

たセンサーの情報から化学物質の放出源を特定するアルゴリズムを開発した<sup>182</sup>。

また、このプロジェクトで開発されるドローン搭載型の化学兵器検知システムは平時の市中だけでなく戦場において使用することも想定されている<sup>183</sup>。

## (2) 公的利用・安全保障における利用

特に CBRN 兵器とされる生物兵器と対比した化学兵器攻撃による疫学的な特徴として、類似する症状の患者がほぼ同時期に出現するというものがある。こうした特徴から、何らかの被害が発生していることの認知は可能であるが、これがどのような化学剤によるものなのかを早期に特定することは、その後の被害管理や現場管理の前提となる情報として重要である<sup>184</sup>。DARPA の ChemSIGMA で行われているようなモニタリングの例でいえば、平時なり、大規模イベントにおいてネットワーク化された検知システムを構築しておくことにより、化学脅威発生時の迅速な情報収集が行えるほか、化学剤の動態シミュレーションを行うようなアルゴリズムと組み合わせることで、その拡散を予測し避難を呼びかけるなど、さらなる被害の拡大を防ぐことができる。

また、ロボットを用いた化学兵器検知技術について戦災下や災害下の過酷環境における化学兵器検知能力向上に貢献すると考えられる。たとえば、化学兵器が弾道ミサイルに搭載されて使用された場合、現場は生物剤の汚染だけでなく、瓦礫の散乱や建造物の倒壊といった作業安全上のリスクが高まっている可能性がある。人員に代わりロボットによる検知が行われることで、二次的な被害の低減が期待される。

また、紛争地域への派兵のような国外の展開先での活動では、ChemSIGMA のような設置型の化学物質検知器を使用することが困難になると考えられる。こうした場合、常設の必要のないロボット・ドローンによる検知、また韓国が開発したような画像認識による技術も有効であり、これらを用いて化学的な安全を確認した上での要員の展開を可能にすることができる。こうした技術を有していることにより紛争後の平和構築活動等、不安定な情勢下の活動能力の向上に貢献することも考えられる。

---

<sup>182</sup> “Life-saving chemical detection drone developed at Loughborough flies through first test stage,” Loughborough University, 19 September 2018. <<https://www.lboro.ac.uk/news-events/news/2018/september/mi-nerva-drone-chemical-detection-life-saving/>>

<sup>183</sup> “UK tests life-saving chemical detection robots and drones,” UK.gov, <<https://www.gov.uk/government/news/uk-tests-life-saving-chemical-detection-robots-and-drones>>

<sup>184</sup> 世界保健機関『WHO ガイダンス：生物・化学兵器への公衆生成対策 第2版』2004年。

### (3) 民生利用

化学剤による脅威という点では、化学兵器による攻撃だけでなく、化学工場の事故等による化学物質の飛散も社会への脅威となる。米国の ChemSIGMA や韓国のハイパースペクトル画像を用いた技術は、こうした事象が発生した際、工場周辺の住民の避難や被害管理において役立つことが考えられる<sup>185</sup>。同様のケースにおいて、ロボットの利用も被災した工場内において、発生源となっている区画や設備の特定に役立つことが想定される。

### (4) 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスクシナリオ

上記技術の開発の目的として、現在ファーストレスポnder等々の要員により実施される現場管理の実施やサンプリング、サンプルの輸送等のプロセスを機械化し、攻撃発生後の対応の迅速化や要員の安全向上を図ることが挙げられていることから、当該技術の劣位は特に我が国の CBRN 対応を行う要員の安全性を向上させる機会の喪失につながる。人口減少が続く中、対応要員の確保も課題になっている現状もあり、他の分野と同様に化学兵器検知についても一定の省力化がなされる必要がある。

また、化学兵器による攻撃事態と化学工場事故のような災害対応に共通する部分として住民避難における情報提供という側面がある。ChemSIGMA や画像処理技術は、飛散している化学物質の動態を可視化することができる。事案発生や事態の推移を説明するにあたり、このような可視的な情報が提供されることは、事態発生を受けて避難等を強いられる住民等の安心や納得を醸成することにも貢献すると考えられる。

### (5) 日本の文脈におけるリスク分析

化学脅威発生の可能性という点において、北朝鮮が多種、大量の化学兵器を保有しているという分析等を鑑みると、わが国においても化学兵器攻撃発生への備えが必要であることが認識できる。前述の米国陸軍の報告書の中では、北朝鮮による化学兵器使用の方法についても想定されている。記述した弾道ミサイルの想定その他、テロ等で想定される市中での散布等様々な用途が想定されていることから、化学兵器の種類、使用・散布のされ方、被害の範囲等、個々の使用のケースを想定し、それぞれに適合する技術や手法が備えられていることが望ましい。

こうした多様な化学脅威のケースに備える中では、省力化や、住民避難のための対応の迅速化、状況の可視化といった技術能力が必須であろう。現状、こうした技術開発は米国や英国、韓国といった我が国と安全保障上のつながりが強い国で進んでいる状況にある。これらの国と

---

<sup>185</sup> PSI は SCRAM の紹介の中で有毒な工業化学物質の広域監視の用途にも言及している。

協力しつつ、技術やその運用について知見を高めていく必要があると考えられる。

また、バイオテクノロジー分野では、米国が質と量の面で優勢ではあるが、中国も年々研究者の数を増やしており、東京大学から中国の天津大学への研究者の移動も見られる。中国において当該分野の研究がより拡大するのと並行して、日本からの人材流出にも留意する必要があるだろう<sup>186</sup>。

#### (6) その他（上記のフォーマットにのらないが特筆すべき点など）

本調査は生物化学兵器検知・特定への先端センシング技術の活用を対象としたものである。他方、化学兵器攻撃による被害低減のためには、他にも活用可能な技術がある。たとえば大規模な化学兵器・化学剤の散布がなされた場合、物質の特性によってはこれが大気等によって広範囲に拡散する可能性がある。WHO はこうした事態において活用しうる技術としてコンピュータシミュレーションを挙げている。

### 6. エネルギーセクターセンサー(Energy-sector sensing)

センサー技術はエネルギー分野でも活躍の場を広げており、特にそのコスト削減と省エネに貢献している。リアルタイムでデータを分析し伝達することで、エネルギー供給のあらゆる工程において、より効率的なシステムを構築・運用することができる。ここでは、センサー技術がエネルギー分野にどのような技術革新をもたらしてきたのかを分析する。

エネルギーセクターにおけるセンサーの導入は、そのほかのデジタル技術の発展と連動して進められてきた。特に IoT(Internet of Things)の概念がエネルギーセクターに導入され、あらゆる工程をデータによって管理して共有するという仕組みが確立される中で、センサー技術が担う役割がさらに大きくなった。例えば、IoT が導入される以前は、高度センサーは1台毎に\$1000 もしたのに対して、IoT が導入されて以降現在では1台あたりの価格が\$10 以下となっている<sup>187</sup>。このことから IoT の導入によりセンサーの商業化が急速に加速したことがわかる。

「インダストリー4.0」はこうした流れをさらに加速させてきた。IoT によりデータを通じてあらゆる工程が可視化されることで、それらの変化や異常を検知するためのセンサーの導入が急激に進むようになったのである。既存の火力発電や原子力発電はもちろんのこと再生可能エネルギーの発電においてもセンサーが導入されることで、これまでバラバラに管理されていた

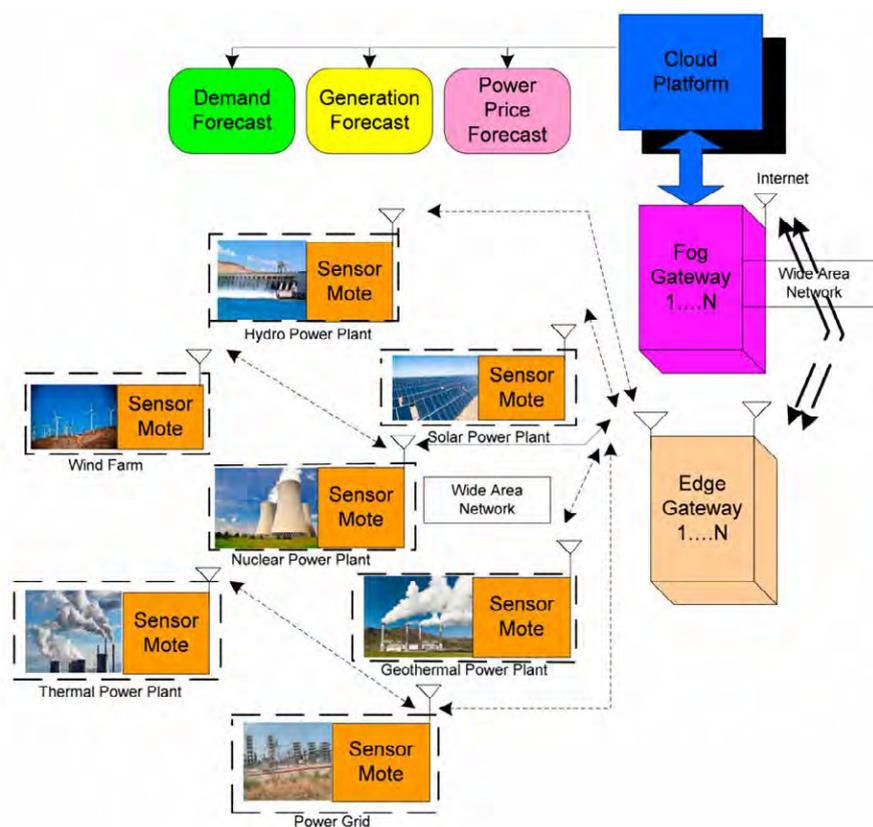
<sup>186</sup> アスタミューゼ社への再委託レポート, 73 頁。

<sup>187</sup> Critchley, Liam. *The development of sensors within the energy sector*. (May 4, 2018).

エネルギー供給の工程が一元的に管理統制されるようになる(図 5-8)。これにより電力の需要と共有のバランスがより一層可視化され、より効率的な電力供給が可能になるのである。

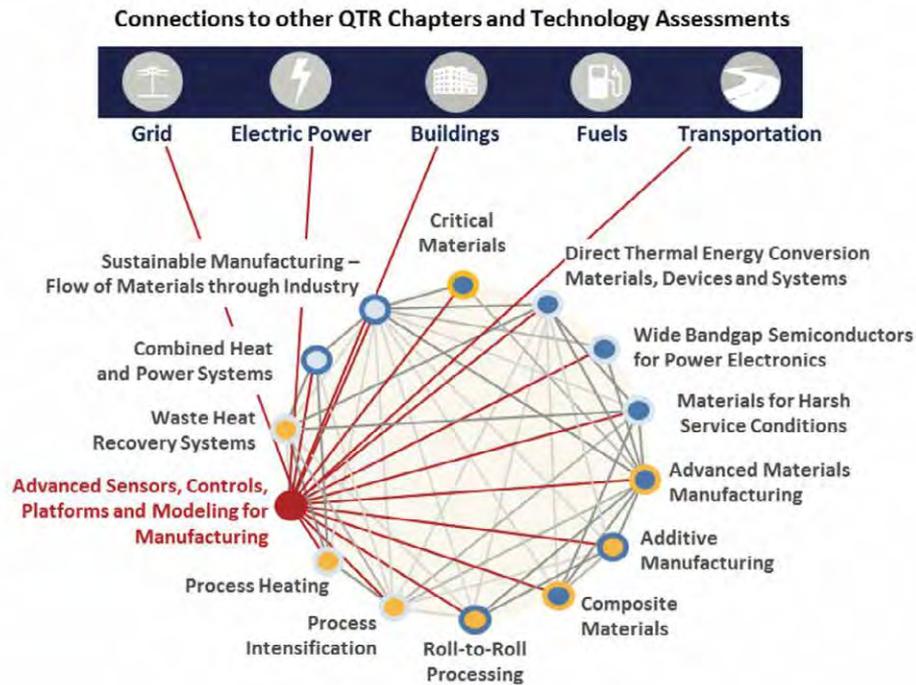
さらに、センサー技術は、発電所システムがそのほかの生活インフラとデータで文字通り繋がることで更なる効果を発揮する。図 2 のようにセンサー技術を通じて、電力とグリッドさらにはその供給先となるビルや交通インフラをデータで繋ぐことができる。こうしたネットワークはその他の先端科学技術と相まって更なるネットワークを広げて図のようなネットワーク網を形成するのである。

このようにセンサー技術はリアルタイムのデータ取得とその送信を実現する重要なツールであり、こうしてリアルタイムのエネルギー需給モニタリングが可能となることで、より低コストでかつ効率的なエネルギー供給が可能になる。センサー技術は、このように IoT 技術全般の発展とともに進化を遂げてきたのである。



(図 5-8 IoT ベースのリアルタイムモニタリング発電システムの仕組み<sup>188)</sup>

<sup>188</sup> Singh, Rajesh, et al. "Energy System 4.0: Digitalization of the energy sector with inclination towards sustainability." *Sensors* 22(17) (2022): 6619.



(図 5-9 高度センサーとエネルギーセクターの情報ネットワーク網の概念図<sup>189)</sup>)

## 7. 環境セクターセンサー (Environment-sector Sensing)

### 環境セクターにおけるセンサー技術の応用

エネルギーセクターと同様に環境セクターにおいてもセンサー技術は幅広く活用されている。その用途は極めて広範囲にわたり、火山活動や海洋状況をリアルタイムでモニタリングするためのセンサーや大気汚染のモニタリングセンサー、さらには、森林火災や地震の検知センサー等々幅広い分野と用途でセンサー技術が用いられている<sup>190</sup>。特に近年では、気候変動対策の観点からセンサー技術への注目が高まっており、地球環境や生態系の変化のデータ取得を目的にセンサー技術が使われるケースが多い<sup>191</sup>。また宇宙衛星から地表の湿度や海面水位等を計測す

<sup>189</sup> The United States Department of Energy, *An assessment of energy technologies and research opportunities*. (Quadrennial Technology Review). September 2015.

<sup>190</sup> Bokare, Madhav, and Anagha Ralegaonkar. "Wireless sensor network: A promising approach for distributed sensing tasks." *Excel Journal of Engineering Technology and Management Science* 1.1 (2012): 1-9; Galar, Diego, and Udar Kumar. *Maintenance: Essential electronic tools for efficiency* (Academic Press, 2017).

<sup>191</sup> Cai, Danlu, et al. "Remote Sensing Greenness and Urbanization in Ecohydrological Model Analysis: Asia and Australasia (1982-2015)." *Sensors* 19.21 (2019): 4693.

るセンサー技術も開発されており、衛星技術とのシナジーも大いに期待される分野である<sup>192</sup>。例えば、米国航空宇宙局(NASA)は、地球上のメタンの量を測定するセンサーを開発しており、リアルタイムのデータ収集を通じて、包括的なカーボンマッピングが実現されつつある<sup>193</sup>。

## 衛星技術とセンサー

地球上の環境変化に関するデータを取得する際に、衛星から地表の状況を観測するという方法が取られることが多い。これは、例えば海上状況把握(MDA)においても同様であるが、海洋状況のみならず、地表やその他あらゆる環境状況の観測にセンサー技術が使われている。例えば、NASAは、北極圏から放出される放射エネルギー(Polar Radiant Energy)を観測するセンサーを衛星に搭載することで、なぜ北極圏の他の地域よりも温暖化が進んでいるのかということ を明らかにしようとしている<sup>194</sup>。また、日本でも地球上の水循環を観測する衛星「しずく」(GCOM-W1)が活躍しており、衛星に搭載された「高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)」というセンサーによって、地球上の水の循環をリアルタイムで計測している。



### ① 太陽電池パドル

軌道上において太陽光を電池エネルギーに変換し、衛星に必要となる電力を供給します。

### ② 高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)

地表や海面、大気などから自然に放射されるマイクロ波を観測するセンサーです。

(図 5-10 第一期水循環変動観測衛星「しずく」(JAXA)<sup>195</sup>)

<sup>192</sup> Althen Sensors & Controls, “Eddy current sensors for measuring climate change.”

<https://www.althensensors.com/case-studies/eddy-current-sensors-for-measuring-climate-change/>

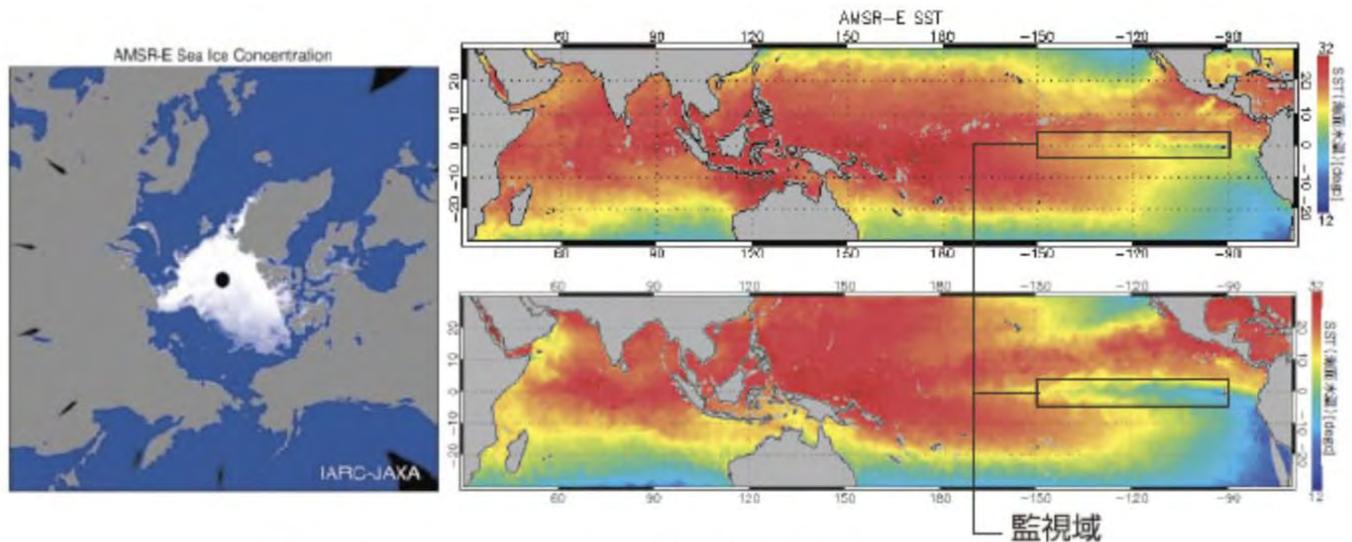
<sup>193</sup> NASA, “NASA Sensors to Help Detect Methane Emitted by Landfills”. December 14, 2022.

<https://climate.nasa.gov/news/3241/nasa-sensors-to-help-detect-methane-emitted-by-landfills/>

<sup>194</sup> NASA, “New NASA space sensors to address key Earth science questions.” February 5, 2018.

<https://climate.nasa.gov/news/2678/new-nasa-space-sensors-to-address-key-earth-science-questions/>

<sup>195</sup> [https://www.jaxa.jp/countdown/f21/overview/shizuku\\_j.html](https://www.jaxa.jp/countdown/f21/overview/shizuku_j.html)



左図：北極海の海氷 右図：エルニーニョ（上）およびラニーニャ（下）

（図 5-11 衛星「しずく」による観測の例<sup>196</sup>）

## 8. 交通分野センシング技術（Transportation-sector Sensing）

自動運転の実用化は、現時点で国際自動車技術会（SAE）が定義する自動運転6段階のうちレベル3の段階にある<sup>197</sup>。日本政府は、日本が抱える課題のうち、交通事故・交通渋滞等の削減<sup>198</sup>、過疎地域や高齢者向けの移動手段の確保や、物流業界における人手不足、これらの課題を自動運転の実用化によって解消し、ひいては国民の安全・安心に寄与するもの<sup>199</sup> <sup>200</sup>として2030年を目処にレベル4の達成を目標に掲げている<sup>201</sup>。

<sup>196</sup> ibid.

<sup>197</sup> 定義の詳細は、令和3年度広範囲調査分析報告書第15節参照。

<sup>198</sup> 内閣府「平成30年交通安全白書」

[https://www8.cao.go.jp/koutu/tai\\_saku/h30kou\\_haku/zenbun/genkyo/feature/feature\\_01.html](https://www8.cao.go.jp/koutu/tai_saku/h30kou_haku/zenbun/genkyo/feature/feature_01.html)

<sup>199</sup> 国土交通省「自動運転に関する主な政府方針等について」<https://www.mlit.go.jp/common/001266402.pdf>

<sup>200</sup> 経済産業省「自動走行ビジネス検討会：

[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/mono/automobile/Automated-driving/automated-driving.html](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/automobile/Automated-driving/automated-driving.html)

<sup>201</sup> 国立研究開発法人 産業技術総合研究所「自動運転レベル4等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト（RoAD to the L4）」

[https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource\\_images/aist\\_j/topics/to2021/to20210610/basic.pdf](https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/topics/to2021/to20210610/basic.pdf)

上記の政策を受けて、自動運転に関するセンシング技術に関しては、既に関係府省・機関が連携して推進する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）的イノベーション創造プログラム（SIP）<sup>202</sup>にて基盤技術の研究開発や実証実験が進められている<sup>203</sup>。

## (1) 技術の概要

自動運転で必要とされるシステムは、4つの運転動作「認知」「予測」「判断」「行動」を運転者に代わって連続して行うことができるものとされている。運転者の視覚や聴覚による「認知」、脳での「予測」及び「判断」、ハンドルやアクセル、ブレーキなどの「行動」という一連の過程を運転者に代わってシステムが実行する。このシステムを実現させるための構成要素のうち、「認知」と「予測」にあたる部分、すなわち車体に搭載されたカメラやセンサー、位置情報システムをここで取り上げるセンシング技術とする。

## GNSS

衛星からの信号を利用する測位システムである。車体に据え付けられた GPS アンテナで信号を受信して高度測位し、自車位置を認識するもので、誤差は 10 メートルから最小で 6 センチメートル程度とされている。ただし GNSS は電波を用いた技術であるゆえトンネル内や高層ビル街などの遮蔽環境では受信精度が極端に低下する。このため多くの異なる衛星システムから異なる帯域の信号を受信できるマルチ GNSS が測位精度を向上させる。現在米国の GPS 以外に世界で数々の準天頂衛星（ロシアの GLONASS、中国の Bei Dou（北斗）、EU の Galileo、日本のみちびき<sup>204</sup>等）が運用されているが、これらの衛星は各国それぞれ違う周波数を持つため、マルチ GNSS によって捕捉衛星数が増やし、異なる周波数帯の信号を同時に受信することによって自動運転の「認識」を妨げる妨害波に対するロバスト性も向上することとなる<sup>205</sup>。

---

<sup>202</sup> 内閣府「戦略的イノベーション推進プログラム（SIP）「自動運転」<https://www.sip-adus.go.jp/rd/>

このほか、関係する省庁（内閣官房、警察庁、総務省、経済産業省、国土交通省）や国立研究法人にも情報掲載あり。

<sup>203</sup> SIP 自動運転推進委員会「【SIP 第 2 期】「自動運転」 2021 年度～2022 年度施策 施策一覧」

[https://www8.cao.go.jp/cstp/qaiyo/sip/iinkai2/jidosoko\\_18/sanko1.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/qaiyo/sip/iinkai2/jidosoko_18/sanko1.pdf)

<sup>204</sup> 科学技術振興機構「日本版 GPS「みちびき初号機後継機」打ち上げ成功 高精度測位に貢献」

[https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20211027\\_n01/](https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20211027_n01/)

<sup>205</sup> Xingzeng, Li, et al. (2022). Multi-GNSS PPP/INS/Vision/LiDAR tightly integrated system for precise navigation in urban environments. *Information Fusion*. Feb2023, Vol. 90, p218-232. P. 15.

## Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) <sup>206207</sup>

GNSS は地球上の位置を示す絶対位置となる座標を得ることができる一方、SLAM は自らの位置の特定と地図作成を同時に行うことができる技術である。車体にセンサーを搭載し、移動しながら周囲の環境をマッピングしていく。また、センサー画像などから任意の基準点を設け、この基準点をベースに車体の移動量を計算したり、車体に搭載した慣性計測装置 (IMU) などから移動量を算出したりすることで自らの相対的な位置を特定することができる。

SLAM に用いられる外界センサには大きく 3 つの種類 (LiDAR、カメラ、距離画像カメラ) があるが、それぞれの特性から単一での運用は難しい。LiDAR は点群による測距を行うが解像度は期待できず、カメラは解像度が高いものの単独での距離計算はできないため不安定要素となり、距離画像カメラは太陽光に弱く室内環境に限定される。結果としてデータの信頼性を高めるためには、複数のセンサデータを融合することとなり、この最適解を導くための技術のひとつが、CT-SLAM (Continuous Time SLAM) と言われている。

### SLAM 開発事例

このほか、Deep Learning を応用した DNN (Deep Neural Network) を SLAM に展開する研究も急速に発達している。継続して移動する車体が捉える画像は視差が生まれにくいという特徴から、学習を用いて距離を推定できるようにする<sup>208</sup>。DNN の応用はカメラ SLAM が先行しているものの、3D 地図を作成できる LiDAR や距離画像カメラ SLAM への応用技術<sup>209210</sup>はまだまだ研究が待たれるところである。

## 6. センサネットワーク／センシング (Networked Sensors and Sensing)

### (1) 当該技術の概要

---

<sup>206</sup> 田崎 勇一 「LiDAR を用いた SLAM 技術の現状と展望」 システム／制御／情報 64-42, pp. 51-56.

<sup>207</sup> 友納 正裕、原 祥堯 「SLAM の現状と今後の展望」 システム／制御／情報 64-42 pp. 45-50

<sup>208</sup> Sobczak, Łukasz et al. (2022). Finding the best hardware configuration for 2D SLAM in indoor environments via simulation based on Google Cartographer. Scientific Reports. 11/5/2022, Vol. 12 Issue 1, p1-21. 21p

<sup>209</sup> Jian, Yang. Et al. (2020) A Review of Multi-Sensor Fusion SLAM Systems Based on 3D LIDAR. Remote Sensing. Jun2022, Vol. 14 Issue 12, pN.PAG-N. PAG. 27p.

<sup>210</sup> Al di baja, Mohammad, Suganuma, Naoki (2021). Graph SLAM-Based 2.5D LIDAR Mapping Module for Autonomous Vehicles. Remote Sensing. Dec2021, Vol. 13 Issue 24, p5066-N. PAG. 1p.

センサネットワーク (networked sensors) とは、センサノード (sensor node) と呼ばれる無線機能と簡易なデータ処理機能を搭載した超小型のコンピュータデバイス群によって構成される無線ネットワークシステムである (膨大な数の小型人工衛星を「群」で運用する衛星コンステレーションシステムをイメージされたい)。センサネットワークは、センサを搭載した超小型のコンピュータが相互に通信を行いながら実空間上の情報を取り込むため、単体のコンピュータと比較して圧倒的な数と種類のインプットが可能となる。多数のセンサによる膨大なデータのインプットとコンピュータが持つ蓄積・解析能力が組み合わせることで新たな価値を生み出すことができるのが当該技術の特徴である。

一般的なセンサノードは、センサ、処理部 (マイクロプロセッサ、メモリ)、電源ユニット (バッテリー)、通信部 (無線通信デバイス) から構成される (ただし電源部を持たない超小型ノードもある)。また機器を制御するアクチュエータを備えたノードも存在する。センサノードは他のセンサノードから中継ノードへデータを送るためのルーティング機能を持ち、センサノード間で通信障害が発生した場合に別の中継経路を自律的に再構築して中枢ノードへのデータ送信を確保するといった機能もある。

センサネットワークはすでに様々なところで実用化されているが、適用領域と移動範囲ごとに類型化することができる<sup>211</sup>。①狭域・固定 (住宅・店舗などの室内環境の計測やセキュリティなどに利用)、②狭域・移動量小 (ウェアラブル端末や放射線可視化システムなどに利用)、③中域・固定 (圃場や森林観測などに利用)、④中域・移動 (自律移動支援システムなどに利用)、⑤広域・固定 (気象データや交通渋滞・事故情報システムなどに利用)。

## (2) 分野

半導体技術の進歩により、超小型・低消費電力の CPU モジュール、無線通信モジュール、センサモジュールが開発され、こうしたモジュールの出現によってセンサネットワークが生み出された。センサネットワークに関する研究は、センサノードを構成するデバイスに始まり、バッテリー、通信プロトコル、システム/ソフトウェア、データ処理方法/セキュアデータ、センサデータによる行動認識、物体追跡・監視など、ハードウェアからアプリケーションの研究開発まで幅広い分野にわたって研究開発されている。

## (3) 注目された経緯

センサとネットワークの関係は科学技術の発展と共に変化してきた。まずは単純なセンサ単

---

<sup>211</sup> 井家上哲史「センサネットワーク概観」『電学論』128 巻 10 号 (2008) 1499f.

体の研究から出発し、ネットワークに繋がったセンサネットワークシステムに進展し、センサをオープンネットワーク化するオープン型センサネットワークが実現、そしてあらゆるモノがインターネットに接続され（IoT）センサ機器が至るところに偏在するユビキタスセンサネットワークの実現に向けて、センサネットワークの技術開発は進展している。このユビキタスネットワークは 2000 年代に提唱され、IoT のトレンドと共にセンサネットワークが注目される大きなきっかけとなった。

また、半導体の MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術の発展によって、センサノードの構成要素デバイスの小型化、省電力化、低価格化が進展し、小サイズ・低価格での製造が可能となったことから、センサネットワークが実用化・普及した。すでにセンサネットワークはわれわれの実社会に溶け込んでおり、「IoT」や「ユビキタスセンサネットワーク社会の実現」という趨勢は、今後も加速していくと思われる。

#### (4) 研究開発状況

従来、センサネットワーク、あるいは IoT やユビキタスネットワークにおいて、センサノードは着用（ウェアラブル）・搭載可能な小型・計量のサイズ、そして長時間駆動するバッテリーの省電力性能が求められてきた。この点における研究開発は 2000 年代初頭から大幅に進展し、現在センサネットワークは広く実用化・普及するに至った。一方、バイタルセンシングや監視、モノの管理に用いられる電子タグには、第三者による悪用に対するセキュリティ対策が求められる。具体的には、①情報漏えいリスクに対するリード制限、データ暗号化・無効化、②偽造・複製の脅威に対する改ざん検出、複製防止措置、③データ改ざんに対するロック機能、④通信妨害に対する対応などが挙げられる。このあたりは情報通信分野、特にネットワークセキュリティ分野の研究開発とオーバーラップしており、同分野や隣接分野の研究開発がセンサネットワークの発展にフィードバックされる形となっている（例えば暗号化技術における秘密計算など）。

こうしたセンサネットワークのセキュリティ面の重要性は、米「連邦サイバーセキュリティ研究開発戦略計画」（2019）でも明確に述べられている。「IoT デバイスは、演算能力、データストレージ、通信、利用可能な電力などのリソースが制限されていることが多々あり（…）デスクトップやサーバー環境では有効な認証、暗号化、セキュリティポリシー適用のアプローチはリソースに制約のあるデバイスには展開できない。（…）一般消費者向けデバイスのユーザーはサイバーセキュリティの訓練を受けておらず、セキュリティとプライバシーに関して確実

に正しい判断を下すことができない可能性がある<sup>212</sup>」。このような問題意識に基づき、同戦略計画は、「低コストのIoTデバイスやセンサネットワークのデバイスからサーバーコンピュータに至るまで、様々なハードウェアのコストと、脅威に比例する統合されたルートオプトラストの代替手段を開発する。ハードウェア層からアプリケーション層まで、保証された、認証済みセキュアブート、認証済みセキュアソフトウェア更新、認証済みセキュアソフトウェア実行のための技術を開発する」ことを研究開発目標に掲げ、開発を支援・推進している。

センサネットワークのこのようなセキュリティ面での課題に加えて、無論のことながら技術面でも研究開発が進んでいる。例えば、欧米では政府が科学技術政策の柱の一つとして支援・推進してきた。例えば、アメリカの科学技術推進施策である「NITRD 計画 (Networking and Information Technology Research & Development)」に基づいて、全米科学財団 (NSF) や国防総省高等研究計画局 (DARPA) などの政府機関が先端技術の開発を支援する体制を構築している。NSF はセンサネットワーク領域で「新しいセンサのコンセプトとデザイン (concepts and designs for new sensors)」、「分散環境下におけるセンサネットワーク (networked sensor systems in a distributed environment)」などに予算をつけて推進してきた。

プロジェクト名	概要
Integrated Smart-Sensor Networks for Monitoring Aqueous Environments	水中で動作するネットワーク接続されたセンサーのデザインと開発。環境モニタ、産業のプロセス制御、セキュリティ等に応用。
Architectures and Design Methodologies for Secure Low-Power Embedded Systems	センサーネットワークでのセキュリティ確保に必要な、ローパワーでセキュアな組み込み型機器の研究 (暗号アルゴリズム等含む)。
Toward a Petabyte Storage Infrastructure	センサーで収集した膨大な情報を保持するための記憶装置の開発。
Ad Hoc Wireless Networks Utilizing Multi-Rate and Power-Save Capabilities	アドホックネットワーク実現に必要なマルチレート、省電力の MAC プロトコル、各レイヤー間の相互作用と効率の関連性の研究。
MAC Protocols Specific for Sensor Networks	センサーネットワークにおける MAC 層プロトコルの研究及びユニークなアプリケーションの開発。
Technologies for Sensor-based Wireless Networks of Toys for Smart Developmental Problem-solving Environments	動的な無線ネットワークの形成、オブジェクトの自動認識と追跡、リアルタイムのセンサーデータの解釈、音声自動認識等の研究開発。
Collaborative Information Processing of Distributed Sensor Networks for Manufacturing Quality Improvement	分散型センサーネットワークによる製造業での品質管理の実現。センサーの協調動作による失敗分析、自己診断、最適配置等の研究。

<sup>212</sup> “Federal Cybersecurity Research and Development Strategy Plan,” December 2019, p. 16,

<https://www.nitrd.gov/pubs/Federal-Cybersecurity-RD-Strategic-Plan-2019.pdf>.

Intelligent Sensor Motes for Vertical Seismic Arrays	3次元加速度センサー、ジャイロ스코プ、磁力センサー、気圧センサーを備えた、多くのMOTEの連携による地震波観測システムの開発。
A Simulation-Based Test Bed for Networked Sensors in Surface Transportation Systems	ITS分野に用いるセンサーネットワークを迅速に評価するテストベッド及びそれを用いたデータ処理のアーキテクチャの研究開発。
A Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research	GPSを用いてリアルタイムに大気観測をするために、センサーネットワークとリアルタイムデータ配信の仕組みを活用。
Ocean Observing System Instrument Network Infrastructure	海洋観測システムにおいてセンサーネットワークからの情報を効率的に処理するための分散オブジェクト技術、XML技術、APIの開発。
Secure Data Distribution and Access in Large Sensor Networks	センサーネットに必要なセキュリティ確保、ノード間のデータアクセス時の省電力化をゲーム理論を活用して分析、フレームワーク開発。
Network Support for Distributed Sensing Applications	アプリの視点で、センサーネットから得られる情報の評価及びリクワイアメント、ネットワークの特性、センサーの処理能力等を研究。
Distributed Learning in Sensor Networks	センサーネットワークにおける無線通信や集めた情報の活用方法、情報処理をどのレベルで行うか、等の課題の解決及び適応方策の研究。
Water Security Networks: Sensors and Control	水質汚染を防ぐためのシステムとして、リスク評価、最適センサー配置、水中ネットワークの品質管理等の研究。

(図 5-12 NSF 支援のセンサネットワーク関連プロジェクト<sup>213</sup>)

#### (5) 軍事・国防上のインプリケーション

##### 想定・想像される用途／実用化に伴う戦術・戦略レベルの影響

センサネットワークは、すでに敵戦力の追跡や自軍兵力の保護などの軍事用途で幅広く利用されている。戦場にセンサネットワークを張り巡らせることで多くのことが実現できる。米軍の将来の戦闘システム（FCS）は、戦場で少ない装甲保護で任務を実行するために、敵ターゲットを検出、位置確認、識別するためのセンサネットワークの使用に大きく依存することになると指摘されている<sup>214</sup>。最新の国土安全保障（HLS）・テロ対策も、重要な民間インフラに対する

<sup>213</sup> 総務省「ユビキタスセンサーネットワークの実現に向けて最終報告」2004年7月

([https://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/chousa/yubikitasu\\_c/040730\\_2\\_s3.html](https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/yubikitasu_c/040730_2_s3.html)

)を基に筆者作成。

<sup>214</sup> J. Nemeroff, L. Garcia, D. Hampel, S. DiPierro (2003), “Networked sensor communications,”

MILCOM 2002 Proceedings, Vol. 2.

テロ攻撃を検知、位置確認、特定するためにセンサネットワークに大きく依存している<sup>215</sup>。Jain と Hussain が指摘するように、「軍事作戦において無線センサノードを使用することで、リスクを減らし、作戦効率を向上させ、何よりも死傷者数を最小にする<sup>216</sup>」ことができる。また、それゆえに軍事作戦におけるセンサノードの使用・展開において、センサーノードのセキュリティは不可欠であり極めて重要である。なぜなら、戦場においてセンサネットワークは、リプレイ攻撃、なりすまし攻撃、前方秘匿・後方秘匿、計算・通信オーバーヘッドの削減、バッテリー消費量の削減など、様々な攻撃や課題に直面しているからである。

戦術レベルでは、こうしたセンサネットワーク活用によって新たな戦術・作戦が可能となるプラスの影響に加えて、センサネットワークへの攻撃や敵陣に悪用されることによるマイナスの影響も考えられる。

戦略レベルでは、センサネットワーク技術の進展が、戦力や装備の見直しにつながっていくと考えられる。実際にセンサネットワーク技術に関連する無人機や監視・追跡システムの発展により、戦場（特に陸）での兵力の運用と体制は大きく変わった。それにより、通常の兵器体系や部隊の編成にも影響が出ているため、センサネットワーク技術は、戦略レベルで大きな影響をもたらしていると言える。

なおセンサネットワークの軍事用途の研究開発は、例えば、無人車両ナビゲーションシステムや<sup>217</sup>、真正性の認証、5G通信との連関<sup>218</sup>など多岐にわたる。今後技術の発展に応じて新たな利用方法が編み出されるかもしれない。

## (6) 経済産業・民生上のインプリケーション

本章第1節で述べたように、センサネットワークはすでに経済産業・民間で広く普及し、さまざまなサービスで利用されている。センサとネットワークの発達により、利用機会も拡大していき、市場規模や経済産業上の重要性も今以上に増していくものと見られる。

---

<sup>215</sup> Ibid.

<sup>216</sup> Usha Jain and Muzzammil Hussain, “Securing Wireless Sensors in Military Applications through Resilient Authentication Mechanism,” *Procedia Computer Science* 171 (2020): 719-728.

<sup>217</sup> Arun Madhu, and A. Sreekumar, “Wireless Sensor Network Security in Military Application using Unmanned Vehicle,” *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering* (August 2014): 51-58.

<sup>218</sup> Lt Col Anthony Tingle, “The Coming 5G Evolution in Network Centric Warfare: The Sensor Saturation Theory,” *The Mitchell Forum* No. 5 (November 2020): 1-11.

## (7) 日本の文脈におけるリスク分析

リスクシナリオとしては、①研究開発面での劣位（窃取によるリスク含む）から②市場での国産センサネットワークの敗退、③海外製センサネットワークの市場寡占／独占によるリスクの顕在化、というシナリオが想定される。海外製のノードセンサによるセンサネットワークがこの点で、提言があるとすれば、上述のような状況が生じた際に、国内企業によるセンサネットワークの供給を保護する措置を講じる想定した準備をしておくべきという点であろう。

## (8) 小括

以上の議論を踏まえて、本章の結論として次の4つの点について要点を整理したい。①当該技術の遍在性または遍在化する可能性、②社会的・軍事的重要性、③国内における代替手段の有無、④海外における代替手段利用の容易さ。

### ①当該技術の遍在性または遍在化する可能性

本章で見てきたように、センサネットワークの技術はすでに広く実用化・普及している。

### ②社会的・軍事的重要性

センサネットワークの社会的重要性は（すでに十分高いが）年々増しており、IoT やユビキタスネットワークとともにその流れは今後も加速していくと考えられる。またその影響は軍事的領域でも無視できるものではなく、各種センシング技術と同様に、小型センサノードを群で運用するセンサネットワークは、今後軍事領域での応用事例も増えていくと思われる。

### ③国内における代替手段の有無

「センサネットワーク」はネットワークシステムであり運用方法のことを指すため「代替」という設問が成り立たない。一方、センサネットワークの技術的コアであるセンサノードについては、開発している日系企業が複数社あるため、数社の代替は可能である。ただ、こうした日系企業が軒並み市場から撤退するような事態が生じた場合には大きな第4節で述べたようなリスクが表面化するため、対策が求められる。

### ④海外における代替手段利用の容易さ

外国企業においても開発提供している企業は数多くある。日本の友好国・同志国の企業も開発しているため、そうした国の企業から代替的に輸入して利活用することは可能である。

## 第6節 原子力エネルギー技術 (Nuclear Energy Technologies)

原子力エネルギーは人類が手にした最も強力なエネルギー源と言っても過言ではない。ウランという放射性物質の核分裂を利用して膨大なエネルギーを半永久的に作り出すことができるこの技術は、我々の生活や産業発展のエネルギー源として経済発展や科学技術の進歩に大きく貢献してきた。近年では原子力エネルギー技術の安全性の向上とより高度な効率化を目指し技術開発が進められているとともに、原子炉の小型化やモジュール化も積極的に研究が進められている。また、従来のウランの核分裂によるエネルギー生成とは別に水素の「核融合」を利用してエネルギー生成する新たな技術の研究も進められており、これが実現すれば人類のエネルギー供給の問題が解決されると大きな期待が寄せられている。

原子力エネルギー技術はまた、民間でのエネルギー供給の他に軍事技術とも密接に関わってきた領域である。そもそも原子力エネルギー技術と核兵器技術とは技術的な共通点も多く、それゆえに「核の平和利用」の名の下に核エネルギーを兵器ではなくて、エネルギー源に用いようという試みが20世紀後半を通じて行われてきたことは言うまでもない。しかし、近年ではエネルギー源としての原子力エネルギーを軍事領域に展開しようという動きも米国を中心に進められている。特に、小型モジュール炉の開発が進められる中で、民間の電源に依存することなく軍事オペレーションにおける安定したエネルギー共有を確立しようという動きが見られる。

本章では、エネルギー電源技術としての原子力エネルギー技術に焦点を当てながら、民生分野と軍事分野の両方でどのような技術開発や転用がされてきたのかを概観する。特に、近年注目されている「小型モジュール炉」の開発やエネルギー技術に革命的転換をもたらすと期待されている「核融合」を中心に近年の技術動向を解説する。その上で、こうした技術開発が宇宙開発や軍事技術領域にどのように用いられようとしているのか、あるいは国防省等の安全保障アクターがどのような分野に関心を示してきたのかを明らかにする。

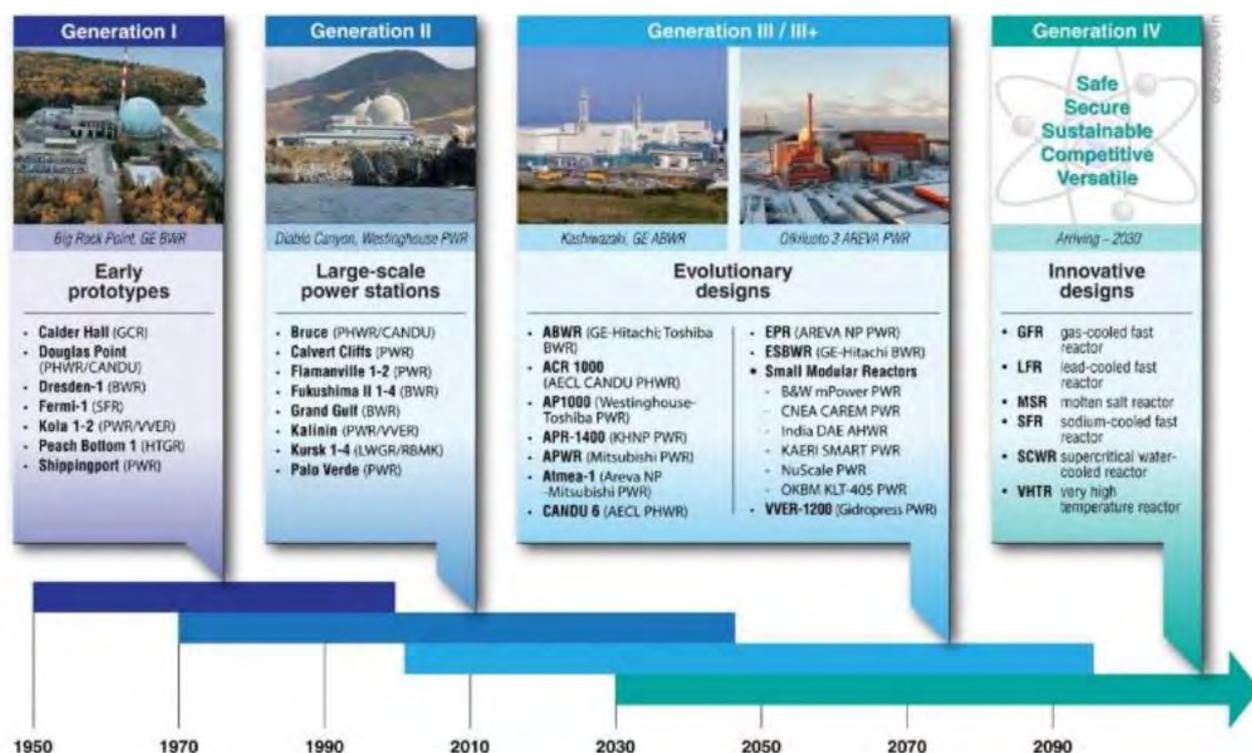
### 1. 原子力エネルギー技術のこれまで

1950年代に原子力発電所が実用化されて以来、21世紀に至るまで革新的な発展を遂げてきた。原子炉技術に関して、初代の「第1世代炉」から1970年代には「第2世代炉」にあたる現行の軽水炉が実用化された。スリーマイル島原発とチェルノブイリ原発での事故を契機に技術改良がさらに進められ、1990年代にはさらに改良が進んだ軽水炉である第3世代炉<sup>219</sup>が台頭するよ

---

<sup>219</sup> 第3世代炉の中でもさらに改良が進み高い安全性を確保した原子炉を「第3+世代」と呼ぶこともある。

うになった<sup>220</sup>。1990年代から2000年代にかけての原発への回帰が見られたが、2011年の福島第一原発の事故の後、各国で改めて原子力発電への方針が議論された(図6-1)。こうした中でより高い燃料効率と安全性を誇る「第4世代炉」が2030年頃の実用化を目標に2001年に設立された「第4世代原子力システム国際フォーラム<sup>221</sup>」(GIF: Generation IV International Forum)の枠組みの中で研究開発が進められてきた。今年にはカーボンニュートラルの実現を目標に中国が第3世代炉6基の建設を許可する等、各国でも実用化が進められようとしている<sup>222</sup>。



(図6-1 原子炉開発の軌跡<sup>223</sup>)

<sup>220</sup> 資源エネルギー庁「世界の原子力技術の動向を追う」(2018年4月25日)

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nucl ear/nucl eartechology.html>

<sup>221</sup> GIFには米国やEU、中国、日本を含む13ヶ国と1機関で構成されている。当該枠組みの詳細は以下のHPを参照。<https://www.gen-4.org/gif/>

<sup>222</sup> 東洋経済「中国政府が「第3世代原子炉」6基の建設を認可」(2022年5月12日)

<https://toyokeizai.net/articles/-/585515>

<sup>223</sup> 小野清「第4世代原子炉の開発目標と展望」(日本原子力研究開発機構, 平成30年3月26日)

[http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/AESJ-2018S-SDG\(1\).pdf](http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/AESJ-2018S-SDG(1).pdf)

## 2. 小型モジュール炉への期待

発電所規模の原子力発電技術と並行して、より小型で移動が可能な小型モジュール炉 (Small Module Reactor: SMR) も持続可能なエネルギー供給を実現する技術として注目されてきた。SMR は、従来の第2世代炉や第3世代炉の軽水炉型の原子力発電技術の派生型であるが<sup>224</sup>、従来の1,000 MWe 超を誇る発電所規模の原子力発電とは異なり、1基毎の出力を300Mwe 以下と小さくすることで、原子炉の冷却を容易にし、安全性を高めた小型原子炉である。文字通り、工場ユニット(モジュール)を製造し、現地で組み立てることができるため、通常の大規模電源では供給が難しい僻地にも十分な電力供給を行うことができる<sup>225</sup>。日本では三菱重工業や日立(米国GEとの合弁会社)といった重電メーカーが研究開発を手がけている<sup>226</sup>。世界各国でもSMRの研究は進んでおり(図6-2)、例えば、2020年5月にはロシアの国営民生用原子力発電公社ロスエネルギーアトム社が、SMRの一種である世界で唯一の海上浮揚式原子力発電所(FNPP)「アカデミック・ロモノソフ号」の営業運転を開始している<sup>227</sup>。

---

<sup>224</sup> OECD, *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*. (Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation And Development, 2021)

<sup>225</sup> 日本原子力研究開発機構「海外におけるSMRの開発・導入動向」(2021年10月14日)  
<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/ordinary/2021/20211014.html>

<sup>226</sup> 日本経済新聞「小型モジュール炉とは 次世代電源として期待」(2021年10月13日)  
<https://www.nikkei.com/article/DGXZ00UA129210S1A011C2000000/>

<sup>227</sup> Rosenergoatom Rosatom, *Rosatom: World's Only Floating Nuclear Power Plant Enters Full Commercial Exploitation*. (22<sup>nd</sup> May 2020) Retrieved from <https://www.rosenergoatom.ru/en/journalists/highlights/35050/>