対象箇所が制限される。

(5) 360度カメラ

屋内点検の行動パターンとしては、図3のような例が考えられる。

今、屋内に設置されている装置A,B,Cを点検するとする。

- ① Aの近くで点検項目に従い点検を行う。
- ② Bに移動し、同様に点検を行う
- ③ Cに移動し、同様に点検を行う

このように点検を行う場合、A,B,Cの点検を行うとした場合であっても、移動の間も周囲を観察している。すなわち、装置間を移動する際は、進む方向だけでなく全方向に注意を払っている。施設の不具合は指定された装置の点検だけではなく、移動時に対象以外で発見する場合もある。

ドローンに装着されているカメラは画角が広く、撮影方向を変化させることができるが、原則前方の一方向を撮影する仕様となっている。上述のような行動をドローンで再現するためには360度(全方位)カメラが必要となる。

6. まとめ

(1) 屋外での利用

原子力発電所を含む各種の工業施設では、屋外のドローンの利用について数多くの実績がある。今後もその延長線上で利用を拡大し、巡視点検業務の効率化を進めていくことになるであろう。

現時点での利用状況を改善してより効果的な利用を目指すのであれば、ウェイポイントのような自立型飛行形態に対して深層学習機

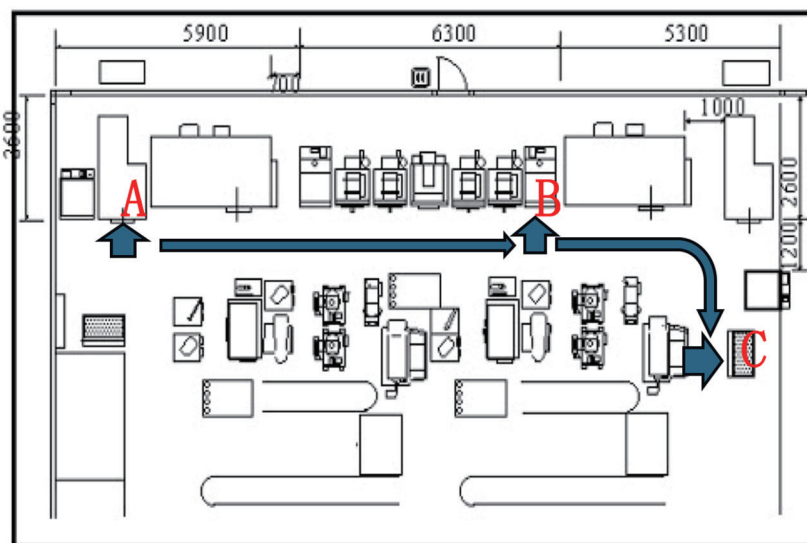


図3 屋内点検の行動パターン例

能をドローンの制御に応用し、飛行中のカメラ画像から移動方向を自律的に判断させる技術が求められる。

また、屋外であることから施設の外部から“ドローン制御の乗っ取り”や“ドローンが収集した情報の盗取”に対する対策も必須の事項である。

(2) 屋内での利用

屋内の利用についても国内外でいくつかの利用実績がある。特に、作業者に対して放射線被ばくのリスクや高所作業などの労働災害のリスクの高い箇所での利用拡大が進んでいくであろう。

屋内だけでなく屋外にも共通の事項ではあるが、ドローンの使用自体が新たなリスクを発生させることにもなる。この点については、本稿で説明した事項がリスクを発生させない又は低減するために有効である。これをまとめると以下の通りとなる。

- 屋内で使用するドローンは可能な限り小型で軽量であること
- ブレードが露出しておらず、接触などで装置などにダメージを与えない構造であること
- 重要インフラである原子力発電所の情報セキュリティ対策が万全であること、これについては国産であることが望ましい。
- 施設点検の行動パターンから全方位を撮影できるカメラ（360度カメラ）の装着が望ましい。
- 高線量の箇所での使用に耐えられる“耐放射線”であること、また、放射性物質が付着しづらく、除染が容易な構造、材質であること
- レーザスキャナは機器形状などを3次元形状で取り込むには有効であるが、その装着にはドローンの大型化が避けられず、狭隘な箇所での使用に制限を受けことになる。3次元形状の取り込みは、光学カメラを用いた SfM (Structure From Motion) が望ましい。(SfM は、ある対象を撮影した複数枚の写真から対象の形状を復元する技術の総称。SfM ソフトウェアを使えば、複数の写真を入力することで、3次元モデルの作成が容易になる。)

なお、現時点では原子力発電所の屋内外で使用するについて法令上の規制を受ける

状況ではないが、使用は保安規定に定める要項、要領および手順書などの下に実施すべきである。

参考文献

- (1) 首相官邸ホームページ, “空の産業革命に向けたロードマップ 2022”, (https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougai_dai6/siryous3_2.pdf) (https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougai_dai18/siryous4.pdf)
- (2) 国土交通省ホームページ, “無人航空機の飛行許可・承認手続”, (https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html#anc01)
- (3) 国土交通省ホームページ, “無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール”, (https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)
- (4) 警視庁, “小型無人機等飛行禁止法関連”, (<https://www.npa.go.jp/bureau/security/kogatamujinki/index.html>)
- (5) ドローン BUSINESS 研究所, (https://note.com/drone_biz_lab/n/n5d1a6efe8eb8)
- (6) 四日市コンビナート先進化検討会, (<https://www.yokkaichikonbinato-senshinka.jp/result/drone.html>)
- (7) 中部電力ホームページ (https://www.chuden.co.jp/resource/seicho_kaihatu/kaihatu/kai_library/news/news_154_04.pdf)
- (8) 中部電力ホームページ (<https://www.chuden.co.jp/resource/ham/211104dronewokatuyoushitatenken.pdf>)
- (9) World Nuclear News, “US utility uses drones for nuclear plant inspections” (<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-utility-uses-drones-for-nuclear-plant-inspections>)
- (10) The Robot Report, “SwRI demos drone autonomy inside nuclear power plant” (<https://www.therobotreport.com/swri-demos-drone-autonomy-nuclear-power-plant/>)

[寄稿]

事故耐性燃料（ATF）被覆管の研究開発について

根本 義之（国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター 照射材料工学研究グループ）

1. はじめに

本稿では、ATF 研究開発の全体概要、(国研) 日本原子力研究開発機構 (JAEA) での ATF 研究、そして経済協力開発機構／原子力機関 (OECD/NEA) の Quench-ATF プロジェクトの概要について述べる。

2. ATF 研究開発の全体概要

2011 年 3 月 11 日の福島第一原発事故では、地震後、原子炉（沸騰水型軽水炉）は成功裡に停止したが、冷却系の停止による炉心温度の上昇で水素が発生し水素爆発が発生した。原子炉内では、ジルコニウム (Zr) 合金製の燃料被覆管やチャンネルボックスが使われている。事故時、その Zr が高温水蒸気と反応し激しく酸化した時に水素が大量発生し、爆発を誘発したのではないかと考えられている。

そこで、事故時の水素発生を抑制するため、Zr 合金被覆管に換わる ATF 被覆管の開発が開始された。ATF 被覆管の主な要件は以下の通りである。

- 通常運転時の耐食性の担保、水素吸収の抑制
- 長期間使用した際の物理的、機械的性質が Zr と同等かそれ以上
- 中性子経済性の担保
- 事故時高温水蒸気中での耐酸化性の向上による、事故時安全裕度の向上
- 高温での機械特性の向上

OECD/NEA 専門家グループが ATF 開発の事前検討の際に作ったリスト⁽¹⁾には、被覆管の材料開発として、

- ① シリコンカーバイド (SiC)、シリコンカーバイドの複合材料の研究開発、
- ② Zr 被覆管の表面をより耐酸化性の高い材料でコーティングする研究開発、
- ③ 鉄鋼系材料を使う研究開発、

④ モリブデンなど高融点金属を使う研究開発が掲載されている。しかし、最近では④の研究はなされていないため、現在、被覆管の材料開発は、①～③の3つで進められている。

また、コアコンポーネントの開発としては、(一財) 電力中央研究所が開発中の事故耐性制御棒 (ATCR) やチャンネルボックスなどを別のものに換えて事故耐性を上げていこうという研究開発が掲載されている。

3. JAEA での ATF 研究

(1) 資源エネルギー庁委託事業

① 背景

軽水炉の継続的な安全性向上のため、福島第一原発事故の教訓も踏まえ、事故時でも溶融しにくい／水素を発生しにくい ATF 開発が期待されている。そのような中、JAEA は、資源エネルギー庁の委託事業で、プラント・燃料メーカー、民間研究機関、大学などと連携し、ATF を軽水炉に適用するために必要となる技術基盤を整備し、産業界が行う実用化開発に繋げることを目標に、ATF 研究開発を進めている。

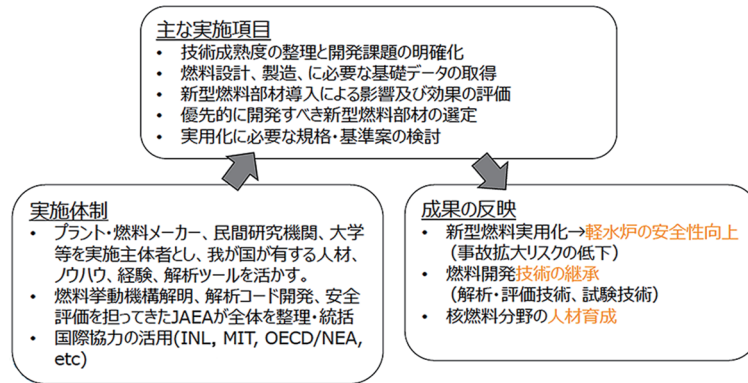


図1 資源エネルギー庁委託事業の実施項目，実施体制，成果の反映⁽¹⁾

② 事業の実施項目，実施体制，成果の反映

図1に主な実施項目，実施体制，成果の概要をまとめた。主な実施項目は，それぞれの材料の技術成熟度の整理と開発課題の明確化，基礎データの取得，あるいはそういった部材を導入したことによる影響や効果の評価，優先的に開発すべきものの部材の選定など，実用化に必要な規格・基準案の検討である。

そのための実施体制として，実際にATFを開発しているプラント・燃料メーカー，民間の研究機関，大学などと連携して事業目的を達成しようとしている。また，解析コードなどを使い，ATFが実際の事故時の効果を評価する必要があるが，現状の解析コードは現行の燃料被覆管を対象に作られているので，ATF被覆管用コードの開発も行う。そして，

照射試験や大型の実験など，日本だけでは実施が困難なことを国際協力で行う体制を組んでいる。

成果の反映としては，軽水炉の安全性向上に資する新型燃料の実用化，燃料開発技術継承，燃料分野の人材育成が考えられる。

③ ATF 開発の流れ

図2は，ATFの実用化に向けた道筋である。最初はプロトタイプの燃料部材などを作って基礎データを取り設計パラメータを確立して行く。その先には，そういった材料の商用炉での照射試験を行い，うまくいけば，新型のATF被覆管を使った燃料棒で集合体を作り，それを商用炉で照射して大丈夫かどうかをみて実用化につなげて行くといった流れである。

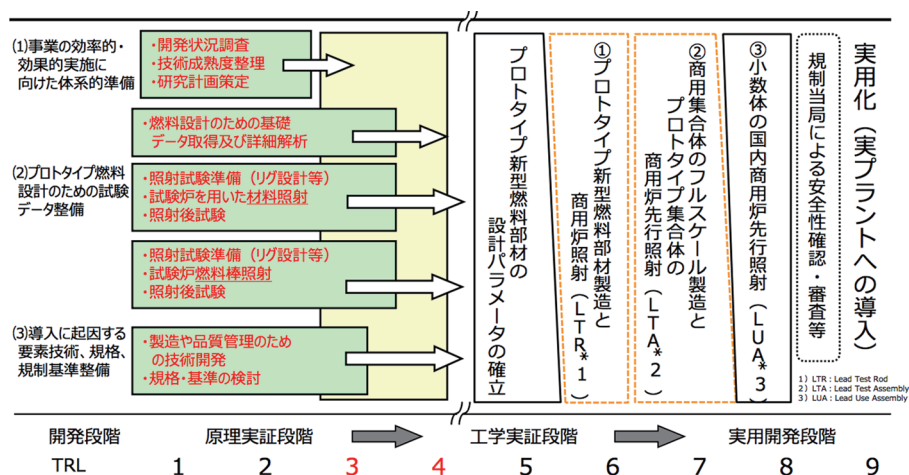


図2 実用化に向けた具体的な道筋⁽²⁾

④ 民間の ATF 研究開発

国内の軽水炉には沸騰水型（BWR）と加圧水型（PWR）があるが、それぞれに関して各プラントメーカーが ATF 開発を行っている。

SiC/SiC 複合材については、BWR、PWR 両方用の燃料被覆管、BWR 用チャンネルボックスの開発を東芝エネルギーシステムズ㈱が行っている。燃料被覆管については、日立 GE ニュークリアエネジー㈱でも開発が行われている。

酸化物の粒子をナノサイズで分散させて強度を上げた「改良ステンレス鋼」（FeCrAl-ODS）を使った燃料被覆管については、日立 GE ニュークリア・エナジー㈱、㈱グローバル・ニュークリア・フューエル・ジャパン（GNF-J）日本核燃料開発㈱（NFD）が開発を進めている。

PWR 用では、通常の Zr 合金被覆管を Cr でコーティングした燃料被覆管について、三菱重工業㈱（MHI）が開発を進めている。

JAEA は、これら民間での研究開発を支援するため、第三者視点での技術成熟度（TRL）やロードマップのレビュー、電力会社と原子力規制庁との情報交換の支援、規格基準策定に向けた取り組みの支援、海外動向の調査などを行っている。

⑤ その他の活動

委託事業の中では前項までの活動に加え、NEA の国際プロジェクト Quench-ATF への参加、海外炉での照射試験、燃料ふるまい解析コードの開発、(一財)電力中央研究所で行っている事故耐性制御棒（ATCR）の開発、(国研)量子科学技術研究開発機構（QST）で行っている SiC 試験技術（通常の金属材料ではなくセラミック製複合材料の特性を評価する試験技術）の標準規格に向けた調査を支援している。なお、国際プロジェクト Quench-ATF については、その概要とこれまでの試験結果を後述する。

（2）Cr コーティング被覆管の基礎研究

JAEA は、上記の受託研究に限らず、自主研

究、民間との共同研究、民間からの受託研究なども行っており、三菱原子燃料㈱（現三菱重工業㈱）とは、共同で ATF 被覆管の基礎研究を行っている。

その成果を『Cr 被覆管に関する研究（1）酸化挙動の評価』と題して、筆者が「2022 年春の原子力学会」で発表した。

同研究では、従来の Zr 合金被覆管（MDA）に Cr をコーティングして、耐酸化性の向上、水素発生と発熱の抑制、事故耐性の向上を目指した。Cr コーティング被覆管は、最も実用化に近い ATF 被覆管候補であるため、国内外で開発が進められている。基礎基盤的な研究で、ATF 研究開発に貢献したいというのが同研究の目的である。

① LOCA 試験の結果

LOCA 試験中に試料である Cr コーティング被覆管が 800～850℃ くらいで膨れて破裂（バースト）し穴が開いた。試験ではその後、1,100℃ 程度で一定時間保持した後、冷却した。

② 被覆管両面の酸化試験の結果

前項のように、LOCA が起きると破裂で被覆管に穴が空いてしまう。穴が開くと燃料管の外面と内面の両方で酸化が進むため、両面の酸化試験も行った。

試料は、Zr 合金被覆管（MDA）とスパッタリング蒸着法で外面を純 Cr でコーティングした Cr コーティング被覆管（20mm 長）を使い、熱天秤を用いて高温水蒸気中での酸化挙動を評価した。

雰囲気条件として、水蒸気を露点 60℃ で制御し、アルゴン（Ar）ガスを導入した。流量条件は、これまでの研究で判明した事故時に流れ込む水蒸気量（0.342mol/m²/s）に合わせた。そして、酸化試験後、光学顕微鏡で観察やレーザーラマン分光分析などを行った。

650℃、1000℃、1050℃、1150℃での酸化量の変化を見たところ、純 Cr の板（Cr）、コーティングしない Zr 合金被覆管（Bare）、外面だけ

をCrコーティングした被覆管（Coated）のうち最も酸化するのはBareで、Coatedの酸化量はその半分くらい、Crの板はほとんど酸化していない。

温度条件 650℃と 1000℃では、途中で表面に生成した酸化皮膜が割れて酸化速度が急激に上がる現象（BA：ブレイクアウェイ）が起きている。650℃ではコーティングしていない被覆管よりもCrコーティングした被覆管の方がBA現象も酸化も遅れる傾向が見られる。以上の結果を時間で割った酸化速度の変化であるが、傾向としては同じである。

酸化試験後の被覆管の様子を見ると、Crコーティングした被覆管は、酸化物が表面にでき緑色をしていた。レーザーラマン分光分析の結果、酸化クロム（ Cr_2O_3 ）に典型的なピークシフトが見られた。コーティング被膜管の外面には、いずれの温度条件でも酸化試験後に Cr_2O_3 が生成していた。

酸化試験後の断面を観察すると、コーティングしていない被覆管は、外面も内面も同じようにZrが酸化して酸化層ができ、4時間半の試験では全て酸化している。Crコーティングした被覆管の場合、内面のZrは普通に酸化しているが、コーティングされていた外面では酸化が大きく抑制されている。ただし、4時間半ではほぼすべて酸化している。

Crコーティングした被覆管の外面近傍の断面を拡大した画像で確認したところ、Zr酸化層の部分は外から酸素が入ってきて酸化したのか、あるいは内面から来た酸素が入ってきて酸化したのか今後検討を要する。

LOCA試験後のCrコーティングした被覆管の外面の膨れた部分には、肉眼でも被覆管の軸方向に沿った縞模様が確認できた。縞の部分では、外面のCr層が割れて穴が空いている。その部分をエネルギー分散型分光法（EDS）で分析するとZrが確認できた。つまり、被覆管が膨んでCrコーティングが割れて素地が出たために、その部分で局所的に酸化が進んでいることが分かる。このことから考察

すると、熱天秤を使った試験でも、Cr層が一部割れて酸素が入る、あるいはCrを通して酸素が供給されるということが考えられる。

また、通常、BAは酸化層が厚くなって内部の圧縮応力が蓄積することによって起きる。しかし、Crコーティング被覆管では、酸化自体が抑制されるのでBAも起こりにくくなる。

最後に、酸化試験のデータから求めた酸化速度定数 k_p の温度依存性を、コーティングしていないZr、外面だけコーティングしたZr、Crについて比較したところ、コーティングによって、酸化速度定数も低下する傾向があることが明らかになった。学会の発表では、これらを整理し、今後の解析手法の高度化などに貢献したい旨を述べた。

③ 学会発表のまとめ

外面のCrコーティングにより、マクロな酸化は抑制される傾向にある。さらに、低温（650℃）ではBAの遅延効果も期待できる。

今後は、LOCA時のコーティングの割れを考慮して、事故時の酸化条件に即した酸化モデルの構築、解析コードの高度化を目標に研究を進める。

④ 補足：被覆管酸化挙動評価手法の開発

冷却水損失事故時においては、被覆管の温度が高い部分が膨れて行き、ある程度に達すると割れて破裂開口（バースト）が起き、その後、内面のZrも酸化して2次水素化が始まる。この段階で被覆管が膨れることでCrコーティング層が割れ、素地のZrが露出すると、Crコーティングの有効性がなくなってくる。そこで、コーティングの割れと温度との関係を今後研究して行こうと考えている。例えば、表面のCr層が割れてしまうしきい変形量がコーティング手法によって異なるならば、それを数値化することで、色々なモデル化に役立つと考えている。それにより「Crコーティング」にもスパッタリング蒸着、コールドスプレイ、イオンプレーティング、メッキなど

色々な手法があるが、どの手法が一番良いのか判断する指標も得られると考えている。

そのために、JAEA では、中が見える状態で被覆管を加熱する LOCA 試験を実施している。従来の LOCA 試験では、中が見えない状態で被覆管を加熱する「赤外線イメージ炉」を使っているため、バルーニングの過程が見えない。そのため、試験中も内部が観察可能な「高周波加熱装置」を用いての LOCA 試験装置を開発した。その結果、LOCA 試験中、被覆管が真っ赤になり、内圧で被覆管がだんだん膨み最終的にバーストする様子を見ることができた。膨張からバーストに至る様子は、被覆管の変形データを基に機械学習 (Machine learning) の手法で数値化し、同じ条件で複数回試験することで再現性を確認済みである。被覆管がバーストすることで、内面の Zr の酸化が急激に起き、水素が出てくるが、そのオフガスも質量分析器で測定できる装置を整備している。この装置を用いることで、今後、Cr コーティングの研究を進めたいと考えている。

4. NEA プロジェクト：Quench-ATF の概要

OECD/NEA の国際協力プロジェクト Quench-ATF は、2021 年 10 月から始まった 4 年間のプロジェクトで、試験場所は独カー

ルスルーエ工科大学 (KIT) である。KIT では、20 年ほど前から事故の条件で模擬集合体を加熱して、事故を模した実験を“Quench”と呼ばれる実験設備で実施してきている。

Quench-ATF では、KIT の“Quench”で 3 回に分けて実験して行こうという活動である。1 回目の試験は 2022 年 6 月 17 日に実施済み、2 回目は 2024 年前半に実施する予定である。2 回目では、1 回目同様、米ウエスティングハウス・エレクトリック社 (WH) が提供する、Zr 合金被覆管の表面にコールドスプレイ手法で Cr コーティングした試料を使う。さらに、(一財) 電力中央研究所が開発中の事故耐性制御棒 (ATCR) のペレットも装荷する。

3 回目の試験では、より厳しい条件で、物理蒸着 (PVD) 手法で Cr コーティングした被覆管の試験を検討している。試料の提供元については、WH、英国国立原子力研究所 (NNL)、仏原子力庁 (CEA) などが検討されている。

実施済みの 1 回目の試験の概要を表 1 に示す。試料は、ヘリウム雰囲気中で“Zirlo”と呼ばれる被覆管にコールドスプレイ手法で 25 μ m 厚の Cr コーティングをした WH 社製被覆管 (2.3m 長) 24 本での模擬集合体を使った。集合体の中には ZrO₂ 模擬ペレットが入っていて、さらにその中にヒーター部が入っていて加熱する。24 本での模擬集合体を囲むシュ

表 1 Quench-ATF プロジェクト (1 回目試験の概要) (3)

試料	● Zirlo 被覆管に He 雰囲気中でのコールドスプレイで 25 μm 厚の Cr コーティングをした Westinghouse の被覆管試料 (2.3m 長)、24 本の模擬集合体 (ZrO₂ 模擬ペレット入り) ● シュラウドも Zr に PVD で 10 μm 厚の Cr コーティングをしたものを使用
試験条件	● Extended DBA 条件 ○ 燃料棒には 5.5MPa の内圧 ○ 5 K/s で 1600K まで加熱 (過熱水蒸気 0.8g/m²/s 中) ○ → -2 K/s で冷却 (この時点で水蒸気量は 10 倍に切替え (ドイツの規制基準に基づくシナリオ)) ○ → 1200K まで冷えた時点で、4 g/s/rod で注水、急冷
水蒸気発生量は、コーティングなし材より、若干低い程度だった (原因は検討中)	
試験後の評価	● 金相試験、中性子ラジオグラフィー、脆化評価試験等 (一部 CEA, IRSN, PSI 等で実施) ● ベンチマーク解析も実施中 (日本からは (一財) エネルギー総合工学研究所が SAMPSON で参加中)

ラウド材も Zr に PVD で 10 μ m 厚の Cr コーティングをした。試験条件は Extended DBA (拡張設計基準事故) とし、試料を 5 K/s で 1600K まで加熱した後に - 2K/s で冷却し、最後には水を入れて急冷した。

試験中に計測された水素発生量は、予想に反して、コーティングしていない被膜管よりも若干低い程度でしかなかったため、その原因を検討しているところである。

試験後の評価としては、金相試験、中性子ラジオグラフィーによる水素吸収量の分布測定、脆化評価試験などを行った。そのうち、脆化評価試験については、一部を CEA、放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN)、ポール・シェラー研究所 (PSI) に移送して行った。ベンチマーク解析も実施中で、日本からは (一財) エネルギー総合工学研究所が解析コード SAMPSON で参加している。

5. おわりに

JAEA では、ATF 研究活動として、資源エネルギー庁委託事業での民間の研究開発のとりまとめとともに、国際協力、海外炉での照射試験や自主的な基礎研究なども実施中である。今後も引き続き ATF の開発に貢献して行きたいと考えている。

参考文献

- (1) 根本義之, 『事故耐性燃料 (ATF) 被覆管の研究開発について』, (一財) エネルギー総合工学研究所主催月例研究会講演資料, 2024 年 2 月 22 日
- (2) 山下 真一郎, 『国内の ATF 研究開発概要』 事故耐性燃料開発に関するワークショップ講演資料, 2023 年 12 月 14 日, 東京大学
- (3) https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_36597/quench-atf-project

令和6年度 事業計画

(一財) エネルギー総合工学研究所

1. 基本的な考え方

当研究所は、わが国のエネルギー工学分野の中心的な調査研究機関として、産・学・官のエネルギー技術に関する専門的な知見・経験を相互に結び付け、「総合工学」の視点に立脚して調査、研究、評価、成果の普及などに努めてきた。技術は、わが国が国際社会で優位性を維持・向上する上で不可欠な資産であり、将来のリスクに対応し得る強靱なエネルギー戦略の構築・実現に貢献するものである。

当研究所は、今後とも「エネルギーの未来を拓くのは技術である」との認識の下、俯瞰的、長期的な視座をもって、エネルギー技術に関する調査、研究、評価、成果の普及などに取り組んでいく。こうした取り組みにより、社会的価値を創出するとともに、当研究所の事業の推進、組織の発展に繋げる。

令和元年度に発生した、受託事業に係る労務費の不適切計上事案の再発防止策を、より幅広いコンプライアンスファーストの意識の定着へと進化させるとともに、調査研究の品質の確保と向上に努め積極的かつ創造的な事業運営を行っていく。

2. 最近の情勢についての認識

(1) 国際的なエネルギー情勢については、ロシアのウクライナ侵攻長期化に加え、イスラエルとパレスチナガザ地区の紛争も起きるなど地政学的な要因、経済の拡大に伴うエネルギー需要の増大など経済的な要因、新型コロナウイルス禍などの社会的な要因などが相互に関連しながらエネルギーの需給面や価格面

に大きな影響を及ぼし、また、それらの先行きに不透明感を投げかけている。

温暖化防止に関しては、2023年11月から12月にアラブ首長国連邦で開催された国連気候変動枠組条約第28回締約国会議(COP28)において、1.5℃目標達成に向けた2025年までの排出量のピークアウト、各国の判断・事情などを考慮して行われる世界的努力への貢献、ロス&ダメージに対応する資金措置および基金の決定などについて合意されるなど、取り組みを加速する動きとなっている。

(2) このような動きの下で、大企業を中心にサプライチェーンを含めた脱炭素化の動きも加速し、加えて、中小企業や地方においてもゼロエミッションの宣言が相次いでいる。また、多角的な視点からの国際的な取り組みである持続可能な開発目標(SDGs)などの動きもあり、エネルギー環境分野でのイノベーションの期待、脱炭素技術に対する更なる投資拡大、循環経済への取り組みの強化が見られる。加えて、デジタル技術の進化、データ活用や生成AI関連技術の普及により、エネルギー分野でも電力需給・ネットワーク技術をコアにしたサービスや、これらを活用したエネルギーマネジメント最適化による低炭素化ビジネス機会も高まっている。原子力分野では、中国、ロシアの存在感の増大に対し、先進国において、小型モジュール炉をはじめとする次世代原子炉開発の進展、民間投資による核融合炉開発の加速などの動きも含め、数々の動きが継続している。

(3) 国内におけるエネルギー情勢については、

2020年に、政府において、2050年にカーボンニュートラルを目指すことが宣言され、続いて2021年には、エネルギー分野について2050年への道筋、新たな2030年目標を内容とする第6次エネルギー基本計画が閣議決定された。その後、温暖化対策を経済成長につなげる「グリーンエネルギー戦略」で、2050年に向けて成長が期待される14の重点分野が選定された。さらに、2022年12月のグリーン・トランスフォーメーション（GX）実行会議で「今後10年を見据えたロードマップ」が策定され、2023年2月にはGX基本方針が閣議決定され、同年6月には関連法案も成立した。

（4）エネルギー需給面での具体的な取り組みでは、スマートグリッド、エネルギーマネジメントシステムなどエネルギー利用の効率化技術、電気自動車、燃料電池自動車などの次世代自動車、エネルギーの貯蔵・輸送・最終利用媒体として期待される水素などに関する研究開発、導入支援、インフラの整備が進められている。また、太陽光発電や風力発電などの再エネ（再生エネルギー）の導入が進む中、大量導入時の出力変動の吸収や火力発電の稼働率低下による調整力不足などが課題となっており、制度面での検討とともに蓄エネルギー技術やデジタル技術を用いた系統運用に係る技術開発などが加速している。加えて、二酸化炭素（CO₂）は排出するが出力調整可能な火力とCO₂は排出しないが変動電源である再エネの相互の利点を活かしたわが国独自のエネルギー供給インフラの構築が重要になってきている。さらに、2024年1月に令和6年能登半島地震が発生するなど、大きな自然災害の頻発、エネルギーインフラの高経年化などを踏まえ、強靱なエネルギー供給の基盤を確保する重要性が指摘され、電力自由化と再エネ拡大による環境変化の中で必要な投資確保への関心が高まり、取り組みが進められている。

（5）東京電力福島第一原子力発電所の事故か

ら13年となり、引き続き住民の方々の帰還に向けた取り組みや事故炉の廃炉・汚染水対策が進められている。原子力発電所の状況については、12基が再稼働し、2024年中にBWRの再稼働も見込まれている。また、廃止措置については、今後24基の原子力発電設備が見込まれている。政策的には、GX実行会議で、原子力は、エネルギー安定供給とカーボンニュートラル実現に向け、脱炭素のベースロード電源としての重要な役割を担うとされた。GX基本方針では、廃止措置原子力発電施設の敷地内での建て替え、運転期間の最長60年の原則の下、停止期間の運転延長を可能とするなど、原子力の活用方策が盛り込まれ、原子力政策が大きく転換された。

（6）エネルギーに関する制度面では、電力システム改革の第3段階である2020年4月の送配電部門の法的分離に続き、2020年7月に中長期的に安定な電源を確保するための容量市場のメインオークションが行われた。続いて、2021年4月に広域で調整力を確保するための需給調整市場の取引が一部商品区分から開始され、2024年度には全ての商品区分が揃う予定である。また、火力電源の休廃止による供給力不足および脱炭素化への対応のため、2024年1月に容量市場の中に長期脱炭素電源オークションの入札制度が設けられた。

さらに、2023年夏には、需給調整市場のΔkW価値と卸電力取引市場のkWh価値を、同時最適に調達することを目指す同時市場の制度設計がスタートするなど、電力取引に関する制度の整備が進められている。また、FIT制度による賦課金増加などの課題に対応し、2022年4月に再エネを電力市場へ統合するためのFIP制度が導入された。

3. 令和6年度の事業

（1）エネルギー技術の俯瞰的評価

エネルギーを取り巻く種々の問題の解決に向

けて技術の可能性と重要性を認識し、将来のエネルギー需給のあり方についてエネルギー技術の観点から調査・分析を行う。具体的には、広範なエネルギー技術分野を俯瞰し、S + 3E（安全性、安定供給、経済効率性の向上、環境への適合）という考え方にに基づき、エネルギー技術に係る知見の最新化、エネルギー技術開発のあり方について調査、研究および評価を行い、今後のエネルギー・環境に関する問題の解決に向けたエネルギービジョンや提言を発信する。

当研究所では平成30年度、当研究所が有するエネルギー環境シミュレーションモデルを用いたエネルギー需給構成などの分析、エネルギー技術の現状と課題を整理し、2050年に向けたエネルギー技術展望をとりまとめた。令和5年度はこのとりまとめから5年経過し、世界の動きもパリ協定の80%削減からカーボンニュートラル（CN）へと変わったことから、上記エネルギー技術展望の改訂を実施した。加えてトランジションに関する検討委員会も立ち上げた。これらの検討内容は2023年11月のシンポジウムで発表し、エネルギー中長期ビジョンレポートを2023年12月に取りまとめた。これらの活動をベースに令和6年度も幅広い分野で検討・情報発信を継続していく。

また、2020年にカーボンリサイクル、2021年にカーボンニュートラル、2023年9月に再エネ・電力システムに関する技術を中心にまとめた書籍をそれぞれ上梓した。2022年には、将来を担う子供向けに、エネルギー全般に関する基本的な知識と課題を紹介する書籍を出版した。また、共著として、2022年にカーボンニュートラル燃料、2023年にはメタネーションに関する技術をまとめた書籍を出版した。2024年3月には、エネルギー中長期ビジョンレポートと、トランジション検討委員会委員の提言からなる書籍を出版予定である。

今後とも、国内外の関係者がエネルギー・地球環境問題について議論する際の素材として活用することを期待し、エネルギーシステム、エネルギー技術などに関する知見、見解、提案な

どを書籍、文献、論文、ニュースレターなどを通じ、紹介し、発信していく。

（2）エネルギーシステムや幅広いエネルギー技術分野での取り組み

当研究所の地球環境統合評価モデル（GRAPE）などの機能強化を図るとともに、同モデルを用いたエネルギーシステムや地球環境問題に関する分析を行う。また、太陽・風力・バイオマスなどの新エネルギー、CO₂の分離・回収・輸送・利用とも組み合わせた化石燃料の利用、次世代電力系統、原子力・廃止措置などに係る最新技術についての国内外の調査・検討・評価を行う。

特に、エネルギーの貯蔵・輸送・最終利用媒体としての水素やCO₂有効利用技術（CCU）などを加味した、カーボンリサイクルエネルギーシステムの調査・可能性評価に取り組む。変動電源である太陽光・風力発電導入に伴う系統連系に係る要件の課題、再エネの蓄熱技術適用によるエネルギー貯蔵・利用に係る課題など、再エネ大量導入時における対策技術にも注力する。

（3）原子力に関する取り組み

原子力は、世界的に脱炭素化の選択肢として評価されており、2023年のCOP28では、2050年までに世界の原子力設備容量を3倍化する宣言も採択されるなど、その価値が改めて認識され、日本でも原子力政策が大きく転換している。このような状況の下で、国内外での革新炉や核融合開発の動向も踏まえ、エネルギーシステムにおける原子力の寄与、革新的原子力システムの研究開発動向などの調査・評価を行う。また、東日本大震災を契機に、安全は国民が広く希求する普遍的な価値として一層重視されてきており、原子力の安全性向上に有効な要素技術開発の支援を引き続き進めるとともに、安全解析コード（SAMPSON）を活用し、福島第一原発事故に関連する国際原子力安全共同研究プロジェクトに引き続き参画する。

軽水炉の廃止措置について、有識者により構成される委員会において第三者的な立場から、

円滑な廃止措置の実施に向けた、工程、技術、制度に関する調査および課題への対応策の検討を進め、その結果を技術レポートとして取りまとめている。これを継続するとともに、廃止措置に係る標準基盤の整備支援、人材育成事業などに引き続き取り組む。

(4) エネルギー需要に関する取り組み

省エネルギーに対する社会的な要請も大きくなる中、需要機器の制御によって電力需給調整に貢献するデマンドレスポンス技術やエネルギーマネジメントシステムに関する調査研究の実施、当研究所がその策定を支援した省エネルギー技術戦略に基づき、CO₂削減効果の見込める蓄熱など技術をはじめとするエネルギー利用効率向上に関する技術調査に取り組んでいく。また、エネルギー需要構造の変化に関する研究を行うとともに、CO₂削減の身近な取り組みとして、重要な省エネ技術導入に関わるコンサルタント業務、こうした業務を通じたCO₂削減策の考案とその産業展開などにも積極的に取り組んでいく。

(5) 標準化に関する取り組み

標準化は、多くの技術について、その将来の開発や普及に大きな役割を果たしている。当研究所としても、エネルギーマネジメントに加え、CCS（CO₂回収・貯留）に係る国際規格の開発に取り組む。

(6) エネルギー技術分野におけるプラットフォーム機能の強化

次世代電力ネットワーク、原子炉廃止措置、太陽熱、CO₂有効利用技術などの重要な技術分野について、関係企業や大学などの専門家による研究会や勉強会を設置し、当該技術に関する情報収集、調査分析を行うとともに、検討会の開催、プロジェクト企画提案などを行う。

また、エネルギー・環境分野をはじめ経済社会の多くの分野で、産・学・官の協働を通じたイノベーションへの取り組みが活発化している。

賛助会員の取り組みを支援するため、ベンチャー支援機関と連携して、スタートアップス、大学などによる技術シーズ紹介の場として「IAE オープンイノベーションフォーラム」を開催する。

(7) 情報発信・提供および賛助会員サービスの向上

賛助会員、関係機関などのステークホルダーに向け、賛助会員会議、シンポジウム、学協会などを通じ、当研究所の調査研究成果や提案を発信・提供するとともに、エネルギー技術、気候変動などに係る重要なテーマに関し、国内外での産・学・官の連携を図りつつ、月例研究会や個別分野研究会などを開催するなど、アウトリーチ活動を積極的に行う。

また、ウェブサイトにおいて、最新の技術に関する情報を提供しているが、2023年に全面リニューアルを行い使いやすさを向上させるとともに、主要研究員紹介ページを追加するなどコンテンツの充実を図った。引き続き、エネルギー技術情報プラットフォームや季報、メールマガジン、ウェブサイトの更なる充実と利便性向上に取り組んでいく。

4. 事業を進めるに当たって

(1) 「受託事業に係る労務費の不適切計上事案」の反省を踏まえ、事業活動および組織運営においてコンプライアンスファーストの実践を進化させつつ継続する。調査研究事業においては品質向上に引き続き努め、公的機関、民間企業などからの受託事業収益によるバランスのとれたポートフォリオを構築し、結果として健全な事業・組織の運営を達成することを目指す。

(2) 国内外の市場（エネルギー事情・政策・需給・技術、CO₂削減取組状況、技術開発状況、規制制度など）の動向を継続的に調査し、分析・評価する。そのような情報や知見を基に、CO₂削減に関する民間企業、国、地方自治体

などからの調査研究業務、コンサルタント業務、情報提供・発信業務に取り組む。

(3) 令和6年度においては、引き続き民間企業からの調査研究事業の受託に注力するとともに、経済産業省の事業や他省庁、独法などの事業の受託に努める。その際、関係機関との連携・協力の一層の推進を図る。また、役職員一丸となり、賛助会員サービスの向上とともに、会費収入の維持・増加に繋がる営業活動に取り組む。

① 民間企業からの調査研究事業の受託増への取り組み

- 所内各研究グループ、研究グループ間連携での個別提案活動
- コンサルティング事業、人材育成・研修事業などへの取り組み

② 個別分野研究会・勉強会での活動

- 次世代電力ネットワーク研究会 (APNet)
- 太陽熱・蓄熱技術研究会 (STE)
- ACC (Anthropogenic Carbon Cycle, 人為的炭素循環) 技術研究会
- 原子力施設の廃止措置へのデジタルトランスフォーメーション適用に係る勉強会

③ 情報発信・提供など賛助会員サービスの向上への取り組み

- シンポジウム、賛助会員会議の開催
- 月例研究会の運営改善 (魅力あるテーマの設定、開催 (Web, ハイブリッド) 方式の工夫など)、賛助会員向け事前資料配布
- メールマガジン (IAE Newsletter) の内容充実と発信先拡充
- ベンチャー支援機関と連携した賛助会員とスタートアップとの協業支援
- 技術相談、技術交流サービスへの取り組みの強化

(4) 受託事業に係る労務費の不適切計上事案を踏まえ、2020年8月にIAE再発防止策実施委員会 (委員長: 理事長) を設置した。同委員会でIAE再発防止策実施計画 (アクション

プラン) の進捗状況を確認しつつ再発防止の徹底を図るとともに、その状況について全役職員に説明し共有してきた。外部機関によるモニタリングを2021年と2022年に受け、取り組みを継続することの重要性を指摘され、当研究所として、アクションプラン2023を策定し、これに基づき「コンプライアンスファースト月間」の取り組み、研修、教育などをはじめ、各再発防止策を継続して実践してきた。2023年12月の再発防止策実施委員会で、アクションプラン2023を「コンプライアンスアクションプラン」とし、毎年策定していたアクションプランを恒常化させ、コンプライアンスファーストの基盤を構築することとした。

(5) 令和6年度は、上記、コンプライアンスアクションプランに基づき、以下を引き続き実施し、合わせてより高度な価値の実現を目指す。毎年度の事業計画の議論の一環として、各研究グループ/チーム、一般管理部門からのリスク認識に関するヒアリングを踏まえ、①経営・コンプライアンス面、②人材育成・確保面、③情報基盤・セキュリティ面、④新たな働き方などの面、からリスクを取りまとめる。また、これらのリスクを評価し優先順位をつけ、人員配置、予算手当も含め順次対応していく。

(6) 令和4年度に、在宅勤務と出社のハイブリッド型の勤務スタイルが定着したことを受け、一層の経費削減の視点も含め研究所内のフリーアドレス化を実施した。令和5年度においては、基盤ソフト類の標準化などによりフリーアドレス環境での業務環境の整備・構築、運用管理の効率化を図った。引き続き、情報共有の促進、人材の育成・確保など、働きやすい環境、働き甲斐のある組織の実現に取り組んでいく。

5. 令和6年度の調査研究などのテーマ

(1) エネルギー技術全般

(ア) エネルギー技術開発戦略に関する調査研究

環境・エネルギーを巡る状況を見ると、国際的には、アラブ首長国連邦で開催されたCOP28では、グローバル・ストックテイクという世界全体の取り組みの集約により1.5℃目標とのギャップが同定され、1.5℃の達成に向けて2025年までの排出量のピークアウト、全ガス・全セクターを対象とした野心的な排出削減、各国の判断・事情などを考慮して行われる世界的努力への貢献、具体的には以下を決定した。それらは、再エネ発電容量3倍・省エネ改善率2倍、排出削減対策が講じられていない石炭火力発電の遡減加速、エネルギー部門の脱・低炭素燃料の使用加速、化石燃料からの移行、再エネ・原子力・CCUSなどの排出削減・炭素除去技術・低炭素水素などの加速、メタンを含む非CO₂ガスについて2030年までの大幅な削減の加速、交通分野のゼロエミッションビークル（ZEV）・低排出車両の普及を含む多様な道筋を通じた排出削減、非効率な化石燃料への補助のフェーズアウトなどに加え、市場メカニズム、都市レベルの取り組み、持続可能なライフスタイルへの移行などである。各国の一律の取り組みではなく、国情に合わせた気候変動対策の強化を求めていることが特徴である。2030年までの緩和の野心と実施を向上するための「緩和作業計画」、適応に関する世界目標、気候変動の悪影響に伴う損失と損害（ロス&ダメージ）支援のための基金の運用気候資金に対する対話促進も継続して進められている。一方、EUでは、2050年にむけて域内の温室効果ガス排出正味ゼロ政策が推し進められ、2030年削減目標の引き上げを図るとともに、ロシアのウクライナ侵攻に伴うロシア産天然ガスの輸入削減を踏まえ、LNG供給多様化、水素利用、風力・太陽光導入、省エネに結びつける方針（REPowerEU）が示され、セキュリティと気候変動の両面での政策を推進している。米国では、気候変動対策政策の方向

性が具体化され、インフレ抑制法案（IRA）では、クリーンエネルギーや電気自動車（EV）購入に伴う税額控除、メタンガスの排出量削減対策、低炭素電源として原子力発電への補助に加えて、石油・ガスの採掘リース権の販売再開に触れている。中国も2060年にCO₂排出を正味でゼロにすることを宣言し、全国規模での発電排出量取引市場を継続するなど、世界の各地域で正味の温室効果ガスゼロエミッションを目指す動きが定着した。国内では、温室効果ガス排出を2050年正味でゼロに抑制する2050年カーボンニュートラル目標に変更はないが、GX基本方針のもとにGX推進法が成立し、投資促進、カーボンプライシング、ファイナンス手法、国際展開戦略といった柱に沿い、GX移行債およびその償還財源としてのカーボンプライシングの方針が固まった。

環境・エネルギー情勢の先行きが不透明な時代に、社会全体の安全性を確保し、エネルギーの安定供給・セキュリティ、環境保全、経済性など様々な要因を考慮しつつ、わが国の将来を中長期的な観点から見据えた、革新的なエネルギー技術戦略策定に関する調査研究、および国際的動向を踏まえた、新しいエネルギー・環境技術について広範な調査を行う。

(イ) 地球規模でのエネルギーシステムに関する調査研究

発展途上国・地域の経済発展を主要因として、世界全体の温室効果ガス排出量は増加を続けている。これに対し、COP21において合意されたパリ協定の目標は、産業革命前からの世界平均温度上昇について2℃から1.5℃に強化され、各国は2030年頃の温室効果ガス削減目標や2050年の長期目標などの削減の取り組みについて報告している。さらに、長期的な温室効果ガスゼロエミッションを目指し、全世界の国・地域、企業、自治体は脱炭素への動きを加速させている。

令和6年度は、当研究所が運用する地球環境システム分析評価ツールであり、原子力、再エネ、

化石燃料、水素、気候工学の各分野における分析に用いてきた GRAPE モデルを活用し、1.5℃目標に整合する温室効果ガス排出経路実現可能性分析を行うとともに、当研究所が実施する各種の調査研究プロジェクトにおいて、地球環境の観点からの評価研究を実施する。また、日本の長期エネルギー需給を詳細分析するツールである TIMES-Japan を用いて、2050 年カーボンニュートラルの実現可能性を評価する。さらに、カーボンニュートラルの実現の鍵を握るネガティブエミッション技術の役割に焦点をあてた詳細評価エネルギー需要への影響について、基盤的な調査分析を実施する。

- ①統合評価モデル GRAPE による世界長期分析
- ②エネルギーモデル TIMES-Japan を用いた日本のエネルギーシステム分析
- ③カーボンニュートラルの実現におけるネガティブエミッション技術の役割に関する評価
- ④長期的なエネルギー需要構造変化の評価

(2) 新エネルギー・電力システム関連

2013 年に開始した電力システム改革の進展に伴い、広域系統運用の拡大、小売全面自由化による競争拡大、送配電部門の法的分離などが進められてきた。一方では、脱炭素化や競争力低下に伴う火力発電所の休廃止、原子力発電所の再稼働遅延などにより、供給力が低下して電力需給は厳しい状況が続いている。さらに、ウクライナ情勢に伴う燃料価格高騰による電気料金的大幅上昇、スポット市場に依存する小売電気事業者の相次ぐ撤退など、電力システム改革による課題が顕在化してきた。

2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画において、2030 年の再エネの比率（電力量）は、36～38%と極めて高い目標が設定され、再エネ主力電源化の方針が打ち出された。再エネが電力系統に大量導入された場合、電圧や周波数への影響および余剰電力の発生が懸念され、それに対応するため、系統の増強・

運用の工夫とともに電力貯蔵を含む様々な調整力が必要となる。さらに、太陽光発電などの非同期電源の増加による慣性力低下への対応も必要になっている。系統側の対策とともに、急速な普及が期待される EV、蓄電池、エコキュートなどの需要側設備（DSR）の制御による電力需給調整への貢献が注目されている。これまでの電力システムは、大容量電源・送電系統が中心であったが、これからは再エネを中心とする分散型電源とエネルギーマネジメントシステム（EMS）、スマートメータ、バーチャルパワープラント（VPP）などのデジタル技術を活用した、需要側系統との協調による電力システムへの転換の期待が高まっている。海外の先進事例の調査とともに、わが国のエネルギー・電力事情に対応した技術開発や新しいビジネスモデルが求められている。

令和 6 年度においては、電力システム改革および再エネの主力電源化に対応する次世代の電力ネットワークのあり方、2050 年のカーボンニュートラル達成に向けた需給状況の変化に対応する調査研究を行う。また、再エネの普及拡大に伴うバイオマスをはじめとする地域エネルギーの活用・自立化に向けた調査研究を行う。大量導入に向けた活動については、再エネなどの電力を熱に変換して貯蔵し、需要に合わせて発電することにより電力需給バランスの確保を行う蓄熱発電が近年急速に注目されていることから、本技術についての調査研究を行う。

このような観点から当研究所では、「次世代電力ネットワーク研究会」を 2009 年 9 月に設立し、電力会社、大学・研究機関、通信事業者、機器メーカーなどの関係者が、幅広い分野の第一人者による講演受講や意見交換などを行い、考え方を共有するとともに、必要な技術開発についての提言や、次世代ネットワークへの移行シナリオの検討を進めている。

また、再エネの安定供給技術の 1 つとして注目されている、集光型太陽熱発電（CSP）や蓄熱発電の情報共有・情報交換の場として、「太陽熱・蓄熱技術研究会」を 2009 年から運営し、

会員へ最新情報を提供するとともに、会員同士の情報交換や新規プロジェクトの立ち上げを目的に活動している。

(ア) 電力システム改革、再エネ大量導入に関する調査研究

- ① 次世代電力ネットワークに関する調査研究および研究会の開催
- ② 再エネ大量導入に関する電力系統への影響と対策技術に関する研究
- ③ 需要地系統および需要側設備の調整力としての活用に関する調査研究
- ④ 将来の電力需給構造変化に関する調査研究
- ⑤ 電力システムへのデジタル技術活用に関する調査研究

(イ) 再エネに関する調査研究

- ① 地域エネルギーとしての再エネの利活用に関する調査研究
- ② 蓄熱等エネルギーの貯蔵技術に関する調査研究
- ③ 低温熱や未利用熱の利活用に関する調査研究
- ④ バイオガス、バイオ燃料およびペレットなどバイオマスの利活用に関する調査研究

(3) 水素エネルギー関連

水素は、①多様な一次エネルギーから製造可能、②電力との相互変換が可能、③貯蔵・輸送が可能、④利用時にCO₂を排出しない、との特徴がある。これらの特徴から、水素は、将来のエネルギー社会の中で、以下の二つの役割を果たすことが期待されている。1つは、再エネやCCSの適地からCO₂フリーのエネルギーを国内に供給する「エネルギーキャリア」としての役割で、もう1つは、国内の再エネ（変動性電源）を最大限活用するための「蓄エネルギー手段」としての役割である。

水素は火力発電の低炭素化やこれまで低炭素化が難しいとされていた産業分野の熱需要の低

炭素化にも寄与できる可能性があり、また、カーボンリサイクルを推進するうえでも、水素は必須である。このため、水素は、エネルギー基本計画においても、「カーボンニュートラルに必要な不可欠な二次エネルギーである」と位置付けられている。

このように、水素は将来のエネルギー社会の中で大きな役割を果たすことが期待されているが、その実現には、水素に関する個別の技術の高度化はもちろんのこと、製造から輸送・貯蔵・利用に至るまでの水素のサプライチェーン全体にわたる多くのステークホルダーや技術分野の協調と協力が必要である。このような観点から当研究所では、自主研究会としてCO₂フリー水素の普及に関する研究会を2011年から運営し、30を超える企業・団体・大学のメンバーからなる産官学の関係者に自由な意見交換の場を提供するとともに、その成果をホームページや学会などで広く公表してきた。

令和6年度は、この研究会活動をさらに発展させるとともに、「エネルギーキャリアとしての水素」、「蓄エネルギー手段としての水素」の両面の調査研究に取り組む。加えて、水素の製造技術や利用技術などの「水素を支える個別技術分野」の調査研究にも取り組む。

(ア) エネルギーキャリアとしての水素に関する調査研究

- ① CO₂フリー水素サプライチェーンに関する調査研究および研究会の開催
- ② 種々の条件における水素需要量（世界、国内）に関する調査研究
- ③ 種々の条件における水素エネルギーキャリア（液化水素、有機ハイドライド、アンモニア、合成燃料など）の経済性・環境性に関する調査研究
- ④ 水素エネルギーキャリアを活用した発電所や事業所の低炭素化に関する調査研究

(イ) 蓄エネルギー手段としての水素に関する調査研究

- ① 水素を用いた国内再エネの有効活用に関する調査研究

(ウ) 水素を支える個別技術分野に関する調査研究

- ① 再エネからの水素製造技術に関する調査研究
- ② 液化水素の製造技術に関する調査研究
- ③ 水素の輸送技術に関する調査研究
- ④ 水素燃焼タービン発電に関する調査研究

(4) 炭素循環エネルギー関連

2050年カーボンニュートラルを目指す上で、再エネや原子力といった脱炭素電源は、エネルギー資源の乏しい日本においては非常に重要である。一方で、CO₂排出削減の観点では、発電分野以外にも産業分野、輸送分野における取り組みも重要で、そのCO₂総排出量は発電分野よりも大きく、これまで築き上げてきた既存の化石燃料エネルギーインフラなどをうまく活用しながら脱炭素化を進めていくことが必要となる。その際、エネルギー利用効率の向上に加え、炭素資源をリサイクル利用する炭素循環経済、さらには炭素資源以外も含め、有用な資源を循環利用するという循環経済（サーキュラー・エコノミー）への移行も重要である。

そのため、分離回収したCO₂を化石資源（炭素資源）の代替として循環利用し、化学品、燃料に変換し、再利用しようとする施策も重要となってくる。また、脱炭素エネルギーを使わず、現状のまま化石燃料エネルギーを使わざるを得ない分野については、CCSなども必要になる。これらは、いわゆるCCUS技術とよばれるもので、カーボンニュートラルを達成する手段の中の1つであり、昨今これらのその重要性が以前にもまして重要視されつつある。

近年、海外の再エネのコストが大幅に低下しており、CO₂を循環利用しエネルギー源として活用するエネルギーシステムの検討も増えている。また、直接空気回収（DAC）の活用検討も世界的に加速している。国内で回収したCO₂を

再エネの豊かな国に輸送し再燃料化すれば、我が国独自の炭素循環エネルギーシステムの構築も可能である。また、廃プラ、一般ごみといった廃棄物も化学品、燃料向けに有用な資源となり得る可能性もあり、化石資源由来のCO₂を含む各種廃棄物を循環利用する技術の重要性が今後増加していくと考えられる。

以上を踏まえ、短期的には、企業へのCCUS技術の各種調査・評価サービス業務、資源循環の観点から廃棄物利用、エネルギー利用効率改善評価・検討サービス業務に取り組んでいく。長期的には、民間企業の脱炭素化の取り組みを、投資家にわかりやすい観点から解説するコンサルタント業務を金融や保険業などへ提供していくことに取り組む。また、引き続き、学との連携でCO₂削減策として有望視される要素・基礎研究の発掘、創出、および産との橋渡しを、ACC技術研究会を含めた活動を通じ展開していく。

令和6年度は、上記の観点から特に再エネを活用した分離回収CO₂の化学品、燃料への変換利活用技術の開発状況、CO₂排出規制・炭素税動向、国内外エネルギー事情の動向を調査し、技術を中心とした情報を、CO₂削減に取り組む民間企業への調査業務や、自治体、投資会社などへのコンサルタント業務にも展開し、当研究所取り組みの特異性・特徴の認知度向上と社会貢献を目指す。

(ア) CCUS技術の開発状況調査、技術評価

- ① 国内外のCO₂分離・回収技術（含むDAC）に関する調査および評価研究
- ② 国内外のCO₂輸送技術調査および評価研究
- ③ 国内外のCO₂固定・貯蔵技術調査および評価研究
- ④ 国内外の合成燃料（e-Fuel, SAFなど）技術に関する調査および評価研究
- ⑤ 国内外のバイオ燃料（バイオディーゼル, SAFなど）技術に関する調査および評価研究
- ⑥ 国内外のCO₂化成品転換技術（化学品、鉱物などなど）に関する調査および評価研究

- ⑦ 国内外のネガティブエミッション技術（DOC など）に関する調査および評価研究
- ⑧ 海外再エネ（太陽光・風力・太陽熱など）導入エネルギーシステムの検討・調査・評価

（イ）熱利用技術・省エネ技術・廃棄物有効利用技術の検討・調査・評価研究

- ① 廃棄物焼却熱の有効利用による産業からの CO₂ 削減対策の検討・評価研究
- ② 廃棄物の熱分解による化成品転換技術（化学品、燃料など）の検討・評価研究
- ③ 廃棄物・バイオマス残渣など有効利用技術（燃料など）の検討・調査・評価研究

（ウ）ACC 技術研究会

- ① CCUS 技術開発状況の紹介
- ② 海外 CCUS 技術開発状況などのニュースレターによる発信

（５）原子力関連

原子力は、世界的に、エネルギーの安定供給および地球環境問題への対応を図る上で重要な役割を担うと評価され、福島第一原発事故後においても、多くの国々が開発利用推進の方針を維持している。日本でも上述の通り、環境問題およびエネルギー安定供給の観点から原子力の位置づけが大きく見直された。当研究所としては、パリ協定への対応、更にカーボンニュートラルへ向けた世界的動きの加速、欧州のタクソノミー、COP28 での動きや電力システム改革の進展など国内外の動向を踏まえ、原子力利用に伴う様々な課題について継続的な検討を行うこととし、令和 6 年度も、原子力技術に関するこれまでの研究や評価の経験を生かし、エネルギーシステムにおける原子力の寄与や、国内外の安全規制、核融合を含む革新的原子力システムに関する研究開発に係る動向などに関する調査研究を進める。また、福島第一原発事故の教訓を踏まえ、原子力の安全性向上に資する要素技術開発を継続するとともに、福島第一原発事故に関連する国際共同研究プロジェクトに参画する。

一方、エネルギーを巡る環境の変化や電力自由化による競争の進展などにより、廃止措置を選択する原子力発電所が増加しており、廃止措置の重要性は今後一層高まると予想される。このため、有識者により構成される検討委員会において第三者的な立場から、円滑な廃止措置の実施のための課題解決に向け、廃止措置に係る工程や技術、制度に関する調査に基づき課題を把握するとともに、対応策をとりまとめた技術レポート（提言書）を公表・公開する。また、廃止措置に係る標準整備に向けた調査研究を引き続き進めるとともに、廃止措置に向けた準備作業を効率的・効果的に実施するための調査研究や廃止措置に必要となる人材の育成事業を行う。

（ア）福島第一原発事故関連および原子力安全の調査研究

- ① 原子力の安全性向上に資する技術開発の調査・検討
- ② 福島第一原発事故解析および汚染機構解明による廃炉作業促進に貢献する研究

（イ）原子力分野全般に係る調査研究

- ① 国内外の原子力開発利用動向に関する調査研究
- ② 国内外の原子力安全規制動向に関する調査研究
- ③ エネルギーシステムにおける原子力の役割に関する調査研究
- ④ 原子力の社会受容性に関する調査研究

（ウ）原子力プラント技術に係る調査研究

- ① 新型軽水炉に係る技術課題の調査研究
- ② 革新的原子力システム開発の国際動向に関する調査研究
- ③ 核融合の技術開発動向および導入シナリオに関する調査研究

（エ）原子炉廃止措置などに関する調査研究

- ① 廃止措置における機器・建屋の解体、放射性廃棄物などの処理処分に係るコスト評価、

安全確保を前提とした全体最適化に関する調査および課題への対応策の検討

- ② 廃止措置を担う人材育成のための教材開発および研修システムの構築
- ③ 原子力施設の廃止措置へのデジタルトランスフォーメーション適用に関する調査研究

6. 最新技術情報の発信、賛助会員サービスの向上

賛助会員をはじめとするステークホルダーや関係機関に向け、当研究所の調査研究事業で得られた成果のうち、技術情報として有用度の高いものについて情報提供を行う。これらの調査研究に係る活動内容や成果は、寄稿・投稿、講演会、学会発表、ウェブサイトへの掲載などにより公表するとともに、技術レポートの公表も実施し、新たなプロジェクトの提案に供することとする。

当研究所では、効果的な情報発信の方法などについて検討を継続しつつ情報発信を行ってきた。2020年6月から月例研究会は新型コロナウイルス感染症対策としてオンライン開催とした。令和3年度からは賛助会員会議、シンポジウムも個別にオンライン開催とし、内容も従来から大幅に変更した。オンライン開催により地理的参加制約がなくなり、案内送付先の拡充などと合わせて、月例研究会、賛助会員会議、シンポジウム参加者は大きく増加した。令和5年度は新型コロナウイルス感染症の5類移行を受け、賛助会員会議とシンポジウムを同日に会場とオンラインのハイブリッドで開催した。また、2024年1月の月例研究会も同じくハイブリッド開催とした。今後は各イベントの内容、目的などに合わせて、オンライン、会場、それら両方のハイブリッドを使い分けていく予定である。

- ① 定期刊行物（季報エネルギー総合工学）の刊行
 - 2021年4月号より記事毎のダウンロードも可能にし、読みやすさ、閲覧自由度向上を

継続する。

② 月例研究会の開催

- 2020年6月より、新型コロナウイルス感染症対策でオンラインでの開催とした。オンライン開催は遠隔地からの参加も可能で参加者増に寄与している。2023年5月に新型コロナウイルス感染症が5類に移行したことから、小型ドローンの実演のあった2024年1月はハイブリッド開催とした。令和6年度もオンラインでの開催、会場での開催およびそれらのハイブリッドを候補として発信内容に応じて運用する。

③ エネルギー技術情報プラットフォームの整備および運用

- セキュリティの向上およびコンテンツの充実に加えて、使いやすさ向上のためトップページレイアウトの変更を2023年1月に実施し、2023年9月には主要研究員紹介のウェブサイトの新設した。引き続き見やすさ、使いやすさの向上を図っていく予定である。

④ メールマガジン（IAE Newsletter）の発行

- 2020年1月号より、研究員コラムの新設、月例研究会や個別研究会の概要掲載など、コンテンツを充実しており、過去の記事も含めて賛助会員専用サイトで閲覧可能とした。配信先拡充と合わせて今後も継続していく。

7. その他

（1）エネルギーに関するアンケート調査

エネルギーに係る一般公衆の意識調査は、東日本大震災以前より実施してきており、引き続き同様のアンケート調査を実施し、その経年的な意識変化などの動向を分析する。ロシアによるウクライナ侵攻やイスラエルとパレスチナガザ地区の紛争に、近年の国内原子力政策の転換などを踏まえ、公衆の意識に変化があるようであれば、その原因についても分析する。

(2) エネルギー技術に関する国際標準化の調査研究

ISO や IEC における，下記分野での国際標準化に係る事業を行う。

- ① エネルギーマネジメントおよび省エネルギーの評価・検証関連
- ② CCS の CO₂ 削減量定量化・検証，および横断的事項関連

研究所のうごき

(令和6年1月1日～3月31日)

◇第35回 理事会

(Web開催および(一財)エネルギー総合工学研究所会議室)

日時：3月6日(月)

議題：

- | | |
|-------|----------------------|
| 第1号議案 | 令和6年度事業計画および収支予算について |
| 第2号議案 | 役員等賠償責任保険契約について |
| 報告事項 | 組織の改編と人事制度の変更について |
| 報告事項 | 業務執行の状況について |

◇月例研究会

第435回月例研究会

日時：1月18日(金) 14:00～16:00

テーマ：

- (1) 原子力発電所におけるドローンの利用
(原子力技術センター 廃止措置チーム 参事 田中 健一)
- (2) 設備点検における超小型産業用ドローンの活用
(株式会社 Liberaware スマート保安事業部 北川 祐介 氏)

第436回月例研究会

日時：2月22日(金) 14:00～15:00

テーマ：

- (1) 事故耐性燃料(ATF)被覆管の研究開発について
(国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 照射材料工学研究グループ 根本 義之 氏)

第437回月例研究会

日時：3月15日(金) 14:00～16:00

テーマ：

- (1) エネルギー危機を通じて認識された電力自由化と燃料安定調達の課題

(合同会社 エネルギー経済社会研究所 代表取締役 松尾 豪 氏)

- (2) ウクライナ危機とパレスチナ危機が共鳴するシェール・ガス革命, シェール・オイル革命の今後

(和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一 氏)

◇外部発表

[講演]

講演者：森山 亮, 炭谷 一朗, 川村 太郎

テーマ：再生可能エネルギー×電力システム

講演先：JX 金属戦略技研セミナー

日時：1月～3月

講演者：飯田 重樹

テーマ：脱炭素化に向けてのエネルギー戦略とそ
の中での水素利用

講演先：(一社)日本計量機器工業連合会 新技術
導入・活用研究会

日時：1月23日

講演者：酒井 奨

テーマ：カーボンリサイクルと排ガスからのCO₂
分離回収技術

講演先：廃棄物対応技術検討懇話会主催「第57
回産官学連携討論会」

日時：1月29日

講演者：岡崎 徹

テーマ：脱炭素社会を経済的に実現する革新的レ
トロテクノロジーの蓄熱発電

講演先：日本水・蒸気性質協会 全体会議

日時：1月30日

講演者：石本 祐樹

テーマ：水素サプライチェーンの水素コスト及び
炭素集約度の分析事例について

講演先：電気化学会 令和6年度総会および第121
回委員会

日時：1月31日

講演者：森山 亮, 炭谷 一朗

テーマ：再生可能エネルギー×電力システム

講演先：日本財団リカレントセミナー

日 時：2月8日

講演者：酒井 奨

テーマ：カーボンニュートラル社会の実現を支える
カーボンリサイクル技術

講演先：(一社)長野県経営者協会主催「長野県経営
大学講演会」

日 時：2月16日

講演者：森山 亮

テーマ：再生可能エネルギーの活用と未来
～サステナブルな都市・東京へ～

講演先：東京都主催、公益財団法人東京都環境公
社事務局「令和5年度都民向けテーマ別
環境学習講座 第4回」

日 時：2月17日

講演者：石本 祐樹

テーマ：水素サプライチェーンの水素コスト及び
炭素集約度の分析事例について

講演先：(一社)ニューグラスフォーラム主催
グラス溶融プロセスの脱炭素化技術調査
報告会

日 時：3月14日

講演者：酒井 奨

テーマ：カーボンニュートラル社会の実現を支える
カーボンリサイクル

講演先：第3回同志社大学カーボンリサイクルシ
ンポジウム

日 時：3月15日

[学会発表]

発表者：井上 智弘

テーマ：エネルギーシステムモデルを用いた2050
年の貨物トラック輸送技術の影響評価(2)
－貨物トラック電動化シナリオの検討－

発表先：第40回エネルギーシステム・経済・環境
コンファレンスプログラム

日 時：1月30～31日

発表者：木野 千晶

テーマ：SAMPSON コードによる福島第一原子力
発電所の事故進展およびFP挙動評価(4)

エアロゾル再浮遊を考慮した2号機シー

ルドプラグ汚染メカニズムの分析

発表先：原子力学会 2024 年春の年会

日 時：3月26日

[寄稿]

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：WE-NET プロジェクト

寄稿先：火力原子力発電協会誌 2月号

第 46 卷 通 卷 目 次

VOL. 46, No. 1 (2023.4)

【調査研究報告】

国内外における革新炉開発動向

～海外の小型モジュール炉（SMR）開発を中心に～

（一財）エネルギー総合工学研究所 原子力技術センター
原子力チーム 部長 都筑 和泰 …………… 1

【調査研究報告】

北ドイツの水素サプライチェーン構築に向けた取り組み

プロジェクト試験研究部 主管研究員 松本 俊一 …………… 10

【寄稿】

ドイツのエネルギー転換と水素分野の現状と可能性

Securing Germany's Energy Supply - Current Status and Opportunities
in the German Energy Transition and Hydrogen Sector

ドイツ貿易・投資振興機関（GTAI）シニアマネージャー ハイコ・スタウビッツ
ドイツ貿易・投資振興機関（GTAI）シニアマネージャー ウィリアム・マクドウガル … 21

【寄稿】

株式会社 脱炭素化支援機構（JICN）の設立と今後の活動について

株式会社 脱炭素化支援機構 代表取締役社長 田吉 禎彦 …………… 38

【事業計画】

令和5年度 事業計画 （一財）エネルギー総合工学研究所 …………… 49

【研究所のうごき】 …………… 61

【第 45 巻通巻目次】 …………… 64

【編集後記】 …………… 68

VOL. 46, No. 2 (2023.7)

【調査研究報告】

IAEA 安全基準の概要と最近の動向

(一財) エネルギー総合工学研究所 原子力技術センター
原子力チーム 部長 都筑 和泰 ……………1

【寄稿】

産業用太陽熱供給と太陽熱コレクタ

新潟大学 客員教授 吉田 一雄 ……………11

【調査研究報告】

米国エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E) の取り組みの最新状況

プロジェクト試験研究部 主任研究員 星 文之 ……………26

【事業報告】

令和4年度 事業報告の概要 (一財) エネルギー総合工学研究所 ……………36

【研究所のうごき】 …………… 49

【編集後記】 …………… 51

VOL. 46, No. 3 (2023.10)

【巻頭言】

カーボンニュートラルを「夢」で終わせない

(一財) エネルギー総合工学研究所 副理事長 国吉 浩 ……………1

【寄稿】

核融合（フュージョン）エネルギー研究開発の現状と将来展望

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
量子エネルギー部門 六ヶ所研究所 所長

竹永 秀信 …………… 3

【寄稿】

世界の核融合スタートアップ最前線

九州大学 都市研究センター
核融合エネルギー部門長・准教授
京都フュージョニアリング株式会社
共同創業者 兼 Chief Strategist

武田秀太郎

九州大学大学院 工学府 土木工学専攻 岩本 みさ ……………15

【寄稿】

グリーン・トランスフォーメーション（GX）に向けた
カーボンリサイクルの役割と課題

経済産業省 資源エネルギー庁
資源・燃料部 燃料環境適合利用推進課 課長補佐

笹山 雅史 ……………25

【寄稿】

脱炭素への動きとロシアによるウクライナ侵攻
～シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の今後～

和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一 ……………35

【研究所のうごき】 …………… 56

【編集後記】 …………… 58

【寄稿】

わが国における浮体式原子力発電の検討について	
東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 副所長	後藤 章 ……1

【寄稿】

浮体式原子力発電の実用化に向けた取り組み	
(一財) 電力中央研究所 副研究参事	宇井 淳 ……7

【寄稿】

中部圏における産業横断水素大規模社会実装の実現に向けて	
～中部圏水素利用協議会の取り組み～	
中部圏水素利用協議会 事務局長	
トヨタ自動車(株) 水素ファクトリー水素事業推進室	
プロフェッショナルパートナー	水谷 英司 ……14

【調査研究報告】

バイオ燃料の CO ₂ 削減効果指標－炭素強度 (CI) －に関する調査	
プロジェクト試験研究部 主任研究員	大道 隆成
プロジェクト試験研究部 参事	濱田 利幸
プロジェクト試験研究部 部長	森山 亮 ……23

第36回 エネルギー総合工学シンポジウム ～ カーボンニュートラル 2050 ビジョン ～
令和5年11月1日(水) 13:30～16:00
航空会館および Web 開催

【開催報告】

シンポジウム事務局 ……33

【要 約】 IAE エネルギー中長期ビジョン

～カーボンニュートラルに向けたシナリオと技術展望～
(一財) エネルギー総合工学研究所 …… 36

【座談会】 「エネルギー中長期ビジョン」(令和5年度改訂版) の検討を振り返る

～執筆者座談会～	
プロジェクト試験研究部 地球環境グループ 主管研究員	井上 智弘
プロジェクト試験研究部 新エネルギーグループ 副部長	川村 太郎
原子力技術センター 原子力チーム 副部長	都築 宣嘉
プロジェクト試験研究部 炭素循環エネルギーグループ 部長	酒井 奨
プロジェクト試験研究部 水素グループ 主任研究員	水野 有智
プロジェクト試験研究部 電力システムグループ 主任研究員	松浦 隆祥
司会：プロジェクト試験研究部 新エネルギーグループ 部長	森山 亮 ……40

【研究所のうごき】	…54
-----------	-----

【編集後記】	…56
--------	-----

編集後記

本号から編集責任者となりました手塚です。編集後記は、季報を読まれる皆さまとのつながりを深め、情報を伝えるだけでなく、感情や思いを共有する場でもあると考えています。皆さまと共に、より良いコンテンツを提供し、価値ある情報をお届けするために努めてまいりますので、どうぞよろしくお願い申し上げます。

本年は例年と比べて桜の開花が遅い印象ですが、自然環境が人間の思い通りにはいかない難しさを感じています。人間が自然に逆らうのではなく、うまく自然と寄り添い利用する形で将来を考えていく必要があるのではないかと、改めて感じました。

そういった観点から、本号の記事にもあるブルーカーボン生態系を含む自然生態系を基盤としたアプローチ・対応策などは、非常に意義が大きいと考えます。

それらを実現するためには、付随する技術の開発が必要で、ここ数年様々な場面で定着してきたドローン技術などにも

大きな期待が寄せられます。本号ではドローンを活用した原子力発電所の廃炉作業などへの取り組み、それを実現するための狭隘部での技術開発が紹介され、より一層の開発加速が期待されます。

このような技術開発を進めていても、万が一、原子力事故が起こった際に、重大な事故進展を未然に防ぐための事故耐性燃料（ATF）の開発も世界各国の研究機関で進められており、研究員の皆さまのご苦労や強い意気込みが感じられます。

自然と人間が上手く協調していくためには、これからも様々な問題に直面する場面が多く出てくると思います。当研究所でも、引き続き技術を中心に、エネルギー、脱炭素に関する様々な活動に取り組み、その情報発信を継続してまいります。当研究所の活動が本号をお読みの皆さまの今後の事業活動に少しでもご参考となれば幸いです。

編集責任者 手塚健一

季報 エネルギー総合工学 第47巻第1号

令和6年4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

<https://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。