

原子カイノベーション政策の追求

2018年12月5日
資源エネルギー庁

第5次エネルギー基本計画（2018年7月3日閣議決定）

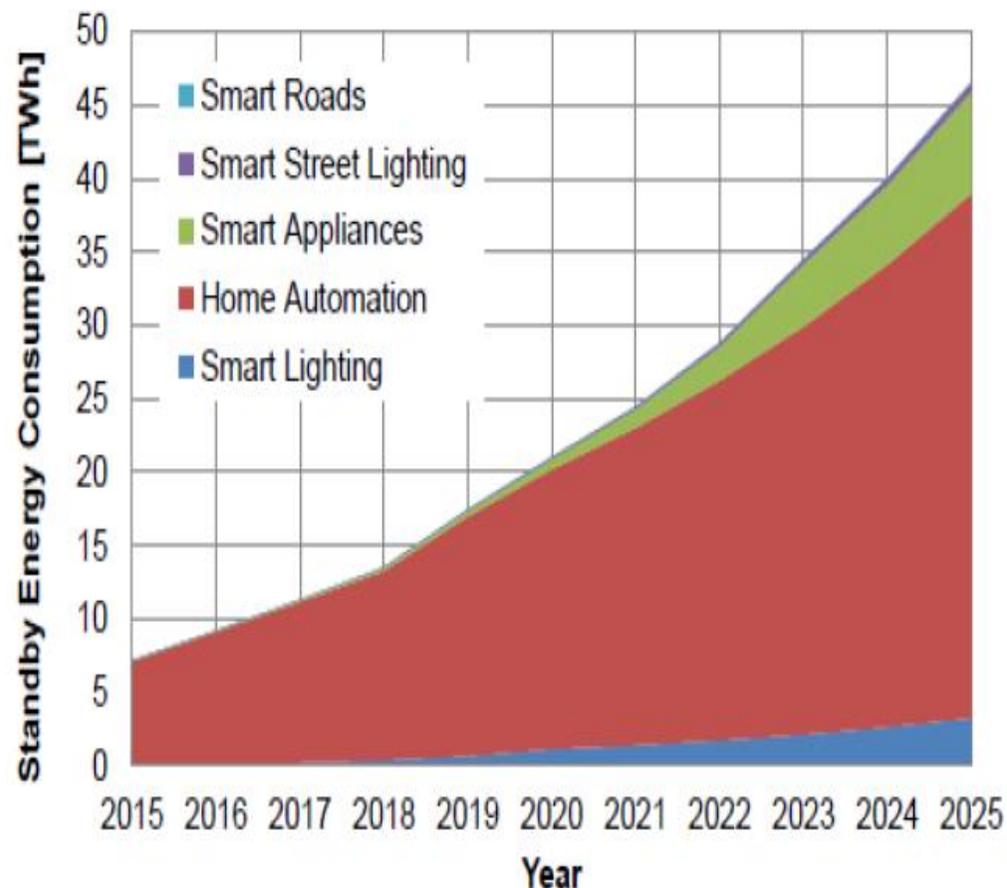
- 現状、実用段階にある脱炭素化の選択肢である原子力に関しては、世界的に見て、一部に脱原発の動きがある一方で、エネルギー情勢の変化に対応して、安全性・経済性・機動性の更なる向上への取組が始まっている。
- 人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉の追及、バックエンド問題の解決に向けた技術開発を進めていく。
- 軽水炉技術の向上を始めとして、国内外の原子力利用を取り巻く環境変化に対応し、その技術課題の解決のために積極的に取り組む必要がある。その際、安全性・信頼性・効率性の一層の向上に加えて、再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進するという観点が重要。
- 水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、安全性の高度化に貢献する技術開発を、海外市場の動向を見据えつつ国際協力の下で推進する。
- 原子力利用の安全性・信頼性・効率性を抜本的に高める新技術等の開発を進める。
- 人材育成や研究開発等に必要な試験研究炉の整備を含め、産学官の垣根を超えた人材・技術・産業基盤の強化を進める。
- 国は長期的な開発ビジョンを掲げ、民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保して進める。

世界ではゼロエミッション電源が求められている

2050年に向けた主要国の戦略

	CO2削減目標	ゼロエミッションへの 主な戦略・スタンス
米国	▲80%以上 (2005年比)	ゼロエミ比率引き上げ 〔再エネ+原子力〕
カナダ	▲80% (2005年比)	電化分の確保 〔水力・変動再エネ+原子力〕 ※既にゼロエミ電源比率は約80%
フランス	▲75% (1990年比)	電化分の確保 〔再エネ+原子力〕 ※既にゼロエミ電源比率は90%以上
英国	▲80%以上 (1990年比)	ゼロエミ比率引き上げ 〔変動再エネ+原子力〕
ドイツ	▲80~95% (1990年比)	引き上げ 〔変動再エネ〕

家庭内IoTデバイス本体の 電力消費量推移の見込み



出典: IEA 4 EDNA: 「Energy of Internet of Things」

更なる安全性向上の要求

- 東電福島原発事故を経て原子力のパブリックアクセプタンスは大幅に低下
- 地震・津波などの規制基準強化、受動的安全性追求等、世界的に広がる更なる安全性の追求。

核不拡散

- 安全や核不拡散及び核セキュリティ強化の要請
- 原子力需要が増加する新興国等への積極的な貢献

放射性廃棄物対策

- 高レベル放射性廃棄物に関する長期的なリスク低減のための、減容化・有害度低減

エネルギーの多目的利用

- 発電のみならず、水素製造や熱利用といった多様な原子力利用

機動性

- 再エネの主力化・導入拡大が進む環境への適応
- 場所を選ばない分散型の電源機能

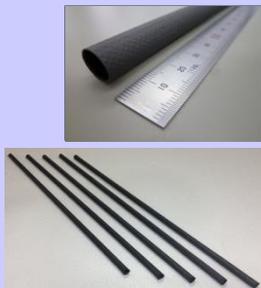
自由化市場での経済性の追求

- 自由化市場における成立性が大前提
- 新技術による初期投資コストの低減や短い建設工期の実現

世界では課題克服に向けたイノベーションの取組が始まっている

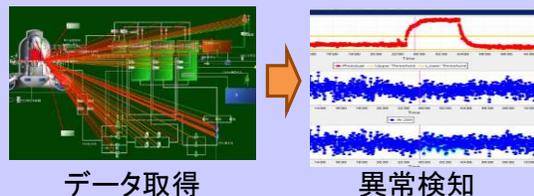
過酷条件においても損傷しにくい 新型燃料部材

- ✓ 過酷条件でも損傷しにくく、水素発生量の少ない新型燃料部材を開発。
- ✓ 過酷事故時に適切な事故対応のための猶予期間を確保可能。



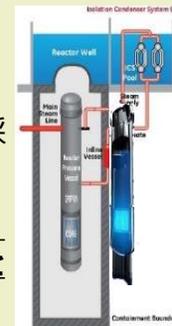
ビッグデータを活用した予兆監視システム

- ✓ プラントの膨大な監視データを自動収集し、ビッグデータ分析技術により全データを自動解析、モデル化。機器の健全性確認に活用。



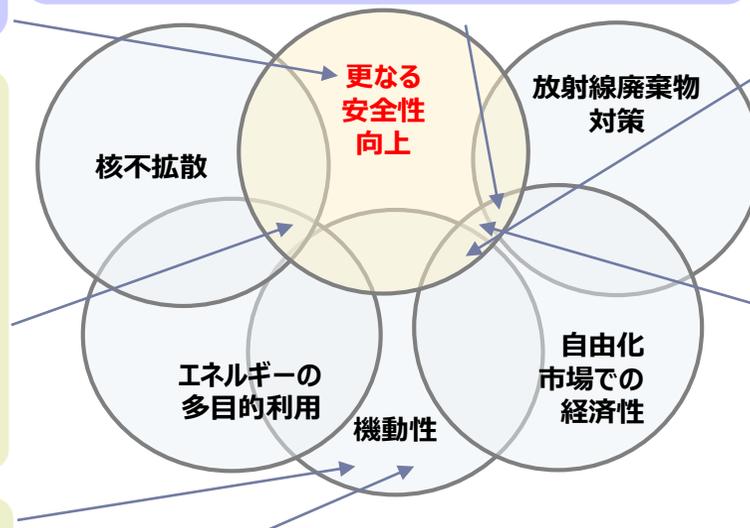
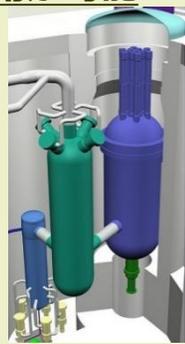
冷却材喪失事故リスクを低減し、 経済性を有する小型炉

- ✓ 30万kW程度 / BWRやPWR
- ✓ 自然循環による炉心冷却を採用し、炉心ポンプを削除。
- ✓ 徹底した設計簡素化により、ガス火力並みの価格競争力を目指す。



電力以外の水素や熱の利用が可能な 高温ガス炉

- ✓ 発電のみならず水素製造など多様な熱利用が可能。
- ✓ 冷却材喪失時も空気による自然冷却が可能。
- ✓ 燃料を四重に被覆するため、炉心溶融しにくい。



商用炉知見を活用し、安全性を追求した上で、 長期運転可能な大型炉



- ✓ 100万kW以上/BWRやPWR
- ✓ 格納容器・建屋の強化などにより更なる安全性向上を追求。
- ✓ 長期運転設計、設計の標準化などにより徹底して発電コストを低減。
- ✓ 万一事故が起きても放射性物質の環境放出を極力低減する技術を開発し、避難不要を目指す。

遠隔地における小型分散型 ベースロード電源

- ✓ 燃料交換なしで10年以上運転可能。宇宙や南極などの極地での電力・熱供給が可能。
- ✓ トレーラーで運搬可能。



海洋資源・エネルギー開発のための洋上電源



- ✓ 海洋資源開発や原子力船などの用途を想定した小型PWR（3万kW等）を開発。

原子力×次世代エネルギーによるイノベーション

- 高温ガス炉は、発電にとどまらず、多様な産業での利用が期待される水素の製造など生み出される熱の利用が可能。
- 中国においては、世界初となる実証炉の建設が進んでおり、来年にも運転予定。米国においては、先進原子炉を用いた電力水素併産のプロジェクトが計画されているなど、諸外国においても開発が進展。

高温ガス炉の優れた安全性

- ① 水を使わず化学的に安定なヘリウムで冷やすので、**爆発の危険性が低い**
- ② 事故時に冷却材を失っても、黒鉛構造材が熱を吸収・放熱するので、**温度が上がりすぎない**
- ③ 燃料を厳重（四重）に被覆するので、**極めて燃料溶融しにくい**

多様かつ効率的な熱利用

- 発電に加え、950℃の高温熱利用（水素製造等）や低温熱利用（地域暖房等）の幅広い**熱の産業利用**が可能

産業競争力

高い技術力
知財・ノウハウ蓄積

エネルギーセキュリティ

エネルギー調達多様化

環境

高効率エネルギー利用
低炭素化

H₂

水素還元製鉄



液体水素ロケット



水素発電

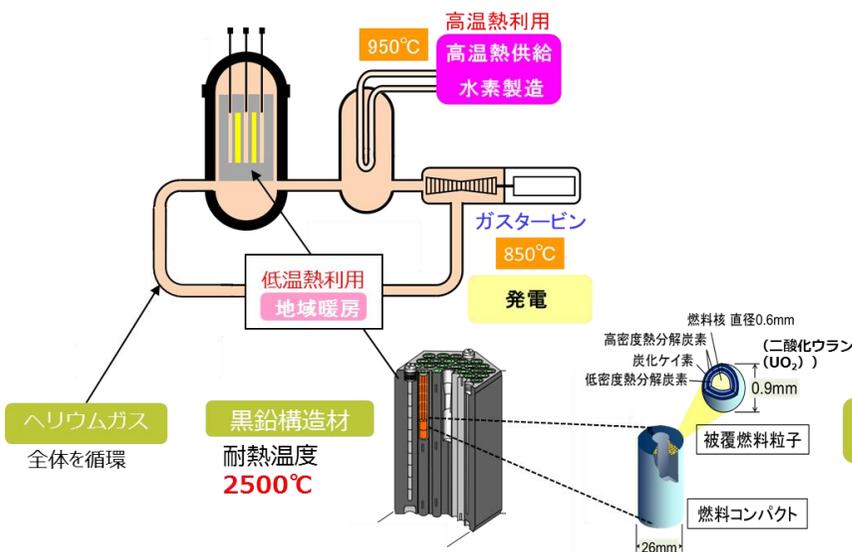
(CO₂フリー火力電源)



基礎化学品製造



高温ガス炉



セラミックス被覆燃料

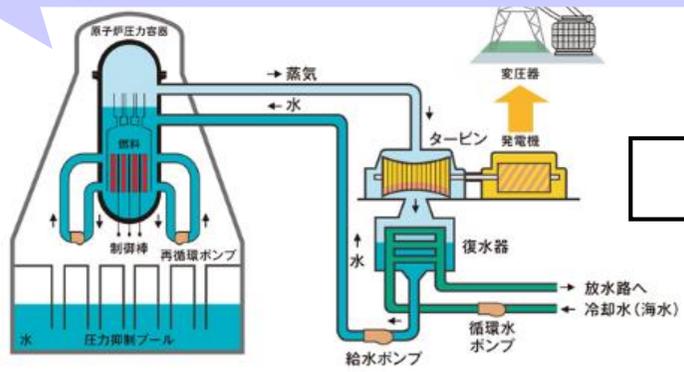
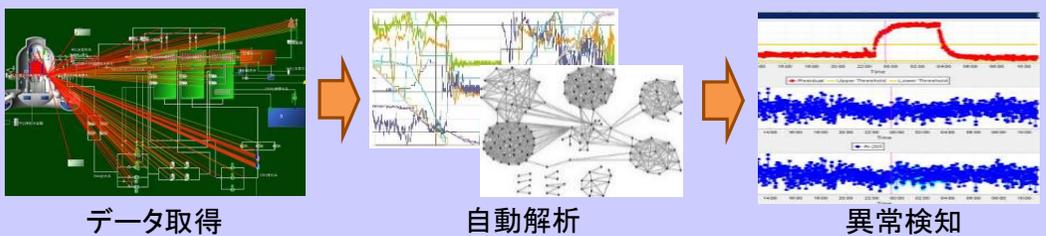
1600℃
でも放射性物質を閉じ込める

原子力×デジタルイノベーションによるイノベーション

- 原子力分野では、ビッグデータ・AI技術により、プラントの膨大な監視データを分析することで、故障の予兆監視、定期検査などでの機器の健全性確認に活用する技術開発が進む。
- 他産業分野においても、今後の人材不足や新規参入事業者の増加などにより、プラント・インフラ保安システムの高度化が共通的な課題。

ビッグデータ分析技術を活用したプラント自動監視システム

- ✓ プラントの膨大な監視データを自動収集し、ビッグデータ分析技術により全データを自動解析、モデル化。
- ✓ 実データの蓄積により、リアルタイムでのプラント監視、定期検査などでの機器の健全性確認に活用。



出典:日本原子力文化財団HP

電力プラント

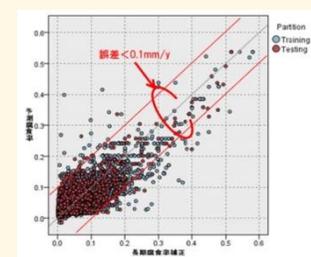
水素製造プラント

石油化学プラント



他産業との連携によるシステム高度化

- ✓ ビッグデータ・AI技術を活用した運転監視システム
- ✓ IoT・ICT技術によるデータ蓄積、保守点検の高度化・効率化



ドローン活用のイメージ

配管腐食データの共有

世界における原子カインノベーション創出に向けた動向

英国 

2018年6月、原子力産業戦略の方向性を示す「**セクターディール**」を公表。

- ✓ コスト削減に資する軽水炉SMRの市場投入を支援。ロールスロイス社の開発が進展。
- ✓ **AMRプログラム**により第4世代炉SMR開発を支援。ARC (Na高速炉)、U-Battery (高温ガス炉) など**8炉型のFSを開始**。

カナダ 

2017年4月、SMRを2026年までに実証する「**10年プラン**」を発表。

- ✓ カナダ原子力研究所は**SMR建設サイトを提供**。
- ✓ 規制機関の**許認可前設計審査**により、様々な革新炉の評価を実施。Terrestrial Energy社、Moltex Energy社 (溶融塩炉)、Holtec社 (軽水炉SMR) など**10社がレビュー中**。
- ✓ 2018年11月、天然資源省・州政府・電力事業者が協力して、SMR開発方針を示したロードマップを作成。

ロシア 

- ✓ 大型炉のみならず浮揚式原発やNa高速炉を開発
- ✓ 例：OKBM (浮揚式、Na高速炉)



仏国 

- ✓ 大型炉開発を進めつつ、高速炉や小型炉の開発も追及
- ✓ 例：Framatom (Na高速炉) EDF (PWR)

中国 

- ✓ 大型炉のみならず船舶式原発や米国と協力してNa高速炉も開発
- ✓ 例：CNNC (船舶式、進行波炉)



?

米国 

2015年11月、革新的な原子力技術の市場投入を加速する「**GAINプログラム**」を立上げ、財政的、技術的、規制上の支援を開始。

- ✓ 革新炉の要素技術開発、FOAK炉の実証準備、許認可申請作業などに対し、**開発段階に応じた財政支援**。NuScale、GE日立 (軽水炉SMR) などの開発が進展。
- ✓ バウチャープログラムにより、民間企業に**国研設備の利用権を提供**。
- ✓ 規制機関はDOEやベンダーと協力しながら革新炉の合理的な規制を検討。

原子力のイノベーションに向けて何が必要か（米国の例）

- 様々な産業において、アイデアメイキングから市場投入までの間には、様々な課題が存在。こういったメカニズムにより、課題を乗り越え、イノベーションが起きるのか。
- 原子力分野は、資金確保・研究施設・規制対応のハードルが高く、よりイノベーションが起きにくい状況だが、米国では、政府支援（財政支援、研究開発基盤の提供、規制との対話の促進等）、民間投資により、イノベーションが進展。革新的安全性を持つNuScale等の開発が進展。NuScaleは2026年後半の商業運転開始を見込む。



- ✓ 小型モジュール炉の設計及び商用化を目的とし、2007年に創設。
- ✓ 2008年以降、米国エネルギー省（DOE）やベンチャーキャピタルから総額約791億円以上の投資を獲得。
- ✓ 2016年、DOEがアイダホ国立研究所のサイト使用許可を発行。同研究所内で2026年後半に商業運転開始予定。
- ✓ 2017年、NSCは設計認証審査開始。審査には一定の合理化を実施。



出典: NuScale power

NuScaleの安全設計

- ✓ 自然循環による受動的な崩壊熱除去により、電源や注水設備なしで冷却可能。
- ✓ 蒸気発生器等を一体化した設計により、大破断LOCAを排除。
- ✓ 地下プール内に原子炉を設置、自動的に冷却が行われる設計。
- ✓ これらにより、放射性物質の放りリスクが低くなり、EPZ(緊急時計画区域)が敷地内に収まることで、避難不要になる可能性。

NuScaleは如何に死の谷を乗り越えたのか（米国の例）

2008年 CEMA Capital (VC) が約2億9千万円を出資。

2011年 Fluor Corporationがエンジニアリング、建設サービスのパートナーとなり約34億円を投資。
現在までに総額約534億円以上を投資。

2013年 米国エネルギー省から約255億円の資金を調達。

2017年 NRCが設計認証審査を開始。
NuScaleのイノベーションに対して規制を合理化。

初号機をINL内に設置し、
2026年後半に商業運転開始。

市場投入

UAMPSのメンバー
が電力を購入。

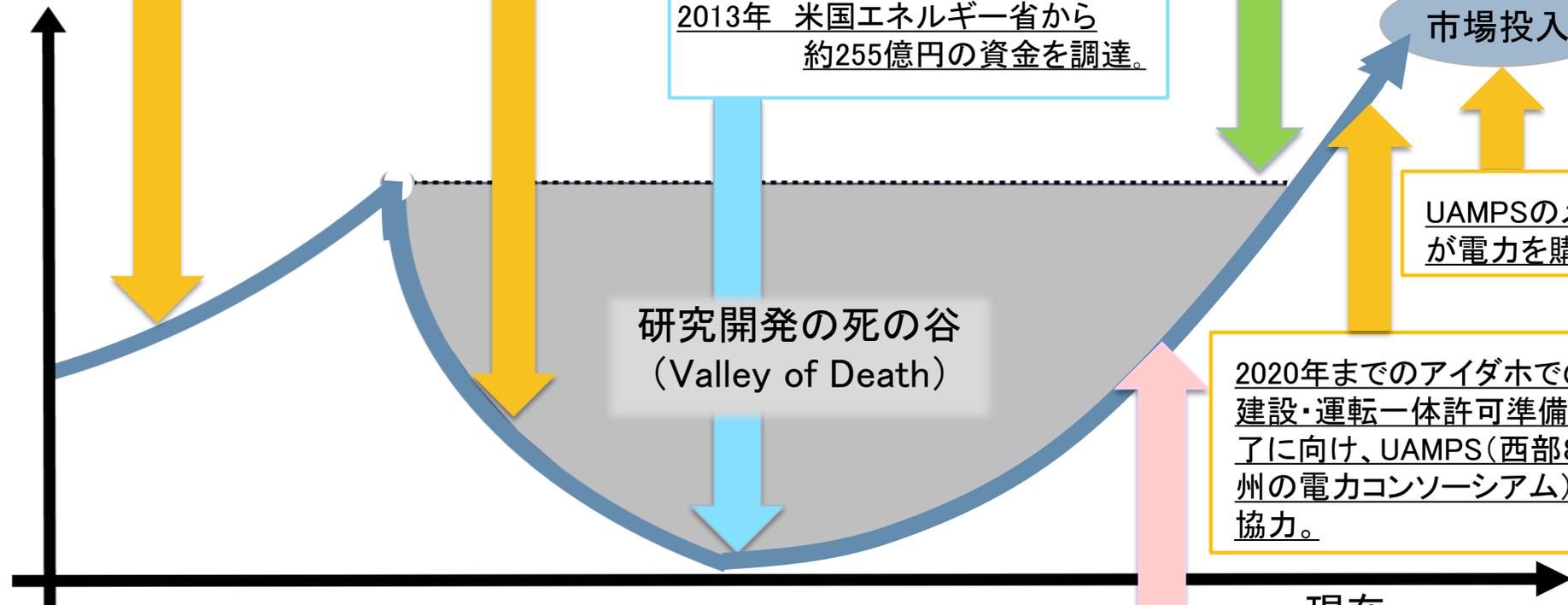
研究開発の死の谷
(Valley of Death)

2020年までのアイダホでの
建設・運転一体許可準備完了
に向け、UAMPS(西部8
州の電力コンソーシアム)が
協力。

2016年 米国エネルギー省はアイダホ国立研究所における建設に向けたサイト使用許可を発行。同年サイト候補地を選定。

現在

2007



原子力のイノベーションに向けて何が必要か（米国の例）

政策ビジョン

- **政府**は原子力研究開発のビジョンを提示。
- 開発の方向性や目的は提示しつつ、技術は民間の選択に委ねる。

市場の選択

- ユーザー、金融機関からの早期の参画

民間の創意工夫を活かした
原子力イノベーションの創出

規制との対話

- 早期に規制に適応可能なアプローチを検討。

資金支援

- 技術の成熟度や開発主体に応じて、研究開発や許認可費用を支援。

研究基盤の提供

- 多様な技術開発に人材・設備・知見を提供。

若手人材の育成

- イノベーションの創出を支える産学官の横断的な人材の育成。

開発ステージに応じた資金支援のあり方とは（米国の例）

- 米国政府では、開発ステージに応じた柔軟な補助率を設定し、幅広いコンセプトから多様な技術間競争を実現。
- 有望技術の選定や市場投入の具体化は、ユーザー（電力事業者等）が積極的に関与。

市場投入

- ・ サイト割当て、ファイナンス支援

商用化目前

- ・ 大規模の50%補助 × 1,2件

基盤研究・開発初期

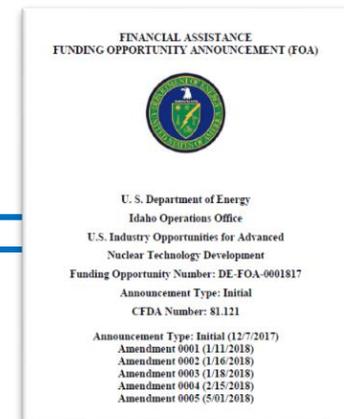
- ・ 小・中規模の50~80%補助 × 数件

基礎研究

- ・ 大学等が中心となり各分野で実施

FOAK炉実証準備プロジェクト

- ✓ 2020年代後半の実用化を目指した先進炉の開発を支援。
- ✓ 2018年11月にはNuScale、ホルテック社SMR-160の事業を採択。



先進炉開発プロジェクト

- ✓ 様々なSMRの設計や、既存炉の運転、建設に関する革新的な技術開発を支援。
- ✓ これまでに13件の事業を採択（補助率50~80%）。

ARPA-E MEITNERプログラム

- ✓ エネルギー技術においてハイリスク・ハイリターン革新的研究開発を進めるARPA-Eの手法を活用し、安全性向上と建造・運転管理コスト低減を両立する革新炉設計を支援。2018年6月には10件の事業を採択。

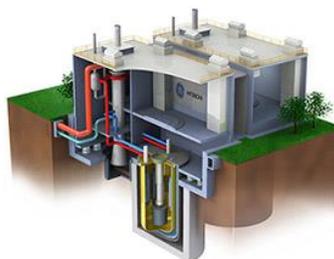


民間主役のイノベーション創出のために国研は何をすべきか（米国の例）

- 米国のアイダホ国立研究所では、研究所施設・プロジェクトを民間に開放し、民間の創意工夫を生かした研究開発を実施。

試験炉の民間共同開発

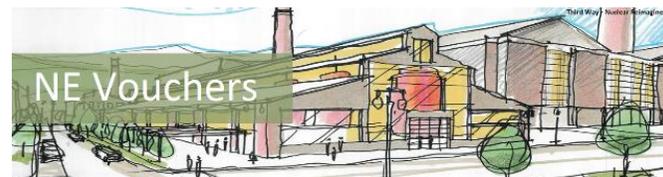
- ✓ 多目的試験炉(VTR)プログラムの支援企業として、モジュール式ナトリウム冷却高速炉「PRISM」を開発するGE日立ニュークリア・エナジー社を選定。



出展: <http://gehitachiprism.com>

GAINバウチャープログラム

- ✓ DOEが国研設備の利用権を中小企業などに提供。関連する研究開発費用についてもDOEが補助。



<https://gain.inl.gov>



民間との共同研究・知財活用

- ✓ 民間企業は、国研とCRADA※（共同研究契約）を結び、研究で得た知的財産の独占的ライセンスを授与可能。

※ Cooperative Research and Development Agreement

実証炉建設サイトの提供

- ✓ NuScale実証炉を建設するためのサイトを提供予定。さらにUAMPS（西部8州の電力コンソーシアム）が建設・運転一体許可申請を支援。



出展: <http://www.nuscalepower.com>

民間主役のイノベーションのため、規制との関わりはどうあるべきか（米国の例）

- 米国原子力規制委員会(NRC)では、ステークホルダーとのコミュニケーションを促進する等の取組を進めている。

米国NRC「非軽水炉の規制に関するビジョンと戦略」（2016年12月）

- ✓ The agency needs to be effective and efficient as it conducts its safety, security, and environmental protection mission, without imposing unnecessary regulatory burden.
（NRCは、**過度な規制負担を課すことなく**、安全、セキュリティ、環境保護のミッションを実行する上で、**効果的かつ効率的である必要がある**）
- ✓ The strategy has three strategic objectives: enhancing technical readiness; optimizing regulatory readiness; and optimizing communication.
（戦略は **①技術整備、②規制の最適化、③コミュニケーションの最適化**、の3つの戦略目標設定。）
- ✓ NRCは、この目標を達成するために、短期（0-5年）、中期（5-10年）、長期（10年以上）の戦略を策定。

	短期（0-5年）	中期（5-10年）	長期（10年以上）
技術整備	審査のための十分な知識、技術、能力、解析コード、ツールの獲得 非軽水炉サイクルのために必要な規格及び基準の促進 規制に影響を与える技術包括的な政策課題の認識及び解決	短期戦略の継続と非軽水炉の管理の継続	
規制の最適化	現行の規制の範囲内での柔軟な規制プロセスのための指針の策定	短期戦略の継続と非軽水炉に関する新たな規制体系の開発	非軽水炉の新たな規制体系の公開
コミュニケーションの最適化	非軽水炉技術に関心をもつステークホルダーとのコミュニケーションを行うための戦略の策定と実施		

NUCLEAR INNOVATION BOOTCAMP

- 異分野融合の先進的な人材育成策として、学生・若手社会人を対象とした「原子カイノベーション・ブートキャンプ」がカリフォルニア大学バークレー校を中心に行われている。
- **ベンチャーキャピタルや弁護士等、実ビジネスを強く意識した集中的な講義と原子力分野課題への革新的な解決策に関するコンテスト**を行うことで、原子カイノベーション創出に必要となる能力の向上を目指す。

（出典）NUCLEAR INNOVATION BOOTCAMP HP <http://nuclearbootcamp.berkeley.edu/>



Modeling, Experimentation and Validation summer school

- 3つの国立研究所（アルゴンヌ、アイダホ、オークリッジ国立研究所）が、持ち回りで、**世界中の若手の原子力技術者と科学者を対象**とした「モデリング・実験・検証サマースクール」を開催。
- **業界の最新の進歩に関する議論の機会を提供**するとともに、**21世紀の原子力を推進する次世代の技術者・科学者のネットワーク構築**を目指す。

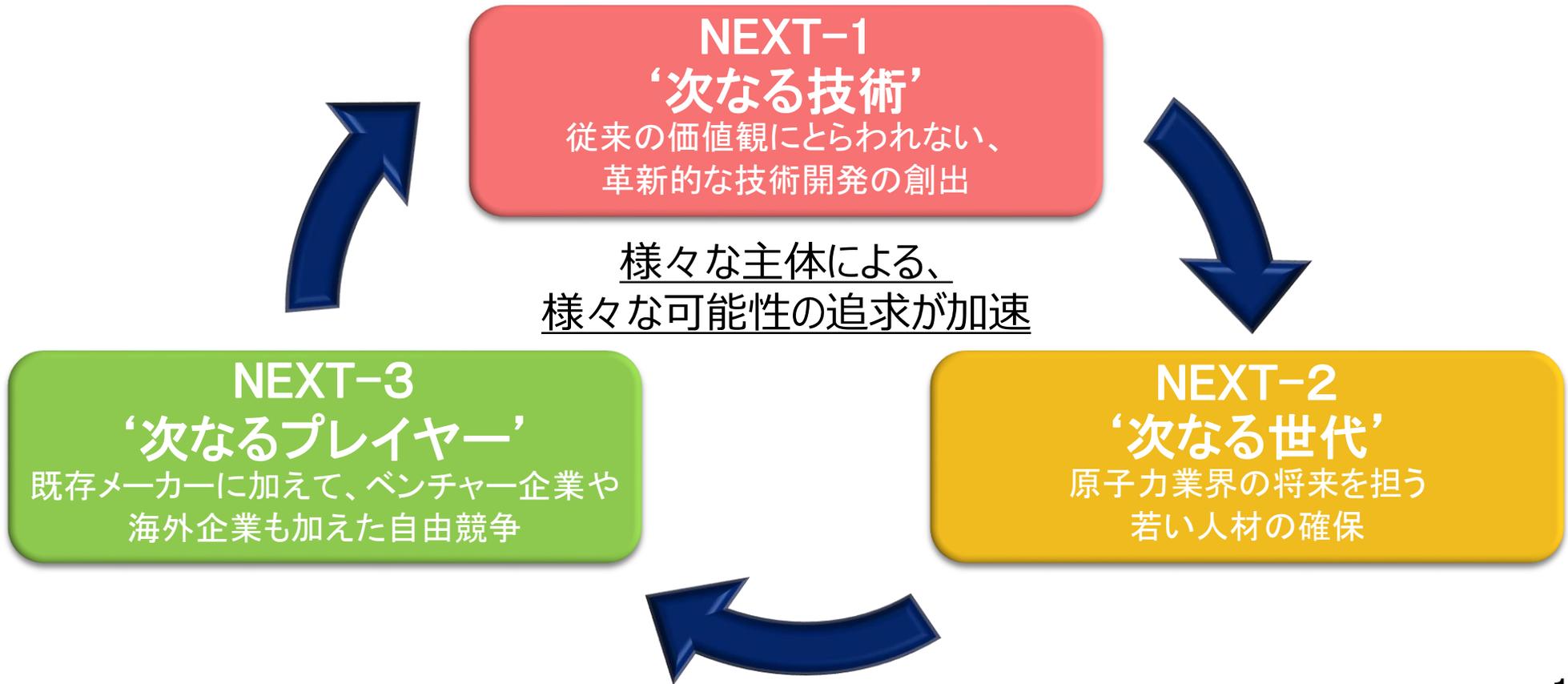
（出典）MeV HP <https://mevschool.org/>, CAES HP <https://caesenergy.org/argonne-hosts-modeling-experimentation-and-validation-summer-school/>



原子力の将来に向けて求められているものは何か

NEXIP : Nuclear Energy × Innovation Promotion

将来の原子力の安全な利用の実現発展に向け、①次なる技術の創出、②次なる世代の確保、③次なるプレイヤーの発掘による、イノベーションを促進する取組を検討すべきではないか。



1. 原子力技術において、更なる安全性の向上をはじめ、どのようなイノベーションが求められているのか？
2. 原子力技術を担う人材にチャレンジしてもらうには？
3. シーズとニーズをつなぎ、革新的なアイデアを実現するために必要なサポートは？
4. イノベーションを起こす「プレイヤー」として誰に期待すべきか？
5. これからの原子力エネルギーの「ユーザー」は誰か？
6. 政府（規制機関含む）・国立研究所は何をすべきなのか？