

米国情報 2024年3月分

日脈グローバル株式会社
米山

- 米国における原子力発電を巡る現状の課題と今後の見通し
(環境面(Enviroment)、エネルギー安全保障面(Energy security)、経済面(Economy)の3つのEの視点を念頭に)、加えて、今後注目すべき重要トピック(SMRなど先端技術、原子力発電商用化の動向、政府政策・計画、使用済み燃料などの社会問題など特筆すべき事項について)

はじめに

米国の原子力発電の現状と今後の見通しを考えるにあたり、まず同国の現状を確認したうえで、一旦過去に戻って戦後の原子力エネルギー政策と振り返る。その上で浮き彫りになる課題と特筆事項及び今後について論考する。

1. 米国における原子力発電を巡る現状

① アメリカの原発の実態 ソース： EIA、IAEAほか

現在、米国内に93基の発電用原子炉が稼働中で、そこにジョージア州の2基が加わる。2022年時点でこれらの原発はアメリカの全電力の18.2%を供給している。

約半分の47基が南部に位置し、22基が中西部、18基が北東部そして6基が西部にある。

その数は1990年の111基をピークに着実に減ってきており、現在稼働中の最古のものは1969年に稼働を開始したニューヨーク州にあるNine Mile Point-1。

② 早期退役の危機を免れつつある原子力発電所 ソース：フォーブス

再生可能エネルギーの価格低減と天然ガスの低コストが原子力発電所の収益を急速に悪化させ、数十もの原子力発電所が早期退役の危機に直面している。

現在アメリカのクリーンエネルギーの約半分を供給している原子力発電所が予定より早くリタイアすれば、その不足分は再生可能エネルギーでは補いきれず、結局化石燃料消費の発電により二酸化炭素の排出は増え、2030年、そして2050年に向けた脱炭素化への米国のコミットメント達成が危うくなる。

そこで議会と連邦政府は2021年のインフラ法と22年のIRAの2つの法律を通じ稼働中の原発の収益性改善の枠組みをつくり、また州政府も独自に支援を提供することで少なくとも22基の原子炉を退役から救うと共に、既存の原発をすべて少なくとも2032年間まで稼働させようとしている。

並行して次世代のモジュラー型の柔軟な原子力発電所建設のための資金供与も始まっている。

2. 米国の原子力発電のこれまでの推移 ソース： World Nuclear Association

① アメリカのこれまでの原発政策

原子力発電の開発は原爆を開発したマンハッタンプロジェクトを引き継ぐ形で、政府のプログラムとして1945年に始まった。

1951年にアイダホの原子炉試験ステーションで初の民生用原子炉が電力をつくり、1950年台半ばには民間にその技術が解放されていった。

世界初の大規模原子力発電所がペンシルベニア州 Shippingport に建造された。この原子力発電所は原子力委員会にて所有されたが、建造と運用は民間の電力会社にてなされた。今日米国の原発のほとんどが民間企業に保有されている。

米国は世界のどの国よりも原発の民活が進んでいるが、政府の果たす役割も大きい。建造物や原子炉、核燃料などの安全性の担保のための審査はもとより新たな原子炉や燃料サイクルの研究開発、気候変動問題に対するクリーンエネルギーとしての運用や新規投資へのインセンティブの提供、外交、貿易、国防に関わってくるためである。

原子力規制委員会は建造認可、運用の認可から新規の原子炉の設計認可、値上げ申請や許認可の更新を行ってきた。

② 州政府や地方政府の原発政策への関与

1976年にカリフォルニア州の州民投票で州内に新規の原発を建造することを禁止する州法をつくった。

7万トンもの高レベルの使用済み核燃料をネバダ州のユッカマウンテンに最終貯蔵していくという連邦政府の長期計画は同州の州民の強い反対で2009年にオバマ政権が破棄している。

③ 米国のエネルギーミックスと原子力の位置付け

1977年、カーター大統領は科学技術委員会にその時点の米国のエネルギーポートフォリオを調べたうえで次世紀に向けたエネルギーニーズに対する提言をするよう諮問した。

同委員会による主要な提言の1つに原子力のキャパシティ拡大を阻害する資本コストや核廃棄物処理及び核兵器拡散のリスクといった要因をクリアしていく集中的な研究開発投資の必要性があった。

この提言に対し、原子力エネルギー研究イニシアティブ（NERI）が1999年に創設され、全米の研究所や大学及び企業の研究施設に資金が投じられるようになった。

2004年、NERIは政府の主たる原子力エネルギー研究開発プログラムである新型燃料サイクルイニシアティブ（AFCI）、第4世代原子力エネルギーシステムイニシアティブ（GenIV）及び原子力水素イニシアティブ（NHI）を推進するような大学の研究プロジェクトに集中して資金投下されることとなった。

④ 新型燃料サイクルイニシアティブ (AFCI)

新しい燃料サイクル技術の開発はエネルギー省創設以来の悲願であったが、その予算が急速に増えたのは近年であり、その背景に高レベル廃棄物を管理する必要性と民生用にプルトニウムを別途つくることを避ける必要性、そして次世代原発向けの燃料サイクルを開発する必要性がある。

⑤ Energy Policy Act 2005 議会主導の原発推進

新規原発建設のための税還付をこの法制で定めた。

最初の8年間の6000メガワットの発電量にキロワット当たり1.8セントを還付する。

当該原発は2020年12月末までに運用を開始していること。税還付の最大値は60億ドル。

この税還付が2021年1月以降に稼働する原発にも6000メガワット分に延長適用されることとなった。

最新型原発6基のフル稼働が行政手続きで遅れて収入が得られない場合の20億ドル分の連邦保証もあり。また、廃炉資金のための税優遇もある。

他に、新型原子炉等脱炭素技術の総費用の80%までの融資保証や、プライス・アンダーソン法（原子力損害賠償制度）の20年延長適用もうたわれた。

⑥ 原子力発電所延命事業

エネルギー省は2012年に軽水炉の運用寿命を、60年を超えて延命する場合に必要な問題点を確認し、研究する計画を発表。

Idaho National Laboratory (INL)での研究開発を企業とも連携し、修理・交換すべき主要部品の判断やライセンスの許可のポイントなどを課題としている。

⑦ 次世代原発

2005年のEPAでプロジェクト化され、高温ガス冷却炉を用いた設計が進められていたが、オバマ政権において予算が抑制され、アレバを中心とした企業チームとの間で齟齬を生じており、失速。

次世代原発として電力とともに水素を生産する新型高温原子炉をINLで2021年までに建造する資金として12.5億ドルが承認されている。

⑧ エネルギー省のイニシアティブ — 新規原発建造のためのローン保証

エネルギー省は2008年に新型原発建造で最大185億ドル、ウラン濃縮工場に最大40億ドルの融資保証を手配。

これに対し、17もの電力会社化21もの原子炉を含む14基の原発の申請があり、総額は185億ドルをはるかに超える1,220億ドルとなった。このため、2010年に増額が図られ融資保証額は545億ドルまで拡大した。

現在建造中のジョージア州のVogtle原発では2019年までに120億ドルの保証がなされている。

2014年12月にエネルギー省は新たに106億ドルの融資保証枠を新型原子炉と小型モジュール原子炉向けに、20億ドルを核燃料濃縮プログラム用に用意した。

2014年11月原子力協会は106億ドルの融資保証枠はギガワット当たり70乃至80億ドルの原発建設費用から鑑みて明らかに小さすぎると指摘。

⑨ SMR

2017年にNuScale Powerは米国で初となる小型モジュール原子炉（SMR）建造のためのローン保証を申請。

ユタ州の地方電力公社(UAMPS)が所有者となり、アイダホ国立研究所に建造される予定であった。

2023年2月の時点ではUAMPS)は建造予算と必要な融資を前向きに進めていたが、同年11月にこのSMR建造プロジェクトはキャンセルされた。

理由はプロジェクト存続に必要な当該電力への加入料の80%に満たなかったため。

⑩ 米政府のこれまでの原発の研究開発投資政策

米政府のエネルギー政策に関する補助金と研究開発支援は2007年時点で1999年のレベルの倍の166億ドルとなっていた。

この中で67.5億ドルは電力生産に支出され、60億ドルは研究開発と補助金に使われた。

原子力の研究開発では922百万ドルが割り振られ、内訳は新規原発の設計と核拡散防止の燃料サイクルに350百万ドル、原子力エネルギーと研究サイトのクリーンアップに350百万ドル、アイダホの施設と管理に253百万ドルとなっている。

⑪ Nuclear Power 2010 官民パートナーシップ

2002年にエネルギー省が発表したこのパートナーシップは第三世代の新型原発を官民のコストシェアで建造する拍車を促すもの。

ライセンス申請の準備のためのマッチングファンドを提供したり、建設と運用の許可をまとめてNRCに申請したりする手続きを促した。その結果、電力会社とベンダーのコンソーシアムがいくつも生まれ、結果として上記のまとめ申請が17件もなされた。

ただ、オバマ政権はこのパートナーシップ予算を大幅に削減、2009年の177.5百万ドルから2010年には20百万ドルにまで絞り込んだ（結局議会が105百万ドルつけた）。

米国としてエネルギー自立、脱炭素、経済成長の方向性は不変だが、各政権でその方向における原子力の位置づけがシフトする。

⑫ 国立研究所の位置づけ

米国における原子力に関する基礎研究から応用研究までのほとんどがエネルギー省の21もの国立研究所でなされている。

多くの原子力研究プログラムが2005年にアイダホ国立研究所（INL）に移管された。INLの母体は、同じ場所に元々1949年に創設されたIdaho National Engineering and Environmental Laboratory（INEEL）とArgonne National Laboratory West（ANL-W）が統合されたもの。

INEELには研究開発用に52機もの異なる原子炉が設計され、試験されてきた。その中には1951年に米国で初めて発電した原子炉もある。

ANL-WではNASAのために原子力による宇宙船推進システムが開発されてきた。

現在INLは第4世代原子炉の国際フォーラムへの米国の参加のリーダー役を務めている。それと並行してINLは米国の次世代原子力発電所や様々な新型燃料サイクルプロジェクトを開発中。

加えて、INLでは高レベル核廃棄物廃棄のための手続きをエネルギー省の民間放射線廃棄物管理局と共に策定中である。

サウスカロライナ州のSavannah River Siteのエネルギー省の施設では最大15基もの小型原子炉のプロトタイプか実証モデルの集合体を設置することが提案されている。

テネシー州にあるOak Ridge National Laboratoryは米国におけるトリウム技術の知的集積所となっており、中国の科学学会と協働している。

またここでは85メガワット級高中性子束アイソトープ原子炉が米国で最大の中性子研究用原子炉となっており、世界で最も高安定中性子束の一つとなっている。

燃料は高濃縮酸化ウランアルミサーメット燃料を用いている。

エネルギー省は全米70以上もの大学に資金を支出して研究委託を行う一方、同省の上述の様々な研究所に民間部門から研究者を雇い入れている。

上述のSavannah River Siteでは国防廃棄物処理施設が1996年から2014年までの間に生じた6800トンもの高レベル放射廃棄物のスラッジをホウケイ酸ガラス状にし、3877ものステンレス鋼のキャニスターに詰め込まれた。全部で8582のキャニスターが必要とされる。これらのキャニスターは国の高レベル廃棄物貯蔵場所にいずれ持ち込まれる。

2020年にはこのSavannah River SiteにおいてSalt Waste Processing Facility（SWPF）が稼働を開始し、117百万トンもの放射性塩（その施設での主たる液体廃棄物）を10年かけて処理する。

このSavannah River Siteで核廃棄物は冷戦時代を通じてなされた国防関連の使用済み核燃料再処理から生じたもの。実際の作業はURS社やベクテル、CH2M及びBabcock & Wilcoxのチームによりなされている。

SWPFの施設の設計、建造及び運用はParsons社が行い、アレバ、EnergySolutions及びURS Professional Solutionsが下請けで入っている。

⑬ 新型原子炉実証プログラム (Advanced Reactor Demonstration Program: ARDP)

2020年にエネルギー省は総額32億ドルものこのプログラムをスタートさせ、7年以内に2基の新型原子炉を建設することを目指した。

ARDPの狙いは建設及び運用費用を抑えること。

2030年代半ばでの商業利用の可能性を睨む。

試験評価はINLのNational Reactor Innovation Center (NRIC) にて行われる。

NRICは2019年にエネルギー省によるGateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN) イニシアティブの一環で創設され、新しい原子力技術の開発と商用化を加速する狙いがある。

2020年にTerraPowerとX-energyが実証プラント建設でエネルギー省に選定された。前者はGE Hitachi Nuclear Energyと共にナトリウム拘束中性子原子炉を建造する一方、後者はXe-100高温ガス冷却小型モジュール原子炉4基とTRISO燃料プラントを建造する。納期は7年以内。それとは別に5つの企業チーム (Kairos Power, Westinghouse, BWXT Advanced Technologies, Holtec及びSouthern Company) が10乃至14年以内に比較的廉価な原子炉を開発する契約をエネルギー省から受注した。

X-energyは2021年にEnergy Northwest等と組んでワシントン州にXe-100を設置することで合意。24億ドルの総工費の内の半分がARDPから拠出され、納期は7年。

同年、TerraPowerはワイオミング州の石炭火力発電所の跡地にナトリウム原子炉の実証プラントを建設する計画を発表。ベクテルもこのコンソーシアムに参加、2023年建設申請、2026年に稼働申請を行う予定でいた。ところがHALEUウラン燃料を供給するロシアが2022年にウクライナに侵攻したことから遅れが生じている。

⑭ Versatile Test Reactor (VTR)

2026年までに高速スペクトラム中性子照射能力を確立するというこのVTRプログラムは2017年の原子力イノベーション能力法と2020年のエネルギー法により承認された。

2018年にINLはGE Hitachi Nuclear EnergyにVTRの開発支援契約を発注。

この試験炉は60年の運用を通じ現在進行中の原子力技術の進化を支援する。

⑮ Nuclear Hydrogen Initiative

原子力設備からの熱を利用して商用規模の水素を生産する能力を実証する研究が長年行われてきた。

エネルギー省はインフラ法の資金を用い、750百万ドルの資金で水素生産コストを1kg当り1ドルにまで削減する技術を10年以内に確立する計画を2022年12月に発表した。

⑯ 2022年インフレ削減法 (IRA) の効果

- 原子力を含めすべてのエネルギー生産技術に関するローン保証400億ドル (2026年9月

まで有効)

- 高濃度低濃縮ウラン (HALEU) の多用で市場に基づくサプライチェーンづくりを支援する資金として7億ドル (2026年9月まで有効)
- 再生可能エネルギーのPTC及びITCを代替するクリーンエネルギーの生産と投資に関する税控除 (2025年から2032年まで)
- アイダホ国立研究所の新型試験炉と燃料のインフラ改良を支援する資金として1.5億ドル (2027年7月まで有効)

⑰ これまでのイノベーション

原子力の非軍事的利用のほぼすべての連邦政府のプログラムはエネルギー省のOffice of Nuclear Energy (ONE)にて管理運営されている。

そこには次世代原子力発電所の研究開発や新型燃料サイクル技術、新たな原子炉の建設のための官民パートナーシップ予算付けおよび国立研究所での原子力関連プロジェクトの運営と予算付けが含まれる。

こうした原子力関連プログラムの予算は政府の①エネルギー自立、②脱炭素および③経済成長に伴うエネルギー需要増大の3つのニーズに沿う形で増大してきた。

但し、オバマ政権時それらの予算は減らされ逆に再生可能エネルギーとエネルギー効率化、保存のほうに予算が多く付与された。

2015年3月に出された原子力に関する報告書では発想はあっても実現していない技術などについて触れている。

原子力分野でイノベーションが少ないことの原因として何か特別な研究や時に危険な研究を行うために施設にアクセスすることが非常に困難である点が挙げられる。

これは原子炉の安全性と信頼性を確実なものとするのが基本となるため。

テストベッドのコンセプトとしては、基礎研究で原子力技術の開発のための技術リスクを削減するための試験を個別に行うものから、商業化のためのフルスケールの原子炉のプロトタイプのものにまで適用される。

国立研究所でのものから個別の技術的なものまでテストベッドは象牙の塔と産業の間の効果的な橋渡しを提供してくれる。

上述の報告書の主要な提言は以下の4点である。

- 原子力の広範な活用の価値を補強するように対話を進めること
- 重要な能力へのアクセスを提供する国立のテストベッドを指定すること
- 最新の原子力技術を規制要件に取り込むためのよりよいアプローチ
- 規律と焦点を持った研究開発

⑱ 国際的枠組み

a. 再処理

先進国間で核拡散予防の見地から核燃料再処理の技術を進め、濃縮や再々処理しないことを条件に生成物を途上国に提供するGlobal Nuclear Energy Partnershipという枠組みを2006年に打ち出したが、オバマ政権は国内で最早商業用再処理を行わないとしてGNEPの枠組みをキャンセル。

その後、International Framework for Nuclear Energy Cooperationとして復活している。

b. ロシアとの枠組み

ロシアの核兵器を2013年までに米国の民間用核燃料の需要の半分に転換するMegatons to Megawatts計画があった。

1993年の合意でロシア製核弾頭の500トンもの高濃縮ウランを低濃縮ウラン燃料として米国内に持ち込むもの。

2013年までに2万発の核弾頭に相当する高濃縮ウラン燃料が米国にUSEC経由売却された。

この動きに合わせて、エネルギー省は米国自身が持つ高濃縮ウランと核兵器級のプルトニウムの余剰分を国内民間原発用に変換することを発表。

⑱ 原発輸出の取り組み

米国原子力法の第123項に基づく合意書を取り交わした相手国に原子力技術や燃料を輸出してきた。

インドや中国とも取り交わしており、2011年にはロシアと協力協定を交わしている。ただ、国際市場ではロシアや韓国に席卷されている。

⑳ 核廃棄物

軍用を含め官民の使用済み核燃料と研究用原子炉の廃棄物は同じ地質に貯蔵廃棄するべく議会で数十年に渡り議論しているが結論が出ていない。一方、海軍の使用済み核燃料はINLに貯蔵されている。

1983年の核廃棄物政策法が1987年に修正され、ネバダ州のユッカマウンテンに7万トンもの高レベル廃棄物を貯蔵すると指定された。

ただ、予算不足や法的課題そして地元の反対などで実行化できていない。

2009年にオバマ政権はこのユッカマウンテン貯蔵地計画をキャンセルした。が、原子力規制委員会は議会が定めた法でうたう貯蔵地以外を行政が定めてはならないとしてユッカマウンテンを貯蔵候補地とした手続きを取ることを求めた。

核廃棄物の最終貯蔵費用として電力会社は1kWh当り0.1セントの費用をエネルギー省に収め、それは2010年1月までで投資金利を含め310億ドルとなり、うち80億ドルがユッカマウンテンプロジェクトに支出されてきた。

その後も、電力会社から年750百万ドル、投資金利から10億ドルが積みあがっている。
現状約8万5千トンの使用済み核燃料が各原子炉サイトに保管され、その内40%がドライ
キャスクに中間貯蔵されている。

使用済み核燃料は年間約2千トンのペースで積み上がっている。

核廃棄物最終貯蔵場所が定まらない中、原子力規制委員会は2011年、使用済み核燃料を
原子炉の運用機関の60年に加え、廃炉後少なくともさらに60年間以上同じ場所に貯蔵する
ことを認める判断を下した。

この判断に対し環境面への悪影響に関し法的訴えがあり、同委員会は580ページに渡る
Waste Confidence Generic Environmental Impact Statementを出して検証を行い自らの
判断を支えると共に、中断されていた新規原子炉の建設・運用許可を2012年に再開した。

米国の核廃棄物政策法は核廃棄物貯蔵場所選定において当該州に拒否権を与えている
(但し議会両院での投票でオーバーライドは可能)。

オバマ政権時の2013年にエネルギー省は核廃棄物管理を専管とする庁をエネルギー省と
別に設け、2025年までに大規模中間貯蔵施設を、2048年までに地下の最終永久貯蔵施設を
設けるという戦略を発表、議会もそれに沿った法案をつくったが実現に至っていない。

3. 原子力に対する米国内の世論

ソース：ピューリサーチセンター

昨年5月30日から6月4日にかけて行われた世論調査では57%の回答者が原発による電力供給を支持すると回答。これは2020年の43%から大きく伸びている。

とはいえ、太陽光発電と原発では前者を好む割合が82%、風力を好む割合でも75%と再生可能エネルギー志向は強い。

原子力発電に批判的な人々はそのコスト高と放射性廃棄物の問題を挙げる。

党派別では民主党支持層と民主党寄り無党派層は、2020年時点で原子力依存度を高めることを支持する割合は37%であったのに対し、昨年の調査では約50%に増大、共和党支持層と共和党寄り無党派層では2020年で53%であったものが67%に拡大支持を増やしている。

また、原子力に関する政府の役割として、政府が支援すべきと答えた割合は41%と2022年より6ポイント上昇した。

ただ、66%は再生可能エネルギーをまず支援すべきと回答。

原子力発電の増強や政府支援を支持する割合は、前者が54対28、後者が71対44で男性の方が女性よりもはるかに高い。

4. 原子力の将来

① 小型原子炉

ソース：ニューヨークタイムズ

二酸化炭素を排出せず、再生可能エネルギーのように時間帯や季節を選ばず、24時間365日安定して稼働する原子力発電の長所は大きいものの、その建造費と時間がネックとなっている。

60年代、70年代と新規原発を建造するとともに規制当局は安全基準を高め、それが費用の積み上げや遅れをもたらし、80年代になってその雪だるま的費用増大に恐れをなして新規建造を考える電力会社がいなくなった。

ただ、ジョージア州のVogtleでの新規原子炉2基の建造計画は最新の安全性を担保する特徴を持った従来と異なる新型のデザインによりコストコントロールが可能となるという前提で2008年にジョージア州とサウスカロライナ州の電力会社が建造申請を行った。ところが何も計画通りにはいかなかった。

デザインが完全に終了する前に建設が始まり、建設の途中で大幅な変更が必要となった。部品の到着も遅れ、1200トンもの異形鉄筋を作業員が設計と少し異なる形で据え付けた為、規制当局での審査が7カ月半遅れた。

サウスカロライナ州の全電力会社連は90億ドルもの資金をつぎ込んだ後の2017年に撤退を表明。その内の一社は倒産し、幹部2名は詐欺の有罪判決を受けた。

ジョージア州の電力会社連のみが本プロジェクトを推進中だが、その電力消費者はこのプロジェクトのために既に世帯当たり900ドル余計に支出しており、今後月に9ドル余計に支払うことになる。

現状建設費は350億ドルがかかり、これは当初見積もりの倍以上、そして時間は予定より7年長くかかっている。この事実からして新たな原発への資本投下を思いとどまらせている。

その費用と時間の解決策として小型標準型原子炉が登場してきている。

GE Hitachi Nuclear Energyによる300メガワット級の沸騰型原子炉、TerraPowerのナトリウム冷却型原子炉は軽水炉よりも内圧を下げシールドを軽量化、カリフォルニア州にあるOkloは同じナトリウム冷却型でもさらに小型の15メガワット級原子炉でアラスカのへき地への電力供給や電気トラック向け充電ステーション用を検討中。

メリーランド州のX-Energyはガス冷却ペブルベッド型原子炉で電力と共に熱も供給する計画。ダウ社はこれを4基導入し現在稼働中の天然ガスタービンを代替する予定。

これらの新しい原子炉のアイデアはシカゴ郊外にあるアルゴン国立研究所での様々な原子炉設計の蓄積からきている。

連邦政府も州政府も国民もかつてないほど原子力に熱いまなざしを送っている。

原発建設を州法で禁じたカリフォルニア州のニューサム知事はDiablo Canyonの原発を延命稼働させようとしている。

同様に原発建造を州法で禁じていた5つの州が方針転換をした。
テキサス州とバージニア州では新規原発建造のための投資を募っている。

とはいえ相変わらず最初の小型原子炉建造計画¹がやはりコストの問題で昨年キャンセルになっている。

原子力規制委員会はこの新しいそれぞれの技術に関する経験に乏しいことからその審査に長い時間がかかるという問題、新型原子炉用の特別な燃料の確保の問題、そして従来からの放射性廃棄物の問題もある。

② 核融合

ソース：IAEA

<https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion>

核融合エネルギーは、温室効果ガスや放射性廃棄物の副産物を放出しない、クリーンで豊富な電力をもたらす。

重水素と三重水素からなる1キログラムの核融合燃料は、1千万キログラムの化石燃料に匹敵するエネルギーを供給する。

核融合の研究が始まってからすでに70年以上が経過しているが、核融合エネルギーが成功裏に展開されるまでにどれだけの時間がかかるかは、世界的なパートナーシップと協力を通じて資源を動員し、産業界がいかに早く新たな核融合技術を開発し、検証し、適格性を確認できるかにかかっている。

もう一つの重要な問題は、この未来のエネルギー源の実現に関連する要件、基準、優良事例など、必要な原子力インフラを並行して開発することである。

a. 核融合の開発

研究は50カ国以上で行われているが、主にアメリカ、フランス、日本が主導している。専門家たちは、核融合が行われるさまざまな設計や磁石を利用した装置を考案してきた：

<磁石を使った装置>

- 「ステラレータ」と「トカマク」：国際原子力機関（IAEA）は、これらのコンセプトを将来の核融合発電所として最も有望なものとして挙げている。
- レーザー：ローレンス・リバモア国立研究所（米国カリフォルニア州）は、2022年以降2度、正味のエネルギーを生成することに成功している。
- リニア・デバイス：TAEテクノロジーズ（米国カリフォルニア州）は、この開発における現在の世界的リーダーである。
- 先進燃料：プロトン・ボロン-11（P-B-11）。P-B-11は将来の燃料となりうるが、核融

¹アイダホに2030年までに建設予定のNuScale社の77メガワット級小型原子炉6基

合反応を維持するためには重水素やトリチウムよりもはるかに高い温度が必要である。TAEテクノロジーはこの問題に対処するため、クローズドなコンセプトを開発した。

b. ローレンス・リバモア国立研究所におけるレーザー核融合のブレイクスルー

ソース： ガーディアン

カリフォルニア州にあるローレンス・リバモア国立研究所の米科学者たちは、核融合反応で2度にわたってプラスの「正味エネルギー」を達成した。

一度目は2022年12月、二度目は2023年8月である。

2022年12月のブレイクスルーは、レーザーを使った核融合実験によって達成された。この実験では、レーザーが2.05メガジュールをターゲットに照射した後、3.15メガジュールのエネルギーを発生させ、「核融合点火」を短時間で達成した。

c. 核融合の課題

この技術を核融合発電所に導入するには、現在いくつかのハードルがある：

- ターゲットペレットはレーザーが投入した以上のエネルギーを放出したが、この計算にはレーザーのパワーアップに必要な300メガジュールは含まれていない。
- 国立点火施設（NIF）のレーザーは1日に1回発射されるが、核融合発電所では1秒間に10回ターゲットを加熱する必要がある。
- 実験に使われる燃料ペレットのコストは現在数万ドル。この価格が実現可能になるには、（他の利用可能なエネルギー源に匹敵するレベルまで）大幅に下がる必要がある。
- 核融合で発生する熱から実際にエネルギーを取り出す、あるいは利用する方法。
- 有用なエネルギーとして十分な時間、エネルギーを維持する方法。

d. 核融合の現実性

ローレンス・リバモア国立研究所所長のキム・ブディル博士は、十分な投資があれば、“数十年の研究でNIFは発電所を建設できる状態になる”と見積もっている。

オックスフォード大学の教授で、オックスフォード高エネルギー密度科学センター所長のジャスティン・ワークは、「核融合発電の課題を克服するのにどれくらいの時間がかかるかを問うのは、ライト兄弟が初飛行した直後に、大西洋を横断する飛行機を作るのにどれくらいの時間がかかるかを問うようなものだ」と述べた。

核融合発電がエネルギー危機に対する偉大な解決策であると誰もが考えたがっているのは理解できる。ただ、その実現が「現実的に確実だ」と言う人は誤解を招きかねない。”

【考察】

今回の調査を通じて感じたのは原子力に関わる経済、エネルギー安保、環境の3つのEに加え、敵（Enemy）の核兵器技術や自らの核兵器の廃棄物処理を含めたエコシステムという4つ目のEがアメリカの原子力（発電）政策に影響を及ぼしているとの印象である。

確かに冷戦時に蓄えた核兵器と廃棄物処理のインフラなどは冷戦勝利後には無用の長物となり気味であり、実際1987年には中距離核戦力全廃条約が米ソ間で合意され、オバマ政権時代にはロシアとの間でSTART II条約が締結され互いのICBMの核弾頭を削減することが合意されていた。

ところがプーチン政権が化石燃料の輸出から経済力を伸ばし、それを軍事力に反映するようになってからロシア側の核兵器削減合意履行が怪しくなり、トランプ政権で上述の中距離核戦力全廃条約が失効され、バイデン政権はオーストラリア海軍向けに原子力潜水艦の技術提供を認めたり、ロシアが年内にも宇宙に核兵器を配備するという懸念への対抗策が検討されたりしている。

同様に中国の兵力増強、北朝鮮、イランの核開発もアメリカをして最先端の核兵器技術の追求や小型化技術とその燃料開発、そしてその廃棄物処理のエコシステムの増強などへの投資が求められ、その派生としての民生技術に転換されるイノベーションが生じる可能性があると考ええる。

それは即ち、インターネットや半導体、GPSなどのイノベーションがEnemyに対する軍事技術から来たEconomyのEの一部ともなり得る。

また、フラッキング技術といったエネルギー生産技術のイノベーションで米国が化石燃料のエネルギー安全保障のEを一気に強化できたように核燃料の処理技術などでブレークスルーが生じればそれはエネルギーのEとして大きなインパクトを持つと考える。

環境のEのお陰で強い追い風が原子力に吹いているうちに米国の官民の研究開発投資が新たなイノベーションを産むかが注目される。

以上